

# Modèles numériques et Environnements de Modélisation: des outils pour mobiliser efficacement les connaissances scientifiques

R. Gicquel

## INTRODUCTION

Même si, comme les autres cadres supérieurs, ils doivent de plus en plus se préoccuper des dimensions non techniques de leur travail, c'est-à-dire de gestion des hommes, d'économie des projets, de marketing des produits, d'impact environnemental des technologies... leurs connaissances scientifiques et techniques et leur capacité à les mobiliser pour résoudre des problèmes concrets sont parmi les spécificités les plus distinctives des ingénieurs.

L'objectif de cette présentation<sup>1</sup> est d'amener les élèves à réfléchir à cet aspect central du métier de l'ingénieur : la place des connaissances scientifiques dans son travail, et la manière de les mobiliser efficacement.

La **modélisation numérique** se situe ainsi de plus en plus au cœur même du métier de l'ingénieur, dont l'environnement de travail a beaucoup évolué au cours des dernières années, et continuera de le faire dans l'avenir. De plus en plus, il bénéficiera d'outils informatisés pour lui faciliter la tâche et notamment lui permettre d'effectuer ses calculs scientifiques avec davantage de précision que par le passé et un gain de temps significatif. Cette évolution, qui semble irréversible, a pour effet de modifier sensiblement le travail même de l'ingénieur. Il importe moins qu'auparavant qu'il connaisse dans le détail la manière dont les calculs sont effectués, mais **il est essentiel qu'il sache exploiter les résultats que lui fournissent les logiciels**, tout en étant capable de les critiquer et d'en connaître les limites.

L'idée est la suivante : les technologies de l'information sont en train de révolutionner les modes d'acquisition, de capitalisation et de transmission du savoir. Dans ces conditions, l'ingénieur manipule de moins en moins souvent directement des équations. Il utilise des modèles numériques qui les encapsulent et permettent de les mettre en œuvre de manière efficace grâce à de puissants environnements de modélisation.

Pour étayer cette idée, nous commencerons par présenter brièvement comment élaborer un **modèle de calcul des propriétés thermodynamiques des gaz idéaux** dans l'environnement Java, ce qui nous permettra de montrer ce que peut apporter un environnement de modélisation adapté.

En effet, au delà de la résolution immédiate d'un problème donné, la modélisation, si elle se veut efficace, doit avoir pour objectif d'être économique, sûre et réutilisable. Sur la base des travaux menés dans ce domaine depuis quelques décennies, il apparaît que ceci implique que la modélisation 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 numérique.

Le problème de la conception d'un tel environnement puissant et générique à partir de modules élémentaires bien choisis est très différent de celui de la conception des modules eux mêmes. En fait, on peut montrer que l'ensemble met en œuvre une double démarche, **systemique** dans sa globalité, et **analytique** au niveau de chacun des modules.

Ces deux approches, souvent présentées comme antinomiques, se révèlent donc en réalité très complémentaires dans ce cas. 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 généralité : 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... La réponse à cette question relève essentiellement de l'approche systémique

---

<sup>1</sup> Elle est très largement basée sur la référence [9] initialement présentée en 1992

- d'autre part, les types primitifs étant identifiés, comment établir les modèles correspondants. L'approche est ici essentiellement analytique, les connexions et interrelations entre les modules étant assurée par des variables de couplage bien choisies

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.

Nous développerons dans une deuxième temps la question de **l'élaboration des modèles numériques**, passant en revue les différents types de modèle scientifiques et leur traduction mathématique.

Nous aborderons ensuite **l'analyse systémique**, pour montrer quelles sont les bases théoriques disponibles et en tirer quelques conclusions quant à la manière de structurer la démarche de modélisation.

## **LES TYPES DE PROBLEMES POSES**

Les problèmes qui se posent le plus souvent à l'ingénieur d'études peuvent être regroupés en trois grandes catégories : la conception de nouveaux dispositifs, la commande de systèmes existants, la caractérisation de composants.

### **La conception de nouveaux dispositifs :**

Lorsqu'on cherche à concevoir un dispositif un peu complexe, il est le plus souvent impossible d'être a priori certain de son bon fonctionnement, surtout si les conditions opératoires sont quelque peu contraignantes. Trois classes de problèmes peuvent ici être recensées :

- la vérification de conformité consiste à s'assurer que le système étudié répond bien au cahier des charges défini par le maître d'ouvrage. Cette phase, importante depuis toujours, se trouve aujourd'hui devenir essentielle pour toute une classe de problèmes où le non respect du cahier des charges peut se traduire par l'impossibilité pure et simple de mener à bien la mission prévue, et non pas simplement par une perte d'efficacité. C'est notamment le cas dans toute une partie du domaine aérospatial.
- L'optimisation correspond à un degré supplémentaire de complexité : non content de s'assurer de la conformité aux spécifications, l'ingénieur cherche alors à minimiser un critère, qui peut être un coût combinant investissement et exploitation.
- La commande du dispositif relève d'une démarche complémentaire. Le système étant conçu, il s'agit de trouver un moyen de le commander qui donne satisfaction. Un chapitre entier de l'automatique s'ouvre ici... Notons à ce propos que, de plus en plus, on cherche à définir la commande en même temps que s'élabore l'architecture du dispositif. On parle alors de conception généralisée.

### **La commande de systèmes existants :**

Lorsque le système existe, et qu'il s'agit de le faire fonctionner au mieux, le problème se pose dans des termes différents :

- en premier lieu, il est nécessaire de l'observer pour en comprendre le comportement, et si possible identifier un modèle qui le représente bien.
- ensuite, le système étant convenablement observé, la commande elle-même devra être définie, ce qui renvoie au point précédent.

## La caractérisation de composants :

Il s'agit dans ce cas, à partir d'une série d'expérimentations appropriées, de déterminer les performances d'un composant ou d'un sous-ensemble, qu'il n'est pas possible d'isoler du système complet, pour des raisons diverses, notamment physiques. Les techniques à employer sont ici les méthodes inverses, ou encore l'identification.

Parmi ces trois grandes catégories, c'est certainement la conception des nouveaux dispositifs, et notamment le souci d'en optimiser les performances, commande incluse, qui correspond au type de problème le plus fréquemment rencontré. En effet, le but poursuivi est de plus en plus souvent l'amélioration de la compétitivité, qu'elle s'exprime par un gain énergétique, un confort accru, un coût d'exploitation réduit, une masse diminuée,...

## 1 MODELE DE GAZ IDEAUX DANS L'ENVIRONNEMENT JAVA

### 1.1 Equations utilisées :

L'équation d'état d'un gaz idéal peut s'écrire :  $pv = rT$

avec  $r = \frac{R}{M}$  (kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

R est la constante universelle = 8,314 (kJ kmole<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

M est la masse molaire du gaz (kg kmole<sup>-1</sup>)

Les capacités thermiques d'un gaz idéal ne sont pas constantes, mais dépendent uniquement de la température.

Le plus souvent, on représente Cp par un ajustement polynomial en T, par exemple sous la forme :

$$C_p = A + B T + C T^2 + D T^3 + E T^4 + \frac{G}{T^2} + \frac{K}{T}$$

Les équations des fonctions d'état thermodynamiques sont les suivantes :

$$\text{Energie interne : } u - u_0 = \int_{T_0}^T C_v(t) dt$$

$$\text{Enthalpie : } h - h_0 = \int_{T_0}^T C_p(t) dt$$

$$\text{Entropie : } s = s_0 + \int_{T_0}^T \frac{C_v(t)}{t} dt + r \ln \frac{v}{v_0} \quad \text{ou} \quad s = s_0 + \int_{T_0}^T \frac{C_p(t)}{t} dt - r \ln \frac{p}{p_0}$$

L'ensemble de ces éléments constitue une représentation des gaz idéaux. Pour la transformer en modèle, il faut réaliser la traduction appropriée de ces équations, associée à l'ensemble des données pertinentes, dans un langage informatique convenable.

Par exemple, les langages objet constituent un mode d'encapsulation particulièrement intéressant, car ils permettent de rassembler dans un même objet, appelé une classe, l'ensemble des éléments de programmation relatifs à un modèle : les données, les variables, et les méthodes, une partie de ces dernières étant accessibles de l'extérieur, tandis que les autres sont cachées pour les utilisateurs.

## 1.2 Schéma de la classe GazIdeal

Dans notre exemple, la classe GazIdeal se caractérisera par :

- comme données, les coefficients A à K pour les différents corps purs, ainsi que leur masse molaire
- comme méthodes les fonctions permettant de calculer les propriétés thermodynamiques intéressantes
- pour les gaz composés, les fonctions d'application de la loi de Dalton fournissant les données du mélange à partir de celles des constituants

Une fois le modèle élaboré, il encapsule effectivement les connaissances correspondantes, et permet de les mobiliser très facilement.

Par souci de clarté et de concision, les variables et méthodes servant au calcul des gaz composés ont été enlevées, et les données ne sont fournies que pour l'air et l'argon. Le code est imprimé en italique, les explications étant en caractères standards.

```
/**
 * Classe des gaz idéaux purs et composés
 *
 */
public class GazIdeal {
```

La classe comprend tout d'abord des déclarations de variables. Leur portée dépend de leur usage : ici, seules V, H, S, Cv, U et PCI sont accessibles de l'extérieur de la classe

```
public double V,H, S,Cv, U,PCI;
private double A,B,C,D,E,F,G,K;
double hf0,sf0,h0,s0,T0;
```

Le rôle du constructeur est de procéder aux initialisations. Ici, il appelle la méthode setPropPur pour un gaz pur, et c'est elle qui effectue les initialisations.

```
/**
 * constructeur GazIdeal
 */
public GazIdeal(String nom_gaz, boolean pur)
{
    if(pur)setPropPur(nom_gaz);
    else setPropComp(nom_gaz);
}
/**
 * initialisation des gaz purs
 * @param nom_gaz String
 */
private void setPropPur(String nom_gaz) {
    if(nom_gaz.equals ("air")){
        M=28.9577634;
        A=11.664138786;B=16.548507822;C=-5.699923263;D=0.495033642;
        E=0.072122872;G=-0.094562097;K=1.690130579;
        hf0=0;sf0=192.727499;h0=0;s0=4.68226591855872;
        PCI=45720.110799;
    }
    else if(nom_gaz.equals ("Ar")){
        M=39.95;
        A=12.471;B=0;C=0;
        D=0;E=0;G=0;K=0;
        hf0=0;sf0=0;h0=0;s0=0;
    }
}
```

}

Les méthodes de calcul des propriétés thermodynamiques se présentent comme suit :

```

/**
 * Cette méthode calcule l'énergie interne molaire
 * @return double
 * @param T double (K)
 */
public double u_gaz_mol(double T){
    double $T=T/1000;
    double $u=0;
        $u=A*($T-0.298)+(B/2*($T*$T-(0.298*0.298)))+(C/3*($T*$T*$T-(0.298*0.298*0.298)));
        $u=$u+(D/4*($T*$T*$T*$T-(0.298*0.298*0.298*0.298)))+(E/5*($T*$T*$T*$T*$T-
(0.298*0.298*0.298*0.298*0.298)));
        $u=$u-(G*(1/$T-(1/0.298)))+(K*Math.log(($T/0.298)));
        return $u*1000;
    }

/**
 * Cette méthode calcule l'entropie molaire
 * @return double
 * @param $T double (K)
 * @param $p double (bar)
 */
public double s_gaz_mol (double $T,double $p) {

    $T=$T/1000;
    double $s=(A+8.314)*Math.log($T/0.298)+(B*($T-0.298))+(C/2.*($T*$T-(0.298*0.298)));
        $s=$s+(D/3.*($T*$T*$T-(0.298*0.298*0.298)))
        +(E/4.*($T*$T*$T*$T-(0.298*0.298*0.298*0.298)));
        $s=$s-(G/2.*(1./($T*$T)-(1/(0.298*0.298)))-(K*(1./$T-(1/0.298)));

        return $s-(8.314*Math.log($p));
    }

/**
 * Cette méthode calcule l'état complet d'un gaz idéal
 * (U,S,H,V,Xh,Cv) en Unités SI
 * @param p double (bar)
 * @param T double (K)
 */
public void etat_complet (double T, double p) {
    U=u_gaz_mol(T)/M ;
    S=s_gaz_mol(T,p)/M ;
    H=U+$R*(T-298)/M;
    V= $R/p*T/100/M;
    Xh=H-(S*T0_xh);
    Cv=(Cp_gaz_mol(T)-$R)/M*1000;
}

} //fin de la classe GazIdeal

```

### 1.3 Aides apportées par l'environnement de modélisation

Une documentation est nécessaire pour utiliser le modèle à bon escient. De plus en plus, les environnements de modélisation cherchent à automatiser son écriture et surtout sa mise à jour. On trouvera ci-dessous un exemple de celle qui est automatiquement générée par l'environnement Java.

## Method Index

- [Cp\\_gaz\\_mol\(double\)](#)  
Cette méthode calcule le Cp molaire.
- [calc\\_fluid\\_com\(int\)](#)  
Cette procédure prépare le calcul par comp\_molaire des coefficients du Cv d'un mélange par application de la loi de Dalton, ainsi que  $\bar{M}$  et  $s_0$ , enthalpie de mélange
- [comp\\_molaire\(int\)](#)  
Calcul des propriétés molaires d'un gaz composé par application de la loi de Dalton
- [etat\\_complet\(double, double\)](#)  
Cette méthode calcule l'état complet d'un gaz idéal (U,S,H,V,Xh,Cv) en Unités SI

En activant l'hyperlien d'un intitulé, on accède à une documentation plus détaillée :

#### ● [etat\\_complet](#)

```
public void etat_complet(double T,
                        double p)
```

Cette méthode calcule l'état complet d'un gaz idéal (U,S,H,V,Xh,Cv) en Unités SI

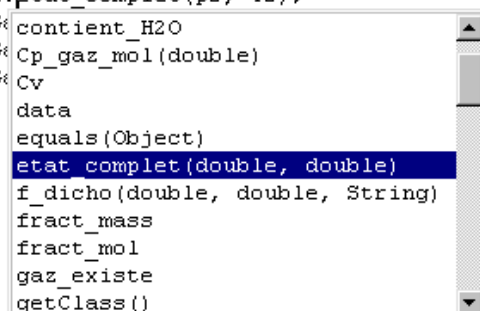
#### Parameters:

p - double (bar)  
T - double (K)

Une fois la classe écrite, son utilisation se fait très simplement, comme le montre l'exemple suivant, permettant le calcul des écarts des valeurs des fonctions thermodynamiques entre deux points.

La classe GazIdeal est instanciée sous le nom de "monGaz", et l'accès à ses variables et méthodes publiques se fait en accolant leur nom à droite de "monGaz.". Si l'environnement de modélisation le permet, ce qui est de plus en plus souvent le cas, l'ensemble des éléments accessibles est automatiquement proposé au modélisateur, ce qui facilite beaucoup l'assemblage des modèles. C'est ce que montre l'exemple suivant : dans la liste proposée apparaissent les variables et les méthodes accessibles de l'extérieur de la classe.

```
public class CalculGaz
{
    double DH, DS, DU;
    CalculGaz(String nomGaz, double p1, double T1, double p2, double T2) {
        GazIdeal monGaz= new GazIdeal(nomGaz, true) ;
        monGaz.etat_complet(p1, T1);
        DH=monGaz.H;
        DS=monGaz.S;
        DU=monGaz.U;
        monGaz.etat_complet(p2, T2);
        DH=DH-monGaz.contient_H2O;
        DS=DS-monGaz.Cp_gaz_mol(double);
        DU=DU-monGaz.Cv;
    }
}
```



## 2 LA NOTION DE MODELE NUMERIQUE

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 supprime 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. En ce sens, il n'y a pas de mauvais modèles, il n'y a que des modèles inadapés ou improprement utilisés.

On peut définir une modélisation 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 analytique). Dans les faits, les modèles utilisés seront fréquemment le fruit d'un compromis entre ces deux manières d'opérer.

### 2.1 Modélisation analytique ou déductive

En fonction des objectifs poursuivis et de la nature des problèmes à résoudre, on aura recours, selon les cas, à des modèles de sophistication variable : par exemple, de par sa plus grande robustesse, une commande en boucle fermée se satisfera d'un modèle beaucoup plus fruste qu'une commande en boucle ouverte.

Trois types de modèles analytiques peuvent ainsi être définis :

- les modèles d'approche, simples mais assez grossiers, ont pour objet de dégrossir le problème en choisissant une représentation simplifiée, "au premier ordre" par exemple, en vue de se faire une idée des principales tendances du comportement du système, et d'identifier les principaux paramètres qui le régissent. Il n'est pas toutefois toujours possible de les établir a priori, du moins avec une précision suffisante en pratique.
- Les modèles de connaissance, très détaillés mais souvent lourds et coûteux d'emploi, se situent à l'autre bout de l'échelle. Basés sur une analyse physique fine des phénomènes en jeu, leur avantage est la précision, mais leur inconvénient est la complexité et la lourdeur de mise en oeuvre. Pour être valables, ils doivent être validés, ce qui peut être une tâche extrêmement compliquée. Ils se présentent comme d'impressionnants empilages d'équations aux nombreux paramètres dont il est difficile de discerner a priori ceux qui sont les plus significatifs.
- Les modèles réduits constituent en quelque sorte le compromis entre la simplicité de mise en oeuvre des modèles d'approche et la précision des modèles de connaissance dont ils sont algorithmiquement issus. Ils traduisent le fait que le comportement d'ensemble d'un système, même complexe, est parfois relativement simple. Les procédures de réduction permettent ainsi de faire le lien théorique entre les lois de la physique (modèles de connaissance) et le comportement d'ensemble des systèmes (modèles identifiés).

**L'élaboration d'un modèle physique, en particulier d'un modèle de connaissance, passe par quatre étapes fondamentales :**

#### 2.1.1 L'analyse physique des phénomènes et l'évaluation critique des hypothèses.

Le passage du système réel au système modélisé requiert l'évaluation et l'analyse des phénomènes mis en jeu. Cette phase est essentielle car elle détermine la justesse et la finesse du modèle; elle nécessite de bonnes connaissances théoriques, une recherche bibliographique systématique, un minimum d'expérience du sujet étudié et surtout une attitude critique vis à vis des hypothèses faites.

En effet, modéliser un système nécessite une évaluation des ordres de grandeurs des phénomènes étudiés (d'où l'importance du rôle des nombres sans dimension et de leur usage correct) et un niveau homogène de complexité. Le côté pluridisciplinaire de cette phase doit être souligné.

### 2.1.2 La sélection de la représentation mathématique adaptée

L'élaboration d'un modèle de connaissance passe par l'écriture mathématique des équations associées aux phénomènes décrits ; cette représentation formelle découle des choix faits au cours de la phase d'analyse physique. Comme on le verra plus loin, plusieurs représentations formelles mathématiques sont possibles (dérivées partielles ou totales, formulation intégrale, ...), et/ou plusieurs schémas de discrétisation envisageables (différences finies, éléments finis, ...). Le choix dépendra des objectifs poursuivis, de la précision recherchée, et de la nature des conditions aux limites. Parfois, comme on le verra plus loin à propos de la thermique linéaire, des prétraitements généraux pourront être effectués sur le formalisme mathématique correspondant aux équations discrétisées, ce qui permettra des gains de temps appréciables pour la suite.

### 2.1.3 Le choix de la méthode de résolution numérique

Le problème ayant été correctement posé, dans un formalisme mathématique approprié, il est possible de procéder à sa résolution.

Dans la plupart des cas, le modèle mathématique n'admet pas de solution analytique, et force est de recourir à des techniques numériques pour obtenir les résultats désirés. L'analyse numérique est une discipline à part entière, souvent mal connue des non-spécialistes comme les thermiciens. Parmi les méthodes couramment employées, il faut en premier lieu citer les techniques de résolution des systèmes linéaires du type  $AX=B$ , telles que la méthode de Gauss, et les techniques plus générales pour les systèmes non linéaires (dichotomie, Newton-Ralphson,...). Viennent ensuite les méthodes spécifiques aux problèmes non stationnaires, qui nous intéressent particulièrement ici : discrétisation par rapport au temps, cohérence, convergence et stabilité du schéma de discrétisation.

Enfin, quand c'est nécessaire, il faut faire appel aux méthodes de résolution des systèmes d'équations différentielles (Runge Kutta,...), ou d'équations aux dérivées partielles (méthode des caractéristiques,...).

De plus en plus, ces méthodes font appel à des sous-programmes standards disponibles dans les bibliothèques mathématiques, ce qui en simplifie l'usage. Un pas de plus est franchi avec l'apparition d'interfaces intelligentes ou de systèmes-experts capables de sélectionner automatiquement les procédures numériques les mieux adaptées à la résolution d'un problème donné.

### 2.1.4 L'élaboration d'un programme informatique

Aujourd'hui, dans la quasi-totalité des cas, un modèle se présente in fine sous la forme d'un programme de calcul scientifique constituant la traduction informatique de l'ensemble des étapes précédentes.

Depuis 1980, le développement des capacités de calcul et des langages d'Intelligence Artificielle permet d'envisager une approche nouvelle de l'outil numérique : on voit apparaître, outre des codes de calcul numérique mettant en oeuvre des méthodes et algorithmes connus, des environnements plus puissants de type CAO dont le rôle est de briser les barrières qui existent entre la représentation formelle d'un problème et sa résolution.

Cette évolution a déjà été constatée en construction mécanique (DAO, CAO), en design industriel, en architecture, en bureautique (traitement de texte, logiciels graphiques) et fait une apparition en ingénierie, recherche et enseignement. Depuis peu existent des logiciels scientifiques à environnement souple, à large spectre d'applications, aux conditions d'utilisation variables (géométrie, conditions aux limites,...).



## 2.2 Validation des modèles

Comme indiqué plus haut, un modèle ne constitue qu'une représentation abstraite de la réalité physique, et il importe de garder en permanence à l'esprit cette limite. Cependant, l'expérience prouve que, dès lors qu'un modèle a été élaboré, on y a recours très fréquemment. Une précaution élémentaire, quoique quelquefois difficile à mettre en oeuvre, consiste à valider ce modèle en le comparant à des résultats expérimentaux. Cette démarche soulève en pratique de nombreuses difficultés, dont deux fondamentales :

- l'expérimentation et l'instrumentation
- la procédure de validation.

### 2.2.1 L'expérimentation et l'instrumentation

L'objectif premier de la modélisation étant de reproduire le plus fidèlement possible le comportement d'un système réel, il est très important d'être capable d'observer quantitativement ce système; d'où le rôle fondamental de l'instrumentation et les difficultés qui s'y rattachent :

- le choix d'instruments de précision suffisante et adaptés au système étudié (constantes de temps, domaine de validité des mesures)
- la connaissance des biais et des erreurs systématiques introduits par la présence de l'instrument (biais entre la grandeur du modèle et la valeur mesurée, incertitudes).
  - le choix des paramètres numériques introduits dans le modèle (conditions expérimentales différentes, bibliographie incertaine).

### 2.2.2 La procédure de validation

Il ne suffit pas de disposer de données expérimentales de qualité pour pouvoir valider un modèle. Il faut encore que le modèle soit suffisamment sensible aux conditions d'essais pour que des conclusions fiables puissent être obtenues. A titre d'exemple, on sait que, dans un émetteur de chauffage parcouru par de l'eau en circulation forcée, la résistance thermique entre l'eau et le métal est très faible devant celle qui existe entre le métal et l'air ambiant. Compte tenu des imprécisions sur la seconde, on ne pourra généralement pas obtenir la valeur de la première par une expérimentation en conditions réelles, si bonne soit-elle.

La validation des modèles de connaissance de dimensions significatives pose donc des problèmes méthodologiques très complexes, qui d'ailleurs sont confirmées partiellement par les théories de réduction de modèles et de l'identification, qui montrent bien qu'étant donné un jeu d'entrées et de sorties (données expérimentales), il est loin d'y avoir unicité de modèle de connaissance.

## 2.3 Modélisation empirique ou inductive

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.

Lorsqu'une modélisation déductive est possible, celle-ci permet de donner la forme générale d'un tel modèle (voir les théories de la réduction de modèles). On retrouve ici les concepts de **boîte noire** ou **boîte grise** introduits par l'approche systémique (voir plus loin).

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,...).

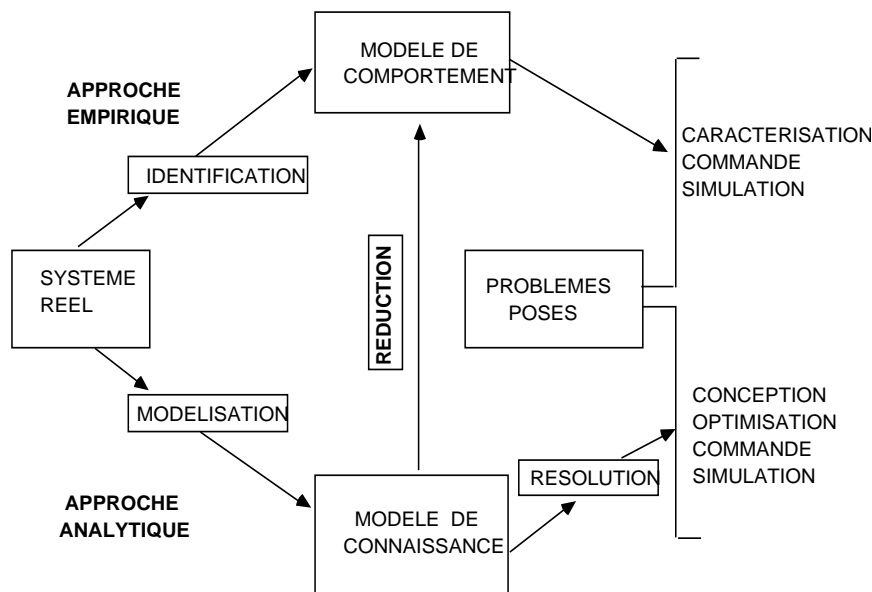
Parmi celles-ci, l'identification ouvre des perspectives particulièrement attrayantes : une étude du type boîte-noire peut permettre, en analysant les seules entrées et sorties d'un système, d'obtenir de bons modèles de comportement, même en l'absence d'une mise en équation préalable sur la base des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

Dans une approche 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 inductive, les paramètres n'ont souvent aucun sens physique direct.

Les techniques d'identification sont empruntées aux mathématiques appliquées (techniques statistiques) et à l'automatique : pour minimiser l'erreur entre grandeurs calculées et valeurs expérimentales, on fait appel à des algorithmes d'identification :

- identification en-ligne et hors-ligne
- méthodes du gradient, des moindres carrés, récursive.

## 2.4 PANOPLIE DES TECHNIQUES DE MODELISATION



En résumé, pour étudier un système réel, le modélisateur peut ainsi faire appel à une panoplie de techniques de modélisation, qui peut être schématiquement représentée par la figure ci-dessus.

L'approche analytique ou déductive consiste à élaborer un modèle de connaissance en décomposant le système en éléments suffisamment petits pour que les lois de la physique soient applicables. Facilitée par l'utilisation d'interfaces informatiques puissantes, elle fournit un outil polyvalent mais coûteux et parfois lourd à mettre en oeuvre, utilisable aussi bien pour la conception, l'optimisation, la commande ou la simulation.

L'approche empirique ou inductive, basée sur l'étude globale du comportement entrée-sortie du système par voie expérimentale, consiste à identifier un modèle synthétique, très concis, utilisable pour la caractérisation, la simulation ou la commande, mais peu adapté à l'optimisation ou la conception.

Entre ces deux approches, des ponts existent, comme par exemple les procédures de réduction de modèles.

Ces deux approches constituent deux cas limites, le système complet étant soit décomposé analytiquement de manière très fine, pour établir un modèle de connaissance, soit considéré globalement pour identifier un modèle de comportement.

En fait, il est tout à fait possible de panacher ces deux techniques et d'établir un modèle composite où certains composants du système sont modélisés analytiquement et certains autres empiriquement.

Parmi les quatre étapes de la modélisation déductive que nous venons de présenter, seules la première, et à moindre degré la seconde, correspondent aux domaines de compétence et aux centres d'intérêt principaux du modélisateur. Les deux dernières sont nécessaires mais relèvent de disciplines différentes : l'analyse numérique et le génie logiciel.

Comme nous le verrons par la suite, la tendance actuelle est de donner à l'ingénieur la possibilité de se concentrer sur les points qui constituent son domaine d'excellence, à savoir l'analyse physique des phénomènes et le choix du formalisme mathématique adapté.

Nous allons donc maintenant approfondir ces deux points, avant d'aborder la présentation des techniques de modélisation des systèmes.

## **2.5 Elaboration des modèles physiques**

Dans cette section, nous étudierons plus précisément ce que l'on a coutume d'appeler l'élaboration des modèles physiques, en examinant les diverses formes de modèles qui peuvent être obtenues, selon les hypothèses retenues.

Dans la pratique, le modélisateur sélectionne le type de modèle à mettre en oeuvre en fonction des objectifs qu'il poursuit. Son choix est le résultat d'un compromis réaliste entre la finesse, donc la précision de la modélisation, et le coût de la résolution, donc sa complexité mathématique.

Si l'on cherche à dresser une typologie des modèles, il est en conséquence intéressant de retenir deux voies d'approche complémentaires, selon que l'on distingue :

- le niveau de finesse de la modélisation, depuis la prise en compte des phénomènes corpusculaires jusqu'à l'établissement des bilans macroscopiques sur des sous ensembles discrets agrégés.
- la forme mathématique du modèle généré : équations algébriques, différentielles ou aux dérivées partielles.

La première typologie permet d'analyser la manière dont les modèles s'emboîtent l'un dans l'autre, à la manière des poupées russes, en fonction du niveau de finesse recherché. Ils illustrent la continuité qui existe entre les phénomènes atomiques ou moléculaires et les grandeurs de dimensionnement recherchées par l'ingénieur. (Elle ne permet cependant pas de conclure sur le niveau souhaitable d'analyse).

La deuxième typologie permet de classer les modèles selon leur complexité mathématique, et donc les difficultés qui seront rencontrées lors de la phase de résolution.

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

- les **variables intensives**, telles que pression, température, tension électrique, qui correspondent à des fonctions de potentiel,
- les **variables extensives**, telles que débit, flux de chaleur ou d'entropie, intensité, qui correspondent à des fonctions de flux.

Une variable 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 de congélation de l'eau.

Une variable extensive est en revanche définie par la donnée du point considéré, et représente la mesure du flux traversant une section élémentaire du milieu. Le débit en mécanique des fluides est un exemple de telle variable.

D'une manière générale, les modèles de la thermique sont établis en écrivant les lois de continuité et de conservation des variables extensives : masse, énergie, et quantité de mouvement, les bilans étant établis au niveau de volumes de contrôle de dimensions variables.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{accumulation} \\ \text{nette dans le} \\ \text{volume de contrôle} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{transport net} \\ \text{entrant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{transport net} \\ \text{sortant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{génération} \\ \text{nette dans} \\ \text{le volume} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Consommation} \\ \text{nette dans} \\ \text{le volume} \end{array} \right\}$$

Construire un modèle consiste à traduire cette expression sémantique en un jeu d'équations et à fixer les conditions initiales et aux limites, puis à écrire le programme informatique correspondant.

### 2.5.1 Niveau corpusculaire ou microscopique

La plus fine modélisation possible aujourd'hui consiste à analyser un phénomène au niveau corpusculaire. A ce niveau, les modèles considèrent que le volume de contrôle est composé d'éléments discrets, atomes, molécules, corpuscules, qui interagissent en suivant certaines lois. Les propriétés globales sont obtenues par sommation sur l'ensemble des corpuscules considérés.

Les méthodes utilisées correspondent à la mécanique quantique, la thermodynamique microscopique et statistique,... Malheureusement, la complexité mathématique des modèles générés est telle qu'en pratique le thermicien n'y a recours qu'exceptionnellement. Ce niveau d'analyse n'est donc mentionné ici que pour mémoire.

### 2.5.2 Modèles macroscopiques continus

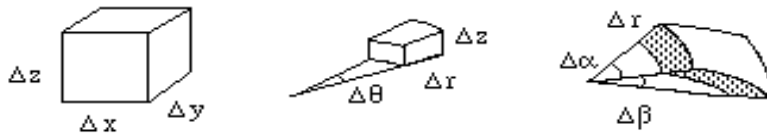
Les modèles macroscopiques continus sont établis, comme on va le voir, sur les bases des lois phénoménologiques, en faisant l'hypothèse que le milieu étudié peut être considéré comme continu.

Alors que, dans l'analyse précédente, on "comptait" atomes ou molécules, on s'intéresse ici à des volumes de contrôle qui, bien que très petits, contiennent déjà des nombres de molécules considérables.

A titre d'exemple, dans l'état normal, 1 micron cube d'un gaz parfait contient  $2.69 \cdot 10^7$  molécules. Or, à l'échelle de l'ingénieur, 1 micron cube correspond à un volume de contrôle infiniment petit.

Dans l'analyse macroscopique, l'écriture des bilans de conservation s'écrit en considérant un élément de volume de petite taille, choisi dans le système de coordonnées le plus adapté à la géométrie considérée.

Le plus généralement, il s'agit de coordonnées cartésiennes, cylindriques ou sphériques (voir figures ci-dessous)



La démarche consiste à écrire le bilan sur l'élément de volume considéré, puis à passer à la limite en faisant tendre les côtés du volume vers 0.

Comme :

$$\frac{\partial f(x, y, z, t)}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x; y; z; t) - f(x; y; z; t)}{\Delta x}$$

le passage à la limite met en évidence, dans le cas général, une expression mathématique où apparaissent des dérivées partielles.

A titre d'exemple, écrivons en coordonnées cartésiennes, la loi de conservation de la masse pour un fluide pur.

Soit :  $\rho$  la masse volumique du fluide  
 $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$  la vitesse du fluide.

L'accumulation de masse dans le volume s'écrit :  
 $[\rho \Delta x \Delta y \Delta z]_{t+\Delta t} - [\rho \Delta x \Delta y \Delta z]_t$

La masse entrant par la surface (par transport) :  
 $[V_x \rho \Delta t \Delta y \Delta z]_x + [V_y \rho \Delta t \Delta x \Delta z]_y + [V_z \rho \Delta t \Delta x \Delta y]_z$

La masse sortant par la surface (par transport) :  
 $[V_x \rho \Delta t \Delta y \Delta z]_{x+\Delta x} + [V_y \rho \Delta t \Delta x \Delta z]_{y+\Delta y} + [V_z \rho \Delta t \Delta x \Delta y]_{z+\Delta z}$

Comme il n'y a pas de terme de consommation ou de génération de masse, le bilan s'écrit :

$$(1) \frac{[\rho]_{t+\Delta t} - [\rho]_t}{\Delta t} = \left[ \frac{[\rho V_x]_x - [\rho V_x]_{x+\Delta x}}{\Delta x} + \frac{[\rho V_y]_y - [\rho V_y]_{y+\Delta y}}{\Delta y} + \frac{[\rho V_z]_z - [\rho V_z]_{z+\Delta z}}{\Delta z} \right]$$

Par passage à la limite :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0$$

Parmi les modèles de la thermique-énergétique couramment décrits sous cette forme, on peut citer :

- les équations de la thermodynamique macroscopique, généralement exprimées à l'équilibre,
- les équations de la conduction,
- les équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes).

L'intérêt de ce type d'analyse est qu'elle correspond à un très grand pouvoir descriptif. Dans la réalité, les propriétés des milieux étudiés peuvent dépendre de leur position spatiale et du temps : elles sont distribuées, et seul le formalisme des équations aux dérivées partielles permet de les prendre en compte avec précision.

Les milieux étudiés en physique étant toujours dans la pratique de volume macroscopique, l'écriture des modèles continus conduit à une **représentation physiquement juste** de ce qui se passe au sein de la masse. Connaissant les conditions aux limites et les conditions initiales, il est théoriquement possible d'intégrer les équations obtenues et d'avoir ainsi accès aux grandeurs globales qui intéressent l'ingénieur.

En pratique cependant, un certain nombre de problèmes vont se poser lors de cette intégration :

Tout d'abord, dans l'exemple traité, on voit qu'il est nécessaire de connaître précisément la loi d'évolution des vitesses pour pouvoir déterminer celle de la masse volumique. Souvent, cette connaissance échappe au modélisateur. C'est le cas, par exemple, d'un écoulement turbulent où les vitesses instantanées dans les trois directions varient très rapidement. Tout au plus a-t-on dans ce cas accès à une vitesse moyenne.

Ensuite et surtout, les équations aux dérivées partielles n'ont que très rarement des solutions analytiques, et leur résolution numérique est complexe et coûteuse en temps calcul.

La difficulté fondamentale provient de ce que les dimensions de l'espace d'état (coordonnées spatiales et temporelle) sont infinies.

En conclusion donc, l'analyse conduit à des modèles très justes, mais difficiles à manipuler.

### 2.5.3 Modèles macroscopiques continus moyennés

Lorsqu'une des grandeurs intervenant dans les équations est impossible à déterminer avec exactitude, les modèles macroscopiques moyennés, à la différence des précédents, sont établis en remplaçant cette grandeur par une valeur moyenne plus une perturbation de moyenne nulle. L'introduction de cet artifice dans les équations a pour effet de remplacer la grandeur inconnue par sa valeur moyenne, et de faire apparaître des termes supplémentaires représentant les produits croisés des perturbations, qui eux n'ont pas de moyenne nulle.

Le principal domaine d'application de cette méthode est l'étude de la turbulence, notamment en mécanique des fluides et en convection.

Le formalisme auquel on aboutit reste encore ici celui des équations aux dérivées partielles.

### 2.5.4 Modèles moyennés unidimensionnels

Dans de nombreux cas, l'analyse du phénomène étudié permet de mettre en évidence l'existence d'une direction privilégiée d'écoulement du flux.

C'est le cas par exemple dans un échangeur à contre-courant à tubes concentriques, où les variations longitudinales des grandeurs physiques sont beaucoup plus importantes que leurs variations radiales.

Dans les modèles moyennés unidimensionnels, on néglige toutes les variations autres que celle qui correspond à la composante maximale du gradient. Grâce à cette hypothèse, on simplifie considérablement le formalisme mathématique, en ne conservant pour l'espace d'état qu'une variable spatiale et le temps. De plus, lorsqu'on ne s'intéresse qu'au régime permanent, le formalisme se simplifie encore, le modèle devenant algébro-différentiel.

Il faut noter que les modèles moyennés unidimensionnels sont très couramment utilisés car ils permettent souvent de bien dégrossir un problème tout en conservant l'hypothèse d'une variation continue d'une variable de position. De nombreux problèmes peuvent en première approximation être considérés comme monodimensionnels et se prêter à cette approche.

Citons par exemple, en mécanique des fluides, la théorie des écoulements unidimensionnels, le calcul de nombreux écoulements industriels (tuyères, calcul des aubages, conduites en charge,...), ou bien, en thermocinétique, le domaine de la convection forcée et de nombreux problèmes de conduction.

### 2.5.5 Modèles agrégés

Souvent, il n'est pas utile (ou possible) de connaître le fonctionnement interne d'un procédé, même par une méthode unidimensionnelle moyennée.

On néglige alors tous les gradients, en faisant l'hypothèse d'un milieu homogène brassé, et les grandeurs étudiées deviennent indépendantes de la position. Les variables indépendantes sont le temps, le titre d'un mélange de phase, les concentrations de constituants,... mais considérés comme valeurs moyennes. Ce type de modèle est souvent appelé modèle agrégé (lumped parameters model)...

On aboutit alors à des modèles macroscopiques souvent calés à l'expérience par des paramètres impossibles à calculer théoriquement, tels que des rendements globaux ou efficacités.

C'est le cas par exemple de nombreuses transformations thermodynamiques dans des organes de compression ou de détente, où les irréversibilités sont déterminées par l'intermédiaire d'un rendement isentropique, ou par un coefficient polytrophique.

C'est le cas aussi des systèmes où l'on s'intéresse à l'état final sans se soucier des transitoires.

## 2.6 Classification selon la forme mathématique

### 2.6.1 Formalismes mathématiques obtenus

Les modèles physiques comportent par ordre de complexité trois types d'équations :

- algébriques,
- différentielles ordinaires (EDO),
- aux dérivées partielles (EDP).

Les équations algébriques ne comportent par définition aucune forme dérivée. Elles ne peuvent servir à représenter des variations continues spatiales ou temporelles. Les modèles utilisant ces équations correspondent donc, dans la typologie précédente, à des modèles agrégés en régime permanent.

Dans une équation différentielle ordinaire, il n'existe qu'une seule variable indépendante qui varie continûment. On est donc limité soit à une seule variable d'espace, soit à une variation dans le temps.

Le premier cas est celui des modèles moyennés unidimensionnels en régime permanent, le second celui des modèles agrégés en régime transitoire. Ces deux cas correspondent en fait déjà à une grande variété d'applications. Comme le traitement mathématique des systèmes algébrodifférentiels est d'une complexité bien moindre que celui des systèmes d'EDP, les modèles de ce type sont très souvent utilisés.

L'intérêt des équations aux dérivées partielles est, on l'a vu, qu'elles correspondent au formalisme naturel dans lequel l'ingénieur décrit ses modèles physiques dans les milieux continus.

Deux, trois ou quatre variables indépendantes peuvent être considérées en même temps lors de la modélisation. Dans la plupart des cas, le temps est l'une au moins des variables indépendantes, et le nombre des autres dépend de la géométrie considérée. L'utilisation de coordonnées cylindriques ou sphériques permet de réduire le nombre de variables spatiales lorsque des symétries de révolution existent.

Le principal inconvénient des EDP est que leur résolution est d'autant plus complexe que le nombre de variables indépendantes est grand.

Un artifice consiste donc à discrétiser l'espace pour remplacer le milieu continu par la juxtaposition de volumes finis et d'écrire pour chacun de ces volumes les équations de bilan, en ne gardant qu'un seul terme dérivé, par exemple le temps. Si le volume choisi est suffisamment petit pour qu'on puisse le considérer homogène, on remplace la résolution d'une seule EDP par celle d'un grand nombre d'EDO. Ces méthodes (différences finies, volumes finis) sont très couramment employées, notamment pour étudier les modèles unidimensionnels en régime dynamique.

### 2.6.2 Critères de choix lors de la modélisation

Lorsqu'on désire modéliser un système ou un composant, on cherche toujours à aboutir à un ou des objectif(s) bien déterminé(s). L'explicitation de cet (ces) objectif(s) correspond à une étape fondamentale de la modélisation, en ce sens qu'elle conditionne fortement les choix fondamentaux, notamment concernant le formalisme mathématique retenu.

#### 1) Equations aux dérivées partielles

Outre qu'elles permettent de conserver le formalisme naturel d'écriture des bilans dans les milieux continus, les EDP donnent accès aux variables de position dans le milieu. En ce sens, elles permettent d'étudier finement les caractéristiques géométriques des composants étudiés.

Le champ d'application privilégié des modèles qui font appel à elles est donc celui de la **conception géométrique des pièces complexes** (détection des zones de contraintes maximales, études de points chauds, étude des écoulements, tracé de profils...).

Leur inconvénient est que les méthodes de résolution sont lourdes et peu maniables, et ne se justifient donc pas toujours.

## 2) Equations différentielles ordinaires

Les modèles utilisant des EDO sont le plus souvent des versions simplifiées des précédents : modèles agrégés dynamiques, modèles statiques unidimensionnels.

Simplifiés, ces modèles sont souvent moins "naturels", car tronqués du fait d'hypothèses diverses, implicites ou explicites. Leur principal intérêt est que les simplifications effectuées les rendent généralement beaucoup plus maniables que les modèles à paramètres distribués.

En particulier, il est presque toujours possible de les linéariser autour d'un point d'équilibre ou dans un intervalle de variation restreint, auquel cas on dispose d'un appareil mathématique considérable pour étudier le phénomène considéré : description interne linéaire, analyse modale, description externe par fonctions de transfert, étude de la stabilité, critères d'observabilité et de commandabilité, identification des paramètres du modèle,...

L'introduction des conditions aux limites pour l'étude des systèmes en régime varié se prête, dans le cas des EDO, à un formalisme relativement simple de couplages de modèles de composants et de définition d'un vecteur de sollicitations excitant le système.

De plus, il est relativement facile de prendre en compte des variations de structure du système considéré en couplant un automate au jeu d'équations algébro-différentielles.

Comme les techniques de résolution des EDO sont beaucoup plus développées que celles des EDP, on trouve des solveurs capables de résoudre dans d'excellentes conditions des modèles possédant plusieurs centaines d'équations et sièges de discontinuités.

Un autre point à considérer est qu'il existe souvent des liens relativement clairs entre les modèles physiques aux EDO et les modèles de comportement obtenus par les méthodes d'approche empiriques. Dans certains cas, ces liens peuvent être expliqués dans le cadre d'une théorie de réduction des modèles, et donner lieu à des procédures algorithmiques particulières (modèles linéaires en thermique par exemple).

Dans d'autres cas, ils proviennent simplement de la similarité des hypothèses implicitement ou explicitement retenues lors de l'élaboration des modèles.

Pour toutes ces raisons, les modèles représentés par des systèmes algébro-différentiels sont aujourd'hui très largement employés dans le domaine des sciences de l'ingénieur, et l'art de ce dernier consiste souvent à trouver les hypothèses judicieuses permettant de transformer une modélisation aux EDP en une modélisation aux EDO.

En conclusion, le formalisme des EDO correspond à un champ de modèles extrêmement vaste, pour lequel on dispose d'outils d'analyse éprouvés. Il est en particulier sans doute le mieux adapté à l'étude des **systèmes interconnectés et sièges de discontinuités**, car il permet d'en analyser la stabilité, l'observabilité et la commande.

En revanche, les modèles aux EDO sont moins adaptés que les modèles aux EDP pour la définition précise des géométries des pièces ou composants de systèmes.

Les deux types de formalisme apparaissent ainsi complémentaires et le choix entre eux sera fait en fonction des objectifs poursuivis par le modélisateur.

## 3 LA DEMARCHE SYSTEMIQUE

La notion de système est apparue il y a moins de 50 ans comme un dénominateur commun à des disciplines aussi diverses que l'économie, l'énergie, la biologie, la sociologie, ... pour mieux comprendre la complexité organisée.

En fait, cette nouvelle discipline est née des limites de la méthode cartésienne classique, paradigme dominant dans le monde scientifique occidental, qui reste encore bien adaptée à l'analyse des phénomènes arborescents, même complexes, mais dont le formalisme ne permet pas d'aborder dans de bonnes conditions l'étude des grands systèmes fortement couplés, d'où on ne peut isoler des "parcelles" solubles indépendamment du tout.



### 3.1 Démarche cartésienne et démarche systémique

Les limites de la démarche cartésienne sont d'autant plus claires que l'on s'intéresse à des systèmes complexes et organisés, finalisés et capables d'évoluer et de s'adapter de manière autonome.

La connaissance des lois de comportement des éléments fondamentaux du système ne permet en effet pas nécessairement de comprendre le comportement de l'ensemble, qui n'est pas réductible à la somme des parties : l'être humain ne peut se résumer à une somme d'organes et à un squelette,...

Pour appréhender la complexité organisée, la démarche systémique met l'accent sur les fonctionnalités, les relations, les boucles de rétroaction, la mémoire, l'autoadaptativité,... autant de notions qui passent de plus en plus dans le vocabulaire courant, mais qui manquent encore d'un cadre conceptuel général universellement reconnu.

Le discours de la méthode de Descartes, fondement de la démarche scientifique classique, est basé sur quatre préceptes fondamentaux remis en cause par les systémiciens :

#### Précepte d'évidence

*"Le premier [est] de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la [connaisse] évidemment être telle, c'est-à-dire d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention, et de ne comprendre rien de plus en mes jugements que ce qui se [présente] si clairement et si distinctement à mon esprit que je n'[aie] aucune occasion de la mettre en doute".*

Ce précepte appelle deux remarques :

- d'une part la subjectivité du concept d'évidence. L'histoire des sciences et des pensées l'a abondamment montré, de nombreuses évidences proclamées ont par la suite été remises en cause pour finir par être abandonnées...
- d'autre part, nous avons parfois à traiter de problèmes non évidents mais cruciaux, que le premier précepte de Descartes tendrait à écarter, faute de clarté et d'évidence.

Contre ce précepte d'évidence, les systémiciens opposent le principe de pertinence : c'est par rapport à des finalités explicites que notre intelligence s'exerce. Un concept sera pertinent s'il est opératoire, et non pas s'il est évident dans l'absolu.

#### Précepte de décomposition

*"Le second, de diviser chacune des difficultés que j'[examinerai] en autant de parcelles qu'il se [peut] et qu'il [est] requis pour les mieux résoudre".*

Derrière ce précepte, si unanimement accepté, se cache une difficulté de taille : Descartes n'explique pas comment doit se faire la division, et une division inadaptée peut accroître la difficulté du problème...

A cette démarche descendante, l'approche systémique tend à associer une démarche ascendante, partant des parties et remontant vers le tout, ouverte sur l'environnement du système...

#### Précepte causaliste

*"Le troisième, de conduire par ordre mes pensées en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connaissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres".*

Ce précepte causaliste est lui aussi à la base d'une grande partie des modes de pensée occidentaux. Valable pour les systèmes simples suivant des lois déterministes, il est cependant caduque pour les systèmes évolués susceptibles de rompre les chaînes causales pour atteindre leurs objectifs.

L'échec de nombreux modèles prévisionnistes basés sur l'extrapolation des "lois du passé" est là pour en témoigner.

Au précepte causaliste, l'approche systémique oppose le principe téléologique, qui fait de la réflexion sur les finalités de l'objet à connaître l'une des clés de lecture.

De même que la démarche descendante s'alliait étroitement au précepte causaliste, la démarche ascendante ouverte sur l'environnement s'associe étroitement à la réflexion sur les finalités, ce qu'illustre la portée du concept de systèmes à buts, s'adaptant et innovant pour atteindre leurs objectifs.

### **Précepte d'exhaustivité**

*"Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales que je [sois] assuré de ne rien omettre".*

En fait, ce quatrième précepte était souvent mis en défaut, car... impraticable... en pratique.

Conscients de l'impossibilité de respecter ce dernier précepte, les systémiciens lui préfèrent un principe d'agrégativité, lié au principe de pertinence, selon lequel, toute représentation étant nécessairement subjective, il importe plus de rechercher des règles permettant de sélectionner de manière pertinente les agrégats à considérer, plutôt que de se bercer d'illusions sur l'objectivité d'un recensement objectif.

On le voit, dans un élan fondateur, l'école de pensée systémique cherche à se démarquer résolument du cartésianisme. Sans doute est-ce d'autant plus nécessaire que l'objectif est d'aborder l'étude des grands systèmes organisés (biologiques, sociaux, écosystèmes,...), qu'il est clair que le mode de pensée occidental dominant ne permet pas de maîtriser complètement.

## **3.2 Complémentarité des deux démarches pour l'étude des systèmes physiques**

Pour ce qui nous intéresse, à savoir les systèmes techniques programmés et même autoadaptatifs, il semble qu'il y ait en fait plus complémentarité qu'antinomie.

Nous essaierons donc de bénéficier des éclairages que chacun des deux modes de pensée peut fournir, espérant ainsi faire apparaître une image en relief plus aisément accessible à notre compréhension.

S'appuyant sur des notions telles que la boucle de réaction négative, la mémoire, l'auto-adaptativité, la démarche systémique a l'ambition d'offrir une clé de lecture générale permettant de mieux maîtriser les systèmes complexes, de les appréhender dans leur globalité, en fournissant l'accès à leurs invariants fondamentaux, leurs principaux déterminants, qui échappent à l'approche analytique classique.

A la vision microscopique fournie par cette dernière, qui cherche à ramener un système à ses éléments constitutifs les plus simples grâce à un grand luxe de détails, mais au prix de la perte de la perspective d'ensemble, la démarche systémique oppose une vision macroscopique qui se contente d'un certain flou dans les détails, mais offre la compréhension du comportement global.

Pendant longtemps, ces deux démarches ont été considérées comme antinomiques. Les systémiciens se contentaient d'une description grossière des phénomènes élémentaires, arguant, souvent à juste titre, que leur objectif totalisant n'avait que faire de la précision analytique, laquelle conduisait à des modes de représentation trop lourds pour être utilisables en pratique. Les analystes, quant à eux, se refusaient à accorder confiance à des résultats fournis par des modèles qu'ils considéraient faux selon leurs critères.

En fait, certains indices laissent penser que cette situation tranchée est susceptible d'évoluer à très court terme, démarche analytique et démarche systémique pouvant être conciliées de plus en plus fréquemment, grâce d'une part à l'emploi de techniques d'analyse puissantes assistées par ordinateur, et d'autre part au développement de méthodes permettant de réduire algorithmiquement les modèles complexes, pour mettre en évidence, pour une finalité déterminée, des modèles de comportement concis mais très précis.

### 3.3 Principes de la modélisation systémique

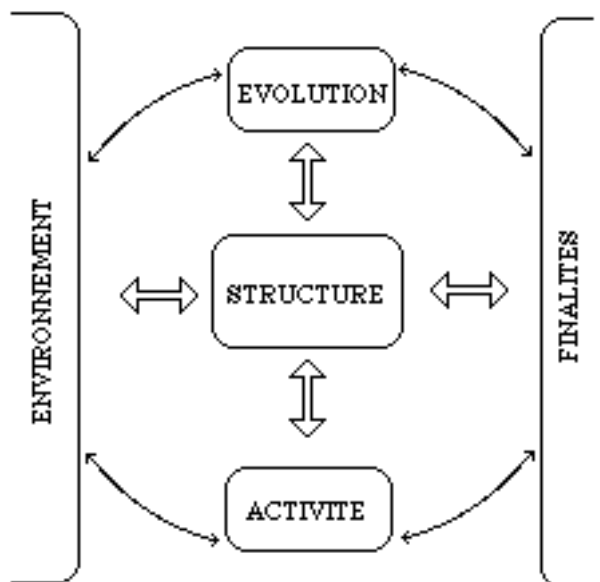
Présenter brièvement la démarche de modélisation systémique est d'autant moins facile qu'il s'agit d'une théorie en pleine évolution, qui manque encore d'un cadre théorique universellement reconnu.

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.

L'originalité de cette présentation est de construire un Système Général, artificiel, possédant toutes les caractéristiques systémiques fondamentales. Ce modèle des modèles, en quelque sorte, fournira une grille d'analyse de tous les systèmes réels, dont le principal intérêt sera de constituer un guide opératoire pour la modélisation.

#### 3.3.1 La Théorie du Système Général

Toute définition a priori d'un système étant soit trop restrictive soit trop vague pour être opérationnelle, J. L. Le Moigne le définit à partir de la description de la figure suivante :



Un système est donc "un objet qui, dans un environnement, doté de finalités, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au cours du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique",  
ou encore :

"Un objet actif )  
et stable ) dans un environnement,  
et évoluant ) et par rapport à quelque finalité."

La Théorie du Système Général se donne comme objectif de décrire le Système Général présentant les "traits permanents associés à la conjonction" de ces cinq concepts.

Ce Système Général, constituera alors une référence fondamentale pour le modélisateur qui, lorsqu'il aura à construire le modèle d'un système existant ou projeté, fera en sorte que ce modèle soit isomorphe au S G (et bien sûr homomorphe au système réel).

#### 3.3.2 Les Concepts de base du Système Général

##### • Activité du Système Général

Alors que, dans la phase d'élaboration des modèles physiques, l'accent a été mis sur la description analytique des lois phénoménologiques, l'**activité** du Système Général va se focaliser, conformément à l'esprit de la démarche systémique, sur les **fonctionnalités** des éléments étudiés.

### a) Les processus

L'un des concepts de base pour décrire le S G est celui de **processus**, intégrant la notion de temps qui s'écoule, et représentant "tout changement dans le temps de matière, d'énergie ou d'information".

Un **processeur** déplacera un objet "processé" dans un référentiel TEF à trois coordonnées : le temps, l'espace, la forme. Il représente bien la ou les fonctionnalité(s) d'un composant du système.

Des processeurs particuliers pourront ainsi se limiter à un changement dans le temps (processeurs T tel que stockage, mémorisation), dans l'espace (processeurs E tel que transport, communication) ou encore dans la forme (processeurs F tel que transformateur). Les plus généraux effectueront des changements dans les trois directions à la fois.

Très classiquement, on distingue trois grandes catégories parmi les objets "processés", **la matière, l'énergie et l'information**. La description mathématique de leur évolution fera appel à la notion de variables d'état, *essentiellement les variables intensives et extensives étudiées plus haut.*

Processeurs types		
	de matière-énergie	d'information
<b>E Processeurs</b>	ingesteur	lecteur
	injecteur	récepteur
	distributeur	canal
	extrudeur	émetteur
	extracteur	
<b>T Processeurs</b>	stockeur	mémoire
	magasineur	duplicateur
	accumulateur	
<b>F Processeurs</b>	destructeur	décodeur
	producteur	codeur
	filtreur	calculateur
	catalyseur	régulateur

Plus finement, on différencie parmi les flux d'information, les signaux de commande (les ordres), des autres (les données) (voir tableau). Ces flux d'information vont revêtir une grande importance pour observer le système et le contrôler. *Ils sont à la base de la construction des automates de régulation.*

### b) **La boîte noire**

Pour décrire un processus, la démarche analytique classique a recours à l'écriture de l'ensemble des relations qui expliquent son comportement interne. 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 processus, sans aucune hypothèse sur son contenu physique ou abstrait, on parle de modèle "boîte noire". Ce concept s'est avéré très puissant, notamment en automatique, où bien souvent il n'est pas nécessaire de connaître un processus de l'intérieur pour le commander. *Le lien entre la notion de boîte noire et les modèles de comportement présentés plus haut est immédiat.*

Dans une telle représentation, les variables associées aux intrants et extrants sont appelées variables de couplage. Le lien de causalité existant entre les extrants et les intrants correspond à la distinction entre variables dépendantes et indépendantes.

### c) La boîte grise

Dans un certain nombre de cas, on connaît partiellement le contenu du processus, 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 modèle "boîte grise". *Cette notion, qui reste très floue, correspond à peu près, en physique, aux modèles agrégés tels qu'ils ont été définis précédemment.*

#### • Structure du Système Général : un réseau borné de processeurs élémentaires

Après s'être doté d'un ensemble de concepts permettant de décrire les fonctionnalités des composants, la prise en compte de la globalité du système se fait à travers l'étude de sa **structure** et de son évolution.

L'une des hypothèses fondamentales du S G est qu'il est composé d'un ensemble d'éléments actifs, suivant chacun une loi de comportement propre, ou encore de processeurs élémentaires, qui peuvent être de type T, E ou F. Cette distinction ne doit cependant pas être faite de manière trop restrictive. Dans certains cas, il faudra faire appel à des processeurs multifonctions, irréductibles à la décomposition précédente. Chaque processeur pourra, sans préjuger de la manière dont il est décrit ou modélisé, être représenté par une boîte (noire, grise ou autre), munie d'une ou plusieurs entrées et d'une ou plusieurs sorties.

Le S G se construit alors comme combinaison de plusieurs processeurs entre eux. L'ensemble des connexions reliant entre elles les entrées et les sorties des processeurs élémentaires forme le réseau d'interrelation, dont la topologie constitue une caractéristique fondamentale du S G.

Des représentations matricielles ou graphiques du réseau peuvent être établies, en établissant les correspondances entre les entrées des diverses boîtes représentant les processeurs et leurs sorties.

Il importe de noter que, dans une très large mesure, la structure d'un système sera indépendante du niveau de finesse de la modélisation (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 processus 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.*

Parmi les études particulières de la structure envisageables, figurent les analyses matricielles, en s'appuyant si nécessaire sur la théorie des graphes.

La topologie générale du réseau est elle-même représentative du degré de complexité du système considéré. Deux grands types de relations sont d'une importance primordiale : les arborescences, et les rétroconnexions.

L'apparition du second type est relativement récente et est à mettre au crédit des cybernéticiens, qui ont les premiers introduit et développé la notion de **feed-back**, capitale en automatique.

On peut montrer que les niveaux de complexité associés aux réseaux rétroconnectés sont d'un ordre supérieur aux réseaux arborescents. Le "degré de rétroconnexion" est ainsi représentatif de la complexité d'un système.

#### . Décomposition du Système Général

Deux des tâches principales du modélisateur systémicien sont, on le voit :

- l'identification des processeurs élémentaires
- 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.

**Pour guider le modélisateur**, un certain nombre de niveaux (neuf) ont été attribués au développement du Système Général.

- le **premier niveau** est celui de l'objet passif, auquel on n'assigne aucune nécessité. *Il ne présente pas d'intérêt particulier pour notre propos, la passivité de l'objet rendant inutile sa modélisation.*
- le **second niveau** est celui de l'objet actif, stable dans le temps, *comme par exemple un convertisseur simple, tel une résistance électrique, une chaudière, ou une turbine.*
- l'apparition de la régulation caractérise le **troisième niveau**. *On considèrera par exemple un régulateur à boules de Watt, limitant la pression d'une chaudière à vapeur en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre moteur.* Il s'agit d'une régulation mécanique à ce stade, sans circuit d'information séparé.
- le **quatrième niveau** marque l'émergence de l'information dans la représentation de l'objet. L'idée relativement récente de différencier les signaux d'information des autres objets processés, s'est avérée extrêmement féconde du fait du développement des techniques de traitement de l'information (régulation, commande, calcul scientifique, systèmes experts). Au quatrième niveau, l'information reste encore sommairement traitée, soit analogiquement, soit numériquement : *régulation tout ou rien ou proportionnelle, comme par exemple dans un thermostat de chauffage.*
- le **cinquième niveau** correspond à l'apparition de la décision, et donc, de manière implicite, de buts à atteindre. Cette nouvelle fonctionnalité implique l'existence d'une logique interne permettant au processeur de choisir parmi plusieurs éventualités, et de décider, en fonction des valeurs des intrants, quelle action doit être entreprise. *Une régulation de chauffage sans mémoire sur température extérieure offre un exemple d'un tel processeur.*
- au **sixième niveau**, l'objet actif est doté d'une mémoire, qui lui permet d'atteindre des degrés de complexité supplémentaires. L'existence d'une mémoire permet au processeur d'intégrer le passé, et ouvre donc un champ nouveau de possibilités. *En matière de régulation, ce champ recouvre la plupart des automates à mémoire, depuis les régulateurs dérivés et intégraux jusqu'aux systèmes de commande optimale.*
- au **septième niveau**, il se coordonne, en structurant les échanges entre les niveaux opérants, informationnels et décisionnels.
- au **huitième niveau**, émerge l'imagination et donc la capacité d'auto-organisation. En matière de régulation par exemple, le huitième niveau voit apparaître des notions telles que l'auto-adaptativité, où le système dispose de processeurs d'apprentissage lui permettant de se régler au mieux en fonction de l'environnement dans lequel il est plongé. Les systèmes experts ou de reconnaissance des formes appartiennent aussi à cette catégorie.
- le **dernier niveau** est celui de l'auto-finalisation, qui ne concerne pas encore les systèmes techniques.

Il est clair que la modélisation des systèmes physiques ne requiert pas la prise en compte de tous ces niveaux, aux limites parfois imprécises. En pratique, les cinq ou six premiers suffisent la plupart du temps. Par ailleurs, il est presque toujours possible de redécomposer des modèles de niveau élevé en sous-modèles faisant appel à des représentations de niveau inférieur. On peut ainsi emboîter des modèles de niveaux différents en fonction des objectifs poursuivis.

#### • Evolution du Système Général : Mémoire et programme

Nous avons vu plus haut que la typologie des processus fait apparaître une hiérarchie d'objets processés : matière, énergie, information. Pour processer la matière, il faut de l'énergie, pour processer l'énergie, il faut de l'information.

Alors que, jusqu'à présent, en analysant sa **structure**, nous avons considéré une représentation du S G où ces trois catégories sont traitées de manière homologue, on peut être amené à différencier leurs modes de représentation. Pour l'étude des grands systèmes de haut niveau, de la notion de flux d'information (avec une nuance entre les signaux informationnels et décisionnels) revêt une telle importance que les concepts très spécifiques de mémoire et de programme s'avèrent des outils d'analyse très puissants.

Dès lors que des systèmes doivent réagir en prenant en compte non seulement l'environnement à l'instant donné, mais aussi la "chronique des événements antérieurs, parce que le projet qu'ils portent s'inscrit dans le temps et

qu'il leur importe de concevoir la prochaine décision par rapport à cette histoire", il leur est nécessaire de disposer de processeurs de mémorisation et décisionnels sophistiqués, des mémoires et des programmes.

Une notion complémentaire très féconde en pratique est celle d'état, déjà abordée plus haut, qui dans une acception automatique du terme, représente "la mémoire minimale du passé nécessaire à la détermination du comportement futur du système". La puissance de ce concept est que, lorsqu'on sait écrire l'équation d'état d'un système ou d'un processus, on dispose alors d'un modèle de comportement permettant d'en déterminer les évolutions avec une grande précision, et le plus souvent une grande économie de moyens.

L'état d'un système étant mémorisé, les processus décisionnels disposent d'un moyen d'anticiper les évolutions possibles du tout en fonction des variations de l'environnement.

Si le système est commandable, il sera possible de l'amener "volontairement" dans un état  $S(t)$  désiré à partir de l'état  $S(t_0)$  où il se trouve.

S'il est observable, on est capable, connaissant l'état à l'instant  $t$  et la chronique des commandes et sollicitations des événements antérieurs, de remonter aux différents états antérieurs.

L'étude de l'observabilité et de la commandabilité des processus et systèmes revêt une importance particulière pour la définition de leur commande.

D'une manière plus générale, le formalisme ainsi dégagé permet d'aborder les problèmes liés à l'évolution de la structure active analysée plus haut.

## **. Environnement et finalités**

La Théorie du Système Général n'a pas encore formalisé la nature des liens qui relient le S G à l'environnement, ni la problématique des finalités. Ce dernier point, qui ne concerne que les systèmes à buts de haut niveau, est un peu étranger à notre propos, et nous n'y reviendrons pas. La première lacune est un peu plus préoccupante, en ce sens que les conditions aux limites de tout système jouent, on le sait, un rôle déterminant sur son comportement. *Ceci étant, comme indiqué lors de l'étude des équations aux EDO ou aux EDP, il existe des techniques mathématiques pour les prendre en compte dans le cas des systèmes physiques.*

## **4 LES ENVIRONNEMENTS DE MODELISATION**

### **4.1 Structuration de la démarche de modélisation**

L'étude de la notion de système a mis en évidence l'importance fondamentale des processeurs et des liens qui les relient. Dans une grande mesure, établir le modèle d'un système, c'est :

- identifier et modéliser les processeurs élémentaires ou composants,
- les relier entre eux.

Résoudre le modèle, c'est l'exploiter pour obtenir des réponses aux problèmes que l'on se pose, à savoir conception, commande et caractérisation. Le plus souvent, on aura recours à la simulation, qui permet d'étudier les réactions du système lorsque l'environnement évolue. Il faut donc construire un modèle de simulation, ou simulateur, qui, compte tenu de la complexité des relations à manipuler, se présente presque toujours sous forme d'un programme informatique.

Pour arriver à cette fin, même pour des systèmes simples, on est conduit, on l'a vu, à intervenir à quatre niveaux complémentaires : l'analyse physique du système, la traduction mathématique des lois physiques, la résolution numérique, la programmation informatique.

Savoir modéliser des systèmes complexes, c'est être capable de mener de manière cohérente et efficace l'ensemble de ces opérations, pour les divers processeurs et pour le réseau de leurs interrelations. Dans la pratique, il est en fait fréquent que l'ensemble des quatre étapes ci-dessus relatives aux divers composants soient menées de manière imbriquée, sans qu'elles apparaissent séparées. Le modélisateur les exécute alors en parallèle, utilisant l'environnement informatique comme support synthétique pour rassembler les différents éléments du système. Il définit ainsi de manière prématurée un cadre pour son modèle, avant même que l'analyse de tous les composants ait été suffisamment poussée.

Le résultat en est un modèle hétérogène quant aux niveaux de précision, spécifique de l'application recherchée, et peu fiable. Il masque fréquemment des incohérences et sa mise au point est de ce fait compliquée. Dans la plupart des cas, même lorsque son concepteur, en y passant le temps, arrive à "le faire tourner", le programme développé est si spécifique que nul autre ne peut le reprendre pour le généraliser ou pour s'en servir comme base pour un autre modèle. Si le concepteur s'en va, il est parfois préférable de repartir à zéro...

Cette manière de faire, un peu caricaturale, représente malheureusement une réalité vécue par de nombreux concepteurs. La raison fondamentale en est d'une part que, la modélisation étant une discipline récente, nombreux sont ceux qui l'ont apprise sur le tas, et qu'ainsi peu sont conscients de l'importance de clairement distinguer les diverses étapes citées plus haut, et d'autre part qu'il est difficile de demander à la même personne d'exceller aussi bien en analyse des phénomènes physiques, en mathématique, en résolution numérique et en informatique.

Après une première période, un peu anarchique, au cours de laquelle, avec les défauts dont nous venons de parler, les ingénieurs ont passé de nombreuses années à développer ex nihilo leurs propres outils pour résoudre leurs problèmes, on assiste depuis plusieurs années à la prise de conscience de la nécessité d'opérer avec plus de discernement, sous peine d'une distorsion entre le temps consacré aux techniques de résolution sur ordinateur et celui dévolu à l'analyse physique ou technique proprement dite.

On comprend donc l'importance d'une démarche de modélisation structurée et cohérente, appliquée depuis le niveau des processeurs élémentaires jusqu'à celui du système complet.

Les environnements de modélisation sont les outils qui permettent de mener de front dans les meilleures conditions l'ensemble de ces tâches.

## 4.2 Les solveurs numériques

Opérer avec discernement dans l'élaboration d'un modèle, c'est aussi séparer le plus distinctement possible les domaines d'intervention respectifs du modélisateur, du numéricien et de l'informaticien.

Etant donné que les objets manipulés par les premiers (le physicien ou l'ingénieur) se traduisent par des représentations mathématiques relativement typées (équations aux dérivées partielles, systèmes algébro-différentiels, équations logiques), il est progressivement apparu utile, lorsque c'était possible, de développer des outils généraux assurant les tâches de résolution numérique et de traitement informatique.

L'utilisation de ces **solveurs** présente un certain nombre d'avantages que nous allons examiner.

### 4.2.1 La résolution automatique

Comme son nom l'indique, la première fonction du solveur est de résoudre automatiquement le jeu d'équations qui lui est soumis, sans que l'utilisateur ait à connaître le détail du mode de résolution choisi. Représentant couramment des investissements de plusieurs dizaines d'homme-années, ces logiciels offrent des solutions robustes et éprouvées à de nombreux problèmes. Il peut arriver cependant que se manifestent des instabilités ou des difficultés de convergence. Les solveurs les plus évolués fournissent au moins dans ce cas des informations précieuses sur ces difficultés.

### 4.2.2 Un gain de temps (et de coût) appréciable

Deux chiffres permettront de comprendre le gain de temps considérable auquel conduit l'utilisation des solveurs. On considère qu'en règle générale, l'élaboration d'un programme de résolution conduit à écrire environ 25 lignes de code "source" par équation, et qu'un bon programmeur développant des programmes destinés à être maintenus dans de bonnes conditions a une productivité journalière de 10 lignes de code - mise au point incluse. A raison de deux équations traitées par programmeur et par semaine, l'intérêt des solveurs apparaît indubitable. Une fois l'analyse physique du système à modéliser effectuée, le temps nécessaire à la résolution se compte en jours lorsqu'on dispose d'un bon solveur, au lieu de mois sinon.



### 4.2.3 Un environnement ouvert, évolutif et communicable

Le troisième avantage qu'offrent les solveurs modernes est de constituer un environnement particulièrement ouvert. Leur langage d'entrée imposant un minimum de rigueur dans la description des modèles, il est d'autant plus facile de communiquer avec d'autres modélisateurs ou, le cas échéant, d'autres environnements de modélisation. La structure de la description étant standardisée, la maintenance des modèles en est facilitée, et l'ensemble se prête bien à la constitution de bibliothèques permettant des échanges fructueux et, progressivement, l'étude de systèmes de plus en plus complexes. Lorsque le solveur peut être connecté à un modèleur permettant la manipulation aisée du descriptif des modèles, l'usage du solveur est possible sans même avoir à connaître en détail la syntaxe de son langage d'entrée.

### 4.3 Une autre voie : les outils spécifiques

La méthode précédemment évoquée permet d'aborder dans de très bonnes conditions l'étude de systèmes complexes quelconques. Très générale, elle présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre sans difficulté majeure, pourvu que l'on dispose des logiciels correspondants. Ceci étant, elle ne permet pas toujours de tirer le meilleur parti des propriétés intrinsèques du système étudié, s'il en a, et masque donc certaines caractéristiques qui peuvent s'avérer très parlantes pour l'ingénieur.

Dans certains cas, et notamment lorsque l'on doit s'intéresser longtemps à la même classe de systèmes, il peut, malgré les remarques faites plus haut, être intéressant de développer des méthodes spécifiques tirant tout le parti possible des propriétés de cette classe de systèmes.

Une seconde approche consiste donc à exploiter au mieux à **exploiter au mieux les propriétés mathématiques du formalisme correspondant aux équations du modèle**. Pour les systèmes dynamiques, le recours aux corps de théorie développés dans le cadre de l'automatique, permet d'obtenir directement des résultats très généraux, avec un besoin minimum de simulation numérique. La thermique linéaire, les apports de l'analyse modale et de la réduction de modèles montrent la richesse de cette seconde démarche.

Le progiciel Thermoptim (<http://www.thermoptim.org>) représente un exemple d'environnement de modélisation bien adapté pour l'étude des systèmes énergétiques complexes et combinant les démarches systémique et analytique.

## CONCLUSION

Les modèles numériques constituent des outils très efficaces pour aider l'ingénieur d'études à mobiliser ses connaissances scientifiques pour résoudre les problèmes qui se posent à lui :

- concevoir de nouveaux dispositifs, avec le souci d'en optimiser le dimensionnement,
- commander des systèmes conçus ou existants,
- caractériser des composants ou sous-systèmes.

Le cerveau humain seul ne suffisant plus lorsqu'il s'agit d'optimiser le dimensionnement d'un système dynamique soumis à des sollicitations multiples, ou d'ajuster un modèle de comportement sur la base de milliers de données expérimentales, le recours à des environnements de modélisation informatisés s'impose de plus en plus.

Compte tenu de la complexité des phénomènes en jeu, et du degré de précision demandé, le niveau de sophistication de ces outils informatiques ne cesse d'augmenter. Deux possibilités se présentent alors à l'ingénieur : soit développer lui-même les modèles dont il a besoin, soit utiliser des logiciels polyvalents existants.

La première attitude était jusqu'à il y a quelques années la règle. Tant que les modèles recherchés n'étaient pas trop complexes, il pouvait en effet sembler plus intéressant de les élaborer soi-même. Cependant, avec le temps, il est apparu que créer ex nihilo le modèle informatique précis d'un système complexe est en réalité une tâche extrêmement difficile, relevant d'une série de démarches très sophistiquées. C'est aujourd'hui une affaire de spécialistes, qui demande une vaste culture en matière de technique de construction de modèles et la connaissance des lois phénoménologiques fondamentales, faute de quoi le produit final reste nécessairement limité, soit en généralité et possibilité d'évolution, soit en précision et justesse. De plus, il s'agit d'un travail long

et coûteux, qui n'est justifié que dans la mesure où le modèle spécialisé que l'on développe est amené à être utilisé de nombreuses fois.

Pour le physicien ou l'ingénieur, qui ne peut, sauf exception, faute des compétences spécialisées et du temps requis, développer lui-même la panoplie d'outils conceptuels dont il a besoin, la deuxième solution apparaît plus attractive : avoir recours à des logiciels généraux pour obtenir rapidement réponse aux problèmes qu'il se pose. Diverses classes de tels logiciels existent déjà, et leur nombre se multiplie : modèles spécifiques à un type d'application (échangeurs, thermique spatiale, thermique du bâtiment,...), modèles généraux de résolution numérique (éléments finis, solveurs de systèmes algébro-différentiels,...).

La contrainte encore fréquente, outre le coût d'accès, est que le modélisateur doit décrire son problème dans le formalisme du logiciel hôte, et que souvent l'interfaçage entre plusieurs logiciels est délicat. Pour pallier ces difficultés, sont en train d'apparaître des environnements de modélisation, qui permettent à l'ingénieur de décrire son problème dans son langage habituel, une interface intelligente se chargeant de traduire ce descriptif dans le formalisme des logiciels de résolution.

Combinant les méthodes de la démarche analytique classique au niveau de leurs modèles élémentaires, et l'apport de la démarche systémique pour l'assemblage de ces modules pour décrire des projets complexes, ces environnements de modélisation lui permettent de mobiliser de manière efficace les connaissances scientifiques disponibles.

Pour autant, il ne doit pas se décharger de ses responsabilités en accordant une confiance aveugle à ces outils. Il doit en connaître les limites et conserver un regard critique sur les résultats qu'il obtient. De plus, dans tous les cas, une grande rigueur dans la démarche d'analyse des problèmes reste nécessaire, et une culture générale solide dans plusieurs domaines est souhaitable :

- les techniques de modélisation analytique, depuis l'écriture des lois phénoménologiques jusqu'au choix des méthodes de résolution numérique, en passant par la sélection du formalisme mathématique approprié.
- les techniques de traitement du signal, notamment tout ce qui concerne l'identification de modèles, l'analyse spectrale et le filtrage.
- les concepts de base de l'analyse des systèmes complexes, c'est-à-dire l'approche systémique, qui constitue un mode de pensée particulièrement bien adapté à la classe de problèmes à traiter.
- plus généralement, les mathématiques appliquées à la physique des systèmes dynamiques, pour bien comprendre les possibilités et les limites de la panoplie des outils susceptibles d'être employés.

## REFERENCES

- [1] DESCARTES R., Discours de la Méthode, Oeuvres Complètes, Bibliothèque de la Pléiade, 1952
- [2] LE MOIGNE J. L., Théorie du Système Général, PUF, 1984
- [3] ROSNAY de J., Le Macroscopie : vers une vision globale, Seuil, 1975
- [4] HIMMELBLAU D., BISCHOFF D., Process Analysis and Simulation - Deterministic Systems, Wiley and Sons, NY, 1968
- [5] SPRIET J., VANSTEENKISTE G., Computer aided Modelling and Simulation, Academic Press, Londres, 1982
- [6] WELLSTEAD P., Introduction to Physical System Modelling, Academic Press, London 1979
- [7] ROSENBERG R., KARNOPP D., Introduction to physical system dynamics, Mc Graw Hill
- [8] GICQUEL R., Systèmes Energétiques, Tomes 1 et 2, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2001
- [9] GICQUEL, Renaud Approche systémique et thermique instationnaire. In Actes de la Rencontre SFT 92 : Colloque de Thermique "Systèmes Thermiques Instationnaires", Sophia Antipolis, France, 20-21 mai 1992. Co-édité par la SFT et l'Ecole des Mines de Paris (ISBN 2-9504471-4-7), janvier 1993, p. 337-355.

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
LES TYPES DE PROBLEMES POSES.....	2
<i>La conception de nouveaux dispositifs :</i> .....	2
<i>La commande de systèmes existants :</i> .....	2
<i>La caractérisation de composants :</i> .....	3
<b>1 MODELE DE GAZ IDEAUX DANS L'ENVIRONNEMENT JAVA.....</b>	<b>3</b>
1.1 EQUATIONS UTILISEES : .....	3
1.2 SCHEMA DE LA CLASSE GAZIDEAL .....	4
1.3 AIDES APPORTEES PAR L'ENVIRONNEMENT DE MODELISATION .....	6
<b>2 LA NOTION DE MODELE NUMERIQUE.....</b>	<b>7</b>
2.1 MODELISATION ANALYTIQUE OU DEDUCTIVE.....	7
2.1.1 <i>L'analyse physique des phénomènes et l'évaluation critique des hypothèses.</i> .....	7
2.1.2 <i>La sélection de la représentation mathématique adaptée</i> .....	8
2.1.3 <i>Le choix de la méthode de résolution numérique</i> .....	8
2.1.4 <i>L'élaboration d'un programme informatique</i> .....	8
2.2 VALIDATION DES MODELES.....	9
2.2.1 <i>L'expérimentation et l'instrumentation</i> .....	9
2.2.2 <i>La procédure de validation</i> .....	9
2.3 MODELISATION EMPIRIQUE OU INDUCTIVE .....	9
2.4 PANOPLIE DES TECHNIQUES DE MODELISATION.....	10
2.5 ELABORATION DES MODELES PHYSIQUES.....	11
2.5.1 <i>Niveau corpusculaire ou microscopique</i> .....	12
2.5.2 <i>Modèles macroscopiques continus</i> .....	12
2.5.3 <i>Modèles macroscopiques continus moyennés</i> .....	14
2.5.4 <i>Modèles moyennés unidimensionnels</i> .....	14
2.5.5 <i>Modèles agrégés</i> .....	14
2.6 CLASSIFICATION SELON LA FORME MATHEMATIQUE.....	15
2.6.1 <i>Formalismes mathématiques obtenus</i> .....	15
2.6.2 <i>Critères de choix lors de la modélisation</i> .....	15
<b>3 LA DEMARCHE SYSTEMIQUE.....</b>	<b>16</b>
3.1 DEMARCHE CARTESIENNE ET DEMARCHE SYSTEMIQUE .....	17
3.2 COMPLEMENTARITE DES DEUX DEMARCHES POUR L'ETUDE DES SYSTEMES PHYSIQUES .....	18
3.3 PRINCIPES DE LA MODELISATION SYSTEMIQUE .....	19
3.3.1 <i>La Théorie du Système Général</i> .....	19
3.3.2 <i>Les Concepts de base du Système Général</i> .....	19
<b>4 LES ENVIRONNEMENTS DE MODELISATION .....</b>	<b>23</b>
4.1 STRUCTURATION DE LA DEMARCHE DE MODELISATION .....	23
4.2 LES SOLVEURS NUMERIQUES.....	24
4.2.1 <i>La résolution automatique</i> .....	24
4.2.2 <i>Un gain de temps (et de coût) appréciable</i> .....	24
4.2.3 <i>Un environnement ouvert, évolutif et communicable</i> .....	25
4.3 UNE AUTRE VOIE : LES OUTILS SPECIFIQUES .....	25
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>25</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>26</b>