

Méthode d'optimisation pour la conception de systèmes compacts

Antoine SRUN^{1*}, Kátia CORDEIRO MENDONÇA^{1,2}, Patrick SALAGNAC¹, Emmanuel BOZONNET¹, Christian INARD¹

¹LaSIE (UMR-CNRS 7356) – Université de La Rochelle
Avenue Michel Crépeau – 17042 La Rochelle Cedex 1

²IRISE (Institut de Recherche et d'Innovation et Sciences de l'Entreprise)
30 rue Cambronne – 75015 Paris

* antoine.srun@univ-lr.fr

Résumé – La consommation énergétique d'un bâtiment est répartie entre différents postes de consommation. Des appareils doivent assurer les fonctions suivantes : la ventilation, le chauffage, le refroidissement et la production d'eau chaude sanitaire. Les systèmes compacts, aussi appelés systèmes multifonctions, permettent de remplir plusieurs de ces usages simultanément ou alternativement. Ils permettent ainsi de concilier des besoins complémentaires pour diminuer la consommation. Ces systèmes tirent leurs énergies des ressources naturelles environnantes, de la récupération d'énergie et de ressources non-renouvelables. Dans le cadre du projet de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) intitulé VENISE, une méthodologie de recherche de solutions optimales utilisant le vecteur air est en cours d'élaboration. La puissance relativement faible nécessaire pour chauffer ces bâtiments permet au vecteur air de jouer un rôle central. La conception d'un système compact constitue un problème d'optimisation combinatoire : il s'agit d'assembler des composants élémentaires (échangeurs, capteurs solaires, résistances électriques, puits canadiens, pompes à chaleurs, mélangeurs, répartiteurs) dans un certain ordre. C'est aussi une optimisation multi-objectifs : on cherche à minimiser la consommation énergétique et à maximiser les taux d'exploitation des ressources définies dans le cadre de l'ANR VALERIE, tout en respectant les contraintes de confort thermique, de débit de ventilation hygiénique et d'approvisionnement suffisant en eau chaude. Des travaux ont été réalisés sur des problèmes d'optimisation combinatoire au cours du projet de recherche de l'ASHRAE RP-1049. Dans le projet VENISE, la donnée d'une liste de composants choisis et d'une liste de connexions autorisées permet d'encoder une grande variété de solutions originales. Une solution peut être décrite par la donnée des composants sélectionnés, leur ordonnancement ainsi que leur paramétrage. Dans le cas général, le nombre élevé de solutions possibles empêche une exploration exhaustive des systèmes imaginables. On utilise donc un algorithme génétique développé dans le framework DEAP en Python pour rechercher un optimum. Une population initiale de solutions est générée. Chaque solution est traitée par un script permettant l'écriture automatique d'un code Modelica que les solveurs de l'environnement Dymola© peuvent résoudre. Les bâtiments et les systèmes sont modélisés en utilisant les bibliothèques BuildSysPro développée par EDF et Buildings développée par le Berkeley Lab. La population engendre des individus nouveaux à partir d'opérateurs génétiques tels que la mutation et le croisement. La méthodologie va être appliquée à une maison individuelle modélisée en monozone. Les simulations sont paramétrées en entrée par des données météorologiques et des scénarios d'occupation. Une combinaison de quelques composants (une pompe à chaleur, un appoint électrique et une ventilation mécanique double flux) a été assemblée pour monter la faisabilité de cette approche. Une exploration exhaustive des solutions possibles a permis de mettre en évidence les difficultés de l'approche. L'algorithme génétique a toutefois réussi à trouver une solution optimale. Ces travaux seront poursuivis dans des cas plus complexes.

Nomenclature

COP	coefficient de performance	<i>Symboles grecs</i>	
DIF_{haut}	durée d'inconfort froid, h	ε_{ech}	efficacité de l'échangeur
h	enthalpie massique, $J.kg^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
N	nombre de composants intégrables	A	du fluide A
P	puissance, W	B	du fluide B
PAC	pompe à chaleur	e	entrant
P_w	puissance du compresseur, W	nom	nominale
q_m	débit massique, $kg.s^{-1}$	s	sortant
y	signal de commande des composants, [0,1]		

1. Introduction

La consommation énergétique d'un bâtiment est répartie entre différents postes de consommation. En dehors des usages liés à l'activité des occupants, il faut assurer le confort des locaux grâce à différents systèmes. Ceux-ci doivent pouvoir assurer les fonctions suivantes : la ventilation, le chauffage, le refroidissement et la production d'eau chaude sanitaire. Les systèmes compacts, aussi appelés systèmes multifonctions, permettent de remplir plusieurs de ces usages simultanément ou alternativement avec un appareil unique. Ils permettent ainsi de concilier des besoins complémentaires [1]. Ces systèmes tirent leurs énergies de plusieurs sources. Ils peuvent exploiter les ressources naturelles environnantes telles que l'énergie solaire ou l'énergie géothermique [2]. Ils peuvent récupérer de l'énergie déjà présente dans le bâtiment, notamment dans l'air extrait [3] et dans les eaux grises [4]. Évidemment, l'utilisation de ressources non-renouvelables assure l'appoint thermique en cas d'insuffisance des autres sources.

La réglementation française RT2012 contraint les constructions neuves à se rapprocher du niveau des bâtiments à basse consommation (BBC). Leurs enveloppes très isolées et limitant les infiltrations permettent de modérer les puissances nécessaires pour chauffer : le vecteur air peut devenir la source principale pour le chauffage et le refroidissement [5].

Le projet ANR VENISE (**VE**cteur air pour une **coN**ception ou **réno**vat**ion** optimi**S**ée des bâtiments **nZEB**) a pour ambition de développer une méthodologie de conception globale. Les travaux s'inspirent d'optimisations réalisées avec des algorithmes génétiques [6-8]. Cette démarche multi-objectif permettra de concilier les usages, de minimiser la consommation tout en assurant une bonne exploitation des ressources environnementales. L'étude portera sur des bâtiments BBC d'usages différents, mettant en avant la capacité du vecteur air à subvenir à des besoins variés. Un état de l'art des systèmes multifonctions existants a été réalisé [9]. Des conclusions ont pu être tirées sur l'architecture usuelle des solutions existantes.

Inspirée par ces travaux, la méthodologie consiste à assembler des composants élémentaires au cours d'une optimisation par algorithme génétique. Cet article présente les premiers tests réalisés. Dans un premier temps, une exploration exhaustive a permis de dresser un état des lieux des combinaisons possibles. Dans un second temps, l'algorithme génétique a eu pour objectif de retrouver les combinaisons que nous savions être optimales dans cette configuration.

2. Description du problème

2.1. Analyse des solutions existantes

L'état de l'art des systèmes compacts a permis d'analyser un grand nombre de systèmes présents sur le marché [9]. On peut noter que les différents composants utilisés suivent généralement le même ordre [1]. La Figure 1 synthétise la configuration générale des systèmes existants.

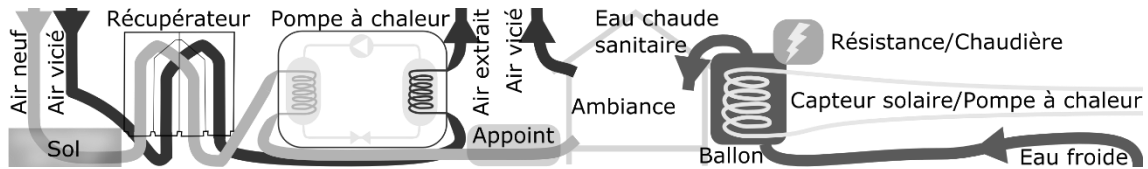


Figure 1 : Schéma synthétique des configurations usuelles de systèmes compacts

Dans cette configuration, l'air neuf peut être préchauffé par le sol (puits canadien, pompe à chaleur géothermique). L'air neuf passe ensuite par le récupérateur de la ventilation mécanique pour être réchauffé par l'air extrait. Une pompe à chaleur sur l'air extrait peut permettre une récupération supplémentaire. Une source de chaleur complémentaire (appoint électrique, batterie eau chaude) peut être ajoutée. L'eau chaude sanitaire est préparée grâce à un ballon muni d'un échangeur. Ce dernier peut être relié à un capteur solaire ou une pompe à chaleur. Le complément d'énergie est apporté par une résistance électrique ou une chaudière.

2.2. Evaluation de la performance d'un système et contraintes réglementaires

Un système multifonctions peut être caractérisé par son efficacité énergétique estimée à partir de sa consommation d'énergie. Il faut comptabiliser la consommation des systèmes chauffants et refroidissants, mais aussi la consommation des auxiliaires (ventilateurs, pompes).

L'objectif principal des systèmes multifonctions est d'assurer un confort thermique ainsi que de subvenir aux besoins en eau chaude sanitaire des occupants. Il s'agit d'une contrainte que doivent satisfaire les systèmes. Pour mesurer le confort thermique en période froide durant laquelle un besoin de chauffage se fait sentir, on utilisera la durée d'inconfort froid (DIF_{haut}). Elle est définie comme la durée cumulée pendant laquelle la température opérative est inférieure de 2°C à la température de consigne que l'on s'est fixée [10]. Le vecteur air étant utilisé pour chauffer le bâtiment, son débit peut être optimisé à chaque instant pour améliorer la performance du système. Toutefois, on fixera un seuil minimum de ventilation correspondant au débit minimum d'air hygiénique.

3. Méthodologie adoptée

La méthodologie développée au cours de ces travaux est basée sur l'analyse des solutions possibles. Elle consiste à assembler des composants élémentaires dans un certain ordre pour constituer un système. Celui-ci est alors connecté à un bâtiment et évalué sur une période donnée. Pour tester la faisabilité de cette démarche, nous appliquons cette méthodologie à un système composé d'un nombre réduit de modèles très simples à savoir une résistance électrique, un échangeur de chaleur du système de ventilation double flux et une pompe à chaleur. Les outils présentés ici sont tout à fait compatibles avec des modèles plus complexes et permettent des études prenant en compte les interactions entre production d'eau chaude sanitaire et traitement de l'ambiance.

3.1. Modèles des composants utilisés

Pour modéliser les composants élémentaires, le logiciel Dymola© a été utilisé. Il s'agit d'un environnement de développement basé sur le langage Modelica et permettant de résoudre des équations différentielles algébriques [11]. Les échanges sont modélisés sous forme de variations d'enthalpie. La puissance des composants est contrôlable par le signal y dont la valeur est comprise entre 0 et 1.

La résistance électrique chauffant de l'air circulant à un débit q_m est modélisée par :

$$P = P_{nom} y \quad (1)$$

$$P = q_m(h_s - h_e) \quad (2)$$

L'échangeur du système de ventilation double flux est simulé à l'aide des équations (3) à (6). Le fluide A correspond à l'air qui va être soufflé dans le bâtiment. Le fluide B correspond à l'air vicié extrait du bâtiment. L'efficacité de l'échangeur ε_{ech} est constante et fixée à 0,7.

$$P_A = q_{mA}(h_{sA} - h_{eA}) \quad (3)$$

$$P_B = q_{mB}(h_{sB} - h_{eB}) \quad (4)$$

$$P_A = -P_B \quad (5)$$

$$P_B = \varepsilon_{ech}[\min(q_{mA}, q_m) \times (h_{eA} - h_{eB})] \quad (6)$$

En ce qui concerne la pompe à chaleur, celle-ci est modélisée à l'aide des équations (7) à (11). Le fluide A correspond à l'eau provenant de la sonde géothermique. Le fluide B correspond à l'air soufflé. Pour simplifier le problème, la température de la source froide est maintenue à 15°C.

$$P_A = q_A(h_{sA} - h_{eA}) \quad (7)$$

$$P_B = q_B(h_{sB} - h_{eB}) \quad (8)$$

$$P_W = P_{Wnom} \gamma \quad (9)$$

$$-P_A + P_W = P_B \quad (10)$$

$$\text{COP} = \frac{P_W}{P_B} \quad (11)$$

3.2. Optimisation combinatoire

Les algorithmes d'optimisation sont nombreux et il faut trouver parmi eux ceux qui sont les plus adaptés au problème étudié. En effet, trouver une solution optimale est plus rapide lorsque la méthode de résolution prend en compte les spécificités du problème [12]. Dans notre cas, il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire. Nous choisissons d'utiliser un algorithme génétique qui a déjà prouvé sa capacité à résoudre ce genre de problèmes.

3.2.1. Description d'une solution

Un système peut être décrit par la liste des composants qui le constituent ainsi que par leur ordonnancement. Dans notre méthodologie, une liste de N composants qui peuvent être associés est définie. Certains de ces composants élémentaires peuvent être dupliqués pour permettre de créer des systèmes utilisant par exemple plusieurs pompes à chaleur ou plusieurs échangeurs. Certains composants comme les échangeurs ont deux entrées et deux sorties. Il faudra donc en tenir compte pour organiser l'ordre de passage des composants.

La Figure 2a liste les composants autorisés par la suite. Une lettre est attribuée à chaque composant et un chiffre est attribué à chaque entrée de fluide. Il est à noter que deux chiffres sont attribués à l'échangeur du système de ventilation double flux ce qui correspond aux entrées d'air neuf et d'air repris. On associe aussi un numéro au bâtiment pour permettre de créer plusieurs configurations pour la récupération sur l'air vicié.

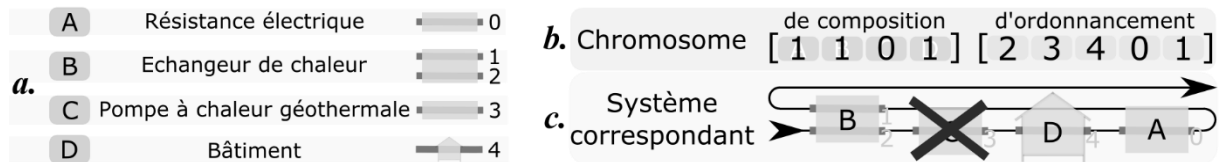


Figure 2 : a-Composants numérotés, b-Exemple de chromosomes, c-Solution correspondante

Chaque solution est encodée avec deux chromosomes. Un premier chromosome représente la composition du système. Il est constitué de N gènes. Sur la Figure 2b, le système ainsi encodé contiendra les composants A, B et D. Le second chromosome correspond à l'ordonnement

des composants. Le système placera les entrées n°2, n°3, n°4, n°0 et n°1 dans cet ordre s'ils sont présents. Le système généré correspond alors au schéma représenté en bas de la Figure 2c ; l'air soufflé admis récupère une partie de l'énergie de l'air vicié, est insufflé dans le bâtiment, puis est chauffé par la résistance électrique.

3.2.2. Opérateurs génétiques

À partir des chromosomes de composition et d'ordonnement, on peut définir les opérateurs génétiques suivants : mutation de composition (ajout ou retrait de composants d'un système), mutation d'ordonnement (modification de l'ordre des composants), croisement de composition (échange de composants entre les systèmes) et croisement d'ordonnement (déplacement de composants dans un système).

Enfin, on affecte à chacun de ces opérateurs une probabilité d'occurrence. Si la probabilité est trop faible, l'algorithme proposera un faible nombre des combinaisons possibles. Si la probabilité est très importante, l'évolution de la population sera très variable et il va être difficile de converger vers une solution optimale [12].

3.2.3. Procédure pour réaliser une optimisation

Sur la Figure 3 est représentée la procédure pour réaliser l'optimisation du système par un algorithme génétique.

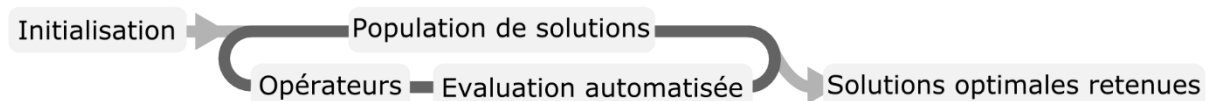


Figure 3 : Schéma de la procédure pour la réalisation de l'optimisation génétique

Dans un premier temps, on paramètre l'algorithme et on initialise une première génération de systèmes. Ensuite, cette population est évaluée de façon automatisée par un ensemble de scripts codés en langage Python permettant la génération et l'exécution des codes Modelica correspondant à différentes solutions. Cette première génération de solutions est soumise aux opérateurs génétiques de mutation et de croisement permettant de créer la génération suivante de systèmes, et ainsi de suite. Les conditions d'arrêt de l'algorithme sont le nombre de générations ou la stabilité de la performance des solutions [13].

4. Cas d'application

4.1. Description du bâtiment et des scénarios

Le modèle de bâtiment est construit à l'aide de la bibliothèque BuildSysPro développé par EDF. Il s'agit d'une maison de plain-pied de 99 m² habitable, modélisée par deux zones : les combles non aménagés et le volume habitable. Le coefficient de transmission des parois murs extérieurs est égal à de 0,18 W.m⁻².K⁻¹. Des fenêtres à double vitrage équipent les quatre faces du bâtiment. Le bâtiment est supposé être sans occupants et sans charges internes. Les données météorologiques utilisées sont celles de la ville de Trappes. La simulation correspond aux dix premiers jours du mois de janvier. La perméabilité de l'enveloppe du bâtiment est égale à 0,4 m³.h⁻¹ par m² de surface extérieure. Le débit de ventilation est égal à 1 vol/h soit 247,5 m³/h. La température de consigne pour le chauffage du bâtiment est fixée à 19°C. On s'intéresse à la consommation des systèmes utilisée pour le chauffage de l'air.

4.2. Description des composants et de leur contrôle

Pour créer des systèmes, le logiciel choisira parmi les composants suivants :

- un appoint électrique d'une puissance nominale de 5 000 W
- une pompe à chaleur constamment approvisionnée avec de l'eau à 15°C et dont le compresseur est d'une puissance nominale de 1 500 W
- un échangeur de chaleur sur air vicié d'une efficacité de 0,7

La loi de commande proportionnelle de la résistance électrique et de la pompe à chaleur (variation du signal y) est donnée à la Figure 4.



Figure 4 : Signal contrôlant les composants d'appoints de chauffage

La Figure 5 montre un exemple de solution constituée d'une entrée d'air neuf, d'une pompe à chaleur géothermale et d'une résistance électrique. L'air ainsi chauffé est soufflé dans le bâtiment.

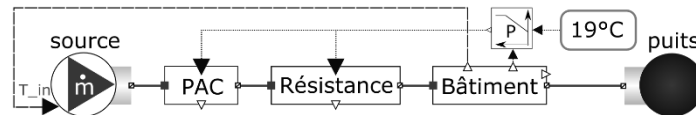


Figure 5 : Schéma d'un exemple de solution

4.3. Exploration exhaustive des combinaisons

Dans un premier temps, nous avons testé toutes les combinaisons de gènes possibles, dont certaines sont redondantes (960 systèmes). La Figure 6 donne les valeurs de la consommation énergétique de chaque solution.

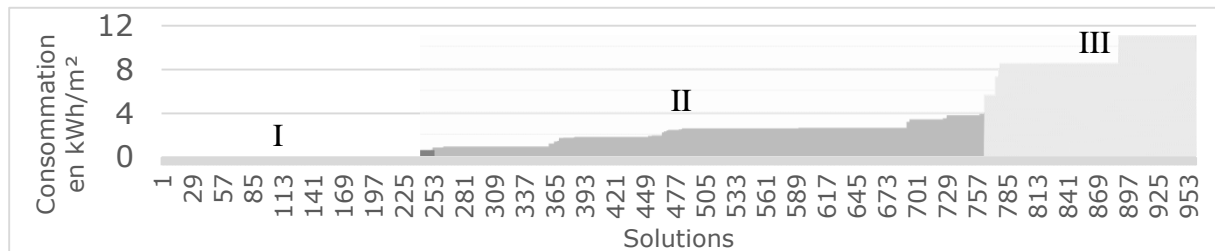


Figure 6 : Consommation énergétique de toutes les combinaisons de systèmes possibles

On constate que les combinaisons peuvent être regroupées en 3 catégories. Les solutions du type I sont constituées uniquement d'éléments passifs (échangeur du système de ventilation double flux). Certes, leur consommation énergétique est nulle mais le confort thermique n'est pas assuré. Les solutions du type III sont ordonnées de telle sorte que les éléments actifs chauffent l'air extérieur au lieu de chauffer l'ambiance. Par conséquent, la commande y reste en permanence égale à 1 durant toute la simulation générant ainsi une forte consommation énergétique. Quant aux solutions du type II, elles correspondent à des systèmes plus réalistes. Ce sont ceux qui nous intéressent. Parmi elles, les solutions en gris foncé sur la Figure 6 sont les solutions optimales. Leur consommation énergétique est égale à 0,56 kWh.m⁻² sur la période de 7 jours. Ces systèmes optimaux correspondent tous à l'utilisation du récupérateur de chaleur du système de ventilation double flux et de la pompe à chaleur géothermale, solution représentée à la Figure 7.

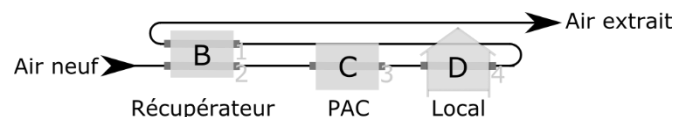


Figure 7 : Solution optimale identifiée

4.4. Optimisation par un algorithme génétique

L'étape suivante de notre étude est la recherche des solutions optimales à l'aide d'un algorithme d'optimisation. Les paramètres d'optimisation choisis sont les suivants :

- nombre d'individus par génération égal à 30
- nombre de générations égal à 10
- probabilité de mutation égale à 0,1
- probabilité de croisement égale à 0,9

La contrainte de confort thermique est prise en compte sous la forme d'une pénalité constante sur la consommation [14]. Ainsi, si la valeur de l'indice DIF_{haut} est supérieure à 1 h, la consommation est automatiquement fixée à la valeur de 11,03 kWh.m⁻² à savoir la plus haute valeur obtenue au cours de l'exploration exhaustive.

L'algorithme d'optimisation a réalisé 171 simulations (Figure 8) sur les 960 solutions existantes.

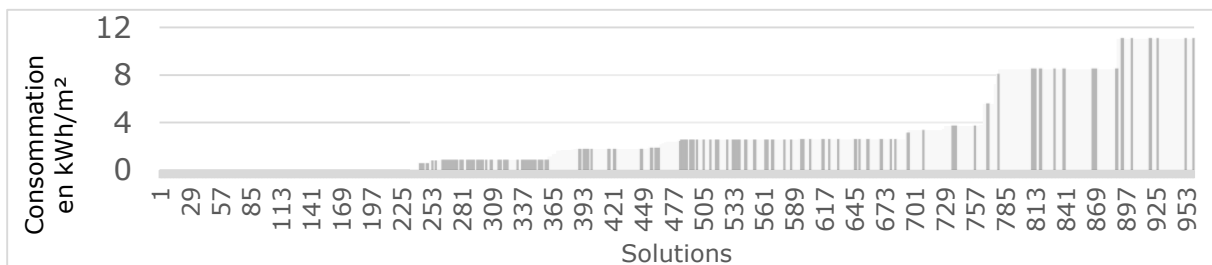


Figure 8 : Solutions générées par l'algorithme génétique

Le meilleur élément présent dans la population obtenu au bout de 10 générations fait partie du groupe des solutions optimales que nous avons déterminé par l'exploration exhaustive des solutions (Figure 7). L'évolution du minimum, de la moyenne et du maximum des consommations énergétiques au cours des générations sont données sur la Figure 9.

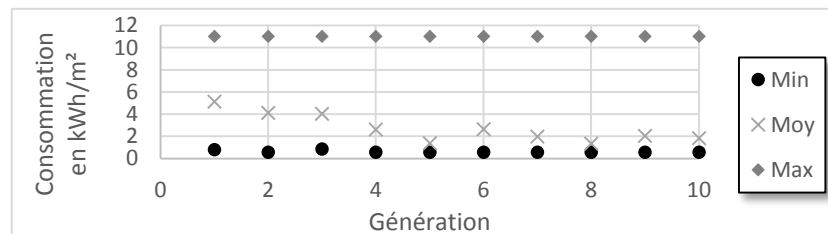


Figure 9 : Évolution du minimum, de la moyenne et du maximum des consommations énergétiques au sein d'une population

On constate que la consommation moyenne d'une génération décroît au cours de l'optimisation. Il subsiste une forte différence entre les valeurs minimale et maximale de la consommation énergétique de chaque génération. De plus, l'effet des opérateurs génétiques ne permet pas à lui seul d'éliminer les éléments les moins performants. Cela est sans doute lié à la grande quantité de systèmes de faible performance énergétique par rapport aux systèmes optimaux.

5. Conclusion et perspectives

La méthodologie d'optimisation développée dans ce travail a été testée avec succès sur un cas très simple. Elle permet de générer un grand nombre de solutions différentes et originales pour la composition et l'ordonnancement de systèmes multifonctions. Ces dernières ont pu être regroupées au sein de plusieurs catégories. On trouve parmi elles des solutions optimales qui

minimisent la consommation d'énergie. Par ailleurs, l'utilisation d'un algorithme génétique a permis de retrouver les solutions optimales sans avoir à effectuer une exploration exhaustive des solutions. La prochaine étape va consister à utiliser des systèmes plus complexes, de permettre un contrôle plus fin des composants et d'intégrer un objectif permettant de maximiser l'utilisation des énergies renouvelables. Enfin, l'usage du bâtiment et la performance de son enveloppe pourront être intégrés comme paramètres des études.

Références

- [1] A. Bühring, Development and measurements of compact heating and ventilation devices with integrated exhaust air heat pump for high performance houses, *8th IEA HPP Conference 2005* (Las Vegas, Nevada, USA, 30 mai-2 juin 2005)
- [2] F. Busato, R.M. Lazzarin, M. Noro, Two years of recorded data for a multisource heat pump system: A performance analysis, *Applied Thermal Engineering*, 57 (2013), 39-47
- [3] A. Mardiana-Idayu, S. B. Riffat, Review on heat recovery technologies for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16-2 (2012), 1241-1255
- [4] S. S. Cipolla, M. Maglionico, Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature, *Energy and Buildings*, 69 (2014), 122-130
- [5] A. Cablé, Étude expérimentale et numérique du traitement des ambiances par le vecteur air dans les bâtiments à très basse consommation d'énergie, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2014, 241 p.
- [6] J. Wright, Y. Zhang, P. Angelov, R. Buswell, *ASHRAE Research Project Report RP-1049 Building system design synthesis and optimization*, ASHRAE (2006)
- [7] J. Seo, R. Ooka, J. T. Kim, Y. Nam, Optimization of the HVAC system design to minimize primary energy demand, *Energy and Buildings*, 76 (2014), 102-108
- [8] M. Mossolly, K. Ghali, N. Ghaddar, Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm, *Energy*, 34-1 (2009), 58-66
- [9] S. Tasca-Guernouti, S. Lemaire-Talon, *Rapport de la tâche 1 de la convention ANR-12-VBDU-0007, États de l'art et des connaissances sur les systèmes à air et les fonctions qu'ils assurent dans le bâtiment*, ANR (2014)
- [10] C. Barras, P. Jallet, C. Pelé, *Rapport de la tâche 2 de la convention ANR-12-VBDU-0007, Cahier des charges de la modélisation et de l'optimisation dans le cadre du projet VENISE*, ANR (2014)
- [11] P. Sahlin, L. Eriksson, P. Grozman, H. Johnsson, A. Shapovalov, M. Vuolle, Whole-building simulation with symbolic DAE equations and general purpose solvers, *Building and Environment*, 39 (2004), 949-958
- [12] G. Renner, A. Ekárt, Genetic algorithms in computer aided design, *Computer-aided design*, 35 (2003), 709-726
- [13] M. Safe, J. Carballido, I. Ponzoni, N. Brignole, On stopping criteria for genetic algorithms, *Advances in Artificial Intelligence – SBIA 2004* (Sao Luis, Maranhao, Brazil, 29 sept.–1 oct. 2004), 405-413
- [14] C. A. C. Coello, Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191 11-12 (2002), 1245-1287

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet VENISE « Vecteur air pour une conception ou rénovation optimisée des bâtiments nZEB » financé par l'Agence Nationale de la Recherche, dans le cadre de l'appel à projets « Villes et Bâtiments Durables 2012 », sous la convention ANR-12-VBDU-0007. Nous tenons à remercier l'ANR pour le financement de cette étude ainsi que les partenaires : Allie'Air, CEREMA, CSTB, EDF, Atlantic et l'ENSAS pour leur collaboration dans ces travaux.