

Optimisation multicritère d'un système solaire inter-saisonnier

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

¹ Aix Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille, France

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

Résumé – Un système solaire thermique est couplé à un stockage de chaleur inter-saisonnier et à un ballon d'eau chaude sanitaire (ECS), il permet de capter l'énergie solaire afin de produire du chauffage et de l'ECS pour un bâtiment collectif. La procédure d'optimisation a été appliquée au système énergétique pour déterminer les meilleurs dimensionnements et régulations en prenant en compte un critère économique, énergétique et environnementale. La méthodologie d'optimisation est composée d'une analyse de sensibilité, d'une optimisation multi-objectif et d'une aide à la décision multicritère. L'influence de la stratification du stockage inter-saisonnier a été également étudié.

Nomenclature

E énergie, kWh

\dot{m} débit massique, kg.s⁻¹

T température, °C

S surface, m²

V volume, m³

Symboles grecs

ΔT différence de température, °C

Indices et exposants

cons consigne

fe fluide entrée

fs fluide sortie

thm thermique

dem demande

r réseau

rs retour au stockage

s stockage

Abréviations

ECS eau chaude sanitaire

CO₂ dioxyde de carbone

LCOE levelized cost of energy (€/kWh)

1. Introduction

En France, la consommation d'énergie augmente rapidement depuis ces dernières années. Le secteur du bâtiment représente 44 % de la consommation d'énergie et près de 25 % des émissions de CO₂ [1]. De plus, le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) représentent 75 % de la consommation totale dans les bâtiments et est responsable de 20 % des émissions de CO₂ [1]. Pour réduire l'impact énergétique, économique et environnemental, il faut élaborer des systèmes basés sur les énergies renouvelables afin de satisfaire les besoins énergétiques des bâtiments. Il est également nécessaire d'appliquer une procédure d'optimisation pour déterminer le meilleur dimensionnement et la meilleure régulation du dispositif.

Une méthodologie d'optimisation multi-objectif est appliquée à un système inter-saisonnier pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire. La modélisation du système est présentée dans la partie 2. Ensuite, une analyse de sensibilité est appliquée, avec la méthode de Morris, pour observer l'impact des paramètres sur les objectifs et ainsi déterminer les facteurs les plus influents. Puis, une procédure d'optimisation multicritère, avec l'algorithme par essaim particuliaire PSO, permet d'identifier les solutions qui possèdent un bon compromis entre les objectifs. Enfin, une aide à la décision multicritère, avec la méthode VIKOR, est utilisée pour sélectionner la meilleure solution. Les critères sont de minimiser le coût de l'énergie et les émissions de CO₂, et de maximiser la fraction solaire. Les variables du système sont les paramètres de dimensionnement et de régulation. Les résultats de la méthodologie d'optimisation sont décrits par la partie 3. Une discussion sera également apportée sur l'influence de la stratification du stockage de chaleur inter-saisonnier.

2. Description du modèle

2.1. Modélisation du système

Un bâtiment collectif de huit habitations permet de capter de l'énergie à l'aide de ses panneaux solaires thermiques pour la stocker dans un ballon de stockage inter-saisonnier de chaleur et dans un ballon d'eau chaude sanitaire, comme illustré par la figure 1. Plus concrètement, ce dispositif permet de stocker de l'énergie en été pour la réutiliser en hiver sous forme de chaleur et au cours de l'année sous forme d'eau chaude sanitaire. Les données météorologiques de la ville de Marseille située dans le sud de la France sont considérées pour cette étude.

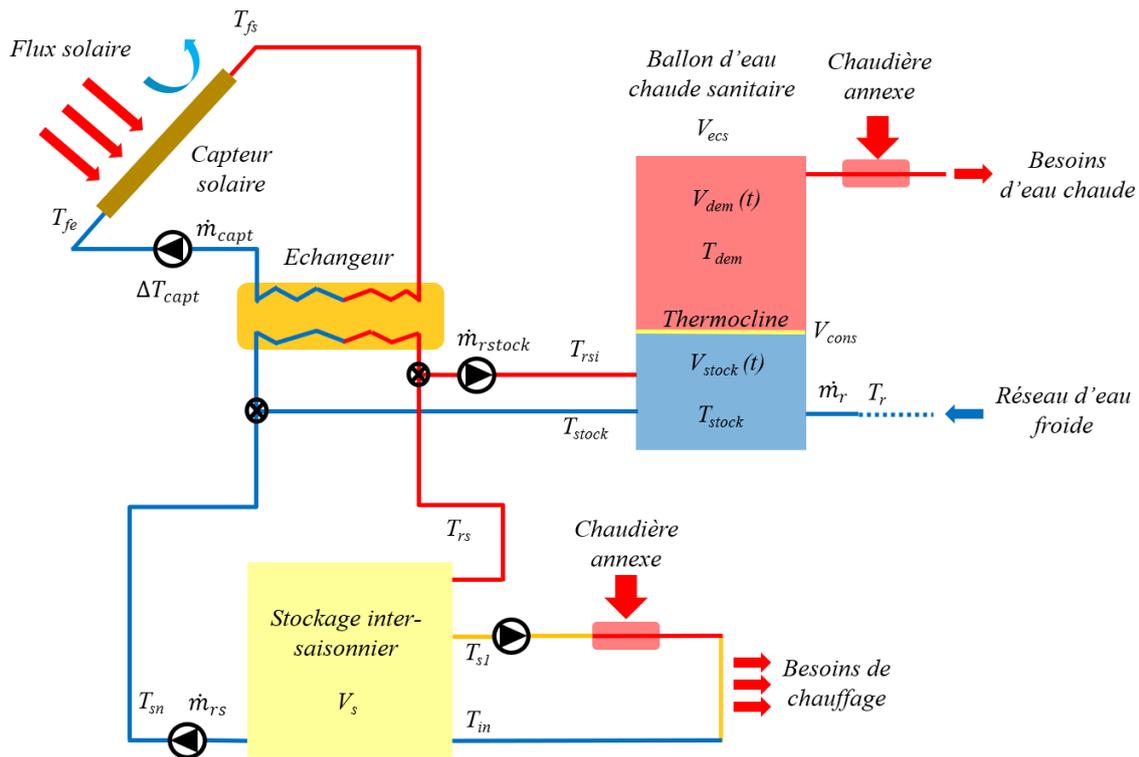


Figure 1 : Schéma du système solaire thermique inter-saisonnier.

La modélisation du système énergétique est détaillée dans [2]. Dans un premier temps, les panneaux solaires captent de l'énergie solaire afin de chauffer un fluide calorifique qui circule dans la boucle des capteurs à l'aide d'une pompe. Ensuite, un échangeur de chaleur à plaques eau-eau transfère la chaleur vers un autre fluide calorifique. Ce circuit est connecté à un stockage inter-saisonnier de chaleur et à un ballon d'eau chaude sanitaire, il est muni de deux pompes qui permettent de réguler l'un des deux types de stockage, sachant que le ballon d'ECS est prioritaire puisque sa demande est plus faible. De plus, le stockage inter-saisonnier permet de conserver de la chaleur, il est situé dans le sol et est soumis à des pertes thermiques. Le ballon d'ECS permet de stocker de l'eau chaude sanitaire. Il est situé à l'intérieur du bâtiment et ne subit pas de pertes de chaleur. Dans un second temps, le puisage dans le stockage inter-saisonnier permet de satisfaire les besoins de chauffage, le ballon est rempli avec de l'eau froide. Si le stockage ne contient pas assez d'énergie, alors le système d'appoint au gaz fournira la part d'énergie manquante. Il en est de même pour le stockage d'eau chaude sanitaire, mais dans ce cas, le ballon est approvisionné directement avec de l'eau froide du réseau.

2.2. Stockage de chaleur inter-saisonnier

Le stockage thermique permet de conserver de l'énergie sous forme de chaleur. La température dans le ballon augmente si les capteurs solaires thermiques fournissent de l'énergie et diminue s'il y a du puisage ou des pertes thermiques.

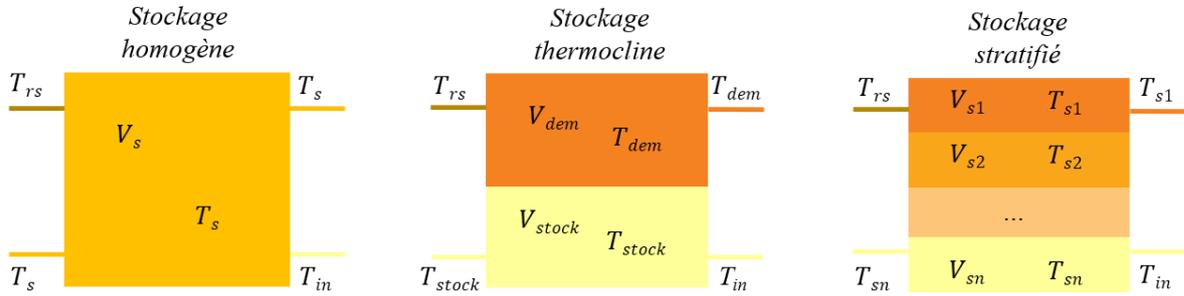


Figure 2 : Schéma du modèle homogène (gauche), thermocline (centre) et stratifié (droite) pour le stockage inter-saisonnier.

Cette étude consiste aussi à observer l'influence de différents modèles pour le stockage inter-saisonnier sur les résultats. Le premier est un ballon à une température homogène T_s [2]. Le deuxième correspond au modèle de la thermocline avec une partie d'eau chaude à la température de consigne et une partie d'eau froide à la température du stockage qui est calculée avec une EDP. Le troisième est le stockage stratifié composé de $n = 10$ volumes identiques avec des températures du plus chaud dans la strate supérieure au plus froid dans la strate inférieure [4]. Par ailleurs, la température en entrée du ballon T_{in} est définie par la température de la strate la plus haute moins ce qui est prélevé pour le chauffage qu'on estime à ΔT_{chauf} .

$$T_{in} = T_{s1} - \Delta T_{chauf} \quad (1)$$

2.3. Variables et objectifs

Le système est constitué de nombreuses variables qui peuvent avoir un impact sur le dispositif (voir tableau 1). Une procédure d'optimisation est appliquée aux paramètres de dimensionnement tels que la surface S_{capt} , l'inclinaison ia des capteurs solaires thermiques, le volume du ballon d'eau chaude sanitaire V_{ecs} et le stockage de chaleur inter-saisonnier V_s . Les paramètres de régulation sont la différence des températures entre la sortie et l'entrée du fluide calorifique des capteurs solaires ΔT_{capt} qui permet d'activer la pompe dans le circuit des collecteurs. La différence de température ΔT_{chauf} estime la diminution de la température prélevée pour le réseau de chauffage. De plus, le volume de consigne de la thermocline V_{cons} permet d'activer la pompe du ballon d'ECS si la position de la thermocline est supérieure à ce volume sinon c'est la pompe du stockage de chaleur qui prend le relai.

$$\Delta T_{capt} = T_{fs} - T_{fe} \quad (2)$$

$$V_{cons} = \frac{V_{stock}}{V_{ecs}} \quad (3)$$

Facteur	V_{cons} [%]	ΔT_{capt} [K]	ΔT_{chauf} [K]	V_{ecs} [m^3]	V_s [m^3]	S_{capt} [m^2]	ia [°]
Min	0.25	2	2	0.6	100	100	0
Ref	0.50	4	4	1.2	200	200	45
Max	0.75	6	6	1.8	300	300	90

Tableau 1 : Récapitulatif des valeurs limites des paramètres.

Les objectifs du problème d'optimisation sont de minimiser le coût de l'énergie $LCOE$ et les émissions de dioxyde de carbone f_{CO_2} , et de maximiser la fraction solaire F_s .

Tout d'abord, le $LCOE$ est la somme des coûts incluant l'investissement, la maintenance et l'opération. Ce coût total est divisé par l'énergie produite sous forme de chaleur et d'eau chaude sanitaire sur une année multipliée par le temps de vie de fonctionnement du système égal à $N_{année} = 30$ ans.

$$LCOE = \frac{Coût_{investissement} + Coût_{maintenance} + Coût_{opération}}{N_{année} * (E_{demande thm} + E_{demande ECS})} \quad (4)$$

La fraction solaire annuelle correspond au rapport entre l'énergie produite par les capteurs solaires thermiques et les besoins d'énergie sous forme de chaleur et d'eau chaude sanitaire.

$$F_s = \frac{E_{produite thm}}{E_{demande thm} + E_{demande ECS}} \quad (5)$$

Les émissions de dioxyde de carbone annuelles au gramme par kWh sont obtenues en réalisant le rapport entre l'énergie auxiliaire et la demande totale en énergie.

$$f_{CO_2} = \frac{E_{auxiliaire} * g_{CO_2}}{E_{demande thm} + E_{demande ECS}} \quad (6)$$

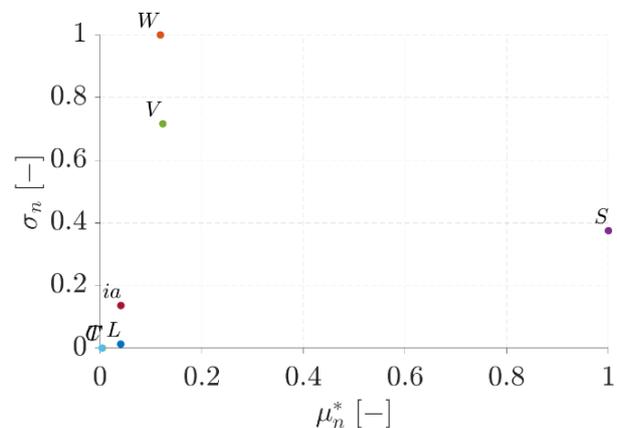
Le coût d'investissement prend en compte le prix des capteurs solaires thermiques, du ballon de stockage de chaleur inter-saisonnier et d'eau chaude sanitaire. Le coût d'opération est égal au prix de l'électricité multiplié par l'énergie consommée par le système d'appoint. Le coût de maintenance tient compte du nettoyage des capteurs.

3. Résultats et discussions

3.1. Analyse de sensibilité

Une étude d'analyse de sensibilité est réalisée pour identifier les paramètres les plus influents en prenant en compte leurs interactions. La méthode de Morris a été développée dans [5], son principe consiste à faire varier un facteur à la fois en répétant le processus. Cette analyse est peu coûteuse, car elle nécessite $N_{rep} (N_{var} + 1)$ évaluations, avec N_{rep} l'ensemble des répétitions et N_{var} le nombre de variables. Cette technique ne requiert pas d'hypothèse sur la forme du modèle, mais, l'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne donne pas de valeur quantitative sur la contribution du facteur puisqu'elle fournit seulement un classement. Elle calcule la variance σ , la moyenne μ et sa valeur absolue $\mu^* = |\mu|$.

σ élevé	facteur influent, effet non monotone et/ou interactions	facteur influent, effet non linéaire et/ou interactions
σ faible	facteur négligeable	facteur influent, effet linéaire
	μ faible	μ élevé



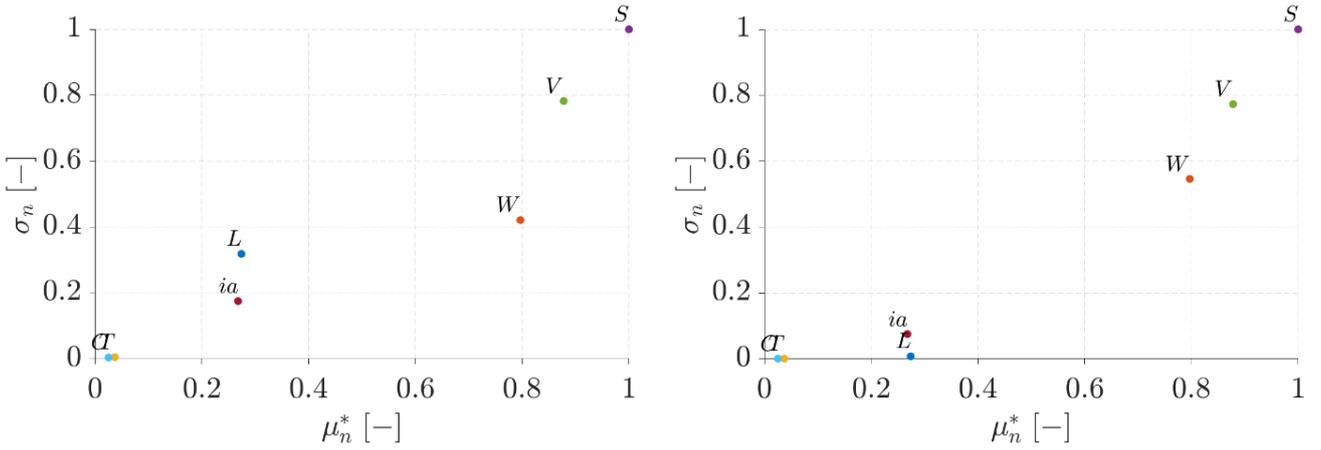


Figure 3 : Variation des valeurs normalisées de σ en fonction de μ^* pour le LCOE en haut, pour la F_s en bas à gauche et pour le f_{CO_2} en bas à droite dans le cas d'un stockage stratifié.

La figure 3 montre que la surface des capteurs solaires, les volumes du stockage de chaleur et d'ECS sont les facteurs les plus prépondérants, car leurs moyennes absolues sont élevées. En effet, lorsque S_{capt} augmente, l'énergie captée est plus élevée et lorsque V_s et V_{ecs} augmentent, l'énergie stockée est plus élevée, ce qui implique que l'énergie d'appoint est plus faible. Pour le LCOE, les variables V_s et V_{ecs} ont des effets d'interaction. Pour la F_s et le f_{CO_2} , les facteurs S_{capt} et V_s ont également des effets de couplage puisque la variance est élevée. L'inclinaison des capteurs et le volume de consigne ont une faible influence pour les trois objectifs et les deux différences de températures ΔT_{capt} et ΔT_{chauf} n'ont pas d'impact sur les critères.

Le tableau 2 présente la hiérarchie des différentes variables pour les trois stockages de chaleur. Les modèles permettent de fournir un classement similaire. Le classement de Morris est réalisé à partir de la distance normalisée moyennée \overline{D}_n^* . Les cinq premières variables sont les facteurs les plus influents, car ils ont une distance supérieure à 0.1.

Nom	$D_n^*(1)$ [-]	$D_n^*(2)$ [-]	$D_n^*(3)$ [-]	\overline{D}_n^* [-]	Rang Morris
$S = S_{capt}$	1.000	1.000	1.000	1.000	1
$V = V_s$	0.665	0.635	0.779	0.693	2
$W = V_{ecs}$	0.586	0.547	0.754	0.629	3
ia	0.219	0.441	0.185	0.282	4
$L = V_{cons}$	0.167	0.131	0.177	0.158	5
$T = \Delta T_{capt}$	0.058	0.063	0.019	0.047	6
$C = \Delta T_{chauf}$	0.000	0.010	0.013	0.008	7

Tableau 2 : Classement des paramètres à partir des distances normalisées D_n^* pour un stockage homogène (1), thermocline (2) et stratifié (3) et de la distance normalisée moyennée \overline{D}_n^* .

Les distances sont déterminées par $D_n^*(i) = \frac{D^*(i)}{\max(D^*)}$ et $D^*(i) = \sqrt{\sigma^2 + \mu^{*2}}$.

Les paramètres de dimensionnement ont beaucoup plus d'influence que les variables de régulation sur les objectifs. Les facteurs sélectionnés pour la procédure d'optimisation sont l'inclinaison ia , la surface des capteurs solaires thermiques S_{capt} , le volume du stockage inter-saisonnier V_s et d'eau chaude sanitaire V_{ecs} et le volume de consigne V_{cons} . Les autres paramètres sont fixés à leur valeur de référence. Le modèle du stockage n'a pas d'influence sur le classement des paramètres, par la suite, le stockage stratifié sera utilisé pour l'optimisation.

3.2. Application de l'optimisation multi-objectifs

L'algorithme « Particle Swarm Optimization » PSO, détaillé dans [6], consiste à faire évoluer un essaim de particule afin de déterminer toutes les solutions qui ont un bon compromis entre les objectifs, ces solutions se regroupent sur le front de Pareto. Pour résoudre le problème d'optimisation multi-objectif, 250 000 évaluations sont nécessaires, pour cela, la méthodologie a été implémentée et parallélisée sur Fortran avec 50 processeurs.

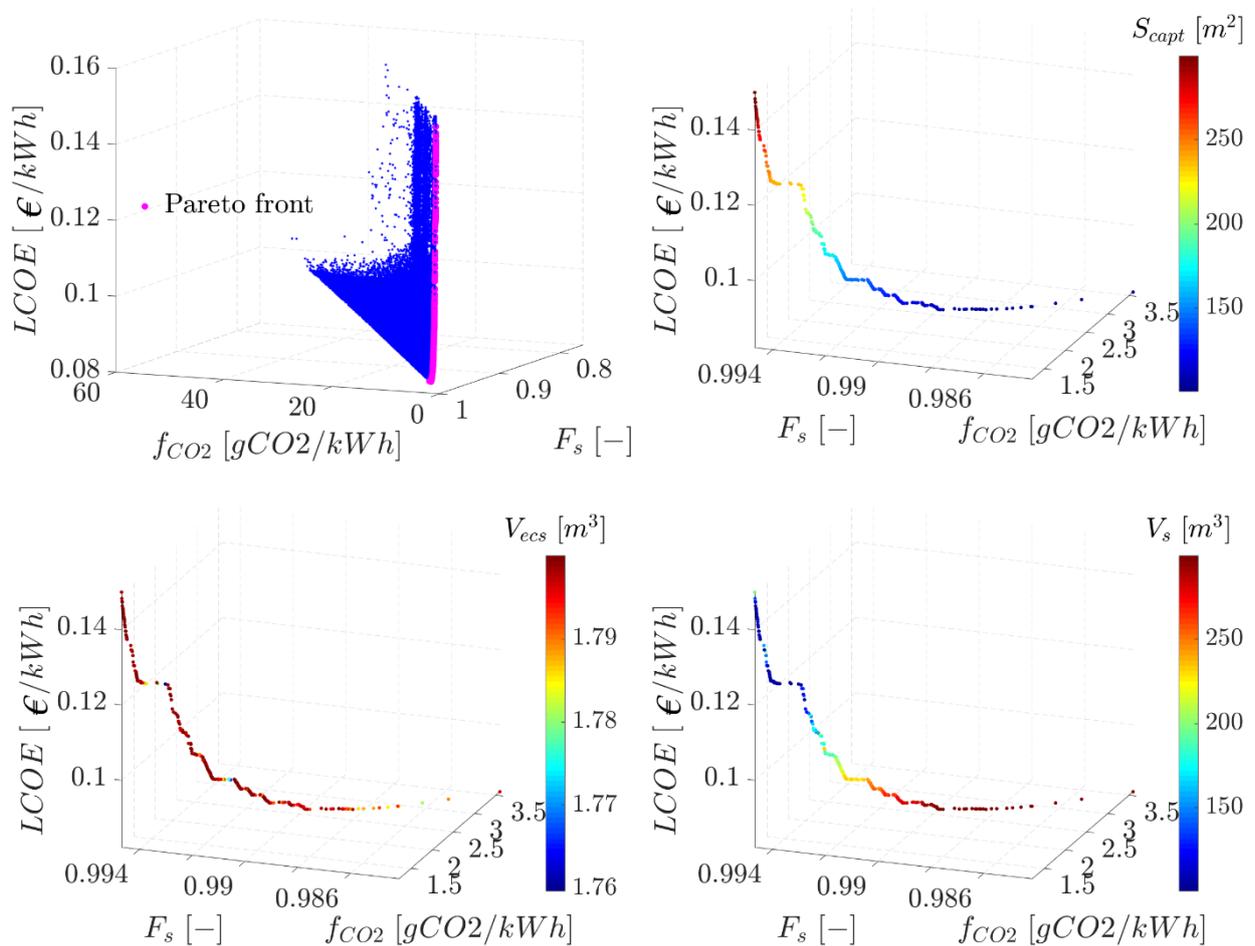


Figure 4 : Front de Pareto pour les différentes variables pour un stockage stratifié.

La figure 4 illustre l'ensemble des solutions obtenues en fonction des trois critères. Les points bleus correspondent à l'ensemble des solutions et les points roses au front de Pareto. Les résultats montrent que lorsque le $LCOE$ diminue entre 0.15 et 0.08 €/kWh et la F_s diminue entre 0.995 et 0.984, le f_{CO_2} augmente entre 1.5 et 3.5 g/kWh. Parmi les solutions de Pareto, certains points ne minimisent que le $LCOE$ (partie droite du front), d'autres solutions améliorent la F_s et le f_{CO_2} (partie gauche) et les points au centre constituent de bons compromis pour les trois objectifs. Le maximum de F_s est obtenu pour une grande surface S_{capt} afin de récupérer plus d'énergie solaire, un grand volume V_{ecs} pour stocker le plus d'énergie possible mais un faible V_s pour éviter les pertes de chaleur entre le stockage thermique et le sol. Dans ce cas, les émissions de dioxyde de carbone f_{CO_2} diminuent, car l'énergie auxiliaire est plus faible donc le système a moins recours au chauffage à gaz. De même, le $LCOE$ augmente puisque le système coûte beaucoup cher sachant que les besoins de chauffage et d'ECS sont similaires.

Par ailleurs, la fraction solaire n'est pas égale à un, effectivement, les besoins de chauffage sont totalement assurés mais pas les besoins d'ECS en raison d'un volume de stockage d'eau

chaude trop faible. En effet, le système a recours aux énergies auxiliaires lorsque les conditions météorologiques sont défavorables pendant plusieurs jours consécutifs.

3.3. Application d'une aide à la décision

La méthode d'aide à la décision VIKOR [7] est utilisée pour déterminer la meilleure solution parmi le front de Pareto. Elle consiste à sélectionner le point le plus proche de la solution idéale (min $LCOE$, min f_{CO_2} et max F_s) avec un poids de 1 pour chaque objectif.

Le tableau 3 présente les valeurs des objectifs et des variables de la solution optimale. Le $LCOE$ a une valeur de 0.089 €/kWh donc le système a un coût de l'énergie plus faible que le prix de l'électricité de 0.120 €/kWh en France. La fraction solaire est égale à 0.99, puisque le système n'a presque pas recours aux énergies auxiliaires. Les émissions de CO2 sont de 2.264 g/kWh donc le système a un impact environnemental très faible. Selon [8], les émissions de CO2 dans les bâtiments représentent 227 g/kWh pour le chauffage avec le gaz naturel et 147 g/kWh avec l'électricité, ce qui est largement supérieur à la valeur obtenue.

De plus, la surface des collecteurs doit être égale à 118 m², le volume de stockage d'ECS est de 1.8 m³, le volume de stockage inter-saisonnier de 299 m³ et l'inclinaison des capteurs de 40 °. La régulation du système permet de remplir le ballon de stockage d'ECS quand le volume de consigne est de 33 %. Le système permet d'atteindre de haute performance pour les trois stockages de chaleur, car la valeur de σ est inférieure à 10 % sur les objectifs.

/	Objectifs			Variables				
	Paramètre	$LCOE$	F_s	f_{CO_2}	V_{cons}	S_{capt}	V_{ECS}	V_s
Unité	€/kWh	–	g/kWh	%	m ²	m ³	m ³	°
Homogène	0.090	0.991	2.153	40.51	124.9	1.798	298.4	36.88
Thermocline	0.091	0.990	2.269	30.25	118.5	1.793	299.8	45.10
Stratifié	0.085	0.989	2.369	28.91	109.4	1.798	298.9	39.31
\bar{x}	0.089	0.990	2.264	33.22	117.6	1.796	299.0	40.43
σ [%]	2.757	0.067	3.259	14.62	4.649	0.124	0.171	7.701

Tableau 3 : Solution optimale du système solaire inter-saisonnier.

L'écart relatif moyen et la moyenne sont exprimés par : $\sigma = \frac{1}{3} \sum \left(\frac{x-\bar{x}}{\bar{x}} \right)$ et $\bar{x} = \frac{1}{3} \sum (x)$.

3.4. Analyse de la solution optimale

La figure 5 à gauche, illustre l'évolution de l'énergie pour le stockage stratifié, il est vide en mars et est rempli en septembre. Les valeurs sont considérées positives si le stockage gagne de l'énergie thermique et négative s'il en perd. Le stockage de l'énergie se reconstitue entre avril et août grâce à la récupération de l'énergie solaire et se désemplit entre octobre et février à cause des besoins de chauffage. Quand le stockage de chaleur est plein, les capteurs solaires sont utilisés pour les besoins quotidiens en eau chaude sanitaire et pour couvrir les pertes thermiques. Si le stockage de chaleur est épuisé, le système utilise de l'énergie auxiliaire et en particulier lorsque les ressources solaires sont très faibles pendant plusieurs jours consécutifs. Les besoins d'eau chaude sanitaire ne sont pas assurés totalement par le stockage d'ECS, c'est pourquoi la fraction solaire n'est pas égale à un.

La figure 5 à droite, montre que la température diminue en hiver et augmente en été pour les mêmes raisons que précédemment. Le ballon thermocline (courbe verte) est très similaire au modèle homogène (courbe rouge) avec une diminution de la température dans la partie basse à une valeur T_{in} quand le stockage est rempli. Le modèle stratifié (courbe bleue) permet d'atteindre une température plus élevée dans la strate supérieure quand le ballon est plein.

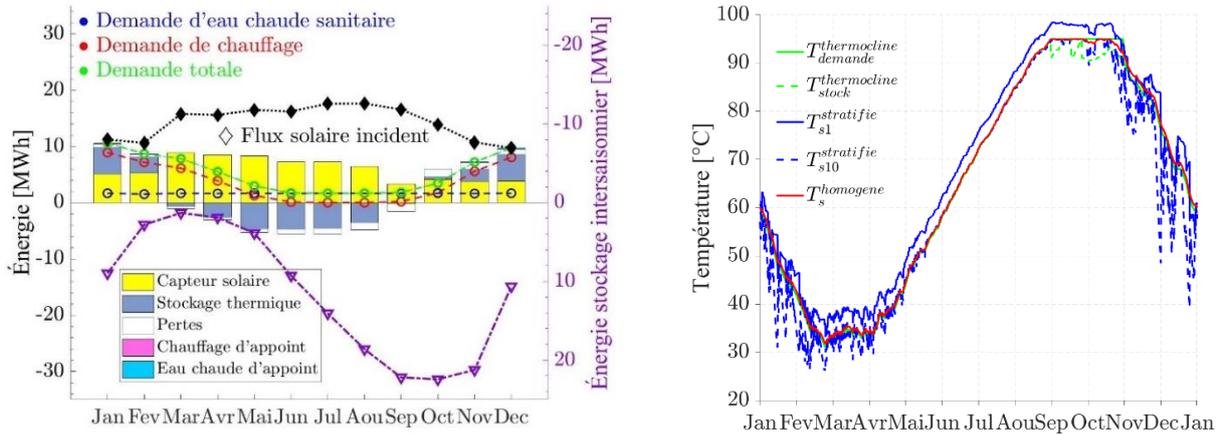


Figure 5 : Evolution de l'énergie (gauche) et de la température (droite) dans le stockage de chaleur.

4. Conclusion

Une méthodologie d'optimisation a été appliquée à un système solaire thermique avec des stockages thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage. Tout d'abord, l'analyse de sensibilité a permis de déterminer les facteurs les plus influents à l'aide de la méthode de Morris. L'algorithme PSO identifie le front de Pareto et la méthode VIKOR sélectionne le meilleur compromis. Pour un bâtiment collectif de Marseille, le système doit être composé de volumes de stockage de chaleur inter-saisonnier et d'ECS élevés, et une surface des capteurs faible. Pour ce dimensionnement, le système permet d'atteindre de haute performance énergétique. Le modèle du stockage n'a pas une grande importance sur l'analyse de sensibilité et l'optimisation, car les résultats sont très similaires. Dans la suite de cette étude, il serait intéressant d'étudier différentes conditions climatiques moins favorables et de considérer des contraintes telles que la surface des panneaux ou le volume de stockage, puisque ces paramètres peuvent engendrer des problèmes d'aménagement.

Remerciements

Le "Centre de Calcul Intensif d'Aix-Marseille" est remercié pour l'accès à ses ressources de calcul haute performance.

Bibliographie

- [1] Réglementation environnementale RE2020 (2022). <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>. Consulté en avril 2022.
- [2] S. Launay, B. Kadoch, O. Le Metayer, C. Parrado. Analysis strategy for multi-criteria optimization: Application to inter-seasonal solar heat storage for residential building needs. *Energy* 171 (2019), p. 419–434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.181>.
- [3] G. Segond. « Etudes des couplages thermohydrauliques en régime variable d'un système thermique avec stockage : application à la production d'eau chaude sanitaire à partir de la valorisation d'une source de chaleur basse température ». Thèse de doctorat à l'université Aix-Marseille, 2015, <http://www.theses.fr/2015AIXM4722>.
- [4] R. Araya, F. Bustos, J. Contreras, A. Fuentes. Life-cycle savings for a flat-plate solar water collector plant in Chile. *Renewable Energy* 112 (2017), p. 365–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.036>.
- [5] M. D. Morris, Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, *Technometrics*, 33 (1991) 161-174.
- [6] Mohamad Zihin bin Mohd Zain, Jeevan Kanesan, Joon Huang Chuah, Saroja Dhanapal, Graham Kendall, A multi-objective particle swarm optimization algorithm based on dynamic boundary search for constrained optimization, *Applied Soft Computing* 70 (2018), p. 680-700, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.022>.
- [7] 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. DOI: <https://doi.org/10.1201/b11032>.
- [8] Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre (2019). [Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre Émissions de gaz à effet de serre - notre-environnement.gouv.fr](https://www.lesfacteursdegaz.fr/). Consulté en avril 2022.