

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 UNE DOUBLE DEMARCHE DE MODELISATION SYSTEMIQUE-ANALYTIQUE

Pour expliquer l'approche retenue dans cet ouvrage, nous commencerons par présenter brièvement le fonctionnement d'une turbine à gaz<sup>1</sup>, l'un des moteurs dont le principe est le plus simple. Cette manière de faire nous permettra d'entrer dans le vif du sujet en introduisant un certain nombre de notions nécessaires pour l'étude des technologies énergétiques : les fluides mis en jeu, les transformations qu'ils subissent et les composants correspondants, enfin les assemblages de ces composants. Elle montrera la pertinence d'une double démarche méthodologique.

### 1.1.1 PHENOMENES PHYSIQUES PRENANT PLACE DANS UNE TURBINE A GAZ

La turbine à gaz, aussi appelée turbine à combustion, est une machine thermique qui connaît actuellement une grande vogue, compte tenu de ses excellentes performances (rendement supérieur à 35 % utilisée seule, et à 55 % en cycle combiné).

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue (figure 1.1.1), cette machine est composée de trois éléments :

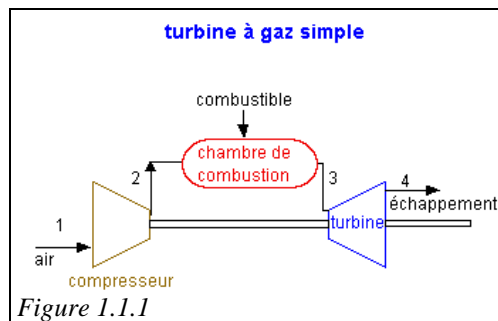


Figure 1.1.1

- un compresseur, généralement centrifuge ou axial, qui sert à comprimer l'air ambiant à une pression comprise dans les machines modernes entre 10 et 30 bar environ ;
- une chambre de combustion, dans laquelle un combustible injecté sous pression est brûlé avec l'air préalablement comprimé (ce dernier en fort excès afin de limiter la température des gaz brûlés en entrée de la turbine) ;
- une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz à haute température sortant de la chambre de combustion. Une partie significative (60 à 70 %) du travail récupéré sur l'arbre de la turbine sert à entraîner le compresseur.

Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un moteur à combustion interne à flux continu. On notera que le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide thermodynamique, qui reste toujours gazeux, et non du combustible utilisé, qui peut être aussi bien gazeux que liquide (les turbines à gaz utilisent généralement du gaz naturel ou des distillats légers).

---

<sup>1</sup> Nous nous contenterons ici d'une présentation succincte de cette technologie, le chapitre 2 du tome 2 lui étant dédié

Cet exemple très simple n'est pas représentatif, loin s'en faut, du fonctionnement de tous les moteurs thermiques. Il permet toutefois de se faire une première idée de la complexité des phénomènes qui y prennent place, et donc des connaissances nécessaires pour les calculer :

- des couplages existent entre les différents organes constitutifs de la machine. Ils proviennent d'une part des fluides qui les traversent, et d'autre part de la liaison mécanique entre les arbres du compresseur et de la turbine ;
- les fluides thermodynamiques sont ici des mélanges gazeux : dans un premier temps de l'air et du combustible, puis des gaz de combustion. Ils peuvent être dans chaque cas considérés comme des **gaz idéaux**, dont les propriétés thermodynamiques énergétiques dépendent seulement de la température ;
- dans d'autres installations motrices, comme les centrales à vapeur, le fluide thermodynamique passe alternativement de l'état de liquide à celui de vapeur. Les modèles de gaz idéaux ne sont alors plus suffisants, et doivent être remplacés par des modèles de **fluides réels** beaucoup plus complexes, les propriétés énergétiques faisant intervenir à la fois la pression et la température ;
- les phases de **compression** et de **détente** ont une importance décisive dans le fonctionnement du moteur, car c'est alors que prennent place les conversions d'énergie entre le fluide et l'arbre moteur ;
- la réaction de **combustion** correspond à des phénomènes extrêmement complexes, actuellement encore imparfaitement connus, mais qui peuvent toutefois être approchés par différentes méthodes, qui permettent de calculer les énergies mises en jeu et de se faire une idée de l'origine des émissions de polluants ;
- enfin, les fluides de travail parcourent les différents organes du moteur, et la compréhension des conditions de leur écoulement fait appel à des notions évoluées de **mécanique des fluides** (qui ne seront pas abordées dans ce livre).

### 1.1.2 LES TECHNOLOGIES ENERGETIQUES : DES ASSEMBLAGES DE COMPOSANTS

A l'instar de la turbine à gaz, les technologies énergétiques se présentent comme des assemblages de composants traversés par des fluides thermodynamiques qui y subissent des transformations de complexité variable. Dans certains cas, comme par exemple dans un moteur alternatif diesel ou à essence, le même organe (ensemble cylindre et piston) est amené à jouer successivement le rôle de compresseur, de chambre de combustion puis d'organe de détente.

En résumé, l'étude d'une technologie énergétique comme la turbine à gaz se heurte à une double difficulté :

- les fluides qui traversent ses différents composants suivent des lois de comportement relativement complexes et y subissent des transformations élémentaires dont l'analyse peut se révéler délicate (lois non linéaires, combustions, etc) ;
- ses composants sont couplés entre eux, de telle sorte qu'ils ne peuvent être calculés indépendamment les uns des autres.

On notera toutefois que dans l'exemple présenté les connexions entre les composants sont très simples : la sortie du compresseur correspond à l'entrée de la chambre de combustion, et la sortie de cette dernière à l'entrée de la turbine. Cette simplicité du réseau des interconnexions est générale et suggère d'adopter une double démarche dans l'étude des technologies énergétiques, en séparant d'une part la description du réseau des interconnexions entre les composants, et d'autre part l'analyse du comportement interne de ceux-ci. Cette manière de procéder présente de nombreux avantages comme on le verra dans la suite de cet ouvrage.

L'approche proposée dans les trois tomes de ce livre repose ainsi sur la constatation que **la thermodynamique est beaucoup plus simple sur le plan qualitatif que sur le plan quantitatif**.

Les technologies énergétiques se présentant comme des assemblages de composants traversés par des fluides thermodynamiques qui y subissent des transformations diverses, on simplifie grandement les choses si on adopte une double démarche, en commençant par dissocier la représentation globale du système, généralement assez simple, de l'étude de ses différents composants considérés individuellement.

La représentation d'ensemble se révèle très utile sur le plan qualitatif : elle est visuelle et permet de bien comprendre le rôle joué par chaque composant dans le système complet. Sur le plan didactique, elle est essentielle pour bien assimiler les principes de conception de ces technologies. Une fois que l'on a bien à l'esprit la structure interne d'un moteur ou d'un appareil frigorifique, l'étude du comportement de l'un de ses composants est facilitée parce que l'on comprend comment il s'insère dans le tout et quelle est sa contribution au fonctionnement global.

Si l'on dispose d'un environnement graphique approprié comme celui qui sera présenté un peu plus loin, la structure interne du système peut être décrite très facilement. On obtient ainsi une représentation qualitative, très parlante pour l'ingénieur, qu'il ne reste plus ensuite qu'à quantifier en paramétrant les propriétés thermodynamiques des différents composants puis en les calculant. Cette représentation qualitative présente de surcroît la particularité d'être dans une très large mesure indépendante des hypothèses que l'on retient pour le calcul des divers composants : il s'agit d'un invariant du système. C'est ainsi qu'une même architecture de système peut mettre en œuvre divers modèles de composants.

Cette double démarche de modélisation met en jeu deux approches souvent présentées comme antinomiques mais qui dans le cas présent se complètent et s'enrichissent mutuellement :

- l'approche analytique qui permet de représenter chaque composant par un certain nombre de paramètres caractéristiques, des variables de couplage et un jeu d'équations approprié ;
- l'approche systémique pour ce qui concerne la définition de l'architecture interne du système (choix des composants, description de leurs liens) ;

Non seulement une telle manière de faire simplifie notablement la démarche de modélisation et facilite ultérieurement l'utilisation et la maintenance du modèle, mais surtout elle sécurise sa construction en automatisant l'établissement des couplages entre les différents éléments qui le composent et en garantissant leur cohérence. Ce point est d'autant plus important que le système étudié comprend un nombre de composants élevé.

Cette manière de faire est de plus la seule qui permette de focaliser les efforts sur l'étude de cycles innovants, qui constitue aujourd'hui un champ de recherche à la fois passionnant et essentiel pour l'avenir.

Les nombreuses idées novatrices très intéressantes qui ont été proposées récemment, par exemple pour mettre au point des cycles sans émission de CO<sub>2</sub>, sont là pour témoigner de la fécondité de ce domaine d'investigation, auquel il est fondamental de sensibiliser nos étudiants.

### 1.1.3 GENERALITES SUR LES MODELES NUMERIQUES

Il nous semble d'autant plus important de procéder de cette manière que, du fait du développement des technologies de l'information, la manière dont l'ingénieur mobilise ses connaissances scientifiques a beaucoup évolué au cours des dernières années. Le temps où il repartait des équations fondamentales et où il les résolvait lui-même est maintenant assez largement révolu.

De plus en plus, il a recours à des modèles qui encapsulent les équations dont il a besoin, et il les met en œuvre dans des environnements de modélisation destinés à faciliter leur assemblage. La modélisation jouant ainsi un rôle croissant dans son activité, il importe qu'il soit capable de choisir avec discernement les modèles qu'il utilise et qu'il sache pour cela bien en évaluer les limites. Le développement d'une solide culture en matière de modélisation devrait donc de plus en plus s'imposer comme une nécessité incontournable dans la formation des ingénieurs<sup>2</sup>.

Au delà de la résolution immédiate d'un problème donné, la modélisation, si elle se veut efficace, doit être économique, sûre et réutilisable. Sur la base des travaux menés dans ce domaine depuis quelques décennies, il apparaît que ceci implique qu'elle soit modulaire (on remarquera que l'étymologie des deux mots est la même), et que l'assemblage de modèles complexes soit facilité par des outils appropriés : les environnements de modélisation.

Un environnement de modélisation des technologies énergétiques doit si possible permettre de combiner une démarche systémique pour la modélisation globale, et une démarche analytique ou empirique classique pour l'élaboration des modèles de composants. Ces deux démarches se révèlent en effet très complémentaires pour modéliser certains systèmes techniques. Il faut pour cela :

- d'une part identifier l'ensemble des concepts élémentaires qui sont nécessaires pour résoudre une classe de problèmes donnée. Ceci pose la question de la genericité : comment, à partir d'un petit nombre de **types primitifs** élémentaires, pouvoir générer un grand nombre de cas, quelles sont les fonctionnalités de base qui doivent être disponibles, etc. La réponse à cette question relève essentiellement de la modélisation systémique ;
- d'autre part, les types primitifs étant identifiés, établir les modèles correspondants. L'approche est ici essentiellement analytique ou empirique, les connexions et interrelations entre les modules étant assurées par des variables de couplage bien choisies.

---

<sup>2</sup> Pour davantage de précisions, le lecteur pourra se référer à la note "Modèles numériques et Environnements de Modélisation : des outils pour mobiliser efficacement les connaissances scientifiques" disponible à l'adresse : <http://www.thermoptim.org/sections/base-methodologique/modelisation-systemes/modeles-numeriques>

Un bon environnement de modélisation est ainsi constitué d'une part d'un ensemble de types primitifs, formant une base suffisante pour permettre la génération du plus grand nombre de projets possibles, et d'autre part d'une interface permettant d'associer facilement entre eux ces types primitifs pour représenter les objets étudiés, et présentant des fonctionnalités complémentaires, notamment en matière d'archivage.

Les modèles numériques sont sans doute les outils de base les plus puissants pour étudier les systèmes complexes. La modélisation est une nécessité ; elle ne supplante pas l'expérimentation ; elle la complète en abaissant le coût des études et en permettant de comprendre des fonctionnements par ailleurs inaccessibles à l'observation directe. Un modèle numérique est une représentation mathématique simplifiée (ou représentation abstraite approximative) du système étudié, qui permet d'en analyser le comportement. Il s'agit d'un outil opératoire que développe l'ingénieur ou le physicien pour résoudre les différents problèmes qui lui sont posés.

Il importe de noter qu'un modèle est faux par définition. De ce fait, il peut posséder des comportements qui lui sont propres, distincts de ceux du système étudié. D'autre part, il peut faillir à représenter certains comportements du système. Ce qui est important, c'est que ces approximations n'aient pas d'influence sur les interprétations que l'on fait.

On peut définir une modélisation **phénoménologique**, ou encore analytique, basée sur une décomposition du problème et l'application de lois de la physique, et une modélisation **empirique**, basée sur des corrélations ou lois établies à partir de données expérimentales (notamment lorsque la complexité ou le caractère aléatoire du problème étudié interdit une démarche phénoménologique). Dans les faits, les modèles utilisés seront fréquemment le fruit d'un compromis entre ces deux manières d'opérer.

Dans une approche analytique ou déductive, la plupart des paramètres introduits dans le modèle ont un sens physique. Parmi ces paramètres, certains ont été mesurés et sont connus avec précision ; d'autres sont connus dans des fourchettes de précision trop larges ou impossibles à mesurer. Enfin, plus le modèle prend des libertés par rapport à la phénoménologie, plus apparaissent des paramètres n'ayant aucun sens physique, quelquefois appelés paramètres de calage. A la limite, dans une approche purement empirique ou inductive, les paramètres n'ont souvent aucun sens physique direct.

Lorsque le degré de complexité du système est très élevé, le nombre des constituants, des interactions et des paramètres descriptifs ne rend pas toujours possible une approche déductive. Dans ce cas, il existe des techniques qui, à partir des données expérimentales (entrées-sorties), permettent de constituer des modèles mathématiques simplifiés cohérents, dits modèles de comportement.

Cette démarche de modélisation non phénoménologique ne permet ni d'améliorer ni d'optimiser le système étudié. Par contre elle permet de caractériser un système existant, de le simuler, ou encore de le commander. Les **méthodes** utilisées sont empruntées pour la plupart à l'**automatique** et aux sciences statistiques : (régressions, corrélations, identification,...).

Parmi celles-ci, l'**identification** ouvre des perspectives particulièrement attrayantes car une étude du type boîte-noire peut permettre, en analysant les seules entrées et sorties d'un système, d'obtenir de bons modèles de comportement, même en l'absence d'une mise en équation préalable sur la base des lois de la physique. Les

méthodes d'identification offrent donc un éclairage complémentaire de l'approche physique traditionnelle. Au sens le plus large, l'identification est la phase qui consiste à déterminer les valeurs numériques des paramètres utilisés dans le modèle, le critère de choix étant de minimiser l'erreur entre les grandeurs calculées et les grandeurs relevées expérimentalement.

## 1.2 MISE EN ŒUVRE PRATIQUE DE LA DOUBLE DEMARCHE SYSTEMIQUE-ANALYTIQUE

Notons en passant que nous serons amenés à utiliser le terme de modèle dans deux acceptions différentes, que le contexte permettra généralement de distinguer sans difficulté : les modèles de composants, sur lesquels nous reviendrons section 1.4.3, permettent de dimensionner ou d'analyser le comportement interne d'un composant, et les modèles de systèmes (cf. section 1.4.6), qui se présentent sous forme d'un assemblage des modèles précédents.

Le noyau de Thermoptim a été bâti pour permettre de représenter les composants les plus courants (compresseurs, turbines, chambres de combustion, organes de laminage, échangeurs de chaleur). Leurs modèles thermodynamiques étant à peu près universellement acceptés, il était possible de les programmer une fois pour toutes.

Le progiciel prend en compte une deuxième famille de composants, qui se présentent sur le plan informatique sous la forme de classes Java externes. Ces composants (par exemple des capteurs solaires, des batteries froides, des tours de refroidissement, des piles à combustible, des réacteurs chimiques...) sont quant à eux facilement personnalisables par les utilisateurs, qui disposent ainsi de la possibilité de définir eux-mêmes les modèles phénoménologiques et de comportement qu'ils souhaitent retenir.

Pour mettre en œuvre la double démarche systémique / analytique que nous préconisons, il faut opérer en deux étapes :

- commencer par se doter des modèles des composants du système ;
- les assembler pour créer le modèle du système global.

La première étape est essentielle et constitue un préalable pour que l'approche systémique puisse être mise en œuvre. Pour un utilisateur, le problème se pose différemment selon qu'un modèle suffisamment réaliste existe ou non dans le noyau de Thermoptim ou dans les classes externes disponibles :

- lorsque tous les composants requis sont déjà disponibles, la démarche de modélisation se limite essentiellement à la phase systémique : elle consiste à assembler des modèles de composants prédéfinis, et à les paramétrer ;
- lorsqu'il est nécessaire de mettre au point certains modèles de composants, l'environnement de développement des classes externes leur permet de créer ces modèles en les rendant compatibles avec le progiciel.

Une fois les modèles de composants disponibles, construire le modèle d'un système thermodynamique avec Thermoptim est très simple :

- on commence par en faire une description qualitative en le représentant graphiquement comme un ensemble de composants connectés par des liens vectoriels représentant les canalisations de fluides ou les échangeurs de chaleur ;

- on quantifie ensuite le modèle ainsi défini en paramétrant les différents types primitifs qu'il met en jeu, pour pouvoir en calculer les performances, faisant ainsi appel aux modèles prédéfinis.

L'**éditeur de schémas** permet de réaliser l'étape qualitative : l'utilisateur ne fournit dans un premier temps que le minimum d'informations nécessaire à la définition logique du projet qu'il construit (implicitement les types de composants qu'il sélectionne, et explicitement leur nom et celui du point de sortie et du corps qui leur sont associés, ainsi que la valeur du débit qui les traverse). Ensuite, lorsqu'il connecte entre eux ces composants, certaines de ces informations sont automatiquement propagées de l'amont vers l'aval (par exemple, le point d'entrée du composant aval devient le même que celui de sortie du composant amont). Ce petit nombre d'informations de base fournies au modèleur graphique correspond à la **description systémique** de la technologie étudiée.

Lorsque cette étape est terminée, il devient possible de transférer dans le **simulateur** les composants du schéma, pour créer les types primitifs requis, avec un paramétrage par défaut de leurs propriétés thermodynamiques. La quantification du modèle désiré peut alors être faite en affinant ce paramétrage, chaque élément du simulateur s'affichant très simplement en double-cliquant, soit sur le composant correspondant dans l'éditeur de schémas, soit sur la ligne d'une table de l'écran de projet principal du simulateur.

Une fois les éléments paramétrés et leur calcul effectué, les résultats obtenus peuvent être directement affichés dans l'éditeur de schémas qui devient ainsi un véritable synoptique de l'installation, ou bien tracés sous forme d'un cycle dans l'un des **diagrammes interactifs**.

L'objectif de cet ouvrage est de permettre à ses lecteurs de comprendre les principes de conception des systèmes énergétiques et d'avoir une vision d'ensemble des différentes technologies utilisables pour leur réalisation.

Nous essaierons de montrer comment peut être mise en œuvre une approche structurée de l'étude des technologies énergétiques basée sur ces principes en nous appuyant sur le progiciel Thermoptim, qui a été précisément conçu pour cela.

Ce livre aura atteint ses objectifs si la double démarche qu'il propose réussit à montrer aux lecteurs qu'il est aujourd'hui parfaitement possible de concilier facilité d'étude des systèmes énergétiques et précision des calculs, lorsqu'on dispose d'un environnement de modélisation approprié.

Nous pensons que ce n'est que s'ils en sont vraiment convaincus que de nombreux étudiants et ingénieurs se motiveront pour cette discipline et désireront s'y investir, alors que tant ont été jusqu'ici rebutés par la lourdeur du formalisme mathématique et des calculs requis.

### 1.3 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Lorsqu'on analyse les technologies énergétiques les plus répandues, on s'aperçoit que le nombre d'éléments dont elles sont composées est relativement limité, et que dans la plupart des cas chaque composant, pour une phase de fonctionnement donnée, peut être qualifié de mono-fonctionnel, car il échange de l'énergie selon un mode privilégié, soit sous forme purement thermique (transfert de chaleur), soit en convertissant de l'énergie mécanique en énergie thermique ou réciproquement.

En conséquence, les fonctions que sont amenés à remplir les différents composants peuvent être regroupées dans des catégories relativement peu nombreuses, calculables indépendamment les unes des autres, qui forment ce que l'on peut appeler la **base de types primitifs** qui constitue le noyau de Thermoptim. Elle est suffisante pour permettre de représenter un grand nombre de technologies énergétiques, notamment celles qui sont utilisées dans les cycles classiques. Comme nous l'avons déjà indiqué, et comme nous aurons l'occasion de le montrer à plusieurs reprises dans cet ouvrage, le mécanisme des classes externes permet de la compléter en ajoutant au progiciel d'autres composants, en particulier multi-fonctionnels.

Le cas des échangeurs de chaleur est un peu particulier, car il est clair que les calculs du refroidissement d'un fluide et de l'échauffement de l'autre doivent être effectués de manière couplée. Un traitement particulier leur sera donc réservé comme on le verra plus loin.

Ces composants reliés entre eux constituent des systèmes auxquels il est fécond d'appliquer les techniques de modélisation systémique, dont nous donnons un aperçu dans la section suivante.

### 1.3.1 MODÉLISATION SYSTÉMIQUE : LE SYSTÈME GÉNÉRAL

La démarche systémique constitue la meilleure base théorique disponible pour appréhender des dispositifs comprenant un ensemble de composants, chacun relativement complexe, reliés entre eux par un réseau de relations lui aussi complexe, organisés en fonction d'un but, et tels que l'évolution de chaque composant ne peut s'expliquer que par celle du tout, sans que l'on puisse mettre *a priori* en évidence des lois de comportement simples.

Présenter la démarche de modélisation systémique est d'autant moins facile qu'il s'agit d'une théorie en pleine évolution, qui manque encore d'un cadre théorique universellement reconnu. L'une des meilleures synthèses est sans doute la *Théorie du Système Général*, de J. L. Le Moigne, qui se veut une théorie de la modélisation systémique, à laquelle le lecteur intéressé pourra se référer.

Une des originalités de cette présentation est de construire un Système Général, artificiel, possédant toutes les caractéristiques systémiques fondamentales. Il s'agit en quelque sorte d'un modèle des modèles, qui fournit une grille d'analyse de tous les systèmes réels, et dont le principal intérêt est de constituer un guide opératoire pour la modélisation.

Sans entrer dans les détails, il est important de signaler que l'approche systémique met l'accent sur les fonctionnalités de chacun des éléments dont le système est composé, ce qui la distingue de l'approche cartésienne classique, qui privilégie la description analytique des lois phénoménologiques.

Pour décrire un composant, la démarche analytique classique a en effet recours à l'écriture de l'ensemble des relations qui expliquent son comportement interne (élaboration de modèles de connaissance). Une approche purement fonctionnelle ne nécessite pas nécessairement ce luxe de détails. Lorsqu'il est possible d'établir un modèle de comportement basé sur l'analyse des seules entrées/sorties du composant, sans aucune hypothèse sur son contenu physique ou abstrait, on parle de modèle "boîte noire" ou de modèle empirique. Ce concept s'est avéré très puissant, notamment en automatique, où bien souvent il n'est pas nécessaire de connaître le détail du fonctionnement interne d'un processus pour le commander.



Dans un certain nombre de cas, on connaît partiellement le contenu du composant, ou sa structure. Il devient alors possible d'établir des modèles plus précis ou d'un domaine de validité plus étendu en utilisant cette information pour guider le choix du modèle. On parle alors de boîte grise ou de modèle adapté ou semi-empirique. C'est précisément ce type de représentation que nous utiliserons pour modéliser les composants qui interviennent dans les technologies énergétiques.

L'intérêt de recourir à l'analyse système est que, dans une très large mesure, la structure d'un système est indépendante du niveau de finesse de la modélisation (le contenu des boîtes). Cette structure organisationnelle caractéristique du système considéré peut dès lors faire l'objet d'analyses particulières qui resteront valables si certains modèles de transformations viennent à changer. Cette propriété permet d'opérer de manière itérative, tout en conservant les acquis des phases précédentes, ce qui s'avère très performant et économique.

Deux des tâches principales du modélisateur systémicien sont dans ces conditions l'identification des éléments qui composent le système et l'établissement de leur réseau d'interrelations.

Pour mener à bien la première tâche, le modélisateur doit être capable de dissocier le système complet en choisissant judicieusement des points de séparation, les "articulations naturelles" du système, ainsi que les variables de couplage. Cet acte comporte un haut niveau de subjectivité et explique qu'un système donné puisse être modélisé de plusieurs manières différentes, y compris par un même modélisateur.

L'analyse est facilitée si l'on dispose d'un catalogue décrivant l'ensemble des *éléments fonctionnels* susceptibles d'apparaître dans les systèmes étudiés (pour les grands systèmes, il s'agit précisément du Système Général de J.L. Le Moigne). Il suffit alors de les identifier dans l'objet analysé, puis de les relier entre eux pour définir la structure du système.

Ces éléments peuvent être regroupés par classes de *types primitifs*. Lorsque plusieurs types primitifs forment un noyau nécessaire et suffisant pour représenter une grande variété de systèmes, nous dirons qu'ils constituent une *base*. A ce titre, ils jouent un rôle majeur dans la démarche de modélisation et leur choix doit être fait avec un très grand soin.

Il est important de souligner que, compte tenu de l'accent particulier que l'approche systémique met sur les fonctionnalités, ces types primitifs représentent les fonctionnalités de base du système, et non pas par exemple sa géométrie. Pour illustrer ce propos, reprenons le cas des moteurs alternatifs à combustion interne (essence ou diesel), où le même ensemble de pièces (le cylindre et le piston) joue successivement, dans un cycle moteur, le rôle de compresseur, de chambre de combustion puis d'organe de détente. La modélisation systémique d'un tel système amène à connecter entre eux les trois types primitifs représentant ces différentes fonctions.

C'est pour cette raison que nous sommes conduits à parler de types primitifs et d'éléments fonctionnels et non pas simplement de composants de base : un composant au sens technologique ou géométrique doit parfois être modélisé par plusieurs types primitifs.

### 1.3.2 ANALYSE-SYSTÈME DES TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, l'analyse-système d'une technologie énergétique peut être décomposée en quatre étapes fondamentales :

- l'analyse de la structure (ou de l'architecture) de la technologie considérée, qui met en évidence ses principaux éléments fonctionnels et leurs connexions. Cette tâche, qui peut s'avérer plus délicate qu'il ne paraît car certains composants assurent quelquefois des fonctions différentes selon les phases de marche, est facilitée si l'on dispose d'une base de types primitifs bien choisie. La structure du système ainsi mise en évidence constitue un invariant à peu près indépendant de la finesse retenue pour la modélisation des composants ;
- pour chaque élément, l'identification du ou des fluides thermodynamiques qui entrent en jeu : par exemple, le fluide comprimé dans une turbine à gaz est de l'air, qui brûle avec un combustible dans la chambre de combustion, pour former des gaz brûlés, eux-mêmes détendus dans la turbine. Dans ce cas il faut donc considérer trois fluides thermodynamiques : dans le compresseur, l'air, qui peut éventuellement être humide, dans la chambre de combustion, l'air, le combustible, et les gaz brûlés, et dans la turbine les gaz brûlés ;
- pour chaque élément, la détermination précise des transformations qu'y subissent les différents fluides identifiés, et le calcul de leurs évolutions. Le niveau de finesse de la modélisation dépend de la précision recherchée et des données dont on dispose. Dans cet ouvrage, nous nous contenterons sur le plan quantitatif d'une modélisation globale des performances des composants, utilisant des paramètres permettant de caractériser leur comportement d'ensemble (leurs caractéristiques), et nous limiterons à des considérations qualitatives les analyses du détail de ce qui se passe en interne ;
- l'établissement du bilan global du système considéré par assemblage des différents modèles des éléments fonctionnels, compte tenu des connexions internes. Lorsque les précédentes étapes ont été menées avec soin, cette dernière ne présente généralement pas de difficulté particulière. Tout au plus faut-il veiller à bien définir les types d'énergie qui entrent en jeu, pour être certain de les comptabiliser correctement, notamment lorsque l'on souhaite calculer une efficacité de cycle, ce qui est souvent le cas<sup>3</sup>.

Une fois ces étapes franchies, on dispose de tous les éléments pour pouvoir passer à la phase d'optimisation du système, réalisable d'une part en faisant des études de sensibilité autour des paramètres de dimensionnement clés, et d'autre part en ayant recours à des outils spécialisés.

### 1.3.3 MODÉLISATION DES COMPOSANTS

La première partie de cet ouvrage est essentiellement consacrée à l'établissement des modèles de composants, que nous regrouperons en trois types :

- les **modèles phénoménologiques** construits sur la base d'une analyse physique du fonctionnement du composant. Leurs paramètres ont alors un sens physique. Leur objectif est de permettre d'étudier les cycles thermodynamiques ;
- les **modèles empiriques** ou **de comportement**, souvent du type boîte noire, qui présentent l'intérêt de représenter globalement le comportement entrée/sortie du composant, et peuvent notamment être utilisés pour étudier son fonctionnement

---

<sup>3</sup> Ce point sera discuté au chapitre 7.

en régime non-nominal. Leurs paramètres n'ont généralement pas de sens physique ;

- les **modèles de dimensionnement technologique** donnent accès au dimensionnement interne détaillé des composants. Les plus précis de ces modèles sont des outils spécifiques prenant en compte les aspects aussi bien théoriques (mécanique, mécanique des fluides, thermique et thermodynamique), que technologiques (procédés de fabrication, traitements des surfaces, choix des matériaux) ou les contraintes économiques (coûts) ou environnementales. Il s'agit alors d'outils pluridisciplinaires très élaborés dont seuls peuvent se doter les industriels du domaine.

Un compromis doit être trouvé entre la précision recherchée et la complexité (et donc le coût) de la modélisation. Compte tenu de l'objectif de cet ouvrage, nous nous limiterons à une représentation des phénomènes en régime permanent, et nous ne chercherons en règle générale pas, au moins dans les deux premiers tomes, à modéliser finement le détail du fonctionnement de tel ou tel composant, qui peut se révéler extrêmement complexe. Ce n'est que dans le troisième tome que nous donnerons quelques indications sur la manière d'aborder le dimensionnement technologique et l'étude du régime non-nominal.

Comme nous le verrons, les modèles que nous utiliserons seront souvent mixtes, étant pour partie phénoménologiques, et pour partie empiriques.

A titre d'exemple, l'étude des échangeurs de chaleur (cf. section 5.2) montre qu'un modèle du type ( $\epsilon$ , NUT) est tout à fait suffisant pour étudier l'insertion d'un tel composant dans un système, mais il ne donne accès qu'au produit UA du coefficient d'échange thermique U et de la surface d'échange A : il s'agit donc d'un modèle phénoménologique incomplet. Si on lui adjoint une loi empirique donnant l'évolution de la valeur de UA en fonction des débits des deux fluides traversant l'échangeur, il peut être utilisé comme modèle de comportement pour analyser la réponse d'un échangeur particulier aux variations de ses conditions d'utilisation. Il peut aussi devenir modèle de dimensionnement technologique si on le complète par l'ensemble des fonctions permettant de déterminer la valeur de U, comme cela sera expliqué dans le tome 3.

Quelques définitions complémentaires relatives aux modèles méritent d'être faites. Les modèles qui nous intéressent mettent en jeu trois différents types de grandeurs :

- les **paramètres** caractérisent le composant : certains sont purement géométriques, comme une section de passage ou une surface d'échange, tandis que d'autres ont un sens thermodynamique, comme un rendement isentropique. Les propriétés thermodynamiques des fluides constituent une catégorie particulière de paramètres ;
- les **variables d'entrée** représentent les sollicitations auxquelles est soumis le composant, comme par exemple un débit, une température ou une pression. Ce sont des variables exogènes, déterminées en dehors du composant ;
- les **variables internes** permettent de déterminer l'état du composant. Ce seront souvent des **variables d'état** au sens thermodynamique du terme ;
- les **variables de sortie** sont les résultats du modèle, comme des températures, des compositions...

Pour étudier l'insertion d'un composant dans un système, il n'est généralement pas nécessaire de connaître le détail de son fonctionnement interne. Le plus souvent, et c'est le cas pour la plupart des technologies qui nous intéressent, un modèle phénoménologique peut représenter un composant par la donnée d'un petit nombre de caractéristiques et de ses variables de couplage (entrées et sorties). Ces caractéristiques dépendent du type de composant et de la technologie retenue.

Par exemple, un compresseur volumétrique sera caractérisé par un rapport de compression volumétrique, un rendement volumétrique et un rendement isentropique ou polytropique, un échangeur par une efficacité et un nombre d'unités de transfert... Les variables de couplage sont quant à elles les pressions, les températures, les débits...

Nous privilégierons une compréhension des performances globales des composants, suffisante pour notre propos, en nous attachant à mettre en évidence les expressions des grandeurs caractéristiques représentatives de leur fonctionnement. En limitant notre exposé aux modèles les plus simples possibles tout en restant thermodynamiquement pertinents, nous manquerons d'exhaustivité. Les lecteurs intéressés par de plus amples développements pourront trouver des compléments dans la littérature spécialisée.

#### 1.3.4 LES TYPES PRIMITIFS DE THERMOPTIM

Pour déterminer les performances des technologies énergétiques, nous avons vu qu'il suffit de se doter d'un outil permettant de décrire, d'assembler et de calculer les différents éléments qui le composent sous une forme aussi pratique que possible. De nombreuses solutions sont bien sûr possibles à ce niveau. Pour notre part, nous illustrerons cette démarche en utilisant le progiciel Thermoptim, qui a précisément été conçu à cette fin.

La liste des éléments fonctionnels qui sont susceptibles d'apparaître dans les principales technologies de conversion de l'énergie correspond aux concepts qui sont mis en œuvre dans Thermoptim et qui sont détaillés ci-dessous. D'une certaine manière, ce progiciel constitue ainsi un Système Général au sens de Le Moigne pour la modélisation systémique des technologies énergétiques : établir le modèle d'une technologie énergétique donnée consiste à en construire une représentation aussi fidèle que possible en assemblant entre eux différents objets choisis parmi ceux que le progiciel propose. Nous donnerons dans cet ouvrage divers exemples qui illustreront cette démarche.

La liste suivante constitue une base de types primitifs suffisante pour l'étude de la plupart des technologies énergétiques :

- il faut tout d'abord pouvoir représenter les propriétés intensives des fluides utilisés, et en calculer l'état pour diverses valeurs de la pression, de la température... Les notions de *corps* et de *points* permettent de le faire ;
- ces fluides subissent des évolutions (*transformations* ou *transfos*) qui peuvent être regroupées en quelques grandes catégories, dont les plus courantes sont les suivantes : des compressions, des détente, des laminages ou flash, des combustions et des échanges de chaleur. C'est à ce niveau que sont spécifiés les débits-masses mis en jeu, et que donc les propriétés extensives peuvent être calculées ;
- les fluides mis en jeu parcourent les composants en formant des réseaux plus ou moins complexes qu'il faut pouvoir décrire. Les transformations mises en

évidence précédemment correspondent à une partie de ces circuits. Pour les compléter, il faut faire appel à des *nœuds* (des diviseurs, des mélangeurs ou des séparateurs) :

- lorsque deux fluides échangent mutuellement de la chaleur, ils forment des *échangeurs de chaleur*, composants couplés dont les deux transformations ne peuvent être calculées séparément.

#### **1.3.4.1 Propriétés thermodynamiques des corps**

La représentation des propriétés thermodynamiques des corps est bien évidemment une nécessité. Elle suppose d'une part de se donner des modèles de fluides adéquats, et d'autre part de disposer de données pour représenter les fluides utilisés.

Tout corps se présente sous l'une au moins des trois phases solide, liquide ou gazeuse. Lorsque la pression est suffisamment faible et la température suffisamment élevée, on est en droit de considérer que le corps se comporte comme un gaz idéal dont la capacité thermique massique, l'énergie interne et l'enthalpie ne dépendent que de la température (et non pas de la pression).

Thermoptim comprend l'ensemble des données thermophysiques nécessaires pour calculer l'état des fluides utilisés, qui peuvent être soit des corps purs, soit des mélanges de gaz. Leur composition peut évoluer, que ce soit du fait de mélanges ou de réactions de combustion.

Il définit trois catégories de corps : des gaz idéaux purs, des gaz idéaux composés, et des vapeurs condensables ou fluides réels (sans mélanges). Les gaz parfaits correspondent au cas particulier de gaz idéaux dont la capacité thermique massique est indépendante de la température.

Les principes de calcul des propriétés des corps sont exposés au chapitre 2.

#### **1.3.4.2 État d'une masse fluide : les points**

Une fois que l'on dispose d'une représentation des propriétés des corps, il devient possible de calculer l'état d'une masse fluide en fonction des grandeurs représentatives intéressantes, comme la pression, la température, l'enthalpie...

Dans Thermoptim, on définit pour cela des points. Un point désigne une particule d'un corps et permet de déterminer ses variables d'état intensives : pression, température, capacités thermiques massiques, enthalpie, entropie, énergie interne, exergie, titre, humidité absolue ou relative... Un point est identifié par son nom et celui du corps qui lui est associé.

Pour le calculer, il faut :

- soit entrer au moins deux de ses variables d'état, généralement la pression et la température pour les systèmes ouverts, et le volume massique et la température pour les systèmes fermés ;
- soit les déterminer automatiquement en utilisant par exemple l'une des transformations définies ci-dessous.

Les écrans de calcul des corps et des points sont présentés au chapitre 3.

#### **1.3.4.3 Transformations**

Les transformations (appelées transfo dans Thermoptim) correspondent à des évolutions thermodynamiques subies par un corps entre deux états. Une transfo

associe donc deux points tels que définis précédemment, un point amont et un point aval. De plus, elle spécifie le débit-masse qui le traverse, et permet donc de calculer les variables d'état extensives, et notamment de déterminer la variation d'énergie mise en jeu.

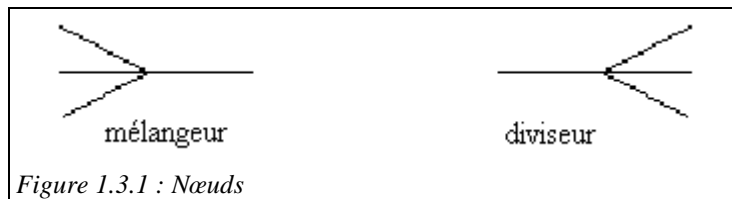
Les transformations les plus courantes ont été modélisées et sont directement accessibles. Connaissant l'état du fluide avant la transformation, Thermoptim peut alors résoudre soit le *problème direct*, soit le *problème inverse*. Dans le premier cas, connaissant les caractéristiques de la transfo, il calcule l'état à la fin de l'évolution et les énergies mises en jeu, et met à jour le point aval. Dans le second cas, il identifie les valeurs des paramètres de la transfo pour que l'évolution choisie conduise bien à l'état du point aval tel qu'il est défini.

Les transformations peuvent être de plusieurs types : compressions, détente, combustions, laminages ou flash (baisse de la pression d'un fluide sans production de travail, comme dans une vanne ou un filtre), échanges de chaleur, et transformations humides (ce dernier cas recouvre six catégories d'évolutions différentes). Elles sont présentées en détail au chapitre 4.

Un cycle peut être décrit comme un ensemble de points reliés par des transformations. Dans la mesure où le débit-masse de fluide est le même dans toutes les transfos, des transfos et des points suffisent pour cela, le réseau de fluide étant implicitement défini par les connexions internes. Si ce n'est pas le cas, il peut être nécessaire de compléter la description du réseau en utilisant les nœuds définis ci-dessous.

#### 1.3.4.4 Nœuds

Les nœuds permettent de décrire les éléments du réseau où prennent place les mélanges, les divisions ou les séparations de fluides. Dans un nœud, plusieurs embranchements fluides sont reliés entre eux pour former une veine unique (figure 1.3.1).



S'il s'agit d'un mélangeur, les diverses branches se rejoignent pour former une seule veine. Le débit massique de la veine principale est égal à la somme de ceux des branches, et le bilan enthalpique permet de calculer l'enthalpie massique et la température du mélange.

S'il s'agit d'un diviseur, la veine principale se subdivise en plusieurs branches dont il faut bien sûr préciser les débits, la température et l'enthalpie massique étant conservées.

Dans Thermoptim, on peut mélanger entre eux plusieurs fluides différents, pourvu que le mélange soit un gaz. Cela signifie que s'il y a des vapeurs condensables (ou fluides réels) parmi les fluides des branches d'un mélangeur associant plusieurs fluides distincts, on fait l'hypothèse qu'elles se retrouvent ensuite à l'état gazeux, et

suivent un comportement de gaz idéal. Les mélanges de vapeurs ne sont, rappelons-le, pas modélisés dans le progiciel<sup>4</sup>.

La définition logique d'un nœud se fait par association (1-n) de transfos : une transfo correspond à la veine principale, et n transfos correspondent aux branches. Les transfos étant elles-mêmes reliées à des points, et ces derniers aux corps, les mises à jour de l'état des fluides sont faites automatiquement.

Un troisième type de nœud existe aussi : le séparateur, qui est un diviseur un peu particulier, qui reçoit en entrée une vapeur à l'état diphasique, et en sépare les phases liquide et gazeuse. Les nœuds sont étudiés au chapitre 3.

#### **1.3.4.5 Échangeurs**

Les échangeurs de chaleur sont des composants qui associent deux fluides, l'un qui se réchauffe, l'autre qui se refroidit, dont les évolutions sont couplées et ne peuvent être calculées indépendamment. La définition la plus simple d'un échangeur demande donc que l'on indique quelles sont les deux transfos qu'il apparie.

Thermoptim peut dimensionner un échangeur, c'est-à-dire calculer la valeur que doit prendre le produit UA de sa surface d'échange par son coefficient d'échange thermique, si l'on indique quelles sont les contraintes sur les débits et les températures que l'on impose (par exemple pincement minimal, efficacité imposée...).

Le progiciel peut aussi, une fois le dimensionnement réalisé (c'est-à-dire pour une valeur du produit UA donnée), calculer, pour des conditions de fonctionnement non nominales sur les débits ou températures d'entrée, quel est le comportement de l'échangeur, c'est-à-dire quelles valeurs prennent les températures de sortie. Les échangeurs sont étudiés au chapitre 5.

#### **1.3.4.6 Composants de l'éditeur de schémas**

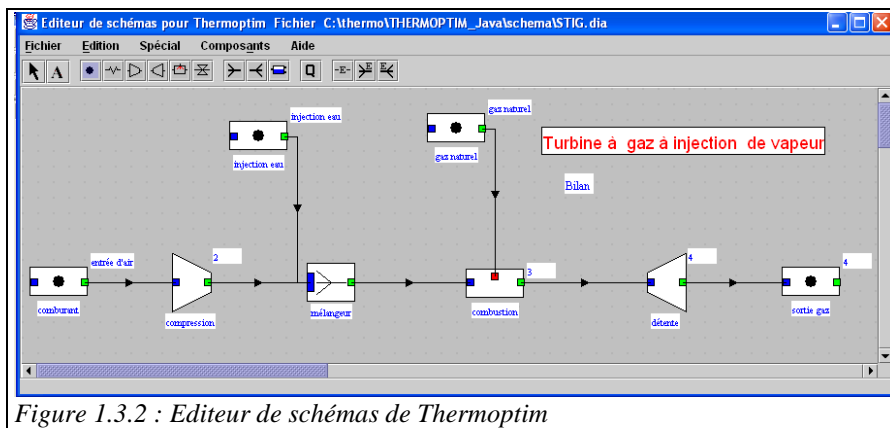
Thermoptim dispose d'un éditeur de schémas (figure 1.3.2) qui permet de décrire qualitativement le système étudié. Il comporte une palette présentant les différents composants représentables (échanges de chaleur, compresseurs, organes de détente, chambres de combustion, mélangeurs, diviseurs...), et un panneau de travail où ces composants sont placés et interconnectés par des liens vectoriels. Cet environnement offre une convivialité particulièrement intéressante pour visualiser et contrôler les connexions de grands systèmes.

Si l'on remarque d'une part qu'un point est toujours associé à une transfo, et un corps à un point, et d'autre part qu'un échangeur de chaleur ne définit en fait qu'un couplage entre deux transfos de type échange, on s'aperçoit que la description d'un système peut être faite à partir seulement de transfos, de nœuds et de leurs couplages.

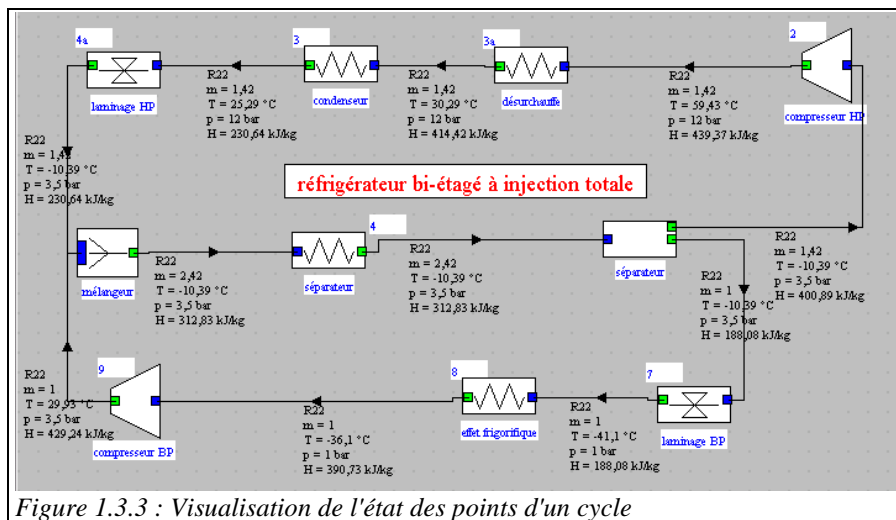
C'est cette propriété qui est utilisée dans l'éditeur de schémas, dont la palette ne présente que des transfos et des nœuds, lesquels sont ensuite connectés en utilisant deux types de liens : des liens orientés représentant une canalisation de fluide, c'est-à-dire essentiellement un point et un débit-masse, et des liens non orientés symbolisant les connexions d'échangeurs.

---

<sup>4</sup> Il est cependant possible d'en modéliser en faisant appel à un serveur de propriétés thermodynamiques externe, comme expliqué chapitre 1 du tome 3.

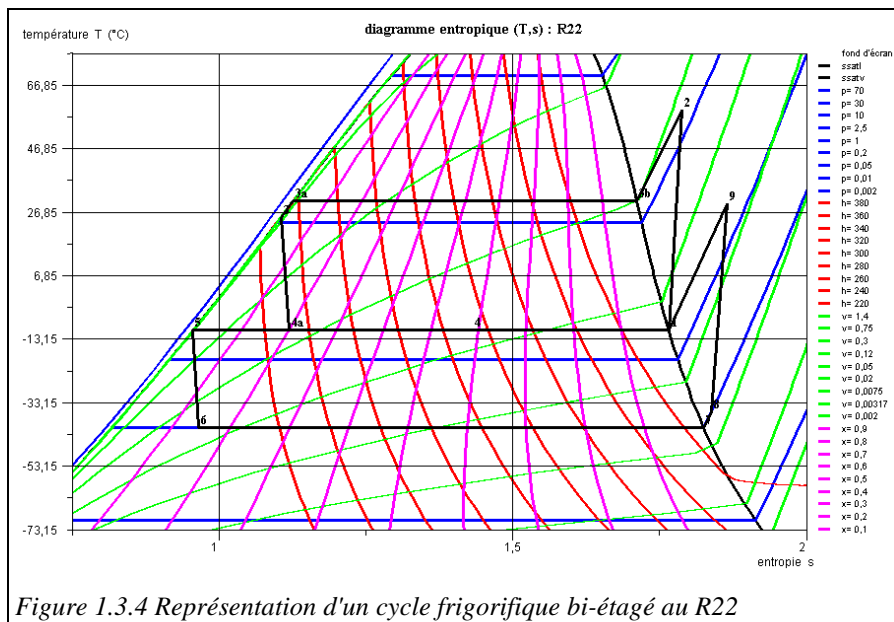


Le grand intérêt de l'éditeur de schémas est qu'il permet de construire visuellement la représentation des systèmes étudiés, et ceci à partir d'un très petit nombre d'éléments, qu'il suffit de bien comprendre et connaître pour pouvoir modéliser un grand nombre de technologies énergétiques. Une fois cette description effectuée, il ne reste plus qu'à bien paramétrer les types primitifs de Thermoptim qui sont mis en jeu. Le travail de modélisation est ainsi découpé en deux phases bien distinctes et complémentaires, la qualitative et la quantitative. Nous verrons plus loin que les couplages étroits entre l'éditeur de schémas et le simulateur de Thermoptim rendent aisée la paramétrisation et la quantification du modèle.



Lorsque les éléments sont paramétrés et que leur calcul est effectué, les résultats obtenus peuvent être directement affichés dans l'éditeur de schémas (figure 1.3.3) qui se comporte alors comme un synoptique du système, et représentés sous forme d'un cycle dans l'un des diagrammes interactifs (figure 1.3.4).





### 1.3.4.7 Projets

L'ensemble des types primitifs permettant de décrire une technologie énergétique (corps, points, transfos, nœuds, échangeurs) est regroupé dans le progiciel sous le nom de projet. Un projet peut être facilement manipulé grâce à des interfaces appropriées. L'ensemble de ses résultats peut être exporté dans un fichier texte retraitable soit par un progiciel de traitement de texte, soit par un tableur.

Afin de faciliter l'archivage et la réutilisation des différents projets générés, un certain nombre de règles et d'outils de gestion des projets ont été définis. En particulier, un projet peut recevoir un nom et un descriptif permettant de le décrire succinctement. Ensuite, comme il est clair qu'à un même schéma peuvent correspondre plusieurs projets, chacun ayant un paramétrage différent, et qu'un projet ne peut en principe pas avoir plusieurs schémas, il est possible d'associer à un projet le nom d'un schéma.

De cette manière, lorsqu'un schéma est affiché dans le modeleur graphique, on peut rechercher parmi les projets la liste de ceux qui lui sont associés, et la faire afficher dans une bibliothèque particulière du type précédent.

### 1.3.5 ATOUTS DE THERMOPTIM

Les lignes qui précèdent ont permis d'introduire les principaux types primitifs de ThermoOptim. Nous montrerons tout au long de cet ouvrage que ce très petit nombre d'éléments suffit pour modéliser un large éventail de technologies énergétiques. Il est très remarquable qu'une dizaine de composants graphiques (liens compris) suffise pour en représenter autant. La modélisation de ces technologies, qui est généralement considérée comme difficile, peut ainsi être grandement simplifiée lorsqu'on dispose d'un outil comme ThermoOptim, l'éditeur de schémas permettant d'obtenir une description qualitative du modèle particulièrement parlante pour un ingénieur, qu'il est relativement facile de quantifier ensuite.

Thermoptim apparaît ainsi comme un progiciel de thermodynamique appliquée dont les principaux atouts sont les suivants :

- il fournit un environnement de modélisation systémique et analytique cohérent. Moyennant un investissement initial relativement limité pour comprendre la logique sous-jacente, elle-même assez naturelle et intuitive, il permet d'adopter une démarche d'analyse très rigoureuse conduisant à des gains de productivité appréciables. Les modèles développés peuvent être facilement documentés, archivés et réutilisés ou modifiés ;
- sa base de types primitifs constitue une grille d'analyse des technologies énergétiques permettant de mettre en évidence le graphe des inter-relations des composants. Avec un peu d'expérience, le modélisateur obtient une représentation qui est à la fois fidèle à la réalité et calculable par le progiciel. Cette étape est grandement facilitée par l'éditeur graphique de schémas ;
- la description du problème est effectuée en utilisant les concepts naturels de l'ingénieur ou du physicien, les types primitifs ayant un sens physique très clair. Le modélisateur peut ainsi se consacrer à l'analyse physique des phénomènes, la traduction mathématique, numérique et informatique du modèle généré étant assurée par l'outil de manière transparente ;
- le modélisateur n'a pas à écrire une ligne de code ou à résoudre lui-même une équation, Thermoptim assurant la traduction informatique de la description du projet qui lui est soumise. L'utilisateur est ainsi assuré d'obtenir rapidement des résultats réalistes sans risques d'erreur de programmation. S'il souhaite effectuer des calculs non prévus dans l'outil, il en a le loisir en exploitant (par exemple avec des macros) le fichier texte des résultats de son projet ;
- étant donné que les propriétés des fluides sont calculées automatiquement, le modélisateur peut obtenir des résultats très précis tout en étant déchargé de nombreuses difficultés calculatoires qu'il n'aurait pu sans cela éviter qu'en recourant à des hypothèses simplificatrices caricaturales ;
- le progiciel est un environnement ouvert, écrit dans le langage Java. Si nécessaire, sa base des types primitifs peut être étendue pour représenter des composants supplémentaires.

#### 1.4 RÉFÉRENCES

J. L. LE MOIGNE *Théorie du système général*, PUF, 1984.

F. KREITH, ed. *The CRC handbook of thermal engineering*, CRC Press, Springer, 2000.

## 2 BASES DE THERMODYNAMIQUE

Dans cette partie, nous présentons les principales connaissances de thermodynamique qui sont nécessaires pour pouvoir aborder l'étude des technologies énergétiques.

La thermodynamique peut se définir comme la science des transformations de l'énergie, laquelle peut prendre quatre formes : mécanique, thermique, chimique ou électrique.

On comprend qu'exposer de manière générale la thermodynamique soit un exercice particulièrement difficile, étant donné que l'ensemble des définitions, postulats et démonstrations doit pouvoir s'appliquer à l'ensemble de ces formes d'énergie.

Or, pour l'étude des systèmes énergétiques abordés dans cet ouvrage, nous pouvons en pratique nous limiter aux deux premières de cette liste, la mécanique et la thermique, sauf pour ce qui concerne les mélanges humides et les réactions de combustion.

Une des ambitions de cet ouvrage, nous l'avons dit, est de proposer une méthode d'apprentissage de la thermodynamique appliquée beaucoup plus simple que celle qui est traditionnellement enseignée. Ce parti pris de simplicité nous a conduits à limiter notre présentation de la thermodynamique aux seules bases nécessaires pour notre propos.

En conséquence, et sauf pour les calculs des mélanges humides et de combustion, qui feront chacun l'objet d'un traitement particulier, nous supposerons toujours que les corps mis en jeu sont de composition invariable, ce qui nous permettra de ne pas faire apparaître les variables chimiques, et donc d'alléger sensiblement le formalisme. Par ailleurs les systèmes que nous étudierons seront toujours non électrisés.

Cette manière de faire, qui correspond à la pratique courante en matière d'ingénierie énergétique, nous conduira à certains moments à nous écarter du formalisme rigoureux de la thermodynamique ; nous le signalerons alors. Comme nous l'avons déjà indiqué en introduction, ce que nous perdrons en généralité sera compensé par les gains obtenus en facilité d'usage de l'ouvrage

Après avoir montré comment s'expriment les échanges d'énergie au cours d'une transformation, un rappel des deux premiers principes de la thermodynamique fournit les bases théoriques permettant de mener la plupart des calculs ultérieurs. La notion d'exergie est ensuite introduite, et la fin du chapitre est consacrée à l'étude des propriétés des corps. On y montre comment ils peuvent être représentés par une cascade de modèles imbriqués : gaz parfaits, idéaux, fluides réels condensables.

On trouvera dans ces chapitres les définitions de nombreuses notions qu'il est important de bien comprendre pour calculer les technologies énergétiques, même si l'on utilise Thermoptim. Citons par exemple les fonctions d'état comme l'énergie interne, l'enthalpie ou l'entropie (sections 2.3 et 2.4), les propriétés de la matière et les différents modèles employés pour représenter les fluides (section 2.6).

## 2.1 NOTIONS FONDAMENTALES, DÉFINITIONS

A ce stade de notre étude, il est préférable de définir ou rappeler un certain nombre de notions fondamentales dont nous aurons besoin dans la suite de l'exposé : systèmes thermodynamiques, variables et équations d'état, phases, équilibres, transformations réversibles et irréversibles. Ces concepts sont nécessaires pour permettre de calculer les évolutions que subissent les fluides thermodynamiques. On est en effet amené à introduire des variables et des fonctions reliées entre elles par des équations qui ne peuvent être déterminées que si le milieu considéré est continu et homogène, c'est-à-dire si ces fonctions sont suffisamment régulières au sens mathématique du terme. En particulier, nous ne nous intéresserons qu'à des quantités de matière macroscopiques.

### 2.1.1 SYSTÈMES OUVERTS ET FERMÉS

Un **système thermodynamique** désigne une quantité de matière isolable de son environnement par une frontière fictive ou réelle. Ce système est dit **fermé** s'il n'échange pas de matière avec l'extérieur à travers ses frontières ; sinon il est dit **ouvert**. On notera que cette notion de système n'est pas du tout la même que celle que nous avons introduite plus haut pour caractériser une technologie énergétique en tant qu'assemblage de composants. Il y a là une difficulté de vocabulaire que l'on ne peut éviter compte tenu des usages, mais le contexte permet généralement sans difficulté de distinguer les deux acceptions du terme.

Les débutants sont souvent décontenancés par la distinction entre systèmes fermés et systèmes ouverts, ces derniers correspondant à un concept nouveau pour eux car au cours de leur scolarité de premier cycle, ils n'ont généralement étudié que des systèmes fermés (pour éviter la prise en compte des échanges de matière aux frontières).

Dans un moteur diesel ou à essence, les soupapes sont fermées pendant la compression, la combustion et la détente, isolant de l'extérieur la masse de gaz qui se trouve comprise entre le piston, la chemise et la culasse. Les transformations qui prennent place à l'intérieur du moteur doivent donc être calculées en système fermé. Dans le cas d'une turbine à gaz, compresseur, chambre de combustion et turbine sont parcourus par un flux continu de gaz. A l'entrée et à la sortie de chacun de ces composants, de la matière est transférée. Les transformations doivent alors être calculées en système ouvert.

Il y a un certain paradoxe dans le fait que les calculs sont généralement plus faciles à effectuer pour les systèmes ouverts que pour les systèmes fermés, bien que ces derniers ne mettent pas en jeu d'échanges de matière avec l'extérieur. La raison en est que la pression est généralement une donnée dans les calculs en système ouvert alors qu'elle dépend de nombreux facteurs dans un système fermé.

A titre d'exemple, la combustion dans une turbine à gaz (système ouvert) prend place à pression constante, à de faibles pertes de charge près, alors que dans un moteur diesel ou à essence (système fermé), la pression varie très fortement au cours de la transformation, de telle sorte qu'il est préférable, si l'on veut approcher un peu la réalité, de la décomposer en plusieurs étapes : par exemple d'abord à volume constant, puis à pression constante, et enfin à température constante.

Pour achever de compliquer les choses, il est naturel (mais fatal) de confondre les notions d'ouverture et de fermeture des systèmes au sens thermodynamique que nous

venons d'introduire et au sens du cycle complet que parcourent les fluides d'une machine thermique.

Par exemple un cycle de machine frigorifique à compression est un cycle fermé (figure 2.1.1), faute de quoi le frigorigène serait perdu dans l'atmosphère, ce qui serait à la fois coûteux et préjudiciable à l'environnement, alors que chacun de ses composants pris séparément (à l'exception éventuellement du compresseur s'il est volumétrique) constitue un système ouvert, traversé en régime permanent par un certain débit de fluide frigorigène.

La machine opère ainsi selon un cycle fermé associant plusieurs composants travaillant chacun en système ouvert.

**Schéma d'un cycle frigorifique à compression**

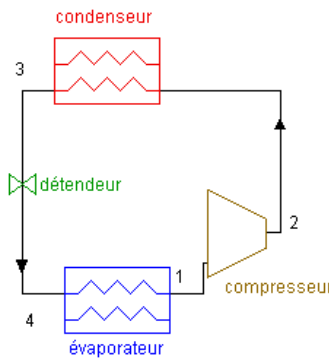


Figure 2.1.1 : Cycle frigorifique à compression

### 2.1.2 ÉTAT D'UN SYSTÈME, GRANDEURS INTENSIVES ET EXTENSIVES

La notion **d'état d'un système** représente "l'information minimale nécessaire à la détermination de son comportement futur". Les variables d'état (températures, pressions...) constituent l'ensemble des grandeurs physiques (ou propriétés thermodynamiques) nécessaires et suffisantes pour caractériser complètement un système à un instant donné. Il existe généralement plusieurs ensembles répondant à cette définition, mais on notera que la vitesse n'est pas une variable d'état, étant donné que sa définition fait intervenir deux instants successifs. Nous verrons par la suite que, pour une phase de masse unitaire, deux grandeurs suffisent pour déterminer toutes les autres. Il en résulte qu'il existe des équations reliant chaque variable d'état à deux d'entre elles indépendantes :  $v = f(P,T)$ ... On appelle **équations d'état** de telles relations, fondamentales en pratique.

Selon le problème posé, on retient le plus souvent les couples suivants : (pression, volume), (pression, température), (température, volume). Une **fonction d'état** est une grandeur dont la valeur ne dépend que de l'état du système, et non pas de son histoire.

Un modèle physique fait intervenir des grandeurs représentatives de l'état d'un système, qui sont a priori fonction du temps et de la position du point considéré. Ces grandeurs peuvent être regroupées en deux grandes classes :

- les **grandeurs intensives**, telles que la pression, la température ou l'enthalpie massique, qui sont indépendantes de la quantité de matière considérée ;
- les **grandeurs extensives**, telles que la masse, l'enthalpie ou l'entropie, qui dépendent de la masse du système.

Une grandeur intensive relie la condition en un point du milieu considéré à une condition de référence en un autre point ou dans un autre milieu. Par exemple, la température est définie par rapport au zéro absolu ou au point triple de l'eau.

Une grandeur extensive est additive : si un système est composé de plusieurs phases, les grandeurs extensives qui le caractérisent sont égales à la somme de celles des

phases qui le composent. La masse ou l'enthalpie totale sont des grandeurs extensives.

On notera qu'en multipliant par la masse d'une phase certaines grandeurs intensives comme l'enthalpie massique ou l'entropie massique, on obtient des grandeurs extensives comme l'enthalpie ou l'entropie.

Rappelons qu'on appelle volume de contrôle une région de l'espace dotée de frontières réelles ou fictives, et délimitant ainsi le système (thermodynamique dans notre cas) auquel on s'intéresse. Un exemple de volume de contrôle est donné figure 2.3.1. Il est délimité par les parois fixes et mobiles de la machine M et par deux surfaces géométriques immatérielles notées  $A_1$  et  $A_2$  à l'instant initial  $t_0$ , et  $B_1$  et  $B_2$  à  $t_0 + dt$ .

Dans l'exemple de la figure 2.3.1, le volume de contrôle est considéré comme un système fermé, que l'on suit dans son déplacement au cours du temps,  $A_1$  passant en  $B_1$  et  $A_2$  en  $B_2$ . Dans d'autres cas, les volumes de contrôle pourront délimiter des systèmes ouverts. Les masses qu'ils isolent seront alors susceptibles de varier en fonction des débits-masses traversant leurs frontières.

D'une manière générale, les modèles des composants que nous utiliserons sont établis en écrivant les lois de continuité et de conservation des variables extensives : masse, énergie, entropie... les bilans étant établis au niveau de volumes de contrôle bien choisis.

Les **lois de conservation** s'écrivent sous la forme générale :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{accumulation} \\ \text{dans le volume} \\ \text{de contrôle} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{transport} \\ \text{entrant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{transport} \\ \text{sortant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{transfert} \\ \text{à} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{génération} \\ \text{dans le} \\ \text{volume} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{consommation} \\ \text{dans le} \\ \text{volume} \end{array} \right\} \quad (2.1.1)$$

Pour les grandeurs conservatives, comme la masse, l'énergie interne et l'enthalpie, les deux derniers termes de l'équation disparaissent. Pour les grandeurs non conservatives, comme l'entropie ou le nombre de moles d'une espèce chimique en réaction, il peut être nécessaire d'introduire l'un ou l'autre.

Construire un modèle consiste à traduire cette expression sémantique en un jeu d'équations et à fixer les conditions initiales et aux limites.

### 2.1.3 PHASE, CORPS PURS, MÉLANGES

On appelle phase un milieu continu jouissant des trois propriétés suivantes :

- il est homogène (ce qui implique une température uniforme) ;
- la vitesse en chacun de ses points est nulle dans un repère convenable ;
- il n'est soumis à aucune force extérieure à distance (pression uniforme).

Comme on le sait, la matière se présente sous trois phases : solide, liquide et gazeuse. Un système thermodynamique peut être constitué d'un seul corps pur, ou en comporter plusieurs. Dans ce dernier cas, le mélange est caractérisé par sa composition, molaire ou massique. Chacun des constituants du mélange peut se trouver présent sous une ou plusieurs phases. Si les constituants et leurs phases sont répartis uniformément dans le volume délimité par les frontières du système, le

mélange est homogène, sinon il est hétérogène. Les propriétés d'un mélange dépendent bien évidemment de son homogénéité.

La notion de phase joue un rôle très important en pratique, car on supposera toujours dans ce qui suit que tout système physique est décomposable en un ensemble de phases.

#### 2.1.4 ÉQUILIBRE, TRANSFORMATION RÉVERSIBLE

Une phase est dite en équilibre statique, ou plus simplement en équilibre, si :

- la pression et la température sont uniformes dans l'espace ;
- toutes les variables d'état sont constantes dans le temps.

On appelle transformation réversible entre deux états d'équilibre 1 et 2 une évolution fictive qui jouit des deux propriétés suivantes :

- elle est suffisamment lente à tous points de vue (vitesses, échanges de chaleur et de matière...) pour qu'on puisse l'assimiler à une suite continue d'états d'équilibre ;
- elle constitue la limite commune de deux familles de transformations réelles dont l'une mène de 1 à 2, et l'autre de 2 à 1.

Une transformation est dite irréversible dans les deux cas suivants :

- la transformation inverse n'est pas réalisable sans modification profonde de l'appareillage (mélange, combustion...);
- elle renferme une cause d'irréversibilité du type frottement ou viscosité.

#### 2.1.5 TEMPÉRATURE

La notion de température peut être introduite de plusieurs manières différentes. Nous nous contenterons ici de la définition opérationnelle proposée par F. Fer, qui repose sur les deux propositions suivantes :

- on sait construire un thermomètre, appareil dont toutes les propriétés physiques sont, dans des conditions opératoires bien définies, fonction d'une seule variable, appelée température ;
- on sait réaliser des milieux matériels tels que, lorsqu'un thermomètre y est plongé, son indication reste constante dans le temps et indépendante de son orientation et de la place qu'il occupe dans le milieu.

On pose alors que la température du milieu est égale à celle du thermomètre, et on dit que le milieu est en équilibre thermique.

A partir de cette présentation, il est possible de faire le lien avec les définitions axiomatiques de la température déduites par exemple du deuxième principe. Un exposé rigoureux et complet de cette notion sort cependant des limites que nous avons fixées pour cet ouvrage, et s'impose d'autant moins qu'elle est assez intuitive et que son utilisation pratique ne pose généralement pas de problème particulier.

#### 2.1.6 NOTATIONS

On notera généralement en minuscules les variables d'état (à l'exception de la température exprimée en Kelvin et de la pression) et les fonctions d'état intensives (rapportées à l'unité de masse), et en majuscules les grandeurs extensives (rapportées à la masse totale).

Conformément à l'usage, une exception sera cependant faite pour l'énergie cinétique  $K$ , le travail des forces externes  $W$  et la chaleur échangée avec l'extérieur  $Q$ , qui seront écrits en majuscules même exprimées en unités massiques, et pour le travail utile  $\tau$ , qui sera toujours écrit en minuscules.

On passe des unes aux autres en multipliant les premières par la masse  $m$  (pour les systèmes fermés), ou le débit massique  $\dot{m}$  (pour les systèmes ouverts).

$$\text{volume } v = \frac{V}{m} = \frac{\dot{V}}{\dot{m}} \quad (\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}) \quad \text{énergie interne } u = \frac{U}{m} = \frac{\dot{U}}{\dot{m}} \quad (\text{J kg}^{-1})$$

$$\text{entropie } s = \frac{S}{m} = \frac{\dot{S}}{\dot{m}} \quad (\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}) \quad \text{enthalpie } h = \frac{H}{m} = \frac{\dot{H}}{\dot{m}} \quad (\text{J kg}^{-1})$$

Pour des raisons de commodité, nous nous ramènerons, chaque fois que possible, à l'unité de masse du fluide considéré.

Dans cet ouvrage, nous n'utiliserons que très rarement les grandeurs extensives, aussi prendrons-nous la liberté, pour ne pas alourdir les notations, d'utiliser aussi les majuscules pour les grandeurs molaires, auxquelles nous aurons parfois recours. Lorsque ce sera le cas, nous l'indiquerons.

Rappelons par ailleurs qu'une kilomole (1 kmol) est la quantité d'une substance dont la masse est égale à sa masse molaire  $M$  exprimée en kilogramme : 1 kmol de  $O_2$  a une masse de 32 kg.

Si  $M^*$  est la masse d'une molécule,  $M^* = \frac{M}{N_0}$ ,  $N_0$  étant le nombre d'Avogadro :

$$N_0 = 6 \cdot 10^{23} \text{ molécules /g.}$$

A l'état normal (0°C, 1 bar), le volume occupé par 1 kmol est égal à 22,414 m<sup>3</sup>.

## 2.2 ÉCHANGES D'ÉNERGIE AU COURS D'UNE TRANSFORMATION

Les composants des machines thermiques sont parcourus par des fluides qui sont le plus souvent à l'état gazeux ou liquide. Au cours des transformations qu'ils y subissent, ces fluides échangent de l'énergie avec l'extérieur ou entre eux sous deux formes : mécanique, notée traditionnellement  $W$ , et thermique notée  $Q$ . Compte tenu de leur importance pratique, nous commencerons par étudier ces échanges d'énergie.

Conformément à notre parti pris de privilégier un exposé aussi simple que possible des bases de la thermodynamique, nous nous limiterons dans ce qui suit à des systèmes en régime permanent, car, même si les résultats que nous établirons se généralisent assez facilement, il est alors nécessaire d'adopter un formalisme plus lourd si l'on veut être rigoureux.

### 2.2.1 TRAVAIL $\delta W$ DES FORCES EXTERNES SUR UN SYSTÈME FERMÉ

Considérons un système fermé monophasé. Les forces extérieures qui s'exercent sur lui se limitent généralement d'une part à l'action de la pesanteur sur la masse fluide, et d'autre part aux pressions qui s'exercent sur ses frontières.

Dans les machines thermiques, le travail de la pesanteur est dans la majorité des cas négligeable devant celui des actions dites "de contact". Pour fixer les idées, le travail fourni par une masse de 1 kg d'eau tombant d'une hauteur de 100 m est égal à 980 J,



alors que celui de la même masse de vapeur d'eau détendue de manière isentropique de 100 bar et 500 °C à 1 bar est égal à 983 kJ, soit 1000 fois plus important.

En conséquence, dans les machines thermiques, le travail des forces massiques sera le plus souvent négligeable devant celui de la pression.

Considérons un fluide au repos (figure 2.2.1), donc à pression uniforme  $P$ , enfermé dans un cylindre dont toutes les parois sont fixes excepté un piston susceptible de se déplacer dans une direction. Exerçons maintenant une force  $\vec{F}$  sur ce piston, afin de le déplacer suffisamment lentement (pour qu'à tout moment le système puisse être assimilé à une phase).

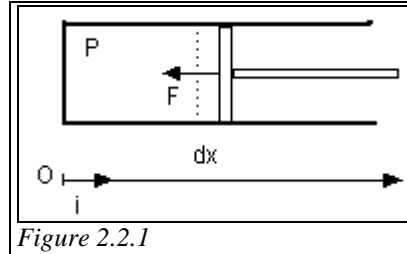


Figure 2.2.1

Donnons-nous un axe  $(O, \vec{i})$  orienté depuis le fond du cylindre ( $x=0 \Rightarrow V=0$ ). La force étant exercée par l'extérieur sur le système,  $\vec{F} = -\|F\| \vec{i}$

Appelons  $A$  la section du piston, et  $d\vec{x} = dx \vec{i}$  le déplacement effectué.

On a bien évidemment  $\|F\| = P A$ , et le travail  $m \delta W_A$  reçu par la masse  $m$  de fluide est :

$$m \delta W_A = \vec{F} \cdot d\vec{x} = -\|F\| dx \vec{i} \cdot \vec{i} = -P A dx = -P dV.$$

$dV$  étant la variation de volume de la masse, égale à  $mdv$ , et :

$$\delta W_A = -P dv \quad (2.2.1)$$

S'il s'agit d'une compression, la variation de volume est négative et le travail reçu est positif. Nous notons d'un indice  $A$  ce travail, pour bien indiquer qu'il est exercé à la surface du système considéré.

Cette expression, qui se généralise sans peine à un système fermé de forme quelconque, n'est valable que si le système reste en équilibre statique, c'est-à-dire si les hypothèses ci-dessous sont vérifiées :

- la pression reste uniforme dans le système ;
- le fluide reste au repos.

On remarquera que la formule (2.2.1) implique que le travail reçu par le système est positif, et que le travail qu'il cède est négatif. Par convention, on généralise ce résultat en comptant positivement l'énergie reçue par un système, et négativement celle qu'il fournit à l'extérieur.

Au cours d'une transformation réversible faisant passer une phase fermée d'un état 1 à un état 2, le travail massique des actions de contact a donc pour valeur :

$$W_A = - \int_1^2 P dv \quad (2.2.2)$$

Dans le cas où le travail de la pesanteur n'est pas négligeable, on peut facilement montrer qu'il s'exprime sous la forme :

$$dW_v = -g dz \quad (2.2.3)$$

$g > 0$  étant l'accélération de la pesanteur, et  $z$  l'altitude du point, comptée positivement vers le haut. Nous notons d'un indice  $v$  ce travail, pour bien indiquer qu'il s'exerce dans le volume du système considéré.

On a donc :

$$W = W_A + W_v \quad (2.2.4)$$

### 2.2.2 TRANSFERTS DE CHALEUR

Soit une masse fluide simple, à l'intérieur de laquelle il ne se produit pas de frottements. Soit  $\delta Q$  la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur et reçue par l'unité de masse de ce fluide, au cours d'une transformation infiniment petite.

Un fait expérimental essentiel, base de la thermodynamique des fluides compressibles, est que  **$\delta Q$  est une forme différentielle de l'état de cette masse fluide**, appelée équation calorimétrique.

A titre d'exemple, dans le cas d'un système monovariant (équilibre entre phases lors d'un changement d'état), l'équation calorimétrique ne dépend que du titre  $x$ , rapport de la masse de vapeur à la masse totale (vapeur + liquide) dans le cas d'une vaporisation ou d'une condensation :  $\delta Q = L dx$

$L$  étant l'enthalpie de changement d'état.

Plus généralement, l'équation calorimétrique qui relie  $\delta Q$  aux variables d'état du fluide simple (bivariant) peut prendre les trois formes canoniques équivalentes entre elles bien connues :

$$\begin{aligned} \delta Q &= c_p dT + h dP \\ \delta Q &= c_v dT + l dv \\ \delta Q &= \mu dP + \lambda dv \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

Les coefficients  $c_p$ ,  $c_v$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $\mu$  et  $\lambda$  sont dits coefficients calorimétriques d'équilibre du fluide (on notera que  $h$  **n'est pas** l'enthalpie, qui sera introduite plus loin). Ils sont reliés par des relations différentielles que l'on peut obtenir sans difficulté notable mais qui ne présentent pas d'intérêt particulier pour nous. Il suffit de savoir que les propriétés calorimétriques d'un fluide sont déterminées par la connaissance de deux de ces six coefficients.

Par la suite, nous nous servirons uniquement des coefficients  $c_p$  et  $c_v$ , qui sont appelés respectivement capacité thermique massique à pression constante, et capacité thermique massique à volume constant, dont l'ancienne appellation était "chaleur massique" (ou spécifique).

Pour un solide ou un liquide,  $c_p \approx c_v$ , et  $\delta Q \approx c dT$

Pour un gaz idéal, comme nous le verrons au paragraphe 2.6.2,  $h = l = 0$ , et, selon que l'on a affaire à un système ouvert ou fermé,  $\delta Q = c_p dT$  ou  $\delta Q = c_v dT$ . Pour un gaz réel, il faut utiliser une des formes canoniques ci-dessus.

Les équations précédentes ne sont cependant valables que si certaines conditions sont respectées :

- tout d'abord, la masse fluide doit être parfaitement homogène, c'est-à-dire assimilable à une phase ;

- ensuite, on a supposé qu'il n'y avait pas d'irréversibilité à l'intérieur ou aux limites de la masse fluide. S'il y en a, la relation devient :

$$\begin{array}{l} \delta Q < c_p dT + h dP \quad \text{On posera alors :} \\ \delta Q = c_p dT + h dP - \delta\pi \end{array} \quad (2.2.6)$$

$\delta\pi$ , terme essentiellement positif, a une signification physique très simple : c'est la chaleur dégagée par les frottements mécaniques au sein du fluide. Bien qu'elle en diffère profondément, elle produit le même effet qu'une chaleur reçue de l'extérieur. Son sens sera précisé lors de la présentation du deuxième principe de la thermodynamique (section 2.4).

Par convention donc, nous noterons  $\delta Q$  la chaleur échangée avec l'extérieur, et comptée positivement si elle est reçue par le système, et  $\delta\pi$  la chaleur dissipée en interne par les frottements s'il y en a. En pratique, il importe de bien distinguer ces deux formes de chaleur, faute de quoi de graves erreurs de raisonnement peuvent être faites. En particulier, les transformations sans échange de chaleur avec l'extérieur, appelées adiabatiques, sont telles que  $\delta Q = 0$ , qu'elles soient ou non le siège d'irréversibilités, c'est-à-dire que  $\delta\pi$  soit nul ou non.

### 2.3 PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

Maintenant que nous avons établi les expressions permettant de calculer les échanges d'énergie mécanique et thermique d'une masse fluide avec son environnement, nous pouvons faire un rappel du premier principe de la thermodynamique. Selon l'usage, nous commencerons par son expression pour les systèmes fermés, bien connue de tous, et nous la généraliserons pour les systèmes ouverts.

Le premier principe, connu aussi sous le nom de principe de l'équivalence ou principe de la conservation de l'énergie, exprime que l'énergie contenue dans un système isolé ou qui évolue selon un cycle fermé reste constante, quelles que soient les transformations qu'il subit. Les différentes formes que peut prendre l'énergie d'un système : énergie mécanique, énergie calorifique, énergie potentielle, énergie cinétique... sont toutes équivalentes entre elles au sens du premier principe.

#### 2.3.1 DÉFINITION DE L'ÉNERGIE INTERNE $U$ (SYSTÈMES FERMÉS)

A tout système physique fermé est attaché un scalaire  $U$ , fonction des seules variables d'état, et tel qu'on a en toute transformation réelle :

$$\Delta U + \Delta K = W + Q \quad (2.3.1)$$

$K$  étant l'énergie cinétique du système,  $W$  le travail des forces externes, exprimé pour la masse totale du système et donné par la relation (2.3.4)  $W = W_A + W_v$ , et  $Q$  la quantité de chaleur échangée par le système avec l'extérieur pendant la transformation considérée.

$U$  est une grandeur extensive appelée **l'énergie interne** du système,  $U + K$  est parfois appelée son **énergie totale**. Pour une phase de masse  $m$ ,  $U = m u$ ,  $u$  étant l'énergie interne massique.

Rappelons que les variables d'état qui définissent, dans le cas le plus général, un système physique, appartiennent à quatre grandes catégories, dont seules les deux

premières seront à considérer dans la plupart des applications que nous aurons à traiter ; la troisième ne sera utilisée que pour les mélanges de fluides et les réactions de combustion ; quant à la quatrième, elle n'interviendra pas dans le cadre de cet ouvrage :

- les variables mécaniques, de position ou de déformation ;
- la température ;
- les variables chimiques ;
- les variables électriques.

On notera que de nombreux auteurs distinguent dans l'expression du premier principe le travail de la pesanteur ( $W_v$ ) et celui des forces de pression ( $W_A$ ), et l'expriment donc sous la forme équivalente :

$$\Delta U + \Delta K + mg\Delta z = W_A + Q$$

Pour un volume de contrôle infiniment petit, l'équation (2.3.1) devient :

$$dU + dK = \delta W + \delta Q \quad (2.3.2)$$

Physiquement, le premier principe découle de la mise en évidence expérimentale du fait que, quelles que soient les transformations subies par un système donné, la somme  $W + Q$  ne dépend que de l'état initial et de l'état final. Il en résulte donc que  $W + Q$  est une fonction d'état du système.

Mathématiquement, le premier principe indique que, alors que  $\delta W$  et  $\delta Q$  ne sont pas des différentielles exactes, leur somme en est une, et qu'elle est égale à la somme des variations de l'énergie cinétique et d'une fonction d'état, l'énergie interne.

### 2.3.2 APPLICATION À UNE MASSE FLUIDE

Nous verrons plus loin que, dans le cas d'une phase fluide simple, l'état physique du système, exprimé en grandeurs massiques, est caractérisé par les variables  $P$ ,  $v$ ,  $T$ , reliées entre elles par l'équation d'état.  $u$  est donc fonction de ces variables, ou plus précisément de deux d'entre elles.

Appliquons le premier principe à une transformation réversible infiniment petite du fluide, en négligeant l'action de la pesanteur. Au cours d'une telle transformation, l'énergie cinétique reste constamment nulle, ce qui implique  $dK = 0$ . Par ailleurs  $\delta W = -Pdv$ , et  $\delta Q$  s'exprime sous la forme :

$$\delta Q = du + Pdv \quad (2.3.3)$$

Par identification avec l'équation calorimétrique (2.2.5), on retrouve bien :

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v, \text{ qui est souvent utilisée comme définition de } c_v.$$

L'équation précédente montre que, pour un échauffement à volume constant, sans frottements mécaniques, la chaleur échangée avec l'extérieur est égale à la variation d'énergie interne du fluide :

$$Q_1^2 = u_2 - u_1$$

Cette relation est à la base des déterminations calorimétriques de  $u$ .

### 2.3.3 TRAVAIL FOURNI, TRAVAIL UTILE $\tau$

Les opérations industrielles se déroulent généralement en continu, chaque composant (turbine, pompe, vanne...) recevant et évacuant de la matière en permanence. Lorsque, comme c'est souvent le cas, leurs conditions de fonctionnement sont stabilisées, éventuellement de manière périodique, on parle de "régime permanent" ou de "régime stationnaire". Comme nous l'avons indiqué précédemment, le calcul de ces appareils doit être fait en système ouvert, et l'expression précédente, valable uniquement en système fermé, doit être généralisée.

Le principe du raisonnement consiste à suivre l'évolution d'un volume de contrôle fermé, et à calculer le travail des forces externes sur l'ensemble de ses frontières, en distinguant les sections de passage des fluides, les parois fixes, qui bien évidemment ne produisent ni ne reçoivent aucun travail, et les parois mobiles, au niveau desquelles s'exerce un certain travail  $\tau$  que l'on appelle "travail utile".

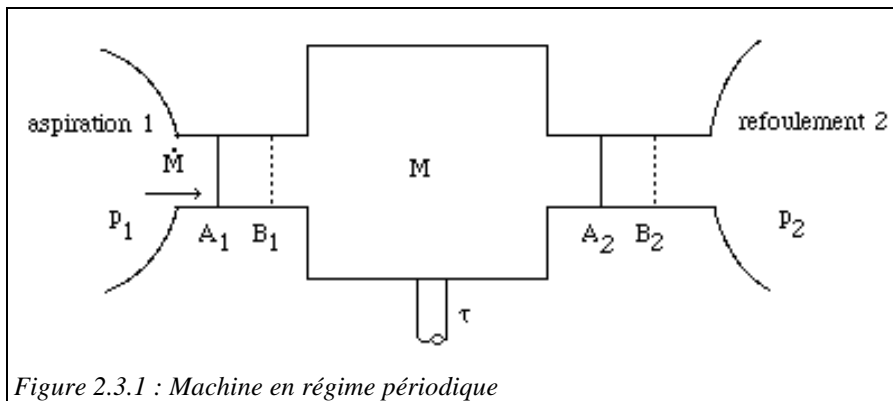


Figure 2.3.1 : Machine en régime périodique

Dans le cas le plus fréquent (figure 2.3.1), on peut supposer que le composant fonctionne entre deux enceintes de grandes dimensions, où le fluide est en équilibre. Les états amont (1) et aval (2) sont définis par leurs pressions et leurs températures supposées uniformes malgré les prélèvements et les apports dus à l'aspiration et au refoulement. Par exemple, un compresseur de turbine à gaz aspire dans l'atmosphère et refoule dans la chambre de combustion où règne une pression sensiblement uniforme.

Dans son passage de (1) à (2), chaque unité de masse de fluide reçoit, de la part des parois mobiles, le travail utile  $\tau$ , dont la connaissance est fondamentale, puisque son produit par le débit-masse  $m$ , donne la puissance mise en jeu (aux pertes mécaniques près dans les paliers et organes de transmission).

On peut facilement démontrer que, par unité de masse, un composant réalisant une transformation quelconque fournit un travail  $\tau$  algébriquement égal au travail  $W_A$  des forces de pression calculées en système fermé, augmenté du travail de transvasement, c'est-à-dire de la variation du produit  $Pv$  :

$$\tau = W_A + P_2 v_2 - P_1 v_1 = W_A + \Delta(Pv) \quad (2.3.4)$$

En général,  $P_2 v_2 - P_1 v_1 \neq 0$ , et  $\tau$  diffère de  $W_A$ .

### 2.3.3.1 Démonstration

La machine, traversée par un débit  $\dot{m}$ , fonctionne en régime non permanent, mais périodique, c'est-à-dire que l'ensemble de ses composants, y compris la masse fluide qui s'y trouve, se retrouve périodiquement dans le même état (on notera que le régime permanent se déduit du régime périodique en faisant tendre vers 0 la période considérée). Considérons le système fermé constitué de la masse fluide comprise à l'état initial dans le volume de contrôle limité par les parois fixes et mobiles et par les sections  $A_1$  et  $A_2$  situées respectivement dans les enceintes d'entrée et de sortie.

Au bout d'une période  $dt$ , ce volume de contrôle s'est déplacé et est maintenant limité par les sections  $B_1$  et  $B_2$ , supposées elles aussi dans les enceintes d'entrée et de sortie. La machine a été traversée par la masse  $\dot{m} dt$  de fluide, masse commune des tranches  $A_1B_1$  et  $A_2B_2$  (conservation du débit-masse), et a exercé sur le fluide le travail  $\tau \dot{m} dt$  (par définition).

Le travail des forces externes  $W \dot{m} dt$  est égal à la somme du travail de la pesanteur et des travaux des forces de pression exercées sur les différentes frontières de la machine, au nombre de quatre :  $A_1$ ,  $A_2$ , les parois mobiles et les parois fixes.

Sur ces dernières,  $\delta W_{A4} = 0$ .

Sur  $A_1$ , un raisonnement analogue à celui de la section 2.2.1 (la machine ne peut être assimilée à une phase unique) montrerait que :

$$\delta W_{A1} = -P_1 dV_1 = -P_1 (-\dot{m} dt) v_1 = P_1 v_1 \dot{m} dt$$

Sur  $A_2$ , de la même manière,  $\delta W_{A2} = -P_2 v_2 \dot{m} dt$ .

Par définition, le travail utile est celui des forces de pression sur les parois mobiles,  $\tau \dot{m} dt = \delta W_{A3}$

On a donc :

$$\delta W = \delta W_A + dW_v = \delta W_{A1} + \delta W_{A2} + \delta W_{A3} + \delta W_{A4} + dW_v$$

$$\delta W = W dt = P_1 v_1 \dot{m} dt - P_2 v_2 \dot{m} dt + \tau \dot{m} dt + dW_v$$

$$\tau = W_A + P_2 v_2 - P_1 v_1 = W_A + \Delta (Pv)$$

Cette notion de travail utile est loin d'être triviale. Sur le plan pratique cependant, elle ne pose pas de problème particulier : dans toutes les compressions et déteintes en système ouvert, c'est le travail utile qui devra être considéré dans les calculs.

Nous verrons plus loin apparaître une autre notion, celle d'énergie utile, employée pour la distinguer de l'énergie payante dans le calcul de l'efficacité des machines. Bien que le terme "utile" soit le même, il s'agit de deux notions très différentes. Sans doute le terme anglais pour désigner  $\tau$ , "shaft work", prête-t-il moins à confusion.

On remarquera que, dans la démonstration précédente, nous n'avons fait aucune hypothèse restrictive sur la nature des transformations dans la machine proprement dite. Nous avons simplement admis que la pression était uniforme et constante dans la suite des temps à l'entrée et à la sortie de la machine. La relation obtenue s'applique donc sous cette seule condition, quelles que soient les transformations intermédiaires, qu'elles soient réversibles ou non.