

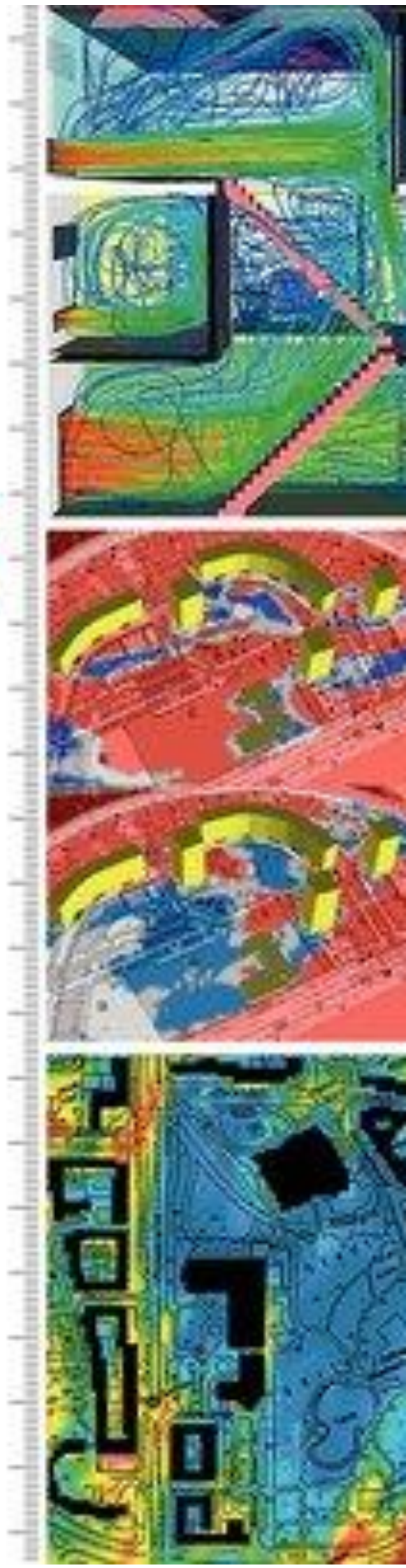
Bruno Peuportier
coordinateur

ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS & SIMULATION THERMIQUE

Modèles
Mise en œuvre
Études de cas

Préface de Ian Beausoleil-Morrison
Introduction d'Hubert Pénicaud

EYROLLES



Ouvrage collectif

Énergétique des bâtiments et simulation thermique

EYROLLES



ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Auteurs : Marc Abadie, Alain Bastide, Rachid Bennacer, Emmanuel Bozonnet, Boris Brangeon, Adrien Brun, Benjamin Cinquin-Lapierre, Baptiste Durand-Estèbe, Aurélie Fouquier, Gilles Fraisse, Jeanne Goffart, Alain Guiavarch, Frédéric Kuznik, Remon Lapisa, Jérôme Lopez, Christophe Ménézo, Laurent Mora, Fabio Munaretto, Marjorie Musy, Hubert Pénicaud, Rémi Périer, Bruno Peuportier, Christophe Plantier, Thomas Recht, Jean-Jacques Roux, Marie Ruellan, Patrick Salagnac, Patrick Schalbart, Eduardo Serodio, Clara Spitz, Yannick Sutter, Stéphane Thiers, Pierre Tittlein, Éric Vorger, Monika Woloszyn, Étienne Wurtz, Frédéric Wurtz.

Coordination : Bruno Peuportier

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2016, ISBN : 978-2-212-14275-4

Sommaire

Préface	13
Introduction	15

I – MODÈLES ET PRINCIPALES HYPOTHÈSES

CHAPITRE 1. Modélisation thermique du bâtiment	23
CHAPITRE 2. Éclairage	43
CHAPITRE 3. Aéraulique	67
CHAPITRE 4. Transferts de masse	85
CHAPITRE 5. Systèmes thermiques	105
CHAPITRE 6. Systèmes photovoltaïques	117
CHAPITRE 7. Systèmes électriques	143
CHAPITRE 8. Énergie et cycle de vie	155
CHAPITRE 9. Fonctionnalités des outils	167

II – VALIDATION DES MODÈLES

CHAPITRE 10. Bancs d'essais, comparaisons interlogicielles	171
CHAPITRE 11. Validation expérimentale	191

III – MISE EN ŒUVRE DE LA SIMULATION

CHAPITRE 12. Adéquation aux objectifs de l'étude	221
CHAPITRE 13. Données d'entrée	225
CHAPITRE 14. Utilisation de la simulation et exploitation des résultats	301

IV – EXEMPLES D'APPLICATIONS

CHAPITRE 15. Construction neuve	349
CHAPITRE 16. Projets de réhabilitation	383
CHAPITRE 17. Nouvelles utilisations de la simulation	411
Conclusions et perspectives	441

Table des matières

Préface	13
Introduction	15

I – MODÈLES ET PRINCIPALES HYPOTHÈSES

CHAPITRE 1. Modélisation thermique du bâtiment	23
1.1 Préambule	23
1.2 Transferts de chaleur dans le bâtiment	24
1.2.1 Conduction	24
1.2.2 Convection	25
1.2.3 Rayonnement	26
1.3 Principes de modélisation dynamique du bâtiment	29
1.4 Bilans enthalpique et massique de la masse d'air	31
1.4.1 Bilan enthalpique: équations générales	31
1.4.2 Bilan massique d'air sec	31
1.4.3 Bilan sensible et latent	32
1.5 Traitement de la conduction	33
1.5.1 Discrétisation spatiale du domaine de calcul	33
1.5.2 Résolution temporelle du système différentiel	34
1.5.3 Méthode de représentation externe	34
1.6 Traitement des échanges radiatifs	35
1.6.1 Hypothèses simplificatrices	35
1.6.2 Échanges radiatifs extérieurs	36
1.6.3 Échanges radiatifs intérieurs	38
1.7 Conclusion	41
1.8 Références bibliographiques	41

CHAPITRE 2. Éclairage	43
2.1 Préambule	43
2.2 Indicateurs d'éclairage naturel	43
2.2.1 Concept d'ambiance lumineuse	43
2.2.2 Indicateurs de caractérisation des ambiances lumineuses	44
2.3 Méthodologies de prédétermination de l'éclairage naturel	50
2.3.1 Les mesures	50
2.3.2 Les calculs	51
2.3.3 Les simulations numériques	51
2.4 Zoom sur les algorithmes de simulation numérique de la propagation de la lumière	51
2.4.1 La méthode des flux séparés	52
2.4.2 La radiosité	52
2.4.3 Le lancer de rayons	53
2.4.4 Le <i>photon mapping</i>	54
2.4.5 Usage pratique des algorithmes	54
2.5 Les paramètres influant dans les simulations numériques	54
2.6 Appréciation de l'influence de certains paramètres à l'aide d'un exemple	57
2.6.1 Influence des paramètres de modélisation	58
2.6.2 Influence des paramètres de simulation	59
2.6.3 Modélisation et paramétrage optimaux	62
2.6.4 Enseignements à retenir de ces tests paramétriques	63
2.7 Quid de l'éclairage électrique	64
2.8 Références	64
2.9 Annexe 1	65
2.10 Annexe 2	66
 CHAPITRE 3. Aéraulique	 67
3.1 La ventilation et la convection naturelles	68
3.1.1 Le tirage thermique	69
3.1.2 Les effets du vent	71
3.1.3 Effets cumulés du vent et du tirage thermique	74
3.1.4 Ventilation naturelle à l'intérieur: le phénomène de shunt	75
3.2 Modélisation des phénomènes aérauliques	76
3.2.1 Méthode MFN	76
3.2.2 Méthode zonale	78
3.2.3 Méthode nodale	79
3.3 Ventilation mécanique	82
3.4 Conclusion	83
3.5 Références	84

CHAPITRE 4. Transferts de masse	85
4.1 Introduction	85
4.2 Les équations de bilan	86
4.3 L'humidité dans les matériaux poreux	88
4.3.1 Introduction	88
4.3.2 Stockage d'humidité (« capacité hygrique »)	88
4.3.3 Transfert d'humidité	89
4.3.4 Modèles simplifiés	92
4.4 Couplages thermo-hygro-aérauliques	94
4.5 Est-il important de prendre en compte l'humidité dans la simulation thermique dynamique?	94
4.6 L'humidité dans les outils de simulation thermique dynamique ..	99
4.7 Validation des codes de simulation thermo-hygro-aérauliques	100
4.8 Conclusion	102
4.9 Références	102
 CHAPITRE 5. Systèmes thermiques	 105
5.1 Introduction	105
5.2 Les différents modèles et les données correspondantes	107
5.2.1 Modèles de type « boîte blanche »	108
5.2.2 Modèles de type « boîte noire »	108
5.2.3 Modèles de type « boîte grise »	108
5.2.4 Identification des paramètres	108
5.3 Exemple de la pompe à chaleur (PAC)	109
5.3.1 Description du modèle	109
5.3.2 Modélisation du compresseur (six paramètres)	110
5.3.3 Modélisation des échangeurs (deux paramètres)	111
5.3.4 Modélisation du détendeur (un paramètre)	111
5.3.5 Paramètres à identifier	111
5.3.6 Données d'essais pour l'identification des paramètres	111
5.3.7 Mise en œuvre sur un cas d'étude	112
5.3.8 Utilisation du modèle	113
5.3.9 Conditions d'utilisation	113
5.3.10 Fonctionnement à charge partielle	114
5.3.11 Mode marche-arrêt	114
5.3.12 Mode variation de puissance	114
5.3.13 Sélection des phénomènes à modéliser	115
5.4 Conclusion	115

CHAPITRE 6. Systèmes photovoltaïques	117
6.1 Introduction	117
6.1.1 Phénomènes physiques	119
6.1.2 Typologie de capteurs photovoltaïques intégrés au bâtiment	121
6.2 Modélisation	124
6.2.1 Production électrique	124
6.2.2 Prise en compte du comportement thermique du capteur PV	126
6.2.3 Modélisation thermique	126
6.2.4 Intégration dans un outil de simulation thermique du bâtiment ...	130
6.3 Application de la simulation à des projets de démonstration	132
6.3.1 Simulation pour BIPV en configuration double peau ventilée	132
6.3.2 Préchauffage d'air neuf	133
6.3.3 Couplage photovoltaïque et pompe à chaleur	134
6.4 Perspectives	139
6.5 Bibliographie	140
CHAPITRE 7. Systèmes électriques	143
7.1 Introduction	143
7.2 Classification et caractérisation	144
7.2.1 Classification des appareils électriques	144
7.2.2 Modèle thermique des appareils électriques	145
7.2.3 Modélisation électrique – Thermique des courbes de charge des appareils électriques	147
7.3 Influence des appareils électriques sur les consommations du bâtiment	150
7.3.1 Description et propriétés du bâtiment	150
7.3.2 Occupation et appareils	151
7.3.3 Résultats et discussions	152
7.4 Conclusion	153
7.5 Bibliographie	154
CHAPITRE 8. Énergie et cycle de vie	155
8.1 Présentation de la méthode	155
8.2 Limites de la méthode	159
8.3 Exemple d'application	160
8.4 Conclusion	165
8.5 Références bibliographiques	166
CHAPITRE 9. Fonctionnalités des outils	167

II – VALIDATION DES MODÈLES

CHAPITRE 10. Bancs d'essais, comparaisons interlogicielles .	171
10.1 BesTest de l'Agence Internationale de l'énergie	171
10.1.1 Principes du banc d'essais numérique	171
10.1.2 Résultats du BESTEST	177
10.1.3 Conclusions	181
10.1.4 Références bibliographiques	182
10.2 Étude en phase de conception d'une des maisons incas	184
10.2.1 Introduction	184
10.2.2 Outils considérés	184
10.2.3 Bâtiment étudié et modèle retenu	185
10.2.4 Résultats	187
10.2.5 Conclusions	190
CHAPITRE 11. Validation expérimentale	191
11.1 Annexe 43 de l'Agence Internationale de l'énergie	191
11.2 Validation expérimentale sur les maisons INCAS	193
11.2.1 Introduction	193
11.2.2 Plate-forme INCAS	194
11.2.3 Validation expérimentale d'EnergyPlus sur la maison I-DM	199
11.2.4 Validation expérimentale de COMFIE sur la maison I-BB	207
11.2.5 Conclusion	217
11.2.6 Références bibliographiques	217

III – MISE EN ŒUVRE DE LA SIMULATION

CHAPITRE 12. Adéquation aux objectifs de l'étude	221
12.1 Utilisation de la simulation à différentes étapes d'un projet	222
12.2 Définition de zones thermiques	222
12.3 Autres aspects	223
CHAPITRE 13. Données d'entrée	225
13.1 Climat	225
13.1.1 Variables météo requises pour la STD	225
13.1.2 Type de fichier utilisé. Méthode de création des fichiers	229
13.1.3 Développements futurs des fichiers types	231
13.1.4 Disponibilité des fichiers types et des données brutes météo	232
13.1.5 Références	233

13.2	Microclimat et environnement proche	234
13.2.1	Introduction	234
13.2.2	Données climatiques	236
13.2.3	Formes urbaines et approches bioclimatiques	240
13.2.4	Confort dans les espaces extérieurs	244
13.2.5	Approches climat-STD	245
13.2.6	Approches climat-STD, échelle Ville	247
13.2.7	Conclusion	247
13.2.8	Bibliographie	248
13.3	Géométrie, liens avec la maquette numérique	250
13.3.1	Modèle thermique et géométrie 3D	251
13.3.2	Géométrie et sémantique. Formats informatiques des données	252
13.3.3	Gestion des flux de données et bases de données	255
13.3.4	Concepts et liens sémantiques d'une ontologie relative à la maquette numérique et aux BDD	257
13.3.5	Conclusion	263
13.3.6	Bibliographie	263
13.4	Données sur l'enveloppe	264
13.4.1	Parois opaques	264
13.4.2	Menuiseries	266
13.4.3	Contact avec le sol	268
13.4.4	Inertie	268
13.4.5	Masques solaires	269
13.4.6	Aéraulique	269
13.4.7	Éclairage	270
13.4.8	Paramètres Hygrothermiques	273
13.5	Données sur les systèmes	273
13.5.1	Exemple d'un chauffe-eau solaire thermique	274
13.5.2	Ressources – Bibliothèque de modèles	277
13.5.3	Références	278
13.6	Scénarios d'usage	279
13.6.1	L'approche stochastique pour pallier les limites des scénarios déterministes	280
13.6.2	Proposition d'une modélisation stochastique	282
13.6.3	Description des modèles dans le cas des logements	286
13.6.4	Application à une maison à énergie positive	297
13.6.5	Conclusion	299
13.6.6	Bibliographie	299

CHAPITRE 14. Utilisation de la simulation et exploitation des résultats 301

14.1	Analyse des résultats – performance et confort	301
14.1.1	Contexte	301
14.1.2	Performance énergétique	302
14.1.3	Confort	303

14.2	Analyse de sensibilité et propagation d'incertitudes	304
14.2.1	Introduction	304
14.2.2	Présentation du bâtiment	305
14.2.3	Modélisation des phénomènes physiques	305
14.2.4	Hypothèse de simulation	306
14.2.5	Définition des variables d'intérêt	311
14.2.6	Analyse de sensibilité	313
14.2.7	Génération des métamodèles	321
14.2.8	Observation des indices de Sobol	326
14.2.9	Propagation d'incertitude sur le cas test	328
14.2.10	Influence de la maîtrise des incertitudes	330
14.2.11	Synthèse propagation d'incertitude	331
14.2.12	Conclusions et Perspectives	331
14.3	Techniques d'optimisation	332
14.3.1	Préambule	332
14.3.2	L'optimisation : une nouvelle révolution des méthodes et outils de conception par ordinateur des bâtiments?	332
14.3.3	Méthodologies d'optimisation	333
14.3.4	Contexte du bâtiment	339
14.3.5	Exemple de problème d'optimisation sur un bâtiment	342
14.3.6	Pour aller plus loin et perspectives de recherche	342
14.3.7	Conclusion	342
14.3.8	Bibliographie	343

IV – EXEMPLES D'APPLICATIONS

CHAPITRE 15.	Construction neuve	349
15.1	Évaluation du besoin énergétique d'un centre de recherche en écotoxicologie et toxicologie environnementale de 13 000 m²	349
15.1.1	Contexte et objectifs	349
15.1.2	Démarche adoptée: la simulation thermique dynamique	350
15.1.3	Hypothèses de simulation du pôle écotox	350
15.1.4	Résultats	357
15.1.5	Fiabilité des résultats et analyses d'incertitude	361
15.1.6	Conclusions et optimisations possibles	367
15.2	La simulation thermique dynamique comme outil d'aide à la décision pour la conception d'un bâtiment à énergie positive	368
15.2.1	Le bâtiment IZUBA: intentions, usages, calendrier	368
15.2.2	Les outils d'aide à la conception : Alcyone, Pléiades+COMFIE, Enlight, novaEQUER	369
15.2.3	Optimisation de l'enveloppe	370
15.2.4	Optimisation énergétique sur les systèmes	374
15.2.5	Énergies renouvelables	376
15.2.6	Analyse du Cycle de Vie	378
15.2.7	Conclusions	380

CHAPITRE 16. Projets de réhabilitation	383
16.1 Le rôle de la simulation thermique dynamique dans un projet de rénovation énergétique	383
16.1.1 Démarche adoptée pour l'étude	383
16.1.2 Les difficultés rencontrées	385
16.1.3 La bonne analyse des résultats de simulation	389
16.1.4 Conclusion	390
16.2 Le rôle de la simulation thermique dynamique dans un projet de rénovation énergétique de bâtiments patrimoniaux	391
16.2.1 Démarche pour l'étude	392
16.2.2 Les difficultés rencontrées	394
16.2.3 Le diagnostic: étude préalable pour une bonne compréhension du projet	396
16.2.4 Première phase d'étude: étude des opportunités du projet	402
16.2.5 Deuxième phase d'étude: analyse de la solution retenue	405
CHAPITRE 17. Nouvelles utilisations de la simulation	411
17.1 Bâtiment industriel et tertiaire	411
17.1.1 Description du bâtiment	411
17.1.2 Scénarios et systèmes de conditionnement	414
17.1.3 Zonage thermique	415
17.1.4 Modèle numérique	415
17.1.5 Validation du modèle	416
17.1.6 Quelques résultats obtenus	417
17.1.7 Conclusion	419
17.1.8 Références	420
17.2 Vers la Garantie de performance énergétique	420
17.2.1 Présentation du bâtiment étudié	420
17.2.2 Description de l'opération de réhabilitation	423
17.2.3 Mesures disponibles	425
17.2.4 Résultats des simulations	428
17.2.5 Analyse de sensibilité et d'incertitude sur la consommation énergétique après travaux	432
17.2.6 Garantie de performance énergétique	437
17.2.7 Annexe: Valeurs des coefficients convectifs	438
17.2.8 Bibliographie	438
Conclusions et perspectives	441

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 aérodynamiques, 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-

sur 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.

Nouvelles utilisations de la simulation

17.1 Bâtiment industriel et tertiaire (P. Salagnac, R. Lapisa, M. Abadie & E. Bozonnet)

Dans cet exemple, nous présentons la modélisation thermoaéroulique d'un bâtiment neuf à vocation industrielle et tertiaire. L'objectif de cette étude est d'évaluer les déperditions thermiques du bâtiment ainsi que son potentiel de rafraîchissement afin de réduire l'inconfort thermique d'été, notamment par ventilation nocturne (mécanique et naturelle).

17.1.1 Description du bâtiment

Ce bâtiment, situé à Poitiers (France), est l'agence commerciale de la société Soprema. La particularité de ce bâtiment est qu'il est composé d'un entrepôt présentant un grand volume et une faible hauteur, situé au nord, et de bureaux situés au sud (figure 17.1).



Figure 17.1 Vue d'ensemble 3D du bâtiment. (Crédit photos : SOPREMA)

La zone de bureaux représente 776,4 m² de surface et s'étale sur deux niveaux (hauteur de plafond : 3 m). L'entrepôt, non cloisonné, d'une hauteur de 5 m, occupe une surface de 637,2 m². L'agencement du bâtiment est présenté sur la figure 17.2. On remarquera que les zones de bureaux sur les deux niveaux (plus forte présence des occupants) sont orientées au sud pour bénéficier des apports solaires gratuits. Les locaux secondaires (vestiaires femmes et hommes, archives, magasin et local d'assistance) sont, quant à eux, positionnés au milieu du bâtiment. Le RdC et l'étage sont connectés par un espace de circulation et un escalier (zone n° 6). La salle de réunion et la salle de repos sont situées à l'étage, et comportent un taux important de surface vitrée.

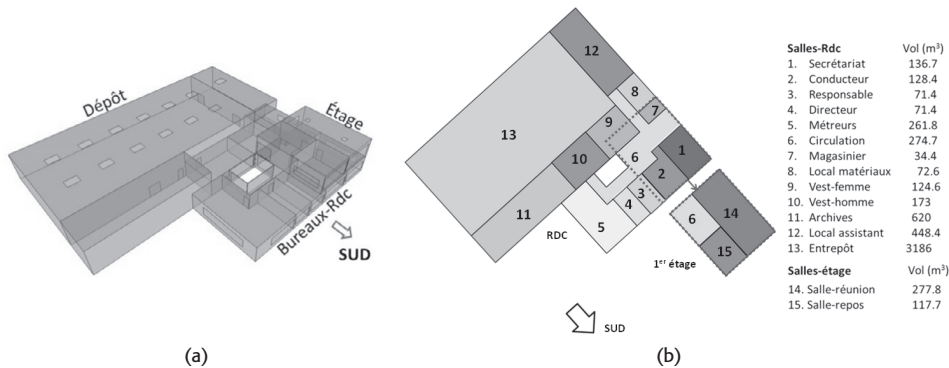


Figure 17.2 Géométrie du bâtiment: a. vue 3D du bâtiment, b. définition des zones thermiques.

Les dimensions de chaque pièce sont présentées dans le tableau 17.1.

Tableau 17.1 Caractéristiques géométriques des pièces.

Zones	S m ²	H m	S _{VIT} m ²	Zones	S _{HAB} m ²	H m	S _{VIT} m ²
Secrétariat	45,58	3	28,43	Vestiaire-Femmes	41,54	3	10,40
Bur. conducteur	42,80	3	13,83	Vestiaire-Hommes	57,66	3	--
Bur. responsable	23,80	3	14,79	Local archives	124	5	--
Bur. directeur	23,80	3	14,79	Local assistance	89,68	5	3,12
Bur. métreurs	87,26	3	17,31	Entrepôt	637,2	5	5,27
Circulation	91,58	3	31,71	Salle de réunion	79,38	3,5	22,08
Magasin	11,48	3	11,76	Salle de repos	33,63	3,5	50,93
Local matériaux	24,19	3	5,58				

S: surface du plancher (m²); H: hauteur du local (m); S_{VIT}: surface des fenêtres (m²).

Le bâtiment a été construit à partir d'une ossature métallique fortement isolée. L'isolation thermique est constituée de laine minérale de 150 mm pour le dépôt, de 250 mm pour les bureaux et de 230 mm en toiture. L'inertie thermique du bâtiment est liée principalement au dallage et aux planchers. Le plancher entre le rez-de-chaussée et l'étage se compose de 13 mm de plâtre, d'une dalle béton de 120 mm et de 12 mm de carrelage. Le plancher bas est en béton d'épaisseur 160 mm posé sur un sol argileux. Les portes intérieures sont en bois lourd

d'épaisseur 40 mm. Le mobilier et les fournitures, qui sont constitués de matériaux en bois, métal, plastique et papier, représentent environ 5 % du volume total des bureaux. Dans l'entrepôt, les marchandises occupent environ 30 % du volume. La toiture-terrasse de l'entrepôt comprend douze lanterneaux d'une surface totale de 33,6 m² pouvant être utilisés pour la ventilation naturelle des locaux (soit 5,3 % de la surface de toiture). Deux lanterneaux d'une surface de 1 m² chacun sont présents en toiture de la salle de réunion. Le détail des matériaux constituant les parois est donné dans le tableau 17.2.

Tableau 17.2 Constitution des parois extérieures et propriétés des matériaux.

Paroi	Matériau	Épaisseur (mm)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Chaleur massique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Bardage extérieur bureaux	Acier	2	50	7 800	419
	Laine de roche	250	0,035	50	920
	Plâtre	13	0,25	825	801
Paroi dépôt/bureaux	Acier	2	50	7 800	419
	Laine de roche	140	0,035	50	920
	Acier	2	50	7 800	419
Bardage extérieur dépôt	Acier	2	50	7 800	419
	Laine de roche	150	0,035	50	920
	Acier	2	50	7 800	419
Cloison de bureau	Plâtre	13	0,25	825	801
	Lame d'air	7			
	Plâtre	13	0,25	825	801
Toiture bureaux	Laine de roche	230	0,041	55	920
	Acier	2	50	7 800	419
Plancher intermédiaire bureaux	Carrelage	12	1,7	2 300	700
	Béton	120	2	2 450	920
	Plâtre	13	0,25	825	801
Plancher RdC	Béton	160	2	2 450	920

Les façades extérieures des parois ont des coefficients de réflectivité solaire (albédo) différents. Les toitures sont revêtues d'une couche d'étanchéité à l'eau de couleur sombre avec un albédo de 0,3. Les parois sud des salles au RdC de la zone bureautique sont de couleur brune avec un albédo de 0,5. Les parois sud de l'étage sont blanches (albédo de 0,7). Les autres parois (archives, entrepôt, magasin et local assistance) sont de couleur sombre comme la toiture avec un albédo de 0,3.

Les coefficients des ponts thermiques des liaisons verticales des parois extérieures et des liaisons des portes principales sont respectivement de 0,06 et 0,05 W.m⁻¹.K⁻¹. Les ponts thermiques (liaison mur-sol) sont modélisés selon la RT 2012 ($\Psi_1 = 18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Le niveau de perméabilité à l'air de ce bâtiment a été évalué par des tests de contrôle d'étanchéité à l'aide du dispositif de la porte soufflante lors de la phase chantier. Les résultats d'essai ont confirmé la faible perméabilité à l'air du bâtiment, avec une valeur de 0,18 m³.m⁻².h⁻¹ sous une différence de pression de 4 Pa.

17.1.2 Scénarios et systèmes de conditionnement

L'ensemble « bureaux » est chauffé par le biais de convecteurs électriques entre 17 et 20 °C (tableau 17.3). Aucun système de climatisation n'est installé. La ventilation mécanique contrôlée (VMC) est de type double flux avec récupération de chaleur (efficacité d'échangeur égale à 0,8) et est active pendant la période hivernale. L'air neuf est injecté dans les locaux principaux par les diffuseurs sur les parois et extrait par les extracteurs qui ont été placés dans les toilettes au RdC et dans la salle de réunion à l'étage. La ventilation est déclenchée une heure avant l'arrivée des occupants afin d'améliorer la qualité d'air en début de journée (tableau 17.4). La période d'occupation est de 8 h à 18 h tous les jours sauf les samedis et dimanches. Le nombre d'occupants est précisé dans le tableau 17.3. L'éclairage artificiel est contrôlé en fonction de l'éclairage naturel afin de respecter les consignes d'éclairage pour chaque local (100 lux pour les couloirs et 500 lux pour les bureaux [1]).

Le dépôt est maintenu à 12 °C en journée et mis hors gel à 5 °C le soir pour la période hivernale avec comme moyen de chauffage deux aérothermes électriques. Le renouvellement d'air est assuré par une VMC à simple flux (0,5 vol.h⁻¹, soit 1 918 kg.h⁻¹).

Tableau 17.3 Températures de consigne de chauffage et gains thermiques internes.

Zone	Occ	PC	Ecl	T _H		Zone	Occ	PC	Ecl	T _H
Bur. secrétariat	1	1	10	21 / 18		Vestiaire-Femmes			5	20 / 17
Bur. conducteur	1	1	10	21 / 18		Vestiaire-Hommes			5	20 / 17
Bur. responsable	1	1	10	20 / 18		Local archives			-	12 / 12
Bur. directeur	1	1	10	21 / 17		Local assistance	3		10	19 / 15
Bur. métreaux	2	2	10	21 / 19		Entrepôt	5		5	12 / 5
Circulation			10	20 / 18		Salle de réunion			10	19 / 17
Magasin	1	1	10	19 / 17		Salle de repos			10	20 / 17
Local matériaux				18 / 16						

Occ: nombre d'occupants; PC: nombre de PC (140 W/unité); Ecl: densité d'éclairage W.m⁻²; T_H: température de consigne de chauffage lors des périodes d'occupation/inoccupation (°C).

Tableau 17.4 Débits de VMC dans la zone bureaux.

Local	Débit entrée (kg.h ⁻¹)		Local	Débit sortie (kg.h ⁻¹)
Bur. secrétariat	60		Vestiaire-femmes	160
Bur. conducteur	60		Vestiaire-hommes	260
Bur. responsable	30		Bur. métreaux	80
Bur. directeur	30		Magasin	30
Bur. métreaux	120		Salle de réunion	220
Magasin	30			
Local assistance	30			
Salle de réunion	120			
Salle de repos	120			
Total	600			750

17.1.3 Zonage thermique

Une étape importante a été de définir les zones thermiques nécessaires à la STD. Dans un premier temps, le bâtiment a été saisi avec le logiciel de dessin 3D SketchUp, dans lequel ont été définies les différentes zones thermiques. Nous avons décidé de découper le bâtiment en quinze zones thermiques en fonction des usages (scénarios, orientation...). La géométrie et le zonage ont ensuite été importés dans le logiciel TRNSYS. La figure 17.2 présente ce découpage.

L'ensemble des zones thermiques est traité par approche multizone, à l'exception de l'entrepôt pour lequel deux approches sont adoptées : l'approche multizone (une zone pour une température) et l'approche zonale, pour laquelle le volume d'air intérieur a été subdivisé verticalement en une dizaine de sous-volumes afin de pouvoir représenter la stratification thermique [2].

17.1.4 Modèle numérique

17.1.4.1 Couplage thermoaéraulique

Afin de prendre en compte les échanges aérauliques liés à l'environnement et au tirage thermique au sein du bâtiment, le modèle du bâtiment a été construit en couplant deux logiciels : TRNSYS pour évaluer les transferts thermiques et CONTAM pour déterminer les débits de ventilation entre pièces et avec l'environnement extérieur. Dans ce but, les types 56 (modèle de thermique du bâtiment) et 97 (modèle aéraulique) de TRNSYS ont été utilisés. Le type 56 calcule la température de l'air intérieur à partir de la connaissance des caractéristiques thermiques du bâtiment, des charges et des débits de ventilation et d'infiltration ; le type 97 évalue, quant à lui, les débits d'air entre les zones intérieures et l'extérieur à partir des sollicitations extérieures et de la connaissance des températures intérieures grâce au logiciel CONTAM. Les débits des infiltrations et de la ventilation naturelle sont induits par l'effet du vent et du tirage thermique. Les coefficients de pression du vent sur l'enveloppe sont déterminés pour chaque paroi en fonction de l'angle d'incidence du vent sur celle-ci selon le modèle proposé par [3] ainsi que de la vitesse de vent météorologique qui est corrigée en fonction de la hauteur des parois.

Le couplage thermoaéraulique s'effectue par un procédé itératif entre les deux modèles pour chaque pas de temps jusqu'à convergence. La figure 17.3 présente le processus de résolution.

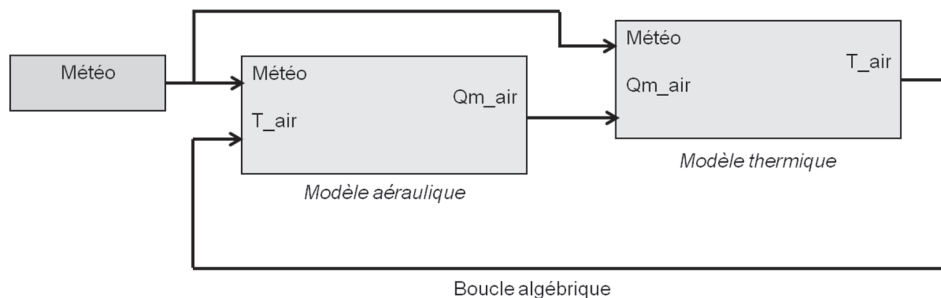


Figure 17.3 Principe du couplage thermoaéraulique.

17.1.4.2 Modèle de sol

La modélisation des transferts thermiques à travers le sol est effectuée à l'aide d'un modèle de différences finies tridimensionnel [4]. Afin de s'affranchir des effets de bord liés aux conditions aux limites, un volume suffisamment grand a été utilisé pour le modèle de sol (figure 17.4).

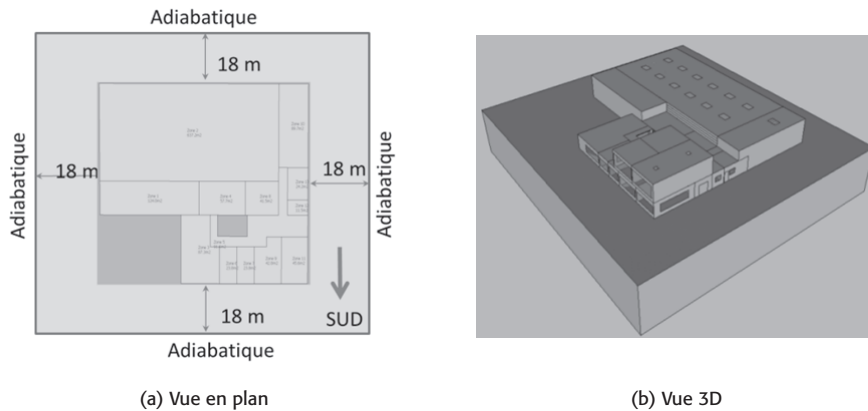


Figure 17.4 Modèle de sol.

17.1.5 Validation du modèle

Une analyse comparative a été réalisée afin d'évaluer la cohérence des résultats numériques par rapport aux mesures sur site. À titre d'exemple, la figure 17.5-a présente l'évolution de la température de l'air du secrétariat. On constate une bonne concordance générale entre la mesure et la simulation tant sur la variation moyenne que sur les fluctuations journalières. Cette similarité des résultats est également observée pour les autres zones dans l'ensemble « bureaux ». En ce qui concerne le grand volume qu'est l'entrepôt, il existe bien une stratification thermique de près de 1 °C entre les deux points de mesure (figure 17.5-b). Contrairement au modèle monozone, on remarque que le modèle zonal permet de modéliser cette stratification et d'obtenir des valeurs proches des températures mesurées. On remarque, par ailleurs, que la température dans la zone d'occupation (de hauteur inférieure à 1,8 m) est plus froide que la température moyenne du dépôt obtenue par l'approche monozone. Ce résultat met en évidence une des limitations de l'approche monozone pour la simulation thermique des volumes de grande hauteur, qui tend systématiquement à surestimer l'inconfort d'été.

Au cours de la période hivernale (01/01-04/04) de 2012, le chauffage et l'éclairage constituent la plus grande partie de la consommation énergétique pour ce type de bâtiment et représentent environ 73,1 % et 10,5 % de la consommation totale (respectivement égaux à 15 233 et 2 177 kWh). Les besoins de chauffage (14 575 kWh) et la dépense électrique d'éclairage (2 260 kWh) sont bien représentés par la simulation numérique avec une déviation sur le chauffage de 4,3 % et de 3,8 % pour l'éclairage artificiel.

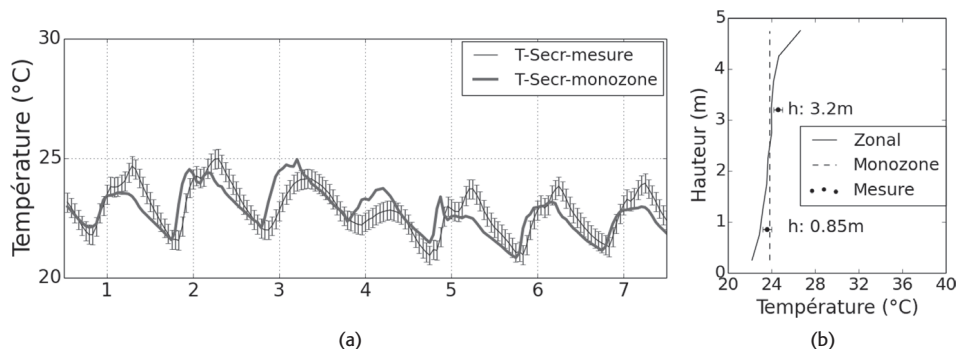


Figure 17.5 a. Température d'air du secrétariat (1^{re} semaine de juin).
b. Profil vertical de la température maximale d'air dans l'entrepôt (mois d'août).

17.1.6 Quelques résultats obtenus

17.1.6.1 Fonctionnement de la ventilation nocturne

À titre d'exemple, le scénario d'ouverture des lanterneaux pour le rafraîchissement nocturne est illustré en figure 17.6. En effet, la ventilation naturelle n'est utilisée que la nuit en fonction des besoins de rafraîchissement. On remarque que les lanterneaux de l'entrepôt ne sont ouverts que pendant une courte période (du 10/08 au 21/08) alors que ceux de la salle de réunion fonctionnent du 01/06 au 10/09. Cela traduit le fait que la température dans l'entrepôt reste peu élevée en comparaison de celle de la salle de réunion, qui est une zone exposée au sud et qui comporte une surface vitrée importante (22,1 %).

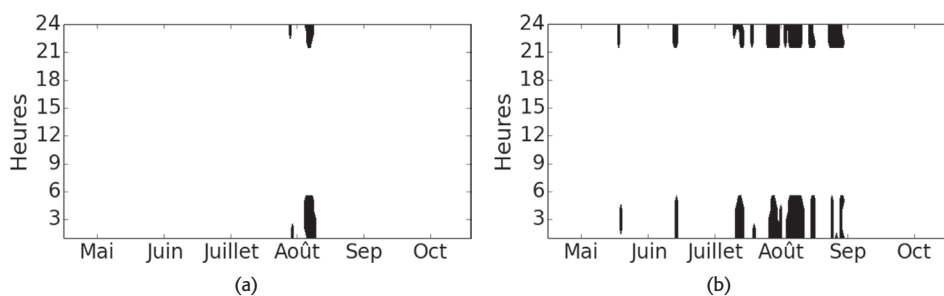


Figure 17.6 Période d'ouverture des lanterneaux: a. entrepôt, b. salle de réunion.

17.1.6.2 Efficacité de la ventilation nocturne

La figure 17.7 présente l'évolution de la température d'air intérieur de l'entrepôt et de la salle de réunion pour le bâtiment sans ventilation nocturne (« Réf »), avec ventilation nocturne par ouverture des lanterneaux (« VN-N ») et par ventilation mécanique (« VMC-N »). Pour ces deux locaux, on remarque que dans l'ensemble la VN-N est plus efficace que la VMC-N pour rafraîchir l'ambiance. Ainsi, la VN-N est capable de réduire la température moyenne de la salle de réunion de 23,6 à 23,1 °C (diminution de 0,5 °C) et de l'entrepôt de 23,5 °C à 23,1 °C (diminution de 0,4 °C) au cours de chaque période d'ouverture correspondante. La

VMC-N permet une réduction de la température de 0,4 °C pour la salle de réunion et de seulement 0,03 °C pour l'entrepôt.

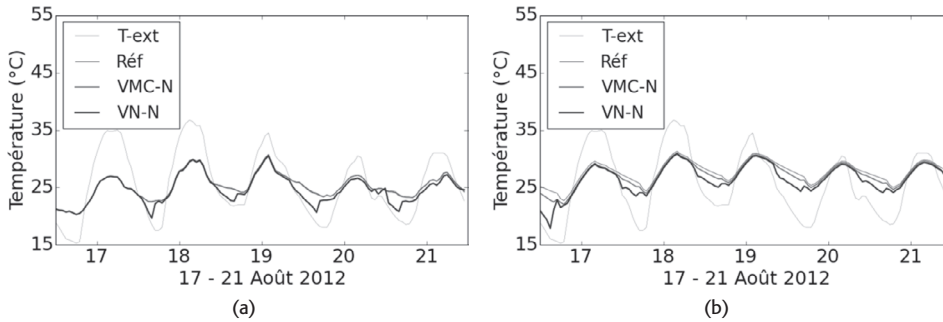


Figure 17.7 Évolution de la température d'air: a. salle de l'entrepôt, b. salle de réunion.

Comme toutes les zones du bâtiment sont aérauliquement couplées, les stratégies de ventilation nocturne ont également un impact sur l'ensemble du bâtiment. La figure 17.8 présente la diminution de la température d'air des zones de contrôle (salle de réunion et entrepôt), du secrétariat (zone aérauliquement proche de la salle de réunion) et du bureau des mètres (zone isolée). On remarque une très forte corrélation du rafraîchissement du secrétariat avec celui de la salle de réunion dans le cas de la VN-N (figure 17.8-a). Cela s'explique par l'effet cheminée, qui tend à ventiler l'ensemble des bureaux localisés au premier étage sous la salle de réunion. De plus, il n'y a pas d'effet de l'ouverture des lanterneaux sur le rafraîchissement de la salle de réunion. Le rafraîchissement du bureau des mètres est quasiment nul en VN-N. En ce qui concerne la VMC-N (figure 17.8-b), l'insufflation d'air frais se faisant dans chaque zone du bâtiment, on observe un rafraîchissement spatialement homogène. Les températures d'air du secrétariat et du bureau des mètres présentent donc une variation similaire. La comparaison de ces deux graphes illustre bien la plus forte diminution de température pour la salle de réunion et l'entrepôt obtenue grâce à la VN-N.

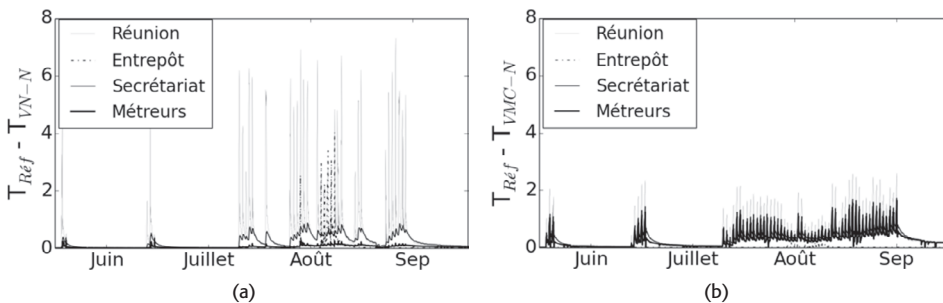


Figure 17.8 Réduction de la température d'air intérieur par rapport au bâtiment sans ventilation nocturne: a. VN-N, b. VMC-N.

17.1.6.3 Impact de la ventilation nocturne sur le confort thermique

Le confort thermique d'été a été évalué dans la présente étude par le calcul des degrés-heures (DH) d'inconfort en prenant comme référence la température maximale de confort adaptatif. L'objectif est de comparer les effets des deux modes de ventilation nocturne sur le confort des

occupants (donc durant la période d'occupation). La figure 17.9 présente les DH pour les différentes zones du bâtiment et pour le bâtiment sans et avec ventilation nocturne. Quatre zones souffrent particulièrement d'inconfort induit par des températures trop élevées: la salle de repos, la salle de réunion, le secrétariat et le bureau des métteurs. On constate que la VN-N est plus efficace pour améliorer le confort thermique dans le secrétariat et la salle de réunion alors que la VMC-N est meilleure pour les deux autres salles. Si on considère l'ensemble du bâtiment, l'impact de la VN-N sur la réduction des DH est identique à la VMC-N. Le total de DH diminue ainsi de 19 % avec la VN-N et de 20 % pour la VMC-N. À résultats identiques, le choix de la VMC-N est peut-être plus évident, car plus simple à gérer. Cependant, une consommation d'énergie supplémentaire pour les ventilateurs d'environ $1,78 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, soit 7,6 % de consommation annuelle de ventilation mécanique, sera à considérer également.

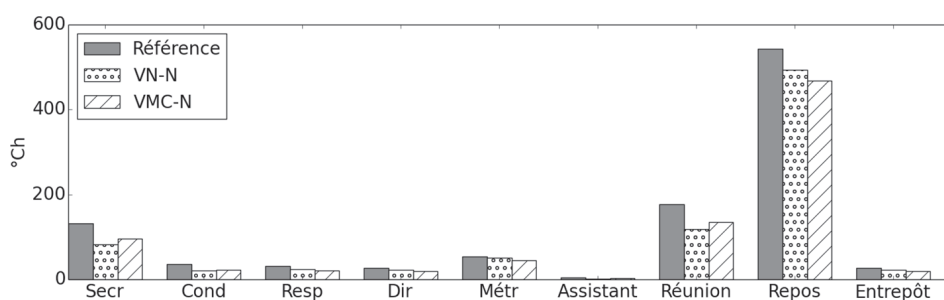


Figure 17.9 Degrés-heures d'inconfort.

17.1.7 Conclusion

La STD classiquement mise en œuvre en bureau d'études s'intéresse généralement à l'étude thermique de bâtiments pour lesquels les débits d'air entre zones thermiques et à travers l'enveloppe sont imposés par la présence d'un système de ventilation mécanique. La première particularité de la présente étude réside en la modélisation de la ventilation naturelle, qui nécessite le calcul couplé et simultané du bilan thermique de chaque zone pour évaluer leur température et le calcul des pressions pour calculer les transferts d'air entre zones. Ainsi, de nombreux phénomènes supplémentaires sont nécessaires à la définition complète du problème, parmi lesquels on citera :

- l'effet du vent, qui nécessite la connaissance de la vitesse et de la direction du vent ainsi que le calcul des coefficients de pression sur les parois du bâtiment ;
- le transfert massique lié au passage de l'air entre zones (perméabilité de l'enveloppe, coefficients de décharge des petites et grandes ouvertures telles que les entrées d'air, les portes, les fenêtres...);
- l'effet du tirage thermique, qui demande une description géométrique tridimensionnelle du bâtiment à la fois pour les approches monozones et zonales.

La conception d'enveloppes performantes de bâtiments pour le rafraîchissement passif nécessite ce type d'approche thermoaérodynamique [5]. Par ailleurs, il est important, dans le cas de bâtiments de grand volume, de modéliser au minimum la stratification thermique en été afin de déterminer correctement la température d'air dans la zone d'occupation. En effet, la température d'air évaluée par un modèle monozone (contrairement au modèle zonal) est générale-

ment plus élevée que celle obtenue dans la réalité, ce qui induit une évaluation erronée du confort thermique et, éventuellement, du pilotage d'un système de climatisation.

17.1.8 Références

- [1] CIBSE. *CIBSE Concise Handbook: The Chartered Institution of Building Services Engineers*. 2011.
- [2] R. Lapisa, M. Abadie, E. Bozonnet, P. Salagnac. « Numerical analysis of thermal stratification modelling effect on comfort for the case of a commercial low-rise building ». *The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Hong-Kong, 2014.
- [3] M.V. Swami, S. Chandra. « Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow ». *ASHRAE transactions*, vol. 94, n°3112, 1988, 243-266.
- [4] R. Lapisa, E. Bozonnet, M. Abadie, P. Salagnac, R. Perrin. « Effect of ground thermal inertia on the energy balance of commercial low-rise buildings ». *Building Simulation 2013*, Chambéry, France, 2013.
- [5] R. Lapisa, E. Bozonnet, M.O. Abadie, P. Salagnac. « Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings-ground thermal inertia impact ». *Advances in Building Energy Research*, 7, 192-208, 2013.

17.2 Vers la Garantie de performance énergétique (B. Peuportier & T. Recht)

L'évaluation des incertitudes est essentielle dans un processus de garantie de performance énergétique (GPE) : elle permet d'évaluer le risque de dépasser la consommation annoncée contractuellement. Cette approche a été expérimentée (expérimentation *ex post*) sur une opération de réhabilitation concernant un bâtiment de logements, en utilisant les méthodes développées dans le cadre du projet ANR Fiabilité¹.

17.2.1 Présentation du bâtiment étudié

17.2.1.1 Géométrie

Le bâtiment étudié est un immeuble R+3 construit en 1978. Il est situé à Feyzin, en banlieue sud de Lyon. La hauteur de chaque étage est de 2,50 m. Le nombre total des logements est de seize, répartis en quatre types (T1, T2, T3 et T4). Les données sur les logements présentées dans le tableau ci-dessous sont extraites du rapport (Enertech, 2011²).

1. [http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-10-HABI-0004](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-10-HABI-0004).
2. *Immeuble d'habitation rue Vignettes, Feyzin (69). Campagne de mesures des performances énergétiques avant/après rénovation. Résultats de la première année de mesures (avant rénovation)*. Rapport final pour la Fondation Bâtiment Énergie, Enertech, septembre 2011.