

Optimisation multicritère d'un échangeur de chaleur air-sol pour différents climats mondiaux

Multi-criteria optimization of an earth-air heat exchanger for different worlds climates

Arnaud LAPERTOT^{1*}, Benjamin KADOCH¹, Olivier LE METAYER¹.

¹ IUSTI UMR 7343, CNRS-Université d'Aix Marseille, 5 rue Enrico Fermi, Marseille, France

* (auteur correspondant : arnaud.lapertot@univ-amu.fr)

Résumé – Une méthodologie d'optimisation multicritère est appliquée à un système énergétique composé d'échangeur de chaleur air-sol, d'une pompe à chaleur et d'un stockage thermique. La procédure repose sur une analyse de sensibilité, une optimisation multicritère et une aide à la décision. Elle a pour but de déterminer le meilleur dimensionnement et la meilleure régulation du dispositif. Les résultats montrent que le système est dépendant des conditions météorologiques, mais il parvient à être rentable, performant et autonome pour les différents climats mondiaux considérés.

Mots-clés : Echangeur de chaleur air-sol, Optimisation, Pompe à chaleur, Analyse de Sensibilité, Stockage de chaleur

Abstract – A multi-criteria optimization methodology is applied to an energy system composed of an earth-air heat exchanger, a heat pump and a heat storage. The procedure based on a sensitivity analysis, a multi-criteria optimization, a decision-making, aims to determine the best sizing and regulation of the system. The results show that the system is dependent on weather conditions but it is still effective, autonomous and profitable for the different climates of the world considered.

Keywords: Earth-to-air heat exchanger, Heat pump, Heat storage, Optimization, Sensitivity analysis

Nomenclature

A	surface, m^2
c_p	capacité thermique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
\dot{m}	débit massique, $kg \cdot s^{-1}$
P	puissance, kW
T	température, $^{\circ}C$
<i>Symboles grecs</i>	
ϵ	efficacité, –
ρ	masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
Δp	pertes de charge, Pa
η	rendement, –

Abréviations

CER	coût d'énergie récupérée, $\text{€}/kWh$
COP	coefficient de performance, –
ECS	eau chaude sanitaire
EAS	échangeur air-sol
F_{ENR}	fraction d'énergie renouvelable, –
PAC	pompe à chaleur
PV	photovoltaïque
TH	thermique
VMC	ventilation à récupération de chaleur

1. Introduction

La consommation d'énergie dans le monde augmente très rapidement et le secteur de l'habitat est responsable d'environ 20 % de ces besoins [1]. Les stratégies mondiales ont prévu de réduire la consommation d'énergie dans le bâtiment afin de lutter contre le réchauffement climatique. Pour cela, il est possible d'utiliser des échangeurs de chaleur air-sol (EAS). L'EAS est un système de chauffage, de ventilation et de climatisation qui utilise l'air extérieur pour circuler dans des tubes dans le sol afin de récupérer l'énergie géothermique [2]. Cette énergie permet de préchauffer ou refroidir l'air dans le bâtiment par ventilation. De plus, l'installation d'une ventilation à récupération de chaleur (VMC) améliore les performances du système en récupérant l'énergie de l'air vicié. En effet, le coefficient de performance (COP) peut atteindre 16,3 [2]. Cependant, le système nécessite de l'énergie auxiliaire pour satisfaire les besoins

énergétiques globaux [3]. La combinaison d'un EAS, d'une pompe à chaleur (PAC) et de capteurs photovoltaïques (PV) semble prometteuse pour augmenter les performances du dispositif. En outre, des capteurs solaires thermiques (TH) peuvent être couplés à un stockage de chaleur pour satisfaire la demande d'eau chaude sanitaire (ECS) [4].

L'objectif de cette étude est de déterminer le meilleur dimensionnement et la meilleure régulation du système en utilisant une procédure d'optimisation. Celle-ci est composée d'une analyse de sensibilité, d'une optimisation multicritère et d'une aide à la décision. Tout d'abord, l'analyse de sensibilité est réalisée avec la méthode FAST et permet de sélectionner les paramètres les plus influents. Ensuite, une étude d'optimisation multicritère est effectuée avec les algorithmes génétiques pour déterminer les meilleurs compromis. Enfin, la méthode d'aide à la décision TOPSIS sélectionne la meilleure combinaison pour différents climats mondiaux.

Cet article présente une méthodologie d'optimisation appliquée à un puits canadien. Le système énergétique est modélisé et simulé dynamiquement sur une année complète dans la section 2. Ensuite, les résultats obtenus sont discutés et interprétés pour les différentes méthodes. Enfin, la meilleure solution est fournie pour les différents climats mondiaux dans la section 3.

2. Modélisation du système

Le système est composé d'un réseau d'air pour le chauffage et le rafraîchissement par ventilation et d'un réseau d'eau pour l'eau chaude sanitaire. Le réseau d'air est constitué d'un échangeur air-sol, d'une ventilation à récupération de chaleur, d'une pompe à chaleur air-air, de capteurs solaires photovoltaïques et d'un bypass. Ensuite, le réseau d'eau est composé de capteurs solaires thermiques, d'un échangeur de chaleur à plaque (EC) et d'un stockage de chaleur (SC), illustré par la Figure 1. Enfin, un bâtiment est modélisé via des besoins en énergies.

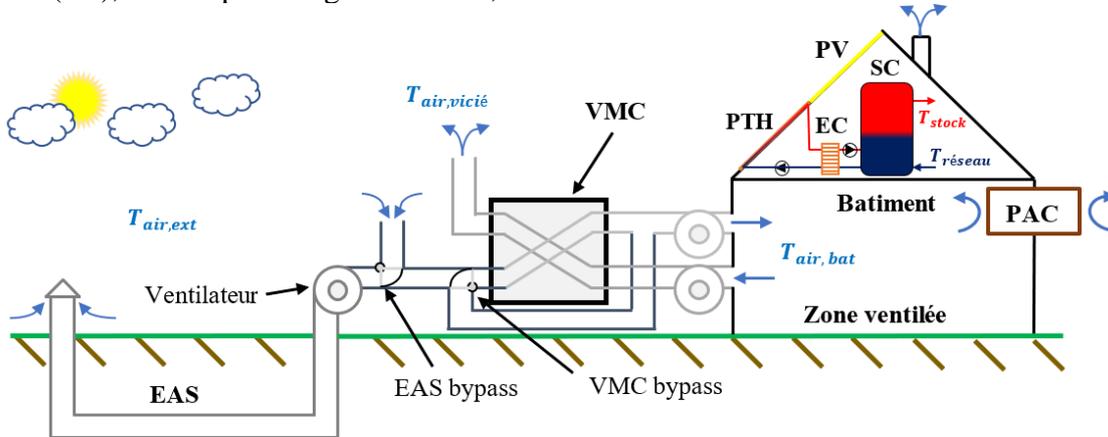


Figure 1: Schéma du système énergétique.

2.1. Echangeur de chaleur air-sol (EAS)

L'échangeur air-sol est un tube enterré dans le sol à une profondeur z avec une longueur L et un rayon r . Un ventilateur collecte l'air extérieur pour récupérer les calories du sol. Le ventilateur impose une vitesse qui est liée au renouvellement de l'air du bâtiment R_{air} . La puissance consommée par le ventilateur et celle récupérée par l'EAS sont détaillées dans [3] :

$$\begin{cases} P_{cons}^{EAS} = \frac{1}{\eta_{EAS}} \Delta p_{EAS} \left(\frac{\dot{m}_{air}}{\rho_{air}} \right) \\ P_{recu}^{EAS} = \dot{m}_{air} c_{p,air} |T_{air}^{ext} - T_{air\neuf}^{out\ EAS}| \end{cases} \quad (1)$$

avec $\eta_{EAS} = 0,63$ le rendement du ventilateur, Δp_{EAS} les pertes de charge. $T_{air\neuf}^{out\ EAS}$ et T_{air}^{ext} correspondent aux températures de l'air en sortie de l'EAS et de l'air extérieur. \dot{m}_{air} est le débit, ρ_{air} la masse volumique et $c_{p,air}$ la capacité thermique de l'air.

2.2. Ventilation à récupération de chaleur (VMC)

La ventilation à récupération de chaleur extrait une partie de l'énergie perdue provenant de l'air vicié pour l'échanger avec l'air neuf. Deux ventilateurs sont utilisés pour faire circuler l'air dans la VMC, un pour le réseau de soufflage et un autre pour le réseau de reprise. La puissance consommée par les ventilateurs et celle récupérée par la VMC sont déterminées par :

$$\begin{cases} P_{cons}^{VMC} = \frac{1}{\eta_{VMC}} \Delta p_{VMC} \left(\frac{\dot{m}_{air}}{\rho_{air}} \right) + P_{antigel} \\ P_{recu}^{VMC} = \dot{m}_{air} c_{p_{air}} |T_{air\ neuf}^{out\ VMC} - T_{air\ neuf}^{in\ VMC}| \end{cases} \quad (2)$$

avec $T_{air\ neuf}^{in\ VMC}$ et $T_{air\ neuf}^{out\ VMC}$ les températures de l'air en entrée et en sortie de la VMC. η_{VMC} et Δp_{VMC} correspondent respectivement au rendement des ventilateurs et aux pertes de charge. Un système antigel est utilisé quand la température de l'air extérieure est négative ($T^0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$) [3].

$$P_{antigel} = \dot{m}_{air} c_{p_{air}} |T_{air\ neuf}^{in\ VMC} - T^0| \quad (3)$$

2.3. Pompe à chaleur air-air (PAC)

La pompe à chaleur capte les calories de l'air pour les transférer à l'intérieur du bâtiment. Elle a besoin d'une énergie électrique pour produire de l'énergie thermique. La PAC est dimensionnée en fonction de sa puissance thermique P_{PAC} . Selon [5], deux corrélations (f_1, f_2) sont utilisées pour calculer la puissance électrique consommée P_{cons}^{PAC} et la puissance thermique produite P_{prod}^{PAC} à partir de la température de l'air du bâtiment T_{air}^{bat} et de l'air extérieur T_{air}^{ext} .

$$\begin{cases} P_{prod}^{PAC} = P_{PAC} * f_2(T_{air}^{bat}, T_{air}^{ext}) \\ P_{cons}^{PAC} = f_1(T_{air}^{bat}, T_{air}^{ext}) \end{cases} \quad (4)$$

2.4. Capteurs solaires photovoltaïques (PV)

Les capteurs solaires photovoltaïques transforment le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'un processus photoélectrique. La puissance électrique produite P_{prod}^{PV} est une fonction de la surface A_{PV} et du rendement η_0 des capteurs photovoltaïques.

$$P_{prod}^{PV} = A_{PV} [\eta_0 \Phi - (T_{air}^{ext} + K_R^{PV} \Phi - T_{air}^{bat}) K_T^{PV}] \quad (5)$$

$K_R^{PV} = 0,0035\text{ }KW^{-1}m^2$ est le coefficient de rayonnement et $K_T^{PV} = 0,61\text{ }WK^{-1}m^{-2}$ le coefficient de température [6]. Φ correspond au rayonnement solaire qui dépend des conditions météorologiques.

2.5. Capteurs solaires thermiques (TH)

Les capteurs solaires thermiques produisent de l'énergie thermique grâce au rayonnement du soleil, en chauffant le fluide caloporteur qui circule dans les collecteurs solaires. La puissance produite P_{prod}^{TH} est une fonction de la surface des capteurs thermiques A_{TH} .

$$P_{prod}^{TH} = A_{TH} \left[F_r \left(\Phi - K_{ext} (T_{eau}^{in} - T_{air}^{ext}) \right) \right] \quad (6)$$

ou T_{eau}^{in} est la température de l'eau en entrée des capteurs. F_r et K_{ext} correspondent au facteur d'évacuation de la chaleur et au coefficient global de transfert de chaleur [4], respectivement.

2.6. Echangeur de chaleur (EC)

L'échangeur de chaleur transfère l'énergie de la boucle des capteurs solaires thermiques vers la stockage de chaleur. D'après [4], l'efficacité de l'échangeur $\epsilon = 0,8$ permet d'exprimer la puissance échangée par l'EC à partir de la puissance produite par les capteurs thermiques.

$$P_{prod}^{EC} = \epsilon * P_{prod}^{TH} \quad (7)$$

2.7. Stockage d'eau chaude sanitaire (ECS)

Le système de stockage contient de l'eau chaude sanitaire. Selon [4], l'équation différentielle (8) permet de trouver le profil de température T_{eau}^{stock} qui augmente si les capteurs solaires thermiques fournissent de l'énergie et diminue s'il y a du puisage.

$$\rho_{eau} c_{p_{eau}} V_{ECS} \frac{dT_{eau}^{stock}}{dt} = P_{prod}^{EC} - P_{puisée}^{ECS} \quad (8)$$

avec V_{ECS} le volume du stockage et $P_{puisée}^{ECS}$ la puissance puisée d'eau chaude sanitaire.

$$P_{puisée}^{ECS} = \dot{m}_{eau} c_{p_{eau}} (T_{eau}^{stock} - T_{eau}^{réseau}) \quad (9)$$

T_{eau}^{stock} est la température dans le stockage d'ECS et $T_{eau}^{réseau} = 15 \text{ °C}$ la température en entrée du réseau d'eau. La puissance consommée par les pompes est exprimée par :

$$P_{cons}^{ECS} = \frac{1}{\eta_{pompe}} \Delta p_{ECS} \left(\frac{\dot{m}_{eau}}{\rho_{eau}} \right) \quad (10)$$

ou $\eta_{pompe} = 0,6$ est le rendement de la pompe et Δp_{ECS} les pertes de charge. \dot{m}_{eau} est le débit de puisage, ρ_{eau} la masse volumique et $c_{p_{eau}}$ la capacité thermique de l'eau.

2.8. Régulation

Dans le réseau d'air, le bypass sélectionne le mode d'opération qui permet d'avoir une température d'insufflation la plus proche de la température de régulation T_{reg} fixée par l'utilisateur entre 19 et 26 °C. D'après [3], les différents modes de régulation sont que l'air insufflé dans le bâtiment provient soit de l'air extérieur, soit de l'air en sortie de l'échangeur air-sol, soit de l'air en sortie de la ventilation à récupération de chaleur ou soit du couplage entre l'EAS et la VMC. De plus, dans le réseau d'eau, si la température du ballon d'eau chaude sanitaire dépasse la consigne de 60 °C, les pompes hydrauliques s'arrêtent et les capteurs n'absorbent plus d'énergie solaire.

2.9. Bâtiment

Un bâtiment collectif de 6 habitations est considéré avec un volume d'air total de 1000 m³. Ce dernier est soumis à des conditions météorologiques et les données sont composées de la température extérieure T_{air}^{ext} , de la température du bâtiment T_{air}^{bat} , du rayonnement solaire Φ et du débit de puisage \dot{m}_{eau} pour chaque heure d'une année. Le débit de puisage est fonction de trois gaussiennes qui correspondent aux besoins journaliers d'ECS. La température du bâtiment est modélisée par la température extérieure moyennée sur une journée. T_{air}^{bat} est une manière simplifiée de prendre en compte l'inertie thermique de l'air du bâtiment [4]. En outre, le bâtiment est soumis à des pertes thermiques dues à la ventilation, et à une demande de chaleur et d'ECS :

$$\begin{cases} P_{lost}^{vent} = \dot{m}_{air} c_{p_{air}} (T_{insufflée}^{bat} - T_{air}^{bat}) \\ P_{dem}^{thm} = U_{bat} A_{bat} (T_{air}^{bat} - T_{air}^{ext}) \\ P_{dem}^{ECS} = \dot{m}_{eau} c_{p_{eau}} (T_{eau}^{consigne} - T_{eau}^{réseau}) \end{cases} \quad (11)$$

avec A_{bat} la surface du bâtiment et U_{bat} le coefficient de déperdition. $T_{eau}^{consigne} = 60 \text{ °C}$ est la température de consigne d'eau chaude. Des bilans thermiques permettent de déterminer les puissances auxiliaires nécessaires pour combler le manque d'énergie :

$$\begin{cases} P_{aux}^{thm} = P_{dem}^{thm} + P_{lost}^{vent} - P_{recu}^{EAS} - P_{recu}^{VMC} - P_{prod}^{PAC} \\ P_{aux}^{elec} = P_{cons}^{ECS} + P_{cons}^{PAC} + P_{cons}^{EAS} + P_{cons}^{VMC} - P_{prod}^{PV} \\ P_{aux}^{ECS} = P_{dem}^{ECS} - P_{puisée}^{ECS} \end{cases} \quad (12)$$

3. Résultats et discussions

La procédure d'optimisation est composée d'une analyse de sensibilité, d'une optimisation multicritère et d'une aide à la décision multicritère pour déterminer le meilleur dimensionnement et la meilleure régulation du système pour différents climats mondiaux.

3.1. Définition des variables et des objectifs

Les variables de dimensionnement sont le rayon r , la longueur L , la profondeur z de l'échangeur de chaleur air-sol, la puissance de la pompe à chaleur P_{PAC} , les surfaces des capteurs photovoltaïques A_{PV} et thermiques A_{TH} . Les paramètres de régulation sont le renouvellement de l'air R_{air} et la température de régulation T_{reg} . Le Tableau 1 présente les valeurs de référence [3, 4] et les valeurs limites des différents paramètres. La valeur du minimum et du maximum a une variation de $\pm 30\%$ par rapport à la valeur de référence.

Variable	r	L	z	R_{air}	T_{reg}	A_{PV}	P_{PAC}	A_{TH}	V_{ECS}
Unité	m	m	m	h^{-1}	$^{\circ}C$	m^2	kW	m^2	m^3
Référence	0,25	50,0	2,50	0,50	22,5	10,0	3,00	25,0	1,20
Minimum	0,18	35,0	1,75	0,35	19,0	7,0	2,10	18,0	0,80
Maximum	0,33	65,0	3,25	0,65	26,0	13,0	3,90	33,0	2,10

Tableau 1 : Valeurs de référence et valeurs limites des variables.

Les objectifs correspondent à deux critères énergétiques et un critère économique. La fraction d'énergie renouvelable F_{ENR} annuelle ($T = 1$ an) est liée à l'énergie auxiliaire totale et à la demande d'énergie (thermique et eau chaude sanitaire).

$$F_{ENR} = 1 - \frac{\int_0^T (P_{aux}^{thm} + P_{aux}^{elec} + P_{aux}^{ECS}) dt}{\int_0^T (P_{dem}^{thm} + P_{dem}^{ECS}) dt} \quad (13)$$

Le coefficient de performance (COP) annuel du système est défini par le rapport entre l'énergie thermique récupérée et l'énergie électrique consommée.

$$COP = \frac{\int_0^T (P_{recu}^{EAS} + P_{recu}^{VMC} + P_{prod}^{PAC} + P_{puisée}^{ECS}) dt}{\int_0^T (P_{cons}^{EAS} + P_{cons}^{VMC} + P_{cons}^{PAC} + P_{cons}^{ECS}) dt} \quad (14)$$

Le coût de l'énergie récupérée (CER) est le ratio entre le coût total du système (installation, opération et maintenance) et l'énergie récupérée durant sa durée de vie de $N_{ans} = 20$ ans.

$$CER = \frac{COût_{installation} + COût_{opération} + COût_{maintenance}}{N_{ans} * \int_0^T (P_{recu}^{EAS} + P_{recu}^{VMC} + P_{prod}^{PAC} + P_{puisée}^{ECS}) dt} \quad (15)$$

Les prix de l'échangeur air-sol et de la ventilation à récupération de chaleur sont détaillés dans [3]. Le coût d'installation quantifie la facturation de la main-d'œuvre et des matériaux. L'achat des panneaux photovoltaïques dépend de la surface des capteurs, de l'onduleur et du raccordement au réseau. De même, le coût de la pompe à chaleur dépend de sa puissance. De plus, les frais de stockage et des capteurs thermiques sont une fonction du volume V_{ECS} et de la surface A_{TH} , respectivement. En outre, le coût de maintenance est lié au nettoyage des capteurs photovoltaïques et thermiques une fois par an. Enfin, le coût d'opération est défini par le produit entre le prix de l'électricité P_{elec} et l'énergie auxiliaire sollicitée. P_{elec} varie entre les différentes capitales [7] référencées dans le Tableau 3.

3.2. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a pour objectif d'identifier, de hiérarchiser les facteurs les plus influents et de déterminer les facteurs non influents afin de les rendre constants [8]. Dans cette

étude, la méthode FAST [8] consiste à approcher les fonctions objectifs par des harmoniques en utilisant les transformées de Fourier. Cette technique évalue les indices de Sobol qui sont des estimateurs permettant de quantifier les variations des paramètres sur les objectifs.

Le Tableau 2 présente le classement des variables en fonction de l'indice de Sobol moyenné $\bar{I}S$ sur les 3 objectifs et sur les 5 capitales étudiées. Les résultats montrent que P_{PAC} , A_{TH} , R_{air} , V_{ECS} et A_{PV} sont les paramètres les plus influents, car les valeurs des contributions sont de 29,4 % ; 28,8 % ; 17,2 % ; 6,2 % ; 6,0 %, respectivement. Les autres paramètres n'ont pas d'impact sur les objectifs car les $\bar{I}S$ sont inférieurs à 0,05. Par conséquent, les variables sélectionnées pour la procédure d'optimisation sont R_{air} , P_{PAC} , A_{PV} , V_{ECS} et A_{TH} . Les autres variables sont fixées à leur valeur de référence.

En outre, les valeurs limites correspondent au dimensionnement d'un bâtiment collectif de 400 m^2 [3, 4]. Pour le processus d'optimisation, les variables varient entre $[0,35 ; 0,65] \text{ h}^{-1}$ pour R_{air} , $[0,2 ; 2,0] \text{ m}^3$ pour V_{ECS} , $[0 ; 10] \text{ kW}$ pour P_{PAC} et $[0 ; 100] \text{ m}^2$ pour A_{PV} et A_{TH} .

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Variable	P_{PAC}	A_{TH}	R_{air}	V_{ECS}	A_{PV}	T_{reg}	L	z	r
$\bar{I}S$	0,294	0,288	0,172	0,062	0,060	0,048	0,021	0,011	0,002

Tableau 2 : Classement des variables en fonction de l'indice de Sobol moyen.

3.3. Optimisation multicritère

Un problème d'optimisation multicritère cherche à optimiser simultanément plusieurs fonctions objectifs. Il n'existe pas une seule solution pour ce problème, mais c'est un ensemble de solutions qui possède un bon compromis pour les différents objectifs et qui forme le front de Pareto. Dans cette étude, l'algorithme NSGA-II [9] utilise un processus de sélection, de croisement et de mutation pour faire évoluer une population de 100 individus sur 1 000 générations. Compte tenu du grand nombre de résultats obtenus sur l'ensemble des 5 capitales et du fait que les fronts de Pareto sont équivalents, seules les figures pour Moscou sont montrées.

La Figure 2 montre les solutions de Pareto en fonction des objectifs. Chaque point correspond à une solution qui est colorée en fonction des valeurs des paramètres. Quand le F_{ENR} augmente de 0,30 à 0,98, le COP diminue de 12 à 4 et le CER diminue de 0,30 à 0,04 €/kWh. La Figure 2 a) présente le front de Pareto en fonction du renouvellement de l'air. Quand R_{air} varie entre 0,35 et 0,65 vol/h, le F_{ENR} augmente, le COP et le CER diminuent. En effet, lorsque R_{air} augmente, l'énergie récupérée par l'EAS/VMC augmente mais l'énergie consommée par les ventilateurs augmente également due aux pertes de charge. La Figure 2 b) illustre les meilleures solutions en fonction de la puissance de la pompe à chaleur. Lorsque P_{PAC} augmente entre 0 et 10 kW, le CER et le COP diminuent, car l'énergie thermique récupérée par la PAC augmente, mais l'énergie électrique consommée augmente également. De même, quand P_{PAC} est maximale, les besoins de chaleur sont satisfaits mais pas les besoins électriques et d'ECS. La Figure 2 c) expose les solutions de Pareto en fonction de la surface des capteurs photovoltaïques. Dans le cas où A_{PV} augmente de 0 à 100 m^2 , le F_{ENR} accroit pour combler la demande d'électricité, mais pas les besoins d'ECS. De plus, l'augmentation de A_{PV} entraîne un surcoût du système et donc un CER plus élevé. La Figure 2 d) présente le front de Pareto pour la surface des capteurs thermiques. Lorsque A_{TH} varie de 10 à 100 m^2 , le F_{ENR} augmente pour satisfaire les besoins d'ECS mais provoque une augmentation du CER à cause du surcoût du système. Enfin, quand V_{ECS} varie de 0,5 à 1,9 m^3 , le F_{ENR} augmente, car le ballon stocke plus d'énergie et utilise moins les énergies auxiliaires pour combler la demande d'ECS. Cependant, lorsque V_{ECS} augmente, le CER augmente en raison du coût total du système.

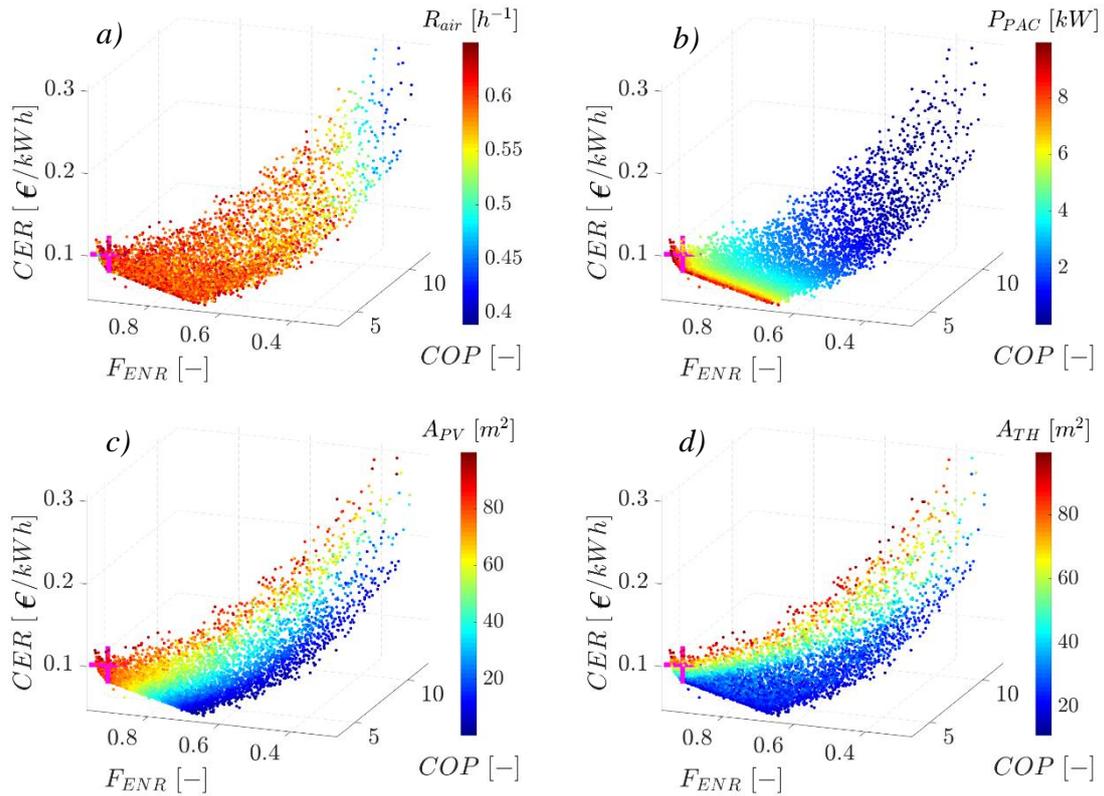


Figure 2 : Représentation du front de Pareto en fonction des paramètres pour Moscou. La croix rose correspond au meilleur compromis obtenue avec la méthode TOPSIS.

3.4. Aide à la décision multicritère

L'aide à la décision est l'ensemble des techniques utilisées pour choisir la meilleure des solutions possibles. L'utilisateur a un rôle important dans ce choix, dans ce cas, il pourra donner plus ou moins d'importance à certains objectifs. La méthode TOPSIS [10] consiste à sélectionner la solution qui se rapproche le plus de la solution idéale. Dans cette étude, le meilleur dimensionnement et la meilleure régulation sont sélectionnés avec la méthode TOPSIS. L'importance associée à chaque objectif est de 1/3 et la solution idéale correspond au maximum de F_{ENR} et de COP , et au minimum de CER .

Le Tableau 3 présente les meilleurs compromis pour les 5 capitales étudiées. Pour les variables, R_{air} varie entre 0,37 et 0,64 vol/h, A_{PV} entre 11,7 et 78,8 m^2 , P_{PAC} entre 3,49 et 6,72 kW, V_{ECS} entre 0,55 et 1,74 m^3 , et A_{TH} entre 10,7 et 70,9 m^2 . Pour les objectifs, le COP varie entre 4,1 et 6,6, le F_{ENR} entre 0,94 et 0,99 et le CER entre 0,08 et 0,18 €/kWh. Le coefficient de performance est élevé grâce à l'utilisation des échangeurs air-sol qui permet d'obtenir de grandes performances. Dans ce cas, le système est presque indépendant des énergies auxiliaires car la fraction d'énergie renouvelable est proche de 1. Il serait possible d'améliorer le F_{ENR} en augmentant A_{TH} , A_{PV} et P_{PAC} mais cela augmenterait le CER . De plus, le coût de l'énergie récupérée est inférieur au prix de l'électricité pour presque toutes les capitales, ce qui signifie que le système est rentable. Cependant le meilleur compromis de Moscou a un CER supérieur à P_{elec} car le prix de l'électricité est faible. Il existe une solution qui permet d'avoir un CER de 0,047 €/kWh en diminuant le COP à 4,0 et le F_{ENR} à 0,66.

Par ailleurs, pour les climats froids, comme Ottawa et Moscou, le COP , le CER et le F_{ENR} sont plus faibles par rapport aux autres capitales. En effet, le COP est moins important car R_{air} est élevé, en raison de l'augmentation de l'énergie consommée. Lorsque CER est plus faible, il permet de récupérer plus d'énergie quel qu'en soit le coût. Quand la F_{ENR} est plus faible, le

système n'est pas en mesure de satisfaire la demande d'énergie et en particulier les besoins d'ECS. Ensuite, pour les climats chauds, comme Ouagadougou et Canberra, R_{air} , A_{PV} , P_{PAC} , V_{ECS} et A_{TH} sont plus faibles car le système a besoin de récupérer moins d'énergie pour satisfaire la demande, de ce fait, les objectifs sont plus élevés. Enfin, pour le climat tempéré (Paris), les valeurs des objectifs et des paramètres sont cohérentes car elles sont intermédiaires par rapport aux résultats précédents.

/	COP	F_{ENR}	CER / P_{elec}	R_{air}	A_{PV}	P_{PAC}	V_{ECS}	A_{TH}
Unité	—	—	€/kWh	h^{-1}	m^2	kW	m^3	m^2
Moscou	4,22	0,939	0,094 > 0,049	0,586	78,8	6,72	1,74	70,9
Ottawa	4,12	0,956	0,088 < 0,091	0,644	65,2	6,68	1,06	67,9
Ouagadougou	6,09	0,991	0,083 < 0,188	0,368	11,7	4,40	0,55	10,7
Paris	5,25	0,954	0,118 < 0,180	0,463	45,6	5,94	1,19	63,6
Canberra	6,55	0,957	0,175 < 0,210	0,409	13,0	3,49	1,07	56,7

Tableau 3 : Meilleur compromis de la procédure d'optimisation multi-objectifs.

4. Conclusion et perspective

Cette étude présente un processus d'optimisation multicritère appliqué à un système énergétique composé d'un échangeur de chaleur air-sol, d'une pompe à chaleur et d'un stockage de chaleur. Tout d'abord, une analyse de sensibilité montre que R_{air} , P_{PAC} , A_{PV} , V_{ECS} et A_{TH} sont les paramètres les plus influents. Ensuite, une optimisation multicritère permet d'identifier les solutions de Pareto qui sont un bon compromis pour les différents objectifs. Lorsque le F_{ENR} augmente, le CER et le COP diminuent. Enfin, une méthode d'aide à la décision multicritère sélectionne le meilleur compromis pour les différents climats mondiaux étudiés. Quel que soit les conditions climatiques, le système demeure rentable, autonome et efficace. Il serait intéressant d'appliquer cette procédure d'optimisation à un système composé d'une éolienne avec un stockage d'électricité par batteries pour satisfaire les besoins d'électricité.

Références

- [1] https://webstore.iea.org/download/direct/4093?filename=key_world_energy_statistics_2020.pdf (site consulté le 16/03/2021).
- [2] H. Li, L. Ni, G. Liu, Z. Zhao, Y. Yao, Feasibility study on applications of an earth-air heat exchanger (EAHE) for preheating fresh air in severe cold regions, *Renewable Energy* 133(2018)1268–1284.
- [3] A. Lapertot, M. Cuny, B. Kadoch, O. Le Métayer, Optimization of an earth-air heat exchanger combined with a heat recovery ventilation for residential building needs, *Energy and Buildings* (2021), p.110702.
- [4] S. Launay, B. Kadoch, O. Le Métayer, C. Parrado, Analysis strategy for multi-criteria optimization: Application to inter-seasonal solar heat storage for residential building needs, *Energy* 171(2019) 419-434.
- [5] H. Blervaque. Modeling rules of energy system in low energy buildings. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. Français. (NNT: 2014ENMP0032). (tel-01139365).
- [6] P. Poulet. R. Outbib. Energy production for dwellings by using hybrid systems based on heat pump variable input power. *Applied Energy* 147(2015)413-429.
- [7] <https://fr.globalpetrolprices.com/> (site consulté le 15/12/2020).
- [8] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola, *Global Sensitivity Analysis. The Primer*, Vol. 304, John Wiley & Sons, 2008.
- [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6 (2002) 182 – 197.
- [10] G. H. Tzeng, J. J. Huang, *Multiple attribute decision making: Methods and applications*, CRC Press, Taylor and Francis Group, A Chapman & Hall Book, Boca Raton, 2011.