

MODELISATION, SIMULATION ET SYSTEME EXPERT EN THERMIQUE DU BATIMENT (1ère Partie)

Par

Sidi Mohamed Karim EL HASSAR

Département Technologie et Structures des Ouvrages

Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment, Algérie

Roger PELLETRET

Service Informatique et Bâtiment

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, France

Résumé

Nous présentons ici quelques options existantes pour réaliser un environnement de simulation dans le domaine de la thermique du bâtiment. Pour ce faire, la méthodologie adoptée a consisté à développer tout d'abord le concept d'ESI : Environnement de Simulation Intelligent ; ce concept, qui repose sur un modèle abstrait d'environnement de simulation, doit permettre la réalisation d'environnements de simulation génériques. La réalisation d'un ESI est un travail complexe qui fait appel à des connaissances issues de plusieurs domaines : modélisation physique, analyse numérique, génie logiciel, intelligence artificielle.

Quelques méthodes numériques sont présentées dans cet article : les méthodes aux différences finies, qui occupent une place importante dans le domaine de la thermique du bâtiment, les méthodes modales, méthodes d'avenir, dont l'application très récente au domaine du bâtiment n'a pas encore permis d'en exploiter toutes les ressources.

L'aide "experte" peut être conçue autour de bases de données et de systèmes experts ; elle peut aussi faire appel à des systèmes experts fondés sur le raisonnement par cas. Il ressort de cette réflexion qu'une interface graphique "bien" conçue permet d'atteindre la plupart des objectifs visés par la concrétisation du concept d'ESI.

Mots clés : modélisation - simulation - bâtiment - environnement de simulation intelligent - dialogue Homme/Machine - système expert - programmation orientée objet.

1 CONTEXTE

Le bâtiment est un ensemble complexe dont les élé-

ments (enveloppe, installations techniques, habitants) interagissent entre eux et avec le milieu extérieur. De ce fait, la conception de constructions au meilleur rapport Qualité/Prix nécessite de considérer globalement le bâtiment, c'est-à-dire à travers différents points de vue physiques : thermique, acoustique, sécurité au feu, aérodynamique, stabilité, ... Force est de constater que ces phénomènes physiques, notamment ceux liés à l'aspect thermique dans la construction, sont loin d'être pris en compte au moment de la conception et au moment de la réalisation des projets de bâtiment en Algérie. Ainsi, de fortes consommations d'énergie pour le chauffage et la climatisation sont nécessaires pour répondre aux exigences de confort ; en d'autres termes, la prise en compte de l'aspect thermique dans le secteur bâtiment permet d'économiser de l'énergie à l'échelle nationale. La mise au point d'environnements de simulation dans le domaine de la thermique du bâtiment permettra de répondre aux questions suivantes :

- ✓ Comment concevoir une habitation thermiquement isolée d'une façon optimale, c'est-à-dire qui répond aux exigences de confort à un coût raisonnable ?
- ✓ Comment vérifier qu'une construction est conforme à la réglementation thermique ⁽¹⁾ ?
- ✓ Comment faire en sorte qu'une habitation déjà construite devienne conforme à la réglementation thermique ?

2 INTRODUCTION

Cette publication fait référence à des travaux de recherches menés dans le cadre du développement par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (France) d'un Envi-

⁽¹⁾ La réglementation thermique algérienne est en cours d'élaboration dans un projet Maghreb-CEE.

ronnement de Simulation Intelligent (ESI) destiné à faciliter l'accès aux logiciels de calculs scientifiques dans le secteur bâtiment [7]. En particulier, deux travaux de recherches complémentaires ont contribué à l'évolution du concept d'ESI :

- le premier travail [8] s'est attaché à définir le concept d'ESI et à développer un modèle profond d'un tel environnement, modèle générique dont le but est de faciliter la réalisation d'applications dédiées ;
- le second travail [3], tout en contribuant à la définition des spécifications de l'environnement de simulation générique, a essentiellement porté sur la réalisation d'une application concrète que l'on peut considérer comme une phase expérimentale de mise en œuvre des concepts développés ; pour ce faire, un environnement fondé sur le principe de la modélisation par assemblage a été réalisé, cet environnement est appelé IISIBât (Interfaces Intelligentes pour la Simulation dans le Bâtiment) ; l'application a été réalisée autour du logiciel de calculs thermiques TRNSYS ⁽²⁾ ; en outre, ce travail de recherche a permis de définir pour de tels environnements les possibilités d'utilisation des systèmes à bases de connaissances (buts et moyens, évaluation de la pertinence des solutions).

Cette publication n'a pas pour but de définir une stratégie générale de conception d'un ESI, mais plutôt de poursuivre l'effort de réflexion, déjà entamé, pour aboutir à la proposition de cas concrets d'ESI dans le domaine de la thermique du bâtiment, en référence aux travaux sus-cités.

Cette publication est structurée de la façon suivante :

- dans cet article, nous exposons les raisons qui nous ont incités à définir le concept d'ESI, et les buts poursuivis par la concrétisation de ce concept ; nous présentons aussi quelques méthodes numériques qui occupent une place importante en thermique du bâtiment ;
- dans un deuxième article, qui paraîtra dans le prochain numéro de la revue, nous présenterons quelques options qui ne permettent pas, bien sûr, d'obtenir l'ESI idéal, mais qui nous semblent être à l'heure actuelle les solutions les meilleures pour réaliser un compromis face au très grand nombre de possibilités ; les réflexions présentées dans cet article sont détaillées dans les travaux de recherches sus-cités [7], [8] et [3] ; dans une conclusion globale pour les deux articles, une nouvelle application du concept d'ESI est envisagée.

3 LE CONCEPT D'ESI ET SES OBJECTIFS

3.1 Problématique

Il existe dans le monde de la thermique du bâtiment un certain nombre de logiciels qui offrent la possibilité de simuler des phénomènes physiques. Ces outils diffèrent par les techniques numériques et logicielles employées, le

niveau de détail des systèmes thermiques décrits et la convivialité des interfaces. Ces outils sont généralement incompatibles entre eux, et l'étude complète d'un problème complexe de bâtiment nécessite l'emploi de plusieurs logiciels ; le chercheur est même parfois obligé d'insérer au sein d'un programme principal des morceaux de code spécifiques, ce qui a pour effet de rendre rapidement les programmes difficiles à maintenir.

D'autre part, on différencie les outils de simulation dits "général" et les outils dits "dédiés" :

- un outil est qualifié de "général" lorsqu'il peut être utilisé indépendamment du domaine traité (ex. : Zoom, Neptunix, Astec 3,...) ; pour que ces outils puissent être bien adaptés à une application particulière, un gros effort de modélisation est nécessaire de la part des utilisateurs ;
- un outil "dédié" ne permet pas de traiter des problèmes qui relèvent d'un autre domaine que celui pour lequel il a été conçu.

Le principe de la modularité permet d'obtenir des outils indépendants du domaine ; en effet, il est possible, au sein d'une architecture modulaire, d'insérer des modules écrits pour des applications a priori différentes ; certains modules peuvent être polyvalents ; d'autres peuvent être très généraux, d'autres encore peuvent être spécifiques (modules "dédiés"). En quelque sorte, la modularité permet d'avoir "au sein d'un seul logiciel plusieurs logiciels". Des logiciels à structure modulaire existent (TRNSYS) ; ils permettent une simulation à la carte. Ces logiciels ont la particularité de posséder d'importantes bibliothèques de composants et de sous-systèmes, qui doivent être assemblés par l'utilisateur pour effectuer une simulation. Cet assemblage est entièrement réalisé par l'utilisateur et la qualité du travail obtenu dépend de l'expérience de l'utilisateur.

Par ailleurs, des logiciels conçus pour la recherche basés sur des modèles et des algorithmes performants restent inexploités ; leur utilisation est réservée à un cercle restreint d'utilisateurs, du fait essentiellement de difficultés liées à la description des projets, à la modification des problèmes à simuler et à l'analyse des résultats. Ces difficultés ont des origines diverses :

- ✓ ces logiciels sont souvent bâtis autour de modèles de composants complexes, dont les paramètres ne sont pas toujours adaptés aux données couramment utilisées dans le monde professionnel ;
- ✓ ces logiciels ont souvent été construits sans tenir compte de l'efficacité du dialogue Homme/Machine ;
- ✓ ces logiciels ont été développés indépendamment les uns des autres, sans possibilité de communication aucune.

Le concept d'ESI a pour objectif d'apporter des réponses concrètes à ces difficultés.

3.2 Le concept d'ESI

Le concept d'Environnement de Simulation Intelligent (ESI) repose sur les idées suivantes :

⁽²⁾ TRNSYS est un logiciel de calculs thermiques pour le bâtiment ; il a été développé à l'Université de Wisconsin-Madison USA [9].

- ✓ faciliter l'accès aux codes de simulation performants ;
- ✓ faciliter la description des entités physiques à étudier ;
- ✓ faciliter la tâche du créateur de modèles pour l'intégration des nouveaux modèles dans un environnement de simulation ;
- ✓ faciliter la préparation des données de simulation ; en effet chaque code de simulation possède son propre langage d'entrée qui demande un temps d'apprentissage long et difficile ;
- ✓ faciliter la lecture et l'interprétation des résultats des simulations ;
- ✓ réaliser un ou plusieurs systèmes capables d'assister l'utilisateur en lui proposant des aides, des vérifications de cohérence, des tâches automatisées ;
- ✓ réaliser une structure de données commune à plusieurs codes de simulation, de façon à faire communiquer différents codes de simulation ; cette structure de données commune doit en outre permettre la réutilisation des données, tout en s'assurant de la cohérence des descriptions techniques du projet considéré à travers différents points de vue.

Par ailleurs, l'élaboration de versions différentes d'un logiciel est presque toujours inévitable. Ces versions différentes doivent pouvoir :

- répondre aux besoins des différentes catégories d'utilisateurs ; c'est pourquoi le concepteur d'un environnement de simulation doit tout d'abord cibler les utilisateurs potentiels du logiciel et avoir une bonne connaissance de leurs besoins (cf. § 3.3) ; cette tâche est délicate dans la mesure où il existe plusieurs catégories d'utilisateurs (chercheurs, ingénieurs en bureaux d'études, industriels), où les concepts auxquels chaque groupe se réfère dépendent du métier exercé, du degré de spécialisation, mais aussi de la culture propre d'une entreprise ;
- répondre aux besoins nouveaux des utilisateurs ; en effet, il ne faut pas voir l'outil de simulation comme un programme figé, mais plutôt comme un environnement qui évolue : nouvelles méthodes numériques, évolution de la réglementation, des règles de calculs, etc... On parle alors d'extensibilité du logiciel : "c'est la facilité d'un logiciel à être réutilisé en tout ou partie pour de nouvelles spécifications".

C'est pourquoi, le concept d'ESI repose sur une approche orientée objet : l'environnement de simulation finalement réalisé n'est qu'un "cas concret" (appelé aussi instance) obtenu à partir d'un modèle générique. L'aspect générique de l'ESI constitue une solution pour obtenir rapidement et à moindre coût des environnements différents.

3.3 Les outils de simulation et les utilisateurs

Plusieurs raisons incitent à simuler :

- pour les centres de recherches et pour les laboratoires universitaires, la préoccupation reste la compréhension des phénomènes physiques et la prévision de leurs incidences sur les macro-systèmes, la vérification de théo-

ries, le développement de méthodes simplifiées pour les bureaux d'études et les industriels ;

- pour les bureaux d'études, il s'agit de concevoir des projets et d'optimiser les solutions techniques ; les modèles de simulation peuvent aussi être utilisés pour résoudre des problèmes de "diagnostic" et de réhabilitation thermique.

• Interprétation des phénomènes

Le rôle essentiel d'un centre de recherches appliquées est de démontrer l'intérêt, de mettre en place et/ou de développer des innovations techniques en interprétant de façon objective les phénomènes physiques. Deux approches complémentaires permettent une interprétation fiable des phénomènes [4] :

- une approche expérimentale ; elle repose sur une observation rigoureuse d'un ou plusieurs phénomènes, sur le plus grand nombre de cas possibles (analyse statistique) ; cette approche est indispensable à la mise au point de modèles élémentaires ; elle est onéreuse et se prête difficilement aux études paramétriques ;
- une approche théorique ; elle repose sur la modélisation/simulation ; il s'agit de créer un (ou plusieurs) modèle(s) que l'on peut manipuler dans un environnement de simulation ; la modélisation/simulation est utile pour compléter l'expérimentation ou parfois la remplacer ; par exemple, si on désire comprendre le phénomène de déperditions thermiques dans une construction, il est difficile et onéreux de mener une campagne de mesures exhaustive ; on procède en général au calcul du bilan thermique par simulations.

Remarque : Les deux approches (expérimentale et théorique) requièrent du savoir-faire, et consomment un temps d'experts important. Etant donné l'investissement, il faut qu'au sein de chaque approche, l'élément mis en place soit réutilisable au maximum.

• Optimisation

Le rôle essentiel d'un bureau d'études dans le secteur du bâtiment consiste à concevoir et à optimiser le système structure/enveloppe/équipements d'un point de vue technico-économique. La recherche d'un optimum technico-économique est, au stade de la conception, une tâche importante pour recourir aux méthodes de simulations [6]. Il faut bien en effet soumettre la (ou les) solution(s) envisagée(s) à de multiples conditions d'utilisation possibles pour pouvoir en apprécier les performances, et finalement en dégager une évaluation globale, c'est-à-dire un cumul de dépenses d'investissement et d'exploitation, en relation bien entendu avec le service rendu à l'utilisateur. Les coûts d'exploitation sont de plus en plus dominés par les consommations d'énergie, mais les frais de maintenance ne sont pas plus négligeables.

L'étude thermique des bâtiments consiste essentiellement à étudier le comportement de l'enveloppe, c'est-à-dire de l'ensemble des parois solides qui composent le bâtiment auquel s'ajoutent les masses d'air, et à étudier le comporte-

ment des équipements thermiques (chauffage, climatisation, ventilation) ; on procède en général de la façon suivante :

- ✦ il s'agit tout d'abord de localiser le projet, de préciser la période à étudier, de décrire l'environnement extérieur (température, ensoleillement,...) et de préciser les sources d'apports internes (intensité, variation dans le temps et dans l'espace) ;
- ✦ il s'agit ensuite d'étudier le comportement de l'enveloppe du bâtiment ; la simulation permet notamment d'évaluer les déperditions thermiques pour chaque paroi et de calculer le renouvellement d'air afin de déterminer les épaisseurs "optimales" d'isolant ;
- ✦ il s'agit aussi d'étudier le comportement des équipements thermiques du bâtiment (chauffage, climatisation, ventilation) ; la simulation évalue, en général, diverses stratégies pour le fonctionnement des équipements en intégrant à la fois les frais d'énergie et les frais de maintenance et détermine les limites de fonctionnement de ces équipements ; cette étude doit permettre de choisir les équipements "optimaux", et d'opter pour une stratégie de fonctionnement "optimale" de ces équipements.

Remarque : Outre le recours aux modèles de simulation, la recherche d'un optimum technico-économique peut être réalisée aussi grâce à des méthodes empruntées au domaine de la recherche opérationnelle : par exemple la méthode S.E.P. - Séparation et Evaluation Progressive - pourrait être utilisée pour optimiser l'isolation thermique d'un bâtiment d'habitation.

Pour les diverses raisons ci-avant invoquées, le recours à l'utilisation des outils de simulation est aujourd'hui indispensable que ce soit pour un centre de recherches, ou pour un bureau d'études, ou encore pour un industriel.

4 REALISATION D'UN ESI

4.1 Tâches pour réaliser un ESI

Les tâches à effectuer dans le cadre de la réalisation d'un environnement de modélisation/simulation font appel à des connaissances diverses, issues de plusieurs domaines : modélisation, analyse numérique et génie logiciel. Quatre grandes étapes peuvent être définies pour l'élaboration d'un logiciel de simulation :

- ✦ la première étape correspond à la modélisation physique, c'est-à-dire à la représentation abstraite par un modèle du comportement d'un objet ; il s'agit, à partir d'un système physique donné, d'écrire des équations capables de représenter un comportement précis du système dans un cadre donné ; un modèle reste une représentation approchée, il représente certains comportements d'un objet ou système physique avec des approximations ; un modèle physique est en fait une image de la réalité ;
- ✦ la seconde étape correspond à la modélisation mathématique (analytique, le plus souvent numérique) ; on

passé alors d'un modèle physique à un modèle numérique approchant au mieux, et selon certaines restrictions, le comportement du modèle physique ; la modélisation numérique va elle aussi introduire une approximation par rapport à la modélisation physique ;

- ✦ la troisième étape correspond à la définition d'une structure logicielle, à la spécification d'une structure de données et à la spécification des fonctions du logiciel ; en particulier, pour améliorer la productivité des utilisateurs, il est indispensable d'insérer au sein de l'environnement de simulation des fonctions d'aide, on parle alors de "système d'aide intégré" ;
- ✦ la quatrième étape consiste à traduire les étapes précédentes en un ensemble de logiciels écrits dans des langages de programmation.

Un environnement de simulation ne doit pas être considéré comme une simple fonction qui génère des résultats numériques (rôle du solveur), il doit aussi prendre en compte toutes les fonctions annexes telles que le dialogue Homme/Machine, le stockage des projets, l'aide à la conception. Par conséquent, un environnement de simulation dans le domaine de la thermique du bâtiment doit comporter les éléments suivants :

- ✦ des modèles physiques (nous n'aborderons pas ce sujet dans cet article) ;
- ✦ des modèles mathématiques modélisant les phénomènes physiques (cf. § 4.2) ;
- ✦ une interface graphique qui permet à l'utilisateur de décrire le problème à traiter, et de stocker le travail effectué dans des bibliothèques de projets ; cet aspect sera abordé dans un prochain article.
- ✦ des fonctions d'aides ; on peut distinguer deux types de fonctions d'aides : les fonctions d'aides "non expertes" (gestion de l'affichage de documents, séquences didactiques,...) et les fonctions d'aides "expertes" ; ce dernier aspect sera abordé dans un prochain article.

4.2 Modélisation mathématique en thermique du bâtiment

Pour évaluer le comportement thermique d'un système physique, il est possible, partant de l'équation de la chaleur, de trouver une solution par des méthodes analytiques dans certains cas simples de géométrie et de conditions aux limites ; mais, dans la plupart des cas, seules des méthodes numériques ou des méthodes analogiques peuvent être utilisées. Il n'est pas dans notre intention de présenter ici toutes les méthodes existantes, nous en donnons seulement un rapide aperçu. On peut citer :

- ▼ les méthodes analytiques, telles la méthode de Laplace ou les méthodes appliquées aux problèmes où le système à étudier est soumis à un phénomène périodique ;
- ▼ les méthodes numériques fondées sur la discrétisation du temps et de l'espace, telles les méthodes aux différences finies, les méthodes modales (pour discrétiser les

- systèmes physiques, on peut utiliser l'analogie électrique);
- ▼ les méthodes stochastiques.

Remarque : Opter pour tel ou tel modèle numérique influe sur la conception de l'environnement de simulation. Par exemple, pour la conception de l'interface, si on opte pour une décomposition du bâtiment en éléments de volume, on doit donner à l'utilisateur la possibilité de "découper" son bâtiment en éléments de volume.

4.2.1 Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques sont souvent appliquées pour l'étude des régimes stationnaires et des régimes transitoires à conditions initiales et aux limites simples. Par régime transitoire, on entend les régimes qui correspondent au passage d'un état stationnaire initial à un état stationnaire final. En régime variable, il est également possible dans certains cas particuliers (paroi soumise à un phénomène périodique) de procéder à un calcul analytique.

• Méthode de Laplace

La méthode de Laplace consiste à effectuer une transformation de Laplace du système d'équations décrivant le problème à traiter. Les équations différentielles linéaires obtenues sont alors plus facilement intégrables et la solution est obtenue sous la forme d'une transformée de Laplace. Il suffit alors d'appliquer la transformée de Laplace inverse pour obtenir les grandeurs de sortie désirées. Cette transformation inverse présente parfois des difficultés.

• Systèmes soumis à un phénomène périodique

Si les conditions aux limites sont des fonctions sinusoïdales, il est parfois possible de déterminer analytiquement les solutions de l'équation de la chaleur. Les conditions aux limites peuvent être décomposées en une valeur moyenne constante et des oscillations périodiques autour de cette valeur moyenne (série de Fourier). La solution des équations de transfert thermique mises sous une forme linéarisée sera la somme de la solution en régime permanent (conditions aux limites constantes) et des solutions en régime variable pour toutes les fréquences de la série de Fourier.

Cette méthode est cependant difficile à appliquer à un bâtiment entier, et n'est utilisée que pour les parois.

4.2.2 Méthodes numériques

Ces méthodes permettent la résolution numérique des systèmes d'équations algèbre-différentielles. Les composants du bâtiment sont discrétisés en de nombreux éléments de dimensions finies caractérisés à chaque instant par une température supposée homogène. De même, le temps est discrétisé. Les lignes, surfaces ou volumes, isothermes en lesquelles seront estimées les températures seront dits nœuds du système ; on désignera par mailles les éléments de volume entourant les nœuds.

Pour chaque nœud, on effectue le bilan thermique : la somme algébrique des flux d'énergie arrivant à un nœud pendant un intervalle de temps fini donné est égale à l'énergie stockée à ce nœud. L'ensemble des équations de bilan thermique peut se présenter sous la forme matricielle suivante :

$$[C] \left(\frac{dT}{dt} \right) = [A] \vec{T}(t) + [E] \vec{U}(t) \quad (1)$$

avec :

- [C] : matrice carrée ne comportant que sur sa diagonale les capacités calorifiques rattachées aux nœuds ;
- [A] : matrice carrée qui regroupe les coefficients d'échange équivalents ;
- [E] : matrice rectangulaire creuse qui traduit les modalités d'action des diverses sollicitations ;
- $\vec{T}$: vecteur des températures aux nœuds du maillage ;
- $\vec{U}$: vecteur des sollicitations.

Cette formulation, très générale, est indépendante de la méthode d'intégration (il existe un certain nombre d'algorithmes d'intégration, on peut citer les méthodes de Range-Kutta, de Gear, de Kohr, etc...) ; on la retrouve en particulier dans l'approche modale des problèmes thermiques. La première étape dans la mise en œuvre de telles méthodes consiste donc à choisir une discrétisation spatiale adaptée aux différents éléments constituant le système thermique.

Nous présentons ici deux méthodes qui occupent une place importante en thermique du bâtiment :

- les méthodes aux différences finies ;
- les méthodes modales.

Nous présentons aussi l'analogie électrique qui est un moyen efficace pour formaliser le système thermique étudié.

• Les méthodes aux différences finies

Pour résoudre le système algèbre-différentiel (1), suivant la manière de discrétiser le temps, on obtient deux types de méthodes :

- méthode explicite ; les variables sur l'intervalle $[t ; t + \Delta t]$ sont supposées rester constantes pendant la durée de t à $t + \Delta t$; tout se passe comme si pendant chaque pas de temps Δt , on était en régime permanent ;
- méthodes implicites ; dans ces méthodes, les valeurs des variables à l'instant t sont exprimées selon une pondération des valeurs des variables aux instants t et $t + \Delta t$; on exprime cette pondération de la façon suivante : $V_t = (1-K) V_t + K V_{t+\Delta t}$; si $K = 1$, la méthode est dite purement implicite ; si $K = 0.5$, la méthode est dénommée de Crank-Nicholson.

Remarque : Calculer les valeurs des variables uniquement à partir des valeurs à l'instant t (méthode explicite) correspond à $K = 0$ dans la formule de pondération suscitée.

La résolution d'équations différentielles se ramène à la résolution d'un système d'équations linéaires.

Le schéma explicite est de loin le plus facile à mettre en œuvre, mais il ne converge qu'à condition de respecter certains critères : à maillage d'espace fixé il faut choisir un pas de temps suffisamment petit ; cette restriction se traduit par des temps de calculs importants. Sa rapidité de mise en œuvre conduit à utiliser ce schéma pour une première approche du problème (élaboration de prototypes logiciels), mais il n'est pas adapté à la conception d'un logiciel destiné à une utilisation intensive.

Contrairement au schéma précédent, le schéma implicite pur est inconditionnellement convergent ; cela signifie que pour un maillage fixé, il est moins sensible au choix du pas de temps.

On montre aussi que le schéma de Crank-Nicholson est inconditionnellement convergent. On constate aussi que ce schéma est systématiquement plus précis que les précédents. En pratique, la précision apportée par ce schéma peut s'avérer négligeable compte-tenu de toutes les approximations qui sont faites dans un logiciel de simulation en thermique du bâtiment (isotropie et homogénéité du milieu, conduction unidimensionnelle, expression linéaire des transferts thermiques, faible variation des propriétés thermophysiques des matériaux).

• Les méthodes modales

Les méthodes modales décrivent l'évolution réelle des phénomènes thermiques en superposant les contributions respectives des solutions élémentaires. Ces solutions élémentaires sont appelées modes propres ; elles représentent des distributions particulières des températures. A chaque mode propre est associé un temps caractéristique qui précise l'évolution temporelle des contributions diverses des modes ; les temps caractéristiques en thermique du bâtiment ne jouent pas le rôle d'une période, mais celui d'un temps de réponse. Pour déterminer les modes propres, il faut tout d'abord discrétiser le système physique en n éléments de volume, chacun est supposé à tout instant isotherme. Dans ces conditions, un mode propre devient un vecteur propre comprenant n températures et il n'existe qu'au plus n modes propres différents associés à n temps caractéristiques.

L'intérêt pratique des méthodes modales réside dans le fait que très peu de modes se révèlent en général déterminants. Il s'ensuit que l'expression des réponses peut être simplifiée sans perte sensible de précision : on peut réduire la série exprimant l'évolution des phénomènes thermiques à la superposition d'un très petit nombre de termes. Ainsi, la méthode modale conduit à l'élaboration de modèles simplifiés qui résument bien le comportement thermique du système.

• Principe de résolution des méthodes modales [1]

Le système (1) est d'abord transformé :

$$\frac{d(T)}{dt} = [C]^{-1} [A] (T) + [C]^{-1} [E] (U) \quad (2)$$

Par définition, les modes propres (vecteurs V_i) sont les solutions des équations linéaires :

$$\lambda_i (V_i) = [C]^{-1} [A] (V_i) \quad \lambda_i : \text{valeur propre associée à } V_i$$

L'ensemble des vecteurs propres constitue une base orthogonale ; il en résulte que dans cette nouvelle base, les nouvelles variables de température (X) se trouvent dans un système d'équations découplées. Notons $[P]$ la matrice de passage ($V_1, \dots, V_n$). Le système (2) prend la forme :

$$\frac{d(X)}{dt} = [F] (X) + [B] (U)$$

avec :

$$(X) = [P]^{-1} (T) ;$$

$$[B] = [P]^{-1} [C]^{-1} [E] ;$$

$$[F] = [P]^{-1} [C]^{-1} [A] [P].$$

• Analogie électrique

L'analogie électrique utilise la correspondance entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques (voir Tableau 1).

Grandeurs Thermiques	Grandeurs électriques
Température	Potentiel
Flux de chaleur	Intensité
Résistance	Résistance
Capacité	Capacité

Tableau 1 : Correspondance entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques.

Décrire un système thermique par son réseau analogue, comportant des capacités, des conductances, des sources de courant ou de tension, est une démarche courante dans le monde de la thermique. Le bâtiment étudié est alors assimilé à un ensemble de nœuds dont on détermine les températures associées ; chaque nœud présente une capacité thermique (qui peut être nulle) et est relié aux autres nœuds par des résistances thermiques.

L'intérêt d'une telle représentation réside essentiellement dans le fait qu'elle est un moyen efficace pour formaliser le système étudié. Les méthodes qui consistent à discrétiser les systèmes en un certain nombre fini de nœuds, se prêtent bien à l'utilisation de ce formalisme (appelé aussi formalisme RC). La figure 1 représente un exemple de discrétisation de l'espace pour une paroi opaque : le mur est divisé en n tranches de même épaisseur Δx .

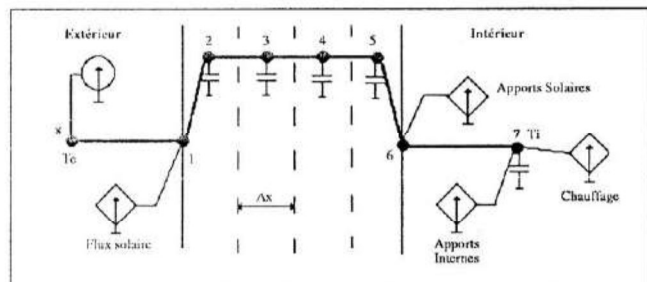


Figure 1 : Exemple de modèle analogique.

Chaque tranche du mur est symbolisée par un noeud (2 à 5 sur la figure 1), caractérisé par une température supposée uniforme et par une capacité calorifique. Le noeud 7 représente l'ambiance intérieure, la capacité affectée à ce noeud rend compte de l'inertie intérieure du local (mobilier). L'air du local reçoit un flux de chaleur (apports internes) ayant pour origine l'éclairage et l'occupation ; l'air du local reçoit aussi le flux de chaleur provenant de l'installation de chauffage. Les noeuds surfaciques 1 et 6 ont une capacité nulle. Le noeud surfacique extérieur 1 reçoit le flux solaire ; le noeud surfacique intérieur 6 reçoit le flux solaire traversant les vitrages. Le noeud 8, dont la température est imposée, est représentatif de l'ambiance extérieure ; le noeud 8 a lui aussi une capacité nulle.

Le système d'équations régissant le système Extérieur / Intérieur, traduisant la conservation de l'énergie à un noeud i , se ramène à un système d'équations de type :

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n G_{ij} (T_j - T_i) + Q_i$$

avec :

- T_i , la température du noeud i ;
- G_{ij} est la conductance entre les noeuds i et j ;
- $\sum_{j=1}^n G_{ij} (T_j - T_i)$ représente le flux sortant ou entrant du noeud i ;
- C_i est la capacité calorifique du noeud i ;
- $C_i dT_i$ représente l'augmentation de l'énergie emmagasinée par le noeud i ;
- Q_i représente les apports directs sur le noeud i .

En utilisant la théorie de l'agrégation des nœuds, on peut, à partir de la description d'un réseau RC, obtenir une description simplifiée du système à étudier tout en conservant un sens physique aux nœuds [5].

Remarque : La description d'un problème thermique en utilisant le formalisme RC permet de décrire la complétude du problème : il est possible d'utiliser les températures en régime variable, de simuler un bâtiment composé de locaux ayant des paramètres d'état différents (multizones), d'intégrer à la fois les échanges d'air entre zones et les infiltrations, les scénarios d'occupation, les apports solaires [2] et l'apport thermique des équipements (chauffage et climatisation). De plus, ce formalisme est suffisamment souple pour permettre son implantation sur micro-ordinateurs.

4.2.3 Les méthodes stochastiques

Les méthodes stochastiques, en particulier les propriétés des chaînes de Markov, peuvent aussi être utilisées avec succès pour la simulation de bâtiments entiers. On définit un nombre fini d'états discrets des variables intéressantes dans le bâtiment ; par exemple, N_I valeurs pour l'insolation I , N_{Te} valeurs pour la température extérieure Te , et N_{Tij} valeurs pour la j ème température intérieure du bâtiment $T_{ij}(t)$. L'état global du bâtiment sera défini par un vecteur X dont les composantes sont des valeurs des variables :

$$X(t) = (T_{i1}(t), \dots, T_{in}(t), I(t), Te(t))$$

Ce vecteur d'état prendra une autre valeur à l'instant $t + \Delta t$. Les valeurs possibles sont nombreuses ; il y a en fait $N_v = N_I \cdot N_{Te} \cdot N_{T1} \dots N_{Tin}$ possibilités. A chacune des transitions possibles du vecteur X correspond une probabilité de transition qui dépend des probabilités de transitions des variables d'entrée. Pour les variables météorologiques I et Te , ces probabilités se trouvent dans les matrices de Markov. La matrice de Markov $[P]$ est définie par :

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{bb} & P_{bc} \\ P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix}$$

avec P_{bb} la probabilité de transition de beau à beau, P_{bc} la probabilité de transition de beau à couvert, P_{cb} la probabilité de transition de couvert à beau, P_{cc} la probabilité de transition de couvert à couvert. L'ensemble des probabilités de transition possibles de tous les états $(X(t))$ à tous les états $(X(t + \Delta t))$ peut être décrit dans une matrice de Markov du bâtiment (M) . La méthode stochastique présente les caractéristiques suivantes :

- elle tient compte de l'aspect aléatoire des variables météorologiques ;
- elle permet d'introduire des variables aléatoires liées au comportement des habitants (ouverture des fenêtres, ...)
- le gros effort de calcul consiste à déterminer la matrice (M) ①

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Bacot : "Méthode Modale". Article in *Energétique des Bâtiments*, Tome 2 ; PYC édition ; 1988.
- [2] K. El Hassar : "Module Ensoleillement". MODSOL ; Rapport, Sophia Antipolis, CSTB, MGL/90-1164/NB, 1990.
- [3] K. El Hassar : "Conception d'un environnement de simulation intelligent". Application à la thermique du bâtiment ; Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992.
- [4] L. Laret : "Modélisation du comportement thermique de l'immeuble expérimental de la DETN". Rapport Final ; Etude, Sophia Antipolis, CSTB MGL 1075, 1989.
- [5] L. Laret : "Le concept de modèle adapté. Séminaire spécialisé "Outil d'aide à la conception et à la gestion"". Article, Sophia Antipolis, CSTB, 1989.
- [6] J. Lebrun : "Modélisation et Désign des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air". In *Climat 2000*, Tome 1, Liège, 1985.
- [7] R. Pelletret : "HISIBât : un environnement de simulation intelligent". S. Soubra ; Document de travail, Sophia Antipolis, CSTB, 1992.
- [8] S. Soubra : "Concepts et outils pour le développement d'un Environnement de Simulation Intelligent". Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992.
- [9] TRNSYS : "A Transient System Simulation Program". Manual, Solar Energy Laboratory, Univ. Of Wisconsin, USA 1990.