

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE DIPLÔME
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

PAR
Magdalena STANESCU

OPTIMISATION DU DESIGN PRÉLIMINAIRE DES SYSTEMES CVCA

MONTREAL, LE 2 MAI 2012

©Tous droits réservés, Magdalena Stanescu, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Stanislaw Kajl, directeur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Louis Lamarche, codirecteur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Forgues, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Hallé, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Radu Grigore Zmeureanu, examinateur externe
Department of Building, Civil and Environmental Engineering à Concordia University

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 26 AVRIL 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La rédaction de la thèse fait sûrement partie des moments les plus délicats, voir les plus difficiles de la thèse, et quand tout semble fini il reste évidemment le temps des remerciements.

Il est avant tout indispensable de remercier mon directeur de recherche, monsieur Stanislaw Kajl, professeur à l'École de technologie supérieure, pour le soutien technique et moral qu'il m'a accordé tout au long de cette recherche. Je le remercie aussi pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, et son aide lors de la recherche et la révision de la thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et mon grand respect.

J'adresse également mes sincères remerciements à monsieur Louis Lamarche, mon codirecteur de thèse pour sa complémentarité scientifique et humaine qui a permis que cette thèse soit le fruit d'un travail d'équipe.

Je tiens naturellement à exprimer ma gratitude aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer à la dernière étape de cette thèse : la soutenance. Je remercie de ce fait monsieur Stéphane Hallé, professeur à l'École de technologie supérieure ainsi que monsieur Radu Zmeureanu, professeur à l'Université Concordia, qui ont eu la tâche ingrate d'être les rapporteurs de ce mémoire. Je remercie également Daniel Forgues, professeur à l'École de technologie supérieure qui a eu la gentillesse d'être le président de ce jury.

Je voudrais remercier mon collègue Nabil Nassif qui, au début de mon doctorat, m'a initié dans le monde de l'intelligence artificielle.

Également, je tiens à remercier les membres du Service de l'équipement pour leur accueil durant mon emploi. L'expérience gagnée lors des simulations énergétiques du campus de l'École de technologie supérieure, les discussions et les projets réalisés avec monsieur Javier Beltran m'ont enrichie personnellement et professionnellement.

Après ces remerciements quelque peu protocolaires mais nécessaires, j'aimerais dédier les lignes qui vont suivre à ma famille, particulièrement à ma mère, qui a toujours eu confiance en moi et m'a soutenu jusqu'au bout, même lorsque je n'y croyais plus moi-même. J'admire le courage et le dévouement en toute circonstance des personnes qui m'ont entourée toutes ces années et j'aspire à leur apporter autant de choses qu'elles l'ont fait pour moi.

Si vous pensez qu'une thèse est une activité plutôt sympathique et qu'il n'existe pas réellement de difficulté autres que scientifique, demandez l'avis à celui ou à celle qui vous accompagne et mettez-vous qu'un instant, à sa place. C'est de tout mon cœur que je remercie mon mari Jean-Philippe pour son soutien, ses encouragements continus et son affection. Merci d'avoir su trouver les mots pour me redonner confiance dans les moments difficiles. Cette thèse est aussi un peu la tienne...

Les derniers mots de ces remerciements je les dois à mes deux trésors Ingrid et Alice qui, par leurs gestes innocents quotidiens, ont été ma source d'inspiration. C'est très précieux de pouvoir revoir le monde avec des yeux d'enfants!

« Il faut regarder toute la vie avec des yeux d'enfants »

Henri Matisse, 1953

OPTIMISATION DU DESIGN PRÉLIMINAIRE DES SYSTEMES CVCA

Magdalena STANESCU

RÉSUMÉ

Les systèmes CVCA (chauffage, ventilation et conditionnement d'air) sont parmi les systèmes les plus énergivores dans les bâtiments. En général, les concepteurs de ces systèmes se servent de leurs expériences antérieures ou des tendances actuelles pour réaliser le regroupement des locaux desservis par les systèmes, en ayant comme premier critère de sélection le prix d'investissement le plus faible et non pas le coût de cycle de vie. L'efficacité énergétique des systèmes CVCA n'est pas un critère facilement calculable lors de la sélection de ces systèmes.

Le regroupement de zones desservies par des systèmes et le nombre de systèmes installés dans le bâtiment sont les variables durant le processus itératif d'optimisation.

Cette thèse présente une première méthode d'optimisation pour le dimensionnement préliminaire des systèmes CVCA à l'aide d'un algorithme évolutionnaire qui utilise la réduction de la consommation d'énergie comme critère d'optimisation. Le logiciel DOE-2 a été utilisé pour calculer la fonction objective, soit la consommation énergétique des systèmes CVCA. L'utilisation d'un outil de simulation comme le logiciel DOE-2 demande l'expérience d'un expert en simulation pour bâtir le modèle du bâtiment et résoudre les problèmes rencontrés durant la simulation. Comme ce problème est assez complexe, nous proposons de modifier la première méthode d'optimisation en introduisant un modèle simplifié basé sur les profils des charges des locaux, une donnée essentielle dans la phase préliminaire de design. Un facteur d'utilisation global (GLR), décrit comme le rapport de la charge réelle et la charge maximale possible du système pour une période donnée, est appliqué comme fonction objective. Les variables du problème d'optimisation sont : (i) le regroupement des zones desservies par les systèmes et (ii) le nombre de systèmes qui desservent le bâtiment. Les contraintes ont été choisies de façon à ce que les limites des variables soient bien représentées.

Les deux méthodes d'optimisation sont appliquées ensuite sur un bâtiment réel pour voir l'impact de l'optimisation au niveau de la consommation d'énergie des systèmes CVCA. Les résultats obtenus lors de l'optimisation du design préliminaire des systèmes CVCA (présentant les mêmes contraintes) démontrent des économies d'énergie importantes au niveau des systèmes CVCA. Ces économies dépendent de la configuration du bâtiment, des contraintes imposées, des types de systèmes CVCA sélectionnés ainsi que de la stratégie de contrôle choisie.

Mots clés: facteur d'utilisation global; systèmes CVCA; regroupement de zones; optimisation; algorithme évolutionnaire; consommation d'énergie; simulation; DOE-2; design; ASHRAE.

OPTIMIZATION OF PRELIMINARY HVAC SYSTEM DESIGN

Magdalena STANESCU

ABSTRACT

HVAC (heating, ventilation and air conditioning) systems are recognized as one of the biggest energy consumers in commercial and institutional buildings. Generally, designers use common sense, historical data and subjective experience in designing these systems: such designs must take into account the way in which the zones served by the systems are grouped as well as the number of systems that serve each building. HVAC energy efficiency is not an easily calculable criterion to use when selecting such systems; usually, the lowest investment price becomes the primary selection criterion and not the life-cycle cost. The grouping of the zones served by the systems and the number of systems serving the building are the variables during the iterative optimization process.

This thesis outlines a first optimization method for preliminary HVAC systems design using an evolutionary algorithm that uses reduction in energy consumption, as the optimization criterion. DOE-2 software was used to calculate the objective function, that is to say, HVAC energy consumption. The use of a calculation engine such as DOE-2 requires the involvement of a simulation expert in order to construct the building's model as well as to solve any problems encountered during simulation. As this problem is rather complex, we suggest to modify the first method by introducing a simplified model based on the zones' daily profile loads: essential data in the preliminary phase of design. A global load ratio (GLR), described as the ratio between the system's real load and its possible maximum load for a given period, is applied as objective function. The optimization variables are: (i) grouping of the zones served by the systems and (ii) number of systems serving the building. Constraints have been selected in order to ensure accurate representation of the variables' limits.

The two optimizations methods are applied on a real building to see the impact on the energy consumption. The results we obtained during preliminary HVAC optimization design process could prove to be very useful for engineers during the preliminary design phase. The comparison between the reference building and the optimized building (under identical constraints) yielded significant energy savings for HVAC energy consumption. These savings are dependent upon the building's configuration, type of constraints imposed, types of HVAC systems it has, and the control strategies these systems employ.

Keywords: global load ratio; HVAC systems; grouping of zones; optimization; evolutionary algorithm; energy consumption; simulation; DOE-2; design; ASHRAE.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITERATURE	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 Historique.....	8
1.3 Systèmes pour le traitement de l'air.....	10
1.3.1 Systèmes à volume d'air variable (VAV).....	11
1.3.2 Systèmes VAV avec ou sans chauffage d'appoint	12
1.4 Le design.....	13
1.4.1 Design versus analyse	14
1.4.2 Étapes du design	16
1.4.2.1 1 ^{ère} étape : Demandes spécifiques.....	16
1.4.2.2 2 ^{ème} étape : Outils généraux	19
1.4.2.3 3 ^{ème} étape : Procédure (choix des systèmes à étudier)	20
1.4.2.4 4 ^{ème} étape : Résultats.....	20
1.4.2.5 5 ^{ème} étape : Procédure (sélection du système).....	20
1.4.2.6 6 ^{ème} étape : Résultats	22
1.4.3 Phases du design	22
1.5 Surdimensionnement.....	23
1.5.1 Monitoring	23
1.5.2 Causes du surdimensionnement.....	25
1.5.3 Conséquences du surdimensionnement	26
1.5.4 Centrale frigorifique et/ou thermique	28
1.6 Méthodes d'optimisation	30
1.6.1 Méthodes diverses.....	30
1.6.2 Algorithme évolutionnaire	33
1.7 Originalité	36
CHAPITRE 2 STRUCTURE DE LA THÈSE	39
2.1 Problématique de recherche.....	39
2.2 Objectifs de recherche.....	39
2.3 Description sommaire des articles	40
CHAPITRE 3 PRELIMINARY DESIGN OF HVAC SYSTEM USING OPTIMIZATION BY EVOLUTIONARY ALGORITHM.....	43
3.1 Abstract.....	43
3.2 Introduction.....	44
3.2.1 System oversizing	44
3.2.2 A solution to the system oversizing	46
3.3 Optimization method	48
3.3.1 Evolutionary algorithm optimization.....	50

3.3.2	Identification of the objective function, variables and constraints	54
3.4	Building modeling and calculation of energy consumption	55
3.4.1	The building studied	55
3.4.2	Evaluation of the objective function	56
3.5	Description of constraints	57
3.5.1	Size of systems.....	57
3.5.2	Size of system air ductwork.....	58
3.6	Optimization	61
3.6.1	Selection of population size	61
3.6.2	Selection of number of iterations.....	63
3.6.3	Optimization using reference building constraints	64
3.6.4	Influence of system extent	67
3.6.5	Influence of system airflow rate	69
3.7	Analysis of results.....	70
3.8	Conclusions.....	72
CHAPITRE 4	SIMPLIFIED OPTIMIZATION METHOD FOR PRELIMINARY DESIGN OF HVAC SYSTEM USING GLOBAL LOAD RATIO AS THE FITNESS FUNCTION.....	75
4.1	Abstract.....	75
4.2	Introduction.....	76
4.3	General optimization principles.....	78
4.4	Objective function.....	79
4.5	Optimization method	82
4.5.1	Evolutionary algorithm operation	82
4.5.2	Optimization procedure using the new GLR optimization function.....	86
4.6	The building studied	87
4.7	Developing and applying the CR_GLR Method	88
4.7.1	Developing the CR_GLR method.....	89
4.7.1.1	Selection of population size and number of iterations.....	89
4.7.1.2	Links between GLR and energy consumption.....	90
4.7.2	Applications of the CR_GLR method.....	94
4.7.2.1	Comparison of optimization results when using VAV versus CAV systems.....	94
4.7.2.2	Impact of using different fan control modes (speed, discharge, inlet)	95
4.7.2.3	Variation in constraint limits (system size, system extent, operating schedule, internal/external zones).....	97
4.7.2.4	Influence of mechanical room location.....	99
4.8	Optimization results	101
4.9	Conclusions.....	104
CHAPITRE 5	EVALUATION OF HVAC SYSTEM DESIGN OPTIMIZATION ON A REAL BUILDING THE B-PAVILION OF ETS	107
5.1	Abstract.....	107

5.2	Introduction.....	108
5.3	General description	109
5.3.1	Building description.....	109
5.3.2	Description of HVAC systems.....	110
5.3.3	Thermal plant.....	111
5.4	Building model.....	112
5.5	Optimization	113
5.5.1	Identification of the objective function, variables and constraints	114
5.5.2	Brief description of evolutionary algorithms.....	116
5.5.3	Optimization methods.....	117
5.6	Optimization results and analysis	118
5.6.1	Optimization using C_{FR} and C_{SE} constraints	120
5.6.2	Impact of zone schedules – optimization using C_{HF} constraint	123
5.6.3	Results and discussion	125
5.7	Cost estimation for building HVAC systems.....	126
5.8	Conclusion	130
	CONCLUSION.....	133
ANNEXE I	OPTIMISATION DU DESIGN DES CENTRALES FRIGORIFIQUES DES BATIMENTS	135
ANNEXE II	EVOLUTIONARY ALGORITHM WITH THREE DIFFERENT PERMUTATION OPTIONS USED FOR PRELIMINARY HVAC SYSTEM DESIGN	147
2.1	Building description.....	148
2.2	HVAC system description	149
2.3	Thermal plant.....	150
	APPENDICE A.....	161
	GRAPHIC REPRESENTATION OF OPTIMAL SOLUTION (CR_CONS METHOD)	161
	APPENDICE B.....	162
	GRAPHIC REPRESENTATION OF OPTIMAL SOLUTION (CR_GLR METHOD)	162
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	163

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1. Characteristic of the cases studied	62
Tableau 3.2. Comparison of results	65
Tableau 3.3. System's operation.....	66
Tableau 3.4. Summary of results for the 8 cases studied.....	68
Tableau 3.5. Summary results for the 6 cases studied	70
Tableau 4.1. Comparison of results	93
Tableau 4.2. Comparison of optimization results when using VAV versus CAV systems	94
Tableau 4.3. Comparison of results for use of various modes of fan control.....	96
Tableau 4.4. Comparison of results for various constraints	97
Tableau 4.5. Distribution of daily operating hours for each system.....	99
Tableau 4.6. Comparison of results for various mechanical room locations.....	100
Tableau 5.1. The cases studied	119
Tableau 5.2. Comparison of results among HVAC system designs for the reference, existing and optimized buildings	120
Tableau 5.3. Comparison between the two methods using intermediary results.....	122
Tableau 5.4. Number of operating hours/day for each system and zone schedule served by these systems	124
Tableau 5.5. Airflow rate and number of operating hours/day.....	125
Tableau 5.6. LCC cost for the optimized and existing HVAC designs.....	129

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1. Schéma d'un système VAV.....	11
Figure 1.2. Schéma du processus d'analyse (ASHRAE 1993)	14
Figure 1.3. Schéma du processus de design (ASHRAE 1993)	15
Figure 1.4. Phases dans le processus de design.....	22
Figure 1.5. Profil de la demande de refroidissement.....	24
Figure 1.6. Domaine de variation du débit d'alimentation (DEB-ALI).....	25
Figure 1.7. Variation du débit d'alimentation du système	27
Figure 1.8. Ouverture des boîtes VAV du système UTA-4 pendant le 8 et le 9 août 2002	28
Figure 1.9. Association de la revue de littérature avec les étapes du design.....	38
Figure 3.1. Variation of supply airflow rate for the system studied.....	45
Figure 3.2. Schematic representation of design process (ASHRAE 1993).....	46
Figure 3.3. Schematic representation of design process, including CR_CONS optimization process method	47
Figure 3.4. Schematic representation of EA optimization including calculation of energy consumption	51
Figure 3.5. Schematic representation showing how to calculate the size of air ductwork for a system	59
Figure 3.6. Evolution of optimization for Cases 1 through 5.....	62
Figure 3.7. Evolution of optimization for Solution 2	64
Figure 3.8. Graphic representation of solutions	65
Figure 3.9. Evolution of optimization for Solutions S2 and S6 through S15.....	69
Figure 3.10. Steps in developing method CR_CONS	71
Figure 4.1. Load diagram for single zone during one summer day.....	77

Figure 4.2.	Schematic representation of design process,	78
Figure 4.3.	Schematic representation of EA operation, including initialization of the first population and input from the database containing zones thermal load	83
Figure 4.4.	Schematic representation of design process, including the CR_GLR optimization process method	86
Figure 4.5.	Convergence towards the optimal solution.....	90
Figure 4.6.	Variation in GLR according to fan energy consumption.....	91
Figure 4.7.	Variation in GLR according to HVAC energy consumption.....	92
Figure 4.8.	Variation in fan energy consumption for	95
Figure 4.9.	Variation in GLR with fan energy consumption for	96
Figure 4.10.	Steps in developing the CR_GLR optimization method.....	102
Figure 4.11.	Graphic representation of optimal solution.....	103
Figure 5.1.	Schematic representation of zone grouping.....	111
Figure 5.2.	Building zones for the 5 levels of the B-Pavilion at ETS	112
Figure 5.3.	Schematic representation of design process, including the optimization procedure (CR_CONS or CR_GLR method).....	114
Figure 5.4.	Schematic representation of the two methods of optimization.....	118
Figure 5.5.	Evolution curve for Solution S1	121
Figure 5.6.	Evolution curve for Solution S2	122
Figure 5.7.	Comparison of evolution curves for Solution S2 through S5	124

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIR	Taux d'intérêt annuel (Annual Interest Rate)
AER	Taux d'augmentation annuel (Annual Escalation Rate)
AFR	Débit d'air (Airflow Rate)
AG	Algorithme génétique
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
BESTD	Building Energy Software Tools Directory
CAV	Système à débit d'air constant
C _{FR}	Contrainte débit maximal ou/et minimal du système
C _{HF}	Contrainte horaire maximal de fonctionnement des systèmes
C _{I/E}	Contrainte séparation en zones internes/zones externes
C _{MR}	Contrainte portant sur l'emplacement de la salle mécanique
C _{SE}	Contrainte étendue des systèmes
CFM	Pieds cubes par minute (Cubic Feet per Minute)
CG	Centre de gravité
CMNEB	Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments
CNRC	Conseil national de recherches Canada
CR_CONS	Critère d'optimisation : réduction de la consommation d'énergie des systèmes CVCA
CR_GLR	Critère d'optimisation : augmentation du facteur d'utilisation globale
CTMY2	Canadian Typical Meteorological Year version 2
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement d'air
Dc	Diamètre équivalent

DISCHARGE Registres d'étranglement à la sortie du ventilateur (Discharge damper)

DOE	Department of Energy (USA)
EA	Evolutionary algorithm (Algorithme évolutionnaire)
E_p	Coût d'opération
E_s	Coût d'investissement
E_{fan}	Coût d'investissement du ventilateur
E_{duct}	Coût d'investissement du réseau de gaines
ÉTS	École de technologie supérieure
GF	Rez-de-chaussée (Ground Floor)
GLR	Facteur d'utilisation globale (Global Load Ratio)
INLET	Aubage mobile de prérotation (Inlet vane)
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LCC	Coût du cycle de vie (Life Cycle Cost)
L1	Étage 1 (Level 1)
L2	Étage 2 (Level 2)
L3	Étage 3 (Level 3)
MR	Salle mécanique (Mechanical room)
NBSLD	National Bureau of Standards Load Determination
PE	Programmation évolutive
PFRR	Pourcentage de fonctionnement à un débit partiel (Part Flow Rate Ratio)
PWEF	Facteur d'augmentation de la valeur présente (Present Worth Escalation Factor)
Sd	Coût du ventilateur et du réseau des gaines d'air par unité de surface

SE	Stratégie d'évolution
Si	Système numéro <i>i</i>
SLR	Facteur d'utilisation calculé pour un système (System Load Ratio)
UTA	Unité de traitement de l'air
VAV	Système à volume d'air variable
VSD	Entraînement à vitesse variable (Variable Speed Drive)
ZLR	Facteur d'utilisation calculé pour une zone (Zone Load Ratio)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

SYMBOLES :

CFM	pieds cubes par minute (unité de débit, IP)
c_p	chaleur specifique (kJ/kg·K)
err	valeur de l'erreur (statistique)
h	heures (unité de temps)
H	hauteur (m)
L	longueur (m)
L/s	litre par seconde (unité de débit, SI)
m	mètre (unité de longueur)
$\dot{m}$	débit massique (kg/s)
m_{extent}	étendue (unité proposée pour mesurer l'étendue du réseau des gaines)
MWh	Mégawatt-heure (unité de mesure d'énergie)
P	puissance électrique (kW)
Q	puissance frigorifique ou thermique (kW)
RSI	résistance thermique (m²K/W)
rc	coefficient de corrélation (symbole r en statistique)
rd	coefficient de détermination (symbole R^2 en statistique)
s	seconde (unité de temps)
T	température (°C)
U	coefficient global de transfert de chaleur (W/m²K)

INDICES ET/OU EXPOSANTS :

act	actuelle
build	bâtiment
cond	condenseur
design	conception
disp	disponible
e	entrée
évap	évaporateur
ext	extérieur
gen	génération
inst	instantané
nom	nominal
oper	fonctionnement
opt	optimal
Pd	jour correspondant à la charge maximale (Peak day)
ref	référence
s	sortie
sens	charge sensible
supply	soufflage
syst	system
w	eau

INTRODUCTION

Généralités

La climatisation et le chauffage sont essentiels au confort de la société contemporaine dans la plus grande partie du monde. Les systèmes CVCA (chauffage, ventilation et conditionnement d'air) contribuent à la santé et au confort de chacun, à la productivité des gens et à la vitalité de l'économie.

Les systèmes CVCA sont reconnus comme étant les plus énergivores dans les bâtiments commerciaux et institutionnels. Conséquemment, c'est très logique de les retrouver tout en haut de la liste des systèmes à optimiser. Pour améliorer leur efficacité énergétique, il faut optimiser l'opération de ces systèmes, mais cette optimisation ne donnera pas les résultats escomptés sans optimiser leur design. Parmi les objectifs de design, nous pouvons citer, par exemple: (i) capacité appropriée du système permettant de couvrir la demande du bâtiment dans les conditions d'opération les plus défavorables, (ii) efficacité énergétique pour diminuer les coûts annuels d'opération, (iii) coûts minimums de cycle de vie. Le premier objectif mentionné ci-dessus mène toujours à un certain surdimensionnement du système, même si les deux autres objectifs doivent plutôt assurer l'inverse.

Problématique

Le monitoring des systèmes CVCA du bâtiment de l'École de technologie supérieure (ÉTS) démontre que ce surdimensionnement peut parfois atteindre un niveau inattendu. Le système UTA-4 de l'ÉTS peut servir d'exemple d'un système VAV (volume d'air variable) largement surdimensionné. À titre d'exemple, le débit du ventilateur enregistré par le système de contrôle ne dépasse jamais 60% du débit de design. Cela indique que le ventilateur d'alimentation fonctionne tout le temps à basse vitesse. Le débit du ventilateur de retour doit être encore plus faible ce qui pourrait le mener à une opération instable. La pression dans les locaux desservis par un système surdimensionné peut être trop faible ce qui pourrait se traduire par le déplacement incontrôlé de l'air d'une zone à l'autre du bâtiment. Ce

surdimensionnement a aussi des conséquences sur l'opération des valves d'eau glacée et d'eau chaude ainsi que sur l'opération des volets d'air frais et de mélange.

Les remarques mentionnées ci-dessus concernent un système CVCA. Le problème est encore plus complexe dans les bâtiments desservis par plusieurs systèmes CVCA comme dans les bâtiments commerciaux et institutionnels. Le regroupement des locaux desservis par chaque système CVCA est surtout basé, par exemple, sur la vocation, l'horaire d'occupation et l'emplacement des locaux ainsi que sur l'expérience du designer. Sans réaliser une optimisation qui prend en considération tous les paramètres requis, le critère de la consommation d'énergie n'est considéré qu'en partie. Il en est ainsi avec le choix des systèmes CVCA proposés dans un bâtiment qui est rarement basé sur l'analyse détaillée des coûts d'opération, d'investissement et de maintenance. Le potentiel d'amélioration du processus de design est donc très important et c'est pourquoi l'optimisation de ce processus est un défi à relever dans la thèse proposée.

Objectifs et méthodologie

Tel que précisé auparavant, les systèmes CVCA font partie des équipements les plus énergivores dans les bâtiments. En général, les concepteurs de ces systèmes se servent de leurs expériences antérieures ou des tendances actuelles pour réaliser le regroupement des locaux desservis par les systèmes, en ayant comme critère de sélection le prix d'investissement le plus faible et rarement le coût de cycle de vie. L'efficacité énergétique des systèmes CVCA n'est pas un critère facilement calculable lors de la sélection de ces systèmes. Avec les outils d'aujourd'hui il est possible d'améliorer ces aspects et dans le cadre de la présente thèse nous nous penchons sur l'optimisation de design des systèmes CVCA dans le but de réduire la consommation d'énergie des systèmes CVCA et ainsi les rendre plus efficaces. Alors, l'objectif fixé dans le cadre de la présente thèse est de développer une méthode d'optimisation pour le design des systèmes CVCA qui vise à augmenter l'efficacité énergétique des systèmes CVCA.

La méthodologie utilisée pour atteindre cet objectif comporte plusieurs aspects énumérés ici-bas :

- Définir les principaux éléments qui caractérisent la consommation d'énergie des systèmes CVCA, comme par exemple la consommation des ventilateurs, des serpentins de chauffage et de climatisation, l'humidificateur, le réchauffage terminal, les pompes, etc.
- Définir les causes du surdimensionnement tout en sachant que le surdimensionnement d'un système augmente le coût d'investissement et a aussi un impact sur l'opération du système.
- Définir les critères d'optimisation, les variables ainsi que les contraintes pour bien caractériser le problème d'optimisation.
- Choisir la méthode d'optimisation appropriée pour notre problème d'optimisation est une autre étape importante. Les algorithmes évolutionnaires ont été souvent utilisés pour répondre à une variété des problèmes d'optimisation de design des systèmes CVCA.
- Adapter la méthode d'optimisation choisie pour caractériser notre problème d'optimisation en utilisant des opérateurs génétiques pour des représentations de type permutations ainsi que l'intervention du logiciel DOE-2 lors du calcul de la consommation d'énergie des systèmes CVCA.
- Éviter l'intervention du logiciel DOE-2 durant l'optimisation, qui demande l'implication d'un expert en simulation, et trouver l'équivalent de la consommation d'énergie comme fonction objective afin de simplifier la méthode d'optimisation.
- Démontrer les liens entre la consommation d'énergie et la nouvelle fonction objective pour justifier son utilisation dans le processus d'optimisation.

Structure de la thèse

La thèse est disposée principalement en 6 chapitres.

Le **chapitre 1** présente une revue de littérature des études antérieures portant sur l'optimisation de design des systèmes CVCA. L'aspect énergétique est survolé avec des notions sur le design, le calcul des charges, les systèmes CVCA. Le problème de

surdimensionnement des systèmes CVCA, qui représente l'élément déclencheur de notre recherche, est détaillé en présentant les causes du surdimensionnement des systèmes CVCA, des résultats de monitoring et des problèmes d'opération observés. Également, ce chapitre passe en revue différentes méthodes d'optimisation dans le but de choisir la méthode la plus appropriée pour notre problème d'optimisation.

Le **chapitre 2** présente la problématique et les objectifs de recherche, ainsi qu'une description sommaire des articles. Ce chapitre présente alors les grandes lignes de cette thèse et se voit être un guide pour anticiper les étapes parcourues pour la réaliser.

Un premier article est présenté dans le **chapitre 3**. Cet article présente une méthode d'optimisation pour le dimensionnement des systèmes CVCA en utilisant la simulation énergétique des bâtiments. Le critère d'optimisation est de minimiser la consommation d'énergie des systèmes CVCA calculée avec le logiciel DOE2. Les résultats obtenus lors de l'optimisation du dimensionnement des systèmes CVCA proposent le nombre de systèmes CVCA et le choix de regroupement des locaux desservis par les systèmes. La comparaison du bâtiment de référence avec le bâtiment optimisé (présentant les mêmes contraintes) démontre des économies d'énergie importantes au niveau des systèmes CVCA.

Le **chapitre 4** présente un deuxième article qui porte sur une méthode d'optimisation simplifiée pour le dimensionnement des systèmes CVCA en n'utilisant que les profils des charges des locaux, une donnée indispensable dans la phase préliminaire de conception. Un facteur d'utilisation global (GLR), décrit comme étant le rapport entre la charge réelle et la charge maximale théoriquement possible du système pour une période donnée, remplace la consommation d'énergie comme fonction objective dans la méthode précédente. Maximiser le facteur GLR est le critère d'optimisation de la méthode présentée dans le deuxième article. Les résultats de comparaison entre ces deux modèles de fonctions objectives montrent le lien entre la consommation d'énergie des systèmes CVCA et le facteur d'utilisation globale. L'impact de l'optimisation du design des systèmes CVCA sur la consommation d'énergie est également présenté dans cet article.

Dans le **chapitre 5** on applique ces 2 méthodes d'optimisation sur un bâtiment réel, soit le Pavillon B de l'ETS. Cette application a fait l'objet d'un autre article et les résultats d'optimisation montrent des économies d'énergie entre 17,2% et 21,7% par rapport au bâtiment existant et jusqu'à 26% par rapport à un bâtiment de référence. Également, une étude économique est effectuée pour comparer le coût global de l'installation CVCA incluant le réseau des gaines. Cette étude nous permet alors de montrer que notre choix concernant la contrainte d'étendue du système pour représenter le réseau des gaines d'air est adéquat.

Nous terminons cette thèse par une **conclusion** générale montrant la contribution à la connaissance ainsi que les retombées de notre projet. Également nous présentons les recommandations concernant les améliorations à faire ou les décisions à prendre dans la phase préliminaire de design en ce qui concerne le regroupement des locaux et le nombre optimal de systèmes à installer.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITERATURE

1.1 Introduction

Comme le but de cette étude est d'optimiser le design des systèmes CVCA (chauffage, ventilation et conditionnement d'air), une revue de littérature est nécessaire pour situer notre travail dans le processus de design. D'abord, nous présentons la différence entre le processus d'analyse et de design avec les phases et les étapes de design. Puisque le regroupement des locaux desservis par les systèmes dans un bâtiment joue un rôle important nous présentons par la suite l'influence de celui-ci. Le surdimensionnement des systèmes CVCA est également pris en considération car il représente le point déclencheur de notre recherche. Comme les bâtiments commerciaux de grandes et moyennes tailles utilisent, très souvent, les systèmes VAV (volume d'air variable) pour le chauffage, ventilation et conditionnement d'air des zones, une courte description des systèmes VAV est présentée. Quelques notions économiques sont présentées lors des étapes du design étant donné que le coût d'investissement représente un critère principal pour les designers lors de la sélection des équipements. Dans notre recherche, minimiser la consommation d'énergie des systèmes CVCA représente le critère d'optimisation (direct ou indirect) mais à l'aide des contraintes imposées, on essaye de garder, de façon indirecte, des coûts d'investissement similaires (réseau des gaines, ventilateurs, etc.). Finalement, nous présentons les différentes méthodes d'optimisation utilisées pour résoudre des problèmes de design des systèmes CVCA. Un survol sur les algorithmes évolutionnaires sera présenté car les études antérieures ont prouvé qu'ils représentent une méthode appropriée pour les problèmes d'optimisation liés aux systèmes CVCA. Pour finir, on présente un schéma (voir Figure 1.9) sur lequel on peut observer où notre méthode intervient dans le processus de design. Sur le même schéma on voit l'intervention dans le processus de design des autres projets de recherche présentés dans la revue de littérature ce qui nous permet de conclure que notre méthode d'optimisation est la seule de ce type dans le processus de design, d'où l'originalité de notre projet.

1.2 Historique

La conquête par l'homme de nouvelles sources d'énergie a toujours été une contribution importante à son développement et les crises pétrolières resteront dans l'histoire un facteur d'accélération du changement.

Initialement, des méthodes manuelles ont été utilisées pour calculer la consommation d'énergie des bâtiments. Pour la première fois, en 1960, des chercheurs développent un programme à l'ordinateur pour faciliter les calculs manuels dans le but de déterminer l'ombrage des fenêtres dû aux surplombs et ainsi établir les charges solaires horaires tout au long de l'année. D'autres programmes ont été développés par la suite pour analyser le transfert de chaleur dans les matériaux de construction et ainsi faire des bilans énergétiques de la pièce. Le premier programme pour le calcul de la charge maximale de chauffage ou de refroidissement (HCC) a été développé par des ingénieurs mécaniques au milieu des années 60. La crise d'énergie de 1970 a stimulé la recherche de nouvelles technologies pour réduire l'utilisation d'énergie dans les bâtiments. C'est dans ce contexte que les chercheurs de l'ASHRAE, du laboratoire de recherche en construction de l'armée américaine ainsi que de l'administration nationale aérospatiale de l'espace (NASA) ont développé des logiciels d'énergie (Henninger 1975; Hittle 1977). La première génération de programmes de charges/énergie a été développée par le Bureau National des Standards des États-Unis en utilisant la méthode du bilan d'énergie (NBSLD) (Kusuda 1974) et par le Bureau de Poste des États-Unis en utilisant la méthode des facteurs de poids (Lokmanhekim *et al.* 1971). Des techniques de gestion d'énergie assistées par ordinateur aussi bien que des applications rigoureuses du concept de volume d'air variable (VAV) ont par la suite été développées dans le but de réaliser un environnement du bâtiment rentable et confortable. Les logiciels actuels sont très utiles dans le calcul de la consommation d'énergie, dans la sélection et le dimensionnement de l'équipement CVCA (Zmeureanu et Fazio 1990). La plupart de ces logiciels ont été développés pour la vérification du design proposé et pour répondre aux besoins réglementaires du bâtiment. Seulement certains logiciels de simulation sont capables de simuler un bâtiment et ses systèmes connexes et en fournir des analyses d'énergie horaires

en utilisant les données météorologiques (i.e. DOE-2, eQUEST, TRNSYS, etc.). La grande catégorie de logiciels utilisés est représentée par les logiciels commerciaux nécessaires dans le projet de design pour la sélection, la configuration et la visualisation virtuelle des différents équipements.

Les logiciels sont utilisés pour réaliser des analyses énergétiques des bâtiments dans le but de concevoir des bâtiments efficaces. En changeant divers paramètres de design (température intérieure, regroupement des locaux, etc.), des simulations énergétiques des bâtiments sont réalisées et leurs effets sur la consommation totale d'énergie sont étudiés. Cependant, l'analyse de la performance d'un bâtiment climatisé est une tâche très complexe qui implique des données climatiques, des caractéristiques physiques et d'opération du bâtiment ainsi que des caractéristiques des systèmes CVCA.

Selon une étude publiée par Nichols (2001), les outils d'analyse énergétique détaillés étaient peu utilisés en 2001, très peu de firmes utilisent une modélisation complète pour orienter la conception d'un nouveau bâtiment et faire ainsi des choix adéquats. Comme le processus de design des systèmes CVCA est strictement lié avec le développement des diverses technologies ou logiciels, on retrouve présentement beaucoup de logiciels pour prédire la consommation d'énergie ou évaluer les économies d'énergie. Une recherche effectuée en utilisant Building Energy Software Tools Directory (BESTD, 2011) nous montre qu'il y a présentement 400 logiciels pour évaluer l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et le développement durable. Orosa et Oliviera (2011) ont effectué une courte revue de littérature mettant en valeur les 9 logiciels de simulation les plus souvent utilisés pour la simulation des bâtiments, soit : BLAST, BSim, CHVAC, DOE-2, EnergyPlus, HAP, TRNSYS, UMIDUS, HAM-tools. Le logiciel DOE-2 (Lawrence Berkeley Laboratory, 1993) a été largement validé par comparaison avec les mesures réelles et les calculs étant vivement recommandés par l'ASHRAE comme un outil de simulation énergétique complet. Il a la capacité de simuler une grande variété de mesures de conservation d'énergie dans les bâtiments mais son principal inconvénient est que l'introduction de données nécessite une grande connaissance de la part de l'utilisateur. Il constitue d'ailleurs le moteur de calcul de

plusieurs interfaces commerciales utilisées pour la simulation énergétique des bâtiments, comme par exemple EE4, SIMEB, eQuest. Le logiciel DOE-2 a été utilisé dans la recherche actuelle pour la simulation du bâtiment en raison de sa grande appréciation de la part des chercheurs.

1.3 Systèmes pour le traitement de l'air

Les systèmes CVCA sont une partie importante du bâtiment parce qu'ils consomment presque la moitié de l'énergie du bâtiment dans le but de maintenir le confort de l'espace (EPA 2000). Ces systèmes sont décrits dans la plupart des livres de référence des systèmes CVCA (ASHRAE 2009, Kreider *et al.* 2009; McQuiston *et al.* 2004; Wang 2001; Chen et Demster 1995).

Suivant la méthode de classification choisie, les systèmes CVCA peuvent être répartis en différentes catégories. En fonction du type de traitement d'air, du transfert de l'énergie et de la régulation, on peut adopter la classification suivante:

- Les systèmes CVCA à air seul (tout air)
 - Systèmes à un conduit à débit d'air constant ou variable
 - Systèmes à deux conduits à débit d'air constant ou variable
- Les systèmes CVCA à l'eau et à l'air
 - Systèmes à induction
 - Systèmes à ventilo-convecteurs

Le rôle d'un système de climatisation est de maintenir la température et l'humidité de l'air à des valeurs prévues et désirées. Pour y arriver, un système dimensionné pour des conditions de design doit être capable de répondre aux besoins variables durant l'année. La variation des charges de climatisation des locaux desservis par un système à débit constant engendre alors la variation de la température de l'air soufflé dans chaque local. Ce processus est inversé dans les systèmes à débit variable (VAV) où le débit d'air est variable tandis que la température de soufflage est constante ou presque constante durant l'année.

1.3.1 Systèmes à volume d'air variable (VAV)

Les bâtiments commerciaux de grandes et moyennes tailles utilisent, en général, les systèmes VAV pour le chauffage, ventilation et conditionnement d'air des zones.

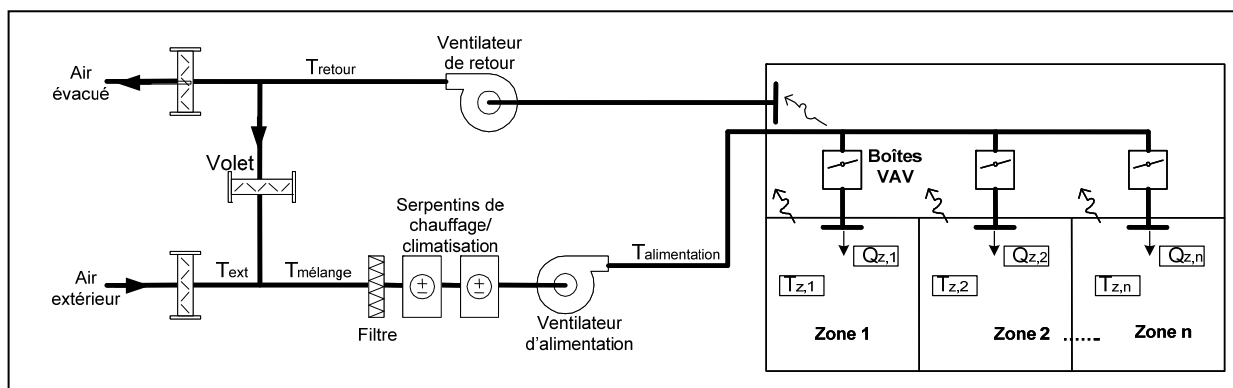


Figure 1.1. Schéma d'un système VAV

Dans les systèmes VAV, tel que mentionné ci-dessus, le débit d'air est variable et la température de l'air soufflé est presque constante durant l'année. Pour assurer la variation de débit d'air, chaque local ou chaque groupe de locaux dispose d'un thermostat qui pilote le régulateur de débit (boîte VAV) en fonction de la température ambiante, sans toutefois qu'on tombe au-dessous d'un débit d'air minimum nécessaire pour des raisons d'hygiène. Le débit maximum du local ou de la zone desservie est déterminé pour les conditions de design qui, en principe, se produisent très rarement. Le débit minimum ajusté par la boîte VAV peut descendre jusqu'à 20 ou 30% du débit maximum à condition que les critères de bonne ventilation du local desservi soient respectés. L'ajustement des débits d'air par l'ensemble des boîtes VAV a pour effet l'ajustement du débit des ventilateurs (alimentation et retour). Ceux-ci sont pilotés par une sonde de pression placée dans le réseau de conduits qui réduit le débit lorsque la pression augmente. Selon les recommandations de l'ASHRAE, ce débit ne doit jamais descendre au-dessous de 50% du débit maximum du système VAV.

Le débit du ventilateur d'alimentation doit être choisi afin d'assurer les conditions pendant la demande frigorifique la plus élevée. Cela permet de diminuer de manière importante le débit d'air du ventilateur par rapport au système à débit constant (ASHRAE 2009).

Le contrôle de l'humidité est un problème potentiel pour les systèmes VAV. L'humidité a une valeur critique (dans certains locaux très spécifiques) lorsque tous les gains sensibles, à l'exception de ceux dus aux occupants, n'ont pas lieu. Dans la pratique, ce cas se présente rarement. En général, les locaux avec les gains latents élevés doivent faire l'objet d'une analyse approfondie. Parfois, les designers préfèrent que ces locaux soient desservis par un système à débit d'air constant (CAV).

Dans le cadre de notre projet, de façon générale, on a choisi de faire l'étude avec des systèmes de type VAV. Si un autre type de système est requis, alors ce type de système sera sélectionné et certaines contraintes supplémentaires devraient être imposées. Toutefois, le type de système choisi n'est important que pour la méthode d'optimisation qui utilise la consommation d'énergie comme fonction objective et dont la valeur est déterminée à l'aide de la simulation détaillée.

Cependant, l'opération des systèmes VAV présente différents failles et plusieurs facteurs contribuent à cette situation non-désirée (Du et Jin 2007; Cappellin 1997; Linder et Dogran 1997). Parmi ces facteurs, nous retrouvons le regroupement des locaux desservis par un système, la grandeur et le nombre de systèmes CVCA dans un bâtiment, le surdimensionnement des systèmes, la stratégie d'opération du système, etc..

1.3.2 Systèmes VAV avec ou sans chauffage d'appoint

Le système VAV sans chauffage d'appoint est le système le plus simple qui ne comporte aucun chauffage complémentaire dans les zones. Il ne sert qu'au refroidissement des zones, par conséquent, il convient très bien à la climatisation des zones internes. Le chauffage d'appoint est nécessaire dans les systèmes qui doivent avoir une pleine flexibilité au niveau

du chauffage et du refroidissement des zones desservies. Ce système VAV peut être conçu soit avec un réchauffage terminal, soit avec un chauffage périphérique. Un réchauffage terminal est intégré à la boîte VAV, tandis qu'un chauffage périphérique ne l'est pas. Les corps de chauffe dans le système périphérique doivent être dimensionnés de telle façon qu'ils puissent d'une part couvrir les pertes de chaleur par l'enveloppe du bâtiment et d'autre part d'assurer le réchauffage du débit d'air minimal soufflé de la température de soufflage à la température ambiante ainsi que le réchauffage des infiltrations d'air extérieur de la température extérieure à la température ambiante.

1.4 Le design

Il n'existe pas de définition unique du design. Son sens varie selon les époques, les cultures et les individus. C'est cette complexité qui le caractérise comme on peut voir en regardant quelques définitions de ce mot.

Design (dizajn ou design) n.m. (mot anglais), discipline visant à une harmonisation de l'environnement humain, depuis la conception des objets usuels jusqu'à l'aménagement des sites. (*Petit Larousse, 1973*)

Design (dizajn ou design) n.m. (mot anglais), discipline visant à la création d'objets, d'environnements, d'œuvres graphiques, etc., à la fois fonctionnels, esthétiques et conformes aux impératifs d'une production industrielle. (*Petit Larousse, 1995*)

Design (dizajn, dezajn) n.m. (v. 1965 : mot anglais, dessin, plan, esquisse). Anglicisme. Esthétique industrielle appliquée à la recherche de formes nouvelles et adaptées à leur fonction (pour les objets utilitaires, les meubles, l'habitat en général). Adj. D'un esthétisme moderne et fonctionnel. (*Petit Robert, 1989*)

L'étymologie du terme design nous indique qu'il signifie à la fois **dessein** et **dessin**. Dessein signifie que tout se décide au départ, au moment du projet. Dessin précise que, dans le projet, le designer n'a pas à s'occuper des fonctionnements purs, affaires de l'ingénieur, mais

seulement de la configuration dans l'espace et dans le temps. Cela caractérise parfaitement notre problème de design car nous intervenons au niveau du design préliminaire, tout au début du processus de conception. Également, suite à l'optimisation, nous serons en mesure de donner l'information sur la configuration des systèmes CVCA (nombre de systèmes, regroupement des zones), sans avoir à s'occuper des fonctionnements purs.

1.4.1 Design versus analyse

Pour bien expliquer la notion de design nous utilisons la comparaison entre le design et l'analyse présentée dans le manuel de design des systèmes CVCA par l'équipe des experts dans ce domaine (ASHRAE 1993).

Sur la Figure 1.2, nous présentons le schéma du processus d'analyse. Nous observons que le processus d'analyse est réalisé dans un seul sens; des données initiales (étape 1) vers la réponse finale (étape 4), à l'aide de certains outils analytiques (étapes 2 et 3).

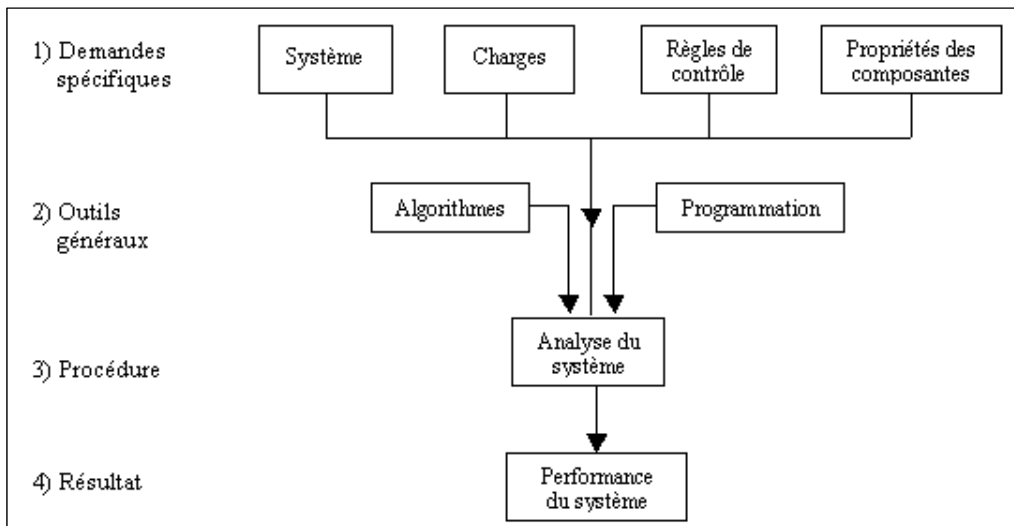


Figure 1.2. Schéma du processus d'analyse (ASHRAE 1993)

En ce qui concerne le design (Figure 1.3), il est un processus itératif très différent de celui d'analyse car il nécessite plusieurs modifications avant de sélectionner le bon système.

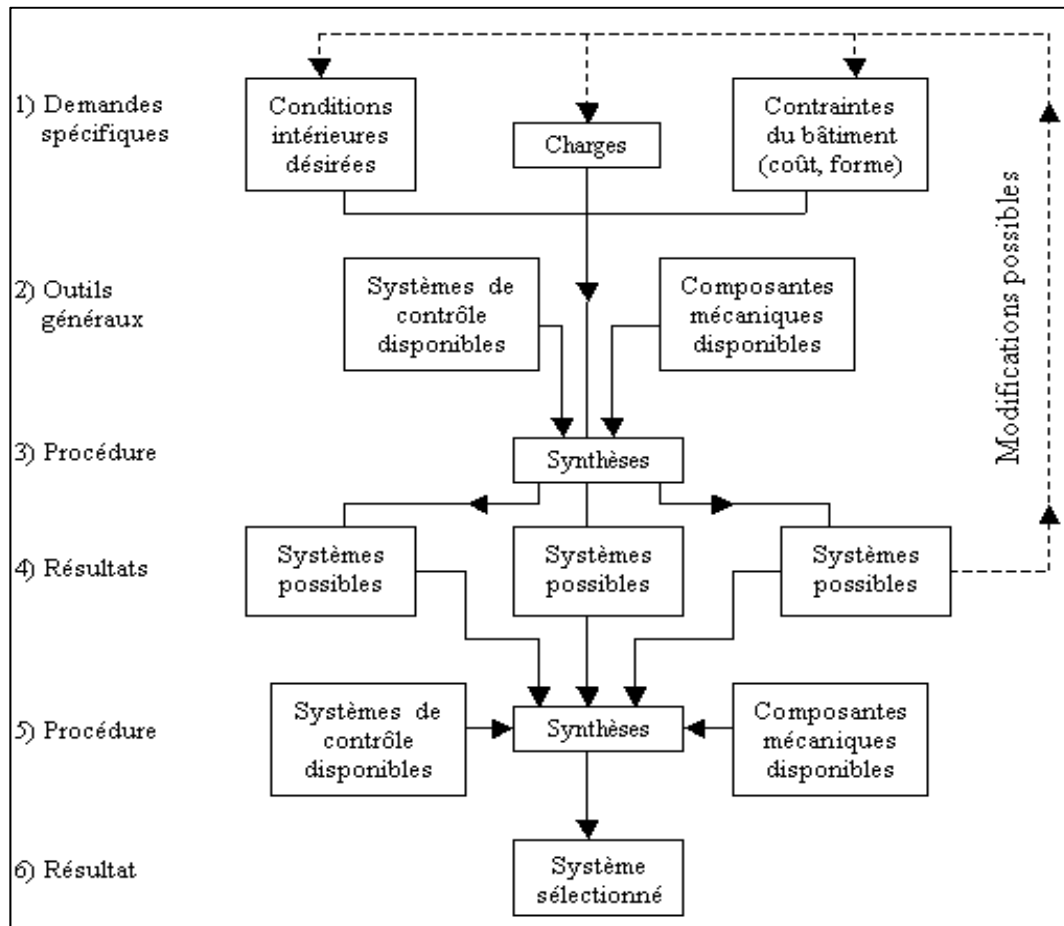


Figure 1.3. Schéma du processus de design (ASHRAE 1993)

Même si à la fin du processus de design la solution finale n'est pas définie en détail, cela peut être fait par la suite. Également, on peut trouver plusieurs solutions possibles, mais il n'y a pas de vraie ou fausse solution lors du processus de design. Les degrés de qualité sont subjectifs et caractérisent les solutions des problèmes de design. Alors, certaines solutions sont meilleures que d'autres pour certaines personnes à un moment donné.

Le design est un processus itératif pendant lequel le concepteur choisit parmi la variété de composantes et d'options de contrôle disponibles pour synthétiser la solution optimale en respectant les contraintes données. Le processus de design contient des étapes répétitives d'analyse, et c'est pour cela que l'analyse est une partie importante du design.

1.4.2 Étapes du design

Comme nous pouvons voir sur la Figure 1.3, pour réaliser le design des systèmes CVCA il faut parcourir certaines étapes. Nous voulons présenter chaque étape pour qu'à la fin, nous soyons en mesure de positionner notre projet par rapport aux recherches réalisées jusqu'à maintenant.

1.4.2.1 1^{ère} étape : Demandes spécifiques

Dans cette étape il faut introduire toutes les informations nécessaires pour le calcul des charges. Pour cela il faut décrire le bâtiment (données d'architecture, vocation du bâtiment, etc.) avec les conditions intérieures désirées (confort thermique, bruit). Au début, on utilise les données nécessaires pour commencer le processus de design mais ces données peuvent être modifiées pendant le processus itératif de design.

a. Charge des locaux

Le choix des matériaux de construction pour diminuer les pertes de chaleur a été étudié. Des recherches ont été effectuées pour étudier le dimensionnement et l'opération des systèmes du bâtiment. En particulier la sélection de la forme du bâtiment, la sélection des matériaux de construction pour l'enveloppe du bâtiment ainsi que pour designer et contrôler les systèmes CVCA ont été étudiées.

Les rapports de littérature montrent que des recherches ont été faites pour étudier la forme du bâtiment, la construction des murs et pour présenter à l'utilisateur un outil de design d'efficacité énergétique. Caldas et Norford (2002) recherchent la dimension optimale des fenêtres dans un bâtiment pour optimiser l'éclairage, le chauffage et le refroidissement. Ils démontrent que les dimensions optimales des fenêtres dépendent des conditions climatiques, du vitrage utilisé, de l'orientation de la fenêtre et de la vocation du bâtiment. Par la suite (Caldas et Norford, 2003) ont étudié l'influence des dimensions et de l'emplacement des

fenêtres dans le but de diminuer la consommation d'énergie dans le bâtiment. Ils ont utilisé le programme DOE-2 pour simuler l'énergie utilisée dans les bâtiments par l'éclairage et les systèmes de climatisation. Leur conclusion a été qu'on réduit le coût de construction au détriment de la consommation d'énergie. Wright (1996) a également étudié l'optimisation de la construction de l'enveloppe du bâtiment, caractérisant le bâtiment par son poids, le type et la surface de vitrage. Lollini *et al.* (2006) cherchent à optimiser les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment en montrant les bénéfices d'une bonne isolation. Monks *et al.* (1998) optimisent les paramètres relatifs à la géométrie de l'espace et au choix des matériaux tout en respectant les normes acoustiques. Wang *et al.* (2006) cherchent à optimiser la forme du plancher, représentée sous forme d'un polygone, d'un bâtiment à bureaux en considérant 2 critères, soit le coût de cycle de vie et l'impact environnemental. La forme d'un bâtiment à bureaux a aussi été optimisée par Ouarghi et Krarti (2006), en considérant comme critère d'optimisation la réduction des coûts énergétiques et d'investissement.

Kim (2010) s'intéresse de quelle façon les mesures d'économie d'énergie qui portent sur l'enveloppe du bâtiment ont un impact sur les économies d'énergie totales du bâtiment. Généralement, les pratiques utilisées par les designers portent sur les stratégies de réduction des charges, spécialement basées sur la performance du vitrage, l'amélioration de l'isolation de la toiture et du design de l'éclairage. Jacobs et Higgins (2004) ont conclu que ces stratégies réduisent la puissance totale installée des équipements CVCA en entraînant une réduction correspondante du coût d'investissement du système CVCA (unités et système de gaines). Pour réduire la taille des systèmes CVCA, les designers et les entrepreneurs des systèmes CVCA devraient appliquer ces stratégies tôt dans leur processus de design.

Nous savons bien que pour déterminer la charge des locaux, les designers utilisent le standard ASHRAE 90.1 (2010) ou le Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments - CMNEB (CNRC 1997). Dans notre processus de design, nous considérons que cette étape est déjà optimisée par l'utilisation de ces méthodes de design qui sont mises à jour couramment. Ces méthodes prescriptibles de performance se réfèrent à l'enveloppe ainsi qu'aux recommandations sur l'éclairage, l'occupation, les équipements etc..

Les designers des systèmes CVCA sont premièrement intéressés par le calcul de la charge maximale pour dimensionner les équipements. Les moyens utilisés pour déterminer les charges peuvent être des méthodes simples, simplifiées ou détaillées (simulation en DOE-2). Dans notre cas, nous utilisons le logiciel DOE-2 pour réaliser la base de données comportant les charges horaires des locaux.

b. Zonage du bâtiment. Regroupement des locaux

Le zonage du bâtiment représente le découpage du bâtiment en zones thermique. Une zone thermique est un espace conditionné et régulé par un thermostat situé dans la zone. Plusieurs espaces peuvent être regroupés dans une même zone thermique s'ils ont sensiblement le même profil de charge de chauffage et de climatisation (Hydro-Québec, 2011). Ces zones thermiques sont ensuite regroupées pour être desservies par des systèmes, ce qu'on appelle dans le présent document le regroupement des locaux.

Auparavant, comme les contrôleurs coûtaient cher, le zonage du bâtiment était fait pour des espaces beaucoup plus importantes. Mais comme leur coût a beaucoup diminué, la zone contrôlée est devenue plus petite ce qui mène à une amélioration du contrôle (Horwitz-Bennett, 2004). Alors, le regroupement des zones desservies par les systèmes devient un aspect intéressant pour économiser de l'énergie. De plus, un bon regroupement peut rendre les équipements plus efficaces, en réduisant le fonctionnement des équipements à charge partielle très ou trop faible.

Nous observons que le regroupement des locaux desservis par les systèmes est souvent réalisé avant de commencer le processus de design ou, au plus tard, au niveau de la 1^{ère} étape de design, tel qu'il est présenté par l'ASHRAE.

Le regroupement des locaux desservis par les systèmes et le nombre de systèmes à installer est un problème qui apparaît en particulier dans les bâtiments avec plusieurs systèmes CVCA. En général, le regroupement des locaux est fait en séparant les zones internes de

zones externes et en considérant l'orientation des zones externes. De même, la vocation des locaux, leur diversification et l'horaire d'occupation jouent aussi un rôle important. Les futurs propriétaires doivent fournir des données précises sur la vocation et l'utilisation des locaux. Un regroupement inapproprié comporte un grand risque de surdimensionnement des systèmes CVCA ce qui peut augmenter le coût d'investissement et peut avoir un impact sur l'opération du système.

Dans l'étude réalisée par Siddiqui (2002) il est présenté l'impact des modifications architecturales ou du changement de vocation de certains locaux sur la consommation d'énergie et sur le confort thermique. Cependant, suite à ces changements architecturaux (passage de grands studios aux salles de classes ou de bureaux), il n'y a pas eu des modifications au niveau des systèmes ce qui représente d'ailleurs la raison qui a déclenché sa recherche.

Une situation similaire a eu lieu lors de l'agrandissement du Pavillon A de l'ÉTS. L'ajout des nouvelles zones (agrandissement de la partie Sud-ouest du Pavillon A) s'est reflété dans des changements au niveau des systèmes. Alors, les systèmes qui étaient initialement surdimensionnées ont pu être utilisés à leur juste capacité en ajoutant des nouvelles zones à desservir. Plus de détails sur le problème de surdimensionnement seront donnés dans la section 1.5.

1.4.2.2 2^{ème} étape : Outils généraux

Dans cette étape, l'ingénieur évalue la disponibilité et la pertinence des composantes mécaniques (récupérateur de chaleur, serpentin de préchauffage, serpentin de fin de cours, etc.) et des stratégies de contrôle (contrôle des ventilateurs, régulation de la centrale, contrôle de la température d'alimentation, l'humidité, des volets, etc.) afin de trouver ceux qui correspondent le mieux aux conditions particulières déterminées dans l'étape 1.

1.4.2.3 3^{ème} étape : Procédure (choix des systèmes à étudier)

Selon la Figure 1.3, dans cette étape on sélectionne parmi les composantes mécaniques et les systèmes de contrôle disponibles celui qui correspond le mieux à notre problème. L'hypothèse sur le nombre de systèmes nécessaires doit être posée. C'est un processus itératif qui dépend fortement des contraintes présentées à l'étape 1 du design. Cependant, souvent le choix du nombre de systèmes et du regroupement de locaux desservis est déjà fait.

Les moyens et les critères utilisés pour présélectionner les systèmes sont nombreux et nous pouvons citer par exemple le standard ASHRAE 90.1 (2010) où il y a de nombreuses recommandations sur le choix de systèmes. Le code modèle national de l'énergie pour les bâtiments (CNRC 1997) donne peu de recommandations, et habituellement, les designers se servent de leurs expériences antérieures ou des tendances actuelles dans le milieu des designers au lieu d'utiliser ce code. Il y a bien sûr les contraintes rencontrées de la part des clients qui peuvent porter sur le coût d'investissement des systèmes. Le choix par la méthode de performance peut être une alternative, et il est réalisé soit avec les méthodes approximatives de calculs énergétiques, soit à l'aide d'une simulation énergétique détaillée.

1.4.2.4 4^{ème} étape : Résultats

À la fin de l'étape 3 de la procédure de design, le designer devrait choisir les systèmes possibles qui correspondent mieux aux conditions de design. Ces systèmes présélectionnés seront étudiés, nécessitant parfois une analyse de résultats, avant de passer à l'étape 5 où la sélection finale aura lieu.

1.4.2.5 5^{ème} étape : Procédure (sélection du système)

Dans cette procédure, le choix du système est souvent basé sur la méthode de performance des systèmes. Cette méthode s'appuie sur le calcul de la consommation d'énergie annuelle ou

sur le coût de cycle de vie des systèmes et donne au designer une liberté plus grande dans le choix des composantes.

Tel que précisé auparavant, le design doit tenir compte des critères économiques : nous sommes intéressés à choisir le système qui a la meilleure opération et dont le coût de cycle de vie est le moins élevé possible.

Il y a peu de recherches qui portent sur les analyses économiques de design des systèmes CVCA, spécialement les analyses économiques intégrées au processus de design. Les recherches antérieures s'adressent à l'évaluation économique des caractéristiques des bâtiments comme par exemple les avantages de l'éclairage naturel (Griffith 1978, Charrette 1980), à l'optimisation des réseaux de gaines et de conduites (Mathews 2003; Kim *et al.* 2002a et 2002b; Carriere 1998; Tsal et Behls 1986; Tsal et Behls 1990), à la sélection du matériel et de l'équipement (Zhao, 2011; Todesco 2004; Tao 1996; Weiding et Cunyang 1995) et au développement des logiciels pour calculer le coût d'investissement des systèmes CVCA (Buys et Mathews, 2005; Yang et Liu 2000).

Il est intéressant de considérer l'importance du coût des composantes mécaniques et architecturales d'un bâtiment, en tenant compte de l'étape de design et de l'étape d'utilisation. Brambley *et al.* (1988) mentionnent que les coûts primaires pour le design et la construction représentent seulement 1/5 du coût total du cycle de vie, les autres 4/5 étant des coûts provenant de l'opération et de maintenance.

Il y a des règles heuristiques qui peuvent nous donner une bonne piste sur les coûts. Par exemple, dans le guide de design pour les petits systèmes CVCA, rédigé par Jacobs et Higgins (2003), le coût d'investissement des unités CVCA est évalué comme étant de 1350 USD par tonne de réfrigération installée et le coût du réseau des gaines d'air est estimé à 1350 USD de plus par tonne installée. Les livres de Means (Mossman 2008) restent cependant la référence dans le domaine.

Wang (2003) est d'opinion que le choix du design des systèmes CVCA devrait finalement être fait sur une base d'analyse économique. Il introduit une méthodologie pour réaliser des analyses économiques pendant le design des systèmes CVCA et il propose les prédictions économiques en 4 étapes : design débutant (*design beginning*), design conceptuel, design préliminaire et design détaillé. Il calcule le coût de cycle de vie, après l'obtention du coût d'investissement et d'opération.

1.4.2.6 6^{ème} étape : Résultats

À la fin de l'étape 5 de la procédure de design, le concepteur choisit le système qui correspond le mieux aux conditions de design. La solution finale est alors choisie et le système devrait être présenté avec toutes les caractéristiques pertinentes et nécessaires.

1.4.3 Phases du design

Les principales phases du processus de design, tel que décrites par ASHRAE (1993), sont présentées sur la Figure 1.4. Dans notre projet de recherche, deux phases nous intéressent particulièrement : la phase préliminaire et la phase finale.

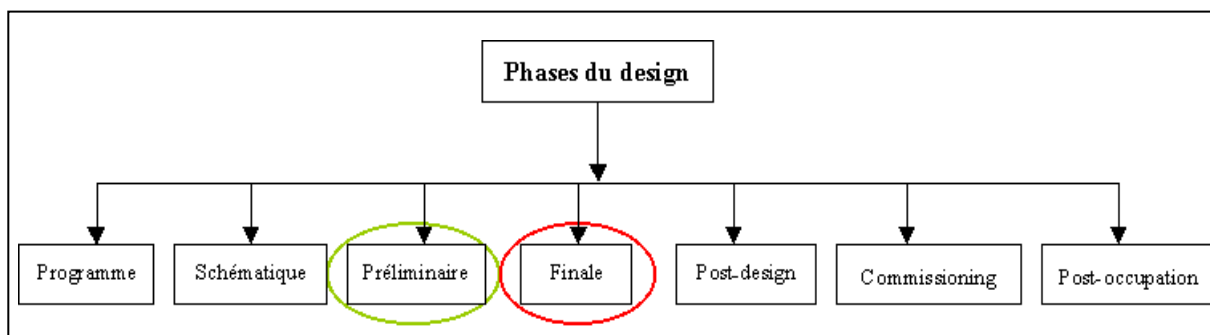


Figure 1.4. Phases dans le processus de design

Dans la phase **préliminaire de design**, pour résoudre des conflits potentiels, on coordonne le design des systèmes CVCA avec les données architecturaux et de structure. La conception intégrée peut être appliquée dans cette phase de design mais elle nécessite l'implication de tous les membres d'équipe de conception. Le dimensionnement des systèmes est réalisé en tenant compte de conditions de design et de fonctionnement à charge partielle. C'est ici qu'on propose le type et le nombre optimal des systèmes ainsi que le regroupement des locaux correspondant à ce design (articles aux chapitres 3 et 4).

Lors du **design final**, les équipements sont sélectionnés (dimensions, numéro de modèle, etc.). Les réseaux de gaines et de conduites et la stratégie de contrôle sont finalisés. C'est ici qu'on peut intervenir pour optimiser la centrale frigorifique ou thermique (Annexe I). Les demandes spéciales finales du propriétaire sont déterminées. À cette étape, ou à la fin de la construction, le propriétaire peut demander des simulations supplémentaires pour établir les coûts d'énergie et les coûts d'opération.

1.5 Surdimensionnement

Beaucoup de systèmes CVCA sont surdimensionnés, ce qui les amène à une opération inefficace. Le surdimensionnement des systèmes se reflète aussi dans un coût d'investissement plus grand de l'unité CVCA et du système de distribution d'air.

1.5.1 Monitoring

Dans l'article intitulé «Optimisation du design des centrales frigorifiques des bâtiments» (Stanescu *et al.* 2005) nous avons utilisé les données du monitoring du bâtiment qui abrite le Pavillon A de l'ÉTS pour démontrer qu'il y a un certain surdimensionnement des systèmes CVCA. Cet édifice est équipé de 11 systèmes de traitement d'air à volume d'air variable (VAV). Ils sont alimentés en eau chaude par le biais de la centrale de vapeur de la communauté de Montréal et en eau froide par le biais d'un groupe refroidisseur centrifuge.

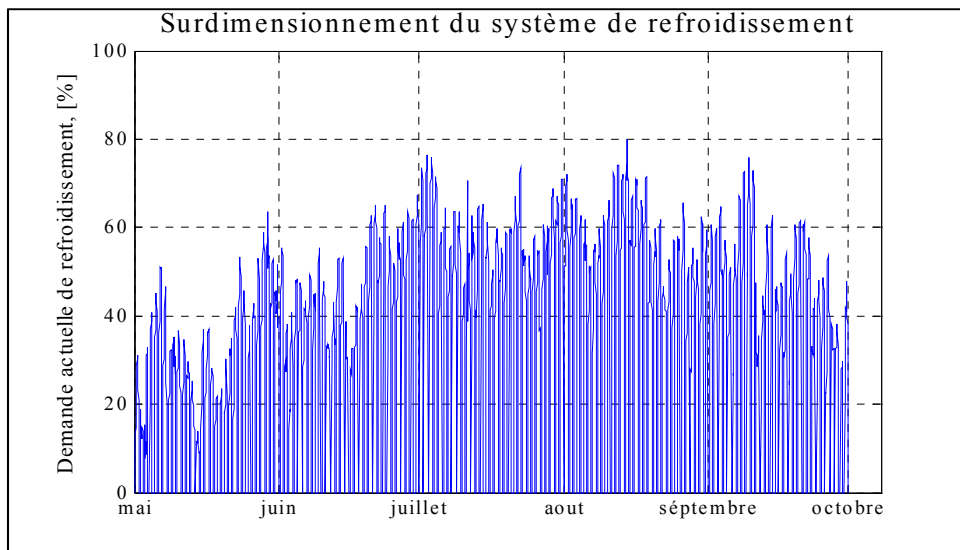


Figure 1.5. Profil de la demande de refroidissement
(mai à octobre 2002)

Sur la Figure 1.5 nous présentons la variation de la puissance frigorifique pour 5 mois de l'année 2002, une année climatique normale pour la région de Montréal. Nous constatons que la consommation moyenne se situe entre 40% et 50% de la puissance frigorifique maximale. Il y a parfois des pointes de l'ordre de 80% ce qui démontre que nous devons en tenir compte lors du design. Les résultats du monitoring peuvent servir pour réaliser différentes analyses. Habituellement, ils font l'objet d'une analyse qui porte sur l'opération des systèmes CVCA afin de trouver la solution qui donne la plus petite consommation d'énergie. Dans notre cas, nous nous en servons pour mettre en évidence l'impact du surdimensionnement (le système dépasse rarement 70 % de sa puissance frigorifique de design).

Kajl *et al.* (2003) ont étudié le surdimensionnement des systèmes CVCA desservis par ce refroidisseur. L'un de ces systèmes (UTA-4) peut servir d'exemple d'un système VAV largement surdimensionné. Le monitoring a démontré que le débit du ventilateur enregistré par le système de contrôle ne dépasse jamais 60% du débit de design (Figure 1.6). De plus, la température de soufflage en été, est rarement inférieure à 16°C qui est une limite assez élevée pour cette période. Si la température était plus basse, ce qui est tout à fait acceptable pour l'été, le débit pourrait être encore plus faible. Le ventilateur d'alimentation fonctionne tout le temps à basse vitesse et à basse fréquence. Le débit du ventilateur de retour doit être encore

plus faible ce qui pourrait le mener à une opération instable. La pression dans les locaux desservis par un système surdimensionné peut être trop faible ce qui pourrait se traduire par le déplacement incontrôlé de l'air d'une zone à l'autre du bâtiment. Ce surdimensionnement a aussi des conséquences sur l'opération des valves d'eau glacée et d'eau chaude ainsi que sur l'opération des volets d'air frais et de mélange.

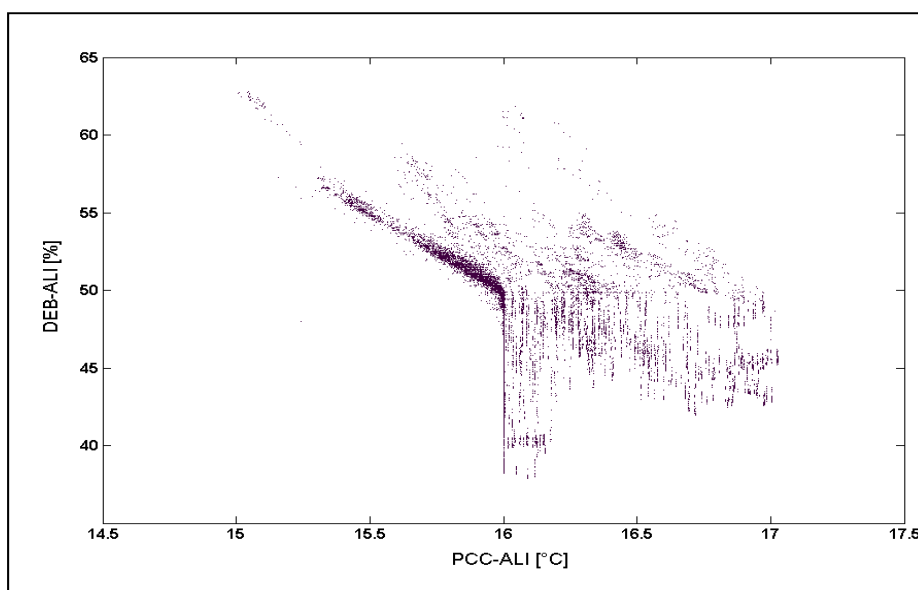


Figure 1.6. Domaine de variation du débit d'alimentation (DEB-ALI) et du point de consigne de température d'alimentation (PCC-ALI) du système UTA-4 en juin 2002

1.5.2 Causes du surdimensionnement

Le monitoring des systèmes CVCA du bâtiment de l'ÉTS démontre que le surdimensionnement d'un système peut parfois atteindre un niveau inattendu. La demande d'un refroidisseur, par exemple, reconnu pour une consommation importante d'énergie, dépasse rarement 80 % de sa capacité de design. Nous avons démontré (Stanescu *et al.* 2005) l'utilité de l'optimisation du design des centrales frigorifiques mettant en évidence les économies d'énergie qui auraient pu être réalisées dans un bâtiment existant si sa centrale frigorifique avait été optimisée. Le surdimensionnement, le nombre de refroidisseurs et leur

capacité de design sont les éléments qui doivent être pris en considération pendant l'optimisation du design. Le critère d'optimisation est évidemment la réduction de la consommation d'énergie et indirectement la diminution du coût d'opération de ces centrales.

Il y a plusieurs raisons pour lesquelles les systèmes CVCA sont surdimensionnés, comme par exemple : *(i)* la méthode utilisée pour calculer les charges de climatisation ou de chauffage de design, *(ii)* la diversification insuffisante des profils de charges ou de la vocation des locaux desservis par un système, *(iii)* les données imprécises fournies par le futur propriétaire sur la vocation et l'utilisation des locaux, *(iv)* la tendance de concevoir des systèmes avec des marges de sécurité élevées, etc.

Une variété de méthodes de dimensionnement est utilisée pour déterminer la grandeur des systèmes CVCA, y compris « les règles du pouce » où le dimensionnement est basé sur pi^2/tonne de réfrigération (m^2/kW de puissance de refroidissement), des méthodes manuelles (ACCA Manual, 1990), des méthodes de calcul automatisées (Energy Design Resources, 1998) et bien sûr la simulation énergétique des bâtiments qui est devenue un outil indispensable de nos jours. Parce que la plupart des méthodes de dimensionnement sont basées sur des hypothèses conservatrices, le calcul de la charge et l'approximation de celle-ci devrait se faire seulement jusqu'à l'unité immédiate supérieure pour éviter le surdimensionnement.

1.5.3 Conséquences du surdimensionnement

Les conséquences du surdimensionnement des systèmes CVCA sont: *(i)* augmentation du coût d'investissement de l'équipement dû au fait qu'il faut acheter un équipement plus grand que nécessaire, *(ii)* augmentation du coût d'opération des équipements ce qui implique une consommation d'énergie plus importante, *(iii)* probabilité d'usure plus rapide de l'équipement ce qui entraîne des coûts de réparation et de maintenance plus élevés.

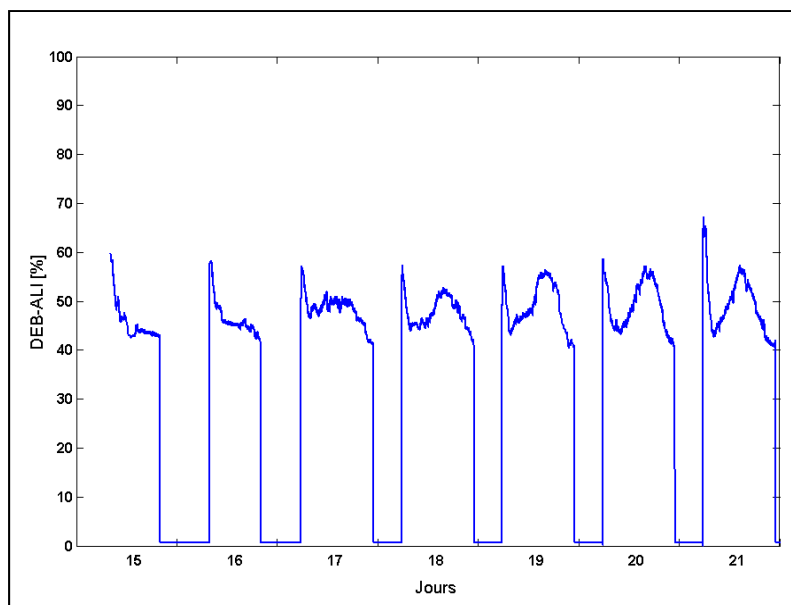


Figure 1.7. Variation du débit d'alimentation du système UTA-4 pendant une semaine du mois d'août 2001

Dans un certain sens, un système VAV largement surdimensionné devient un système à débit constant (Figure 1.7) parce que, finalement c'est la température d'alimentation qui est ajustée pour ne pas dépasser la limite inférieure du débit de ventilateur tel que mentionné précédemment.

En ce qui concerne le confort thermique, la distribution de l'air dans les locaux desservis par un système VAV en hiver (débit d'air faible) est considérée comme une faiblesse même si elle résulte du principe d'opération. Dans le cas d'un système surdimensionné, cette faiblesse a aussi lieu en été. De plus, tous les composants d'un système surdimensionné fonctionnent à charge partielle comme par exemple : les boîtes VAV (Figure 1.8), les valves d'eau chaude et d'eau glacée, le ventilateur, etc. (Kajl *et al.* 2003). Il en résulte que l'opération pourrait être améliorée en baissant ainsi la consommation d'énergie.

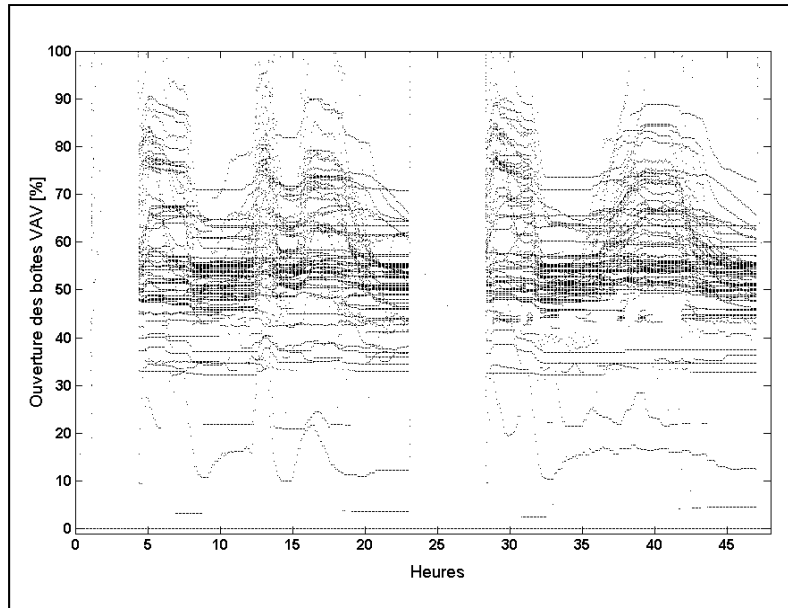


Figure 1.8. Ouverture des boîtes VAV du système UTA-4 pendant le 8 et le 9 août 2002

Pour corriger le surdimensionnement et améliorer l'efficacité des systèmes on peut intervenir à plusieurs moments dans le design, comme présenté sur la Figure 1.5. Par exemple, le regroupement des locaux desservis par des systèmes, la sélection du matériel et de l'équipement, le contrôle des systèmes CVCA, le réseau des gaines, la centrale frigorifique ou thermique, etc. représentent des éléments qui peuvent être améliorés et ainsi éviter les surdimensionnement des systèmes.

1.5.4 Centrale frigorifique et/ou thermique

Une centrale frigorifique est constituée d'un ou de plusieurs refroidisseurs qui habituellement sont disposés en parallèle. Leur rôle est de fournir la source de refroidissement pour le système. Les contrôleurs individuels de rétroaction ajustent la capacité de refroidissement de chaque refroidisseur afin de maintenir une température désirée de l'eau de refroidissement. Les variables additionnelles de commande du refroidisseur correspondent au nombre de refroidisseurs en fonction et à la charge relative de chaque refroidisseur. Pour une demande

totale de refroidissement donnée, la charge individuelle de chaque refroidisseur peut être contrôlée en utilisant différents points de réglage de la température de l'eau de refroidissement pour des débits individuels constants ou en ajustant différents débits pour des points de réglage identiques. L'aspect important du mode d'opération est la priorité d'opération des refroidisseurs. La priorité d'opération définit l'ordre et les conditions liés à la mise en marche de l'équipement. Le but de la stratégie de contrôle du système de refroidissement est de déterminer la manière d'utilisation la plus économique des refroidisseurs pour maintenir la température de l'air de soufflage à la valeur du point de consigne.

Chan et Yu (2004) étudient les caractéristiques de la charge de refroidissement et le profil de la fréquence de la charge, et, présentent 4 possibilités de design. Cet article démontre qu'il est préférable d'utiliser des refroidisseurs de tailles différentes dans le but de prolonger leur opération près de la charge maximale et ainsi diminuer la consommation en électricité. Ardakani *et al.* (2008) cherchent à trouver la charge optimale des refroidisseurs. Dans leurs méthodes d'optimisation, la charge partielle (PLR) du refroidisseur est choisie comme variable d'optimisation et la demande du refroidisseur comme fonction objective. Chen *et al.* (2010) optimisent plutôt le contrôle de la centrale frigorifique ce qui se reflète dans une meilleure opération.

Dans l'article présenté en Annexe I (Stanescu *et al.* 2005), nous avons étudié l'optimisation du design des centrales frigorifiques en utilisant les données de monitoring du bâtiment de l'ETS. La comparaison d'une centrale frigorifique optimisée (2 ou 3 refroidisseurs plus petits) avec la centrale existante comportant un seul refroidisseur démontre qu'une économie d'énergie de 7% peut être réalisée. Nous avons observé que cette économie d'énergie varie en fonction de la configuration de la centrale frigorifique du bâtiment.

1.6 Méthodes d'optimisation

Dans le contexte de la mécanique du bâtiment et des systèmes CVCA, les méthodes d'optimisations couplées avec la simulation ont été développées et souvent utilisées dans les dernières années. L'optimisation consiste dans un ensemble de techniques qui permettent de trouver la meilleure solution d'un problème, soit la solution qui optimise une fonction objective (par exemple: la consommation annuelle d'énergie, le coût de cycle de vie, le confort thermique, les paramètres de design, etc.). Une diversité de nouvelles techniques est maintenant appliquée aux problèmes analytiques concernant la prédiction du futur comportement des systèmes CVCA. Les nouveaux outils comme les algorithmes évolutionnaires promettent de fournir les résultats qui ne peuvent pas être obtenus avec des techniques traditionnelles. (Kreider et Haberl, 1994).

1.6.1 Méthodes diverses

Les méthodes d'optimisation utilisées couramment peuvent être divisées en optimisation monocritère ou multicritère. Pour résoudre ces problèmes, les chercheurs peuvent utiliser les algorithmes d'optimisation qui arrêtent après un nombre fini d'étapes (i.e. Simplex), les méthodes itératives qui convergent vers une solution (i.e. Gradient) ou les algorithmes heuristiques (i.e. Algorithmes évolutionnaires, Optimisation par essais particuliers, etc.) qui fournissent des solutions approximatives aux problèmes. La méthode Simplex est le plus souvent utilisée pour résoudre un système linéaire de maximisation ou minimisation de la fonction objective. La méthode du gradient a été utilisée souvent quand les contraintes n'existent pas mais les implémentations de cette méthode peuvent accommoder deux bornes des contraintes.

Les méthodes d'optimisation ont été utilisées pour investiguer le confort thermique optimal en considérant les variables du bâtiment comme les propriétés thermique et l'épaisseur de l'enveloppe, la fenestration, l'ombrage, (Bouchlaghem, 1990), la grandeur des fenêtres et le choix du type de matériaux de vitrages (Radford et Gero, 1979). Le dimensionnement des

systèmes CVCA en considérant comme fonction objective le coût d'investissement de ces systèmes et en appliquant des contraintes appropriées (configuration des serpentins, contrôle des systèmes etc.) a été étudié par Wright (1996). La stratégie de contrôle des systèmes CVCA dans les bâtiments avec un stockage thermique a également été étudiée (Nagai *et al.* 2002).

Wright *et al.* (2001) utilisent comme fonction objective le coût d'opération des systèmes CVCA et les variables du problème sont la grandeur des composantes du système CVCA, la stratégie de contrôle des systèmes CVCA et la construction de l'enveloppe du bâtiment. Cette approche a été étendue par l'application d'un algorithme génétique multi-objectifs (qui considère comme fonctions objectives le coût d'opération des systèmes CVCA ainsi que le confort thermique des occupants, et cela, pour 3 journées de conception. (Wright *et al.* 2002). Fong *et al.* (2006) ont appliqués la programmation évolutive (PE) couplée avec le modèle de simulation de la centrale thermique pour une gestion efficace de l'énergie des systèmes CVCA, en considérant comme variables d'optimisation la température de l'eau à la sortie du refroidisseur ainsi que le température de soufflage de l'unité de traitement de l'air.

Wetter and Wright (2003) décrivent dans leur article que résoudre des problèmes d'optimisation pour le design et le contrôle du bâtiment demande souvent d'utiliser les fonctions de coûts obtenus avec des logiciels de simulation énergétique des bâtiments. Ces fonctions de coûts peuvent être discontinues en limitant les types d'algorithme d'optimisation approprié pour ce problème. Les auteurs comparent deux algorithmes d'optimisation (Hooke-Jeeves Algorithm and Genetic Algorithm) et trouvent qu'ils sont des bons candidats pour résoudre ce genre de problèmes. Cependant, ils suggèrent que le temps de calcul peut être réduit et la précision de la solution améliorée si le logiciel de simulation permet de contrôler l'erreur d'approximation des fonctions de coût.

L'application de l'optimisation lors du design des systèmes CVCA (y compris le choix des composantes du système, les connexions entre les composantes et la taille et le fonctionnement des composantes) est présentée aussi dans la norme ASHRAE RP-1049.

(Wright *et al.* 2004). Les variables d'optimisation sont dérivées des dimensions physiques des composantes ainsi que des variables qui peuvent être contrôlées comme le débit du fluide, ce qui se traduit par un contrôle optimal du système. En appliquant la procédure d'optimisation, des nouvelles configurations des systèmes CVCA ont été identifiées et une réduction de la consommation d'énergie des systèmes CVCA de 15% par rapport au design de référence a été estimée.

Asiedu *et al.* (2000) ont étudié l'application des algorithmes évolutionnaires pour le design du réseau des gaines. Les méthodes pour le design des réseaux des gaines d'air d'un bâtiment sont présentées dans le livre d'ASHRAE *Handbook- Fundamentals* (2009): frottement égal, regain statique et la méthode T qui est en fait la seule méthode d'optimisation. Le nombre de systèmes doit être établi avant de commencer le design du réseau des gaines d'air. Les méthodes de frottement égal et regain statique calculent les pertes de pression du système une fois que la taille des conduites d'air est sélectionnée. La méthode T, introduite par Tsal *et al.* (1988a, 1998b), permet de trouver les dimensions optimales des gaines de ventilation ainsi que la taille optimale du ventilateur afin de réduire le coût de cycle de vie du système. Kim *et al.* (2002a et 2002b) étudient ces méthodes de design de gaines d'air et ils cherchent à trouver l'optimum du design pour les gaines des systèmes VAV. Ils appliquent avec succès la méthode simplex Nelder et Mead (méthode numérique heuristique qui cherche à minimiser une fonction continue dans un espace à plusieurs dimensions) pour un problème de design non-conditionné pour trouver les dimensions optimales des gaines. Après que les dimensions optimales des conduites d'air sont établies par les différentes méthodes de design, une simulation du mode d'opération est requise pour vérifier la performance des méthodes. La méthode T a un grand potentiel pour réduire des coûts et il est recommandé de l'utiliser pour le design des conduits d'air des systèmes VAV.

Il existe beaucoup de littérature entourant les programmes informatiques qui mentionne le programme GenOpt. Celui-ci aborde le problème de l'optimisation des systèmes CVCA et peut être utilisé dans une approche optimisation/simulation énergétique. Il peut être couplé à des logiciels de simulation externes qui peuvent lire et écrire les données d'entrée et de sortie

dans un fichier texte. GenOpt est un programme d'optimisation générique qui utilise plusieurs algorithmes d'optimisation, comme par exemple : algorithme de recherche de motifs, algorithme par essais particuliers, algorithme Hooke-Jeeves, algorithme Simplex de Nelder et Mead, méthode du gradient à pas d'Armijo, etc. GenOpt a été développé par Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) pour trouver les variables d'optimisation qui donnent le meilleur rendement pour des systèmes complexes impliquant de nombreuses variables et où la fonction de coût demande beaucoup de calcul. (Wetter 2009)

En utilisant l'approche optimisation/simulation de nombreux problèmes particuliers peuvent être résolus dans le cadre de la gestion de l'énergie. Les études précédentes ont prouvé que les méthodes d'optimisation numérique sont capables de répondre à une variété de problèmes d'optimisation de systèmes CVCA.

1.6.2 Algorithme évolutionnaire

Tel que précisé auparavant, la majorité des problèmes de design des bâtiments se réfère à la réduction du coût de capital et d'opération. Les concepteurs peuvent évaluer leurs choix en simulant la consommation d'énergie pour le bâtiment et l'opération des équipements CVCA, et également en calculant le coût de construction. Les algorithmes évolutionnaires sont une méthode d'optimisation qui a souvent été appliquée pour résoudre ces problèmes.

Les algorithmes évolutionnaires (AE) se classent en trois grandes catégories en fonction du type de représentation de données, de l'importance du croisement et de la mutation et du type d'opérateur de sélection. Les trois catégories sont : *(i)* la stratégie d'évolution (SE), *(ii)* la programmation évolutive (PE) et *(iii)* l'algorithme génétique (AG). Généralement, pour AG la représentation des individus est binaire, le croisement est essentiel, la mutation a moins d'importance et la sélection est aléatoire. Pour la PE la représentation est réelle, la mutation est indispensable, la recombinaison n'est pas incluse et la sélection est stochastique. Pour la SE la représentation est réelle, la mutation est importante (parfois le seul opérateur de

variation), le croisement est souvent inclus (pas dans toutes les formulations de SE) et la sélection est déterministe (Fong *et al.* 2006; McDonnell *et al.* 1995; Eiben et Smith 2003).

Les algorithmes évolutionnaires (AE), pouvant prendre une des trois formes présentées ci-haut, sont une procédure de recherche basée sur les mécanismes de la sélection naturelle de Darwin. Le mécanisme est de combiner la survie de l'individu avec la fonction fitness la plus convenable avec une information d'un individu choisi aléatoirement pour échanger de l'information dans le but de former un algorithme de recherche avec une partie du flair innovateur de l'humain (Holland 1992).

Les AGs ont été initialement développés par John Holland (1975). C'est au livre de Goldberg (1989) que nous devons leur popularisation. Depuis son introduction, l'algorithme génétique a été appliqué à une vaste gamme de problèmes scientifiques, économiques et d'ingénierie. L'AG a servi pour la résolution de problèmes d'ingénierie liés aux systèmes comme le design des équipements, la production manufacturière, les contrôleurs, les utilités municipales, la robotique, les processus de signaux et la fausse détection. La majeure partie du travail initial de recherche peut être trouvée dans diverses démarches présentées lors de conférences internationales. Cependant, il existe maintenant plusieurs manuels sur les AE (Mitchell 1998; Gen et Cheng 1997). Le livre d'Eiben et Smith (2003), présentant une introduction dans le calcul évolutif, nous a inspiré en mode particulier et a été la base de la conception de notre algorithme évolutionnaire puisqu'il présente les opérateurs génétiques pour des représentations de type permutations comme c'est le cas dans notre recherche.

Les algorithmes évolutionnaires ont été utilisés pour les caractéristiques suivantes:

- ils sont faciles à comprendre et peuvent être appliqués à une large plage de problèmes avec peu ou pas de modifications;
- ils sont disponibles publiquement et il est facile d'implémenter les codes;
- ils sont capables de fonctionner avec des programmes de simulation complexes;

- ils sont efficaces pour résoudre des problèmes complexes qui ne possèdent pas de solutions analytiques: des estimations économétriques, la résolution des modèles dynamiques, etc.
- l'identification facile de l'optimum en fonction des multiples critères d'optimisation.

Tel qu'il a été mentionné, les algorithmes évolutionnaires ont été utilisés pour concevoir des systèmes CVCA (Wright 1996; Asiedu *et al.* 2000). D'ailleurs, Wright (1996) décrit la performance de la méthode de recherche avec un algorithme génétique simple au lieu d'utiliser des méthodes de recherche d'optimisation directes.

Les algorithmes évolutionnaires ont été utilisés dans des applications du bâtiment relatives à la consommation d'énergie, en particulier pour optimiser les dimensions des systèmes CVCA. L'AE a un progrès initial rapide mais la convergence finale est lente due au nombre élevé de contraintes du problème d'optimisation. Il est suggéré qu'une utilisation plus efficace des fonctions de contrainte puisse améliorer la convergence et la robustesse de l'algorithme. La performance de l'algorithme est également sensible à la formulation du problème, mais il montre un bon potentiel pour résoudre des problèmes de dimensionnement des systèmes CVCA. Asiedu *et al.* (2000) utilisent l'AG pour concevoir un réseau des gaines d'air pour les systèmes CVCA avec un coût minimum du cycle de vie. L'algorithme génétique a été utilisé pour dessiner les plans du réseau des gaines d'air des systèmes CVCA, pour établir les dimensions des gaines d'air ainsi que pour déterminer le prix variable de l'électricité. Wright et Farmani (2001) étudient l'optimisation simultanée du design de construction du bâtiment, de la taille du système CVCA et de la stratégie de contrôle (le design de tout le bâtiment) en utilisant la méthode de recherche de l'AG, les résultats indiquant que l'AG est efficace pour trouver une solution faisable en partant d'une population de solutions générées aléatoirement et de manifester rapidement la convergence vers une solution. Les solutions obtenues sont presque optimales. Le manque de convergence est dû aux variables qui ont un effet secondaire sur la fonction objective.

Caldas et Norford (2003) utilisent un algorithme génétique qui contrôle le programme de simulation DOE-2 d'énergie dans un bâtiment pour étudier les dimensions et l'orientation des fenêtres dans le but de minimiser la fonction objective qui est la consommation d'énergie. Ils ont également utilisé l'algorithme génétique pour changer la forme du bâtiment dans le but d'optimiser la consommation d'énergie de chauffage et d'éclairage. L'AG a été utilisé par Reddy et Norford (2002) pour programmer les réductions d'éclairage et de puissance de refroidissement pendant une période de contrôle de la charge. L'AG a été utilisé pour trouver les solutions de design possibles qui sont par la suite évaluées du point de vue des performances thermiques et de l'éclairage en utilisant le programme DOE-2.1 E (Caldas et Norford 2002). Les résultats de simulations sont par la suite utilisés pour guider l'AG à chercher, parmi les solutions réduites en énergie, la solution optimale.

1.7 Originalité

Jusqu'à maintenant, nous n'avons pas trouvé de recherches sur l'optimisation du design des systèmes CVCA qui prennent en considération le nombre de systèmes et les diverses possibilités de regroupement des locaux desservis par ces systèmes pour trouver la meilleure combinaison du point de vue énergétique.

Tel que présenté dans la revue de littérature, au début du processus de design, les designers s'intéressent plutôt à la diminution des charges du bâtiment basée sur les stratégies de réduction des charges dues à la performance du vitrage, l'amélioration de l'isolation de la toiture, l'efficacité de l'éclairage, etc.. Cependant, le regroupement de zones et la proposition relative au nombre de systèmes dans un bâtiment, sont souvent réalisés avant ou au début du processus de design tel qu'il est présenté par l'ASHRAE. Alors, la méthode proposée permet d'optimiser le design des systèmes en phase préliminaire de design, en réalisant une optimisation du design pour trouver le regroupement optimal des locaux et le nombre optimal de systèmes. Le choix du type de système, l'optimisation du système de contrôle ou l'optimisation du réseau de gaines représentent les étapes suivantes par rapport à ce que nous proposons, tel que présenté sur la Figure 1.9. L'optimisation des centrales frigorifiques

présentée dans l'Annexe I pourrait servir d'exemple d'optimisation qui peut être la suite de l'optimisation proposée dans cette recherche.

L'optimisation du design des systèmes CVCA, réalisée au début du processus de design, tient compte des regroupements des locaux et du nombre de systèmes dans le but d'obtenir la moindre consommation d'énergie. L'originalité de notre projet consiste alors dans le développement d'une méthode d'optimisation de design permettant dans la phase préliminaire de design de choisir le nombre des systèmes et le regroupements des zones desservies par ces systèmes ce qui est complémentaire aux ouvrages publiés auparavant.

La Figure 1.9 schématise la revue de littérature et associe les principaux projets de recherche aux étapes du processus de design déjà schématisé sur la Figure 1.3. Cette figure situe aussi notre projet de recherche dans le processus de design ainsi que par rapport à d'autres projets présentés dans la revue de littératures.

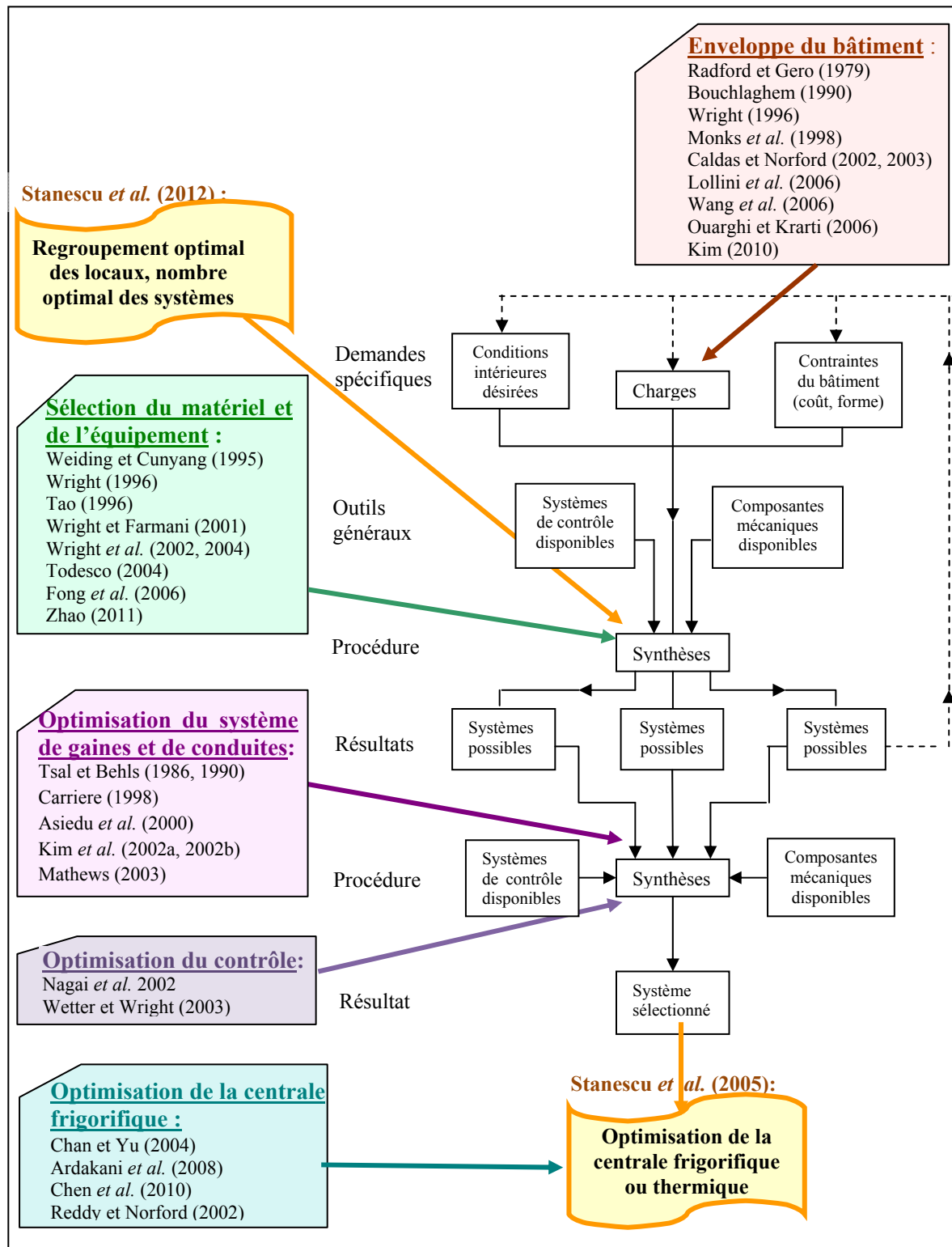


Figure 1.9. Association de la revue de littérature avec les étapes du design

CHAPITRE 2

STRUCTURE DE LA THÈSE

2.1 Problématique de recherche

Le problème de surdimensionnement des systèmes CVCA représente l'élément déclencheur de notre recherche. Le monitoring des systèmes CVCA du bâtiment de l'ÉTS démontre que ce surdimensionnement peut parfois atteindre un niveau inattendu et peut causer des problèmes d'opération. Le chapitre 1 passe en revue différentes méthodes d'optimisation dans le but de choisir la méthode la plus appropriée pour notre problème d'optimisation.

Ce problème est très complexe dans les bâtiments desservis par plusieurs systèmes CVCA comme dans les bâtiments commerciaux et institutionnels. Le regroupement des locaux desservis par chaque système CVCA est, par exemple, basé surtout sur la vocation, l'horaire d'occupation et l'emplacement des locaux ainsi que sur l'expérience du designer. Sans réaliser une optimisation qui prend en considération tous les paramètres requis, le critère de minimisation de la consommation d'énergie n'est considéré que partiellement. Il en est ainsi avec le choix des systèmes CVCA proposés dans un bâtiment qui est rarement basé sur l'analyse détaillée des coûts d'opération, d'investissement et de maintenance. Le potentiel d'amélioration du processus de design est donc très important et c'est pourquoi l'optimisation de ce processus est un défi à relever dans la thèse proposée.

2.2 Objectifs de recherche

Tel que précisé auparavant, les systèmes CVCA font partie des équipements les plus énergivores dans les bâtiments. En général, les concepteurs de ces systèmes se servent de leurs expériences antérieures ou des tendances actuelles pour réaliser le regroupement des locaux desservis par les systèmes, en ayant comme critère de sélection le prix d'investissement le plus faible et rarement le coût de cycle de vie. L'efficacité énergétique des systèmes CVCA n'est pas un critère facilement calculable lors de la sélection de ces

systèmes. Avec les outils d'aujourd'hui c'est possible d'améliorer ces aspects et dans le cadre de la présente thèse nous nous penchons sur l'optimisation de design des systèmes CVCA dans le but de réduire la consommation d'énergie des systèmes CVCA et ainsi les rendre plus efficaces. Alors, l'objectif fixé dans le cadre de la présente thèse est de développer une méthode d'optimisation pour le design des systèmes CVCA qui vise à augmenter l'efficacité énergétique des systèmes CVCA.

2.3 Description sommaire des articles

Notre étude consiste à optimiser le design des systèmes CVCA dans le but réduire la consommation énergétique des systèmes CVCA. Pour cela nous avons choisi deux variables d'optimisation : le regroupement des locaux desservis par les systèmes ainsi que le nombre de systèmes dans un bâtiment.

Pour démontrer l'impact de l'optimisation sur la consommation d'énergie, nous avons développé une première méthode d'optimisation ayant comme critère d'optimisation de minimiser la consommation d'énergie des systèmes CVCA, soit la Méthode CR_CONS. Nous avons développé l'algorithme d'optimisation spécifique pour notre problème dans le logiciel Matlab. Cette méthode exige l'interaction avec un logiciel de simulation (dans notre cas le logiciel DOE2) lors du calcul de la consommation d'énergie des systèmes CVCA, ce qui se traduit par un temps de calcul très important. Cette approche est présentée dans le premier article (Chapitre 3).

Une nouvelle notion est présentée, soit l'étendue des systèmes, décrite dans le premier article et appliquée dans tous les autres articles présentés dans la thèse. Cette notion a été introduite pour considérer de façon indirecte la grandeur du réseau des gaines d'air : nous considérons que la distance entre le centre de gravité de toutes les zones desservies par le même système et la salle mécanique peut servir comme une bonne approximation pour quantifier la grandeur du réseau des gaines d'air.

Dans le deuxième article (Chapitre 4), pour contourner le problème du temps de calcul très important, nous avons changé le critère d'optimisation par un critère simplifié, soit de maximiser le facteur global d'utilisation, GLR (le rapport entre la charge réelle et la charge maximale théoriquement possible du système pour une période donnée). Le temps de calcul lors de l'application de cette méthode (Méthode CR_GLR) est ainsi réduit et, pour réaliser l'optimisation, nous utilisons que les profils des charges des locaux, une donnée indispensable dans la phase préliminaire de conception. Nous présentons également le lien entre la consommation d'énergie des systèmes CVCA et le facteur d'utilisation globale.

Dans le troisième article nous appliquons ces deux (2) méthodes d'optimisation sur un bâtiment existant, soit le Pavillon B de l'ETS (Chapitre 5). Nous présentons également les économies d'énergie obtenus, qui peuvent aller jusqu'à 21.7% par rapport au bâtiment existant et jusqu'à 26% par rapport à un bâtiment de référence. Également, une étude économique est effectuée pour comparer le coût global de l'installation CVCA incluant le réseau des gaines. Les résultats démontrent aussi que, dans cette méthode d'optimisation, un bon choix des contraintes d'optimisation peut avoir un impact sur la consommation d'énergie.

Une conclusion générale portant sur les trois (3) articles et montrant la contribution à la connaissance ainsi que les retombées de notre projet est présentée.

Cette section présente les grandes lignes de cette thèse et se voit être un guide pour anticiper les étapes parcourues pour la réaliser.

CHAPITRE 3

PRELIMINARY DESIGN OF HVAC SYSTEM USING OPTIMIZATION BY EVOLUTIONARY ALGORITHM

Magdalena Stanescu¹, Stanislaw Kajl¹, Louis Lamarche¹

¹ Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure,

1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis à la revue «Journal of Energy Engineering» en mars 2012.

3.1 Abstract

HVAC systems are recognized as the greatest energy consumers in commercial and institutional buildings. Generally, designers use common sense, historical data and subjective experience in designing these systems: such designs must take into account the way in which the zones served by the systems are grouped as well as the number of systems that serve each building. HVAC energy efficiency is not an easily calculable criterion to use when selecting such systems; usually, the lowest investment price becomes the primary selection criterion.

This article outlines an optimization method for HVAC systems design that uses reduction in energy consumption as the optimization criterion. The optimization variables are: (i) grouping of the zones served by the systems and (ii) number of systems serving the building. Constraints have been selected in order to ensure accurate representation of the variables' limits. For this article, we modeled an office building using the DOE-2 calculation engine.

The results obtained during this HVAC optimization design process could prove to be very useful for engineers during the preliminary design phase and reveals significant savings for HVAC energy consumption. These savings are dependent upon the building's configuration, the types of HVAC systems it has, and the control strategies these systems employ.

Keywords: HVAC systems; grouping of zones; optimization; evolutionary algorithm; energy consumption; DOE-2 simulation; design; ASHRAE.

3.2 Introduction

HVAC (heating, ventilation and air conditioning) systems in commercial and institutional buildings are often oversized. The monitoring of two VAV (variable air volume) systems carried out at *École de technologie supérieure* (ÉTS) has revealed that these systems' design can be improved to render their operation more energy efficient.

A good HVAC system design is based on the principle of matching thermal comfort conditions to equipment technical specifications. The equipment selected must meet the system's design load requirements and must also be efficient when the system is operating under partial load.

3.2.1 System oversizing

The data recorded via monitoring were analyzed by Kajl *et al.* (2003). The VAV system thus investigated is installed at ÉTS and is largely oversized. This system meets the load requirements of offices and research laboratories in the southwest façade of the building. Its airflow rate is 24 m³/s.

Results of monitoring (for a period with a high cooling demand) show that airflow rate always varies between 45% and 55% of design flow rate when supply air temperature is relatively high (16°C). Additionally, whenever the supply temperature was lower, a circumstance that is quite acceptable during the summer period, the airflow rate was even lower. Airflow rate must respect an inferior limit, however: one that is determined by thermal comfort and fan operation. Therefore, according to the control sequences, supply air temperature is adjusted whenever the airflow rate reaches 50% of design value.

There are several factors that contribute to HVAC system oversizing. Four of these are: (i) principles of design cooling and methods of calculating heating load; (ii) the system's load profile, resulting from an insufficient diversification of the thermal load of spaces served by the system; (iii) inaccurate data provided by the future owner on functional spaces and their uses; and (iv) a tendency to size systems using high safety coefficients (Djunaedy *et al.* 2011). We know that system oversizing increases investment costs; the results of monitoring show that this oversizing also has an impact on a system's energy consumption. In fact, a largely oversized VAV system becomes almost a constant flow-rate system (Figure 3.1), because its supply temperature is adjusted in order to respect the lower limit of fan operation.

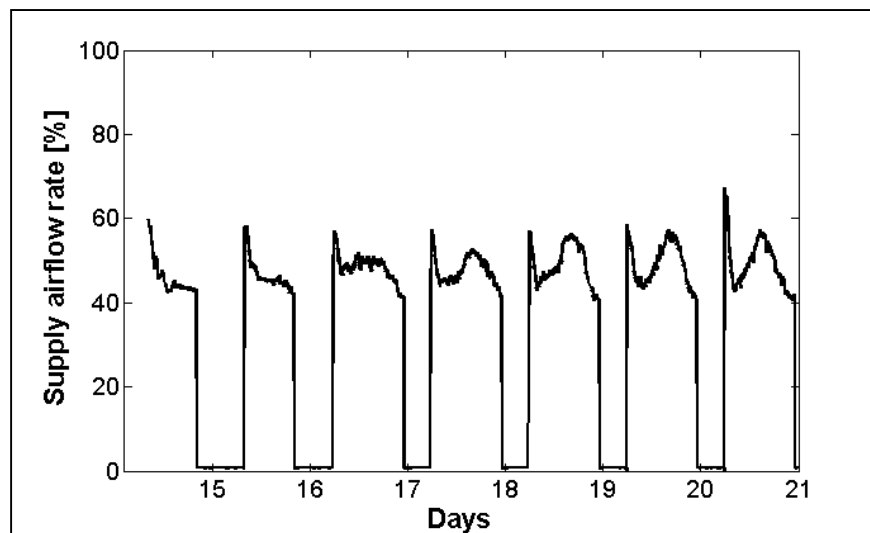


Figure 3.1. Variation of supply airflow rate for the system studied for one week in August 2001 (Kajl *et al.* 2003)

With regard to thermal comfort, the ventilation of spaces in winter is viewed as the weak point of VAV systems. In the case of an oversized system, this weakness also occurs in summer and leads to continuous partial-load operation.

3.2.2 A solution to the system oversizing

To avoid system oversizing, we propose that the possibility be examined that a better or best grouping of the zones served by the system be introduced during the preliminary design phase, a very decisive phase. According to Step 4 of the HVAC system design process proposed by ASHRAE (1993) as shown in Figure 3.2, engineers must consider several candidate systems before selecting an appropriate system or systems. Choosing the number of systems to serve a building and determining the way in which the zones served by these systems are to be grouped are complex challenges, particularly in commercial and institutional buildings. Generally, designers employ common sense, historical data and subjective experience when carrying out grouping of zones to be served by systems. According to Brambley *et al.* (1998), the primary costs for building design and construction represent only 1/5 of total life-cycle costs: the remaining 4/5 covers operation and maintenance.

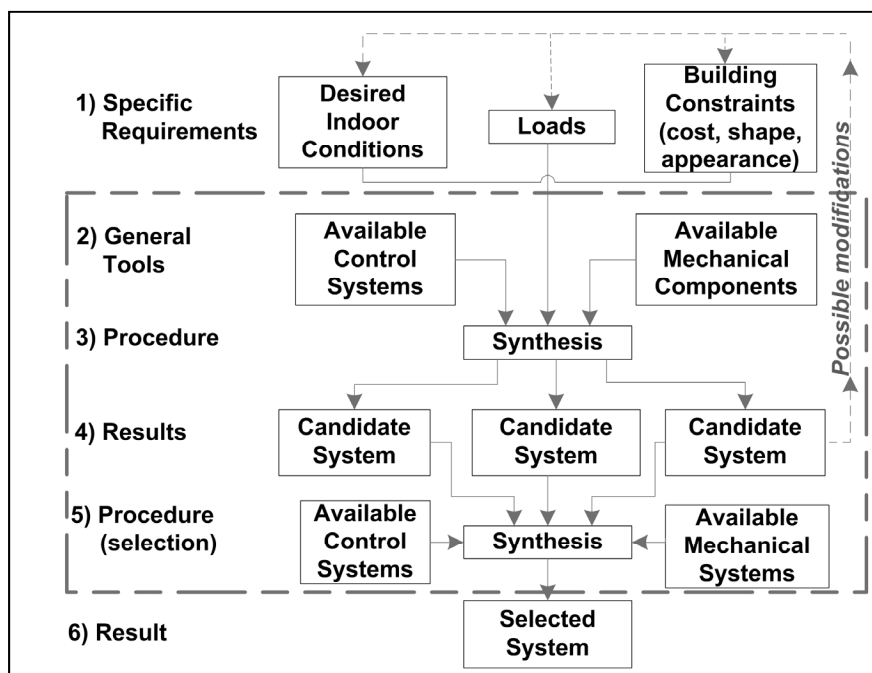


Figure 3.2. Schematic representation of design process (ASHRAE 1993)

The energy efficiency of HVAC systems must therefore be seen as an essential criterion for selecting these systems, as carried out during the iterative design process proposed by ASHRAE (1993) and shown in Figure 3.2. Grouping of zones as well as the type and number of systems serving the building are the elements designers take into account; these are the variables used during the iterative design process, as shown in Figure 3.3. Constraints mainly respect physical limitations, based on conditions of thermal comfort and a given building's architecture. The choice of candidate systems studied in Step 4 also has some disadvantages. To optimize this selection, all candidate systems (VAV type for our problem) should be taken into account, but this is nearly impossible without including an optimization method in the design process. Normally, the goal of the design process as presented by ASHRAE is to minimize investment cost (size and scope of systems) as well as operating cost (energy consumption); achieving this goal, however, requires a detailed model of the building as well as a simulation method.

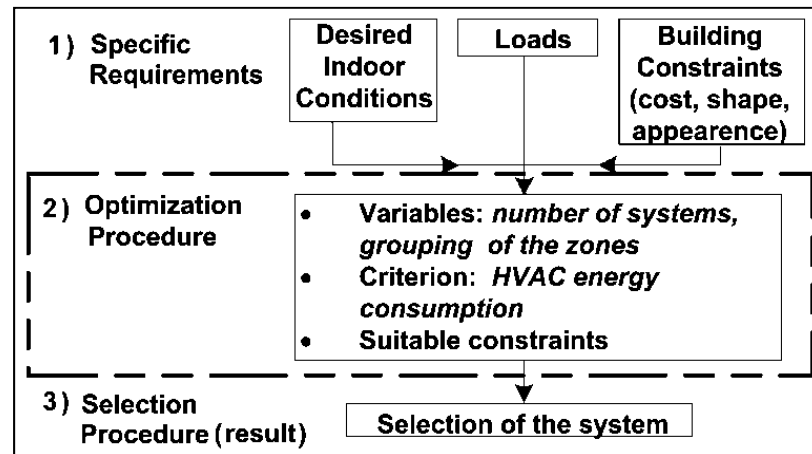


Figure 3.3. Schematic representation of design process, including CR_CONS optimization process method

To take one example: a detailed model of a building using DOE-2 software (commercial software developed by the United States Department of Energy, LBNL 1993a) should be required, but is rarely carried out due to its complexity and the need for an expert in simulation. According to a study published by Nichols (2001), tools for detailed energy

analysis are not yet widely used, and very few firms use simulation methods to select the appropriate systems when designing new buildings.

This said, a multitude of tools have been developed to facilitate the designer's task. These tools provide important insights for designers about the impact of different strategies for reducing energy consumption (Zhu, 2006). In a departure from ASHRAE's proposed design process, we therefore here propose an original design process that incorporates an optimization method, shown in Figure 3.3. This new design process is meant to replace Steps 2 through 5 of the ASHRAE procedure with an optimization procedure in which energy consumption (CR_CONS) is applied as objective function. Also, this new optimized grouping of the zones served by the system, using reduction in energy consumption as optimization criterion, takes into account the impact of system partial-load operation on the energy consumption. In this manner, the problem of system oversizing can be avoided and an appropriate size of equipments could be selected. The solutions generated by the optimization method (number and type of systems, grouping of zones) ensure that in this process, all available VAV candidate systems are taken into consideration.

3.3 Optimization method

In the context of the building services and HVAC systems, development of simulation-optimization methods was often used in the recent years. Optimization consists of a set of techniques that make it possible to find values for the variables that optimize a given answer function (i.e. year-round energy consumption, life-cycle cost, thermal comfort, plant scheduling, design parameters, etc). Optimization methods in current use can be divided into mono-criterion optimization methods or multi-criterion optimization methods. Our problem can be initially placed in the first category, that is to say, mono-criterion optimization, because we have only one objective function.

To solve these problems, researchers may use optimization algorithms (i.e. Simplex) which terminate in a finite number of steps, heuristics algorithms (i.e. Evolutionary Algorithms,

Particle Swarm Optimization, etc.) which may provide approximate solutions to some problems or iterative methods (i.e. Gradient) which converge to a solution. The Simplex method is most often used to resolve a linear system for maximization or minimization of the objective function. The Gradient method was used often when constraints are non-existent but implementations of this method can accommodate both bounds and constraint functions. From the previous studies (Wright et Farmani 2001; Wright *et al.* 2002; Fong *et al.* 2006; Asiedu *et al.* 2000), evolutionary algorithm (EA) has been proven to be an effective numerical optimization method, able to respond to a variety of HVAC optimization problems. By using the optimization simulation approach many particular problems can be solved in the context of sustainable energy management. Wright and Farmani (2001) optimized simultaneously the physical size of HVAC system, its operation, together with the choice of construction materials. The approach was also extended to examine the compromise between the system energy use and occupant thermal comfort (Wright *et al.* 2002). Fong *et al.* (2006) applied an optimization method coupled with the plant simulation model for the effective energy management of HVAC system. Asiedu *et al.* (2000) focused on the application of EA for the duct system design.

Substantial literature surrounding computer programs mention the GenOpt program, which addresses the problem of optimization of HVAC building systems, who can be coupled with any simulation program that reads and writes its input/output to text files. GenOpt is an optimization program that has been developed to find the independent variables that yield the best performance of complex systems involving many independent variables and where the cost function is computationally expensive and its derivatives are not available (Wetter 2009).

The application of model based optimization in the synthesis of novel HVAC system designs (including the choice of system components, the topological connections between the components, and the size and operation of the components) is presented in the output of ASHRAE RP-1049 (Wright *et al.* 2004).

The choice of optimization variables for our problem (combination of spatial and system thermodynamic variables) is complementary to previously published studies and evolutionary algorithms it seems to be the most appropriate method for our case.

3.3.1 Evolutionary algorithm optimization

The Evolutionary Algorithms (EA) are classified in three major categories according to the data representation, importance of recombination and mutation and the type of selection operator. The three categories are: evolution strategy (ES), evolutionary programming (EP) and genetic algorithm (GA). Generally for GA, the representation of the individuals is binary, recombination is essential, mutation has less importance and selection is stochastic. For EP, the representation is real-valued, mutation is essential, recombination is not included, and the selection is stochastic. For ES, the representation is also real-valued, mutation is important (sometimes the only operator), recombination is often included (not every formulation of ES has it either), but the selection is deterministic (Fong *et al.* 2006; McDonnell *et al.* 1995; Eiben et Smith 2003).

Regarding this classification, the evolutionary algorithm, used in the method we are proposing for optimizing HVAC system design, resembles most an evolution strategy.

Figure 3.4 shows an optimization method using EA, including an interaction with DOE-2 software when calculating HVAC system energy consumption.

Steps 1 and 3, which included the use of DOE-2 software (for modeling and simulation) as well as the interaction between DOE-2 and the EA, will be shown in Section 3.4.2. Step 2 occurred just once at the beginning of the optimization, and represented the initialization of the first population of individuals which would be required to evolve. For this reason, in this section we will discuss only the operation of EA in the optimization process.

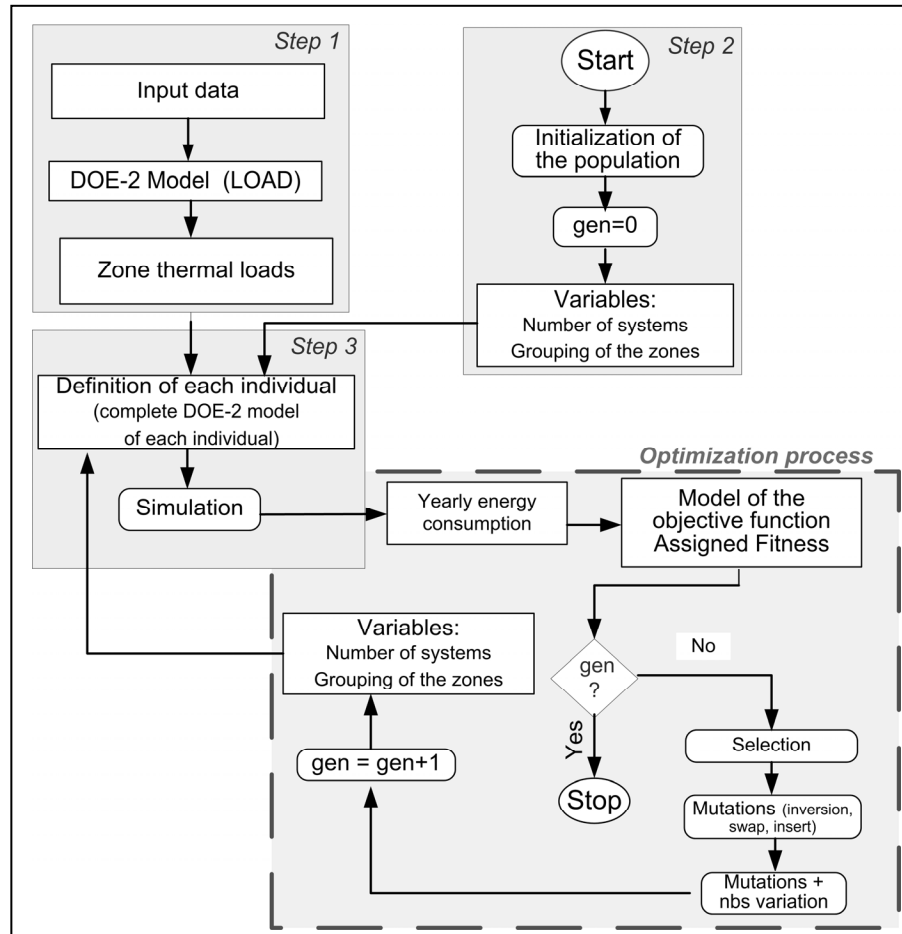


Figure 3.4. Schematic representation of EA optimization including calculation of energy consumption

In order to define our specific EA, we must describe a number of components, procedures or operators such as: representation of individuals, evaluation function, population, parent selection mechanism, variation operators and survivor selection mechanism.

The first stage of creating an evolutionary algorithm is to decide on a genetic representation of a candidate solution which is in our case a permutation representation of a set of integers. The length of our permutation vector represents the number of zones in the building, each of which occurs exactly once. The zones are placed randomly in the vector and to group zones into systems we use break points that are randomly selected, also. Increasing by one the number of break points leads us to find the number of systems. For example, the first system

is represented by the zones placed at the beginning of the vector until the first break point, therefore the order in which the elements occur is important.

The search for the optimum began with a random number of solutions that provided the first population that would need to evolve. At this step, we thus defined a population size that was neither too high (to reduce computing time) nor too low (to find the solution which best represented the optimum). During this step, the variables (number of systems, grouping of zones) were randomly set. Once a random population of solutions had been created, each individual was defined (full DOE-2 model) and evaluated using the model for calculating the objective function. Then a fitness value was assigned to each individual. If the final condition was not met, the population of solutions was modified by genetic operators for permutation representations, and variables were once again included in the DOE-2 model in order to define the following population to evolve.

To represent valid permutations, variation operators are needed to preserve the permutation property of each possible allele value occurs exactly once in the solution.

The tournament selection operator was chosen to select parents, because of its simplicity and because the selection pressure is easy to control by varying the tournament size. Tournament selection involves running several "tournaments" among a few individuals chosen at random from the population. Selection quality could easily be adjusted by changing tournament size (n): if the tournament size is larger, then there are more chances that it will contain members of above average fitness, and if the tournament size is less then it will contain members of low-fitness members. There were as many tournaments as there were individuals to select. The winner of each tournament (the one with the best fitness) is selected for modification. For our optimization problem, the tournament size was established to 8 individuals. To prevent losing the best solution found we use elitism, so we place the individual with the best fitness into the next generation, increasing in this way the performance of the EA. The probability that an individual will be selected as the results of a tournament depends on four factors, namely: (i) its rank in the population; (ii) the tournament size n ; (iii) the probability

that the best individual is selected in any tournament (usually this is 1, lower selection pressure); *iv*) whether individuals are chosen with or without replacement (Eiben and Smith 2003).

Subsequently, we applied the mutation operator in order to maintain diversity within the population and inhibit premature convergence. Three forms of mutation were chosen such as: swap mutation, insert mutation and inversion mutation. The swap mutation works by randomly picking two positions in the string and swapping their allele values. The insert mutation works by picking two alleles at random and moving one so that it is next to the other, shuffling along the others to make room. The inversion mutation works by randomly selecting two positions in the string and reversing the order in which the values appear between those positions (Eiben and Smith 2003). The probability of mutation can be applied at two levels, the chromosome level and the genes level (Wright *et al.* 2004). We applied a probability of chromosome mutation of 0.8 since the evolution strategy use mutation as the primary search mechanism. The probability of gene mutation varies according to the form of mutation operator use.

The three operators below work by making changes to the grouping of zones by systems and keeping the same number of systems. To maintain diversity in the population we also want to modify the number of systems so we randomly chose other break points. So this new operator works by creating offspring from parents using new randomly dividing points along the room vector, who translate in a different number and size of systems.

Also, for our evolution strategy, we do not apply crossover. The reason to select mutation as the only variation operator is based on tests realized in previous work, and, it represents to us a good compromise between the computing time (half-time reduction) and the objective function response. Therefore, the operators used for our EA was selection and mutation (inversion, swap, insert and change the number of systems-nbs). Subsequently, a new, improved population was created. The counter was increased to indicate that a new generation had been completed (Deb 2001).

3.3.2 Identification of the objective function, variables and constraints

The design optimization problem can be characterized using the problem's variables, the objective function and the constraints.

The objective functions used in HVAC system design are the criteria used by design engineers to compare candidates' design solutions; generally, these objective functions (i.e.: system operating cost, capital cost, life-cycle cost) are nonlinear (Fong *et al.* 2006; Wright and Hanby 1987; Hanby and Wright 1989). Our problem's objective function was energy consumption by HVAC systems, which was computed using DOE-2 software for each individual in the population generated by the evolutionary algorithm. The objective was to minimize the objective function. Thereafter, individuals with the lowest energy consumption from each tournament were selected and modified in order to create the next population.

The variables of the optimization problem for designing HVAC systems are: (i) grouping of zones served by systems and (ii) number of systems serving a building. Although system type had already been chosen for this study, it could also have served as a variable.

Although this problem appears straightforward, it is actually quite complex, because the two variables previously mentioned are dependent: if the number of systems changes, then the grouping of the zones changes as well. The danger exists of finding the same zone several times within the same grouping. Like mentioned before, to avoid this problem we used permutation representations for individuals.

In general, constraints represent the higher and lower limits of problem variables, either directly or indirectly. It follows that, in order to avoid the risk of having system airflow rates that were too low or too high, system size became our first constraint, and was represented by minimal and maximal airflow rates. Our second constraint was the size of the system's air ductwork, which took into account the location of zones served by the same system in order

to reduce costs associated with the air duct network. Solutions who do not respect constraints are not selected to evolve. Details will be discussed in Section 3.5.

3.4 Building modeling and calculation of energy consumption

To determine energy consumption which is the objective function, it is necessary to model a building as well as the HVAC systems serving it. In our case, although the building was served by VAV systems, its number became one of the problem variables.

3.4.1 The building studied

The building under consideration was an office building with four floors (GF, L1, L2 and L3) and with a total area of approximately 1,700 m². Its main characteristics were as follows: exterior walls with thermal resistance $RSI=4.5\text{m}^2\text{K/W}$; roof with thermal resistance $RSI=4.3\text{m}^2\text{K/W}$; opening windows coated with low-emissivity double glazing separated by a 6-mm air gap with thermal heat transfer coefficient $U=4.3\text{W/m}^2\text{K}$. To amplify the impact of solar gains and thus obtain a much greater variation in hourly zone load, we simulated a building with 60% average fenestration.

The building consisted of 31 thermal zones whose main vocations were: office, conference room/meeting room, recreation/rest, cafeteria, library and archives. Each floor had an open-space area mainly serving as an office. During optimization, we studied only areas served by central systems. This means that areas such as stairways, toilets and hallways (served by transferred air) were not taken into account. Figure 3.8 shows diagrams of three types of floors with each thermal zone identified by its own number, also presented in Appendix (Appendice A) for greater legibility.

The reference building had five VAV systems: one system met the load requirements for interior zones, and four other systems met the load requirements for perimeter zones (one

system per façade: north, east, west and south). This building was used as a comparison tool in our analysis of results (Stanescu *et al.* 2009).

3.4.2 Evaluation of the objective function

As previously mentioned, the objective function for our problem was represented by the energy consumption of HVAC systems, evaluated using DOE-2 software for the building described above. The optimization using a building energy simulation program is often used to reduce the annual heating and cooling energy consumption even if this requires a significant amount of experience, time, and effort to enter detailed building parameters (Bambrook *et al.* 2011; Smith *et al.* 2011).

Once we had defined the building in the simulation software, along with its architecture, envelope components, vocation, lighting and zone equipment, we proceeded to define its HVAC systems and plants. Because the vocation of thermal zones would remain unchanged during the optimization process, zone load was calculated once, in the beginning of the process (Figure 3.4, Step 1). The ‘typical year’ weather input used in our building energy simulation was the one for Montreal city (CTMY2 file). The EA began by initializing the first population of individuals needing to evolve. (Figure 3.4, Step 2). Modeling of the building had to be completed for each individual, and depended upon the variables selected by the EA (number of systems, and grouping of the zones). This action was carried out for each iteration (Figure 3.4, Step 3). Definition of HVAC systems depends upon choice of variables; these were chosen both at the beginning of the optimization process (Figure 3.4, Step 2) and during the EA optimization process (Figure 3.4, Step 3). These variables influenced some system parameters, such as design airflow rate, fan power, the system's operating schedule, and temperature difference across fans. HVAC systems were defined for each individual generated (Figure 3.4, Step 3), taking into account the zone loads already calculated in Step 1.

To calculate fan power, we used ASHRAE 90.1 standard correlations (ASHRAE 2004): for an airflow rate less than 20,000 cfm (9438.9 L/s), fan power was 1.7 hp/1000 cfm (1.26 kW per 471.9 L/s), and for an airflow rate greater than 20,000 cfm (9438.9 L/s), fan power was 1.5 hp/1000 cfm (1.11 kW per 471.9 L/s). Each system's operation schedule was viewed as the union of all operating schedules for the zones served by that system.

The temperature difference across fans was calculated based on fan efficiency (70% in our case) and on the efficiency of the fan motor. We adjusted the parameters for each individual and for the size of the building's plant equipment. Using DOE-2 software, we obtained HVAC system energy consumption for each individual in the EA population; this gave us a selection criterion for defining the next population.

3.5 Description of constraints

As previously mentioned constraints generally represent the upper and lower limits of any problem's variables, either directly or indirectly. In our case, the constraints mainly represented the systems' physical size as well as the size of their air ductwork

3.5.1 Size of systems

To avoid having systems that were too small, we chose, as first constraint, size of systems (C_{FR}), represented by the minimum airflow rate. We did this by calculating that a system's minimum design airflow rate ought to be 10% of total airflow rate, calculated using the corresponding peak load of the building. This constraint gave us an idea of the maximum number of systems in the building: in our case, ten systems. Moreover, for the building described in this paper, this value allowed us to group all internal zones into one separate system, yielding a greater choice when optimizing. In other words, in our case, a smaller value for this constraint required us to group the internal and external zones into a single system. Although a maximum flow rate could also be imposed, in our case this was imposed only in some cases, because the building's total airflow rate was deemed physically

acceptable (approximately 7550 L/s or 16,000 cfm). This limit may prove useful in the case of larger buildings, however, due to factors such as equipment investment cost, location, or noise associated with large installations. In Section 3.6.5 we will analyze the impact of this constraint on energy consumption.

3.5.2 Size of system air ductwork

Our second constraint (C_{SE}) was the size of system air ductwork, taking into account the location of zones served by the same system to reduce costs associated with the air ductwork. The methods described in the book *ASHRAE Handbook-Fundamentals* (ASHRAE 2009) for designing air ductwork in buildings with a given number of systems are as follows: (i) equal friction; (ii) static regain, and (iii) the T-method, which is the only one of these methods using optimization. The design of air ducts for VAV systems has already been the focus of an optimization method developed by Kim *et al.* (2002a; 2002b) using GA. In our case, this problem was quite complex, due to the large number of parameters involved, which changed for each EA-generated individual. For this reason, we developed a simplified and indirect method for taking into account the size of system air ductwork: we considered that the distance between the centre of gravity of all zones served by a single system and the mechanical room could serve as a good approximation for quantifying the size of system air ductwork.

We proceeded as follows: once evolutionary algorithms had proposed a grouping of zones, we created, for each floor and for each system, an image of the zones, and calculated the centre of gravity for each zone. This image included only the zones we had selected per system, per floor. Once the image was defined for each floor and a given system, we calculated the coordinates of the centre of gravity (x_{CG} , y_{CG}) by means of the following formulas:

$$x_{CG} = \frac{1}{area} \iint x dx dy \quad (3.1)$$

(3.2)

$$y_{CG} = \frac{1}{area} \iint y dx dy$$

From this point (x_{CG} , y_{CG}), we calculated the distance to the location of the air duct riser connecting the floor with the mechanical room, whose position we had pre-selected. To this value we added the distance in height between the given floor and the annex where the mechanical room was located.

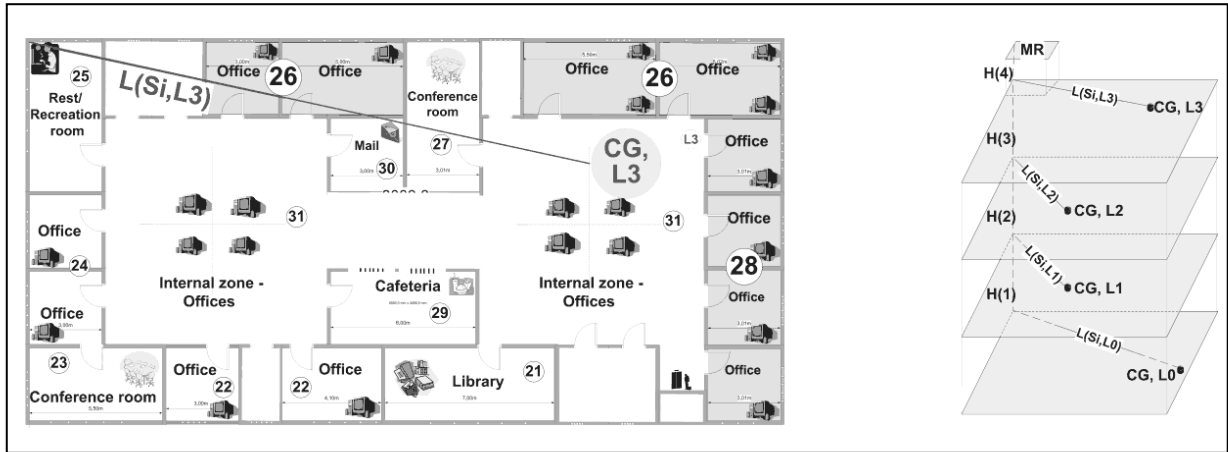


Figure 3.5. Schematic representation showing how to calculate the size of air ductwork for a system

Figure 3.5 shows a schematic representation on how to calculate the size of air ductwork for System S_i , where "i" represents the system number, serving the zones situated on all floors marked L_j (where "j" is the floor number). The centre of gravity for each floor and the distances to the riser connecting these floors to the mechanical room (MR) are also shown in Figure 3.5. In addition, for the third floor (L_3), we have created a plan view that includes the zones served by this system (Zones 26 and 28 in the Figure 3.5) as well as the location of the centre of gravity (CG in the Figure 3.5).

To determine the size of air ductwork for System S_i ($DIST_{S_i}$), we took into account the distances between the centre of gravity (CG) and the riser (*Sections* $L(S_i, L_j)$) and the heights

between the floors and the mechanical room (Sections H(1) through H(4)). The size of the air ductwork for this system ($DIST_{Si}$) was therefore the sum of the lengths of the sections mentioned above, which were weighted as follows:

- we calculated the design airflow rate for each zone (AFR_{zones}).
- we multiplied the initial length of each section ($L(S_i, L_j)$) by the ratio of the sum of the airflow rates of zones located on a given floor served by this system ($AFR_{zone(S_i, L_j)}$) by the design airflow rate for the building ($AFR_{building}$). We did the same for the heights.

For example, Figure 3.5 shows the CG , L_3 for System S_i , serving zones 26 and 28 on the northeast façade located on the third floor. The weighting of Segment $L(S_i, L_3)$, was then done as follows:

$$L(S_i, L_3)_{weighted} = L(S_i, L_3) \cdot \frac{AFR_{zone(S_i, L_3)}}{AFR_{building}} \quad (3.3)$$

- we then added all lengths and heights in order to calculate the weighted size of air ductwork for System S_i :

$$DIST_{Si} = \sum_{j=1}^{nb_floor} [L(S_i, L_j)_{weighted} + H(S_i, L_j)_{weighted}] \quad (3.4)$$

- the sum of all $DIST_{Si}$ therefore represents the weighted size of air ductwork for the building:

$$DIST_{building} = \sum_{i=1}^{nb_systems} DIST_{Si} \quad (3.5)$$

If the air velocity in the ducts remains constant, using the airflow rate to determine the weighted size of air ductwork for the system would be the same as when using duct sections for this purpose.

In order to find the appropriate image for each floor, a grid was required. The size of our grid was $0.5m \times 0.5m$, but this dimension could vary, depending upon the size of a building and taking into account its zoning. If the zoning of the building is very detailed, then a fine grid would be needed. This method is easy to accomplish, because zones are often rectangles.

Another method of calculating the CG could be applied in cases where buildings have more complex geometries.

Although the unit of the weighted size of air ductwork for the system is the meter $[m]$, it should be noted that, because of the weighting method applied to each segment using airflow rates, this is not a physical length. To distinguish this weighted size from a physical length, we have coined a term for the unit: $[m_{extent}]$.

The weighted size of air ductwork for the building ($DIST_{building}$) expressed in $[m_{extent}]$ was a constraint in the optimization we used to evaluate the air ductwork. This constraint was a partial representation of the investment costs of air ductwork for HVAC systems.

3.6 Optimization

The steps we used in developing the optimization method were as follows:

- Selection of population size and number of iterations needed to reach convergence. The size chosen had to represent a good compromise between the time required by convergence and the value of the objective function for optimization. (Sections 3.6.1 and 3.6.2).
- Optimization, making use of the same constraints as those applied in the reference building. This allowed us not only to compare the optimal solution with the reference solution, but also to evaluate the impact of optimization. (Sections 3.6.3).
- Analysis of the impact of constraint values on the optimal solution. For this we varied the constraint values within the interval determined by the bound of constraint values. (Sections 3.6.4 and 3.6.5).

3.6.1 Selection of population size

To find the adequate size for our own optimization problem, we studied five different population sizes for our EA, of between 40 and 144 individuals. Like mentioned before, we

want to select the smallest population size who converges to a good solution, in order to do a compromise between the time required by convergence and the value of the objective function for optimization.

Tableau 3.1. Characteristic of the cases studied

Case	Constraints		Iterations	EA population	Average calculation time /iteration
	C_{FR} , [L/s]	C_{SE} , [m _{extent}]			
Solution 1 (S1)	755	73	1000	40	2'44"
Solution 2 (S2)	755	73	1000	64	4'21"
Solution 3 (S3)	755	73	1000	88	6'01"
Solution 4 (S4)	755	73	1000	120	8'18"
Solution 5 (S5)	755	73	1000	144	9'45"

The Table 3.1 shows the main characteristics of the cases we studied. Constraint (C_{FR}) relates to the minimum airflow rate for each system, while constraint (C_{SE}) refers to the extent of the systems. For this first step, the bounds of the constraints are fixed as shown in Table 3.1. We chose these values to ensure that our five cases would converge onto the same solution with reasonable computing time.

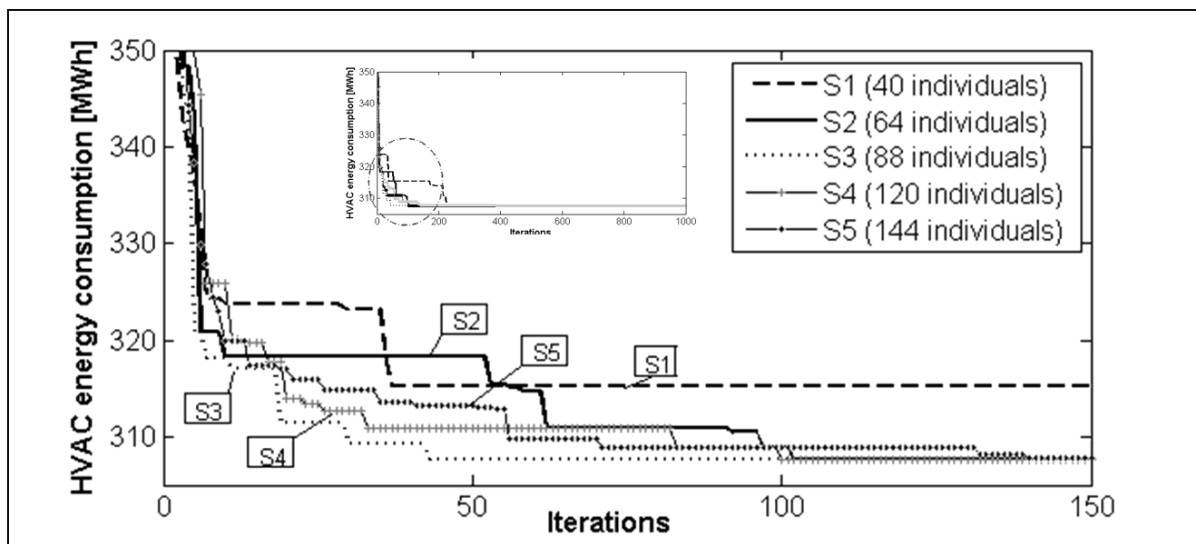


Figure 3.6. Evolution of optimization for Cases 1 through 5

First we analyzed the evolution of the EA for Solutions S1 through S5 as well as the speed of response of the optimization method (Figure 3.6). The final (optimal) result, after 1000 iterations, was the same for all five cases studied; speed of convergence was different, however.

Among the cases we studied, only in Solution S1, whose population size was 40 individuals, was the optimal result found later – after approximately 900 iterations. In other cases, convergence to the optimal result was faster, occurring in under 150 iterations.

With this in mind, in order to continue our optimization problem we selected 64 individuals as population size.

3.6.2 Selection of number of iterations

As mentioned previously, Figure 3.6 shows that the values for the objective function changed somewhat after 100 iterations. For example, for Solution S2 with a size of 64 individuals, Figure 3.7 shows the optimal results after 100 and 1000 generations with energy-consumption values for HVAC systems of 308.99 and 307.70 MWh, respectively. The computation time required for 100 iterations was approximately seven hours and 15 minutes; for 1000 iterations, it was approximately three days (*Computer specifications: AMD Phenom™ 9600B Quad-Core Processor, 2.29 GHz, 3.23 GB of Ram*). It would thus be useful in the future to conduct a sensitivity analysis to find the optimal number of iterations. It should be noted, however, that the improvement in energy consumption from 100 to 1000 generations was only 0.42%. Therefore, in terms of the number of iterations required in order to reach convergence, we concluded conservatively that a maximum of 500 iterations would suffice for our optimization problem.

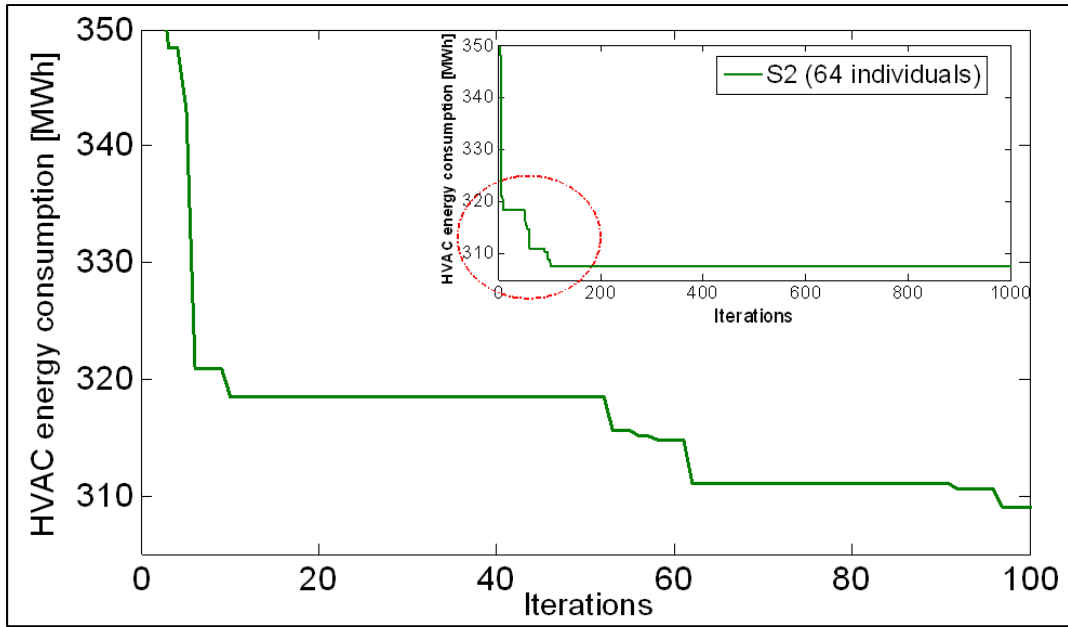


Figure 3.7. Evolution of optimization for Solution 2
after 100 and after 1000 iterations

3.6.3 Optimization using reference building constraints

In order to compare the energy consumption of the reference building with the energy consumption obtained via the optimization method, and in order to evaluate the impact of optimization, we applied the same constraints to the optimization process as those used for the reference building. Just a reminder, the minimum system airflow rate was 755 L/s (1600 cfm) and a value for the extent of the systems was set at 66.16 m_{extent} .

Optimization using evolutionary algorithm was applied for our building, which had 31 thermal zones and 2 to 10 HVAC systems. The optimal solution revealed that the preferred grouping used a diversifying zone orientation and promotes similar zone vocation (reducing operating systems schedule). For the reference solution, the buildings' zones were served by five systems and, for the optimal solution, there are four systems.

The results of the comparison are shown in the Table 3.2. Energy savings for the fans' annual energy consumption were approximately 15.6%, and the decrease in total airflow rate for the building was 837 L/s. The annual energy consumption of HVAC systems decreased by approximately 20.5%.

Tableau 3.2. Comparison of results

Solution name	Number of systems	Fan energy consumption, [MWh]	HVAC energy consumption, [MWh]	Total AFR, [L/s]	System extent, [m _{extent}]
Reference	5	129.59	394.10	8303	66.16
S6 (ref_opt)	4	109.31	313.14	7469	65.92
% savings	-	15.65	20.54		

In our study, the HVAC energy consumption includes fan energy consumption as well as heating or air-conditioning energy consumption for the building. Total energy consumption, not shown here, includes a portion that remained constant (lighting, domestic warm water, etc) of approximately 129 MWh, a value that was added onto HVAC energy consumption.

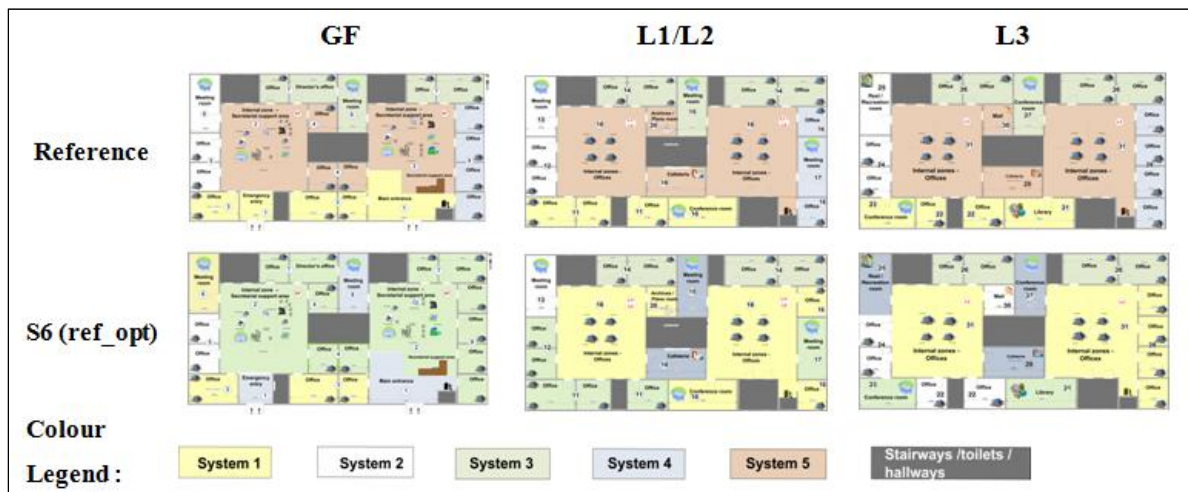


Figure 3.8. Graphic representation of solutions

Figure 3.8 shows the grouping of zones and HVAC systems as applied in the reference building as well as those obtained by the optimal solution (Solution S6). Figures showing this optimal solution (S6) are also shown in Appendix (Appendice A) for greater legibility.

First, we found that the grouping of zones was accomplished by taking occupancy schedules into account. Thus, zones with the longest occupancy schedule were grouped into a single system. We also discovered a vocational trend in the grouping of zones. However, there is load diversity due to the fact that zone grouping took into account the zones located in different building façades.

Tableau 3.3. System's operation

		System 1	System 2	System 3	System 4	System 5
Reference	Airflow rate, [L/s]	2481.5	1621.6	1744.8	762.2	1694
	Hours PFRR > 50%	128	102	229	213	433
	Hours PFRR = 50%	493	519	392	408	188
S6(ref_opt)	Airflow rate, [L/s]	3599	2164.8	947.7	755.2	-
	Hours PFRR > 50%	287	192	290	210	-
	Hours PFRR = 50%	178	273	175	380	

While respecting system extent (constraint C_{SE} as the one for the reference building), the grouping of zones was relatively flexible, since the building studied was not a very large one; this allowed us to group the zones together, even if they are located in opposite facades (not so far one from each other). However, this strongly depends on the C_{SE} constraint imposed, the building form as well as on the mechanical room position. Having an extent of systems that was at least equal to the reference case allowed us to maintain a similar investment cost for air ductwork.

This grouping also ensured better system operation, as shown in Table 3.3. The analysis presented in Table 3.3 is made for July, the month with the maximum cooling load and with the greatest fan airflow rates. Generally, the fan airflow rate (AFR) for a VAV system varies depending on load, with a lower limit set at 50%. When demand for airflow rate is less than 50%, air supply temperature adjusts up to 50%, thereby increasing fan energy consumption (adjusted AFR). Since the number of systems was not the same for the reference solution as it was for Optimal Solution S6, it was quite difficult to compare their operation. We found it

necessary to analyze the operation of each system by calculating the time when its fan was running at a rate of 50% (including adjusted AFR) and when it was running at rates above 50%. This percentage of fan AFR (a fraction of the design AFR) is shown in the table as PFRR (Part Flow Rate Ratio). We observed that for the reference solution, the number of hours during which the fan operated at $\text{PFRR} = 50\%$ (adjusted AFR included) was much greater than for the optimal solution. Likewise, the number of hours when the fan operated at $\text{PFRR} > 50\%$ was greater for the optimal solution: this partly reflected the decrease in energy consumption. System 5 (for the reference building) was different, because it was a system serving internal zones; this explains the high number of hours when $\text{PFRR} > 50\%$. It also partly accounts for a savings in HVAC system energy consumption of approximately 20%, when compared to the reference case. These energy savings depends on type of building, type of HVAC systems, and the control strategy chosen, however.

3.6.4 Influence of system extent

To evaluate the influence of this constraint on the optimization results, we analyzed several solutions using values for system extent between 62 and 73 m_{extent} . In order to determine whether or not the value of 73 m_{extent} adequately represented the upper bound, we also ran a test without using any upper bound for this constraint. Since the optimal result was the same, we concluded that a distance of 73 m_{extent} may well represent the upper limit for our building. As for the lower limit, we found that for a system extent below 65 m_{extent} (S12 to S14), convergence time increased (Figure 3.9), and even when the number of iterations was very high, convergence to a value for the objective function (HVAC Consumption) of approximately 310 MWh was hard to obtain. For example, the value for the objective function for Solution S14 at 62.5 m_{extent} following 1000 iterations was much higher than it was for the objective function (342.1 MWh). When we then analyzed another solution using an extent of 62 m_{extent} , we found that there was no valid solution, signifying that we had then reached the lower limit of this constraint for our building.

Tableau 3.4. Summary of results for the 8 cases studied

Solution name	Real system airflow, [L/s] ($C_{FR}=755$ L/s)		Maximum distance, [m _{extent}] (C_{SE})	Number of systems	System extent, [m _{extent}]	Fan consumption, [MWh]	HVAC Consumption, [MWh]	Total AFR, [L/s]
	Max.	Min.						
S7	6427	755	∅	2	72.66	105.50	307.70	7183
S2	6427	755	73	2	72.66	105.50	307.70	7183
S8	3237	758	71.5	3	70.43	105.94	308.97	7182
S9	3820	774	70	4	69.46	106.06	309.49	7219
S10	2732	774	68.5	4	68.48	106.03	310.30	7219
S11	2250	755	67	5	66.71	107.12	309.00	7296
S6(ref_opt)	3600	755	66.16	4	65.92	109.31	313.14	7466
S12	2506	758	65	5	64.90	112.98	324.89	7465
S13	2018	915	63	5	62.98	120.33	349.90	7717
S14	3696	1213	62.5	4	62.34	122.53	359.50	7794
S15	-	-	62	-	-	-	-	-

Table 3.4 shows the optimization results we obtained for Solutions S7 through S15. It should be noted that the minimum system airflow rate (AFR) constraint was identical (755 L/s) for all the solutions shown in this table. In addition to these solutions, and for purposes of comparison, we have shown solutions S2 and S6, which had been carried out beforehand because they respected the same constraints as did Solutions S7 through S15.

In a general way, number of systems and total building design airflow rates increased, except for Solution S14, where system extent decreased. This also implied an increase in fan energy as well as HVAC energy consumption.

In all the cases we studied, we observed that zones with the lengthiest occupation schedules were grouped under single systems. This way of grouping minimized the operating schedule in order to reduce equipment operation costs. We also observed that for lower system extent values, any given grouping included zones located on two adjacent floors rather than zones located on all floors of the building. Speed of convergence was also influenced by size of system extent. For lower system extent values, it was harder to achieve a result approaching the objective function (an optimal result).

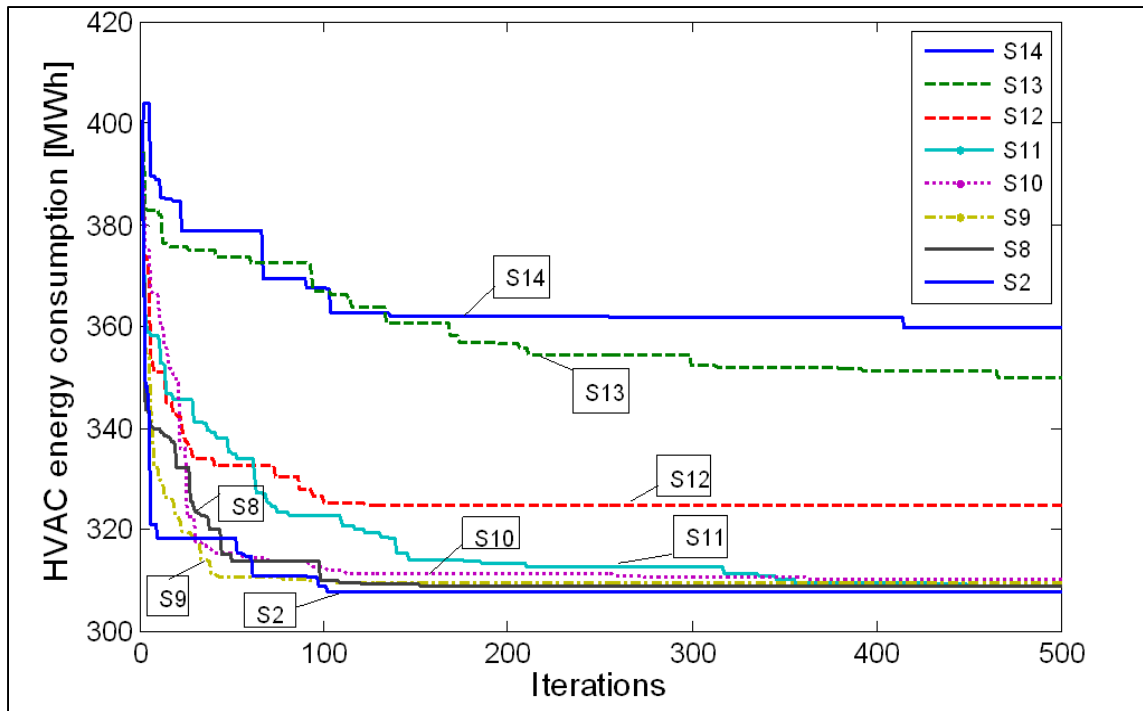


Figure 3.9. Evolution of optimization for Solutions S2 and S6 through S15 for system extent values between 62.5 and 73 m_{extent}

3.6.5 Influence of system airflow rate

Constraints on a given system's airflow rate (C_{FR}) are very important in the optimization process, because they indirectly represent the size of the system's equipment. With this in mind we then carried out several simulations using minimum and excluding maximum system airflow rate values (Solutions S11, S19 and S20), and using both minimum and maximum system airflow rates (Solutions S17 and S18).

A low value for the maximum airflow rate constraint reveals a designer's preference for several small systems, and makes it possible to avoid design solutions with overly large systems.

A low value for the minimal airflow constraint allows for better grouping of zones with particular needs, such as the zones in our case with lengthier occupation schedules.

Tableau 3.5. Summary results for the 6 cases studied

Solution name	Maximum distance, [m _{extent}]	Airflow/system, [L/s]		Number of systems	System extent, [m _{extent}]	Fan energy consumption, [MWh]	HVAC energy consumption, [MWh]	Total AFR, [L/s]
		Min.	Max.					
S16	67	-	-	4	66.91	106.06	308.99	7240
S17	67	755	1888	6	66.91	107.38	313.24	7315
S18	67	755	3776	4	66.85	109.17	323.51	7415
S11	67	755	-	5	66.71	107.12	309.00	7296
S19	67	472	-	4	66.97	106.97	312.58	7301
S20	67	236	-	5	66.98	106.79	310.99	7342

To carry out these tests (Table 3.5), we set the system extent constraint at 67 m_{extent} like the value obtained for Solution S11 (Table 3.4 and Figure 3.9). We chose this value because the system extent is almost the same as those for the reference building and the results for energy consumption obtained using this solution (S11) was nearly optimal.

We noted that Solution S16, without Constraint C_{FR}, yielded the lowest rate of HVAC energy consumption. In Solutions S17 and S18, when we imposed C_{FR} as lowest and highest limit, the evolutionary algorithm required some iteration before finding a viable solution and then beginning the optimization. As expected, we observed an increase in the number of systems when the maximum airflow constraint was relatively low (Solution S17, with a maximum airflow constraint of 1888 L/s).

3.7 Analysis of results

The steps taken in developing the optimization method are set out in Figure 3.10. The first solutions (from S1 through S5) were used to define optimization parameters such as population size (64 individuals) as well as number of iterations (500 iterations).

Afterwards, in order to obtain a comparison tool, we define a reference building containing five VAV systems: four systems for the external zones (one system per façade) and one system serving the building's internal zones. In order to compare a reference solution with an optimized solution, we calculated the constraints (C_{FR} and C_{SE}) for the reference case and

applied the same constraints during optimization. The reference building optimal solution (optimized solution using the same constraints as the reference building) was found to be Case S6, and the results of this optimization are shown in Table 3.2.

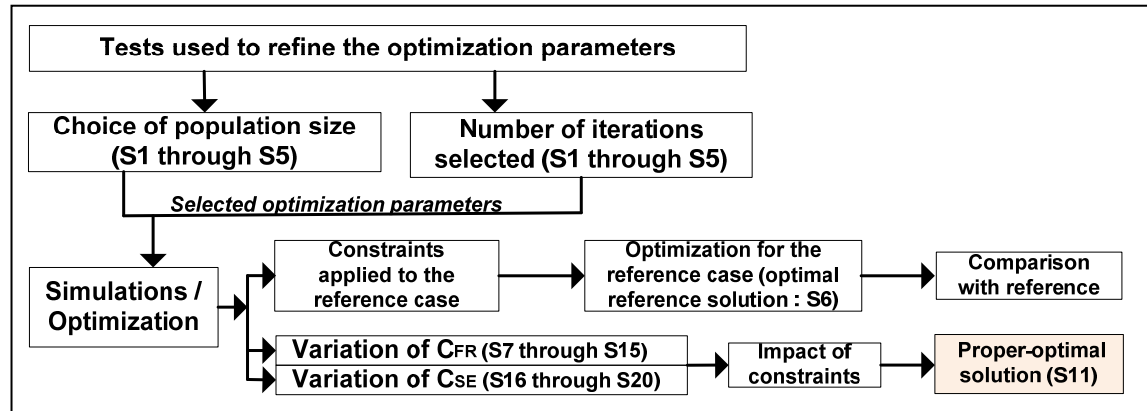


Figure 3.10. Steps in developing method CR_CONS

We then played the role of an engineer applying optimization methods, and chose random but physically valid constraints in order to find the optimal results. In this way we carried out several optimization processes (Solutions S7 through S20); at first sight the best results proved to be those in which constraint values were less restrictive.

Analyzing only the optimization results obtained using solutions with a constraint C_{FR} of 755 L/s, we found that the best solution was S7, the solution that did not make use of constraint C_{SE} and becomes a particularly solution because is probably physically inadequate. We also observed that Solutions S2 and S7 yielded identical optimization results, confirming that the constraint for system extent C_{SE} (73 m_{extent}) for Solution S2 was a very weak, nearly non-existent constraint and we consider this solution as the solution S7 mentioned above. We find also that the solution S6 which use the same constraints as the reference building is much better than the reference solution. If, we exclude the solutions S2, S7 and S6, we can conclude that:

- The increase of the system extent constraint involves generally a decrease in HVAC energy consumption.

- For the solution S8 to S11, the C_{SE} constraint varies between 71.5 to 67 m_{extent} , and that represents solutions with smaller HVAC energy consumption comparing to the optimal reference solution S6.
- To define the proper and physically acceptable system extent value we must first find the links between the system extent and the air ductwork investment cost. This problem will be addressed in future work and for this reason, the solution S11 seems to be the best because: (i) its system extent is quite the same as the one for the reference building (it means physically acceptable) and (ii) the HVAC energy consumption is much lower than the one of the optimal solution S6 that use the same constraints as the reference building.
- The zone operation schedules were taken into account during the optimization process. Concerning the solution S11, four (4) systems from five (5) served zones with occupation schedules of types A (15h/day) and C (14h/day), which implies 15 hours of daily system operation. Only one system served zones with occupation schedules of type B (18h/day) and of type C (14h/day), which implies 19 hours of daily system operation . It is in this case a small system which does not increase significantly the building's energy consumption. Generally, we observe that there are no systems that deserve zones with all type of occupation schedules (type A, B and C) which implies a maximum of 20 hours of system operation schedule.
- The optimization results obtained by the best solution (S11) showed that energy savings were about 21.6 % for HVAC energy consumption and the building's airflow rate was reduced by approximately 12.1% as compared to the reference building.

3.8 Conclusions

This article demonstrates that the proposed optimization method is entirely adapted for HVAC system design, and that this optimization method can be quite useful in the preliminary phase of HVAC system design. The optimal solution was based on an optimal number of HVAC systems and on a grouping of zones for each building. It allows engineers to make ideal HVAC system choices, because the solutions generated by this optimization

method ensure that all available candidate systems (VAV type in our case) are considered in this process, while respecting the imposed constraints.

The comparison between the reference building and an identical building that has an optimal grouping of building zones, as well as an optimal number of HVAC systems, yielded significant energy savings in HVAC energy consumption. In general, these energy savings depend upon building configuration, types of HVAC systems, and their control strategies. Diversity in building load profiles also has a significant impact on energy savings. By the fact that the optimization constraints (C_{SE} and C_{FR}) and the optimization criterion (minimizing the HVAC energy consumption) take indirectly into account the investment cost, the optimized solution permit a good system sizing. The PFRR analysis (Table 3.3) demonstrate that the number of hours during which the fan of the optimized solution operated with a PFRR >50% is much greater than for the reference solution. It means that the reference solution is much more oversized than the optimized solution.

This article sets out a simplified, indirect method for considering the extent of system air ductwork, which is the constraint used in the optimization method. This constraint partly represents the investment cost of air ductwork for an HVAC system. Using this simplified method to estimate the system extent we are able to calculate, for each individuals, the system extent and include it in the objective function. However, this problem, i.e. to find links between the system extent and the initial cost of air ductwork, will be addressed in future work.

Including the choice of system type as a variable in an optimization method is a more complex problem. It seems that once the grouping is suggested, the choice of system type must be carried out by designers, in order to make sure that all the constraints related to HVAC systems design are taken into account.

The proposed optimization method, having energy consumption as an objective function, requires a detailed simulation tool as well as a great deal of computing time. Moreover the

computing time, the interaction between the EA and DOE-2 software are very complex to do. The goal of our current research project is to replace HVAC energy consumption with a simplified calculation model for the new objective function. In this approach, we seek not only to avoid using DOE-2 software for modeling, but also to find a way of determining a new objective function that requires only data already in regular use by designers in the preliminary dimensioning process. In this way, savings in energy consumption will be maintained and computing time will be considerably reduced.

CHAPITRE 4

SIMPLIFIED OPTIMIZATION METHOD FOR PRELIMINARY DESIGN OF HVAC SYSTEM USING GLOBAL LOAD RATIO AS THE FITNESS FUNCTION

Magdalena Stanescu¹, Stanislaw Kajl¹, Louis Lamarche¹

¹Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure,

1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis à la revue «HVAC&R Research» en avril 2012.

4.1 Abstract

HVAC systems are recognized as the greatest energy consumers in commercial and institutional buildings. Generally, designers use common sense, historical data and subjective experience in designing these systems. The grouping of the zones served by the systems and the number of systems serving the building are the variables during the iterative optimization process.

This article outlines an optimization method for HVAC system design that makes use of the zones' daily profile loads – essential data in the preliminary design phase. A global load ratio (GLR), described as the relationship between the system's real load and its possible maximum load for a given period, is applied as objective function. The optimization variables are: (i) grouping of the zones served by the systems and (ii) number of systems serving the building. Constraints have been selected in order to ensure accurate representation of the variables' limits.

The results we obtained during this HVAC optimization design process could prove to be very useful for engineers during the preliminary design phase. The comparison between the reference building and the optimized building (under identical constraints) yielded significant energy savings for HVAC energy consumption.

Keywords: global load ratio; HVAC systems; grouping of zones; optimization; evolutionary algorithm; energy consumption; simulation; DOE-2; design

4.2 Introduction

Generally, HVAC (heating, ventilation and air conditioning) systems must ensure the comfort of the occupants in a building. The proper sizing of HVAC system design is very important, because these systems are recognized as the greatest energy consumers in commercial and institutional buildings (Canbay *et al.* 2004). As presented by Kajl *et al.* (2003), these systems are often largely oversized, and this affects their efficiency. In order to improve HVAC system energy efficiency, we must optimize their operation, but this optimization will not yield the anticipated results if their design is not optimized as well. One solution worth considering is creating a better grouping of building zones served by these systems, and using optimization instead of relying on the designer's common sense, or on current trends.

Taking the HVAC system design process proposed by ASHRAE (1993) as a starting point, we have previously proposed an optimization method for HVAC system design using an evolutionary algorithm. DOE-2 software (commercial software developed by the United States Department of Energy, LBNL 1993a; 1993b) was used to calculate the objective function, that is to say, HVAC energy consumption (the CR_CONS method), (Stanescu *et al.* 2011, 2012a). The use of a calculation engine such as DOE-2 requires the involvement of a simulation expert in order to construct the building's model as well as to solve any problems encountered during simulation. Although the role of the software is to help analyze energy utilization in the buildings, designers' judgment and experience remain the most important elements in the design process of any building.

As this problem is rather complex, we suggest that the CR_CONS method be modified by introducing a simplified model based on the zones' daily profile loads: essential data in the preliminary phase of design. In this proposed method, the objective function is calculated

using the model of the global load ratio (GLR), with zone load ratio (ZLR) and system load ratio (SLR) described as the relationships between space real load and possible maximum load for the zone or for the system, respectively. The factor thus defined can then be calculated for a single day or for a given period.

In our study, we calculated this load ratio for the day corresponding to the system's peak, taking into account the number of operating hours for the system. For example: for a given zone (Figure 4.1), this factor is the ratio between the surface as given by the load diagram ($\int_0^{24} q_{sens} dt$) and the surface of the rectangle as given by maximum load ($\int_0^{24} q_{sens,max} dt$).

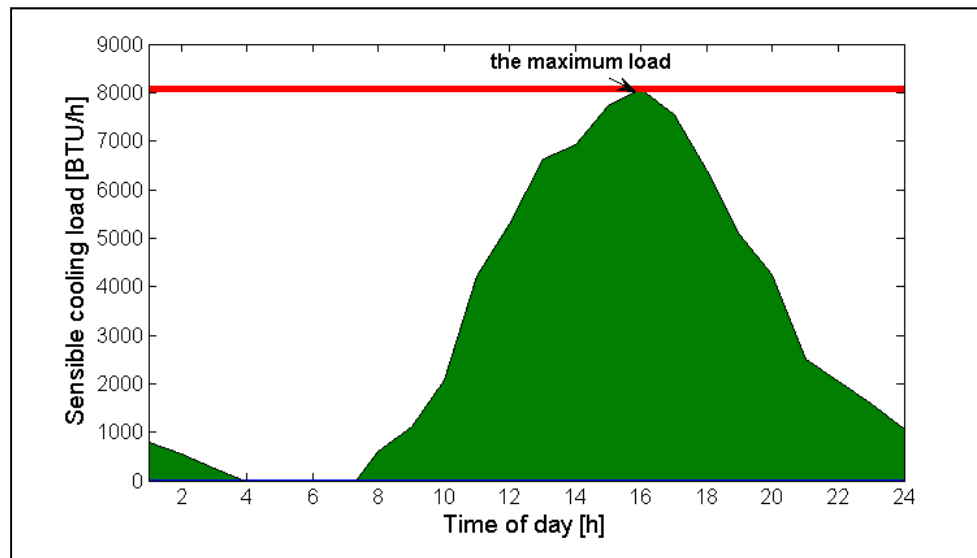


Figure 4.1. Load diagram for single zone during one summer day

Details concerning ZLR, SLR and GLR calculations for the entire building will be provided later, in Section 4.4.

This new optimization method is called “the CR_GLR method.” Its validation results show the links between GLR and HVAC energy consumption. So, this method has an impact on HVAC system optimization design.

4.3 General optimization principles

As presented by Stanescu *et al.* (2012a) in previous work, in order to avoid the problem of system oversizing in the preliminary design phase, we proposed that the possibility be explored of improving the grouping of the building zones served by the systems. The above-mentioned article describes the design process suggested by ASHRAE, as well as its modification, as required by the CR_CONS optimization procedure. Figure 4.2 sets out this procedure once again, in which minimizing the energy consumption is the optimization criterion.

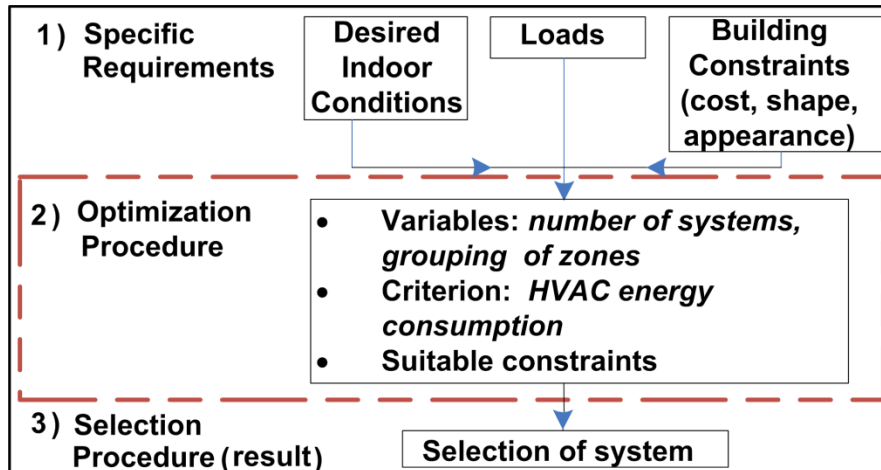


Figure 4.2. Schematic representation of design process, including an optimization process using the CR_CONS method, (Stanescu *et al.* 2012a)

We used a single objective evolutionary algorithm to optimize HVAC system design, because previous research had demonstrated that this is the most suitable method (Wright et Farmani 2001; Wright *et al.* 2002; Fong *et al.* 2006; Asiedu *et al.* 2000; Wetter 2009, Wright *et al.* 2004). To characterize the design optimization problem, we defined the problem variables (number of systems, grouping of zones), the objective function (energy consumption), as well as the constraints. These constraints related most specifically to the physical limitations imposed by thermal comfort conditions and by the building's architecture. We applied constraints such as system size or extent (to take air ductwork into

account) in order to ensure a physically achievable solution. The optimization criterion helped us always to select the best individuals, and helped us guide optimization towards an optimal solution.

The CR_CONS optimization method required a detailed model of the building. Inserting such a model into the optimization process (Stanescu *et al.* 2012a) was rather complex due to the use of simulation software. An optimization process using a building energy simulation program requires a significant amount of experience, time, and effort to enter detailed building parameters (Bambrook *et al.* 2011; Smith *et al.* 2011). In our case, computing time was considerable: it sometimes lasted for several days.

We thus replaced the HVAC energy consumption criterion with a new criterion, thereby simplifying the objective function calculation model. In this new approach, modeling using DOE-2 software was no longer necessary, and essential data in the preliminary design phase (i.e. design day space load) were required in order to determine the objective function.

This article will focus on the new, simplified optimization procedure, as described below. Validation of the links between the optimization criterion proposed (GLR) and HVAC energy consumption (the optimization criterion used in the CR_CONS method) will also be carried out, in order to show that energy consumption is regarded indirectly as the optimization objective in the new CR_GLR method.

4.4 Objective function

The objective function for our optimization problem was the global load ratio (GLR). In the following section, we will show that maximizing GLR indirectly leads to a reduction in energy consumption. In the new optimization procedure, HVAC energy consumption calculation using a detailed DOE-2 model of the building was no longer required. In order to compare the two methods, however, we also calculated energy consumption using DOE-2 software and, in Section 4.7.1.2, we will show the links between energy consumption and

GLR. We employed the same interaction method between the optimization procedure and the DOE-2 software as the one that had been used and detailed in previous work (Stanescu *et al.* 2012a). Once the links between HVAC energy consumption and GLR were shown, we no longer needed to calculate HVAC energy consumption.

GLR is the objective function we suggested for replacing HVAC energy consumption; GLR is shown along with the zones' daily profile loads. In order to size HVAC systems, designers must at the very least know the load profile for each thermal zone for the day corresponding to the design day. We know that grouping zones with high load profile diversities will yield more uniform load system profiles. To apply this principle, we introduced the notion of ZLR and SLR, defined as the relationship between real sensible load ($load_{sens_Pd}$) and maximum load for the zone and the system, respectively. Thus defined, these factors could be calculated for a single day or for a given period.

In our study, we calculated ZLR for the day corresponding to the system peak (Pd), taking into account the number of system operating hours ($hours_{oper_syst_Pd}$). For example, for a given zone, ZLR could be calculated as follows:

$$ZLR = \frac{\sum_{i=1h}^{24h} (loads_{sens_Pd}^i)_{zone_at_hours_i}}{Max(loads_{sens_Pd})_{zone} * hours_{oper_syst_Pd}} \quad (4.1)$$

For several zones in the same system, the SLR formula is similar:

$$SLR = \frac{\sum_{i=1h}^{24h} (loads_{sens_Pd}^i)_{syst_at_hours_i}}{Max(loads_{sens_Pd})_{syst} * hours_{oper_syst_Pd}} \quad (4.2)$$

In a building using several systems, these SLR factors were then weighted by daily system loads relating to daily building loads, in order to determine a global load ratio (GLR) for the building:

$$GLR = \sum_{syst=1}^n \left(SLR \cdot \frac{\sum_{1h}^{24h} (loads_{sens_Pd})_{syst}}{\sum_{1h}^{24h} (loads_{sens_Pd})_{build}} \right) \quad (4.3)$$

The GLR thus defined depended only on hourly loads. The decision to choose a GLR factor was therefore justified by the following facts:

- zone loads (due to lighting, equipment, solar radiation and occupants) depended neither on the grouping of zones nor on the number of selected systems;
- these loads had to be removed from the building: seasonal energy consumption would be the result (seasonal energy consumption also depended on the cooling system's effectiveness and on the type of system selected).

A validation of the links between GLR and energy consumption will be shown in Section 4.7.1.2, in order to demonstrate that maximizing the GLR factor leads to minimizing energy consumption; this validation will also confirm that the GLR factor could serve as the objective function in our optimization process.

In this optimization, calculating energy consumption was not required. We knew that the more uniform load profile resulting from this optimization would lead to improved operation of the chiller, due to smaller partial-load variation. The reduction in seasonal energy consumption (June through September) was primarily due to fan energy consumption. Indeed, the SLR factor (*Equation 4.2*) can also be described according to both the design airflow rate (AFR_{design_syst}) and the instantaneous airflow rate (AFR_{inst_syst}) of a VAV system (*Equations 4.4 through 4.7*). If variation in zone (T_{zone}) and supply temperature (T_{supply}) during the summer are held to be negligible, the SLR factor becomes the function of the airflow rate.

$$AFR_{design_syst} = \frac{Max(load_{sens_Pd})_{syst}}{\rho \cdot c_p \cdot (T_{zone} - T_{supply})} \quad (4.4)$$

$$SLR = \frac{\sum_{1h}^{24h} (loads_{sens_Pd})_{syst}}{AFR_{design_syst} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{zone} - T_{supply}) \cdot hours_{fonct_syst_Pd}} \quad (4.5)$$

$$SLR = \frac{\sum_{1h}^{24h} (AFR_{inst_syst} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{zone} - T_{supply}))}{AFR_{design_syst} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{zone} - T_{supply}) \cdot hours_{fonct_syst_Pd}} \quad (4.6)$$

$$SLR = \frac{\sum_{1h}^{24h} (AFR_{inst_syst})}{AFR_{design_syst} \cdot hours_{fonct_syst_Pd}} \quad (4.7)$$

The links between energy consumption and GLR, as well as validation of the GLR model, will be explained in Section 4.7.1.2.

4.5 Optimization method

Optimization seeks to analyze and solve problems analytically or numerically by finding the values of the variables that optimize a given response function. Because we had only one objective function, we could label it a "mono-criterion" optimization. Previous studies (Wright et Farmani 2001; Wright *et al.* 2002; Fong *et al.* 2006; Asiedu *et al.* 2000; Wetter 2009, Wright *et al.* 2004) have demonstrated that the most suitable method for our case would be an optimization method employing evolutionary algorithms.

4.5.1 Evolutionary algorithm operation

Evolutionary algorithms (EAs) using single objectives were therefore used in the method we are proposing for optimizing HVAC system design. The operating principle of our evolutionary algorithm is represented in Figure 4.3.

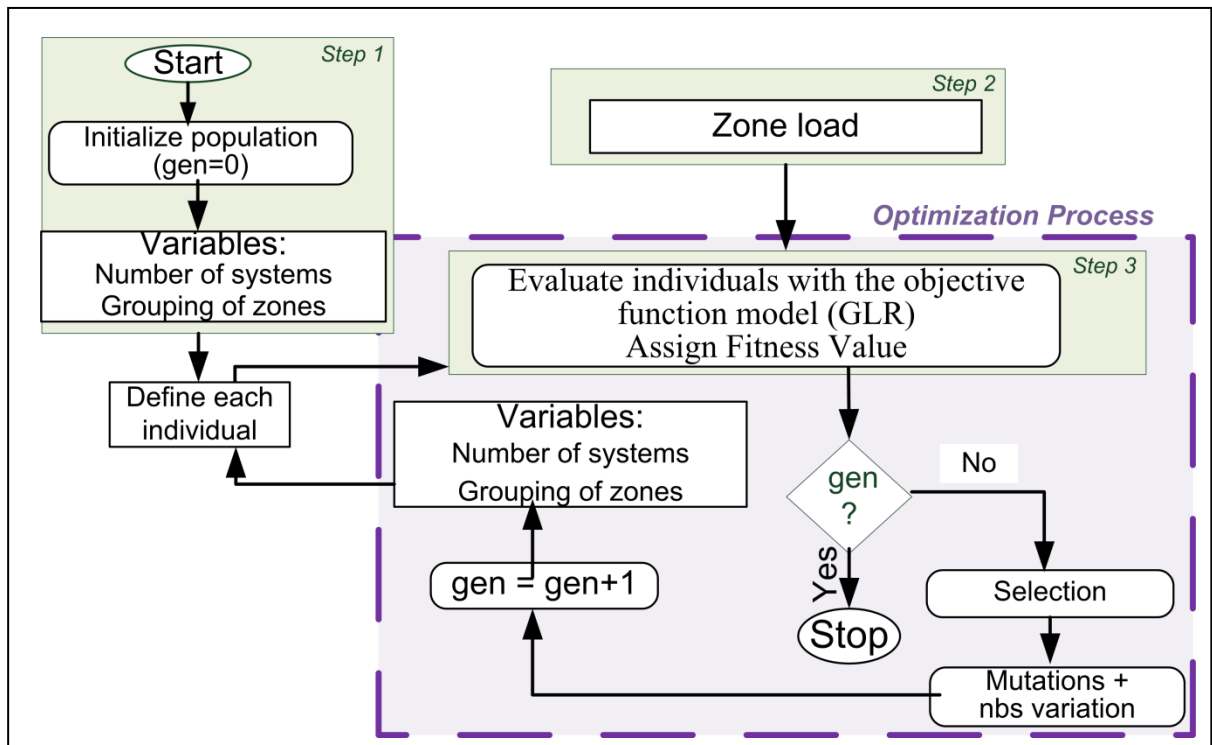


Figure 4.3. Schematic representation of EA operation, including initialization of the first population and input from the database containing zones thermal load

Step 1 occurred just once at the beginning of optimization, and represented the initialization of the first population of individuals needing to evolve. Step 2 consisted in determining the hourly thermal loads for zones. As the thermal zone loads remained unchanged during the optimization process, this step also took place just once, at the start of optimization. Consequently, this paragraph has described only EA operation during the optimization process shown in Figure 4.3.

In order to define our specific EA, we must describe a number of components, procedures or operators such as: representation of individuals, evaluation function, population, parent selection mechanism, variation operators and survivor selection mechanism.

The first stage of creating an evolutionary algorithm is to decide on a genetic representation of a candidate solution which is in our case a permutation representation of a set of integers. The length of our permutation vector represents the number of zones in the building, each of

which occurs exactly once. The zones are placed randomly in the vector and to group zones into systems we use break points that are randomly selected, also. Increasing by one the number of break points leads us to find the number of systems. For example, the first system is represented by the zones placed at the beginning of the vector until the first break point, therefore the order in which the elements occur is important.

The search for the optimum began with a random number of solutions that provided the first population that would need to evolve. At this step, we thus defined a population size that was neither too high (to reduce computing time) nor too low (to find the solution which best represented the optimum). During this step, the variables (number of systems, grouping of zones) were randomly set. Once a random population of solutions had been created, each individual was defined and evaluated using the model for calculating the objective function (Step 3). A fitness value was then assigned for each individual. If the final condition was not met, the population of solutions was modified by genetic operators for permutation representations.

To represent valid permutations, variation operators are needed to preserve the permutation property of each possible allele value occurs exactly once in the solution.

The tournament selection operator was chosen to select parents, because of its simplicity and because the selection pressure is easy to control by varying the tournament size. Tournament selection involves running several "tournaments" among a few individuals chosen at random from the population. Selection quality could easily be adjusted by changing tournament size (n): if the tournament size is large, then there are more chances that it will contain members of above average fitness, and if the tournament size is small then it will contain low-fitness members. There were as many tournaments as there were individuals to select. The winner of each tournament (the one with the best fitness) is selected for modification. For our optimization problem, the tournament size was established to 8 individuals. To prevent losing the best solution found we use elitism, so we place the individual with the best fitness into the next generation, increasing in this way the performance of the EA. The probability

that an individual will be selected as the results of a tournament depends on four factors, namely: *(i)* its rank in the population; *(ii)* the tournament size n ; *(iii)* the probability that the best individual is selected in any tournament (usually this is 1, lower selection pressure); *iv)* whether individuals are chosen with or without replacement (Eiben and Smith 2003).

Subsequently, we applied the mutation operator in order to maintain diversity within the population and inhibit premature convergence. Three forms of mutation were chosen such as: swap mutation, insert mutation and inversion mutation. The swap mutation works by randomly picking two positions in the string and swapping their allele values. The insert mutation works by picking two alleles at random and moving one so that it is next to the other, shuffling along the others to make room. The inversion mutation works by randomly selecting two positions in the string and reversing the order in which the values appear between those positions (Eiben and Smith 2003). The probability of mutation can be applied at two levels, the chromosome level and the genes level (Wright *et al.* 2004). We applied a probability of chromosome mutation of 0.8 since the evolution strategy use mutation as the primary search mechanism. The probability of gene mutation varies according to the form of mutation operator use.

The three operators below work by making changes to the grouping of zones by systems and keeping the same number of systems. To maintain diversity in the population we also want to modify the number of systems so we randomly chose other break points. So this new operator works by creating offspring from parents using new randomly dividing points along the room vector, who translate in a different number and size of systems.

Also, for our evolution strategy, we do not apply crossover. The reason to select mutation as the only variation operator is based on tests realized in previous work, and, it represents to us a good compromise between the computing time (half-time reduction) and the objective function response. Therefore, the operators used for our EA was selection and mutation (inversion, swap, insert and change the number of systems-nbs). Subsequently, a new,

improved population was created. The counter was increased to indicate that a new generation had been completed (Deb 2001).

4.5.2 Optimization procedure using the new GLR optimization function

The optimization procedure utilizing the new objective function (the CR_GLR method) is shown in Figure 4.4. As described earlier, the design optimization problem can be characterized using the problem's variables, the objective function (GLR) and suitable constraints.

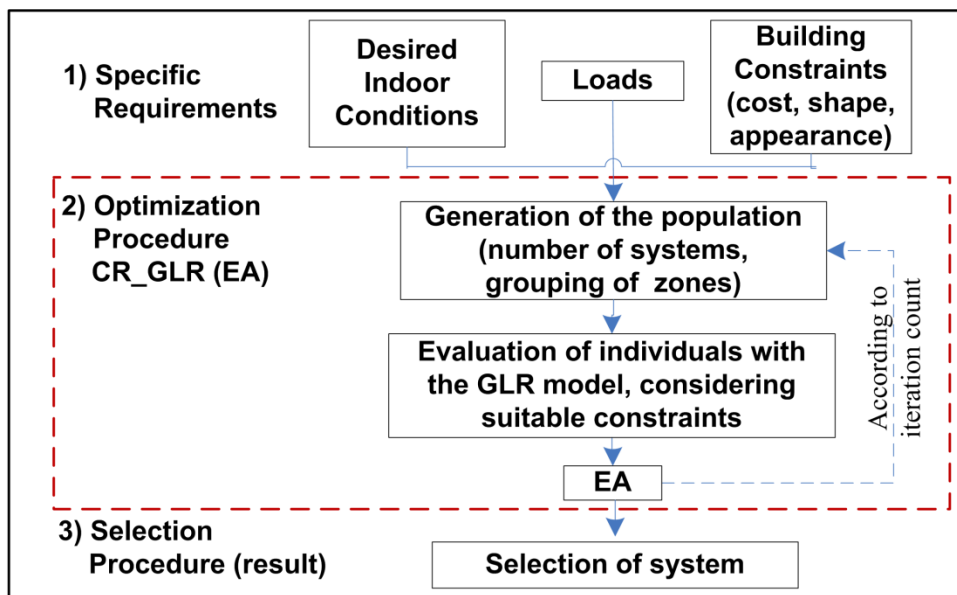


Figure 4.4. Schematic representation of design process, including the CR_GLR optimization process method

The objective functions used in HVAC system design are the criteria used by design engineers to compare candidates' design solutions; generally, these objective functions (i.e.: system operating cost, capital cost, life-cycle cost) are nonlinear (Fong *et al.* 2006; Wright and Hanby 1987; Hanby and Wright 1989). The objective function of our problem was the GLR, which we calculated for each individual in the EA population. The objective was to

maximize the objective function; individuals with the highest GLR value were then selected to define the following population.

The variables of our HVAC design optimization problem are: (i) grouping of zones served by systems and (ii) number of systems serving a building. Although system type had already been chosen for this study, it could also have served as a variable.

Although this problem appears straightforward, it was actually quite complex, because the two variables previously mentioned were dependent: if the number of systems changed, then the grouping of zones changed as well. The danger existed that we would find the same zone several times within the same grouping. To avoid this problem we used permutation representations for individuals.

In general, constraints represent the upper and lower limits of problem variables, either directly or indirectly. It follows that, in order to avoid the risk of having system airflow rates that were too low or too high, system size became our first constraint (C_{FR}), and was represented by minimal and maximal airflow rates. In order to do this, we considered that the minimum design airflow rate for the systems had to be at least 10% of the building's total airflow. Our second constraint was the size of the system's air ductwork (C_{SE}), which took into account the location of zones served by the same system, in order to reduce costs associated with the air ductwork. Details will be discussed in Section 4.7.2.3.

4.6 The building studied

The building under consideration was an office building with four floors (GF, L1, L2 and L3) and with a total area of approximately 1,700 m². Its main characteristics were as follows: exterior walls with RSI 4.5; roof with RSI 4.3; opening windows coated with low-emissivity double glazing separated by a 6-mm air gap with coefficient $U = 4.3\text{W/m}^2\text{ K}$. To amplify the impact of solar gains and thus obtain a much greater variation in hourly zone load, we simulated a building with 60% average fenestration. The weather input location file for our building energy simulation was chose the one for Montreal city (CTMY2 file).

The building consisted of 31 thermal zones whose main vocations were: office, conference room/meeting room, recreation/rest, cafeteria, library and archives. Each floor had an open-space area mainly serving as an office. During optimization, we studied only areas served by central systems. This means that areas such as stairways, toilets and hallways (served by transferred air) were not taken into account. Figure 4.11 shows diagrams of three types of floors with each thermal zone identified by its own number, also presented in Appendix (Appendice B) for greater legibility.

The reference building had five VAV systems: one system met the load requirements for interior zones, and four other systems met the load requirements for perimeter zones (one system per façade: north, east, west and south).

4.7 Developing and applying the CR_GLR Method

Development of the CR_GLR optimization method included the following steps:

- choosing the population size and the number of iterations needed to reach convergence; Population size was large, in order to ensure good diversity among individuals. To define these two aspects, we used the results presented by Stanescu *et al.* 2012a (Section 4.7.1.1);
- analyzing the links between energy consumption and GLR to justify the choice of GLR as objective function (Section 4.7.1.2);
- comparing the optimization results obtained previously via the CR_CONS method with the optimization results obtained via the CR_GLR method (Section 4.7.1.3). In order to perform this comparison we utilized the same constraints (C_{FR} and C_{SE}) as those used for the reference building described in Section 4.6.

In previous work (Stanescu *et al.* 2012a), when describing the CR_CONS optimization method, we mentioned that the time needed for optimization was approximately three days per 1000 iterations. Optimization time using the CR_GLR method proved to be much shorter, because there was no longer any need to calculate energy consumption using DOE-2

software. Consequently, in this article, we have been able to introduce several optimizations that aim to analyze the influence of certain parameters on energy consumption. Although, for verification, we did employ DOE-2 software in calculating energy consumption for the final analyses: we did so only for each iteration's best solution and not for each individual generated by the evolutionary algorithms, as we had done when employing the CR_CONS method. In Section 4.7.2 we will describe the following types of analysis:

- a comparison of optimization results when using VAV systems versus CAV systems (Section 4.7.2.1);
- the impact of using different types of fan control modes (speed, discharge, inlet) on reducing HVAC energy consumption using optimization (Section 4.7.2.2);
- variations in constraint limits (system size, system extent, separation in internal zone/external zone) in order to analyze their impact on the optimal solution (Section 4.7.2.3);
- the influence of the mechanical room's location (Section 4.7.2.4).

4.7.1 Developing the CR_GLR method

4.7.1.1 Selection of population size and number of iterations

Population size strongly influences the speed of convergence during optimization, hence, the interest in finding a suitable population size for our optimization problem. In a previous study (Stanescu *et al.* 2012a) we explored five different sizes of evolutionary algorithm population (with population sizes ranging between 40 and 144 individuals): we concluded that a population of 64 individuals would be sufficient for this optimization problem.

Figure 4.5 shows a typical evolution of the GLR factor (y axis: $1/\text{GLR}$ on the figure) during the optimization we performed using the same constraints as those used for the reference building (Section 4.6). In addition, by analyzing the results obtained, we were able to conclude conservatively that a maximum of 500 iterations would suffice for our optimization problem.

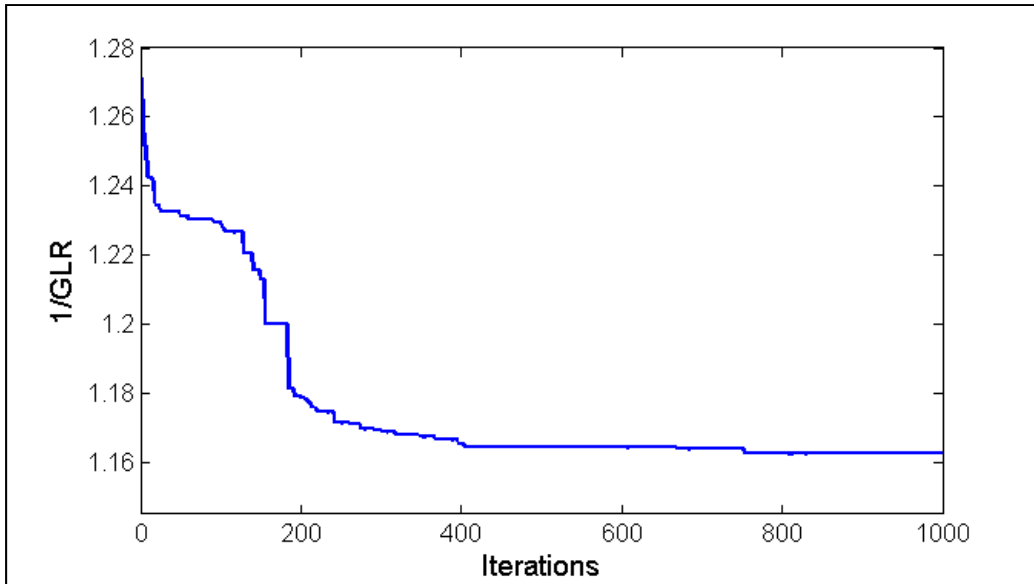


Figure 4.5. Convergence towards the optimal solution

4.7.1.2 Links between GLR and energy consumption

Optimization using the CR_GLR method did not require a detailed simulation of the building. However, in order to validate the CR_GLR method, we used the detailed simulation method in order to succeed in analyzing the simultaneous evolutions of both the GLR factor and energy consumption during the optimization process. This analysis would reveal the links between the GLR factor and energy consumption.

In Section 4.4, we mentioned that the reduction in energy consumption was essentially due to fan energy consumption. We also stated that the more uniform load profile resulting from optimization led to improved operation of the chiller machine, thanks to smaller partial-load variation.

Since the number of occupants in the building remained constant during the optimization process, the minimum airflow of fresh air remained constant as well. The percentage of fresh airflow rate could vary somewhat, however, depending on the design system's airflow rate

for individuals. This type of variation could also have an effect on energy consumption outside the free cooling period.

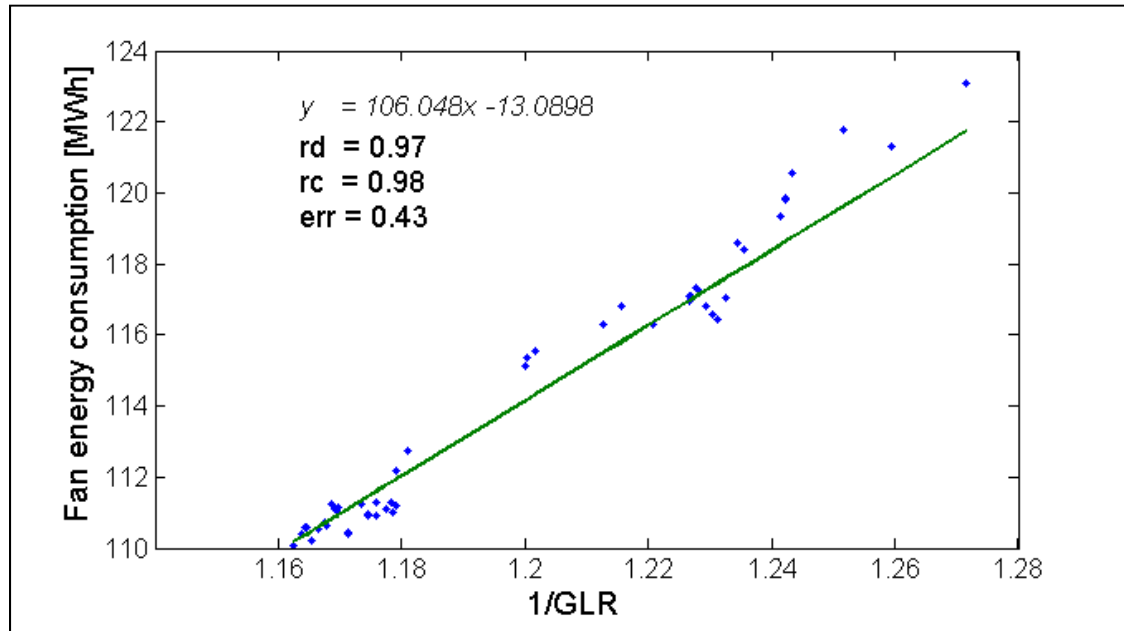


Figure 4.6. Variation in GLR according to fan energy consumption

For this reason, in addition to showing the links between the GLR factor and fan energy consumption (Figure 4.6), we also showed the links between the GLR factor and HVAC energy consumption (Figure 4.7). Figures 4.6 and 4.7 show the evolution in the above-mentioned types of consumption, obtained simultaneously along with the evolving GLR factor during optimization.

We calculated the correlation coefficient (rc) between the two variables (on the X axes: GLR and on the Y axes: energy consumption) as shown in Figures 4.6 and 4.7. The tendency curve shows the link between the two variables. An indication of the regression's quality is given by the error value (err). The lower this value is, the better the regression. What is usually employed is the coefficient of determination (rd on the Figures 4.6 and 4.7 or R^2 in current use), whose value tends toward 1; in our case it revealed a good correlation. Although the

correlation between GLR and energy nconsumption was imperfect, we can confirm that maximizing GLR led to minimizing HVAC energy consumption.

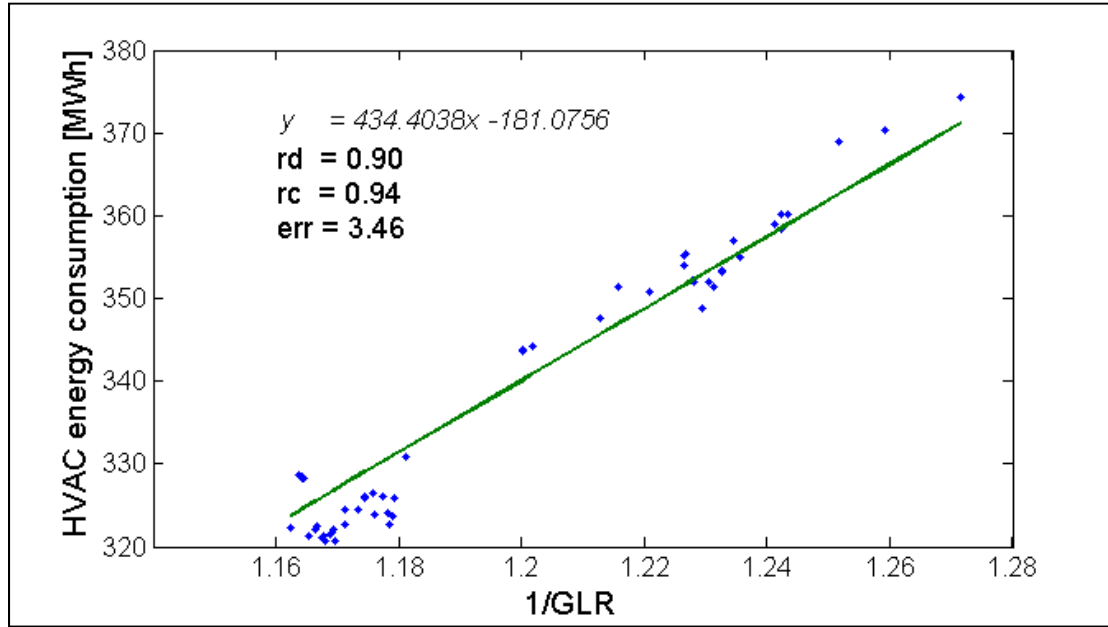


Figure 4.7. Variation in GLR according to HVAC energy consumption

Firstly, we will endeavor to compare the optimization results we obtained using the CR_GLR method (with GLR as objective function) with those obtained using the CR_CONS method (energy consumption of HVAC systems obtained via DOE-2). This comparison not only allows us to confirm that the objective function was appropriate, but also to conclude that the number of iterations chosen (500) was indeed sufficient for reaching convergence.

As previously mentioned, a comparison was done, using a reference building having five VAV systems: one system per façade and one system serving the internal area. For comparison, we employed the same constraints as those used for the reference building: a minimum airflow rate value (C_{FR}) of 1600 CFM per system, and a system extent (C_{SE}) of 66.16 m_{extent} . The term " m_{extent} " was introduced by Stanescu *et al.* (2012a) to avoid confusing "system extent" with a physical distance, expressed in meters [m]. Doing this

allowed us to compare the reference solution against the optimal solution, while maintaining similar costs for system air ductwork and system size.

The results obtained using the evolutionary algorithm (CR_CONS and CR_GLR methods) in the building studied show that zones are best grouped according to vocation (reduced hours in system operating schedules), while diversifying zone orientation. The reference solution and optimal solutions consist of five or four systems.

Tableau 4.1. Comparison of results

Solution name	Number of systems	Fan energy consumption, MWh	HVAC energy consumption, MWh	Total AFR, L/s	System extent, m_{extent}	GLR
Reference	5	129.59	394.10	8304	66.16	0.732
CR_CONS	4	109.31	313.14	7466	65.92	0.825
CR_GLR	5	110.05	322.28	7530	66.13	0.860
% CR_CONS savings		15.65	20.54			
% CR_GLR savings		15.08	18.22			

The results of the comparison are shown in Table 4.1. HVAC energy consumption included fan consumption as well as the consumption necessary for air treatment. Total energy consumption, not shown here, included a portion that remained constant (lighting, domestic hot water, etc) of approximately 129 MWh, a value added onto HVAC energy consumption. Energy savings relating to fan consumption obtained using both methods (CR_CONS and CR_GLR) were approximately 15%. The total airflow rate in the building was reduced by about 10%. As for HVAC energy consumption, the savings obtained by the CR_GLR method were 2.32% less than those obtained using the CR_CONS method (18.22% versus 20.54%).

4.7.2 Applications of the CR_GLR method

4.7.2.1 Comparison of optimization results when using VAV versus CAV systems

The inclusion of system choice in optimization is quite complex. It appears that, once the grouping is suggested, system choice must be carried out by designers, so that all constraints related to HVAC system design will be taken into account. What we wanted to compare, however, were the results of optimization using VAV systems versus CAV systems, in order to see its impact on zone regrouping and on number of systems. This case is a hypothetical one because, in general, a CAV system is selected only under specific conditions.

The Table 4.2 shows the results of energy consumption for this comparison, taking the reference building into account.

Tableau 4.2. Comparison of optimization results when using VAV versus CAV systems

	Energy consumption. MWh		HVAC energy consumption savings, %		
Case study:	Fans	HVAC	(a-b) (d-c)	(c-b)	(a-d)
a) Reference VAV	129.59	394.10	20.02		18.22
b) Reference CAV	268.83	492.76		6.96	
c) S GLR CAV	251.33	458.48	29.71		
d) S GLR VAV	110.05	322.28			

The use of VAV versus CAV systems led to energy savings of approximately 20% in the case of the reference building (Cases *a* and *b*) and approximately 30% for the optimized building (Cases *c* and *d*). These results confirmed the superiority of VAV systems in terms of energy consumption. However, we wished to verify if the energy savings resulting from optimization were greater for VAV systems or for CAV systems. For CAV systems, energy savings were determined for Case *b* (reference CAV) and Case *c* (optimal CAV): these

savings were only 6.9%. The optimization potential was greater in the case of VAV systems (Case *a* and Case *d*) because the difference here was 18.22%.

4.7.2.2 Impact of using different fan control modes (speed, discharge, inlet)

It is known that the energy consumption of VAV systems varies according to the type of fan control mode used (LBNL 1991). We wished to verify if this control mode influenced convergence and should therefore be considered during optimization.

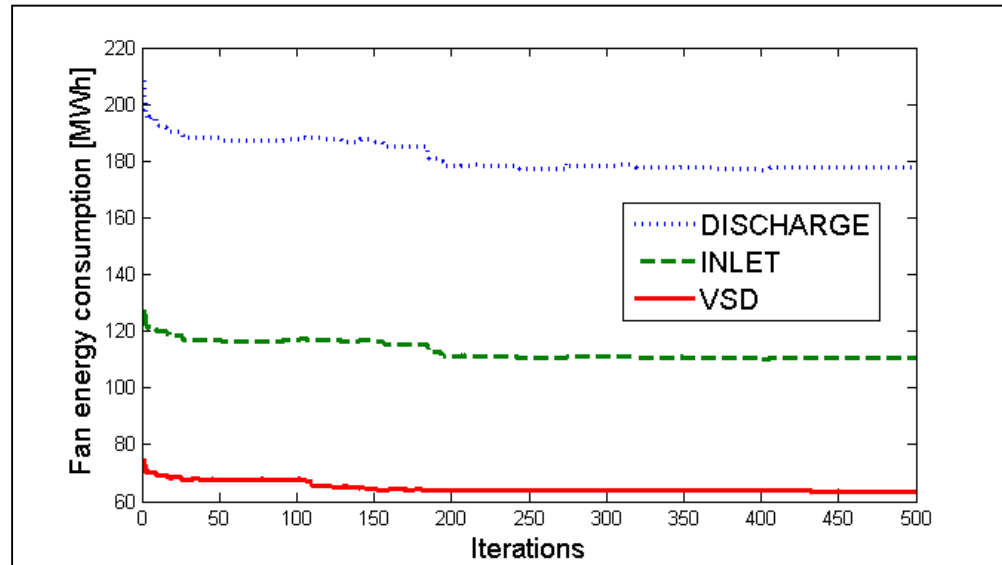


Figure 4.8. Variation in fan energy consumption for various modes of fan control

Figure 4.8 shows the optimization curves obtained for each of the three fan control modes: discharge damper, inlet vanes and variable speed drive. We observed that throughout optimization, the difference between the curves representing modes of fan control remained nearly constant, indicating that convergence was not being affected by fan control mode. Obviously, the fan energy consumption that was controlled by a variable speed drive yielded the lowest value. With the exception of the comparison shown in this chapter, all results set out in this article were obtained using inlet vanes control modes represented by the middle curve of fan energy consumption in Figures 4.8 and 4.9.

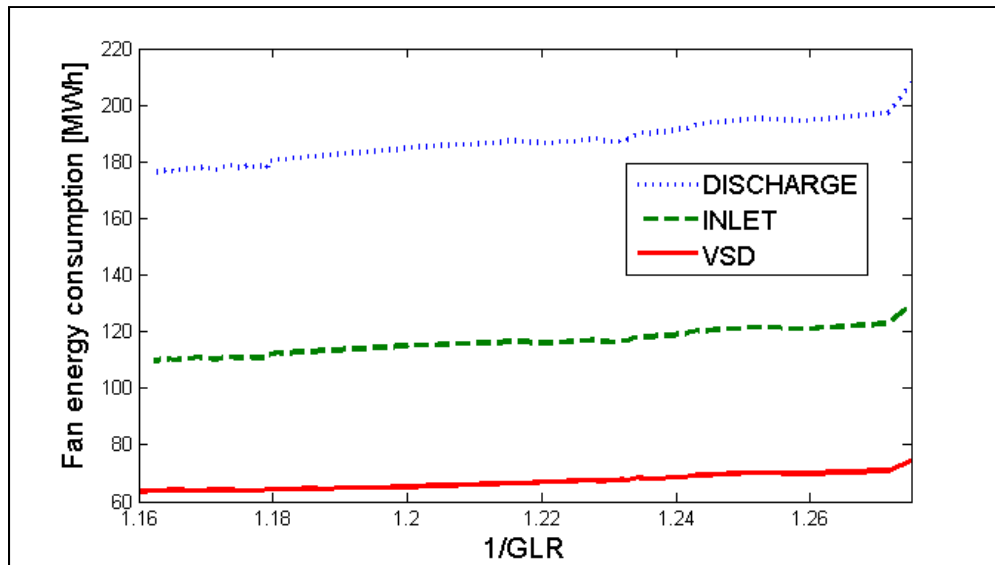


Figure 4.9. Variation in GLR with fan energy consumption for various modes of fan control

Table 4.3 shows a comparison of fan energy consumption between the reference and optimized building. We observed that whatever the mode of fan control selected, the percentage of energy savings determined by the optimization process was almost the same: approximately 15%. Fan energy consumption depended strongly on mode of fan control, however. The same held true for a GLR of approximately 0.86 for the optimized solution.

Tableau 4.3. Comparison of results for use of various modes of fan control

	Fan energy consumption [MWh]		
	Discharge	Inlet	VSD
Reference	208.17	129.59	74.71
Optimized	176.67	110.05	63.58
Savings	15.13%	15.07%	14.89%
GLR	0.8603	0.8603	0.8652

4.7.2.3 Variation in constraint limits (system size, system extent, operating schedule, internal/external zones)

The comparisons described in previous sections were carried out with Constraints C_{FR} and C_{SE} , as were those conducted for the reference building. Our next step was to introduce new constraints and verify the impact of constraint limits on energy consumption. To do this, we carried out the optimizations shown in Table 4.4.

Tableau 4.4. Comparison of results for various constraints

Solution	Constraints				Number of systems	GLR	HVAC and Fan energy consumption, [MWh]
	C_{FR}	C_{SE}	C_{HF}	$C_{I/E}$			
	[CFM]	[m _{extent}]	[h/day]	-			0 100 200 300 400
Reference	1600	66.17	-	yes	5	0.732	129.59 394.1
S1	1600	73	-	-	4	0.880	106.65 327.96
S2	1600	68.5	-	-	3	0.866	108.2 320.81
S3	1600	66.17	-	-	5	0.865	109.49 323.76
S4	1600	65	-	-	5	0.823	115.76 330.02
S5	1600	63.5	-	-	5	0.803	118.87 346.5
S6	1600	62.5	-	-	5	0.810	119.48 347.8
S7	1600	62	-	-	4	0.734	128.86 378.65
S8	1600	61	-	-	-	-	-
S9	1600	71.5	19	-	4	0.880	106.09 315.32
S10	1600	70	19	-	4	0.881	106.18 315.18
S11	1600	67	19	-	6	0.873	107.38 321.39
S12	1600	73	-	yes	5	0.853	109.84 343.13
S13	1600	66.16	-	yes	5	0.779	125.31 385.17

The constraint relating to system size (C_{FR}) was represented indirectly by system airflow rate. For the building described in this article, we chose a value of 1600 CFM as its lower limit, thus eliminating the danger of having too-small systems, operating ineffectively.

The second constraint, system extent (C_{SE}), varied from 61 to 73 m_{extent} . After we performed a few preliminary optimizations, we observed that for a C_{SE} lower than 62 m_{extent} it was very difficult to find a solution. We then took the value of 61 m_{extent} as the lower limit. As for the upper limit, beyond the value of 73 m_{extent} it no longer represented a constraint, because the same optimal solution was always obtained. We observed that GLR value was generally inversely proportional to system extent constraint. The higher the value of system extent (a low C_{SE} constraint), the more the GLR increased: this yielded a reduction in energy consumption.

The third constraint related to the practice of grouping zones with different occupancy schedules (C_{HF}) under a single system, and was imposed only for three simulations (S9 through S11). For the building described in this article, we had three types of schedule that were specific to zone function: (i) Type A (offices: 15 hours per day); (ii) Type B (cafeteria, recreation: 18 hours per day), and (iii) Type C (conference/meeting room: 14 hours per day). The system operating schedule was created based on the union of zone schedules found under the same system. For example, if we were to group zones with A and B schedules in the same system, this would imply a system operating schedule of 20 hours per day. As for the grouping of zones with B and C schedules, this would imply a system operating schedule of 19 hours per day. Therefore, in order to minimize system operating time, we imposed a maximum limit of 19 hours per day for system operating schedules (Cases S9 through S11). The application of this constraint (C_{HF}) thus led to solutions displaying reduced energy consumption values (S9 through S11) as compared with other solutions. This was due, among other reasons, to the fact that imposing this constraint gave greater priority to zone groupings that improved the system's operating schedule. The distribution of the daily operating schedule for each system is shown in Table 4.5.

The final constraint related to grouping zones by isolating internal zones from external zones ($C_{I/E}$); this constraint was imposed for two simulations (S12 and S13) in order to ascertain whether it would lead to significant energy savings. In this case, in order to respect the constraint for the systems' minimal airflow rate (C_{FR}), we had to group all the internal zones

under the same system; this led, however, to a system operating schedule that exceeded the daily limit of 19 hours per day. So, in order to find a solution while using the $C_{I/E}$ constraint (S12 and S13), we had to remove the C_{HF} constraint.

Tableau 4.5. Distribution of daily operating hours for each system

Solution	<i>Number of daily operating hours for each system [h]</i>					
	System 1	System 2	System 3	System 4	System 5	System 6
S9	15	15	15	19	-	-
S10	19	15	15	15	-	-
S11	15	15	15	15	15	19

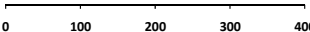
As for the other cases, the constraint relating to system extent (C_{SE}) made the difference between these two solutions: Solution S12 ($C_{SE}=73 \text{ m}_{\text{extent}}$) proved to be better than Solution S13 ($C_{SE}=66.16 \text{ m}_{\text{extent}}$). Solution S13 was used as a comparison with the reference case because it was the solution that came closest in terms of constraints. We then discovered that, unlike the reference case (where each façade was served by a single system), these solutions contained zones that were located in two façades served by the same system (North & East, North & South).

Among the simulations we carried out, Case S10 provided the best solution, with a GLR value of 0.881 and an HVAC energy consumption value of 315.18 MWh. The unique feature of this solution was that most systems included zones located on opposing façades, which procured very good load diversification: this in turn decreased the GLR. The zones having lengthier schedules were grouped on the same system due to the C_{HF} constraint (a limit in system operation of 19 hours per day): this was valid for the majority of solutions.

4.7.2.4 Influence of mechanical room location

The location of the mechanical room (C_{MR}) was very important during optimization because of its influence on the constraint relating to system extent (C_{SE}).

Tableau 4.6. Comparison of results for various mechanical room locations

Solution	MR location	Constraints			Results		
	C_{MR} -	C_{FR} [CFM]	C_{SE} [m_{extent}]	$C_{I/E}$ -	Number of systems	GLR	HVAC and Fan energy consumption, [MWh] 
Reference	NW, Roof	1600	66.17	Yes	5	0.732	129.59 394.1
S10	NW, Roof	1600	70	No	4	0.881	106.18 315.18
S14	NE, Roof	1600	70	No	4	0.877	106.59 315.81
S15	SE, Roof	1600	70	No	4	0.881	106.03 318.6
S16	SW, Roof	1600	70	No	4	0.875	106.5 325.97
S17	CTRE, Roof	1600	20	No	3	0.883	105.68 310.07
S18	NE, Bsmt	1600	70	No	3	0.881	106.09 319.02
S19	NW, Bsmt	1600	70	No	5	0.878	106.68 318.75
S20	CTRE, Bsmt	1600	20	No	3	0.883	105.68 310.07
S3	NW, Roof	1600	66.16	No	5	0.865	109.49 323.76
S21	NE, Roof	1600	66.16	No	4	0.873	105.62 312.45
S22	SE, Roof	1600	66.16	No	5	0.876	106.47 320.69
S23	SW, Roof	1600	66.16	No	4	0.875	106.44 328.96
S24	NE, Bsmt	1600	66.16	No	4	0.867	108.05 313.87
S25	NW, Bsmt	1600	66.16	No	5	0.861	109.14 324.98
S26	NE, Roof	1600	66.16	No	4	0.877	108.2 317.43
S13	NW, Roof	1600	66.16	Yes	5	0.779	125.31 385.17
S27	NE, Roof	1600	66.16	Yes	6	0.810	117.08 362.51

We chose a variety of locations for the mechanical room: in one or more of the building's four corners; at the centre of the roof, and laid out similarly in the building's basement. We identified the mechanical rooms located in corners using the names of the four cardinal points; for example, the mechanical room located in the roof's left corner was labeled Northwest (NW). The other constraints imposed were C_{SE} and $C_{I/E}$. C_{SE} could vary greatly, depending on the mechanical room's location, and was limited to a maximum of 70 m_{extent}

(S10, S14 through S16, S18, S19) up until 66.16 m_{extent} (S3, S13, S21 through S27) or to a value of 20 m_{extent} for a centrally located mechanical room (S17, S20).

Imposing various constraints influenced the value of energy consumption, which was somewhat higher for the solutions under the system-extent constraint of 66.16 (S3, S21 through S26) as compared to those with system extents of 70 (S10, S14 through S16, S18, S19); energy consumption was much greater for the solutions where the $C_{I/E}$ constraint (separation in internal and external zones) was present (S13, S27).

Slight differences were noted between solutions for mechanical rooms located in the various corners of the same floor: for example, between S10 and S14. On the other hand, in terms of zone grouping, we observed much greater differences in the majority of cases. The S17 and S20 solutions yielded the same answer, which means that for identical constraints, the fact of placing the mechanical room on the roof or in the basement had very little influence on the results. This is a consequence of the localization of the zones and of the zones' function: they were different for each building studied. For the case under study, we observed that the best solution was the one involving a mechanical room located at the centre of the building, whether on the roof or in the basement. The optimal number of systems was three.

4.8 Optimization results

The results of this optimization of HVAC system design showed the impact that constraints as well as optimization variables had on energy consumption. This impact depended upon the seasonal load profile of the building studied.

Once population size and iteration number had been established (Figure 4.10 - Step 1), we conducted a comparison between the use of CAV and VAV systems (Step 2). Using a VAV system proved to be better for this type of optimization, unless another system type were imposed. As for type of fan control, we chose an inlet configuration (Step 3).

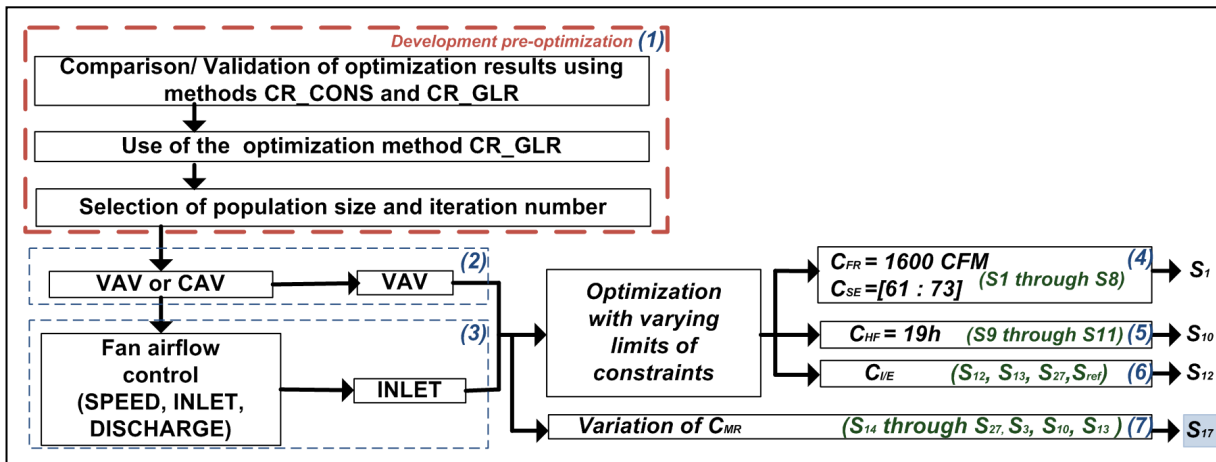


Figure 4.10. Steps in developing the CR_GLR optimization method

Our next step was to conduct an optimization using variable constraints. In order to obtain a comparison tool, we determined a reference case having five VAV systems, one system per façade, and one system serving the building's internal zones. Several optimizations with varying limits of constraints were applied.

Then, playing the role of an engineer applying optimization methods, we chose random but physically valid constraints in order to find the optimal solution. Thus, several scenarios of simulations with varying constraint limits were carried out; the best results proved to occur whenever the constraint values showed greater flexibility.

For the initial simulations (Figure 4.10 - Step 4), the minimum airflow rate constraint was kept at its reference value; it was the system extent constraint that varied between 61 and 73 m_{extent} . We then imposed the system operating schedule constraint (C_{HF}), which limited the maximum number of operating hours per day to 19 hours (Step 5). A final constraint, separation between internal and external zones, was imposed for some simulations (Step 6). For all simulations previously conducted, the mechanical room's location was set at the northwest corner of the roof. Other simulations were carried out to see the impact of changes in mechanical room location (Step 7).

By analyzing the results of all the simulations carried out during optimization with varying constraint limits, we found that the best solution was S10. Moreover, when we took various mechanical room locations into consideration, the optimal solution was found to be Case S17. For S17, the constraint of minimal airflow rate per system remained applicable; the results of this optimization are described in Section 4.7.2.4. The results obtained using the evolutionary algorithm for an office building with 31 thermal zones and with a number of candidate systems (between two and ten), show that grouping the building zones according to a three-system number, with a mechanical room located in the centre of the floor, proved best in terms of energy consumption.

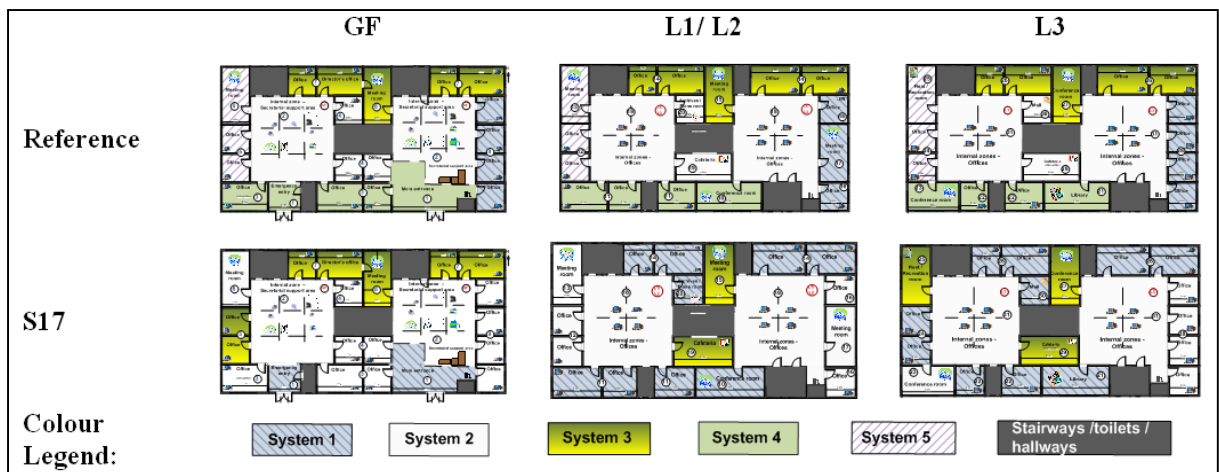


Figure 4.11. Graphic representation of optimal solution

In Figure 4.11 we show the optimal solution we obtained as well as its reference case. In Figure 4.11, the grouping of building zones served by each system is represented differently: the zones served by a single system share one colour, while unconditioned spaces are represented in black. The figures showing the optimized building (S17) are re-displayed in Appendix (Appendice B), for greater legibility

The grouping of zones served by the same system but located on more than one façade led to load diversity due to the non-simultaneity of solar gains. Here we observed a particular grouping of the external zones located on opposing façades: that is to say North-South or

East-West. The constraints for this solution also forced us to group the internal zones with the external zones. By analyzing the results of optimization, we observed that the system's operating schedule was of great importance: the first two systems consisted of zones with occupation schedules of Type A (15 hours per day) and C (14 hours per day), which implied a system operating at 15 hours per day. The third, smaller system (1600 CFM) consisted of zones with schedules of Type B (18 hours per day) and Type A, in order to meet the system size constraint. The operation of the third system was somewhat penalized, because this one needed to function for a total of 20 hours per day. The fact that this system was rather small, however, did not reflect much in terms of system energy consumption. This grouping led to energy savings of approximately 21.3% in HVAC energy consumption and reduced the building's airflow rate by approximately 13.2%, as compared to that of the reference building.

4.9 Conclusions

This article has demonstrated that the proposed optimization method is entirely adapted for HVAC system design, and this optimization method can be quite useful in the preliminary phase of such a design process. The optimal solution was based on an optimal number of HVAC systems and on a grouping of zones for each studied building. It allows engineers to make ideal HVAC system choices, because the solutions generated by this optimization method ensure that all available candidate systems are considered in this process, while respecting the imposed constraints.

An optimization method based on evolutionary algorithms requires only data that is already in regular use by designers in their preliminary sizing process. GLR proved to be an appropriate optimization objective function, and led to a minimization of HVAC system energy consumption. The links between energy consumption and GLR were analyzed, and the results of the comparison showed a 2.8% difference in HVAC energy consumption between the two methods.

The comparison between the reference building and an identical building that has an optimal number of HVAC systems and on optimal grouping of zones yielded significant energy savings in HVAC energy consumption. The optimized design led to energy savings of about 21.3% in HVAC energy consumption and reduced the building's airflow rate by approximately 13.2%. In general, these energy savings depended upon building configuration, types of HVAC systems, and their control strategies. Diversity in building load profiles also had a significant impact on the energy savings.

This article has described a simplified method for considering a constraint that partly represents the investment cost of air ductwork for an HVAC system, i.e. the extent of system air ductwork.

Including the choice of system type as a variable in an optimization method is a more complex problem. It seems that once the grouping is suggested, the choice of system type must be carried out by designers, in order to make sure that all constraints bearing on HVAC system design are taken into account.

This method of optimization could well be employed for future buildings, in order to avoid situations in which a building designer's subjective experience becomes the principal criterion for selecting number of systems and the zone groupings served by these systems.

CHAPITRE 5

EVALUATION OF HVAC SYSTEM DESIGN OPTIMIZATION ON A REAL BUILDING THE B-PAVILION OF ETS

Magdalena Stanescu¹, Stanislaw Kajl¹, Louis Lamarche¹

¹Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure,

1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis à la revue «HVAC&R Research» en avril 2012.

5.1 Abstract

HVAC systems (heating, ventilation and air conditioning) are recognized as the greatest energy consumers in commercial and institutional buildings. Generally, designers use common sense, historical data and subjective experience in designing these systems: this includes the number of systems chosen and the grouping of the zones served by these systems. HVAC energy efficiency is not an easily calculable criterion when the selection of these systems: usually the first selection criterion is the weakest investment cost.

In this article we describe an optimization of HVAC system design using the detailed simulation method, or only the zones' daily profile loads (essential data in the preliminary design phase). In the detailed simulation method we use HVAC energy consumption, calculated using DOE-2 software, as the direct optimization function. In the second method, a global load ratio (GLR), here described as the relationship between the system's real load and its possible maximum load for a given period, is applied as an optimization function. Computing time and convergence speed for the optimization methods are compared.

The variables for the optimization problem are: (i) grouping of the zones served by the systems and (ii) number of systems serving each building. Type of system was preselected for the present study, but this could also serve as an optimization variable. Constraints were

selected in such a way that the limits of the variables were well represented. For this article we used a real institutional building, that is to say, the B-Pavilion at École de technologie supérieure in Montréal. We modeled the building using the DOE-2 calculation engine. The results of our optimization suggest design choices that include grouping of zones and number of HVAC systems for each building; both of these aspects are crucial to engineers during the preliminary design phase. The comparison made among the existing, reference, and optimized buildings (all sharing the same constraints) have yielded significant energy savings for HVAC energy consumption. An LCC analysis has also been done to estimate savings in terms of investment, operations and maintenance costs. These savings will depend upon building configuration, the constraints imposed, the types of HVAC systems selected, and the control strategies for these systems.

Keywords: global load ratio; HVAC systems; grouping of zones; optimization; evolutionary algorithm; energy consumption; simulation; design; LCC.

5.2 Introduction

In order to obtain values for HVAC energy consumption and/or the zones' daily load profiles, and thus optimize HVAC system design for a real university building, we used DOE-2 software (*commercial software developed by the United States Department of Energy*, LBNL 1993a; 1993b). The building studied is the B-Pavilion at ÉTS (*École de technologie supérieure*), built in 2004. We used the building's existing grouping of zones by system as well as the number of systems in this building, as designed by its mechanical engineer, to define the existing building.

This article briefly describes the methods used for creating an HVAC optimization design for this building, already described by Stanescu *et al.* (2012a; 2012b) in previous work. The B-Pavilion, with its existing systems, is shown in Figure 5.2. To highlight the impact of optimization on energy consumption, we also created a reference building with its own system design: one system per façade (i.e. 4 VAV systems); a system serving a few zones

located at Levels 3 and 4 on the east side of the building (System UTA-7 in the existing building), and another system covering the internal zones. The existing building and reference building were used as comparison tools for our optimization methods.

We then describe the results of the optimizations, which included grouping of zones and number of HVAC systems for the building. Evolutionary algorithms (EAs) were used for optimization. The first optimization method (CR_GLR method) used the global load ratio model (GLR) as the objective function: this is described as the relationship between real load and possible maximum system load for a single day or for a given period (Stanescu *et al.* 2012b). A second optimization method (CR_CONS method) used HVAC energy consumption as the objective function (Stanescu *et al.* 2012a). The comparison between (i) the existing, (ii) the reference and (iii) the optimized buildings (having the same constraints and using both of the previously mentioned optimization methods) yielded significant savings in HVAC energy consumption. These savings depended upon the building's configuration; the types of HVAC systems employed and their control strategies, as well as the constraints imposed.

5.3 General description

5.3.1 Building description

The building studied is a university institution housing an 11.5-month teaching program. Built in 2004, it is located in Montreal. The footprint of this building is 4639 m² and the building is 34.11m high.

The entire simulated surface is 28598 m² (31388 m² of rough surface) and this area is set out over an underground parking as well as over five floors. The main zone categories for this building are: classrooms (4691.5 m²), laboratories (402.1 m²), offices (3825 m²), corridors and supply rooms (5695.6 m²), cafeteria (457 m²), kitchen (457 m²), gymnasium and training room (2011 m²), locker-rooms (355 m²), toilets (388.6m²), and a parking zone (9834 m²).

The building's characteristics are as follows:

- principal orientation is north, with an azimuth of 40 degrees;
- average window-to wall ratio is 30%, as follows: 23% North, 38% East, 31% South, 32% West;
- external walls with RSI 3.52, and roof with 3.1 RSI (Type III);
- double clearly powerful Low-E window with argon space, with a global heat transfer coefficient of $U=1.32\text{W/m}^2\text{C}$ and a shading coefficient of 0.28; the glazing is fixed, without frames.

5.3.2 Description of HVAC systems

There are a total of seven (7) HVAC systems installed in the existing building, including:

- 4 VAV (variable air volume) systems serving each of the following zones: classrooms, offices, corridors, workout room and small cafeterias. Zone grouping is shown in Figure 5.1, except for system UTA-107, which supplies mainly the training room located on the east side of the building; this system is not mentioned in Figure 5.1.
- Two CAV (constant air volume) systems, serving both gymnasiums as well as the mechanical room at Level 4 (Systems UTA-105 and UTA-106). The vocations of zones served by the systems using constant air flow rates (CAV or Make-up systems) were so specific that these zones were excluded from our optimization.
- One make-up system (UTA-101), providing 100% of the outside air for the nursery and the pub.

Each HVAC system is provided with CO₂ sensor detection. The weekday operating schedule runs from 6 a.m. to 11 p.m. (17 hours per day).

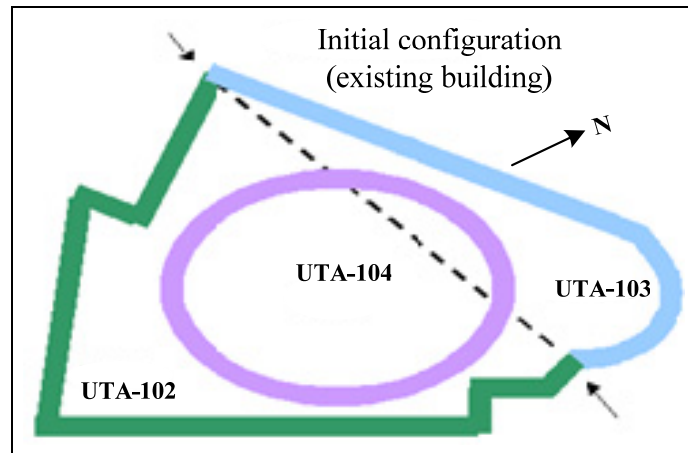


Figure 5.1. Schematic representation of zone grouping by main system for existing building

As mentioned above, a reference building was simulated and used as a comparison tool in this study. This reference building was provided with six (6) VAV systems: one for each facade (i.e. 4 VAV systems); one VAV system mainly for the training room on the east side of the building, and one VAV system for the building's internal zones.

5.3.3 Thermal plant

The thermal plant has one chiller that provides chilled water for space cooling, using the cooling tower located on the roof. The centrifugal chiller has a cooling capacity of 450 tons (1582.5 kW) and uses R-134a as refrigerant. Superheated steam from the Montreal Community Steam Power Plant (CCUM) is used for space heating and for service water heating.

Rooms with specific demands, such as the server/telecom rooms or computer rooms are served by individual heat pumps which are cooled by a second cooling tower.

5.4 Building model

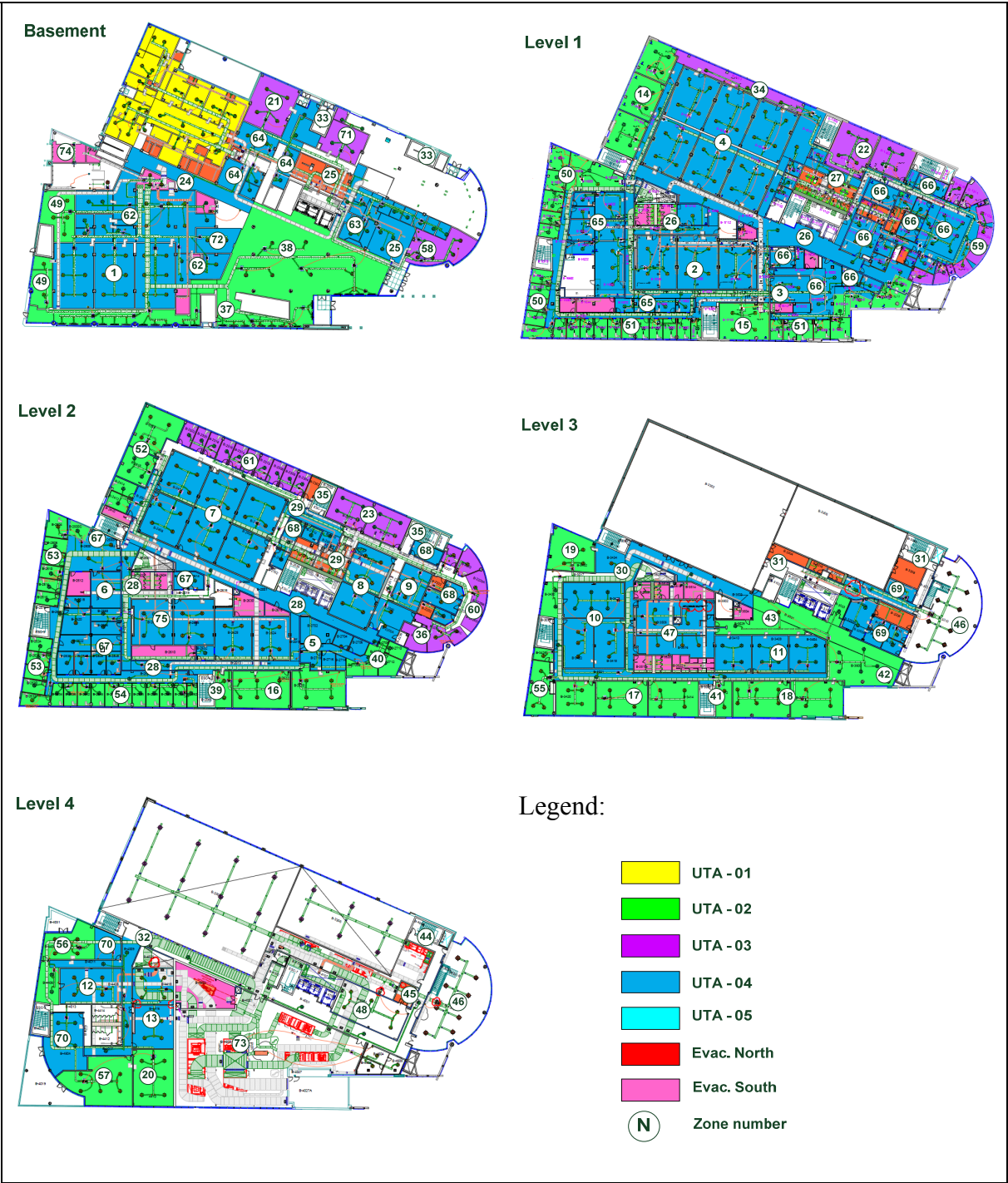


Figure 5.2. Building zones for the 5 levels of the B-Pavilion at ETS

The building's simulation model was developed using DOE-2 software. In order to validate the building model, it was necessary to compare the results obtained using a simulation with energy bills. We found that the difference between annual energy consumption, obtained using the simulation model, and these energy bills was only about 2.8% (Stanescu *et al.* 2007).

Note that the CR_CONS optimization method uses the detailed building model in DOE-2 software in order to determine HVAC energy consumption. The CR_GLR optimization method does not require the detailed building model, so we were able to use simply the zone load profile.

5.5 Optimization

As described by Stanescu *et al.* (2012a; 2012b) in previous work, we had optimized the building's system design in order to carry out a better grouping of the building zones served by its systems. Our articles have described the modifications required by the optimization procedure (CR_CONS or CR_GLR) at the beginning of the design process, as suggested by ASHRAE (1993). Figure 5.3 provides a reminder of this modified design process, including the optimization procedure we used.

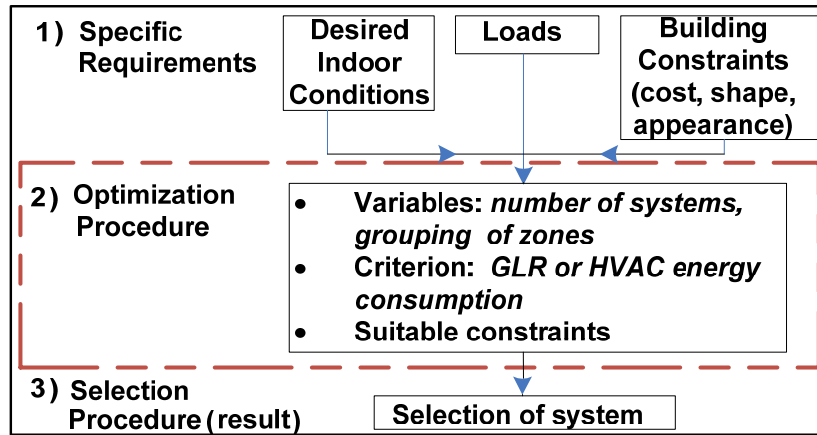


Figure 5.3. Schematic representation of design process, including the optimization procedure (CR_CONS or CR_GLR method)

5.5.1 Identification of the objective function, variables and constraints

The design optimization procedure can be characterized using the problem's variables (grouping of the zones served by the systems and number of systems serving the building), the objective function and appropriate constraints.

The objective function in the CR_CONS method is HVAC energy consumption, evaluated using DOE-2 software (Stanescu *et al.* 2012a). The objective function in the CR_GLR method is the Global Load Ratio (GLR). Maximization of the GLR leads to a decrease in HVAC energy consumption (Stanescu *et al.* 2012b).

The first constraint is the size of systems (C_{FR}), represented by minimal and maximal airflow rates (AFR). We accomplished this by limiting the system's minimum and maximum design AFR to 8% and 50% of total AFR (calculated using the building's corresponding peak load), respectively. This constraint indirectly gave us the minimum or maximum number of systems allowed during optimization, i.e. between 2 and 12 possible systems.

The second constraint is the size of the system's air ductwork (C_{SE}), which took into account the location of zones served by the same system in order to reduce costs associated with the

air duct network. The design of air ducts for VAV systems has already been the focus of an optimization method developed by Kim *et al.* (2002a; 2002b) using GA. In our case, this problem was quite complex due to the large number of parameters involved, which changed for each EA-generated individual. For this reason, we developed a simplified and indirect method which took into account the size of system air ductwork: we calculated that the distance between the centre of gravity of all zones served by a single system and the mechanical room could serve as a good approximation for quantifying the size of system air ductwork. We applied a weighting method to each segment using airflow rates, and to characterize this weighted size we named it “system extent” and coined a term for the unit: $[m_{extent}]$ (Stanescu *et al.* 2012a). For this complex building, many thermal zones are represented by irregular polygons. To calculate the gravity centre we use many-point weighted triangle method and for that we collect all the coins position for each thermal zone.

A third constraint was also imposed, one that related to the practice of grouping zones with different occupancy schedules (C_{HF}) under a single system. For the building described in this article, there are three types of schedule specific to zone function: (i) Type A-11 hours (offices, cafeteria: 7 a.m. to 6 p.m.); (ii) Type D-14 hours (classrooms, laboratories: 8 a.m. to 10 p.m.) and (iii) Type J-15 hours (gymnasiums, training-room, locker-rooms: 7 a.m. to 10 p.m.). The system's operating schedule was created based on the union of zone schedules found under the same system. For example, if we were to group zones with A and D schedules in the same system, this would imply a system schedule operating from 7 a.m. to 10 p.m. (14 hours of operation per day). Therefore, in order to minimize system operating time, we imposed the C_{HF} constraint for some simulations.

Details concerning constraints, objective functions and optimization variables have already been provided by Stanescu *et al.* in previous work (Stanescu *et al.* 2009; 2011; 2012a; 2012b).

5.5.2 Brief description of evolutionary algorithms

Evolutionary algorithms (EAs) using single objectives were therefore used for optimizing HVAC system design. Once a random population of solutions had been created, each individual was defined and evaluated using the model for calculating the objective function. A fitness value was then assigned to each individual. In cases where the final condition was not met, the population of solutions was modified by genetic operators for permutation representations. (Deb 2001)

The evolutionary algorithms we used to optimize system design were characterized by an integer chromosome representation of individuals, with mutation and selection as optimization operators. We selected mutation as the only variation operator because, in tests conducted previously, we felt that mutation represented a good compromise between computing time (a half-time reduction) and the objective function response. The mutation operator helped us maintain diversity within the population and inhibit premature convergence. Three forms of mutation were chosen: swap mutation, insert mutation and inversion mutation. Swap mutation works by randomly picking two positions in the string and swapping their allele values. Insert mutation works picks two alleles at random and moves one so that it is next to the other, shuffling the others along to make room for it. Inversion mutation works by randomly selecting two positions in the string and reversing the order in which the values appear between those positions (Eiben and Smith 2003). Since an evolution strategy uses mutation as its primary search mechanism, the probability of chromosome mutation is about 0.9. The probability of gene mutation varies according to the form of mutation operator used and the random changes that the algorithm applies in order to modify the individual genes of individuals and improve the value of the fitness function (Eiben and Smith 2003; Fong *et al.* 2006).

A tournament selection operator was chosen to select parents, because of its simplicity and because selection pressure is easy to control by varying tournament size. For our optimization problem, tournament size was set at eight individuals, for a population size of

80 individuals. We also used elitism in order to keep from losing the best solution found: we placed the individual with the best fitness from each tournament selection into the next generation.

Therefore, the selection operator we chose for managing the population was *tournament selection* and the variation operator that would act on that solution was *mutation* (inversion, sliding and insertion).

5.5.3 Optimization methods

In this article, we describe the results we obtained using the CR_CONS method (Stanescu *et al.* 2012a) and the CR_GLR method (Stanescu *et al.* 2012b). These two methods are shown schematically in Figure 5.4.

The CR_CONS method is an EA optimization that includes an interaction with DOE-2 software when calculating HVAC system energy consumption. As mentioned in (Stanescu *et al.* 2012a), this method requires a detailed simulation tool as well as a great deal of computing time. We found it interesting, however, to apply this optimization method to a real building, and to compare it with the optimization results obtained using the CR_GLR method. In this second, simplified method, we replaced HVAC energy consumption by the GLR model. The goal was not only to avoid using DOE-2 software for modeling, but also to use an objective function requiring only data already in regular use by designers in the preliminary sizing process. In this way, savings in energy consumption would be maintained and computing time would be considerably reduced.

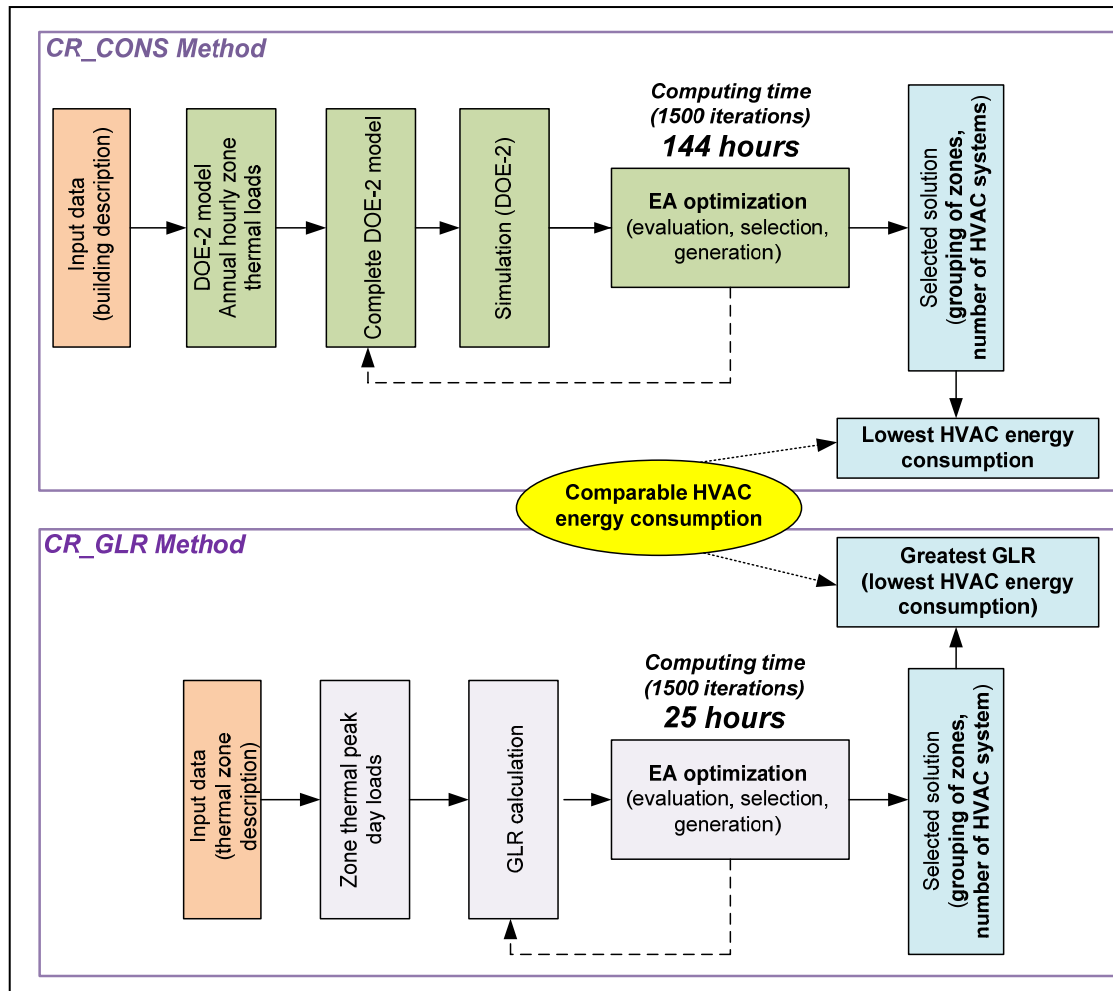


Figure 5.4. Schematic representation of the two methods of optimization

5.6 Optimization results and analysis

In this section we will discuss the results of our optimizations, after applying two optimization methods: CR_CONS and CR_GLR (the simplified method). Table 5.1 shows the case studied, along with the constraints applied for each case. As mentioned before, the optimization constraints C_{FR} and C_{SE} were the same as those used for the existing and reference buildings. In order to minimize system operating time, we imposed the C_{HF} constraint for Solutions S3 through S5.

Tableau 5.1. The cases studied

OPTIMIZATION METHOD		Constraints	C_{FR}	C_{SE}	C_{HF} (not grouping)		
					A & D	A & J	D & J
		Reference/Existing building	√	√			
	CR_CONS	S1	√	√			
	CR_GLR	S2	√	√			
		S3	√	√	√		
		S4	√	√		√	
		S5	√	√			√

The results for the five (5) cases studied (S1 through S5) are shown in Table 5.2. It is clear that HVAC energy consumption savings can be as high as 26% for the CR_GLR method (Solution S3), as compared to the energy consumption of the reference building. Although the percentage of energy savings approximates 25% for the CR_CONS method (Solution S1), as compared to the reference building, we must keep in mind that CR_CONS is much more difficult, because it requires a detailed DOE-2 model, and because the interaction between the DOE-2 model and the EA requires more computing time.

As shown in Table 5.1, the first two optimization solutions take only the C_{FR} and C_{SE} constraints into consideration. Because we used two different methods (CR_CONS and CR_GLR) to optimize the same problem, we decided that it would be interesting to begin by comparing the results of S1 versus S2.

We performed a second analysis to see what impact the constraint related to the system schedule (C_{HF}) would have on the optimal solution using the CR_GLR (simplified) method.

We then compared the results for Solutions S2 to S5, to determine whether system schedule plays an important role in optimization.

Our third analysis was done to see what impact the system extent constraint (C_{SE}) would have on air ductwork. Introducing the same constraint of system extent (C_{SE}) as the constraint already calculated for the existing building allowed us to show that the investment cost for air ductwork was well represented. To do this, we conducted a life-cycle cost analysis (LCC) for Cases S1 and S2: these were cases for which the system extent values obtained were closer to those of the existing building.

Tableau 5.2. Comparison of results among HVAC system designs for the reference, existing and optimized buildings

Solution	Number of systems	GLR [%]	System extent [m_{extent}]	Fan energy consumption [MWh]	HVAC energy consumption [MWh]	HVAC energy savings	Total AFR [L/s]
Reference building	6	75.67	$2.8075 \cdot 10^{-4}$	688.57	2691.0	-	115190
Existing building	4	77.20	$2.8161 \cdot 10^{-4}$	657.05	2544.9	5.42%	111150
S1	6	83.14	$2.7579 \cdot 10^{-4}$	590.92	2018.45	25%	105701
S2	6	84.37	$2.7940 \cdot 10^{-4}$	595.37	2105.49	21.75%	105375
S3	3	84.30	$2.6727 \cdot 10^{-4}$	557.49	1991.86	26%	107908
S4	3	84.43	$2.6816 \cdot 10^{-4}$	558.57	1993.84	25.9%	108166
S5	3	83.23	$2.7354 \cdot 10^{-4}$	597.07	2112.50	21.5%	105904

5.6.1 Optimization using C_{FR} and C_{SE} constraints

For our first analysis, we took only the C_{FR} and C_{SE} constraints into account and applied both optimization methods. Figures 5.5 and 5.6 show the evolution optimization curves for the first two optimization solutions.

Figure 5.5 shows the HVAC energy consumption optimization curve for Solution S1, obtained using the CR_CONS optimization method. In the upper right corner of this figure, we have placed the GLR evolution curve obtained during this optimization. The HVAC

energy consumption for the optimized solution is approximately 2018 MWh, and the GLR value is approximately 83.14%.

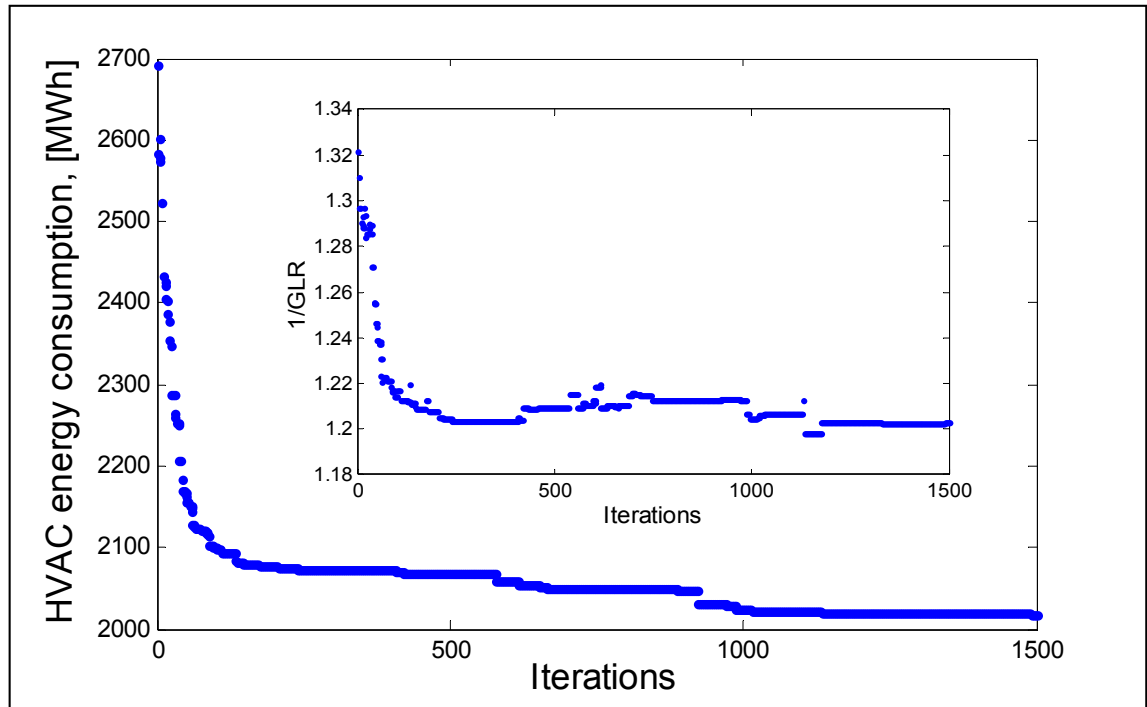


Figure 5.5. Evolution curve for Solution S1

The evolution curve for Solution S2, obtained using the CR_GLR optimization method for 1500 iterations is shown in Figure 5.6. In order to see the impact of optimization on energy consumption for each generation's optimal solution, we calculated HVAC energy consumption using DOE-2 software. This calculation was not necessary during the optimization process, however; this is why we have also shown the HVAC energy consumption curve obtained during this optimization, in the upper right corner of the table. The optimal solution had a GLR of 84.37% and the HVAC energy consumption calculated using DOE-2 simulation engine was approximately 2105.5 MWh.

We observed comparable values for Solutions S1 and S2, obtained using both optimization methods, and an approximate difference in HVAC energy consumption of 87 MWh.

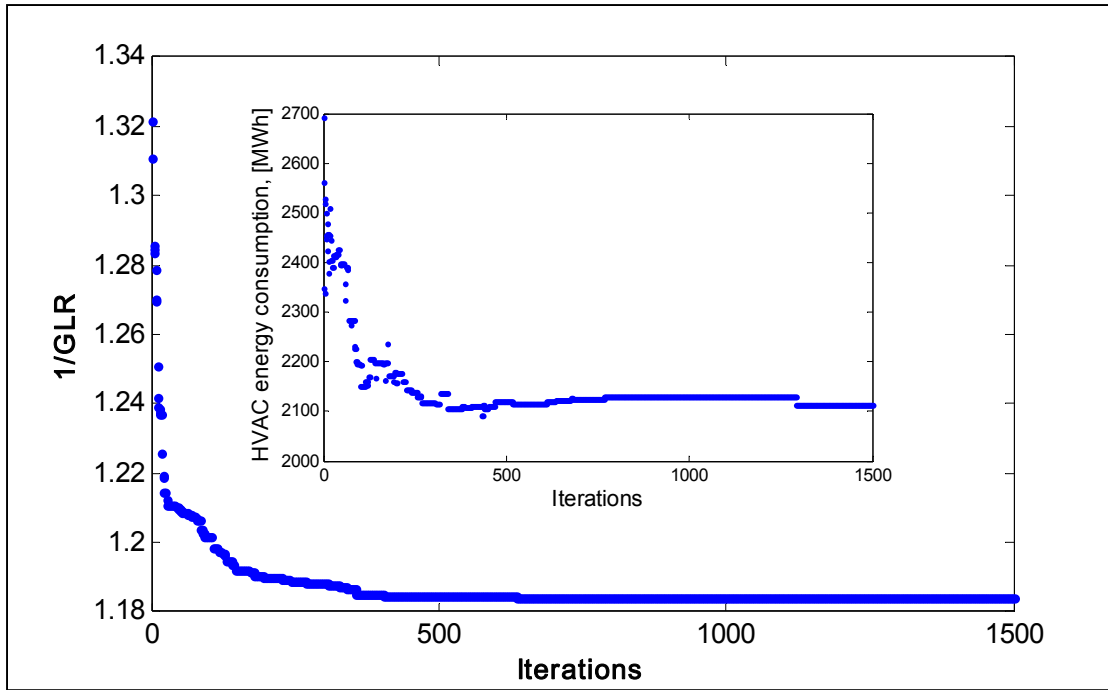


Figure 5.6. Evolution curve for Solution S2

To clarify how optimization evolved, we have included the intermediary results obtained following 100, 200, 500, 1000 and 1500 iterations, in Table 5.3.

Tableau 5.3. Comparison between the two methods using intermediary results

Solution	100 iterations		250 iterations		500 iterations		1000 iterations		1500 iterations	
	HVAC energy cons., [MWh]	GLR	HVAC energy cons., [MWh]	GLR	HVAC energy cons., [MWh]	GLR	HVAC energy cons., [MWh]	GLR	HVAC energy cons., [MWh]	GLR
S1	2101.2	82.35	2073.3	83.10	2064.2	82.68	2023.2	83.03	2018.45	83.14
S2	2151.3	83.20	2139.7	84.12	2120.6	84.36	2128.7	84.37	2105.49	84.37

As seen in Table 5.3 and Figures 5.5 and 5.6, the fastest optimization results (in terms of HVAC energy consumption reduction) were obtained from the EA using HVAC energy consumption as the fitness function. Although the evolution curve for the CR_CONS method showed slightly faster convergence, this method required more computing time: about six

days rather than the single day required with CR_GLR (for 1500 iterations). Fewer than 1500 iterations would have been possible if the optimization had targeted precise values for HVAC energy consumption or energy savings. We also observed that the mean difference between the two methods, in terms of HVAC energy consumption, was approximately 5%, while the difference for the GLR value was very small: about 1%, as shown in Table 5.3.

5.6.2 Impact of zone schedules – optimization using C_{HF} constraint

During the optimization process, we observed that each zone's schedule played an important role; therefore we identified *zone schedule* as reason for improved grouping. In the CR_CONS method, because we calculated HVAC energy consumption using DOE-2 software, we included this constraint indirectly in the optimization criterion. For this reason, we decided to show the impact of system schedule on the optimal solution only for the simplified (CR_GLR) method. We optimized the same building using varying schedule constraints such as those shown in Table 5.1. We added the C_{HF} constraint to the C_{FR} and C_{SE} constraints for Solutions S3 through S5.

Figure 5.7 compares the evolution curves for Solutions S2 through S5. Here we see that the evolution curves for Solutions S3 and S4 are similar: imposing the C_{HF} constraint yielded a very fast convergence (grouping zones with very different occupancy schedules is prohibited, as in this example: grouping a Type A-11h/day schedule with Type D-14h/day or Type J-15h/day schedules). Analyzing Table 5.4, we find that, for Solution S2, zone operation schedules were taken into account during the optimization process, although the C_{HF} constraint had not been imposed. This explains why, for 360 iterations, the evolution curves for Solutions S2 through S4 were almost the same, as seen in Figure 6. The evolution curve for Solution S5 was quite different because of the C_{HF} constraint imposed: grouping zones with Type D (14h/day) occupancy schedules with zones having Type J (15h/day) occupancy schedules is prohibited. As for Solution S5, we conclude that is of great importance to impose a proper C_{HF} constraint: for example, one may prohibit zones having occupancy schedules that differ by more than 2h/day from being grouped under the same system.

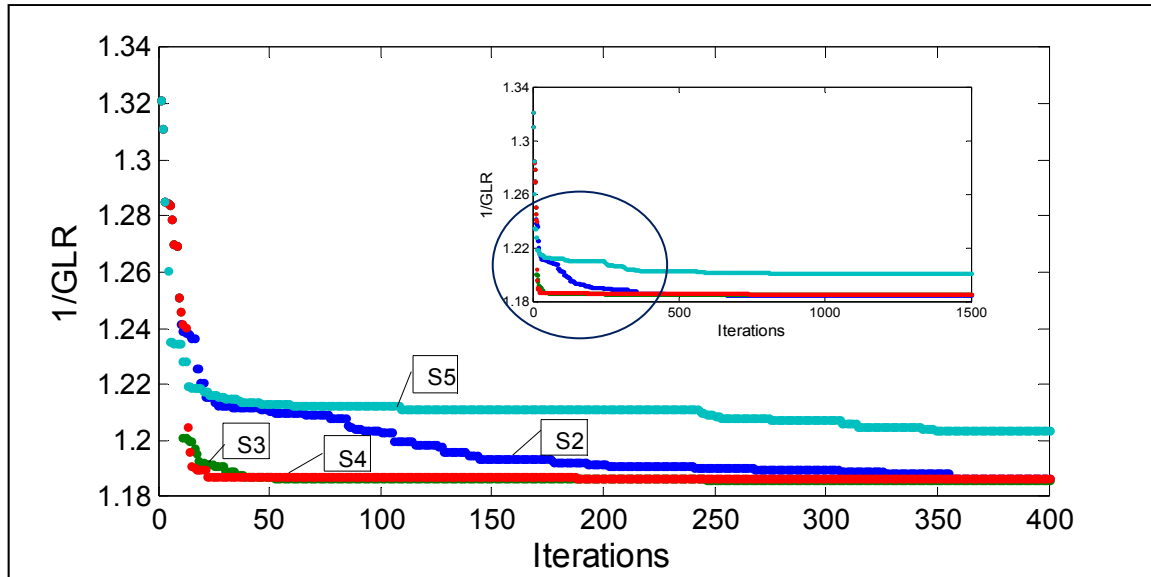


Figure 5.7. Comparison of evolution curves for Solution S2 through S5 (CR_GLR method)

Note that we calculated HVAC energy consumption using the CR_GLR method (Solutions S2 through S5), as shown in Table 5.2. It follows that applying a proper C_{HF} constraint led to solutions showing reduced HVAC energy consumption values, as compared to other solutions. This was due, among other reasons, to the fact that imposing this constraint gave greater priority to zone groupings that improved the system's operating schedule. The distribution of the daily operating schedule for each system is shown in Table 5.4.

Tableau 5.4. Number of operating hours/day for each system and zone schedule served by these systems

	System	Solution S2						Solution S3			Solution S4			Solution S5		
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Zone operating schedule	11h			√	√	√	√			√			√		√	√
	14h	√	√	√	√	√		√	√		√	√		√		√
	15h					√			√			√			√	
Number of system operating hours /day, [h]		14	14	14	14	15	11	14	15	11	14	15	11	14	15	14

5.6.3 Results and discussion

A comparison between the optimization results obtained using both optimization methods as well as the results for the reference building and existing building are shown in Table 5.2. We observed that Solutions S1 and S2 yielded six systems, while Solutions S3 through S5 yielded three systems.

The CR_CONS method provided nearly 25% in HVAC energy consumption savings, while the CR_GLR method, with proper constraints, was able to provide almost 26%, as compared to the reference building.

Tableau 5.5. Airflow rate and number of operating hours/day for each system

	Existing building				Solution S3		
<i>System</i>	1	2	3	4	1	2	3
Flow (L/s)	47538	16876	37640	9097	45122	20616	42171
Hours/day	15h	15h	15h	15h	14h	15h	11h

Compared to the existing building, which has four systems, we considered it reasonable to seek a solution having three systems. Table 5.3 shows system airflow rate (to characterize system size) for the existing building and for Solution S3. We discovered that system airflow rate for Solution S3 was comparable with the system airflow rate for the existing solution. Although system size was comparable, system operation was improved for the optimal solution due to the C_{HF} constraints imposed.

The grouping of zones was done mainly to serve the zones situated in one or two façades of the building and also in order to respect the C_{SE} constraint. For the solutions yielding six systems (S1 and S2 with no C_{HF} constraint), we note that there are systems that group zones from only two or three levels of the building, in order to respect the C_{SE} constraint. For solutions with three systems (S3 through S5), each system groups zones from all floors. Internal and external zones are often grouped under the same system in order to provide

greater load diversity. This solution does not lead to system control problems, however, because HVAC energy consumption is lower and system control is adequate. The type of system selected for optimization was a VAV system with reheat coils; the control strategy for supply temperature was selected as "coldest" or "warmest," depending on the season.

5.7 Cost estimation for building HVAC systems

For this paper we studied a real building. For this reason, we decided to draw up a detailed life-cycle cost analysis, to better see the benefits of the system we selected. We selected Cases S1 and S2 for our economical analysis because they had yielded the highest system extent values.

When using the CR_CONS optimization method, we took only HVAC energy consumption (equipment operation cost) as the objective function. We did not include capital cost as the objective function because of the problem's complexity, especially regarding cost of system air ductwork. Although an objective function taking investment cost into consideration was feasible, using a simplified characterization of system air ductwork, i.e. system extent, the links between system extent and investment cost needed to be studied first. Therefore, for our problem, we chose Constraint C_{SE} (size of system air ductwork), which took into account the location of zones served by the same system, in order to indirectly reduce the costs associated with the air duct network; we represented the constraint relating to system size (C_{FR}) indirectly by system airflow rate.

We had always imposed a C_{SE} constraint in our previous work (Stanescu *et al.* 2012a; 2012b). The novelty of this article is that here we have carried out a LCC analysis, and for this we needed to design the air ductwork ourselves. For the existing building, we used the proposed ductwork design; we designed the two optimized solutions we wished to study (S1 and S2). We used the method proposed by Kim *et al.* (2002a; 2002b) to evaluate life-cycle cost for both the proposed and existing HVAC air duct network designs. As mentioned in our previous work, the initial cost includes fan cost and cost of the installed ducts (as a function

of cost per unit area of duct surface, or S_d). The cost of HVAC equipment (such as fittings, heating and cooling coils) is considered to be the same for all the HVAC designs we analyzed; these were not included in the LCC analysis.

By multiplying **Ep** (*annual energy cost*) by **PWEF** (*present worth escalation factor, dimensionless*), and adding **Es** (*initial costs*), we obtained **LCC** (*life-cycle cost*).

$$LCC = Ep \cdot PWEF + Es \quad (5.1)$$

HVAC energy consumption, calculated using simulation tools, was used to obtain the annual energy cost. We estimated the price of kWh, based on energy bill data for the buildings studied, at 6¢/kWh. Skyrocketing energy costs worldwide required us to include a cost escalation factor in the life-cycle cost. The current value of an annual cost over a selected time period (a), using **AIR** (*annual interest rate, dimensionless*) and **AER** (*annual escalation rate, dimensionless*), is known as **PWEF** and is determined by:

$$PWEF = \frac{\left[\frac{1+AER}{1+AIR} \right]^a - 1}{1 - \left[\frac{1+AIR}{1+AER} \right]} \quad (5.2)$$

Heating and cooling loads depend on many probability factors. Therefore, there is no need for over accurate economic data for duct design. If the interest rate (AIR) is unknown, the recommended interest rate is 6 percent. If the amortization period (a) is unknown, 10 years is recommended. The value for the *present worth escalation factor* matched the value used in previous studies (Karunakaran *et al.* 2006), or $PWEF=12.61$.

Initial cost should include construction costs for the system as well as additional building costs attributed to the system. We evaluated these by taking only the variable parts of costs into account, that is to say: fan cost (E_{fan}) and main ductwork cost (E_{duct}).

$$Es = E_{fan} + E_{duct} \quad (5.3)$$

We evaluated fan cost using data from the *Means Mechanical Cost Data* book [17] for a centrifuge-type HVAC fan, and used CFM values from 1000 CFM (472 l/s) to 134960 CFM (63694 l/s). This value represents the sum of bare material cost plus 10% for profit, bare labour cost plus total overhead and profit and bare equipment cost, plus 10% for profit, as mentioned in Means Mechanical Cost Data (Mossman 2008).

Duct cost was evaluated for both circular and rectangular sections, and took duct length (L) and duct section into account. The value used for unit ductwork cost (S_d), including material and labour, had already been estimated at \$43/m² by Asiedu (2000a).

Duct cost was:

$$E_{duct} = S_d \cdot \pi \cdot D_c \cdot L \quad (5.4)$$

We used D_c equal to the diameter (D) for a round duct, or $D_c = 2(H+W)/\pi$ for a rectangular duct, applying Asiedu's simplification (2000b).

By combining Equations (5.1) through (5.4), total life-cycle cost can be rewritten as:

$$LCC = E_p \cdot PWEF + E_{fan} + S_d \cdot \pi \cdot D_c \cdot L \quad (5.5)$$

In order to calculate LCC cost for the existing building's systems, we used the equations shown above as well as mechanical specifications and the building ventilation plans, with all the ductwork already designed. For the optimized buildings, we used the same procedure as for the existing building to calculate the air ductwork, as follows:

- We designed the ductwork for each optimal solution, respecting the same rules as for the existing building;
- We applied the same calculation principles for finding duct sections as those used for the existing building. Thus, using the existing building's data, we found the following relationship between airflow rate (AFR) in [L/s] and duct section [m²]:

$$Duct\ section\ [m^2] = (AFR) \cdot 10^{-4} + 5.59 \cdot 10^{-2} \quad (5.6)$$

- Using Means's design data and real data, we found a tendency curve formula that calculated fan cost, depending on airflow rate (AFR) in [L/s], as follows:

$$\text{Fan cost } [\$] = 7 \cdot 10^{-6} \cdot (\text{AFR})^2 + 0.3947 \cdot (\text{AFR}) + 2476.9 \quad (5.7)$$

We applied this formula in order to evaluate the life-cycle cost for the optimized building and for the existing building, as shown in Table 5.6. The reference building was not studied here, because it would have required the tracing of air ductwork. Solutions S1 and S2 were chosen for this analysis because we wished to compare solutions with system extent values that were closer to the ones calculated for the existing building. The LCC analysis is shown in Table 5.6.

Tableau 5.6. LCC cost for the optimized and existing HVAC designs

		Existing building	Optimized building S2 (CR_GLR)	Optimized building S1 (CR_CONS)
		Cost [\$/]		
System 1	E _{fan}	10,739.00	4,410.86	4,989.97
	E _{duct}	60,825.20	14,160.75	18,970.26
System 2	E _{fan}	4,786.90	7,790.61	6,809.45
	E _{duct}	20,091.80	32,506.62	25,480.90
System 3	E _{fan}	15,906.00	5,143.35	6,447.08
	E _{duct}	51,050.00	9,674.58	29,802.67
System 4	E _{fan}	3,414.40	4,669.09	3,698.59
	E _{duct}	6,234.00	13,598.17	11,987.42
System 5	E _{fan}	-	8,569.58	8,682.07
	E _{duct}	-	68,861.11	42,244.98
System 6	E _{fan}	-	3,361.68	4,008.34
	E _{duct}	-	7,927.23	8,625.09
Initial cost (fan + duct)		Es	173,047.30	172,104.10
HVAC energy cost		Ep	1,925,471.34	1,593,008.69
Life-cycle cost		LCC	2,098,518.64	1,765,112.79
				1,698,944.97

It is evident that initial HVAC cost (fan and air ductwork) is relatively the same as the costs for the three buildings previously described. Note that the C_{SE} constraints for Solutions S1

and S2 are identical to those for the existing building. This means that the C_{SE} system extent constraint does provide a good representation of the investment cost of air ductwork. The difference for life-cycle cost is due mainly to HVAC energy operating costs. LCC savings are approximately 19% for CR_CONS optimized building, and approximately 15.9% for the CR_GLR optimized building, as compared to the existing building's solution. Note that the LCC for Solutions S3 or S4 using the CR_GLR method could be better, however, because of HVAC energy costs. We did not take these solutions into account in the LCC analysis, as their C_{SE} constraints were different from those for the existing building.

5.8 Conclusion

In this article we have applied the optimization method to a real building. We have demonstrated that the proposed optimization method is adaptable for HVAC system design. Optimal solutions include an optimal grouping of building zones as well as an optimal number of HVAC systems for the building studied. The proposed optimization methods should allow engineers to create optimal HVAC system designs, because the solutions generated by this optimization method ensure that all available candidates for the chosen system types are taken into consideration in this process, while respecting the constraints imposed.

Our comparison between reference, existing and optimal solutions for our chosen building's HVAC design yielded significant savings in HVAC energy consumption. Compared to the reference building, the optimized design led to energy savings of approximately 25% when using the CR_CONS method, and nearly 26% when using the CR_GLR method, while reducing the building's airflow rate by 7282L/s to 9815 L/s. Generally speaking, we found that these energy savings depended upon building configuration, types of HVAC systems and their control strategies, as well as upon the constraints imposed. Diversity in building load profiles also had a significant impact on energy savings.

An LCC analysis was carried out, taking air ductwork cost, fan cost and HVAC energy consumption into account, to verify if the optimal solutions are profitable overall and also to validate the choice of the C_{SE} constraint. Using the CR_CONS optimization method, we found LCC savings of approximately 19% between the existing and optimized buildings (Solution S1): this represents monetary savings of approximately \$399,573 for the amortization period. With the CR_GLR method we obtained LCC savings of approximately 15.9 % between the existing and optimized buildings (Solution S2); this represents around \$333,405 in terms of money saved for the amortization period.

These optimization methods could be quite useful in the preliminary phase of the design process, and could help prevent situations in which a building designer's subjective experience becomes the principal criterion for selecting number of systems and the zone groupings served by these systems.

CONCLUSION

Comme présenté dans la revue de littérature, jusqu'à maintenant nous n'avons pas trouvé de recherches qui prennent en considération le meilleur regroupement des locaux par rapport aux systèmes ainsi que le nombre optimal des systèmes. Donc, les méthodes proposées permettent d'optimiser le design des systèmes dans la phase préliminaire de design. Les études antérieures, tel que le choix du type de système, l'optimisation de l'opération du système de contrôle ainsi que l'optimisation de design du réseau des gaines représentent l'étape suivante par rapport à ce que nous on propose. Par exemple, on peut mentionner l'optimisation des centrales frigorifiques qui pourrait être l'étape suivante dans le processus d'optimisation.

La méthode d'optimisation basée sur les algorithmes évolutionnaires est entièrement appropriée pour la conception des systèmes CVCA. Le coût de réseaux des gaines d'air des systèmes CVCA est indirectement pris en considération en utilisant la contrainte d'étendue des systèmes (C_{SE}). De plus, considérer la réduction de la consommation d'énergie comme le critère d'optimisation (méthode CR_CONS) ou utiliser un critère d'optimisation simplifié (méthode CR_GLR) s'avère tout à fait appropriés pour la conception des systèmes CVCA. Cependant, la première méthode exige l'expertise d'un utilisateur du logiciel de simulation pour bâtir le modèle du bâtiment ainsi que pour résoudre les éventuels problèmes rencontrés durant simulation. Comme ce problème est assez complexe, nous proposons d'utiliser plutôt la deuxième méthode qui est basé sur les profils des charges des locaux, une donnée indispensable dans la phase préliminaire du design. De plus, cette simplification réduit également le temps de calcul. Cette méthode d'optimisation devrait être utilisée dans le cas des futurs bâtiments pour éviter que le choix du regroupement des zones par système soit fait selon l'expérience des concepteurs.

Nous avons appliqué cette méthode sur un bâtiment réel pour voir les avantages de l'optimisation dans le cas d'une vraie construction. La comparaison du bâtiment de référence avec le même bâtiment ayant un regroupement des locaux et un nombre de systèmes CVCA

optimaux démontre des économies d'énergie importantes au niveau des systèmes CVCA. Ces économies dépendent de la configuration du bâtiment, des contraintes imposées, du type de systèmes CVCA sélectionné ainsi que de la stratégie de contrôle choisie. La diversité de profils de charge des locaux a aussi un impact important sur les économies d'énergie.

Les articles présentés démontrent l'utilité de l'optimisation de dimensionnement des systèmes CVCA dans la phase préliminaire de conception permettant aux ingénieurs de faire un meilleur choix parmi l'ensemble de possibilités de regroupement des locaux desservis par les systèmes. Ce choix met en évidence les économies d'énergie qui auraient pu être réalisées dans un bâtiment si la conception des systèmes CVCA avait été optimisée.

Dans les articles présentés, nous prenons en considération le regroupement des locaux mais la contrainte qui porte sur l'étendue du système (C_{SE}) nous permet de maintenir des coûts d'investissement similaires pour le réseau des gaines d'air du bâtiment optimisé par rapport aux coûts d'un bâtiment existant ou du référence. En utilisant cette méthode simplifiée pour calculer l'étendue des systèmes, nous sommes capables de le calculer pour chaque individu et, éventuellement, l'utiliser comme fonction objective. Par contre, ce problème, soit de trouver les liens entre l'étendue du système et el coût d'investissement du réseau des gaines sera traité dans des travaux futurs.

Inclure le choix des systèmes dans l'optimisation est un problème plus complexe. Il semble qu'une fois le regroupement proposé, le choix du système doit être réalisé par les concepteurs afin de tenir compte de toutes les contraintes liées à la conception des systèmes CVCA.

Retombés

Les dernières émergences des différents outils de simulation (souvent basés sur le moteur de calcul DOE2) font croire que notre méthode, qui exige la connaissance des profils journaliers de chaque zone (CR_GLR), pourra être couplée avec un de ces outils de simulation. Certaines discussions avec les concepteurs du logiciel SIMEB sont déjà amorcées.

ANNEXE I

OPTIMISATION DU DESIGN DES CENTRALES FRIGORIFIQUES DES BATIMENTS

Magdalena Stanescu¹, Stanislaw Kajl¹, Louis Lamarche¹

¹ Département génie mécanique, École de technologie supérieure.

Résumé

Les systèmes CVCA (chauffage, ventilation et conditionnement d'air) sont parmi les systèmes les plus énergivores dans les bâtiments. Le surdimensionnement de ces systèmes ainsi que le design non optimisé peuvent grandement contribuer à la consommation d'énergie de ces systèmes. L'objectif est donc de développer une méthode d'optimisation des centrales frigorifiques des bâtiments ayant comme critère d'optimisation la consommation d'énergie et indirectement le coût d'opération de ces centrales. Pour cela, nous utilisons le modèle du refroidisseur présenté dans les documents sur la conformité des bâtiments par la méthode de performance (CNRS 1999) Pour appliquer le modèle à un refroidisseur existant, nous disposons des données du fabricant correspondant aux conditions de l'ARI (American Refrigerating Institute) ainsi que des données fournies par le monitoring. Nous présentons les résultats de validation du modèle ainsi que l'impact de l'optimisation de la centrale frigorifique sur la consommation d'énergie.

Mots clés : *systèmes CVCA, surdimensionnement, monitoring, modélisation, refroidisseur, optimisation*

1. Introduction

La climatisation commerciale et institutionnelle est essentielle au confort de la société contemporaine dans la plus grande partie du monde. Les systèmes CVCA (chauffage, ventilation et conditionnement d'air) contribuent à la santé et au confort de chacun, à la productivité des gens et à la vitalité de l'économie.

Les systèmes CVCA sont reconnus comme les plus énergivores dans les bâtiments commerciaux et institutionnels. Pour améliorer leur efficacité énergétique, il faut optimiser l'opération de ces systèmes, mais cette optimisation ne donnera pas les résultats escomptés sans optimiser leur design.

Le monitoring des systèmes CVCA du bâtiment de l'École de technologie supérieure (ÉTS) démontre que le surdimensionnement d'un système peut parfois atteindre un niveau inattendu. La demande d'un refroidisseur, par exemple, reconnu pour une consommation importante d'énergie, dépasse rarement 80% de sa capacité de design. L'optimisation d'une centrale frigorifique devient donc un défi du design des systèmes CVCA. Le

surdimensionnement, le nombre de refroidisseurs et leur capacité de design sont les éléments qui doivent être pris en considération pendant l'optimisation du design.

Il y a plusieurs raisons pour lesquelles les systèmes CVCA sont surdimensionnés, comme par exemple: (i) la méthode utilisée pour calculer les charges de climatisation ou de chauffage, (ii) la diversification insuffisante de la vocation des locaux desservis par un système, (iii) les données imprécises fournies par le futur propriétaire sur la vocation et l'utilisation des locaux, (iv) la tendance de concevoir des systèmes avec des marges de sécurité élevées, etc.

Les conséquences du surdimensionnement des centrales frigorifiques sont : (i) augmentation du coût d'investissement de l'équipement dû au fait qu'il faut acheter un équipement plus grand que nécessaire, (ii) augmentation du coût d'opération des équipements ce qui amène à une consommation d'énergie plus importante, (iii) probabilité d'usure plus rapide de l'équipement ce qui entraîne des coûts de réparation et de maintenance plus élevés.

En ce qui concerne le confort thermique, la distribution de l'air dans les locaux desservis par un système VAV en hiver (débit d'air faible) est considérée comme une faiblesse même si elle résulte du principe d'opération. Dans le cas d'un système surdimensionné, cette faiblesse a aussi lieu en été. (Kajl *et al.* 2003)

L'objectif du projet présenté dans cet article est donc de développer la méthode d'optimisation des centrales frigorifiques des bâtiments. Le critère d'optimisation est évidemment la consommation d'énergie et indirectement le coût d'opération de ces centrales.

La méthodologie suivante est utilisée pour atteindre cet objectif : (i) analyse des données du monitoring (ii) modélisation du refroidisseur, (iii) identification des variables, des contraintes et des critères d'optimisation, (iv) évaluation de la méthode d'optimisation et choix des procédures d'optimisation, (v) évaluation de l'impact de l'optimisation sur les coûts d'opération d'une centrale frigorifique d'un bâtiment.

2. Monitoring du bâtiment de l'ÉTS

Le monitoring du bâtiment qui abrite l'École de technologie supérieure (ÉTS - ancien pavillon) nous démontre qu'il y a un certain surdimensionnement des systèmes CVCA. L'édifice est équipé de 11 systèmes de traitement d'air à volume d'air variable (VAV). Ils sont alimentés en eau chaude par le biais de la centrale de vapeur de la communauté de Montréal et en eau froide par le biais d'un groupe refroidisseur centrifuge.

Le schéma du système VAV qui a fait l'objet du monitoring est montré dans la figure A I-1. La partie étudiée est le système de refroidissement. Le débit de design de l'eau glacée est de 108.82 l/s et la puissance appelée du refroidisseur est de 518 KW. Les données sont prises de la fiche du manufacturier pour un refroidisseur centrifuge de marque YORK, modèle YTK9L6F2-CXG.

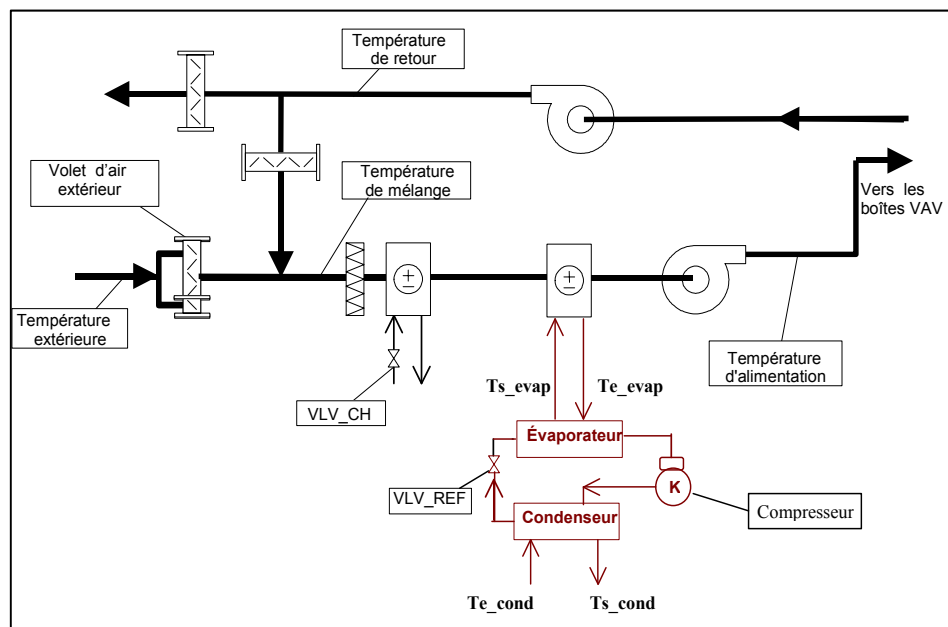


Figure-A I-1. Schéma du système VAV

La base de données comportant les charges horaires de refroidissement est requise pour démontrer l'impact de l'optimisation sur la consommation d'énergie. L'analyse des résultats du monitoring des systèmes CVCA d'un bâtiment est réalisée pour obtenir cette base de données couvrant la période d'été (5 mois).

Suite à l'analyse de la variation de la charge de refroidissement, nous avons constaté que nous pouvons regrouper les mois étudiés dans deux catégories. La première catégorie regroupe les mois de mai, juin et septembre qui ont une variation de charge de refroidissement semblable. La deuxième catégorie regroupe, en se basant sur le même critère, les mois de juillet et août. De plus, nous constatons que l'horaire d'opération du refroidisseur est de 6h à 22h pendant la semaine et de 8h à 20h pendant les week-ends ou les vacances.

Les modèles des composantes des systèmes CVCA, comme le ventilateur, les serpentins et les volets ont été réalisés et validés par Nassif et Kajl (2003). Dans cet article, nous étudions et validons le modèle du refroidisseur. Pour modéliser le refroidisseur nous avons besoin des données du monitoring comprenant les températures de l'eau à l'entrée du condenseur (Te_{cond}) et à la sortie de l'évaporateur (Ts_{evap}). De plus, pour valider le modèle, d'autres données sont nécessaires telles que la température de l'eau à l'entrée de l'évaporateur (Te_{evap}) et la demande actuelle de refroidissement. En ce qui concerne la température de l'eau à l'entrée du condenseur, nous pouvons l'évaluer comme étant supérieure de 3°C par rapport à la température humide de l'air.

L'analyse des données acquises nous indique que, pour des raisons parfois aléatoires, certaines données sont manquantes. Nous proposons la procédure suivante pour obtenir une

base de données complète : (i) acquisition des données du monitoring représentant les variables du modèle, soient les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur, à l'entrée du condenseur ainsi que la demande actuelle du refroidisseur, (ii) analyse des données du monitoring pour identifier les trous dans la base de données, (iii) détermination des courbes de tendance des variables en fonction de la température extérieure et, (iv) remplissage des trous. Cette procédure nous permet de compléter la base de données couvrant la période de 5 mois, de mai à septembre. Les données erronées ou manquantes sont, respectivement, corrigées ou générées à l'aide des courbes de tendances tracées en fonction de la température extérieure.

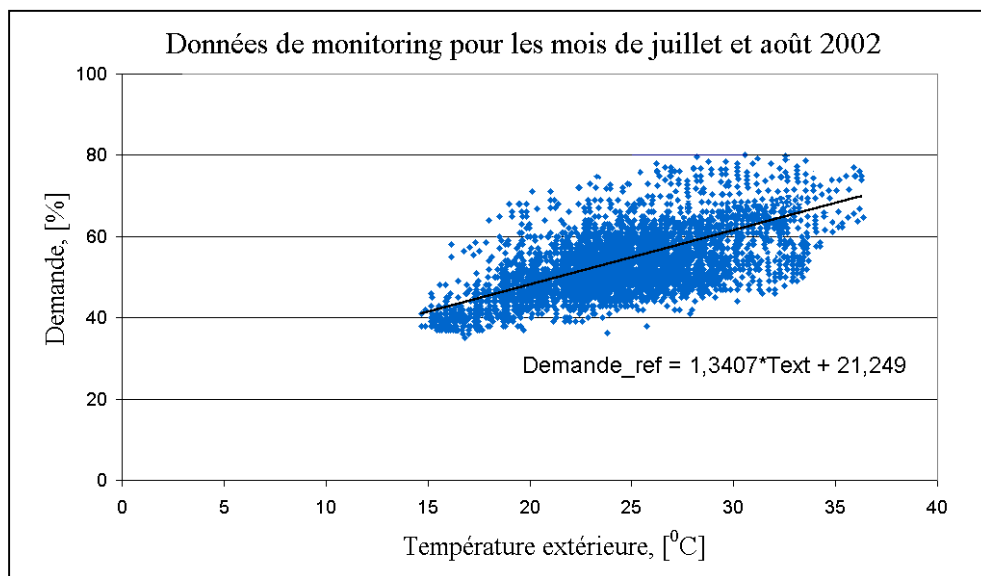


Figure-A I-2: Courbe de tendance de la demande actuelle de refroidissement

Par exemple, la courbe de tendance correspondant à la demande de refroidissement enregistrée pendant les mois juillet-août 2002 est présentée dans la Figure A I-2.

Dans la figure 3, nous avons tracé les courbes de tendance des températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur. À l'aide des données du monitoring, nous avons pu tracer les courbes de tendance caractérisant l'autre catégorie, soient les mois de mai, juin, septembre, et ainsi compléter notre base de données nécessaire dans le cadre de l'étude.

La base de données ainsi obtenue peut servir aux différentes analyses. Les données telles que les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur, à l'entrée du condenseur ainsi que la demande actuelle du refroidisseur sont utilisées pour valider le modèle du refroidisseur présenté ci-dessous. Le modèle est ensuite utilisé pour faire l'optimisation et pour établir l'impact d'une centrale optimisée sur la consommation d'énergie.

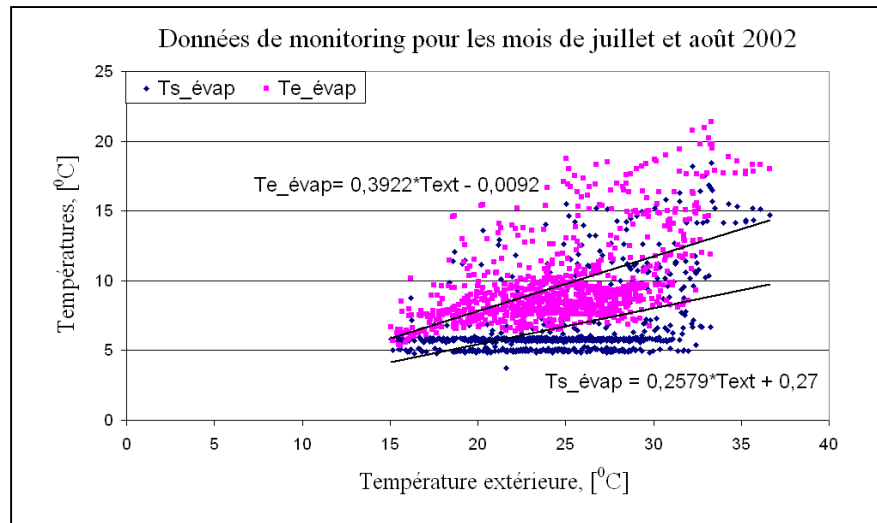


Figure-A I-3. Courbes de tendance des températures à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur

La figure A I-4 présente la variation de la puissance frigorifique. Nous constatons que la consommation moyenne se situe entre 40% et 50% de la puissance frigorifique maximale. Il y a parfois des demandes de l'ordre de 80% ce qui nous démontre que nous devons en tenir compte lors du design. Dans cet article, nous voulons mettre en évidence l'impact du surdimensionnement (le système dépasse rarement 70% de sa puissance frigorifique de design) sur l'opération des systèmes CVCA. Nous voulons aussi étudier quel est l'impact de la composition de la centrale frigorifique (une ou plusieurs machines frigorifiques) sur la consommation d'énergie.

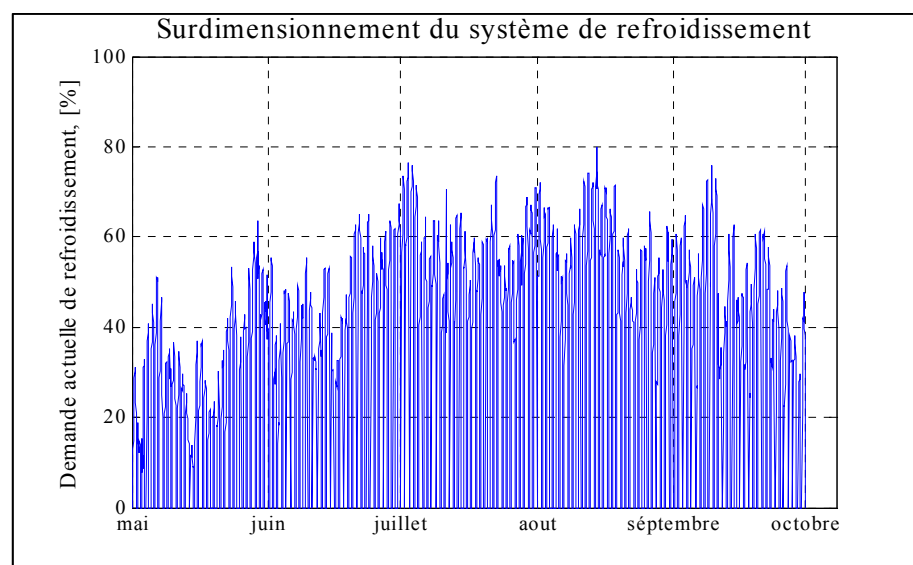


Figure-A I-4. Profil de la demande de refroidissement

3. Choix et validation du modèle

Pour notre problème d'optimisation, nous avons choisi d'utiliser le modèle du refroidisseur présenté dans le logiciel EE4 développé pour le Code national d'énergie dans les bâtiments du Canada ayant comme moteur de calcul le logiciel DOE-2 (CNRS 1999)

3.1. Le modèle du refroidisseur

Pour appliquer le modèle à un refroidisseur existant, nous disposons des données du manufacturier correspondant aux conditions de l'ARI (American Refrigerating Institute) ainsi que des données fournies par le monitoring telles que les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie du condenseur et de l'évaporateur.

Les conditions de l'ARI, dans le cas d'un fonctionnement à pleine charge des refroidisseurs centrifuges, sont les suivantes : température de l'eau à la sortie et à l'entrée de l'évaporateur de 6.7°C et de 12.2°C respectivement ainsi que température de l'eau à l'entrée du condenseur de 29.4°C. Les données techniques fournies par le manufacturier se réfèrent évidemment au débit de design d'eau de l'évaporateur et à la puissance frigorifique nominale du refroidisseur.

Le modèle utilise des équations d'ordre 2 qui correspondent aux courbes de pondération relatives aux refroidisseurs. La courbe de pondération de la puissance frigorifique est donnée par les équations suivantes (CNRS 1999) :

$$CAP_FT = a + b \cdot T_{s_évap} + c \cdot T_{s_évap}^2 + d \cdot T_{e_cond} + e \cdot T_{e_cond}^2 + f \cdot T_{s_évap} \cdot T_{e_cond} \quad (A\ I-1)$$

$$\dot{Q}_{disp}(T_{s_évap}, T_{e_cond}) = (CAP_FT) \cdot \dot{Q}_{nom} \quad (A\ I-2)$$

où :

$\dot{Q}_{disp}$ - puissance frigorifique disponible dans les conditions actuelles d'opération, [KW]

$\dot{Q}_{nom}$ - puissance frigorifique nominale dans les conditions de l'ARI, [KW]

a, b, c, d, e, f - coefficients CAP_FT correspondant aux refroidisseurs centrifuges

Pour décrire la courbe de pondération de la puissance appelée (électrique), nous utilisons les équations (A I-3) à (A I-6):

$$P_{act} = P_{nom} \cdot (EIR_FPLR)(EIR_FT)(CAP_FT) \quad (A\ I-3)$$

$$EIR_FPLR = a' + b' \cdot PLR + c' \cdot PLR^2 \quad (A\ I-4)$$

$$PLR = \frac{\dot{Q}_{act}}{\dot{Q}_{disp}(T_{s_évap}, T_{e_cond})} \quad (A\ I-5)$$

$$EIR_FT = a'' + b'' \cdot T_{s_évap} + c'' \cdot T_{s_évap}^2 + d'' \cdot T_{e_cond} + e'' \cdot T_{e_cond}^2 + f'' \cdot T_{s_évap} \cdot T_{e_cond} \quad (A\ I-6)$$

où :

P_{act} - puissance appelée dans les conditions actuelles d'opération, [KW]

P_{nom} - puissance appelée dans les conditions de l'ARI, [KW]

$\dot{Q}_{act}$ - demande actuelle du refroidisseur, [KW]

EIR_FPLR - pondération de la puissance nominale due aux variations de la demande

EIR_FT - pondération de la puissance nominale due aux variables environnementales

PLR - coefficient de charge partielle relative à la puissance disponible

a'', b'', c'' - coefficients EIR_FPLR qui correspondent aux refroidisseurs centrifuges

$a'', b'', c'', d'', e'', f''$ - coefficients EIR_FT qui correspondent aux refroidisseurs centrifuges

Les données nécessaires à l'entrée du modèle sont :

- la demande actuelle du refroidisseur ($\dot{Q}_{act}$)
- la puissance appelée nominale dans les conditions ARI ($\dot{Q}_{nom}$),
- les températures de l'eau à la sortie de l'évaporateur et à l'entrée du condenseur.

La demande actuelle du refroidisseur se calcule d'après la formule :

$$\dot{Q}_{act} = c_p \cdot \dot{m}_{w_design} \cdot (T_{e_évap} - T_{s_évap}) \quad (A\ I-7)$$

où:

c_p capacité thermique de l'eau, 4.18 KJ/kg·K

$\dot{m}_{w_design}$ débit massique de design donné par le manufacturier, [kg/s]

Le modèle nous fournit la puissance appelée dans les conditions actuelles d'opération (P_{act}).

3.2. La validation du modèle

La validation du modèle du refroidisseur a été réalisée pour la période de l'été 2002 en utilisant les données provenant du monitoring de l'opération réelle d'un système CVCA.

Dans la Figure A I-5, nous présentons les résultats de cette validation portant sur la période du 18 au 25 juillet 2002. La validation est réalisée en comparant la consommation d'énergie obtenue à l'aide des données du monitoring et celle obtenue à l'aide du modèle. La précision du modèle est bonne, car l'erreur relative n'est que d'environ 5% pour toute la période de 5 mois.

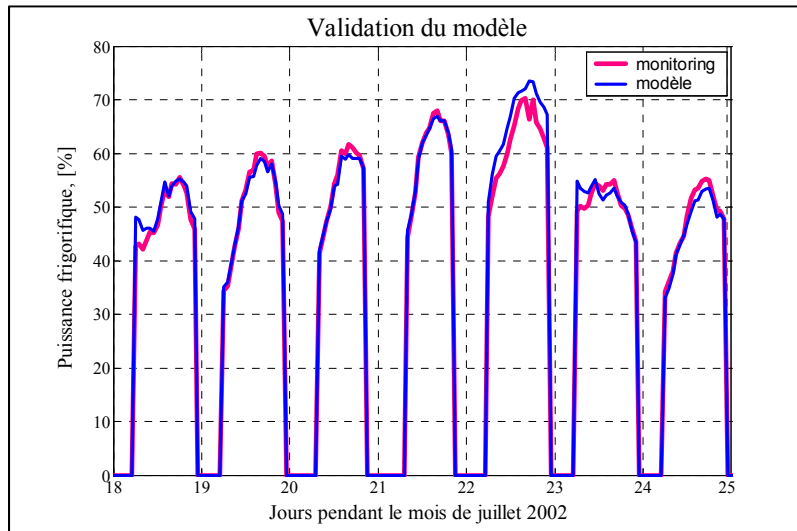


Figure A I-5. Données enregistrées pendant la 3^{ème} semaine du mois de juillet 2002

4. Optimisation

En général, le problème d'optimisation peut être caractérisé à l'aide des variables du problème, de la fonction objective et des contraintes de design.

4.1. Identification des variables, des contraintes et de la fonction objective

Les variables du problème d'optimisation du design des centrales frigorifiques des systèmes CVCA sont : (i) la capacité de design de la centrale, (ii) le nombre de refroidisseurs et (iii) les séquences de contrôle relatives au fonctionnement de la centrale frigorifique.

Les contraintes représentent les limites supérieure et inférieure des variables du problème couvrant ainsi la capacité de design des composantes. Dans notre cas, les contraintes d'optimisation résultent aussi des limites d'opération des refroidisseurs recommandées par les manufacturiers. Par expérience, nous envisageons de limiter notre étude à un nombre maximal de 3 refroidisseurs. Nous pensons, en tenant compte de notre profil annuel de demande, qu'une centrale comportant plus que trois refroidisseurs n'est plus rentable à cause du coût d'investissement. Cela demeure tout de même une idée à confirmer.

En général, les fonctions objectives du système CVCA sont non-linéaires. La fonction objective de notre problème est la consommation d'énergie et indirectement le coût d'opération de la centrale frigorifique. Nous planifions de continuer l'étude en introduisant une fonction objective représentant le coût de cycle de vie de la centrale frigorifique. L'algorithme génétique a, évidemment, pour but de minimiser la fonction objective.

4.2. La méthode d'optimisation

Parmi les méthodes d'optimisation, nous pouvons citer : les méthodes d'optimisation monocritère (Simplex, Gradient, Newton, SEP, la programmation dynamique, les algorithmes génétiques...), la méthode de poids, les méthodes d'optimisation multicritère, la théorie de probabilités, la théorie de sous-ensembles flous, etc.

Dans notre cas, il y a plusieurs méthodes d'optimisation qui peuvent être appliquées. Notre problème s'encadre d'abord dans la première catégorie, soit l'optimisation monocritère, car nous n'avons qu'une seule fonction objective qui est la consommation d'énergie.

La méthode Simplex est souvent utilisée pour la résolution d'un système linéaire de maximisation de la fonction objective. La méthode du gradient ne correspond pas à notre problème, car c'est une méthode où les contraintes sont inexistantes ce qui n'est pas notre cas (Miramont 2003). Les études antérieures, (Wright 1996; Nassif *et al.* 2004) ont prouvé que la méthode la plus appropriée est la méthode d'optimisation à l'aide des algorithmes génétiques.

Les algorithmes génétiques comportant un seul objectif sont alors utilisés pour optimiser le design de la centrale frigorifique. La procédure d'optimisation respecte le schéma de la Figure A I-6.

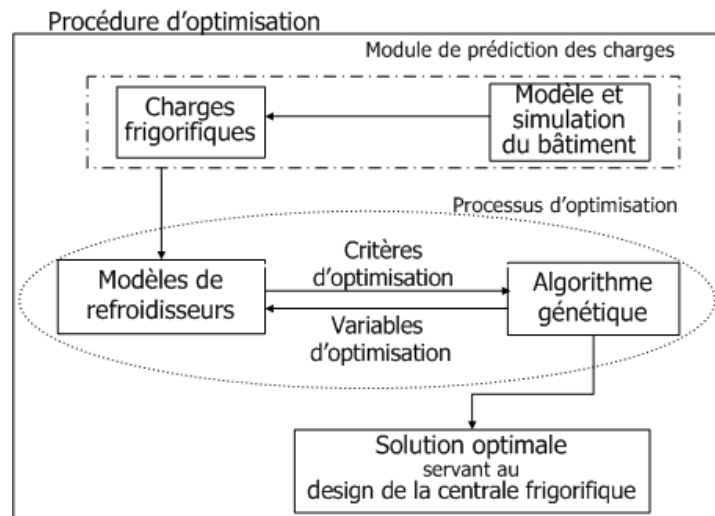


Figure-A I-6. Schéma d'une procédure d'optimisation

Pour mettre en évidence l'impact de l'optimisation sur la consommation d'énergie d'une centrale frigorifique projetée, la procédure d'optimisation, telle que mentionnée sur la Figure A-I-6, comprend : (i) module de prédiction des charges frigorifiques et (ii) processus d'optimisation qui contient les modèles de refroidisseurs et l'algorithme génétique. Dans le cas d'une centrale frigorifique existante, cas présenté dans notre article, le modèle de simulation du bâtiment est remplacé par les données provenant du monitoring. Pour que la

procédure d'optimisation soit efficace, elle doit bien refléter les caractéristiques du problème d'optimisation.

Le principe de fonctionnement de l'algorithme génétique est représenté sur la Figure A I-7.

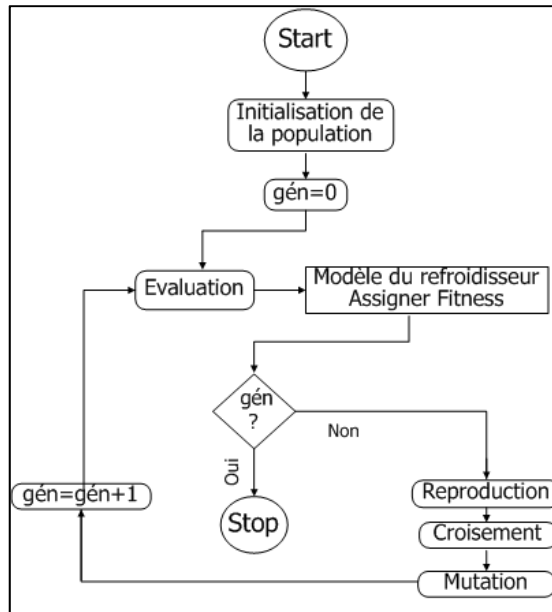


Figure-A I-7. Principe de fonctionnement de l'algorithme génétique

La recherche débute avec un nombre aléatoire de solutions. Une fois qu'une population aléatoire de solutions est créée, chacune est évaluée à l'aide du modèle du refroidisseur (calcul de la fonction objective) et une valeur fitness est assignée. La transformation la plus utilisée d'une fonction objective $g(X)$ dans une fonction fitness $f(X)$ est :

$$f(X) = g_{max} - g(X) \quad (\text{A I-8})$$

où g_{max} est la valeur maximale de la fonction objective dans la population courante.

Une condition finale est par la suite vérifiée (dans notre cas si le nombre de générations est égal à 100). Si la condition finale n'est pas satisfaite, la population de solutions est modifiée en fonction de 3 opérateurs principaux (reproduction, croisement, mutation) et une nouvelle population (meilleure) est créée. Le compteur de générations est incrémenté pour indiquer qu'une génération de l'algorithme génétique est complétée. (Deb 2001)

5. Résultats de l'optimisation

Les résultats de l'optimisation du design d'une centrale frigorifique démontrent l'impact des variables d'optimisation sur la consommation d'énergie. Il faut noter que cet impact dépend du profil saisonnier de la charge de refroidissement du bâtiment étudié.

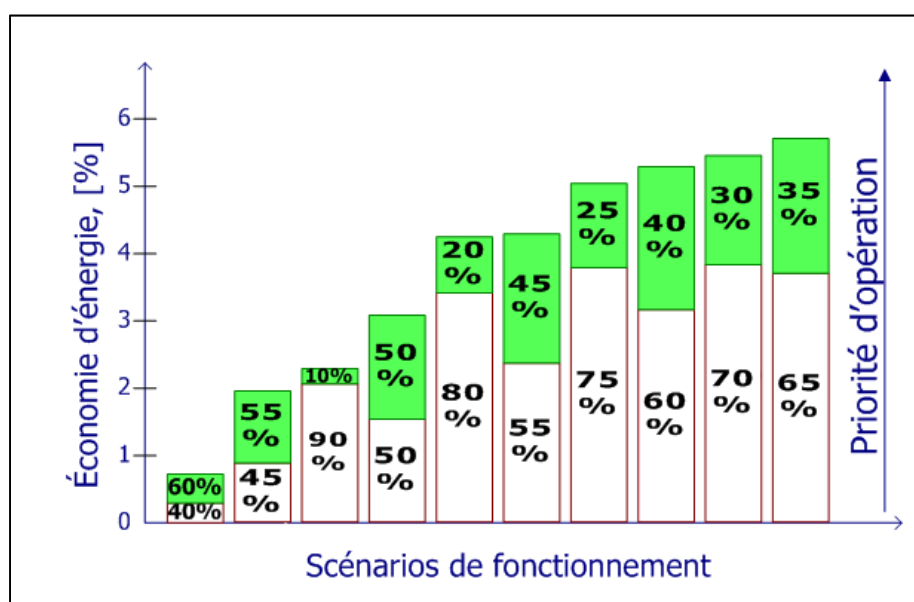


Figure-A I-8. Possibilités d'économie d'énergie dans le cas d'une centrale frigorifique composée de 2 refroidisseurs

Les résultats obtenus à l'aide de l'algorithme génétique dans le cas d'une centrale frigorifique composée de 2 refroidisseurs, démontrent que la centrale composée de deux refroidisseurs ayant 65 et 35 % de la capacité totale du design est la meilleure du point de vue énergétique. Il est à noter que le premier refroidisseur (65% de capacité du design) a la priorité d'opération par rapport au deuxième (35% de capacité du design) qui est mis en marche lorsque le premier atteint sa limite. L'économie d'énergie obtenue avec cette configuration de la centrale frigorifique est de 5.8% par rapport à la configuration initiale (un seul refroidisseur). Pour mettre en évidence les différentes possibilités d'économie d'énergie, la figure A I-8 présente les résultats pour différents scénarios de fonctionnement.

La priorité d'opération est définie ci-dessous. Dans le cas d'une centrale frigorifique composée de 3 refroidisseurs, le premier refroidisseur fonctionne lorsque la demande est faible. Il est suivi par un deuxième refroidisseur lorsque la capacité du premier atteint sa limite. Le troisième est utilisé lors des périodes de pointe, lorsque les deux premiers fonctionnent à pleine capacité.

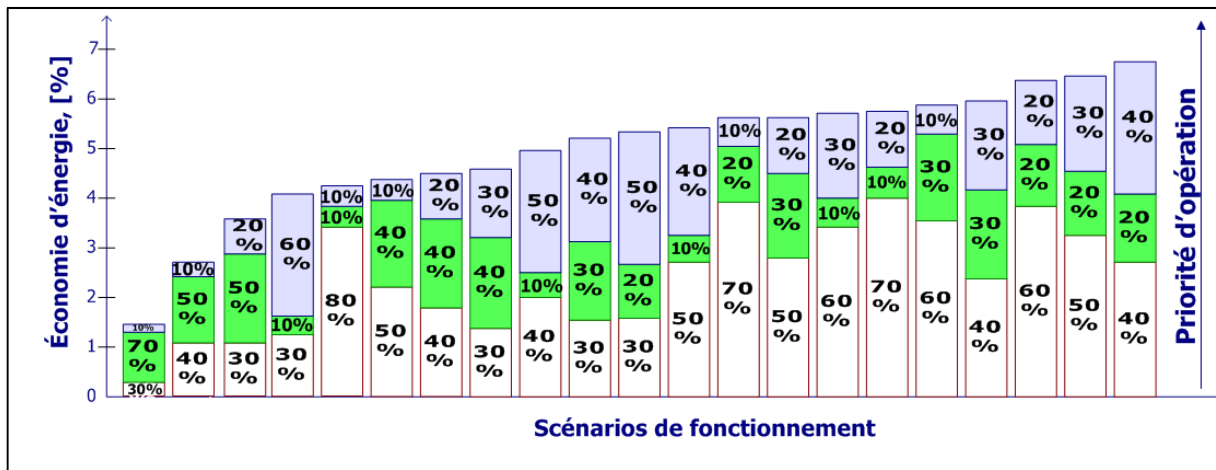


Figure-A I-9. Possibilités d'économie d'énergie dans le cas d'une centrale frigorifique composée de 3 refroidisseurs

Dans l'hypothèse d'une installation composée de 3 refroidisseurs, l'algorithme génétique trouve comme meilleure solution, une installation composée d'un premier refroidisseur ayant une capacité de 40%, un deuxième de 20% et un troisième de 40% de la capacité de design.

6. Conclusions

L'article démontre l'utilité de l'optimisation du design des centrales frigorifiques mettant en évidence les économies d'énergie qui auraient pu être réalisées dans un bâtiment existant si sa centrale frigorifique avait été optimisée.

La méthode d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques est entièrement appropriée pour le design des centrales frigorifiques. Cette méthode d'optimisation peut aussi être utilisée dans le cas des futurs bâtiments pour éviter le problème de surdimensionnement et pour diminuer la consommation d'énergie.

La comparaison d'une centrale frigorifique optimisée avec une centrale existante comportant un seul refroidisseur démontre qu'une économie d'énergie de 7% peut être réalisée. On observe que cette économie d'énergie varie en fonction de la configuration de la centrale frigorifique du bâtiment.

ANNEXE II

EVOLUTIONARY ALGORITHM WITH THREE DIFFERENT PERMUTATION OPTIONS USED FOR PRELIMINARY HVAC SYSTEM DESIGN

Magdalena Stanescu¹, Stanislaw Kajl¹, Louis Lamarche¹

¹ Département génie mécanique, École de technologie supérieure.

Abstract

This paper discusses an HVAC system design optimization using a detailed simulation method as well as an evolutionary algorithm using three different permutation options. The detailed simulation method was used to evaluate the objective function, *i.e.* HVAC energy consumption, calculated using DOE-2 software. The variables for the optimization problem were: (i) grouping of the zones served by the systems and (ii) number of systems serving each building. Constraints were selected in such a way that the limits of the variables were well represented. A comparison of the optimization results, computing time as well as convergence speed was carried out in order to select an optimal solution.

1. Introduction

HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*) systems are recognized as the greatest energy consumers in commercial and institutional buildings. Generally, designers use common sense, historical data and subjective experience in designing these systems: this includes the number of systems chosen and the grouping of the zones served by these systems. HVAC energy efficiency is not an easily calculable criterion during the selection of these systems: usually the first selection criterion is the weakest investment cost.

For this article, we used a real institutional building, that is to say the B-Pavilion at *École de technologie supérieure* (ÉTS) in Montréal, built in 2004. We modelled the building using the DOE-2 calculation engine (*commercial software developed by the United States Department of Energy*, LBNL 2003a). We used the building's own grouping of zones by system as well as the number of systems in this building, as designed by its mechanical engineer, to define the existing building.

This article briefly describes the method used for creating an HVAC optimization design for this building, already described by Stanescu *et al.* (2012a). The B-Pavilion, with its existing systems, is shown in Figure A II-1. To highlight the impact of optimization on energy consumption, we also created a reference building with its own system design: one system per façade (*i.e.* 4 VAV systems); a system serving a few zones located at Levels 3 and 4 on

the east side of the building (System UTA-7 in the existing building), and another system covering the internal zones. Analyzing the energy bills for this building, we found that the existing HVAC system design was already superior to the design for the reference building. The existing building and reference building were used as comparison tools for our optimization methods.

We then describe the results of our optimizations, which included grouping of zones and number of HVAC systems for the building. Evolutionary algorithms (*EAs*) with three different permutation options and having HVAC energy consumption as the objective function were used for optimization. The three approaches used for optimization were: an EA using crossover and mutation as variation operators; an EA using only crossover as variation operator, and an EA using only mutation as variation operator. Optimization results, computing time and convergence speed were compared in order to select an optimum solution for our problem.

The results of the optimization approaches propose design choices including grouping of zones and number of HVAC systems for the building that could prove quite interesting for engineers during the preliminary design phase. While type of system was preselected for this study, it could be serve as an optimization variable. Comparing the *(i)* existing, *(ii)* reference and *(iii)* optimized buildings (all having the same constraints and using both of the previously mentioned optimization methods) yielded significant savings in HVAC energy consumption. These savings depended upon three factors: the building's configuration; the types of HVAC systems employed and their control strategies, and the constraints imposed.

2. General description

2.1 Building description

The building studied is a university institution housing an 11.5-month teaching program. Built in 2004, it is located in Montreal. The footprint of this building is 4639 m² and the building is 34.11m high.

The entire simulated surface is 28,598 m² (31,388 m² of rough surface) and this area is set out over an underground parking zone as well as over five floors. The main zone categories for this building are: classrooms (4691.5 m²), laboratories (402.1 m²), offices (3825 m²), corridors and supply rooms (5695.6 m²), cafeteria (457 m²), kitchen (457 m²), gymnasium and training room (2011 m²), locker-rooms (355 m²), toilets (388.6m²), and a parking zone (9834 m²).

The building's characteristics are as follows:

- principal orientation North (azimuth of 40°)
- average window-to-wall ratio : 23% North, 38% East, 31% South, 32% West
- RSI = 3.5 m²C/W for external walls; RSI = 3.1 m²C/W for the roof

- double clearly powerful Low-E window with argon space ($U=1.32\text{W/m}^2\text{C}$, Shading Coefficient of 28); the glazing is fixed without frame

2.2 HVAC system description

There are a total of seven (7) HVAC systems installed in the existing building, including:

- 4 VAV (variable air volume) systems serving each of the following zones: classrooms, offices, corridors, workout room and small cafeterias. Zone grouping is shown in Figure A II-1, except for system UTA-107, which supplies mainly the training room located on the east side of the building; this system is not mentioned in Figure A II-1.
- Two CAV (constant air volume) systems, serving both gymnasiums as well as the mechanical room at Level 4 (Systems UTA-105 and UTA-106). The vocations of zones served by the systems using constant air flow rates (CAV or make-up systems) were so specific that these zones were excluded from our optimization.
- One make-up system (UTA-101), providing 100% of the outside air for the nursery and the pub.

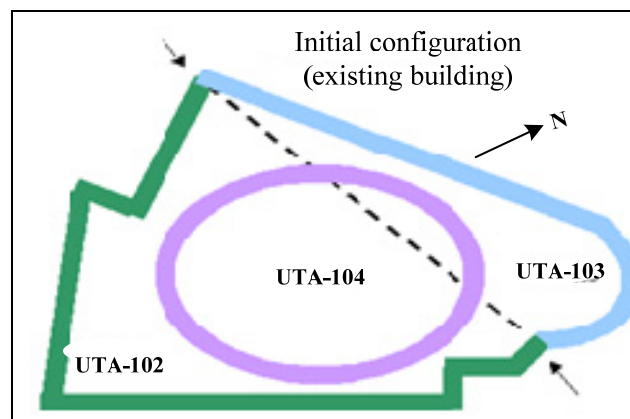


Figure-A II-1. Schematic grouping of zones by main systems for the existing building

Each HVAC system is provided with CO_2 sensor detection. Minimum weekday operating schedules run from 6 a.m. to 11 p.m. (17 hours per day).

As mentioned above, a reference building was simulated and used as a comparison tool in this study. This reference building was provided with six (6) VAV systems: one for each facade (i.e. 4 VAV systems); one VAV system mainly for the training room on the east side of the building, and one VAV system for the building's internal zones. The grouping of zones by main systems for the reference building is shown in Figure A II-2.

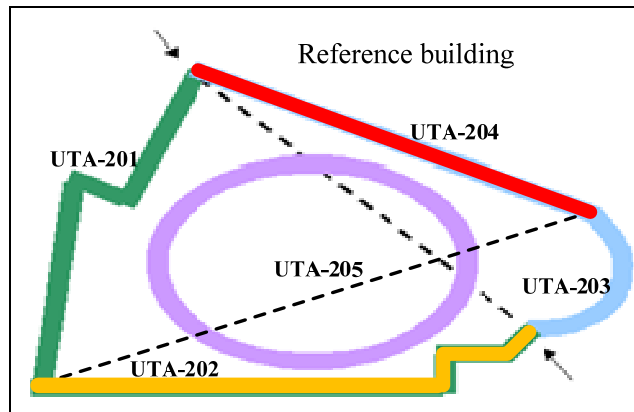


Figure-A II-2. Schematic grouping of zones by main system for the reference building

2.3 Thermal plant

The thermal plant has one chiller that provides chilled water for space cooling, using the cooling tower located on the roof. The centrifugal chiller has a cooling capacity of 450 tons (1582.5 kW) and uses R-134a as refrigerant. Superheated steam from the Montreal Community Steam Power Plant (CCUM) is used for space heating and for service water heating.

Rooms with specific demands, such as the server/telecom rooms or computer rooms are served by individual heat pumps which are cooled by a second cooling tower.

3. Optimization

As described by Stanescu *et al.* (2012a) in previous work, we had optimized the building's system design in order to carry out a better grouping of the building zones served by its systems. In our article we described the modifications required by the optimization procedure (CR_CONS) at the beginning of the design process, as suggested by ASHRAE (1993). Figure A II-3 provides a reminder of this modified design process, including the optimization procedure we used.

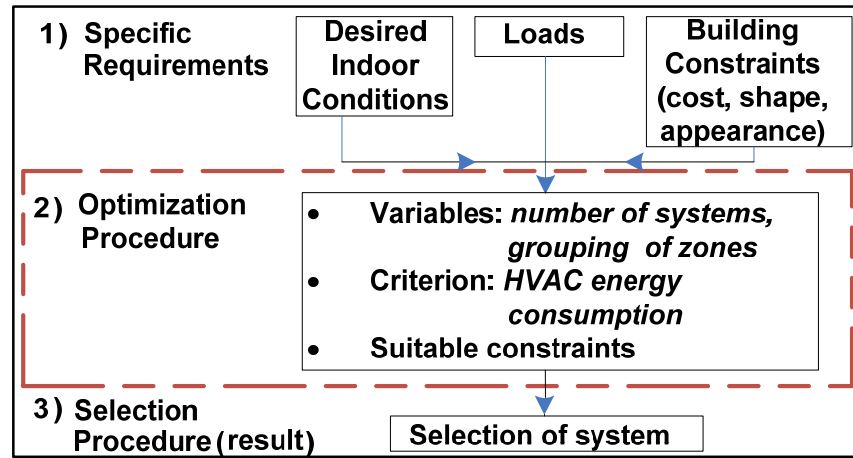


Figure-A II-3. Representation of design process, including CR_CONS optimization procedure method

3.1. Evolutionary algorithm optimization

Evolutionary algorithms using single objectives were therefore used in the method we are proposing for optimizing HVAC system design.

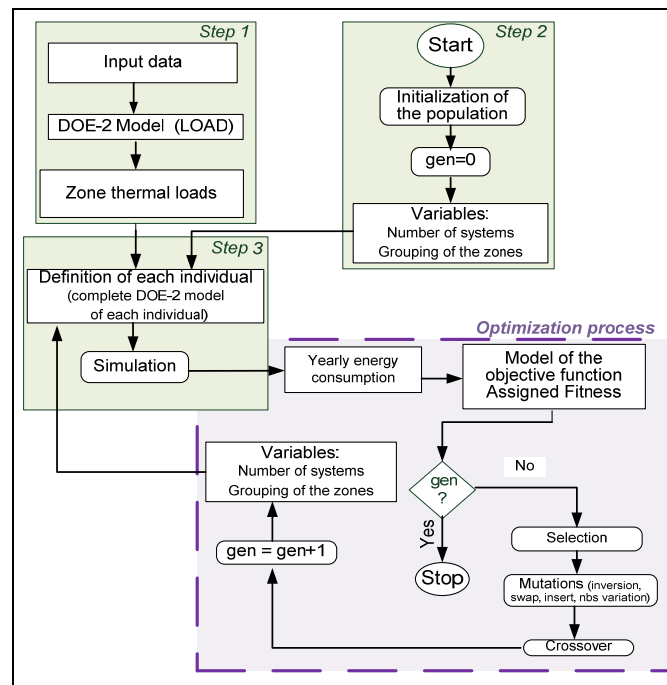


Figure-A II-4. Representation of EA optimization including calculation of energy consumption

Figure A II-4 shows an optimization using EA, including an interaction with DOE-2 software when calculating the objective function, that is to say, HVAC system energy consumption.

Steps 1 and 3 employed DOE-2 software for modeling and simulation. Interactions between DOE-2 and the EA are shown in the section entitled “*Simulation of the building.*” Step 2 occurred just once at the beginning of optimization, and represented the initialization of the first population of individuals that would need to evolve. For this reason, in this section we will discuss only EA operation in the optimization process.

In order to define our specific EA, we must describe a number of components, procedures and operators, such as: representation of individuals, evaluation function, population, parent selection mechanism, variation operators and a survivor selection mechanism.

The first stage in creating an evolutionary algorithm is to decide on a genetic representation of a candidate solution, which was, in our case, a permutation representation of a set of integers. The length of our permutation vector represented the number of zones in the building, each of which occurs exactly once. The zones were placed randomly in the vector, and in order to group zones into systems we used randomly selected break points. Increasing the number of break points by one guided us towards finding the number of systems. For example, the first system was represented by the zones placed at the beginning of the vector up to the first break point; therefore, the order in which elements occur is important.

The search for the optimum began with a random number of solutions that provided the first population that would need to evolve. At this step, we defined a population size that was neither too high (to reduce computing time) nor too low (to find the solution which would best represent the optimum). During this step, the variables (number of systems, grouping of zones) were randomly set. Once a random population of solutions had been created, each individual was defined (full DOE-2 model) and evaluated using the model for calculating the objective function. Then a fitness value was assigned to each individual. If the final condition was not met, the population of solutions was modified by genetic operators for permutation representations, and variables were once again included in the DOE-2 model in order to define the following population needing to evolve.

In order to represent valid permutations, variation operators were needed, to preserve the permutation property of each possible allele value occurring exactly once in the solution.

We chose the tournament selection operator to select parents, because of its simplicity and because selection pressure is easy to control by varying tournament size. Tournament selection involves running several "tournaments" among a few individuals chosen at random from the population. Selection quality can be adjusted easily by changing tournament size (n): if a tournament size is greater, then there are more chances that it will contain members of above-average fitness; and if a tournament size is smaller, then it is likely to contain low-fitness members. In our case, there were as many tournaments as there were individuals to select. The winner of each tournament (the one with the best fitness) was selected for

modification. To keep from losing the best solution found, we used elitism, placing the individual with the best fitness into the next generation, thereby increasing EA performance. The probability that an individual will be selected as the result of a tournament depends upon four factors, namely: (i) its rank in the population; (ii) tournament size n ; (iii) the probability that the best individual will be selected in any tournament (usually this is 1 , lower selection pressure); (iv) whether individuals are chosen with or without replacement, (Eiben and Smith, 2003).

We then applied variations operators in order to maintain diversity within the population and inhibit premature convergence.

Three forms of mutation were chosen: swap mutation, insert mutation and inversion mutation. Swap mutation works by randomly picking two positions in the string and swapping their allele values. Insert mutation works by picking two alleles at random and moving one so that it is next to the other, shuffling along the others to make room. Inversion mutation works by randomly selecting two positions in the string and reversing the order in which the values appear between those positions (Eiben and Smith, 2003). The probability of mutation can be applied at two levels: the chromosome level and the gene level (Wright *et al.*, 2004). The probability of gene mutation varies according to the form of mutation operator use. The three operators below work by making changes to the grouping of zones by system, and by keeping the same number of systems. To maintain diversity in the population, we also wanted to modify the number of systems. For this reason, we chose other break points randomly.

The crossover form we employed is called *order crossover*. Order crossover begins by copying a randomly chosen segment of the first parent into the offspring. From the replaced portion on, the rest is filled up by the remaining genes in the order in which they appear in the second parent, where genes already present are omitted and the order is preserved (Eiben and Smith, 2003).

The main genetic operators for our optimization problem were therefore: selection (tournaments); mutation (inversion, sliding, insertion and change in number of systems-nbs); and crossover, depending on the type of EA we chose to employ. A new, improved population was then created. The counter was increased to indicate that a new generation had been completed (Deb, 2001).

3.2. Identification of the objective function, variables and constraints

A design optimization problem can be characterized using the problem's variables, objective function and constraints.

The objective functions generally used in HVAC system design are the criteria used by design engineers for comparing candidates' design solutions; these objective functions (i.e.: system-operating cost, capital cost, life-cycle cost) are usually nonlinear (Fong *et al.* 2006,

Wright and Hanby 1987, Hanby and Wright 1989). Our problem's objective function was energy consumption by HVAC systems, computed using DOE-2 software for each individual in the population generated by the evolutionary algorithm. Our objective was to minimize the objective function. Thereafter, individuals with the lowest energy consumption from each tournament were selected and modified in order to create the next population.

The variables for an optimization problem when designing HVAC systems are: (i) grouping of zones served by systems and (ii) number of systems serving a building. For this study, system type had already been chosen, but it could also have served as a variable.

Although this problem appears straightforward, it is actually quite complex, because the two variables previously mentioned are dependent: if the number of systems changes, then the grouping of the zones changes as well. The danger exists of finding the same zone several times within the same grouping. As mentioned above, in order to bypass this problem, we used permutation representations for individuals.

In general, constraints represent the higher and lower limits of problem variables, either directly or indirectly. It follows that, in order to avoid the risk of having system airflow rates that were too low or too high, system size became our first constraint, and was represented by minimal and maximal airflow rates (AFR). We accomplished this by limiting the system's minimum and maximum design AFR to 8% and 50% of total AFR (calculated using the building's corresponding peak load), respectively. This constraint indirectly gave us the minimum or maximum number of systems allowed during optimization, i.e. between 2 and 12 possible systems.

Our second constraint was the size of the system's air ductwork, which took into account the location of zones served by the same system in order to reduce costs associated with the air duct network. The design of air ducts for VAV systems has already been the focus of an optimization method developed by Kim *et al.* (2002a) using GA. In our case, this problem was quite complex due to the large number of parameters involved, which changed for each EA-generated individual. For this reason, we developed a simplified and indirect method for taking into account the size of system air ductwork: we considered that the distance between the centre of gravity of all zones served by a single system and the mechanical room could serve as a good approximation for quantifying the size of system air ductwork. We applied a weighting method to each segment using airflow rates, and to characterize this weighted size we named it “system extent” and coined a term for the unit: [m_{extent}].(Stanescu *et al.*, 2012a)

4. Simulation of the building

Optimization using a building energy simulation program is often used to reduce annual heating and cooling energy consumption, even though this requires a significant amount of experience, time, and effort to enter detailed building parameters (Bambrink *et al.* 2011, Smith *et al.* 2012a).

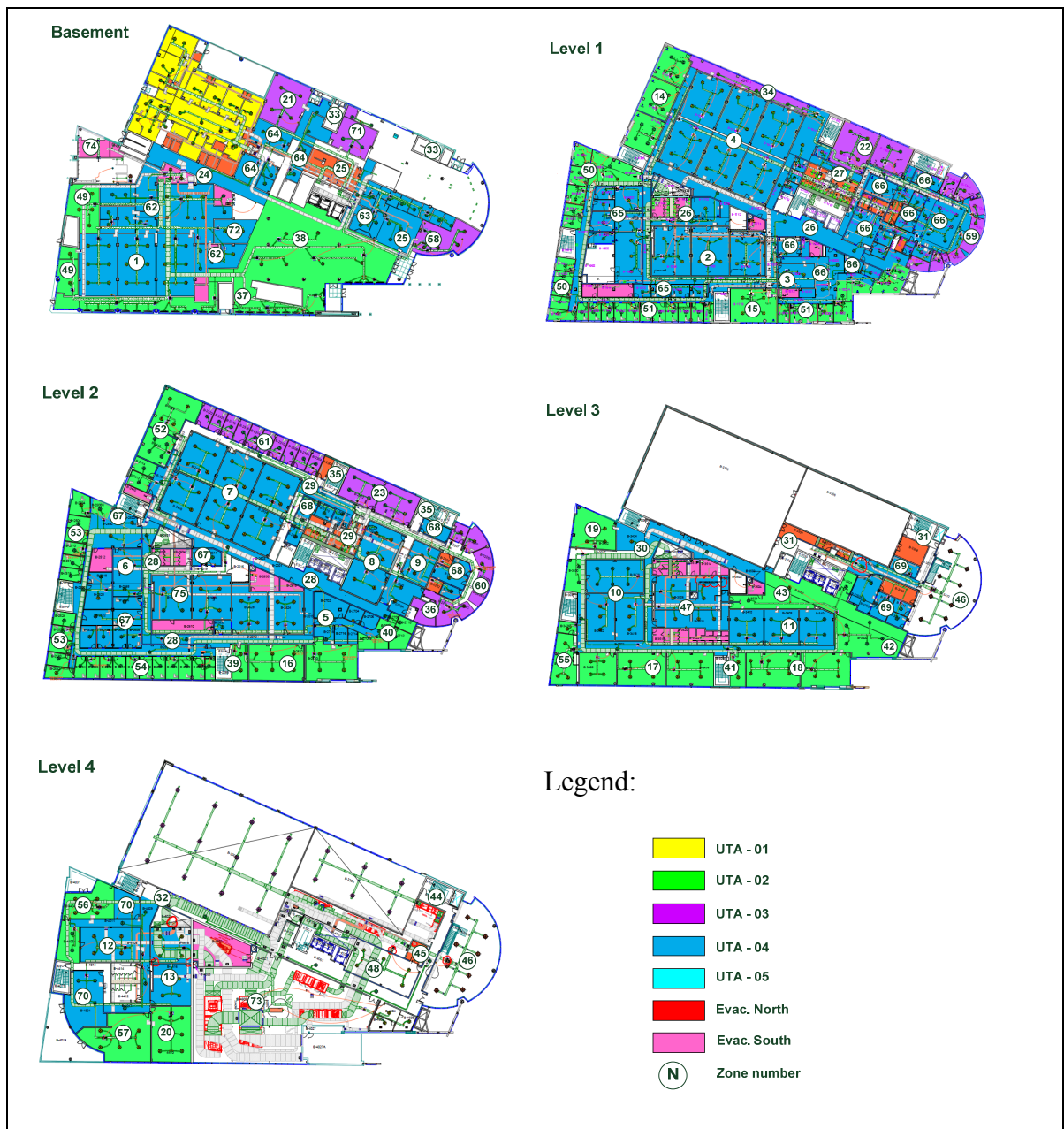


Figure-A II-5. Building zones for the five levels of the B-Pavilion at ETS

Our optimization method required the detailed building model in DOE-2 software to determine HVAC energy consumption as shown in Figure A II-5. All the data shown below, as well as the architecture, electricity and ventilation plans, were necessary in order to design the building model. Once we had defined the building in the simulation software, along with its architecture, envelope components, vocation, lighting and zone equipment, we proceeded to define its HVAC systems and plants. Because the vocation of thermal zones would remain unchanged during the optimization process, zone load was calculated once, at the beginning

of the process (Figure A II-4, Step 1). The ‘typical year’ weather input used in our building energy simulation was the one for the City of Montreal (CTMY2 file). The EA began by initializing the first population of individuals needing to evolve. (Figure A II-4, Step 2). Modelling of the building had to be completed for each individual, and depended upon the variables selected by the EA (number of systems, and grouping of the zones). This action was carried out for each iteration (Figure A II-4, Step 3). Definition of HVAC systems depends upon choice of variables; these were chosen both at the beginning of the optimization process (Figure A II-4, Step 2) and during the EA optimization process (Figure A II-4, Step 3). These variables influenced some system parameters, such as design airflow rate, fan power, system operating schedule, and temperature difference across fans. HVAC systems were defined for each individual generated (Figure A II-4, Step 3), taking into account the zone loads already calculated in Step 1.

To calculate fan power, we used ASHRAE 90.1 standard correlations (ASHRAE 2004): for an airflow rate less than 20,000 cfm (9438.9 L/s), fan power was 1.7 hp/1000 cfm (1.26 kW per 471.9 L/s), and for an airflow rate greater than 20,000 cfm (9438.9 L/s), fan power was 1.5 hp/1000 cfm (1.11 kW per 471.9 L/s). Each system's operation schedule was viewed as the union of all operating schedules for the zones served by that system.

The temperature difference across fans was calculated based on fan efficiency (70% in our case) and on the efficiency of the fan motor. We adjusted the parameters for each individual and for the size of the building's plant equipment. Using DOE-2 software, we obtained HVAC system energy consumption for each individual in the EA population; this gave us a selection criterion for defining the next population.

The building's simulation model was realized using DOE-2 software. In order to validate the building model, it was necessary to compare the results obtained using a simulation with energy bills. We found that the difference between annual energy consumption, obtained using the simulation model, and these energy bills was only about 2.8%. (Stanescu *et al.*, 2007)

Figure A II-3 shows all five levels of the building: zone numbers are marked. Approximately 75 zones were used in our optimization method.

a) Optimization using mutation as the only variation operator

Optimization without crossover may be classified as an evolutionary strategy (ES), because it involves a real-valued representation of individuals; mutation is crucial (sometimes it is the only operator), and recombination is secondary (Eiben and Smith 2003, Fong *et al.* 2006). In our case, the probability of chromosome mutation was approximately 0.9, since the evolution strategy selected used mutation as its primary search mechanism. The probability of gene mutation varied according to the form of mutation operator used, and the random changes

applied by the algorithm modified individual genes and improved the value of the fitness function.

b) Optimization using crossover and mutation as variation operators

This type of optimization algorithm respects the principles of a real coded genetic algorithm (GA) and uses crossover and mutation operators as variation operators. In our case, the probability of chromosome mutation was about 0.5 and the probability of chromosome recombination was about 0.4.

c) Optimization using crossover as the only variation operator

In order to see how the EAs perform when there is no mutation, we tested an optimization algorithm using crossover as the only variation operator. In our case, the algorithm selected genes from the individuals in the initial population and recombined them. The probability of chromosome crossover was approximately 0.8, since the evolutionary algorithm uses crossover as the primary search mechanism.

For all types of EA, we used elitism in order to preserve the best solution found: we placed the individual with the best fitness from each tournament selection into the next generation.

5. Discussion and analysis of results

We compared the three types of EA presented above, and chose the fast optimization method, which yielded the best optimization results.

Tableau-A II-1. Optimization results for different steps

ITERATIONS	HVAC ENERGY CONSUMPTION, [MWh]		
	100	250	500
a) mutation	2114.1	2073.3	2064.2
b) mutation + crossover	2063.3	2020.3	2016.7
c) crossover	2113.4	2099.3	2078.05

Optimization evolution curves are shown in Figure A II-6, for 500 iterations. We observed that these optimization curves were comparable for the three cases studied (a, b, or c). A wide gap in computing time remained, however: Case *a*) required only 2 days to find the optimum solution, while Case *b*) required 3½ days and Case *c*) required 4 days.

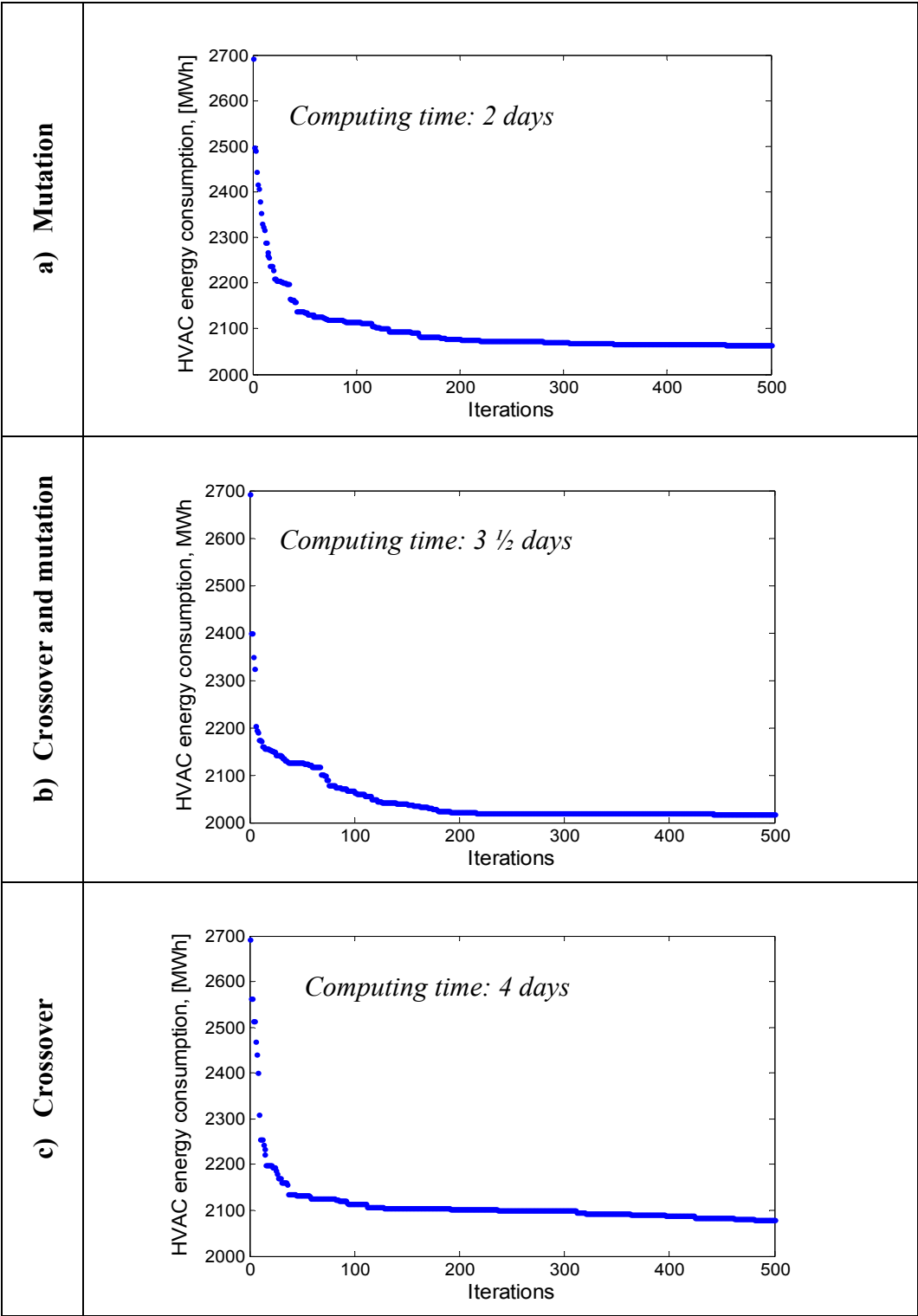


Figure-A II-6. Evolution of HVAC energy consumption using different EA variation operators

Tableau-A II-2. Comparison of results among the reference, existing and optimized buildings' HVAC system designs

SOLUTION	NUMBER OF SYSTEMS	SYSTEM EXTENT, [m _{extent}]	FAN ENERGY CONSUMPTION, [MWh]	HVAC ENERGY CONSUMPTION, [MWh]	HVAC ENERGY SAVINGS	TOTAL AFR, [L/s]
Reference building	6	2.8075*10 ⁴	688.57	2691	-	115190
Existing building	4	2.8161*10 ⁴	657.05	2544.9	5.42%	111150
Solution a)	6	2.6559*10 ⁴	603.84	2064.2	23.29%	105549
Solution b)	6	2.7628*10 ⁴	595.03	2016.7	25.05%	106153
Solution c)	6	2.7650*10 ⁴	605.54	2078.1	22.78%	105854

Intermediary results for HVAC energy consumption for the three cases studied are also shown in Table A II-1 for 100, 250 and 500 iterations. The differences in HVAC energy consumption after 500 iterations are quite small. Between Case *a*) and Case *c*), we find 0.66% savings (10.85 MWh), and 2.9% savings (64.35 MWh) between Cases *b*) et *c*).

Compared optimization results for the reference and existing buildings are shown in Table A II-2. Here we see that the optimum solutions yielded 6 systems, and we also note a reduction in total AFR of approximately 8%, as compared to the reference building. HVAC energy consumption savings were approximately 25% compared to those for the reference building, and about 20% compared to the existing building. For Table A II-2 as well as Figure A II-6, we decided to retain Case *a*) as the optimum solution for our problem, that is to say, an optimization process using mutation as variation operator. In our view, this represented a good compromise between length of computing time (2 days instead of 3½ or 4 days) and optimization results. We based our choice partly on the fact that we had used the number of iterations, i.e. 500, as our stopping criterion. If we had chosen desired consumption (which had been hard to quantify in the preliminary design) as the stopping criterion, then the optimization would have stopped when the HVAC energy consumption target was reached, thereby using less computation time. It is also true that types of variation operators used in an optimization problem can slightly alter optimization results.

Optimal zone groupings for Solution *a*) are shown in Table A II-3. The zones have the same numbering as those shown in Figure A II-5.

Tableau-A II-3. Zone groupings for Optimal Solution *a*)

SYST	ZONES
S1	1, 4, 22, 23, 26, 27, 28, 34,37
S2	3, 19, 21, 31, 32, 33, 36, 39, 41, 44, 46, 47, 56, 68, 71, 73
S3	10, 12, 29, 35, 49, 51, 61, 69
S4	8, 16, 24, 40
S5	2, 5, 6, 7, 11, 13, 15, 20, 25, 30, 38, 42, 43, 45, 48, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 72, 74, 75
S6	9, 14, 17, 18

Zones were grouped mainly in order to serve one or two façades of the building and also in order to respect the C_{SE} constraint. We also noted there were systems that grouped zones located on only two or three levels of the building. Internal and external zones are often grouped under the same system, to provide more load diversity.

For this optimization problem, we did not take into account the constraint related to the practice of grouping zones with different occupancy schedules under a single system. We did find, however, that zone operation schedules were taken into consideration during the optimization process. Compared to the reference or existing building, where each system serves all types of zone schedule, in the optimum solution there were systems serving only one type of zone schedule. On the other hand, the constraints imposed, mainly C_{FR} , forced zones with different schedules to be grouped under the same system.

6. Conclusions

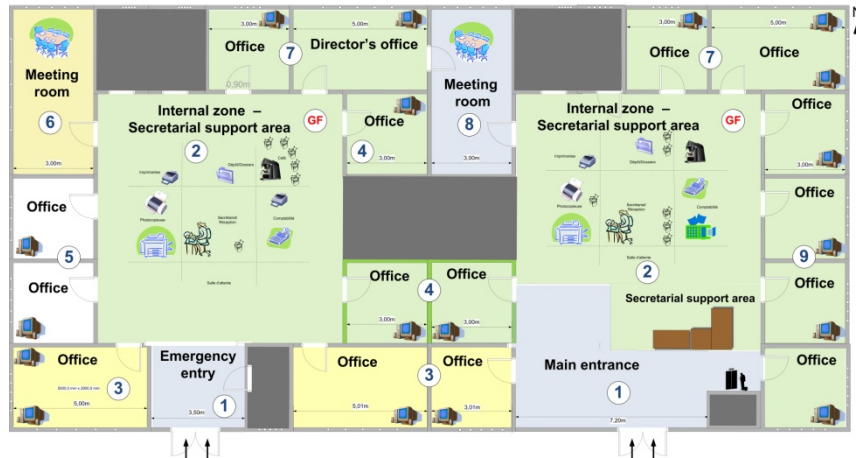
This paper has applied the CR_CONS optimization method to a real building; it has demonstrated that the proposed optimization method can be adapted for preliminary HVAC system design. A comparison among three different permutation options (in terms of optimization results, computing time and convergence speed) was done in order to select an optimal solution for our problem. The solutions include an optimal number of HVAC systems as well as an optimal grouping of zones for each building studied. This method therefore contributes to improving HVAC system design, because the solutions generated by this optimization method ensure that all available VAV candidate systems are considered in this process, while respecting the constraints imposed.

Comparing EA using three different permutation options, we determined that an EA using only mutation as variation operator constitutes a good compromise among factors such as optimization results, convergence speed and especially, computing time. I must be specified, however, that this decision depends upon the stopping criterion as well as on the variation operators used in the optimization problem, which and can slightly alter the results. It follows that the evolutionary nature of the search algorithm has a substantial impact in terms of fitness function evaluation count (= computation time) and quality of solution. This type of evolutionary algorithm, using mutation as the only variation operator, was used in our work.

For our optimization problem, approximate HVAC energy consumption savings were 22.7% to 25%, compared to those for the reference building, and about 18.3% to 20.8%, compared to the existing building. In general, these energy savings depended upon building configuration, types of HVAC systems, and their control strategies. Diversity in building load profiles also had a significant impact on energy savings.

GRAPHIC REPRESENTATION OF OPTIMAL SOLUTION (CR_CONS METHOD)

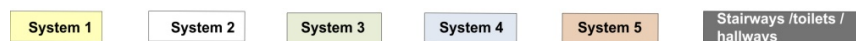
GF

**L1/L2**

L3



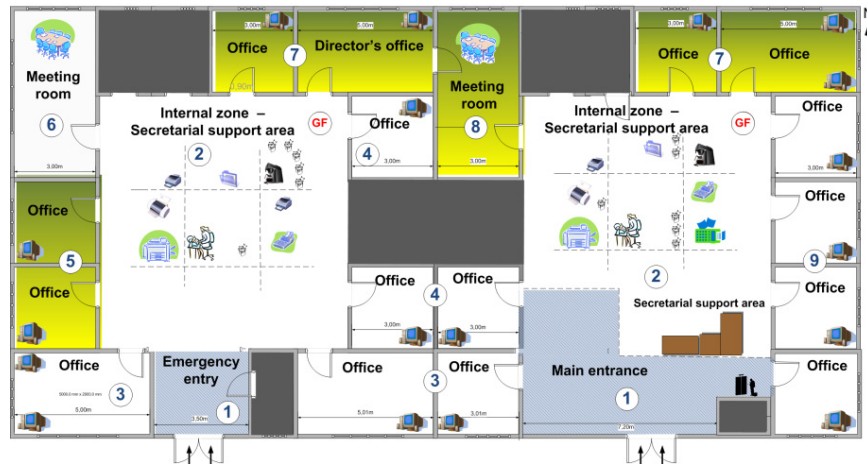
Legend:



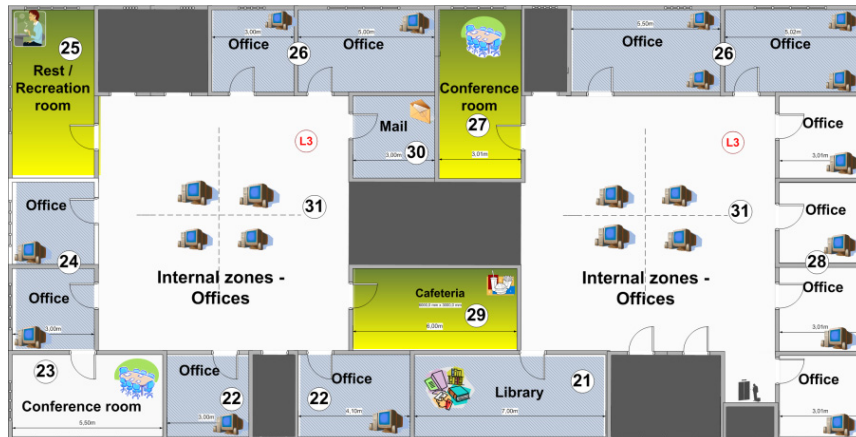
APPENDICE B

GRAPHIC REPRESENTATION OF OPTIMAL SOLUTION (CR_GLR METHOD)

GF

**L1/L2**

L3



Legend:



LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACCA. 1990. *Manual Q: Low Pressure, Low Velocity Duct System Design for Commercial Applications*, Arlington, VA: Air Conditioning Contractors Association, 316 p.
- ASHRAE. 2004. *ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-200, Energy Standard for Buildings Except Low-rise Residential Buildings*, I-P Edition, ISSN 1041-2336, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 226 p.
- ASHRAE. 1993. *Air-Conditioning Systems Design Manual*. ISBN 1-883413-00-1, Prepared by the ASHRAE 581-RP Project Team Harold G. Lorsch, Principal Investigator. Atlanta, GA: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE. 2009 *ASHRAE Handbook—Fundamentals*, I-P Edition, ISBN 978-1-933742-54-0, Chapter 21, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 983 p.
- Asiedu, Y., Besant, Robert W. et P. Gu. 2000a. « HVAC duct system design using genetic algorithms ». *HVAC&R Research*, vol. 6, n° 2, p. 149-173.
- Asiedu Y.. 2000b. « Life-Cycle cost analysis and probabilistic cost estimating in engineering design using an air duct design case study ». Mémoire de thèse en génie mécanique, Saskatoon, University of Saskatchewan, 196 p.
- Ardakani, A. Jahanbani, Ardakani F. Fattahi. et S.H. Hosseini. 2008. « A novel approach for optimal chiller loading using particle swarm optimization ». *Energy and Buildings*, vol. 40, n° 12, p 2177-2187.
- Bambrink, S.M., Sproul A.B et D. Jacob. 2011. « Design optimization for a low energy home in Sydney ». *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 7, p. 1702-1711.
- BESTD. U.S. Department of Energy (DOE). 2011. In *Building Energy Software Tools Directory*. En ligne. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>. Consulté le 15 septembre 2011.
- Bouchlaghem, N.M. et K.M. Letherman. 1990. « Numerical optimization applied to the thermal design of buildings ». *Building and Environment*, vol. 25, n° 2, p. 117-124.
- Brambley, M.R., Crawley D.B., Hostetler D.D., Stratton R.C., Addison M.S., Deringer J.J., Hall J.D. et S.E. Selowitz. 1988. Technical report. *Advanced Energy Design and Operation Technologies Research: Recommendations for U.S. Department of Energy Multiyear Program Plan*. Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, Report PNL-6255, p. 195

- Buys, Johan H. et E.H. Mathews. 2005. « Investigation into capital costs of HVAC systems ». *Building and Environment*, vol. 40, n° 9, p. 1153-1163.
- Caldas, L.G. et L.K. Norford. 2002. « A design optimization tool based on a genetic algorithm ». *Automation in Construction* vol. 11, n° 2, p. 173-184.
- Caldas, L.G. et L.K. Norford. 2003. « Genetic algorithms for optimization of building envelopes and the design and control of HVAC systems ». *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, n° 3, p. 343-351.
- Canbay, C.S., Hepbasli A. et G. Gokcen. 2004. « Evaluating performance indices of a shopping centre and implementing HVAC control principles to minimize energy usage ». *Energy and Buildings*, vol. 36, n° 6, p. 587-598.
- Cappellin, T.E.. 1997. « VAV systems - what makes them succeed? What makes them fail? ». *ASHRAE Transactions*, vol. 103, n° 2, p. 814-822.
- Carriere, M., Schoenau G.J. et Robert W. Besant. 1998. « Revised procedure for duct design with minimum life-cycle cost ». *ASHRAE Transactions*, vol. 104, n° 2, p. 62-67.
- Chan, K.T. et F.W. Yu. 2004. « How chillers react to building loads ». *ASHRAE Journal*, vol. 46, n° 8, p. 52-58.
- Charrette, R.P.. 1980. « Life-cycle cost analysis for buildings ». *ASHRAE Transactions*, vol. 86, n° 2, p. 167-193.
- Chen, C.W., Lee C.W. et C.Y. Chen. 2010. « To enhance the energy efficiency of chiller plants with system optimization theory ». *Energy & Environment*, vol. 21, n° 5, p. 409-424.
- Chen, S. et S. Demster. 1995. *Variable Air Volume System for Environment Quality*. ISBN 978-0070110854, 1^{ère} édition, New York: McGraw-Hill, 373 p.
- CNRC. 1997. *Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments – Canada 1997 (CMNÉB)*. Conseil national de recherches Canada, CNRC 38731F, 234 p.
- CNRC. 1999. *Conformité des bâtiments par la méthode de performance: Methodes de calcul pour démontrer la conformité au Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments à l'aide de la performance du bâtiment dans son ensemble*. Conseil national de recherches Canada, Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, p. A.6-A.8.
- Deb, K.. 2001. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. ISBN 978-0471873396, 1^{ère} édition, New York: John Wiley & Sons, Ltd., 518 p.
- Djunaedy E., Van der Wymelenberg K., Acker B. et H. Thimmana. 2011. « Oversizing of HVAC system: Signatures and penalties ». *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 2-3, p. 468-475.

- Du, Z. et X. Jin. 2007. « Detection and diagnosis for multiple faults in VAV systems ». *Energy and Buildings*, vol. 39, n° 8, p. 923-34.
- Eiben, A.E. et J.E. Smith. 2003. *Introduction to Evolutionary Computing*, ISBN 978-3540401841, Berlin Heidelberg (Allemagne): Springer-Verlag, 316 p.
- Energy Design Resources. 1998. *Design brief: Integrated Energy Design*. En ligne. <http://www.energydesignresources.com/media/1711/EDR_DesignBriefs_design.pdf>. Consulté le 6 décembre 2011, 34p.
- EPA. 2000. *Energy cost and IAQ performance of ventilation systems and controls*. Executive summary. EPA-4-2-S-01-001, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 37 p.
- Fong K.F., V.I. Hanby et T.T. Chow. 2006. « HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming ». *Energy and Buildings*, vol. 38, n° 3, p. 220-231.
- Gen, M. et R. Cheng. 1997. *Genetic algorithms and engineering design*. ISBN 978-0471127413, 1^{ère} édition, New York: John Wiley & Sons, Ltd., 432 p.
- Goldberg, D.E.. 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. ISBN 978-0201157673, 1^{ère} édition, Boston (États-Unis): Addison-Wesley Professional Publishing Co., Inc., 432 p.
- Griffith, J.W.. 1978. « Benefits of daylight-cost and energy saving ». *ASHRAE Journal*, vol. 20, n° 1, p. 53-56.
- Hanby V.I. et J.A. Wright. 1989. « HVAC optimization studies: Component modelling methodology ». *Building Services Engineering Research & Technology*, vol. 10, n° 1, p. 35-39.
- Henninger, R. H.. 1975. *NECAP, NASA's Energy-Cost Analysis Program*. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC.
- Hittle, D.C.. 1977. *The Building Loads Analysis and System Thermodynamics Program, BLAST*. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, IL.
- Holland, J.H.. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press. (États-Unis), 183 p.
- Holland, J.H.. 1992. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. ISBN 978-0262581110, 1^{ère} édition, Cambridge, MA (États-Unis): MIT Press, 211 p.
- Horwitz-Bennett, B.. 2004. « Zoning In ». *Consulting-Specifying Engineer*, vol. 36, n° 5, p. 23-27.

- Hydro-Québec. 2011. Guide méthodologique - SIMEB 3.0 bêta 2, Institut de recherche d'Hydro-Québec, Shawinigan (Qc)
- Jacobs, P.C. et C. Higgins. 2003. *Small HVAC system design guide: design guidelines*, California Energy Commission, rapport n° 500-03-082-A12, 84 p.
- Jacobs, P.C. et C. Higgins. 2004. « Integrated design for small commercial buildings: an idea whose time has come ». *Heating/Piping/Air Conditioning Engineering*, Juillet 2004, p. 44-53
- Kajl, S.. 1999. « Les systèmes à volume variable : efficacité et qualité de l'air ». In 2^{ième} colloque AGPI, Association des gestionnaires des parcs immobiliers institutionnels, Montréal.
- Kajl, S., Nassif, N. et M. Daigle. 2003. « Monitoring: un outil d'optimisation de l'opération des systèmes CVCA ». In 1^{ère} Conférence Internationale sur l'énergie et l'architecture verte, Bangkok, p. 65-72
- Karunakaran, R., Kavitha M. et S. Iniyan. 2006. « Variable air volume duct system design optimization by genetic algorithm ». In *International Conference on Energy and Environment*, Universiti Tenaga Nasional (UNITEN), Malaysia, 7 p.
- Kim, T., Spitler J.D. et R. Delahoussaye. 2002a. « Optimum duct design for variable air volume systems, Part 1: Problem Domain Analysis of VAV Duct Systems ». *ASHRAE Transactions*, vol. 108, n° 1, p. 96-104
- Kim, T., Spitler J.D. et R. Delahoussaye. 2002b. « Optimum duct design for variable air volume systems, Part 2: Problem Domain Analysis of VAV Duct Systems ». *ASHRAE Transactions*, vol. 108, n° 1, p. 105-127
- Kim, D.. 2010. « Optimizing cost effective energy conservation measures for building envelope » *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, vol. 107, n° 3, p. 70-80
- Kreider, J.F. et J.S. Haberl. 1994. « Predicting hourly building energy usage: "The great energy predictor shootout" – overview and discussion of results ». *ASHRAE Transactions*, vol. 100, n° 2, p. 1104-1118.
- Kreider, J.F., Curtiss P.S. et A. Rabl. 2009. *Heating and cooling of buildings: design for efficiency, Revised second edition*, ISBN 978-1439811511, États-Unis: CRC Press, Taylor & Francis Group, 863 p.
- Kusuda, T.. 1974. *NBSLD: Computer Program for Heating and Cooling Loads in Buildings*. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- LBNL. 1991. *DOE-2 Basics Version 2.1E*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Simulation Research Group, LBL-29140, Berkely, CA (États-Unis). 351 p.

- LBNL. 1993a. Building energy use and cost analysis tool: *DOE- 2.1E Version 2*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (États-Unis).
- LBNL. 1993b. *DOE-2 Supplement – Version 2.1E*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Simulation Research Group, LBL-34946, Berkely, CA (États-Unis). 992 p.
- Linder, R. et C.B. Dorgan. 1997. « VAV systems work despite some design and application problems ». *ASHRAE Transactions* vol. 103, n° 2, p. 807-813.
- Lokmanhekim, M., Henninger R.H, Shih J.Y. et C.C. Groth. 1971. « Computer Program for Analysis of Energy Utilization in Postal Facilities ». Vol. III, présenté à l'*U.S. Postal Service Symposium*, Washington, DC (États-Unis).
- Lollini, R., Barozzi B., Fasano G., Meroni I. et M. Zinzi. 2006. « Optimization of opaque components of the building envelope. Energy, economic and environmental issues ». *Building and Environment*, vol. 41, n° 8, p. 1001-1013.
- Weiding, L. et F. Cunyang. 1995. « Feasibility analysis of using the ASHP chiller in Shanghai area ». *HV&AC*, vol. 5, p.3-7
- Mathews, E.H. et D.T. Claassen. 2003. « A new duct design software tool ». *Building and Environment*, vol. 38, n° 4, p. 521-531.
- McDonnell, J.R., R.G. Reynolds et D.B. Fogel. 1995. *Evolutionary Programming IV: Proceedings of the Fourth Annual Conference on Evolutionary Programming, San Diego, CA, USA, March 1-3, 1995*. ISBN 0-262-13317-2, Cambridge, MA (États-Unis): MIT Press.
- McQuiston, F.C., Parker J.D. et J.D. Spitler. 2004. Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design. Sixième édition. ISBN 978-0471470151. New York (États-Unis): John Wiley & Sons, Ltd., 642 p.
- Miramont, M.. 2003. *Systémique et modélisation des systèmes*. [Notes du cours TCED4, Master MEGA]. Lyon (France): Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Mitchell, M.. 1998. *An introduction to genetic algorithms*. Troisième édition. ISBN 978-0262631853, Cambridge, MA (États-Unis): MIT Press, 221 p.
- Monks, M., B.M. Oh et J. Dorsey. 1998. *Audiooptimization: goal based acoustic design*. MIT Technical Report MIT/LCS/TM-588, Massachusetts Institute of Technology, MA (États-Unis), 25 p.
- Mossman, M.J.. 2008. Means Mechanical Cost Data 2008, 31st annual edition, RSMeans, ISBN 978-0876290484. Kingston, MA (États-Unis): R.S. Means Co., 725 p.

- Nagai, T., Agami R. Et D. Massie. 2002. « Optimization method for minimizing annual energy, peak energy demand, and annual energy cost through use of building thermal storage ». *ASHRAE Transactions*, vol. 100, n° 1, p.43-53
- Nassif, N. et S. Kajl. 2003. « Modélisation des composantes d'un système CVCA existant ». In *VI^e Colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes (CIFQ 2003)*. (Québec, 26-28 mai 2003), article 12-01.
- Nassif, N., Kajl S. et R. Sabourin. 2004. « Two-objective on-line optimization of supervisory control strategy ». *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 25, n° 3, p. 241-251.
- Nichols, L.. 2001. « La modélisation des systèmes énergétiques de bâtiment – un outil de décision ». In *La conférence canadienne sur la simulation énergétique dans les bâtiments (ESIM 2001)*. (Ottawa, 13-14 juin 2001), séance 1-1, 8 p.
- Orosa, J.A. et A.C. Oliveira. 2011. « Software tools for HVAC research ». *Advances in Engineering Software*, vol. 42, n° 10, p. 846-851
- Ouarghi, R. et M. Krarti. 2006. « Building shape optimization using neural network and genetic algorithm approach ». *ASHRAE Transactions - Technical and Symposium Papers presented at the 2006 ASHRAE Winter Meeting*, vol. 112, n° 1, p. 484-491
- Petit Larousse. 1973. *Petit Larousse illustré, dictionnaire encyclopédique pour tous*. Librairie Larousse : 17, rue du Montparnasse, et boulevard Raspail, 114. Paris VI^e, imprimé au Canada, 1790 p.
- Petit Larousse. 1995. *Le petit Larousse illustré 1995 en couleurs, dictionnaire encyclopédique*. Nouvelle édition. Larousse: 17 rue du Montparnasse 75298 Paris Cedex 06. ISBN 2033013316, 1784 p.
- Petit Robert. 1989. *Petit Robert 1- dictionnaire de la langue française*. Rédaction dirigée par A. Rey et J. Rey-Debove, ouvrage édité par les Dictionnaires Le Robert: 107 av. Parmentier, 75011 Paris (France), n° impression G89/27483 P, Orléans Maury-imprimeur S.A., 45330 Malesherbes, 2949 p.
- Radford, A. et J.S. Gero. 1979. « On the design of windows ». *Environment and Planning B*, vol. 6, n° 1, p. 41-45.
- Reddy, T.A. et L.K. Norford. 2002. *Building Operation and Dynamics within an Aggregated Load*. Final report for ASHRAE research project 1146-RP, ASHRAE, Atlanta (États-Unis), 244 p.
- Siddiqui, K.A.. 2002. « Impact of building rezoning and change of use on energy consumption and occupants thermal comfort ». Master of Science in Architectural Engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran (Arabie Saoudite), 146 p.

- Smith, A., Fumo N.S., Luck R. et P.J. Mago. 2011. « Robustness of a methodology for estimating hourly energy consumption of buildings using monthly utility bills ». *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 4, p. 779-786.
- Stanescu, M., Kajl S. et L. Lamarche. 2005. « Optimisation du design des centrales frigorifiques des bâtiments ». In *VII^e Colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes (CIFQ 2005)*. (St-Malo, France, 23-25 mai 2005), article 12-08.
- Stanescu M., Kajl S. et L. Lamarche. 2007. « Performance énergétique des bâtiments – de la simulation à la réalité ». In *VIII^{ème} Colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes (CIFQ 2007)*. (Montréal, 28-30 mai 2007), p. 275-281.
- Stanescu M., Kajl S. et L. Lamarche. 2009. « Choix d'un critère d'optimisation pour la conception des systèmes CVCA ». In *IX^{ème} Colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes (CIFQ 2009)*. (Lille, France, 18-20 mai 2009), article 104.
- Stanescu M., Kajl S. et L. Lamarche. 2011. « Optimisation des systèmes CVCA d'un bâtiment institutionnel archétype de SIMEB ». In *X^{ème} Colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes (CIFQ 2011)*. (Chicoutimi, 20-22 juin 2011), p. 335-340
- Stanescu M., Kajl S. et L. Lamarche. 2012a. « Preliminary design of HVAC system using optimization by evolutionary algorithm ». Soumis à *Journal of Energy Engineering*, Résultats non-publiés.
- Stanescu M., Kajl S. et L. Lamarche. 2012b. « Simplified optimization method for preliminary design of HVAC system using global load ratio as the fitness function ». Soumis à *HVAC&R Research*, Résultats non-publiés.
- Stanescu M., Kajl S. et L. Lamarche. 2012c. « Evaluation of HVAC system design on a real building, the B-Pavilion of ÉTS ». Soumis à *HVAC&R Research*, Résultats non-publiés.
- Tao, X.. 1996. « Economic and technical analysis of a real cooling plant ». *HV&AC*, vol. 5, pp.32-35
- Todesco, G.. 2004. « Integrated designs and HVAC equipment sizing ». *ASHRAE Journal*, vol. 46, n° 9, p. S42-S47
- Tsal, R.J. et H.F. Behls. 1986. « Evaluation of duct design method ». *ASHRAE Transactions*, vol. 92, n° 1, p. 347-361
- Tsal, R.J. et H.F. Behls. 1990. « Using the T-method for duct system design ». *ASHRAE Journal*, vol. 32, n° 3.
- Tsal, R.J., Behls H.F. et R. Mangel. 1988a. « T-Method duct design, part I: optimization theory ». *ASHRAE Transactions* vol. 94, n° 2, p. 90-111.

- Tsal, R.J., Behls H.F. et R. Mangel. 1988b. « T-Method duct design, part II: calculation procedure and economic analysis ». *ASHRAE Transactions* vol. 94, n° 2, p. 112-151.
- Yang, Y., et J. Liu. 2000. « Design of budget management software of HVAC project ». *HV&AC*, vol. 1, p. 55-56.
- Zhao, Z.. 2011. « Building equipment life cycle cost studies ». *Advanced Materials Research*, vol. 250-253, p. 3702-3705.
- Zhu, Y.. 2006. « Applying computer-based simulation to energy auditing: a case study ». *Energy and Buildings*, vol. 38, n° 5, p. 421-428.
- Zmeureanu, R. et P. Fazio. 1990. « Computer-aided design of energy-efficient buildings ». *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 3, no 4, p. 214-220.
- Wang, S.K.. 2001. *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. ISBN 978-0070681675, 2^{ième} édition, New York: McGraw-Hill, 1232 p.
- Wang, F.. 2003. « Economic Prediction of HVAC Systems at Different Design Stages ». *ASHRAE Transactions*, vol. 109, n° 1, p. 157-166.
- Wang, W., Rivard H. et R. Zmeureanu. 2006. « Floor shape optimization for green building design ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 20, n° 4, p. 363-378.
- Wetter M. et J.A. Wright. 2003. « Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method ». In *Eighth International Building Performance Simulation Association Conference (IBPSA)*, (Eindhoven, Netherlands, 11-14 août 2003), p. 1401-1408
- Wetter M.. 2009. « GenOpt: Generic Optimization Program ». In *Lawrence Berkeley National Laboratory*, CA. En ligne <<http://gundog.lbl.gov/GO/>>. Consulté le 1^{er} octobre 2011.
- Wright, J.A. et V.I. Hanby. 1987. « The formulation characteristics and solution of HVAC systems optimized design problems ». *ASHRAE Transactions*, vol. 93, n° 2, p. 2133-2145.
- Wright, J.A.. 1996. « HVAC optimization studies: Sizing by genetic algorithm ». *Building Services Engineering Research & Technology*, vol. 17, n° 1, p. 7-14.
- Wright, J.A. et R. Farmani. 2001. « The simultaneous optimization of building fabric construction, HVAC system size and the plant control strategy ». In *Seventh International Building Performance Simulation Association Conference (IBPSA)*, (Rio de Janeiro, Brésil, 13-15 août), p.865-872.
- Wright, J.A., Loosemore H.A. et R. Farmani. 2002. « Optimization of building thermal design and control by multicriterion genetic algorithm ». *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 9, p. 959-972.

Wright, J.A., Zhang Y., Angelov P., Buswell. R. et V. Hanby. 2004. *Building System Design Synthesis and Optimization*. Final Report ASHRAE RP-1049, Loughborough University (Angleterre), 191 p.