



ISSN: 0975-833X

Available online at <http://www.journalcra.com>

INTERNATIONAL JOURNAL  
OF CURRENT RESEARCH

International Journal of Current Research  
Vol. 12, Issue, 08, pp.12975-12983, August, 2020

DOI: <https://doi.org/10.24941/ijcr.39400.08.2020>

## RESEARCH ARTICLE

### METHODES ET OUTILS D'OPTIMISATION UTILISES DANS LA CONCEPTION ET LA RECHERCHE D'EFFICACITE ENERGETIQUE: REVUE DE LITTERATURE

Guy Clarence SEMASSOU<sup>1\*</sup>, Abdel Deen Derrick Vital Dai TOMETIN<sup>1</sup>, Kouamy Victorin CHEGNIMONHAN<sup>2</sup> and Edmond VODOUNNOU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Energetics and Applied Mechanics (LEMA), University of Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Benin

<sup>2</sup>Thermics and Energy Laboratory of Nantes, (LTEN) - CNRS, UMR 6607, BP 50609, 44306 Nantes, France

#### ARTICLE INFO

##### Article History:

Received 30<sup>th</sup> May, 2020  
Received in revised form  
21<sup>st</sup> June, 2020  
Accepted 10<sup>th</sup> July, 2020  
Published online 30<sup>th</sup> August, 2020

##### Key Words:

Optimisation, Algorithme,  
Enveloppe de bâtiment, Simulation  
thermique, Efficacité Énergétique.

#### ABSTRACT

La performance énergétique d'un bâtiment est considérablement influencée par les paramètres de l'enveloppe du bâtiment, sa toiture et ses configurations géométriques (la forme, l'orientation, les matériaux...). Cependant, déterminer les configurations optimales de forme et de l'enveloppe du bâtiment demeure un défi. Différentes méthodes ont été utilisées dans la littérature pour optimiser les paramètres de l'enveloppe du bâtiment, sa toiture et ses configurations pour atteindre une meilleure performance énergétique. L'objectif du présent travail est de réaliser une vue panoramique sur les méthodes d'optimisation utilisées dans la conception des bâtiments à haute efficacité énergétique. Ainsi, les potentiels et l'applicabilité de ces méthodes sont identifiés. Les méthodes d'optimisation associées qui sont soit avec dérivée ou sans dérivée et leurs applications dans la conception de bâtiments éconergétiques sont considérées dans ce travail, ainsi que les approches de prise de décision relatives aux optimisations multi-objectifs. Certains outils d'optimisation couramment rencontrés (Matlab, GenOpt, BEOpt TM, Opt-E-Plus...) sont également présentés.

Copyright © 2020, Guy Clarence SEMASSOU et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Citation: Guy Clarence SEMASSOU, Abdel Deen Derrick Vital Dai TOMETIN, Kouamy Victorin CHEGNIMONHAN and Edmond VODOUNNOU. 2020. "Methodes et outils d'optimisation utilisés dans la conception et la recherche d'efficacité énergétique : revue de littérature", *International Journal of Current Research*, 12, (08), 12975-12983.

## INTRODUCTION

L'optimisation de l'enveloppe du bâtiment pour une conception économe en énergie a commencé dans les années 1980, bien qu'il y ait eu des études et des outils développés, tels que PACE (Package for Architectural Computer Evaluation), qui prennent en compte la nature multicritère de la conception des bâtiments par une approche intégrée et complètent un ensemble de mesures d'évaluation à la fin des années 60 (1). Au cours des dernières décennies, différentes méthodes d'optimisation ont été appliquées pour trouver de meilleurs compromis entre la configuration du bâtiment et la configuration de son enveloppe qui offrent des alternatives de conception de bâtiments à basse énergie. Ces méthodes vont de l'optimisation basée sur le calcul de dérivée aux méthodes sans dérivée. L'optimisation basée sur le calcul des dérivées a été utilisée dans différentes études dans la conception de l'enveloppe du bâtiment économe en énergie.

En outre, les algorithmes évolutionnaires, qui sont des méthodes de recherche basées sur la population, inspirées de l'évolution naturelle ou du comportement social d'espèces, sont appliqués pour surmonter les insuffisances de la programmation linéaire et des techniques de programmation dynamique pour résoudre des problèmes NP-hard (Non déterministe Polynomial difficile) (2). Elles permettent de trouver des solutions quasi optimales lorsque la recherche brute n'est pas applicable (3). Dans cet article, nous avons discuté des applications des différentes méthodes d'optimisation qui ont été utilisées plus d'une fois dans la littérature pour la conception énergétique optimale des bâtiments.

**Méthode d'optimisation basée sur le calcul dans l'évaluation des performances des bâtiments :** Les optimisations basées sur le calcul ont été appliquées dans différentes études pour trouver les configurations optimales des enveloppes des bâtiments. Page (4) a étudié l'impact de la forme du bâtiment sur les pertes de chaleur par conduction en

\*Corresponding author: Guy Clarence SEMASSOU,

utilisant respectivement des techniques de calcul pour des bâtiments détachés, des bâtiments jumelés, les logements mitoyens et logements plats. Le but de son étude a été de minimiser les pertes de chaleur par conduction pour une norme d'isolation thermique dans les sols, les murs et les plafonds en trouvant la forme et le nombre optimaux d'étages. Il n'a pas tenu compte des aspects de gain de chaleur. Il a conclu que la forme compacte d'un bâtiment peut être une alternative plus économe en énergie d'après ses études de cas. Jedrzejuk et Marks (5,6) ont étudié l'optimisation multicritère, composé de trois problèmes principaux: les partitions internes du bâtiment et la détermination de l'épaisseur de l'isolation thermique, et la forme du bâtiment et les sources de chaleur. Le processus d'optimisation a été résolu par une méthode analytique-numérique.

### **Méthode de recherche directe dans l'évaluation des performances des bâtiments**

Gupta (7) a été parmi les premiers auteurs à avoir discuté l'optimisation des performances thermiques des bâtiments en couplant la méthode de recherche directe et une analyse thermique dans les bâtiments. Il a établi le modèle mathématique pour optimiser la conception thermique des bâtiments résidentiels ou de bureaux. Les critères de son optimisation étaient de minimiser l'inconfort thermique ainsi que les charges de chauffage et de refroidissement. Dans son processus d'analyse thermique, il a considéré des excitations climatiques et opérationnelles temporelles. Il a tenu compte de différents paramètres tels que l'orientation, le rapport hauteur / largeur, l'isolation, le volume, le vitrage, l'ombrage, les traitements de surface, l'absorptivité solaire et l'émissivité thermique. Pour la modélisation thermique, l'auteur a adopté le modèle de Muncey (8). Comme les calculs des dérivés dans le modèle distribué résistance-capacité pour les constructions multicouches utilisées dans cette recherche étaient complexes, l'auteur a utilisé la recherche directe basée sur la théorie des surfaces de réponse (9) à la place de la recherche de gradient. Ses travaux proposent un modèle mathématique bien défini pour l'optimisation des performances thermiques des bâtiments.

Bouchlaghem (10) a utilisé la méthode des simplexes, décrite par Nelder et Mead (11) et la méthode complexe non aléatoire, décrite dans Mitchell et Kaplan (9) pour l'optimisation des performances thermiques d'un bâtiment. La méthode de Nelder et Mead converge rapidement mais ne tient pas compte des contraintes et n'a pas pu être appliquée au problème de conception thermique. D'autre part, la méthode Mitchell et Kaplan tient compte des contraintes tout en étant moins efficace que la méthode simplex pour la recherche des solutions optimales (10). Par conséquent, l'auteur a proposé la combinaison de ces deux méthodes. Dans le but de minimiser la charge de chauffage ou de refroidissement, et d'atteindre l'objectif ciblé pour une base d'optimisation définie, deux scénarios ont été étudiés. Pour le premier scénario, un bâtiment non climatisé a été analysé. L'indice de confort thermique de la température sèche résultante a été considéré comme un objectif. Le deuxième critère était lié au temps de calcul pour atteindre l'alternative optimale. Le programme d'ombrage solaire (SUN-SHADE) a été utilisé comme moteur de simulation. Les résultats de la simulation ont été validés d'abord avec des calculs manuels. Le processus d'optimisation a été validé en attribuant d'abord des nombres aléatoires comme entrée, ensuite en exécutant l'optimisation et en affectant la

sortie optimale comme entrée pour la deuxième exécution de l'optimisation.

Les résultats ont révélé qu'il n'y a pas eu de améliorations accrues dans les résultats. Al-Homoud (12) a proposé un modèle d'optimisation pour minimiser la consommation annuelle d'énergie et les charges de pointe de chauffage et de refroidissement des bureaux dans différentes régions climatiques, sans modifier les paramètres de l'enveloppe. Ensuite, l'auteur a proposé un modèle d'optimisation pour la conception thermique optimale des enveloppes des bâtiments résidentiels et bureaux (13). Cette méthode utilise une technique d'optimisation de recherche directe intégrée à un programme de simulation énergétique horaire du bâtiment. Comme la technique de recherche d'optimisation de Nelder et Mead (11) et Himmelblau (14) ont été jugées efficaces, il a été mis en œuvre dans le modèle d'optimisation, ENEROPT.

**Méthode de recuit simulé dans l'évaluation de la performance des bâtiments:** La plupart des études qui ont mis en œuvre le SA (Simulated Annealing) dans cette revue de littérature l'ont comparé à GA (Algorithmes Génétiques). Beaucoup de ces études ont également considéré l'hybride GA-SA. Caldas (15) a étudié les performances de différentes méthodes d'optimisation, principalement GA et SA, pour proposer un système de conception générative basé sur l'évolution. Il a conclu que le GA est légèrement plus performant que SA. La facilité de proposer différentes alternatives de GA est mentionnée comme l'un des principaux avantages de GA par rapport à SA. Plus tard, Kaziolas et al. (16) ont optimisé un bâtiment en bois pour les deux configurations LCA et structurelles en utilisant GA et SA. De plus, l'effet de l'incertitude de la température de conception à l'intérieur du bâtiment et son impact sur LCA est considéré. Junghans et Darde (17) ont montré que l'AG ne détermine pas toujours des solutions optimales globales. GA, SA et SA modifié ont été utilisés pour trouver le LCC optimal de deux conceptions de façade, composé de cinq et six paramètres, avec au total 30 240 et 268 800 solutions potentielles, respectivement. Contrairement à la SA conventionnelle, qui commence par un point de départ, la sortie de GA a alimenté l'entrée de la SA modifiée dans cette étude. La recherche énumérative a été menée pour trouver l'optimum global. Les résultats ont révélé que le SA modifié avait une performance significative meilleure à celle de GA. De plus, le GA-SA hybride a montré les meilleures performances et même les résultats du SA modifiés n'étaient pas précis par rapport à l'hybride GA-SA.

Varma et Bhattacharjee (18) ont étudié l'application de GA et SA dans l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment. Les variables de conception utilisées dans le cadre de cette étude sont le type de mur et le type de toit. Il est conclu que, bien que GA surpasse SA dans sa convergence initiale vers une solution quasi optimale, SA fonctionne mieux si la solution initiale est raisonnablement proche de la solution optimum. Par conséquent, la nature plus aléatoire de GA permet à cette méthode d'explorer largement l'espace de la solution. Cependant, la performance du SA peut dépendre davantage de l'alternative initiale. En outre, les avantages potentiels de l'hybride GA-SA sont reconnus.

**Méthode de Programmation dynamique dans l'évaluation de la performance des bâtiments :** Radford et Gero ont étudié l'optimisation du facteur lumière du jour à l'arrière de la pièce

et la température interne de pointe de l'environnement en été en utilisant la programmation dynamique. Les variables de conception utilisées au cours de cette optimisation sont les types de construction de murs extérieurs, les types de vitrage, orientations, dimensions et pare-soleil horizontaux des fenêtres. D'Cruz et al. (19) ont utilisé la programmation dynamique optimale de Pareto. D'Cruz et Radford (20) ont ensuite utilisé la programmation dynamique optimale de Pareto pour trouver la charge thermique optimale, et la disponibilité de la lumière du jour. Les variables de conception de cette étude sont la forme, la masse, l'orientation, la taille des fenêtres, types de verre, ombrage, finitions de surface, propriétés des matériaux, ventilation, et l'infiltration. Ils ont énuméré tous les paramètres et ont attribué les critères qui ont été affectés par les paramètres. Puis la séparation a été effectuée parce que chacun des critères sera affecté par un ensemble de paramètres. Le problème a ensuite été formulé en sept étapes à travers un problème de programmation dynamique non sérié avec des branches convergentes. Huit programmes FORTRAN, fonctionnant indépendamment, sept pour sept étapes et une pour le suivi des spécifications du bâtiment, ont été utilisés dans cette étude. Les équations pour l'analyse thermique ont été mises en œuvre dans le programme. Les résultats ont révélé des informations quantitatives normatives de différents cas considérant différents objectifs.

#### **Méthode des Algorithmes génétiques dans l'évaluation de la performance des bâtiments :**

Il y a eu différentes études sur la conception de bâtiments éconergétiques où les GA ont été utilisés comme méthode d'optimisation. Une méthode de recherche GA multi-objectifs est utilisée pour optimiser le coût énergétique du bâtiment et la zone de confort thermique (25). Grierson et Khajepour (26) ont utilisé GA dans les tours d'immeubles de bureaux en phase conceptuelle. Dans cette étude, le filtrage informatif de la couleur de l'optimum de Pareto est utilisé comme un outil informatif pour observer la différence. Ils ont étudié l'optimisation pour un large éventail de paramètres, y compris le CVC et l'utilisation et le coût de l'énergie de façon structurelle. En outre, Mihail – Bogdan et al. (27) ont étudié l'impact des paramètres de l'AG dans l'optimisation du bâtiment. Il existe également de nombreuses études axées sur l'optimisation de l'efficacité énergétique de la conception des bâtiments architecturaux à l'aide des GA. Caldas et Norford (28) ont mené une recherche sur l'optimisation de l'emplacement et le dimensionnement des fenêtres d'un immeuble de bureaux à l'aide des GA. Le but de cette étude multi-objective était de minimiser la charge d'éclairage, de chauffage en deux endroits différents, Phoenix (AZ), comme un climat dominé par le refroidissement, et Chicago (IL), comme un climat dominé par le chauffage. L'outil de simulation détaillée DOE2.1E a été utilisé pour l'analyse. Le Micro-GA, qui a une population plus petite par rapport à l'AG classique, a été utilisé dans cette étude. Il est mentionné que le Micro-GA a été utilisé car il est approprié pour trouver la solution près de l'optimum local en raison du fait que la différence de solutions avant la convergence a peu d'allèles. Afin de valider les résultats de l'AG, tout d'abord, 64 variations de fenêtres pour chaque direction ont été simulées manuellement tandis que la taille des fenêtres dans l'autre direction était maintenue constante. Les résultats ont été comparés aux résultats obtenus à partir des GA. Les résultats dans la plupart des cas correspondaient bien et dans certains cas, GA a trouvé un optimum local, qui était proche du minimum global. La dernière exécution de l'AG a considéré les changements de taille de fenêtre dans toutes les directions, ce

qui a donné un espace de solution composé de 16 777 216 alternatives. La comparaison des solutions optimum a montré que si les fenêtres Est et Ouest étaient à peu près similaires sous deux climats, les fenêtres nord de Chicago, IL, étaient considérablement plus petites que les fenêtres nord à Phoenix, AZ, en raison des hivers plus froids dans le premier climat. Dans le cas des fenêtres sud, Chicago, IL, avaient des fenêtres plus grandes que Phoenix, AZ, bien que la différence de la taille était considérablement inférieure à celle du nord. Dans la continuité des recherches précédentes, Caldas et Norford ont étudié l'impact des matériaux de construction sur la conception optimale du bâtiment avec comme objectifs la consommation d'énergie et le coût initial. Ils ont également examiné le compromis entre l'éclairage et l'énergie de chauffage ainsi que le contrôle de la charge en utilisant GA. La forme du bâtiment, la taille de zones et l'inclinaison du toit ont été considérés comme les paramètres de cette étude. Gagne et Andersen (29) ont proposé un outil basé sur les GA pour trouver les configurations optimales de façade pour des objectifs d'éclairage et / ou d'éblouissement dans les premiers processus d'exploration de conception. L'interface de programmation de l'application Ruby intégrée avec Google SketchUp a été utilisée pour l'automatisation de la génération de modèles tridimensionnels. Le logiciel de visualisation des images Lightsolve (30), une méthode de rendu global hybride, est utilisée comme l'outil de simulation de la lumière du jour. Lightsolve est un outil de simulation d'éclairage rapide qui combine le ray tracing avec la radiosité et le rendu des volumes d'ombre. Deux mesures, une pour l'éclairage et une pour l'éblouissement à la lumière du jour, sont les critères de cette optimisation. Au début de la conception dix paramètres qui influencent les deux critères ont été choisis. Ils ont utilisé quatre indices différents (faible acceptable, faible souhaitée, élevé souhaité et élevé acceptable) pour la mesure de l'éclairage, et la probabilité d'éblouissement à la lumière du jour (31,32) pour la mesure d'éblouissement. Afin de réduire le temps de calcul le micro-GA dans l'optimisation des performances thermiques et d'éclairage des bâtiments a été appliqué (28,33). Le modèle a été exécuté à la fois avec comme seul objectif, juste pour l'éclairage, puis e multi-objectif, pour l'éclairage et l'éblouissement. Les auteurs ont créé une boîte à outils facile à utiliser dans Google SketchUp, ce qui permet à l'utilisateur de mettre les valeurs facilement au lieu d'exiger la programmation. Ils ont étudié trois cas, dont: un cas d'objectifs d'éclairage non conflictuels, un cas d'objectifs d'éclairage conflictuels, et un cas d'objectifs d'éclairage et d'éblouissement conflictuels.

#### **Il a été conclu que les dispositifs d'ombrage combinés à des fenêtres plus petites et des verres à faible transmissivité ont un faible potentiel d'éblouissement:**

Comme mentionné par les auteurs, il existe des limites telles que l'incohérence des solutions finales et la convergence vers un optimum local. La plus faible population utilisée en micro-GA peut être une cause majeure de ces limitations pendant laquelle l'augmentation de la population pour conséquence un coût de calcul élevé. Coley et Schukat (34) ont mené une étude sur la minimisation de la consommation d'énergie et l'attrait architectural à l'aide de GA couplé avec la simulation thermique dynamique du bâtiment EXCALIBUR (35). L'espace du plancher dans une salle communautaire à un étage a été considérée comme fixe avec des côtés verticaux. La forme du périmètre, la pente du toit, les détails de construction des murs extérieurs, le sol, le toit, les fenêtres, l'emplacement de fenêtres et d'ombrage, et l'orientation du bâtiment ont été considérés comme des

variables. Ils ont mentionné que pour avoir une diversité de populations raisonnable dans GA simple sans niching ou autres méthodes qui améliorent les recherches des optima locaux, la mutation joue le rôle de diversificateur. En ayant une liste de contrôle, ils ont mis en place un processus de vérification pour ne pas analyser une alternative plus d'une fois. Pour affiner les options, un histogramme empilé est généré afin que l'utilisateur puisse trouver les configurations de chaque alternative et choisir entre eux. Wang et al. (24) ont proposé un cadre orienté objet, qui est une architecture logicielle réutilisable (36), pour l'optimisation du bâtiment vert en utilisant les GA. Il peut être utilisé aussi bien dans des problèmes d'optimisation à objectif unique sans contrainte et multi-objectif, que dans les problèmes d'optimisation à objectif unique avec contraintes. Les variables continues, les variables discrètes et les variables structurées sont incluses dans ce travail. Bien que la boîte à outils ASHRAE soit utilisée pour l'évaluation, il est mentionné que d'autres logiciels avec des mécanismes d'entrée et de sortie similaires, même les outils des évaluations de la performance des bâtiments autres que les bâtiments écologiques, peuvent être mis en œuvre facilement.

Chen et Yang (37) ont proposé une approche d'optimisation de conception à objectifs multiples. Le cadre proposé comprend deux étapes. Dans l'ordre pour développer des modèles de substitution pour améliorer l'efficacité de calcul du processus d'optimisation, la première étape utilise les méthodes d'apprentissage automatique, y compris la régression linéaire multiple, la régression adaptative multivariée des splines et des machines à vecteurs de support, formées par EnergyPlus. Le modèle de substitution formé est ensuite couplé avec le NSGA-II dans un programme R. L'optimisation a été appliquée à un bâtiment résidentiel conçu passivement en considérant les modèles de ventilation unilatérale et de ventilation croisée soumis à diverses exigences de charge thermique à Hong Kong et un climat méditerranéen (Los Angeles). Différents paramètres sont pris en compte dans le processus d'optimisation, y compris la disposition du bâtiment, les paramètres thermophysiques de l'enveloppe, la géométrie et l'infiltration des bâtiments & l'étanchéité à l'air, la ventilation hybride et les commandes d'éclairage artificiel. Les résultats ont révélé les cas optimaux dans chaque location et configuration tandis que le temps de calcul est considérablement diminué en utilisant le modèle substitué.

Ascione et al. (38) ont proposé un cadre pour une analyse optimale des coûts par l'optimisation multi-objectifs et les réseaux de neurones artificiels, appelés CASA, permet de sélectionner des packages de rénovation optimaux pour minimiser la consommation d'énergie et l'inconfort thermique avec couplage de EnergyPlus et MATLAB et en utilisant GA pour l'optimisation multi-objectifs. Trois méthodologies sont déployées dans CASA, y compris CAMO (coût-optimal d'analyse par optimisation multi-objectifs) (39), SLABE (simulation-based large-scale uncertainty / sensitivity analysis of building energy Performance) (40), et les ANN pour prédire la performance énergétique et les scénarios de rénovation pour tout membre d'une catégorie de bâtiment (41). SLABE est appliqué pour identifier les paramètres influents. Ensuite, les ANNs prédisent la consommation d'énergie et le confort thermique. Enfin, CAMO est exécuté pour trouver le package optimal de mesures de rénovation énergétique. L'utilisation du méta-modèle au lieu de EnergyPlus implique une procédure d'optimisation plus rapide par rapport à la version originale de CAMO (39). La méthode CASA a été

appliquée à un immeuble de bureaux situé dans le sud de l'Italie. Selon le coût d'investissement, la solution optimale a été trouvée parmi les quatre packages recommandés, qui comprennent une isolation thermique externe, un refroidisseur à eau, un système de ventilation mécanique pour mettre en œuvre le refroidissement, un système de protection solaire externe et un toit complet de modules photovoltaïques. Xu et al. (42) ont proposé deux améliorations concernant l'algorithme NSGA-II pour réduire le nombre de simulations énergétiques des bâtiments au niveau de l'algorithme et obtenir de meilleures solutions optimales. Ces améliorations comprennent l'optimisation du réglage des paramètres de l'opérateur en employant une stratégie adaptative et une procédure d'optimisation multiobjectif basé sur un méta-modèle dynamique avec déploiement d'une régression linéaire. Un bâtiment existant situé à Carnegie Mellon University, Pittsburgh campus, Pennsylvania est utilisé comme cas d'étude. DesignBuilder v4.5 est utilisé pour la modélisation, EnergyPlus pour les simulations d'énergie tandis qu'une application basée sur Java a transféré et traité des données parmi les outils, les bibliothèques et les bases de données. Les deux objectifs inclus dans l'optimisation étaient le coût initial et le coût de fonctionnement, en tenant compte d'une nouvelle mesure financière introduite, d'un seuil de rentabilité supplémentaire du coût initial, qui est une première analyse basée sur les coûts qui convertit toutes les économies financières dans la période de cycle de vie d'un projet à une valeur actuelle. Le mur externe, le toit, la fenêtre, les luminaires, le contrôle de la lumière du jour et les systèmes CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation) étaient les six variables de conception. Les résultats ont montré la réduction du temps d'optimisation ainsi que l'amélioration de la convergence des solutions optimum avec la mise en œuvre des deux stratégies.

Bien que GA ait été largement utilisé dans l'optimisation énergétique des bâtiments, il y a des insuffisances dans GA qui devraient être considérées. GA nécessite une évaluation d'un grand nombre d'échantillons qui seront pour la plupart ignorés car ils ne sont pas des solutions quasi optimales ou non dominés (si l'optimum de Pareto est utilisé). Les simulations détaillées d'énergie et de confort du bâtiment, utilisées pour évaluer chaque solution individuelle, peut être informatiquement cher. Par conséquent, GA peut exiger un nombre considérable de simulations coûteuses. Comme discuté par Magnier et Haghghat (51), deux stratégies sont généralement adoptées pour lutter contre cette question: en utilisant des méthodes simplifiées (également, Jin (43) a discuté de la simplification) et en diminuant le nombre d'individus de GA. Dans ces cas, il convient de considérer que l'utilisation de méthodes simplifiées peut négliger les informations détaillées et diminuer le nombre de générations et / ou les populations en GA, peuvent augmenter le risque de solutions non optimales. En outre, la définition des critères d'arrêt dans les GA est essentielle car il peut ne pas converger vers la ou les solutions optimales même avec des fonctions de coût lisses (8). L'un des domaines qui nécessite une attention concerne les modifications de l'AG en fonctions multimodales qui améliorent ses performances pour couvrir une plus large variété de solutions dans l'optimale de Pareto considérant tous les objectifs. Il y a eu différentes modifications dans GA pour éviter une convergence prématurée, y compris l'étude de Eshelman et Schaffer (44) et comme mentionné par Dasgupta, des stratégies telles que la transformation de la fonction de forme et les mécanismes de sélection efficaces (c.-

à-d. écart de génération (45) et classement (46, 47)). Pour améliorer les performances des GA dans ce domaine, une approche consiste à exécuter le modèle plusieurs fois ou à avoir une exécution unique sur différents processeurs, appelée GA partitionnée. Le problème de cette approche est que les populations et les différents parcours ne sont pas connectés, par conséquent, ils peuvent converger très similaires les uns aux autres et peuvent ne pas inclure les résultats avec suffisamment de variété pour tenir compte de certains objectifs autant que souhaité. Différentes configurations de niching GA (qui permet l'investigation de plusieurs solutions optimales à la fois) est une autre approche pour surmonter ce problème (48). Plus de discussions sur l'amélioration des méthodes de recherche locales et des dérives génétiques sont discutées dans l'article de Goldberg et Richardson (49).

**Méthode d'Optimisation des essais de particules dans l'évaluation des performances des bâtiments:** PSO est une méthode d'optimisation largement utilisée dans la conception d'enveloppe de bâtiment efficient en énergie. Carlucci et al. (50) ont utilisé PSO pour optimiser l'enveloppe du bâtiment et les stratégies passives dans un immeuble résidentiel. EnergyPlus et GenOpt (programme d'optimisation générique de Lawrence Berkeley National Laboratory) (7) ont été utilisés pour évaluer les performances du bâtiment et optimiser les paramètres dans deux indices d'inconfort à long terme saisonnier dans un bâtiment, respectivement. L'autre étude a utilisé PSO pour optimiser différentes technologies pour les systèmes d'enveloppe et les systèmes techniques dans un bâtiment résidentiel pour atteindre le coût de Bâtiments à zéro énergie (88). GenOpt et TRNSYS ont été utilisés pour optimiser et évaluer la performance du bâtiment, respectivement. Les résultats révèlent que les enveloppes en bois clair sont le meilleur choix pour les maisons individuelles Françaises et les chaudières à granulés bois sont la meilleure solution du point de vue du coût. Plus tard, Ferrara et al. (52) ont utilisé PSO pour minimiser la demande totale d'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage d'une salle de classe à l'aide de TRNSYS et GenOpt.

**Méthode de recherche d'harmonie dans l'évaluation des performances des bâtiments:** Fesanghary et al. (53) ont appliqué le HS pour optimiser les paramètres de l'enveloppe du bâtiment pour trouver les alternatives de conception de bâtiments avec une consommation d'énergie minimale, les coûts et les impacts environnementaux. Une série de solutions optimales de Pareto ont été proposées pour la maison type unifamiliale étudiée. Dans une autre étude, Asadi (54) a utilisé HS pour optimiser les paramètres de conception d'un bâtiment unifamilial typique. LCA a été utilisé pour évaluer les critères économiques et environnementaux. Plus tard, Asadi et al. (55) ont examiné un plus large éventail de paramètres, y compris les systèmes CVC et les paramètres de l'enveloppe dans l'optimisation utilisant HS. Aussi, Khoroshiltseva et al. (56) ont utilisé le HS pour optimiser la consommation d'énergie et les confort d'éclairage et thermique en considérant les dispositifs d'ombrage et d'efficacité énergétique dans la rénovation du bâtiment résidentiel en Espagne.

**Méthode d'optimisation des colonies de fourmis dans l'évaluation des performances des bâtiments:** L'ACO a été utilisé dans les problèmes d'optimisation énergétique des bâtiments. Dans une recherche, une méthode multicritères ACO utilisant le filtrage Pareto est appliquée pour trouver les configurations de panneaux qui optimisent les performances

d'éclairage et de coût (57). Afin d'analyser la lumière du jour sur les panneaux, la mesure du facteur de lumière du jour en heures de soleil a été étudiée en utilisant la radiance. L'ACO a également été utilisé pour optimiser l'énergie du cycle de vie d'un bâtiment (58).

**Méthodes combinées et leurs applications dans l'évaluation de la performance des bâtiments:** Les méthodes d'optimisation peuvent être classées en méthodes de recherche d'optimum local et global. La principale différence entre ces classes est la façon dont l'algorithme spécifique recherche les meilleures solutions. Certains algorithmes fonctionnent mieux pour trouver les meilleures solutions dans le voisinage des solutions candidates, identifiés comme méthodes d'optimisation locales, tandis que d'autres peuvent mieux sonder tout l'espace de recherche et sont appelés méthodes d'optimisation globale. Cependant, généralement moyennant quelques modifications, la plupart des méthodes d'optimisation peuvent être utilisées pour trouver des optimums locaux et globaux. Une approche pour remédier aux lacunes dans la recherche des solutions optimales avec des algorithmes différents est la modification de chaque algorithme. Par exemple, l'approche dite d'« escalade » (hillclimbing) simple peut être reconnue comme un algorithme qui fonctionne mieux pour trouver l'optimum local dans l'échelle voisine plutôt que de garantir une approche de recherche globale de l'optimum global. Cependant, il y a eu des modifications proposées pour améliorer les performances de hillclimbing dans la recherche globale, telle que la méthode de clustering, qui nécessite l'exécution de l'algorithme plusieurs fois, à chaque fois avec un point de démarrage stochastique différent. Les modifications de hillclimbing peuvent être vues dans SA, avec la contrainte de se déplacer vers les voisins ayant de moins bonnes performances (montée lorsque l'on considère la minimisation), déterminée dans une probabilité acceptable.

Junghans et Dande (20) ont étudié GA, SA et un GA-SA hybride pour trouver le LCC optimal en fonction du besoin énergétique de chauffage, de refroidissement et d'éclairage. Les six paramètres de cette étude sont le type de vitrage, l'étanchéité de l'air de façade, l'isolation et les dimensions de la géométrie de l'ombrage (trois paramètres). Différentes exécutions de GA, une population de 10 ou 20 personnes avec ou sans élitisme, ont été étudiées. Les résultats ont montré la meilleure performance du GA-SA hybride. L'autre approche consiste à les combiner avec d'autres algorithmes. Par exemple, GA peut être reconnu comme un algorithme de recherche globale. Cependant, atteindre la solution optimale de très près peut entraîner un calcul informatique coûteux. La combinaison d'une méthode de recherche locale efficace peut améliorer les performances du système combiné. Un des exemples d'algorithmes hybrides est GPSOCCHJ dans GenOpt, qui utilise une recherche de modèle généralisée suivie d'algorithmes PSO et HJ. Des exemples d'études qui ont utilisé GPSOCCHJ peuvent être trouvés à (59, 60). L'approche combinatoire a été utilisée dans l'optimisation de la performance énergétique des bâtiments dans différentes études. Par exemple, Futrell et al. (3) ont étudié l'optimisation de la demande énergétique pour le chauffage, le refroidissement, et l'éclairage d'une salle de classe à zone unique à l'aide de GenOpt (61). GenOpt génère les scènes requises pour RADIANCE et EnergyPlus pour l'analyse de la lumière du jour et des performances thermiques. Afin de maximiser l'éclairage naturel et les performances thermiques, un algorithme hybride de HJ, le modèle de recherche, et

l'algorithme PSO utilisant un coefficient de construction ont été utilisés.

Différents paramètres, tels que la géométrie de la surface du bâtiment, les propriétés du matériau de surface, et un modèle de ciel et de soleil dérivé de historique des données climatiques ont été analysés. Dans le cas de la modélisation de l'éclairage, le backward-raytracing a été utilisé. Afin d'atteindre un temps de simulation approprié et la précision des résultats, une analyse de sensibilité a été réalisée sur les simulations RADIANCE et l'algorithme PSO au moyen d'une conception d'expérience a été effectuée. Par exemple, le nombre d'échantillons de rayons sont d'abord optimisés à l'aide d'une analyse de sensibilité. L'éclairage cible est dans la plage acceptable de 500 à 1 000 lx. Dans le cas de l'analyse thermique, le transfert de chaleur par convection à partir des surfaces de la pièce et les gains de chaleur internes ont été ajoutés aux charges nécessaires pendant que l'infiltration et la ventilation sont ajoutées pour analyser les charges du système. Les fronts de Pareto de chaque orientation ont ensuite été analysés. Les résultats ont révélé que l'orientation vers le nord avait le conflit le plus élevé entre l'éclairage naturel et la performance thermique. La meilleure performance pour l'éclairage naturel dans l'orientation vers le nord était environ 10% plus élevée que le meilleur cas suivant. Comme prévu, bien que les grandes fenêtres nord admettent une lumière diffuse, il existe une perte de chaleur considérable en hiver dans ces fenêtres. L'optimisation dans les fenêtres regardant le sud prouve l'impact souhaité des stratégies solaires passives. Les cas de l'Est et de l'Ouest avaient approximativement la même tendance sauf que le cas de l'ouest a de moins bonnes performances d'éclairage naturel. Enfin, afin de classer les résultats pour trouver la solution optimale, chaque critère a été pondéré sur l'échelle de 0 à 1 pour permettre la comparaison tout en considérant tous les critères. Les résultats montrent que dans le cas étudié à Charlotte, NC, contrairement aux cas exposés au nord, au sud, à l'est et à l'ouest, l'éclairage naturel et les performances thermiques ne sont pas fortement en conflit.

**Outils d'optimisation :** Afin d'optimiser la performance énergétique des bâtiments, un algorithme d'optimisation doit être couplé avec des outils de simulation énergétique ou d'autres techniques d'évaluation, comme les calculs numériques. L'optimisation énergétique des bâtiments peut être explorée par la programmation définie par l'utilisateur ou l'utilisation d'outils d'optimisation développés. Les outils d'optimisation répertoriés dans cette section vont de ceux qui sont spécifiquement utilisés dans l'optimisation des performances du bâtiment à ceux qui sont développés pour différentes disciplines, y compris la conception du bâtiment.

Un certain nombre d'outils d'évaluation énergétique des bâtiments sont déjà couplés avec des plates-formes d'optimisation et les ont rendu pratiques pour les utilisateurs pour effectuer l'optimisation. Cependant, il y a un compromis entre la facilité d'utilisation et la flexibilité. Si un problème nécessite des modifications spéciales des algorithmes mis en œuvre dans ces applications et que les utilisateurs ne peuvent pas le faire, alors la programmation personnalisée peut être une autre option pour l'optimisation. De plus, tous les algorithmes mis en œuvre dans ces applications ne conviennent pas pour l'optimisation énergétique des bâtiments. Par conséquent, bien que ces plates-formes constituent une aide pour les chercheurs et praticiens dans une large mesure, suscite l'alternative de développer des codes personnalisés. MATLAB (Matrix Laboratory), développé par MathWorks (62), est un

environnement largement utilisé pour résoudre des problèmes numériques dans différentes disciplines utilisant le langage de script MATLAB. MATLAB a été couplé avec différents outils de simulation énergétique du bâtiment afin d'optimiser sa consommation d'énergie. De plus, des boîtes à outils disponibles développées pour différentes méthodes d'optimisation ont fait de l'usage de MATLAB plus pratique dans les problèmes d'optimisation. GenOpt, développé par Lawrence Berkeley National Laboratory, est un programme d'optimisation qui optimise une fonction de coût. Le logiciel externe qui lit son entrée à partir de fichiers texte et écrit ses sorties dans des fichiers texte, tels que EnergyPlus, TRNSYS, Dymola, IDA-ICE ou DOE-2, sont utilisés pour évaluer la fonction de coût. GenOpt accepte à la fois en continu et discrète (ou une combinaison des deux) pour les variables indépendantes et est utilisé lorsque la fonction gradient n'est pas disponible. Les contraintes peuvent être définies par des fonctions de pénalité ou de barrière (7,61). BEOptTM est un autre outil d'optimisation de construction sur la voie du zéro énergie nette (63). Le moteur d'optimisation est couplé avec DOE2.2 et TRNSYS pour évaluer la performance énergétique des bâtiments (64). Opt-E-Plus est un outil d'optimisation avec différents algorithmes d'optimisation couplé à la simulation énergétique du bâtiment, EnergyPlus, qui sert à évaluer la performance énergétique des bâtiments. Certains facteurs d'EnergyPlus sont ajustés pour accélérer de nombreuses exécutions requises dans le processus d'optimisation avec une pénalité triviale de précision (65).

GENE\_ARCH est un système de conception générative basé sur l'évolution qui utilise GA, comme optimiseur, couplé avec DOE-2, comme l'outil de simulation de l'énergie du bâtiment pour évaluer la fonction de coût. GENE\_ARCH est développé pour aider les architectes dans la conception de bâtiments séconergétiques. Il compte pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation et l'énergie d'éclairage artificiel dans les bâtiments ainsi que les émissions de gaz à effet de serre et l'énergie intrinsèque. TRNOPT couple TRNSYS avec GenOpt pour optimiser une fonction de coût. C'est une plateforme pratique pour l'optimisation. Cependant, comme TRNOPT ne peut pas modifier les paramètres de construction, il peut manquer d'efficacité tandis que l'optimisation nécessite quelques modifications des éléments de construction (par exemple, isolation des murs, etc.) (66). MultiOpt2 est une optimisation multicritère qui peut être utilisée avec tous les projets de TRNSYS-17 Simulation Studio. L'optimisation peut être effectuée pour le système et les variables de construction. Le moteur d'optimisation utilisé dans MultiOpt est GA (66). jEPlus + EA est un outil d'optimisation facile à utiliser qui utilise NSGA-II. Cependant, afin d'avoir une interface facile à utiliser, un nombre limité de paramètres GA peuvent être ajustés dans le jEPlus + EA (67). MOBO est un outil d'optimisation unique et multi-objectif qui autorise les variables continues, les variables discrètes et fonctions de contrainte. MOBO peut être couplé à différents outils de simulation énergétique des bâtiments. Les utilisateurs peuvent ajouter des algorithmes et des fonctions d'optimisation personnalisés avec l'interface de programmation d'application MOBO pour Java (66). Mode FRONTIER est un environnement d'optimisation multi-objectif développé par ESTECO, qui peut être couplé à des outils d'ingénierie, dans ce cas, aux outils de simulation énergétique du bâtiment. mode FRONTIER englobe à la fois les méthodes de surface de réponse et les optimisations directes et accepte à la fois des variables discrètes et continues (68). Mode FRONTIER présente un avantage particulier par sa

diversité de choix des algorithmes. ModelCenter est un logiciel qui permet d'intégrer des outils de simulation et automatise les workflows de simulation. Par conséquent, Phoenix Integration's ModelCenter est utile, en particulier pour les processus multidisciplinaires, qui nécessitent l'intégration et l'automatisation de différentes simulations afin d'optimiser efficacement le problème (69).

MultiOpt est un outil d'optimisation utilisé pour les opérations de rénovation, en mettant l'accent sur les enveloppes de bâtiments, les charges de chauffage et de refroidissement, et les stratégies de contrôle. Il utilise GA (NSGA-II) comme moteur de recherche et TRNSYS pour évaluer la fonction de coût). ParaGen est un outil d'optimisation et de conception paramétrique qui utilise des GA pour l'exploration de la forme sur la base de critères de performance. C'est développé par l'Université du Michigan pour l'optimisation structurelle et est étendu à l'optimisation interdisciplinaire par l'Université de Delft de la technologie (70). Galapagos (71) est un outil d'optimisation à objectif unique pour Grasshopper, un plug-in paramétrique pour Rhino, qui utilise GA ou SA pour optimiser le modèle de Grasshopper et / ou le modèle Rhino connecté à Grasshopper. Il peut être couplé à EnergyPlus pour la simulation énergétique de l'ensemble du bâtiment, et avec des outils d'analyse de la lumière du jour, tels que DIVA. Octopus est un autre outil d'optimisation pour Grasshopper. Octopus est basé sur SPEA-2, un algorithme évolutif multi-objectif amélioré (72). Il fournit les meilleurs compromis entre les différents objectifs recherchés. Le concepteur peut choisir entre les solutions optimales de Pareto.

### Perspective

Il ressort des différents travaux examinés dans cette revue de littérature, que les algorithmes évolutionnaires permettent de surmonter les insuffisances de la programmation linéaire et de la programmation dynamique, lesquels ne permettent pas de résoudre les problèmes dits NP-hard (Non-deterministic polynomial-time hardness), et aussi de trouver des solutions quasi optimales lorsque la recherche brute force n'est pas applicable. Nous envisageons dans nos futures recherches, comme objectif principal, d'optimiser la performance énergétique des bâtiments selon l'influence des paramètres de conception de l'enveloppe du bâtiment et selon l'influence du soleil. Les objectifs secondaires de notre optimisation multi objectif seront l'impact environnemental et le coût sur cycle de vie. Pour réaliser nos futures recherches, nous comptons développer une méthodologie pour coupler et exploiter simultanément un outil d'optimisation multi objectif (notamment GenOpt) et un outil de simulation thermique dynamique des bâtiments (notamment TRNSYS).

### Conclusion

La littérature indique l'augmentation du nombre d'études sur l'optimisation de l'énergie dans le secteur du bâtiment ces dernières années. C'est dû à différents faits, y compris la demande plus élevée pour l'efficacité énergétique dans la conception de bâtiment, exigée par des normes ou des politiques relatives aux coûts d'énergie, ou les développements des plateformes d'optimisation facile à utiliser et qui peuvent être facilement couplées aux outils de simulation d'énergie de bâtiment. La forme du bâtiment et la conception de l'enveloppe peuvent sensiblement affecter la performance énergétique du bâtiment. Par conséquent, différentes stratégies d'efficacité

énergétique sont proposées et appliquées dans la conception de bâtiment. Ces stratégies se concentrent principalement sur l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables (par exemple solaire et éolienne), ou en utilisant des techniques passives ou en mettant en application des stratégies actives applicables intégrées avec la conception du bâtiment.

Cependant, la meilleure solution d'efficacité énergétique n'est pas le seul but dans la conception de bâtiment. Idéalement, l'optimisation de la performance énergétique d'un bâtiment devrait être conduite tout en considérant d'autres objectifs de la conception du bâtiment. Des méthodes d'optimisation basées à la fois sur la nature du problème et les différents paramètres devraient être choisies. Les méthodes basées sur calcul ou celles basées sur gradient exigent des fonctions continues, alors que les problèmes non-linéaires et discontinus exigent les méthodes de gradient pour optimiser la consommation d'énergie de bâtiment. Pendant que les solutions approximatives produites par la simulation d'énergie peuvent mener aux résultats discontinus, les méthodes basées sur gradient peuvent ne pas être la meilleure option dans beaucoup de cas (173). Comme indiqué par Wetter et Wright (173), la discontinuité de la fonction objective peut la rendre difficile pour que l'algorithme d'optimisation converge aux solutions optimales. Par conséquent, il est proposé que les programmes de simulation soient écrits de manière que la précision puisse être changée sans recompilation. Dans le cadre de ce travail, on a procédé à l'investigation des méthodes d'optimisation utilisées couramment dans la gestion optimale de l'énergie dans le secteur des bâtiments. Ce travail n'a pas pour objectif de révéler la prédominance d'une méthode sur une autre. Mais il revient à chaque concepteur de faire un choix convenable en tenant compte des spécificités du problème à résoudre.

### RÉFÉRENCES

- (1) Mayer TW. PACE 1: computer aided building appraisal. *Archit J Libr* 1971;207-14.
- (2) Lovbjerg M. Improving particle swarm optimization by hybridization of stochastic search heuristics and self-organized criticality (Masters Thesis). Denmark: Aarhus Universitet; 2002.
- (3) Futrell BJ, Ozelkan EC, Brentup D. Bi-objective optimization of building enclosure design for thermal and lighting performance. *Build Environ* 2015;92:591-602.
- (4) Page JK. The optimization of building shape to conserve energy. *J Archit Res* 1974;3:20-8.
- (5) Jedrzejuk H, Marks W. Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization. Partial problems solution. *Build Environ* 2002;37:1037-43.
- (6) Jedrzejuk H, Marks W. Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization. Basic theory. *Build Environ* 2002;37:1249-53.
- (8) Gupta CL. A systematic approach to optimum thermal design. *Build Sci* 1970;5:165-73.
- (9) Muncey RW. The calculation of temperatures inside buildings having variable external conditions. *Aust J Appl Sci* 1953;4:189.
- (10) Box GEP, Wilson KB. On the experimental attainment of optimum conditions. *J R Stat Soc* 1951;13:1-45.
- (11) Bouchlaghem N. Optimizing the design of building envelopes for thermal performance. *Autom Constr* 2000;10:101-12.

- (12) Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. *Comput J* 1965;7:308–13.
- (13) Al-Homoud M. Optimum thermal design of office buildings. *Int J Energy Res* 1997;21:941–57.
- (14) Al-Homoud MS. A systematic approach for the thermal design optimization of building envelopes. *J Build Phys* 2005;29:95–119.
- (15) Himmelblau DM. *Applied nonlinear programming*. New York: McGraw-Hill Book Co.; 1972.
- (16) Caldas L. An evolution-based generative design system: using adaptation to shape architectural form (Ph.D. Dissertation in architecture). Cambridge, Massachusetts, USA: Building Technology, MIT; 2001.
- (17) Kaziolas DN, Bekas GK, Zygomas I, Stavroulakis GE. Life cycle analysis and optimization of a timber building. *Energy Procedia* 2015;83:41–9.
- (18) Junghans L, Darde N. Hybrid single objective genetic algorithm coupled with the simulated annealing optimization method for building optimization. *Energy Build* 2015;86:651–62.
- (19) Varma P, Bhattacharjee B. Evaluating performance of simulated annealing and genetic based approach in building envelope optimization. In: *Proceedings of the BS2015 14th conference international build. perform. simul. assoc.* Hyderabad, India.
- (20) D'Cruz N, Radford AD, Gero JS. A Pareto optimization problem formulation for building performance and design. *Eng Optim* 1983;7:17–33.
- (23) D'Cruz NA, Radford AD. A multicriteria model for building performance and design. *Build Environ* 1987;22:167–79.
- (24) Wang W, Rivard H, Zmeureanu R. An object-oriented framework for simulation based green building design optimization with genetic algorithms. *Adv Eng Inform* 2005;19:5–23.
- (25) Wright JA, Loosemore HA, Farmani R. Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy Build* 2002;34:959–72.
- (26) Grierson DE, Khajepour S. Method for conceptual design applied to office buildings. *J Comput Civ Eng* 2002;16:83–103.
- (27) Carutasiu M, Ionescu C, Necula H. The influence of genetic algorithm parameters over the efficiency of the energy consumption estimation in a low-energy building. *Energy Procedia* 2016;85:99–108.
- (28) Caldas LG, Norford LK. A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Autom Constr* 2002;11:173–84.
- (29) Gagne J, Andersen M. A generative facade design method based on daylighting performance goals. *J Build Perform Simul* 2012;5:141–54.
- (30) Andersen M, Kleindienst S, Gagne J. *Lightsolve Tutorial*. DepArchit Build Technol Program Massachusetts Inst Technol; 2010.
- (31) Wienold J, Christoffersen J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy Build* 2006;38:743–57.
- (32) Kleindienst SA, Andersen M. The adaptation of daylight glare problem to dynamic metrics in a computational setting. In: *Proceedings Lux Eur. 2009 – 11th Eur. light. conference, 2009*, p. 3–10.
- (33) Caldas L. Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE\_ARCH: an evolution-based generative design system. *Adv Eng Inform* 2008;22:59–70.
- (34) Coley DA, Schukat S. Low-energy design: combining computer-based optimization and human judgement. *Build Environ* 2002;37:1241–7.
- (35) Crabb JA, Murdoch N, Penman JM. A simplified thermal response model. *Build Serv Eng Res Technol* 1987;8:13–9.
- (36) Mattsson M. *Object-oriented frameworks—a survey of methodological issues*. Sweden: Lund University; 1996.
- (37) Chen X, Yang H. A multi-stage optimization of passively designed high-rise residential buildings in multiple building operation scenarios. *Appl Energy* 2017;206:541–57.
- (38) Ascione F, Bianco N, De Stasio C, Mauro GM, Vanoli GP. CASA, cost-optimal analysis by multi-objective optimisation and artificial neural networks: a new framework for the robust assessment of cost-optimal energy retrofit, feasible for any building. *Energy Build* 2017;146:200
- (39) Ascione F, Bianco N, De Stasio C, Mauro GM, Vanoli GP. A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. *Energy Build* 2015;88:78–90.
- (40) Mauro GM, Hamdy M, Vanoli GP, Bianco N, Hensen JLM. A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category. *Energy Build* 2015;107:456–78.
- (41) Ascione F, Bianco N, De Stasio C, Mauro GM, Vanoli GP. Artificial neural networks to predict energy performance and retrofit scenarios for any member of a building category: a novel approach. *Energy* 2017;118:999–1017.
- (42) Xu W, Chong A, Karaguzel OT, Lam KP. Improving evolutionary algorithm performance for integer type multi-objective building system design optimization. *Energy Build* 2016;127:714–29.
- (43) Jin Y, Sendhoff B. Fitness approximation in evolutionary computation – a survey. In: *GECCO'02 proceedings 4th annu. conference genet. evol. comput, 2002*, p. 1105–12.
- (44) Eshelman LJ, Schaffer JD. Preventing premature convergence in genetic algorithms by preventing incest. In: *Proceedings of the fourth international conference genet. algorithms their appl.*; 1991.
- (45) DeJong KA. *Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Ann Arbor, USA: University of Michigan; 1975.
- (46) Baker JE. Adaptive selection methods for genetic algorithms. In: *Grefenstette JJ, editor. Proc. first int. conf. genet. algorithms their appl.* Pittsburgh: Carnegie- Mellon University; 1985, p. 101–11.
- (47) Fonseca CM, Fleming PJ. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms – Part I: a unified formulation. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part A Syst Hum* 1998;28:26–37.
- (48) Glibovets NN, Gulayeva NM. A review of niching genetic algorithms for multimodal function optimization. *Cybern Syst Anal* 2013;49:815–20.
- (49) Goldberg DE, Richardson J. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. In: *Proceedings of the second international conference genet. algorithms genet. algorithms their appl.*; 1987, p. 41–9.
- (50) Carlucci S, Pagliano L, Zangheri P. Optimization by discomfort minimization for designing a comfortable net zero energy building in the mediterranean climate. *Adv Mater Res* 2013;689:44–8.



- (51) Ferrara M, Fabrizio E, Virgone J, Filippi M. A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly zero energy buildings. *Energy Build* 2014;84:442–57.
- (52) Ferrarara M, Filippia M, Siromboa E, Cravino V. A simulation-based optimization method for the integrative design of the building envelope. In: *Proceedings of the 6th international build. phys. conference IBPC 2015*; 2015, p. 2608–13.
- (53) Fesanghary M, Asadi S, Geem ZW. Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. *Build Environ* 2012;49:245–50.
- (54) Asadi S. A multiobjective harmony-search algorithm for building life-cycle energy optimization. In: *Constr. res. Congr. Atlanta, GA*; 2014.
- (55) Asadi S, Mostavi E, Boussaa D. Identifying optimal design of office buildings using harmony search optimization algorithm. In: *Qatar found. annu. res. Conference proceedings. EEP2189*; 2016.
- (56) Khoroshiltseva M, Slanzi D, Poli I. A Pareto-based multi-objective optimization algorithm to design energy-efficient shading devices. *Appl Energy* 2016;184:1400–10.
- (57) Shea K, Sedgwick A, Antonunnto G. Multicriteria optimization of paneled building envelopes using ant colony optimization. *IntellComputEngArchit* 2006:627–36.
- (58) Yuan Y, Yuan J, Du H, Li L. An improved multi-objective ant colony algorithm for building life cycle energy consumption optimisation. *Int J ComputApplTechnol* 2012;43:60–6.
- (59) Hani A, Koiv T-A. Optimization of office building façades in a warm summer continental climate. *Smart Grid Renew Energy* 2012;3:222–30.
- (60) Khatami M, Kordjamshidi M, Mohammad Kari B, Zolfaghari A. Design optimization of glazing façade by using the GSPSOCCHJ algorithm. In: *Proceedings of the 30th international PLEA conference. Ahmedabad*; 2014.
- (61) Wetter M. *Generic optimization program user manual. Energy* 2011:1998–2011.
- (62) MathWorks. *The Language of Technical Computing*; 2017. (<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>). Retrieved on April 20, 2017.
- (63) National Renewable Energy Laboratory. *BEopt. Version 2.7. Golden, CO: NREL*; 2016.
- (64) Christensen C, Horowitz S, Givler T, Courtney A, Barker G. *BEopt: Software for Identifying Optimal Building Designs on the Path to Zero Net Energy Preprint. Colorado, USA: Natl Renew Energy Lab*; 2005. NREL/CP-550-37733.
- (65) Ellis PG, Griffith BT, Long N, Torcellini P, Crawley D. Automated multivariate optimization tool for energy analysis. *IBPSA Simbuild 2006. Cambridge, Massachusetts*, 2006, p. 42–8.
- (66) Palonen M, Hamdy M, Hasan A. MOBO a new software for multi-objective building performance optimization. In: *Proceedings of the 13th conference international build perform simulAssoc*; 2013, p. 2567–74.
- (67) JEPlus– An EnergyPlus simulation manager for parametrics. Available at: (<http://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=start>). Retrieved on March 28, 2017.
- (68) modeFRONTIER. ESTECO SpA; 2016. Available at: (<http://www.esteco.com/modefrontier>). Retrieved on February 12, 2017.
- (69) Goossens P, Chaudhari S. *A Better Design with Model-Based Systems Engineering: Functional Verification using System-Level Modeling*; 2017. (<http://www.phoenix-int.com/resources/webinars.php>). Retrieved on April 02, 2017.
- (70) Turrin M, Buelow P, Stouffs R. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *AdvEng Inform* 2011;25:656–75.
- (71) Rutten D. *Evolutionary Principles applied to Problem Solving*. Available: (<http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-Principles>). Retrieved March 29, 2017.
- (72) Vierlinger R. *Octopus*. Available: (<http://www.grasshopper3d.com/group/octopus>). Retrieved Febr 12, 2017.

\*\*\*\*\*