

Sommaire

Préface	15
Introduction	17

I – MODÈLES ET PRINCIPALES HYPOTHÈSES

CHAPITRE 1. Modélisation thermique du bâtiment	25
CHAPITRE 2. Éclairage	45
CHAPITRE 3. Aéraulique	71
CHAPITRE 4. Transferts hygrothermiques	89
CHAPITRE 5. Systèmes thermiques	109
CHAPITRE 6. Systèmes photovoltaïques	121
CHAPITRE 7. Systèmes électriques	147
CHAPITRE 8. Énergie et cycle de vie	159
CHAPITRE 9. Fonctionnalités des outils	171

II – VALIDATION DES MODÈLES

CHAPITRE 10. Bancs d'essais, comparaisons interlogicielles	177
CHAPITRE 11. Validation expérimentale	197

III – MISE EN ŒUVRE DE LA SIMULATION

CHAPITRE 12. Adéquation aux objectifs de l'étude	227
CHAPITRE 13. Données d'entrée	231
CHAPITRE 14. Utilisation de la simulation et exploitation des résultats	305

IV – EXEMPLES D'APPLICATIONS

CHAPITRE 15. Construction neuve	353
CHAPITRE 16. Projets de réhabilitation	387
CHAPITRE 17. Nouvelles utilisations de la simulation	415
 Conclusions et perspectives	 445

Table des matières

Préface	15
Introduction	17

I – MODÈLES ET PRINCIPALES HYPOTHÈSES

CHAPITRE 1. Modélisation thermique du bâtiment	25
1.1 Preambule	25
1.2 Transferts de chaleur dans le bâtiment	26
1.2.1 Conduction	26
1.2.2 Convection	27
1.2.3 Rayonnement	28
1.3 Principes de modélisation dynamique du bâtiment	31
1.4 Bilans enthalpique et massique de la masse d'air	33
1.4.1 Bilan enthalpique: équations générales	33
1.4.2 Bilan massique d'air sec	33
1.4.3 Bilan sensible et latent	34
1.5 Traitement de la conduction	35
1.5.1 Discrétisation spatiale du domaine de calcul	35
1.5.2 Résolution temporelle du système différentiel	36
1.5.3 Méthode de représentation externe	36
1.6 Traitement des échanges radiatifs	37
1.6.1 Hypothèses simplificatrices	37
1.6.2 Échanges radiatifs extérieurs	38
1.6.3 Échanges radiatifs intérieurs	40
1.7 Conclusion	43
1.8 Références bibliographiques	43

CHAPITRE 2. Éclairage	45
2.1 Préambule	45
2.2 Indicateurs d'éclairage naturel	45
2.2.1 Concept d'ambiance lumineuse	45
2.2.2 Indicateurs de caractérisation des ambiances lumineuses	46
2.3 Méthodologies de prédétermination de l'éclairage naturel	52
2.3.1 Les mesures	52
2.3.2 Les calculs	53
2.3.3 Les simulations numériques	53
2.4 Zoom sur les algorithmes de simulation numérique de la propagation de la lumière	53
2.4.1 La méthode des flux séparés	54
2.4.2 La radiativité	54
2.4.3 Le lancer de rayons	55
2.4.4 Le <i>photon mapping</i>	56
2.4.5 Usage pratique des algorithmes	56
2.5 Les paramètres influant dans les simulations numériques	56
2.6 Appréciation de l'influence de certains paramètres à l'aide d'un exemple	59
2.6.1 Influence des paramètres de modélisation	60
2.6.2 Influence des paramètres de simulation	62
2.6.3 Modélisation et paramétrage optimaux	65
2.6.4 Enseignements à retenir de ces tests paramétriques	66
2.7 Quid de l'éclairage électrique	66
2.8 Références	67
2.9 Annexe 1	68
2.10 Annexe 2	69
CHAPITRE 3. Aéraulique	71
3.1 La ventilation et la convection naturelles	72
3.1.1 Le tirage thermique	73
3.1.2 Les effets du vent	75
3.1.3 Effets cumulés du vent et du tirage thermique	78
3.1.4 Ventilation naturelle à l'intérieur : le phénomène de shunt	79
3.2 Modélisation des phénomènes aérauliques	80
3.2.1 Méthode MFN	80
3.2.2 Méthode zonale	82
3.2.3 Méthode nodale	83
3.3 Ventilation mécanique	86
3.4 Conclusion	87
3.5 Références	88

CHAPITRE 4. Transferts hygrothermiques	89
4.1 Introduction	89
4.2 Les équations de bilan	90
4.3 L'humidité dans les matériaux poreux	92
4.3.1 Introduction	92
4.3.2 Stockage d'humidité (« capacité hygrique »)	92
4.3.3 Transfert d'humidité	93
4.3.4 Modèles simplifiés	96
4.4 Couplages thermo-hygro-aérauliques	98
4.5 Est-il important de prendre en compte l'humidité dans la simulation thermique dynamique ?	98
4.6 L'humidité dans les outils de simulation thermique dynamique	103
4.7 Validation des codes de simulation thermo-hygro-aérauliques	104
4.8 Conclusion	106
4.9 Références	106
CHAPITRE 5. Systèmes thermiques	109
5.1 Introduction	109
5.2 Les différents modèles et les données correspondantes	111
5.2.1 Modèles de type « boîte blanche »	112
5.2.2 Modèles de type « boîte noire »	112
5.2.3 Modèles de type « boîte grise »	112
5.2.4 Identification des paramètres	112
5.3 Exemple de la pompe à chaleur (PAC)	113
5.3.1 Description du modèle	113
5.3.2 Modélisation du compresseur (six paramètres)	114
5.3.3 Modélisation des échangeurs (deux paramètres)	115
5.3.4 Modélisation du détendeur (un paramètre)	115
5.3.5 Paramètres à identifier	115
5.3.6 Données d'essais pour l'identification des paramètres	115
5.3.7 Mise en œuvre sur un cas d'étude	116
5.3.8 Utilisation du modèle	117
5.3.9 Conditions d'utilisation	117
5.3.10 Fonctionnement à charge partielle	118
5.3.11 Mode marche-arrêt	118
5.3.12 Mode variation de puissance	118
5.3.13 Sélection des phénomènes à modéliser	119
5.4 Conclusion	119
5.5 Références	119

CHAPITRE 6. Systèmes photovoltaïques	121
6.1 Introduction	121
6.1.1 Phénomènes physiques	123
6.1.2 Typologie de capteurs photovoltaïques intégrés au bâtiment	125
6.2 Modélisation	128
6.2.1 Production électrique	128
6.2.2 Prise en compte du comportement thermique du capteur PV	130
6.2.3 Modélisation thermique	130
6.2.4 Intégration dans un outil de simulation thermique du bâtiment	134
6.3 Application de la simulation à des projets de démonstration	136
6.3.1 Simulation pour BIPV en configuration double peau ventilée	136
6.3.2 Préchauffage d'air neuf	137
6.3.3 Couplage photovoltaïque et pompe à chaleur	138
6.4 Perspectives	143
6.5 Bibliographie	144
CHAPITRE 7. Systèmes électriques	147
7.1 Introduction	147
7.2 Classification et caractérisation	148
7.2.1 Classification des appareils électriques	148
7.2.2 Modèle thermique des appareils électriques	149
7.2.3 Modélisation électrique – Thermique des courbes de charge des appareils électriques	151
7.3 Influence des appareils électriques sur les consommations du bâtiment	154
7.3.1 Description et propriétés du bâtiment	154
7.3.2 Occupation et appareils	155
7.3.3 Résultats et discussions	156
7.4 Conclusion	157
7.5 Bibliographie	158
CHAPITRE 8. Énergie et cycle de vie	159
8.1 Présentation de la méthode	159
8.2 Limites de la méthode	163
8.3 Exemple d'application	164
8.4 Conclusion	169
8.5 Références bibliographiques	170
CHAPITRE 9. Fonctionnalités des outils	171

II – VALIDATION DES MODÈLES

CHAPITRE 10. Bancs d'essais, comparaisons interlogicielles	177
10.1 BesTest de l'Agence Internationale de l'énergie	177
10.1.1 Principes du banc d'essais numérique	177
10.1.2 Résultats du BesTest	183
10.1.3 Conclusions	187
10.1.4 Références bibliographiques	188
10.2 Étude en phase de conception d'une des maisons INCAS	190
10.2.1 Introduction	190
10.2.2 Outils considérés	190
10.2.3 Bâtiment étudié et modèle retenu	191
10.2.4 Résultats	193
10.2.5 Conclusions	196
CHAPITRE 11. Validation expérimentale	197
11.1 Annexe 43 de l'Agence Internationale de l'énergie	197
11.2 Validation expérimentale sur les maisons INCAS	199
11.2.1 Introduction	199
11.2.2 Plate-forme INCAS	200
11.2.3 Validation expérimentale d'EnergyPlus sur la maison I-DM	205
11.2.4 Validation expérimentale de COMFIE sur la maison I-BB	213
11.2.5 Conclusion	223
11.2.6 Références bibliographiques	223

III – MISE EN ŒUVRE DE LA SIMULATION

CHAPITRE 12. Adéquation aux objectifs de l'étude	227
12.1 Utilisation de la simulation à différentes étapes d'un projet	228
12.2 Définition de zones thermiques	228
12.3 Autres aspects	229
CHAPITRE 13. Données d'entrée	231
13.1 Climat	231
13.1.1 Variables météo requises pour la STD	231
13.1.2 Type de fichier utilisé. Méthode de création des fichiers	235
13.1.3 Développements futurs des fichiers types	237
13.1.4 Disponibilité des fichiers types et des données brutes météo	238
13.1.5 Références	239

13.2	Microclimat et environnement proche	240
13.2.1	Introduction	240
13.2.2	Données climatiques	242
13.2.3	Formes urbaines et approches bioclimatiques	246
13.2.4	Confort dans les espaces extérieurs	250
13.2.5	Approches climat-STD	251
13.2.6	Approches climat-STD, échelle Ville	253
13.2.7	Conclusion	253
13.2.8	Bibliographie	254
13.3	Géométrie, liens avec la maquette numérique	256
13.3.1	Modèle thermique et géométrie 3D	257
13.3.2	Géométrie et sémantique. Formats informatiques des données	258
13.3.3	Gestion des flux de données et bases de données	261
13.3.4	Concepts et liens sémantiques d'une ontologie relative à la maquette numérique et aux BDD	263
13.3.5	Conclusion	269
13.3.6	Bibliographie	269
13.4	Données sur l'enveloppe	270
13.4.1	Parois opaques	270
13.4.2	Menuiseries	272
13.4.3	Contact avec le sol	274
13.4.4	Inertie	274
13.4.5	Masques solaires	275
13.4.6	Aérodynamique	275
13.4.7	Éclairage	276
13.4.8	Paramètres Hygrothermiques	279
13.5	Données sur les systèmes	279
13.5.1	Exemple d'un chauffe-eau solaire thermique	280
13.5.2	Ressources – Bibliothèque de modèles	283
13.6	Scénarios d'usage	284
13.6.1	L'approche stochastique pour pallier les limites des scénarios déterministes	285
13.6.2	Proposition d'une modélisation stochastique	287
13.6.3	Description des modèles dans le cas des logements	291
13.6.4	Application à une maison à énergie positive	302
13.6.5	Conclusion	304
13.6.6	Bibliographie	304

CHAPITRE 14. Utilisation de la simulation et exploitation des résultats

14.1	Analyse des résultats – performance et confort	305
14.1.1	Contexte	305
14.1.2	Performance énergétique	306
14.1.3	Confort	307

14.2	Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes	308
14.2.1	Introduction	308
14.2.2	Présentation du bâtiment	309
14.2.3	Modélisation des phénomènes physiques	309
14.2.4	Hypothèse de simulation	310
14.2.5	Définition des variables d'intérêt	315
14.2.6	Analyse de sensibilité	317
14.2.7	Génération des métamodèles	325
14.2.8	Observation des indices de Sobol	331
14.2.9	Propagation d'incertitude sur le cas test	332
14.2.10	Influence de la maîtrise des incertitudes	334
14.2.11	Synthèse propagation d'incertitude	335
14.2.12	Conclusions et Perspectives	335
14.3	Techniques d'optimisation	336
14.3.1	Préambule	336
14.3.2	L'optimisation : une nouvelle révolution des méthodes et outils de conception par ordinateur des bâtiments?	336
14.3.3	Méthodologies d'optimisation	337
14.3.4	Contexte du bâtiment	343
14.3.5	Exemple de problème d'optimisation sur un bâtiment	346
14.3.6	Pour aller plus loin et perspectives de recherche	346
14.3.7	Conclusion	346
14.3.8	Bibliographie	347

IV – EXEMPLES D'APPLICATIONS

CHAPITRE 15.	Construction neuve	353
15.1	Évaluation du besoin énergétique d'un centre de recherche en écotoxicologie et toxicologie environnementale de 13 000 m²	353
15.1.1	Contexte et objectifs	353
15.1.2	Démarche adoptée : la simulation thermique dynamique	354
15.1.3	Hypothèses de simulation du pôle écotox	354
15.1.4	Résultats	361
15.1.5	Fiabilité des résultats et analyses d'incertitude	365
15.1.6	Conclusions et optimisations possibles	371
15.2	La simulation thermique dynamique comme outil d'aide à la décision pour la conception d'un bâtiment à énergie positive	372
15.2.1	Le bâtiment IZUBA : intentions, usages, calendrier	372
15.2.2	Les outils d'aide à la conception : Alcyone, Pléiades+COMFIE, Eneligh, novaEQUER	373
15.2.3	Optimisation de l'enveloppe	374
15.2.4	Optimisation énergétique sur les systèmes	378
15.2.5	Énergies renouvelables	380
15.2.6	Analyse du Cycle de Vie	382
15.2.7	Conclusions	384

CHAPITRE 16. Projets de réhabilitation	387
16.1 Le rôle de la simulation thermique dynamique dans un projet de rénovation énergétique	387
16.1.1 Démarche adoptée pour l'étude	387
16.1.2 Les difficultés rencontrées	389
16.1.3 La bonne analyse des résultats de simulation	393
16.1.4 Conclusion	394
16.2 Le rôle de la simulation thermique dynamique dans un projet de rénovation énergétique de bâtiments patrimoniaux	395
16.2.1 Démarche pour l'étude	396
16.2.2 Les difficultés rencontrées	398
16.2.3 Le diagnostic : étude préalable pour une bonne compréhension du projet	400
16.2.4 Première phase d'étude : étude des opportunités du projet	406
16.2.5 Deuxième phase d'étude : analyse de la solution retenue	409
CHAPITRE 17. Nouvelles utilisations de la simulation	415
17.1 Bâtiment industriel et tertiaire	415
17.1.1 Description du bâtiment	415
17.1.2 Scénarios et systèmes de conditionnement	418
17.1.3 Zonage thermique	419
17.1.4 Modèle numérique	419
17.1.5 Validation du modèle	420
17.1.6 Quelques résultats obtenus	421
17.1.7 Conclusion	423
17.1.8 Références	424
17.2 Vers la Garantie de performance énergétique	424
17.2.1 Présentation du bâtiment étudié	424
17.2.2 Description de l'opération de réhabilitation	427
17.2.3 Mesures disponibles	429
17.2.4 Résultats des simulations	432
17.2.5 Analyse de sensibilité et d'incertitude sur la consommation énergétique après travaux	436
17.2.6 Garantie de performance énergétique	441
17.2.7 Annexe : Valeurs des coefficients convectifs	442
17.2.8 Bibliographie	443

Conclusions et perspectives	445
------------------------------------	-----

Les schémas qui exigeaient d'être en couleurs figurent une première fois en noir dans le texte et une seconde fois en couleurs dans le cahier hors-texte.

Préface

Un des grands défis d'aujourd'hui et des années à venir consiste à diminuer les risques de changement climatique anthropique et à atténuer les conséquences négatives d'une consommation excessive d'énergie sans pour autant sacrifier la qualité de vie. Cela est particulièrement problématique en raison de la croissance de la population mondiale et de la transformation rapide des modes de vie dans les pays en voie de développement. Le chauffage, la climatisation, la ventilation et l'éclairage des bâtiments contribuent considérablement à la consommation globale d'énergie (de 30 à 40 % selon les pays). Par conséquent, il est impossible de répondre à ce grand défi social et environnemental sans s'attaquer à la performance énergétique des bâtiments.

Comment concevoir des bâtiments à faibles besoins énergétiques? Quelles sortes de fenêtres devrait-on fabriquer pour fournir un bon éclairage naturel et, en même temps, en minimiser l'impact sur les systèmes thermiques? Quelle quantité d'isolant devrait-on poser dans les parois, et comment empêcher les transports d'humidité dans les matériaux poreux? Comment dimensionner et intégrer les capteurs solaires thermiques et les systèmes photovoltaïques dans les bâtiments et les systèmes thermiques et électriques pour mieux exploiter l'énergie renouvelable?

Les réponses à ces questions ne sont pas universelles. Elles dépendent du climat, du comportement des occupants et des interactions entre l'enveloppe du bâtiment et les systèmes thermiques et aérauliques, etc. Les combinaisons d'options de conception et de mise en œuvre sont infinies. Un outil de simulation énergétique des bâtiments peut fonctionner comme une plate-forme d'essais virtuelle afin d'examiner les options et de trouver les solutions optimales. Ainsi, ces outils offrent un grand potentiel pour changer les procédures de conception du bâtiment, améliorer la qualité de l'environnement intérieur, réduire le coût global et diminuer la consommation d'énergie. Mais ce potentiel ne sera pas réalisé sans des instruments performants et fiables, et surtout sans utilisateurs bien formés.

Il est très facile de faire fonctionner un outil de simulation et de produire des résultats, mais la production de résultats fiables est difficile, même pour des utilisateurs expérimentés. Il est vrai que les outils de simulation sont complexes et que l'incertitude des données d'entrée est considérable. Mais à vrai dire, le maillon faible est l'utilisateur. Pour faire fonctionner effectivement un outil de simulation, il est indispensable de comprendre les hypothèses ainsi que les limites des modèles et leurs incertitudes. Ces connaissances sont nécessaires pour savoir choi-

sir un outil approprié et entre les options disponibles dans chaque outil de simulation. De plus, avec ces connaissances, l'utilisateur peut juger des limites de la simulation et du niveau d'incertitude dans les résultats.

Ce livre, rédigé par des experts français de haut niveau, constitue une contribution importante à l'éducation des utilisateurs d'outils de simulation. Dans sa première partie, il expose certains des modèles implantés dans les outils de simulation, par exemple les méthodes pour traiter les transferts de chaleur et les mouvements de l'air et de l'humidité. Je suggère au lecteur d'étudier la théorie élaborée dans ces sections et en parallèle explorer l'utilisation des outils pour développer des connaissances en profondeur des modèles et de leurs limites. Dans l'apprentissage de la simulation des bâtiments, l'exploration active des outils est indispensable pour mieux comprendre, mais cela ne devrait pas être isolé de l'étude de la théorie. Il est donc important d'explorer des outils et d'étudier la théorie qui est présentée dans la première section d'une façon cyclique.

La deuxième partie de l'ouvrage traite d'un sujet important : les techniques qui ont été développées pour tester et valider des modèles et la fiabilité des outils. Sa troisième partie donne des conseils sur la mise en œuvre des outils de simulation : par exemple, la définition de zones thermiques et l'analyse des résultats. Enfin, dans la quatrième et dernière partie, on peut découvrir plusieurs exemples de l'application des outils de simulation.

Il est vraiment extraordinaire de pouvoir disposer maintenant d'un ouvrage si exhaustif en français. Il est, à mon avis, indispensable aux débutants comme aux experts dans le domaine de la simulation énergétique des bâtiments.

Ian Beausoleil-Morrison
professeur à la Carleton University
Ottawa, Canada
mai 2015.

Introduction

(H. Pénicaud)

Qu'apporte la simulation énergétique? Que peut-on en attendre?

Comme son nom l'indique, la simulation énergétique vise à donner une image aussi exacte que possible des échanges énergétiques dans les bâtiments, dans un but d'optimisation de la conception et de l'usage des bâtiments et de leurs installations techniques.

Cette optimisation porte essentiellement sur deux facteurs: le confort – hygrothermique, lumineux et en termes de qualité de l'air – et la consommation d'énergie, ainsi que ses conséquences sur le coût d'exploitation et le changement climatique.

À entendre certains discours, on a parfois l'impression qu'il n'existe qu'une seule réalité énergétique, et donc qu'il ne devrait y avoir qu'un seul logiciel de simulation, celui qui correspondrait exactement à cette réalité.

Mais, même si l'apparition des outils numériques a multiplié nos capacités de simulation, tout logiciel de simulation énergétique, pour pouvoir être opérationnel, est nécessairement basé sur des hypothèses simplificatrices, plus ou moins implicites. Ces simplifications sont fonction de l'objet auquel s'applique la simulation.

Le temps

Par rapport aux calculs tels qu'ils pouvaient être effectués avant l'ère du numérique, la STD (Simulation Thermique Dynamique) introduit la dimension TEMPS: le progrès déterminant est que la simulation thermique est aujourd'hui «dynamique». Auparavant, le calcul thermique était basé sur des équations utilisées pour traduire des états instantanés (utilisées pour dimensionner des puissances maximales d'installation ou des conditions limites de confort, par exemple), des régimes permanents ou à rythmes cycliques simples. La variation des phénomènes n'était analysable que pour des phénomènes cycliques décomposables en variations sinusoïdales (on prenait en compte ainsi les rythmes de variations quotidiennes des éléments climatiques).

Les logiciels de STD sont calés sur des pas de temps le plus souvent de l'ordre de quelques minutes à une heure, bien adaptés à la prise en compte des phénomènes essentiellement conductifs modélisés. Les variations sur des temps plus courts ou plus longs ne sont pas directement prises en compte.

Pour des variations plus courtes, on prend le plus souvent des valeurs statistiques observées ou calculées en amont. Ainsi, les coefficients d'échanges convectifs des parois ne sont pas calculés à chaque pas de temps d'après les mouvements d'air locaux à un instant précis. Ainsi également, le temps de réaction d'une régulation ou la surpuissance appelée à la mise en route d'une pompe ou d'un ventilateur ne sont pris en compte que forfaitairement, d'après les résultats de mesures physiques et de simulations réalisées à une tout autre échelle de temps.

Par contre, les phénomènes radiatifs peuvent être pris en compte en considérant à chaque pas de temps l'irradiation solaire instantanée sur les parois considérées et l'effet des masques et des occultations.

Des éléments plus aléatoires, notamment liés au comportement des occupants, sont traduits en rythmes réguliers, que ce soit pour l'occupation ou le déplacement d'un point de consigne pour un ralenti de nuit. Certaines variations des paramètres de la simulation peuvent être liées aux conditions d'ambiance thermique, en introduisant un comportement théorique (abaissement des stores ou ouverture des fenêtres en fonction de l'insolation ou de la surchauffe, par exemple). La consommation d'eau chaude sanitaire, celle d'un réfrigérateur ou pour la cuisson des aliments vont dépendre des installations (dont les consommations nominales sont approchées à partir de tests en amont imposés aux constructeurs), mais essentiellement des modes de vie (nombre et durée des douches, ouvertures et rotation de la nourriture dans le réfrigérateur, régime alimentaire), qui ne sont approchés que de façon statistique.

Pour les variations plus longues que l'année, les logiciels partent de données climatiques sur une année type : soit une année basée sur les statistiques des années antérieures, soit une année basée sur les projections tenant compte du changement climatique sur les quarante à quatre-vingts années pour lesquelles les bâtiments sont construits. Mais dans le même temps, les comportements évolueront tout autant, et leur impact sur les consommations va être au moins aussi déterminant.

L'espace tridimensionnel

Si la STD se caractérise par l'introduction de la dimension temporelle, la puissance de calcul des outils numériques permet également de passer d'un calcul monodimensionnel à un calcul bidimensionnel ou tridimensionnel, permettant de traduire d'autres aspects des échanges énergétiques.

La plupart des logiciels restent basés, comme les anciens calculateurs analogiques, sur une décomposition des phénomènes en circuits d'échanges en série et en parallèle. L'enveloppe et les parois du bâtiment sont décomposées en surfaces (généralement planes) séparant deux ambiances. Cela correspond aux modes constructifs actuels, mais que dire des habitats premiers que sont la tente ou la grotte ?

L'investissement de l'espace tridimensionnel ne se fait généralement pas par le logiciel STD lui-même, mais en amont et en aval.

En amont d'une STD, on peut effectuer des simulations de ponts thermiques (en bidimensionnel pour les ponts thermiques linéaires, en tridimensionnel pour les ponts thermiques

ponctuels) : ces simulations, réalisées en régime permanent, permettent d'intégrer les échanges moyens par ces zones singulières, mais généralement pas l'inertie thermique de ces zones.

Chez les fabricants d'organes d'installations énergétiques, des outils de simulation tridimensionnelle permettent de les concevoir en optimisant leur rendement et leur fonctionnement, et des tests les font valider. La normalisation des essais permet de fournir aux programmes de STD des données d'entrée sous forme de caractéristiques de fonctionnement aux différents régimes établis : à chaque pas de temps, on fait appel aux paramètres de fonctionnement ainsi prédéterminés, en fonction des conditions instantanées.

Si la modélisation des ponts thermiques et des organes techniques peut souvent se passer de la dimension « temps » sans trop d'erreurs, il en va autrement pour d'autres phénomènes : en particulier, le comportement thermique du sol impose de tenir compte de son inertie. La plupart des logiciels de STD nous proposent des modèles de sol plus ou moins convaincants pour des cas standard, tirés d'études dynamiques 3D.

En aval de la STD, les résultats de celle-ci servent de paramètres d'entrée aux logiciels aérodynamiques de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), autorisant l'étude des mouvements d'air dans les espaces. La STD permet de donner les conditions aux limites à partir desquelles seront déterminés les champs de vitesse et de température à l'intérieur de volumes vastes et complexes pour un moment donné, choisi comme représentatif de conditions moyennes ou extrêmes. Du fait de la lourdeur et du temps pris par les calculs, liés à la discrétisation poussée de l'espace, on n'introduit pas dans ces calculs la dimension temporelle.

Il est important d'adapter les outils à l'objet et aux paramètres que l'on désire simuler : nous devons jouer entre des simulations fines sur un objet statique ou des simulations basées sur des modèles simplifiés (homogénéité de chaque ambiance) mais permettant une analyse de l'évolution des paramètres.

Les données climatiques d'entrée et l'imbrication des échelles

Un autre point délicat est lié à la définition des limites de nos modèles, et de leurs conditions aux limites. En particulier, de quelles données d'entrée du climat extérieur peut-on partir ?

À partir des données météorologiques enregistrées à la station la plus proche (ou interpolées entre différentes stations voisines), comment peut-on en déduire le microclimat aux abords mêmes du bâtiment que nous simulons ? Cette interrogation est particulièrement légitime à propos des bâtiments où des infiltrations constituent un élément déterminant de leur bilan thermique, ou de ceux où la ventilation naturelle est utilisée dans la mesure où le paramètre climatique le plus variable d'un endroit à l'autre est le vent.

Des modélisations à l'échelle urbaine seraient nécessaires, couplant des modèles météorologiques de l'atmosphère à une simulation des interférences et phénomènes dans la couche limite où se créent des microclimats largement tributaires de la topographie, de la nature du sol et des bâtiments eux-mêmes.

Nous n'en sommes guère au point de pouvoir entrer dans nos simulations des paramètres climatiques recalés par rapport à l'influence de l'environnement sur les champs de vitesse d'air à chaque pas de temps, ou par rapport à l'influence de l'évapotranspiration de la végétation avoisinante sur la réduction de l'îlot de chaleur locale.

Avec l'élargissement des préoccupations du bâtiment aux quartiers et ensembles urbains, de nouveaux modèles de simulation voient le jour.

De l'influence des logiciels de simulation sur l'architecture

Tant que nous nous intéressons à des ambiances de bâtiments très hermétiques, nos simulations donnent des résultats répondant relativement bien à nos attentes en termes de confort ou de consommation énergétique. Par contre, une simulation complète des ambiances thermiques et des champs de température, de vitesse d'air et de transferts de vapeur d'eau, nécessaire pour évaluer le confort dans des bâtiments de zones tropicales humides en ventilation naturelle, reste très approximative.

Pour l'instant, la tendance dominante, avec le pouvoir magique attribué à la simulation thermique, érigée en juge de paix absolu, est de générer une architecture dont la vertu puisse être validée par ces fameuses STD.

- Typiquement, la ventilation naturelle étant plus difficile à modéliser, on est peu enclin à la valoriser dans les projets.
- Les échanges évaporatifs de la végétation n'étant pas simulés, ils sont négligés. On ne fait pas la différence entre une toiture végétale en sédum sec et une végétation sur substrat irrigué.
- De même, certaines formes d'architectures ne raisonnant pas en murs et toit, mais en objets ou en espaces complexes se trouvent écartées du champ d'investigation.

Sans doute, le seul paramètre énergétique peut, dans une première réflexion, nous orienter vers des espaces à vivre uniformes, à l'enveloppe très hermétique, permettant un contrôle parfait des ambiances modélisées à loisir. Les politiques de « modèles » constructifs, avec des cellules types, réapparaissent périodiquement. Effectivement, de même qu'on simule à tous points de vue l'ambiance et la consommation énergétique d'une automobile ou d'un train, on pourrait proposer un module d'habitat unique, avec au besoin une légère variation régionale suivant le climat. L'homme n'est (malheureusement?) pas unique ni modelable, et son habitat est encore un lieu d'expression de sa culture et de son individualité. Aussi, la simulation énergétique n'a pas pour but de concevoir LA boîte idéale à caser des populations, mais d'optimiser énergétiquement un produit répondant à leurs aspirations.

Et l'habitant?

Dans notre approche tridimensionnelle et temporelle de l'énergie, n'oublions pas non plus que l'homme vit, dans tout cet espace, avec ses désirs et son imaginaire: il bouge, il passe du dedans au dehors, il change d'activité et de vêtements, il souhaite profiter du soleil de printemps, se mettre au frais sur une terrasse ombragée en sentant la brise, puis s'abriter dans une ombre protectrice, aller dans un sauna avant de se rouler dans la neige. Est-on sûr que le bien-être et le confort peuvent se réduire à éviter un inconfort normalisé?

La STD est pour l'instant un outil dont on attend beaucoup trop: certains revendeurs de logiciels déclarent que leurs simulations sont vraies au dixième de degré près! Mais les résultats de ces simulations ne sont que la résultante des données entrées et de présupposés quant aux aspirations des habitants.

La simulation nous permet, par sa puissance de calcul, de concevoir l'énergétique du bâtiment dans un monde en quatre dimensions. Il est néanmoins une dimension qu'elle n'aborde guère pour l'instant que de façon normative ou statistique: le comportement humain, à travers les modes d'habitat et l'entretien et la maintenance des installations.

Chaque progrès dans la maîtrise des consommations énergétiques fait apparaître de nouveaux postes dont l'importance relative croît au fur et à mesure que les principaux postes de consommation traditionnels sont de mieux en mieux traités et limités. Ainsi, une fois l'isolation des parois opaques bien maîtrisée, les ponts thermiques, puis les pertes par infiltration, sont devenus les points critiques de l'enveloppe. Aujourd'hui, la consommation des auxiliaires (pompes, ventilateurs, régulateurs) devient prédominante parmi les postes de consommation liés au fonctionnement du bâtiment, mais aussi les consommations d'énergie relatives aux activités internes (bureautique, vidéo, appareillages électroniques divers, cuisson ou conservation des aliments) prennent le pas sur ces consommations « réglementaires » : c'est le mode de vie qui devient le facteur déterminant des consommations énergétiques.

Les prochains programmes de simulation ne progresseront sans doute pas tant dans le traitement d'algorithmes permettant de rendre compte de phénomènes physiques plus complexes, qu'en aidant non plus seulement les concepteurs, mais aussi les exploitants et les habitants à gérer et vivre au mieux les bâtiments mis à leur disposition : une dimension pédagogique et interactive affirmée, avec la possibilité d'études de sensibilité exploitables rapidement. À partir des modèles mis au point par les concepteurs, et des systèmes experts capables d'ajuster ces modèles, on permettra à tout un chacun de mieux maîtriser son environnement de façon éconsciente.

Attention, néanmoins, aux failles de ces systèmes.

- D'une part, il s'agit bien de rendre chacun plus apte à assumer directement ses responsabilités vis-à-vis de ses comportements et par là de ses consommations, et non pas de se reposer entièrement sur un « *big brother* » au bout d'une « *smart grid* » opaque.
- D'autre part, ne perdons pas de vue que les immenses possibilités de calcul des ordinateurs :
 - consomment de l'énergie (les GTB et autres systèmes sophistiqués de contrôle des ambiances et des consommations commencent parfois à consommer plus d'énergie qu'ils n'en font gagner) ;
 - supposent des comptages et des mesures fiables dans le temps, ce qui n'est pas toujours le cas (sondes, senseurs, compteurs électriques, connaissent des problèmes de vieillissement et de dérive). Aussi ces organes doivent-ils être limités, simples et facilement contrôlables.