

Intégration énergétique d'un système de refroidissement par sur-ventilation nocturne et double flux thermoélectrique.

Gilles FRAISSE*, Gilbert ACHARD, Matthieu COSNIER, Lingai LUO

LOCIE-CNRS FRE3220

Polytech'Savoie, Savoie Technolac – 73376 Le Bourget du Lac

*(auteur correspondant : fraisse@univ-savoie.fr)

Résumé - Il est souvent mentionné que l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments se déroule en trois étapes : sobriété, efficacité et recours aux énergies renouvelables. Cette approche doit être améliorée car il convient de s'assurer de l'efficacité énergétique globale et du respect d'autres critères environnementaux, économiques et de bien-être des occupants. C'est tout l'enjeu de l'intégration énergétique. Nous illustrons la démarche d'intégration énergétique dans le cas d'un système de refroidissement par sur-ventilation nocturne et double flux thermoélectrique.

Nomenclature

<i>E</i>	consommation électrique, <i>kWh</i>	<i>Indices et exposants</i>	
<i>IDH</i>	Inconfort Degré Heure, <i>°C.h</i>	<i>int</i>	intérieur
<i>N</i>	Nombre de modules	<i>ext</i>	extérieur
<i>T</i>	température, <i>K</i>	<i>set</i>	consigne

1. Introduction

Deux enjeux majeurs dominent la scène énergétique mondiale : d'une part la réduction des émissions de gaz à effet de serre afin de limiter le réchauffement climatique, et d'autre part l'épuisement progressif des ressources énergétiques fossiles. Il est nécessaire de mettre en place une politique énergétique efficace au niveau mondial visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'objectif à atteindre dans les pays industrialisés est désigné « Facteur 4 » qui correspond en France à une réduction des émissions de gaz à effet de serre par 4 d'ici 2050 par rapport à 1990 [1].

Il est souvent mentionné que l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments se déroule en trois étapes : la sobriété (réduction des besoins), l'efficacité énergétique des systèmes et le recours aux énergies renouvelables. Cette démarche, dite Négawatt est primordiale lorsqu'on traite un problème énergétique mais elle n'est pas suffisante car il convient également de s'assurer de l'efficacité énergétique globale et du respect d'autres critères environnementaux, économiques et de bien-être des occupants. C'est tout l'enjeu de l'intégration énergétique. Nous allons illustrer dans cet article comment réaliser l'intégration énergétique d'un double système de rafraîchissement par sur-ventilation nocturne et double-flux thermoélectrique.

1.1. L'intégration énergétique dans le contexte du bâtiment

Les actions liées à l'efficacité énergétique des bâtiments sont très rarement traitées globalement et avec une approche multidisciplinaire. A la difficulté de rapprocher des communautés scientifiques assez éloignées, s'ajoute le manque d'outils globaux d'évaluation et d'optimisation. Jusqu'à présent, l'intégration énergétique a surtout été appliquée aux

procédés industriels avec la méthode du pincement. Une méthode mieux adaptée à l'intégration énergétique des systèmes associés au bâtiment est ensuite proposée. Elle est basée sur la simulation dynamique et l'optimisation ; elle sera donc désignée « *optimisation dynamique multicritère* ».

1.1.1. La méthode du pincement

Il s'agit de l'approche traditionnelle de l'intégration énergétique basée sur l'étude thermodynamique des procédés. La méthode du pincement permet d'optimiser, à la fois sur le plan thermodynamique et sur le plan économique, les possibilités de récupération d'énergie (rejets thermiques) de tout type de procédé industriel, notamment dans l'industrie chimique et pétrolière [2].

La méthode du pincement vise à favoriser les échanges de chaleur sur un site industriel donné en définissant sur un diagramme température / puissance chaleur, les besoins énergétiques (flux froid) et les opportunités de récupération (flux chaud). L'écart de température minimum entre les deux courbes composites, caractérisant l'ensemble des procédés définit la température du point de pincement. La méthode du pincement peut être étendue à d'autres facteurs environnementaux, exergétiques, financiers ... Néanmoins, elle ne repose pas sur une analyse dynamique des phénomènes. Il n'est donc pas possible de prendre en compte correctement la complexité des comportements et les interactions entre l'enveloppe du bâtiment, l'environnement, les systèmes et les occupants.

1.1.2. Les méthodes basées sur la simulation dynamique et l'optimisation

La deuxième approche repose sur l'utilisation d'outils numériques de modélisation et d'optimisation. Elle est finalement peu développée dans le domaine du bâtiment. Des outils d'intégration énergétique spécifiques au bâtiment commencent à voir le jour. C'est le cas de l'outil DEECO (Dynamic Energy, Emissions, and Cost Optimization) qui permet d'optimiser, à partir d'un calcul dynamique au cours d'une année tous types de systèmes couplés [3]. Les pourcentages de réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'augmentation du coût financier sont ainsi évalués. L'approche de modélisation est simplifiée par rapport aux outils de simulation actuellement disponibles pour les systèmes associés au bâtiment, et il n'est donc pas possible d'évaluer par exemple le confort des occupants avec précision.

Un autre outil, MERIT, permet d'adapter les profils liés à la fourniture d'énergie aux besoins énergétiques lorsque les énergies renouvelables sont utilisées [4]. Différents coefficients sont utilisés pour caractériser et optimiser le niveau de concordance entre ces différents profils temporels. Le champ d'application du logiciel MERIT est très large. Son domaine d'application s'étend du bâtiment à la ville. La même approche est utilisée par Virgone pour optimiser le couplage entre les profils temporels des besoins électriques, thermiques et frigorifiques, et les profils de production des systèmes [5]. Même si l'approche multi-source a été considérée, l'approche globale d'optimisation énergétique, économique et environnementale n'a pas été traitée.

1.2. Définition de l'intégration énergétique des systèmes associés au bâtiment

La définition suivante de l'intégration énergétique des systèmes associés aux bâtiments a été proposée en mettant en avant la nécessité de ne pas considérer uniquement les critères énergétiques [6] : « *Opération visant à satisfaire les besoins énergétiques du bâtiment en utilisant une combinaison de sources et de systèmes avec la meilleure efficacité globale* ».

définie à partir de critères énergétiques, environnementaux, socio-économiques et de qualité de vie » .

La nature du problème à résoudre étant extrêmement complexe, seule l'utilisation d'outils numériques de modélisation et d'optimisation permet de traiter l'intégration énergétique. La figure 1 illustre la problématique de l'intégration énergétique basée sur l'optimisation dynamique multicritère. Nous avons volontairement limité la définition de l'intégration énergétique à l'échelle du bâtiment. La prise en compte de l'échelle du quartier ou de la ville nécessite une démarche différente compte tenu du niveau de finesse moins exigeant du comportement des bâtiments. Dans ce cas, le transport lié à l'étalement urbain nécessite d'être considéré puisque son impact en terme de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre est très important.

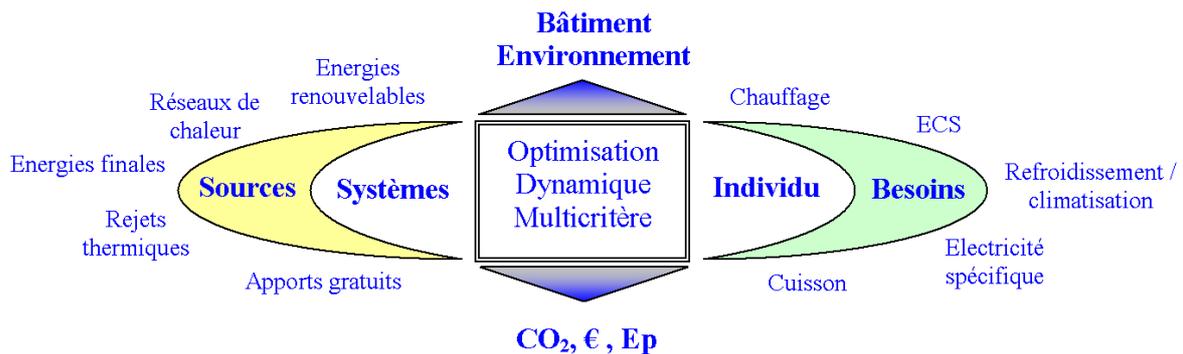


Figure 1 : L'intégration énergétique basée sur l'optimisation dynamique multicritère

2. Exemple d'intégration énergétique d'un double système de rafraîchissement

Il n'est pas envisageable de réaliser aujourd'hui l'intégration énergétique complète des systèmes associés au bâtiment en raison du manque d'outils numériques globaux de modélisation et d'optimisation. Nous allons néanmoins illustrer la démarche d'intégration énergétique en considérant un double système de rafraîchissement aéraulique d'une maison. Le refroidissement est réalisé par sur-ventilation nocturne et double flux thermoélectrique [7][8]. Deux sources sont considérées :

- L'électricité du réseau qui alimente le système de ventilation double flux thermoélectrique. Ce système fonctionne la journée en refroidissant l'air soufflé dans les pièces principales. Le recyclage de l'air intérieur est considéré afin d'améliorer l'efficacité.
- L'air extérieur pendant la nuit lorsque la température est inférieure à celle de la maison. La maison étant supposée occupée pendant la nuit, il n'est pas envisagé d'avoir des débits importants comme c'est le cas avec la sur-ventilation classique utilisée dans les bâtiments tertiaires.

2.1. La gestion des deux systèmes de refroidissement

Les deux systèmes de refroidissement retenus sont complémentaires dans la mesure où ils ne fonctionnent pas au même moment. Ils interagissent du fait de l'inertie du bâtiment et il est donc important de ne pas sur-dimensionner les deux systèmes en les considérant de façon indépendante. Le système de contrôle-commande met en marche la sur-ventilation nocturne

ou le refroidissement diurne sous certaines conditions. Le fonctionnement de la ventilation nocturne est effectif si toutes les conditions du tableau 1 sont vérifiées. Ces conditions permettent de réduire les risques de refroidissement excessif et prennent en compte l'état thermique du bâtiment avec la température maximale $T_{int-max}(j-1)$ observée pendant 24 heures. Le refroidissement diurne est en marche lorsque les conditions du tableau 2 sont respectées

Conditions à respecter	Signification
$T_{int-max}(j-1) \geq T_{int-max-set}(j-1)$	Il a fait chaud le jour précédent
$T_{int} > T_{int-nuit-set}$	Evite de refroidir en excès l'intérieur
$T_{ext} > T_{ext-nuit-set}$	Evite la sensation de courant d'air trop froid
$T_{ext} < T_{int}$	Sur-ventilation nocturne possible

Tableau 1 : Stratégie de commande du fonctionnement de la sur-ventilation nocturne

Conditions à respecter	Signification
$T_{int-max}(j-1) \geq T_{int-max-set}(j-1)$	Il a fait chaud le jour précédent
$T_{int} > T_{int-jour-set}$	Evite de refroidir en excès l'intérieur
$T_{soufflage} < T_{entrée}$	Le refroidissement thermoélectrique est nécessaire

Tableau 2 : Stratégie de commande du fonctionnement du refroidissement diurne

Avec $T_{entrée}$ la température de l'air en entrée du système de refroidissement thermoélectrique (température extérieure ou de mélange liée au recyclage)

2.2. L'optimisation dynamique multicritère

L'intérêt de coupler une sur-ventilation nocturne et un refroidissement thermoélectrique est double. Cela permet d'une part de réduire la consommation électrique du système thermoélectrique, et d'autre part de réduire le débit de sur-ventilation nocturne dans la maison. L'efficacité énergétique des modules nécessite de définir un compromis entre la puissance utile froide fournie et leur coefficient de performance. La démarche de l'intégration énergétique est plus globale en considérant trois critères d'optimisation : le confort thermique des occupants, la consommation électrique annuelle (ventilateurs et système thermoélectrique) et le coût d'investissement en se basant sur le nombre de modules utilisés. Les paramètres optimisés sont liés à la conception et au dimensionnement des deux systèmes : débit jour, débit nuit, géométrie des échangeurs, nombre de modules thermoélectriques et température de soufflage. La solution issue de l'optimisation dynamique multicritère tient compte des fortes interactions entre les deux systèmes de refroidissement.

Le confort sur la période de refroidissement est évalué grâce à l'indice d'inconfort défini à partir du confort adaptatif [9]. Cet indice d'inconfort, que nous nommons IDH (Inconfort Degré Heure), est basé sur le nombre de degrés heures pour lesquels la température intérieure est en dehors d'une plage d'acceptabilité définie à 90% :

$$IDH = \int_{\text{journée}} [\max(T_{int} - T_{90u} ; 0) + \max(T_{90d} - T_{int} ; 0)] dt \quad (1)$$

Avec T_{90u} et T_{90d} températures limites supérieures et inférieures de la plage d'acceptabilité

La définition de la fonction de performance requiert une certaine expertise. Après comparaison de plusieurs approches, la fonction de performance retenue intègre une pondération qui limite l'influence du nombre de modules (en lien avec le coût d'investissement) au bénéfice de la consommation énergétique et du confort. La mise en place

de cette pondération dans la fonction de performance a permis, pour une consommation électrique équivalente (augmentation de 0.6%), de diminuer l'IDH de plus de 14 % .

$$Perf = 1.2 \frac{(IDH)^2}{(IDH_{ref})^2} + 1.2 \frac{(E)^2}{(E_{ref})^2} + 0.6 \frac{(N)^2}{(N_{ref})^2} \quad (2)$$

Avec E : consommation électrique globale (ventilateurs et modules thermoélectriques)

N : nombre de modules thermoélectriques

$E_{ref}, IDH_{ref}, N_{ref}$: valeurs de référence relatives à un dimensionnement standard

La figure 2 montre le principe de la boucle d'optimisation entre l'environnement de simulation TRNSYS et l'outil d'optimisation GenOpt (Generic Optimization Program du Lawrence Berkeley Laboratory). L'interface entre ces deux logiciels est réalisée grâce au TYPE TrnOpt de la bibliothèque TESS (www.tess-inc.com).

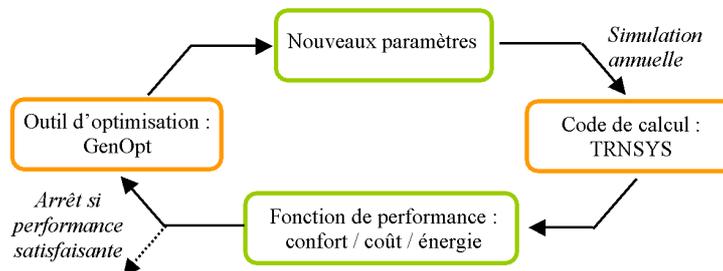


Figure 2 : Principe de la boucle d'optimisation entre TRNSYS et GenOpt

2.3. Gains obtenus grâce à l'optimisation

Les températures au cours de l'été dans la zone séjour de la maison située à Carpentras sont représentées sur la figure 3. Elles montrent le confort obtenu dans le cas de base (sans dispositif de refroidissement), et avec le système de refroidissement optimisé combinant un refroidissement diurne (1.4 vol/h dont 0.96 vol/h en recyclage) et une sur-ventilation nocturne (1.8 vol/h). La répartition des températures dans la zone de confort (80% de satisfaction) montre que le gain est significatif. Il est particulièrement intéressant de noter que le gain de confort est obtenu avec des débits relativement faibles par rapport à ceux considérés habituellement en sur-ventilation nocturne.

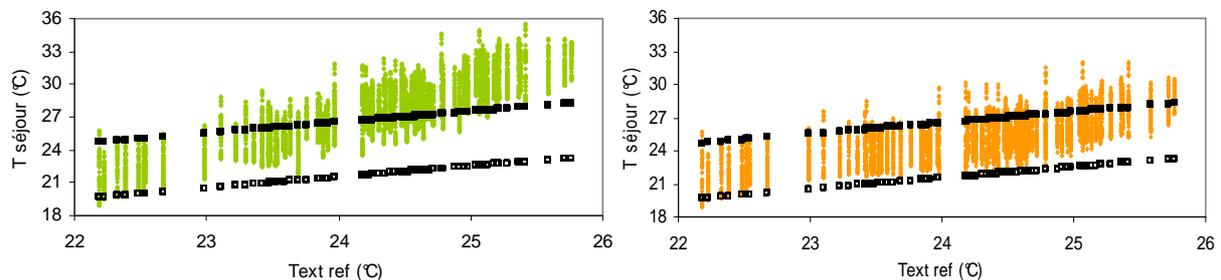


Figure 3 : Confort adaptatif lié à la température du séjour dans le cas de base, et le système avec refroidissement diurne thermoélectrique (1.4 vol/h) et sur-ventilation nocturne (1.8 vol/h)

Le COP des modules thermoélectriques sur la période est de 2.5 en mode refroidissement. Cela montre que l'utilisation de modules thermoélectriques pour chauffer ou refroidir est tout à fait envisageable, notamment dans les bâtiments BBC. Les différentes stratégies

d'optimisation étudiées ont montré l'importance d'une approche globale d'optimisation, plutôt que d'optimiser indépendamment les composants du système de refroidissement [10].

3. Conclusion

Ce travail n'est qu'une contribution à l'intégration énergétique dans la mesure où l'ensemble des systèmes associés au bâtiment, des sources et des besoins énergétiques n'ont pas été considérés simultanément. Nous avons néanmoins défini et illustré la démarche d'intégration énergétique en présentant l'exemple d'un double système de rafraîchissement des bâtiments utilisant un double-flux thermoélectrique et la sur-ventilation nocturne. Le choix d'un critère d'optimisation transcrivant une performance globale est une tâche délicate sachant que différents critères doivent être considérés. Si la méthode du coût global semble faire un consensus sur le plan financier, le choix des critères énergétiques des systèmes associés au bâtiment est plus complexe compte tenu du nombre important de possibilités : énergie grise, énergie primaire, productivité de composants solaires, taux de couverture, coefficient de performance, exergie...

Références

- [1] C. Boissieu, *Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050*. Rapport du Groupe de travail « Facteur 4 », Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, Ministère de l'écologie et du développement durable (août 2006), 77 p.
- [2] F. Staine, *Intégration énergétique des procédés industriels par la méthode du pincement étendue aux facteurs énergétiques*, Thèse n°1318, EPFL, (1994), 212 p.
- [3] T. Bruckner, R. Morrison, C. Handley, M. Patterson, *High-Resolution Modeling of Energy-Services Supply Systems using deco : Overview and Application to Policy Development*. Annals of Operations Research 121, (2003), p. 151–180.
- [4] FJ. Born, *Aiding Renewable Energy Integration through Complimentary Demand-Supply Matching*, Ph. D. Thesis, University of Strathclyde, Energy Systems Research Unit, 2001, 355 p.
- [5] J. Virgone, E. Fabrizio, Y. Raffanel, E. Blanco, G. Thomas, *Commande des systèmes multi-énergies pour les bâtiments à haute performance énergétique*, SFT-IBPSA, (mars 2006), 8p.
- [6] G. Fraisse, *Contribution à l'intégration énergétique des systèmes associés au Bâtiment*. Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Savoie, Chambéry, déc. 2008, 137 p.
- [7] N. Le Pierrès, M. Cosnier, L. Luo, G. Fraisse. *Coupling of thermoelectric modules with a photovoltaic panel for air pre-heating and pre-cooling application: an annual energy and exergy evaluation*. International Journal of Energy Research 32, p. 1316-1328, juillet 2008.
- [8] M. Cosnier, G. Fraisse and L. Luo. *An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system* ». International Journal of Refrigeration, Volume 31, Issue 6, September 2008, Pages 1051-1062.
- [9] J. F. Nicol and M. A. Humphreys, *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*, Energy and Buildings, Volume 34, Issue 6, (July 2002), p. 563-572.
- [10] M. Cosnier, *Etude numérique et expérimentale d'un système thermoélectrique destiné au rafraîchissement des bâtiments*. Thèse de l'Université de Savoie, (Septembre 2008), 214 p.

Remerciements

Nous remercions la Région Rhône-Alpes qui a financé l'étude liée au refroidissement thermoélectrique dans le cadre du projet Cluster 7 Energies “ Réduction et lissage de la consommation électrique liée à la climatisation et au rafraîchissement des bâtiments ”.