

Analyse multicritère pour la rénovation énergétique d'un bâtiment tertiaire

Ziqian ZHANG¹, Zaid ROMANI², Zaid BOUHMAIDI¹, Amina MESLEM¹, Florence COLLET¹

¹ Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, Univ Rennes

² Laboratory of Built Environment and Landscape (LaBEL), National School of Architecture of Tetouan, Morocco

RESUME Cette étude s'inscrit dans le cadre de la Chaire Rénovation Énergétique des Bâtiments de la Fondation Université de Rennes. Un premier travail a permis d'optimiser la rénovation énergétique de l'enveloppe du bâtiment en termes de besoins de chauffage, approchant un bâtiment passif. L'objectif ici est d'améliorer l'inconfort d'été et réduire la consommation énergétique globale. Pour ce faire, plusieurs solutions techniques sont modélisées sur Trnsys et Contam, notamment la surventilation nocturne, les casquettes et stores, les fenêtres pariéto-dynamiques et l'ouverture automatisée des fenêtres. Les résultats montrent une amélioration significative du confort d'été. Dans le but d'atteindre un bâtiment zéro énergie ou à énergie positive, les systèmes de production d'énergie, tels que des pompes à chaleur (PAC) air/eau, des panneaux photovoltaïques thermiques (PVT), et des panneaux photovoltaïques (PV), sont considérés. Les résultats montrent que le système hybride couplant une PAC, des panneaux PVT, et de l'électricité d'appoint est le plus efficace. Une étude multicritère prenant en considération l'analyse du cycle de vie et le coût global sur le cycle de vie est réalisée. Il est trouvé que le système hybride des panneaux PV incliné à 45°, orienté au sud avec une surface de 310 m² est le système le plus avantageux face aux critères environnementaux et économiques.

Mots-clés Optimisation énergétique, Confort thermique, Conception passive/active, Analyse du cycle de vie (ACV), Coût global, Analyse multicritère

I. INTRODUCTION

Selon les données de la commission européenne, en Europe, le secteur du bâtiment représente 40 % de la consommation totale d'énergie et 36 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Commission.europa, 2022). En France, la consommation énergétique moyenne des immeubles de bureaux est de 146 kWh/m²/an, le tertiaire représentant 17 % de la consommation d'énergie finale (Ademe, 2024). Dans le cadre du Plan d'Objectifs Climatiques 2030, la Commission européenne a vise à réduire de 55 % les émissions de GES du secteur du bâtiment, de 14 % leur consommation finale d'énergie, et de 18 % la consommation énergétique pour le chauffage et le refroidissement.

Il est actuellement estimé qu'au moins 75 % des bâtiments sont obsolètes en termes d'efficacité énergétique et ne parviennent pas à assurer le confort de leurs occupants. Les premiers leviers pour minimiser les besoins tout en assurant le confort des usagers passent par la rénovation des enveloppes. Bien que le taux de rénovation des systèmes de chauffage soit faible (3,6 % selon (Eichhammer et al., 2009)), leur rénovation représente une option pour réduire la consommation

d'énergie, les coûts et l'impact environnemental des bâtiments existants (Hosein Abbasi, et al., 2021). En effet, l'utilisation des combustibles fossiles entraînera des contraintes sur les ressources à l'avenir et générera également une grande quantité de pollution. Selon Zhang et al. (2019), la technologie des pompes à chaleur (PAC) est aujourd'hui préférée aux systèmes conventionnels tels que les chaudières à gaz naturel. Dans le cas de la France cela se justifie par le fait d'une production électrique avec un faible impact carbone. Le recours à une production photovoltaïque (PV) offre également un impact positif sur la réduction des émissions de GESs.

Par ailleurs, les effets environnementaux de la rénovation peuvent être estimés via une analyse du cycle de vie (ACV), intégrant les effets environnementaux depuis la phase de production jusqu'à celle de la démolition, en passant par la construction, l'exploitation et l'entretien. Enfin, l'aspect économique peut être analysé à partir de l'analyse du coût de cycle de vie (ACCV) qui évalue les coûts associés à l'ensemble du cycle de vie du bâtiment (Bochare et al. 2024).

Ainsi, la combinaison des critères énergétiques, environnementaux et économiques permet aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et gestionnaires de bâtiments de prendre des décisions éclairées concernant les matériaux de construction, les systèmes et les pratiques d'entretien.

La Chaire rénovation énergétique des bâtiments de la Fondation Université de Rennes a pour objectif de proposer des combinaisons de solutions techniques permettant une rénovation multicritère et performante.

Cet article porte sur un bâtiment démonstrateur tertiaire. Une première étude a été menée sur l'optimisation de l'enveloppe au regard de la minimisation des besoins de chauffage (Bouhmaid, 2023). Cette étude porte sur l'amélioration du confort d'été ainsi que sur l'intégration de systèmes de production d'énergie. La combinaison de solutions optimale est identifiée en considérant les critères ACV et ACCV du bâtiment.

II. BÂTIMENT SUPPORT ET METHODOLOGIE

A. Bâtiment support

Le bâtiment support se situe à l'ouest de la périphérie de Rennes. Il a une superficie de 874 m² par niveau, avec une hauteur sous plafond de 2,8 m. Il se compose de 3 niveaux (Fig. 1). Le 1^{er} niveau est une zone commerciale, le 2^{ème} et le 3^{ème} niveaux sont une zone de bureaux. Dans le cadre de cette étude, seule la zone de bureaux est traitée.



FIGURE 1. Bâtiment étudié et son emplacement géographique

B. Méthodologie

La méthodologie de la démarche, dont les étapes sont détaillées par la suite, est illustrée en Fig. 2.

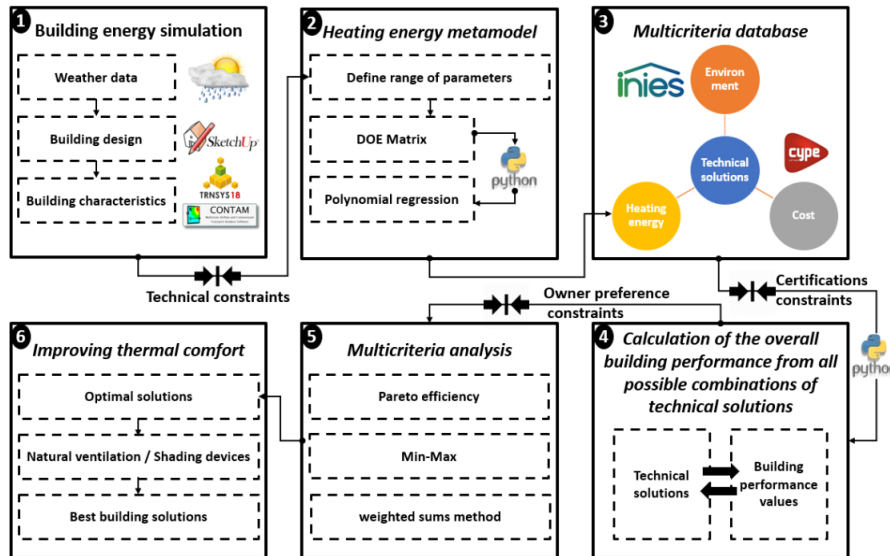


FIGURE 2. Méthodologie de construction du métamodèle pour la rénovation des bâtiments

- Métamodèle

La maquette numérique du bâtiment démonstrateur est construit sous TRNSYS couplé à CONTAM et python pour effectuer un calcul des besoins énergétiques et du confort thermique. (Romani et al., 2021). La recherche de la combinaison optimale de plusieurs paramètres de conception (paramètres d'entrée des modèles) nécessite la simulation de milliers, voire de millions de cas. Étant donné le temps de calcul potentiellement élevé, la méthode des plans d'expériences a été adoptée pour sélectionner un nombre réduit de cas d'étude permettant de développer un polynôme (métamodèle statistique) via la régression multiple.

- Optimisation multi-critères

L'optimisation des solutions techniques repose sur une analyse multicritères prenant en compte simultanément 13 critères (9 environnementaux et 4 économiques).

Les études d'ACV des systèmes énergétiques permettent de mesurer l'impact environnemental de chaque étape, depuis l'étape de production, l'énergie consommée ou produite pendant la durée de vie jusqu'à la fin de vie des systèmes. Dans cette partie, toutes les données environnementales proviennent de la base Inies. Le Tab. 1 donne les indicateurs environnementaux pendant la durée de la vie du bâtiment estimée à 80 ans, comme considéré dans (Andersen et Negendahl, 2023).

Outre le coût d'investissement, le prix de l'énergie, le temps de retour et le coût du cycle de vie (Life Cycle Cost - LCC) sont considérés comme critères économiques. Le principal objectif de l'analyse du coût du LCC est de fournir aux décideurs un outil d'optimisation de la performance économique à long terme d'un bâtiment ou d'un système en évaluant l'ensemble des coûts associés tout au long de son cycle de vie. Le LCC garantit que la solution retenue est économiquement optimale sur toute la durée de vie. Le LCC est particulièrement intéressant dans la conception de bâtiments durables, car il permet d'intégrer les impacts financiers à court et à long termes, évitant ainsi une prise de décision biaisée par une focalisation excessive sur l'investissement initial.

L'Equation 1 permet de calculer le coût total des systèmes pendant toute la durée de vie du bâtiment. Il est utile de prendre en compte l'inflation des prix de l'énergie, qui est influencée par divers facteurs tels que les guerres, les crises financières, et autres événements imprévisibles. Selon les données de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (Insee), l'inflation des prix de l'énergie en France a été de 2,5 % entre 2002 et 2016, période marquée par l'introduction de l'euro. Dans cette étude, il est supposé que cette valeur reste constante dans le futur afin de simplifier l'estimation. En ce qui concerne les coûts de maintenance, ceux-ci peuvent être estimés à environ 1 % du coût total du système chaque année. Cette approche permet d'avoir une estimation des coûts plus réaliste et complète pour l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

$$LCC = C_{inv} \cdot N + \sum_{n=0}^L \frac{C_{\text{énergie}} \cdot \omega + C_{\text{main}}}{(1 + d)^n} \quad (1)$$

Avec : LCC : Coût total pendant la durée de la vie (€), C_{inv} : Coût total d'investissement (€), N : Nombre de remplacement, $C_{\text{énergie}}$: Coût total d'énergie consommée (€), C_{main} : Coût total de maintenance (€), ω : Taux d'inflation du prix de l'énergie, d : Taux de recyclage (5% pour cette étude).

TABLEAU 1. Indicateurs environnementaux considérés dans l'ACV

Indicateur	Unité
Réchauffement climatique	kg CO2 eq
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq
Acidification des sols et de l'eau	kg SO2 eq
Eutrophisation	kg (PO4)3- eq
Formation d'ozone photochimique	kg C2H4 eq
Epuisement des ressources abiotiques- éléments	kg Sb eq
Epuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles	MJ
Pollution de l'air	m ³
Pollution de l'eau	m ³

Dans cette étude, l'optimisation multicritère considère deux types de pondérations (Fig. 3). Dans le premier, le poids de tous les critères est identique (préférence égales en rouge sur la Fig.3). Dans le deuxième, les critères sont pondérés suite à un questionnaire auprès des décideurs, les propriétaires du bâtiment, qui ont défini leurs priorités actuelles (en bleu sur la Fig.3).

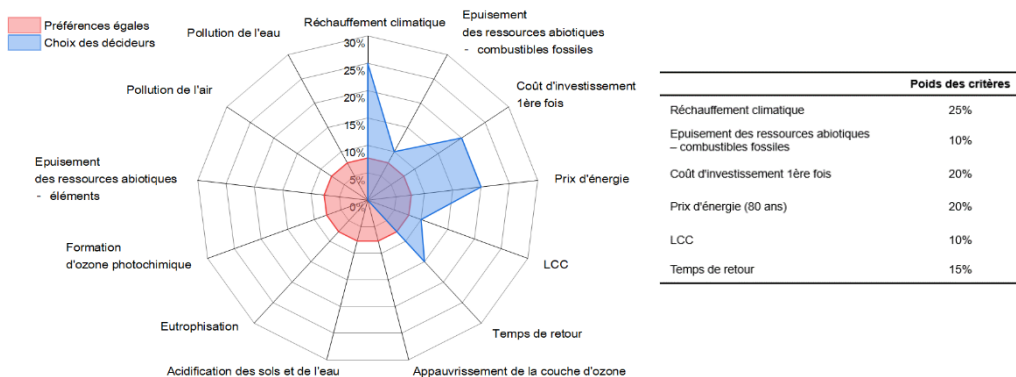


FIGURE 3. Propositions du métamodèle des multicritères

Les combinaisons de solutions sont ensuite classées à l'aide de la méthode Front de Pareto pour ressortir les solutions optimales. Dans cette méthode (Fig. 4), la valeur de d pour chaque système peut être déterminée en utilisant l'Équation 2. Le système optimal correspond à celui pour lequel la valeur de d est minimisée.

$$d = \min \left(\sum_{j=1}^k \tau \cdot (f_{Pj} - f_{Idj})^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2)$$

Avec : f_{Pj} : Coordonnées des points situés dans le front de Pareto pour chaque critère, f_{Idj} : Coordonnées du point idéal pour chaque critère, k : Nombre d'objectifs, τ : Poids de critère

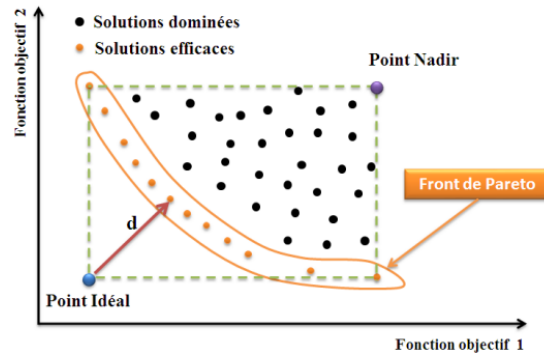


FIGURE 4. Principe de Front de Pareto

- Optimisation antérieure de l'enveloppe

L'optimisation de l'enveloppe du bâtiment au regard des besoins de chauffage a fait l'objet de travaux précédents (Bouhmaid, 2023). Les solutions techniques combinées considérées comprennent 6 épaisseurs d'isolation des murs, 2 épaisseurs d'isolation de la toiture, 7 types de fenêtre pour chaque orientation, 5 couleurs de revêtement de la façade, 5 couleurs de revêtement de la toiture et 2 couleurs de cadre de fenêtre, soit un total de 205 800 combinaisons pour chaque type d'isolant (une laine de roche et une laine de bois).

Le Tab. 2 présente les 4 meilleurs compromis. La combinaison sélectionnée pour la suite de l'étude correspond au scénario SC2_Laine de Bois. Cette optimisation permet de réduire les besoins de chauffage à 2 kWh/(m².an) mais conduit à une problématique d'inconfort en été, illustré pour le bureau en Fig. 5 qui peuvent dépasser 26°C à partir de mi-avril, et atteindre 38 °C début septembre.

TABLEAU 2. Meilleurs compromis de l'optimisation de l'enveloppe au regard des besoins de chauffage

Scénario (SC1* / SC2**)	SC1_Laine de bois	SC2_Laine de bois	SC1_Laine de roche	SC2_Laine de roche
Isolation des murs extérieurs (cm)	12	20	16	12
Isolation de la toiture (cm)	20	20	24	24
Fenêtre Sud	ENR PVC	ENR PVC	ENR PVC	ENR PVC
Fenêtre Nord	DV PVC	ENR PVC	DV PVC	ENR PVC
Fenêtre Est	ENR PVC	ENR PVC	ENR PVC	ENR PVC

*SC1 : pondération selon choix des décideurs, **SC2 : poids égal des 17 critères

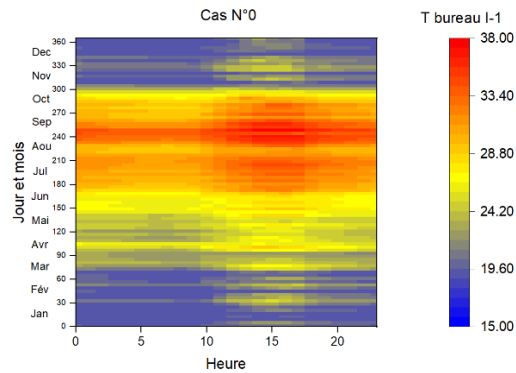


FIGURE 5. Température opérative intérieure du bureau 1 sur une année

- Traitement de l'inconfort d'été

Le traitement de l'inconfort d'été est considéré à travers quatre solutions techniques. Ces solutions comprennent la surventilation nocturne, la protection solaire, la fenêtre pariéto-dynamique et l'ouverture automatisée des fenêtres. L'objectif est donc d'améliorer l'inconfort d'été du bâtiment pour être en conformité avec la RE2020.

La ventilation nocturne double le débit d'air neuf dans les bureaux pendant la nuit (de 19h00 à 8h00) durant la période estivale (du 15/06 à 0h00 au 10/10 à 0h00), à l'exception des week-ends et des périodes de vacances. Selon le Code du Travail, le débit d'air neuf minimal en période d'occupation est fixé à 25 m³/h/personne dans les bureaux. En période de surventilation, ce débit est amené à 50 m³/h/personne.

L'installation de casquettes et de stores permet de limiter le rayonnement solaire direct. Cependant, il est essentiel de s'assurer que le bâtiment reçoit une lumière naturelle suffisante pendant toute l'année. Les dimensions des casquettes sont déterminées en tenant compte de l'angle solaire, de façon à masquer totalement la fenêtre au solstice d'été et à l'éclairer totalement au solstice d'hiver à 12h. Le calcul conduit à des casquettes de 1,71 m de profondeur. Elles sont installées à 1,2m au-dessus des fenêtres.

L'ouverture et la fermeture des stores intérieurs sont contrôlées automatiquement en fonction du rayonnement solaire incident sur les fenêtres pendant la période de non-chauffage. Selon l'étude de Zhang et al. (2012), la majorité des occupants ferment les stores manuellement lorsque le rayonnement solaire dépasse à 250 W/m². Il suggère que le taux de fermeture des stores en fonction du rayonnement solaire est linéaire entre 120 et 250 W/m² en façade Sud. Cette règle est appliquée dans notre modèle.

La fenêtre pariéto-dynamique est une solution innovante permettant de récupérer une partie de l'énergie perdue à travers les vitrages en période de chauffage. Elle est constituée de trois vitres, entre lesquelles l'air neuf de ventilation peut circuler en étant réchauffé dans les espaces inter-vitrages avant d'être introduit dans la pièce. Le constructeur traduit la réduction de la perte énergétique du vitrage par un coefficient de transmission thermique surfacique équivalent égal à 0,6 W/(m²·K). Pour la période de non-chauffage, un système d'ouverture automatisée des fenêtres est mis en place suivant l'organigramme décrit en Fig. 6. Ce système est contrôlé par 4 paramètres : la température extérieure T_{ext} , la température intérieure T_{int} , la température de surface du plancher intérieur $T_{plancher}$ et la vitesse du vent V_{vent} .

Ces différentes solutions techniques sont considérées de façon cumulative et conduisent à 4 cas pour le traitement de l'inconfort d'été :

- Cas 0 : Cas de référence = Optimisation d'hiver
- Cas 1 : Cas 0 + Surventilation nocturne
- Cas 2 : Cas 1 + Casquette
- Cas 3 : Cas 2 + fenêtre pariétodynamique
- Cas 4 : Cas 3 + Ouverture automatisée des fenêtres (Couplé à Contam)

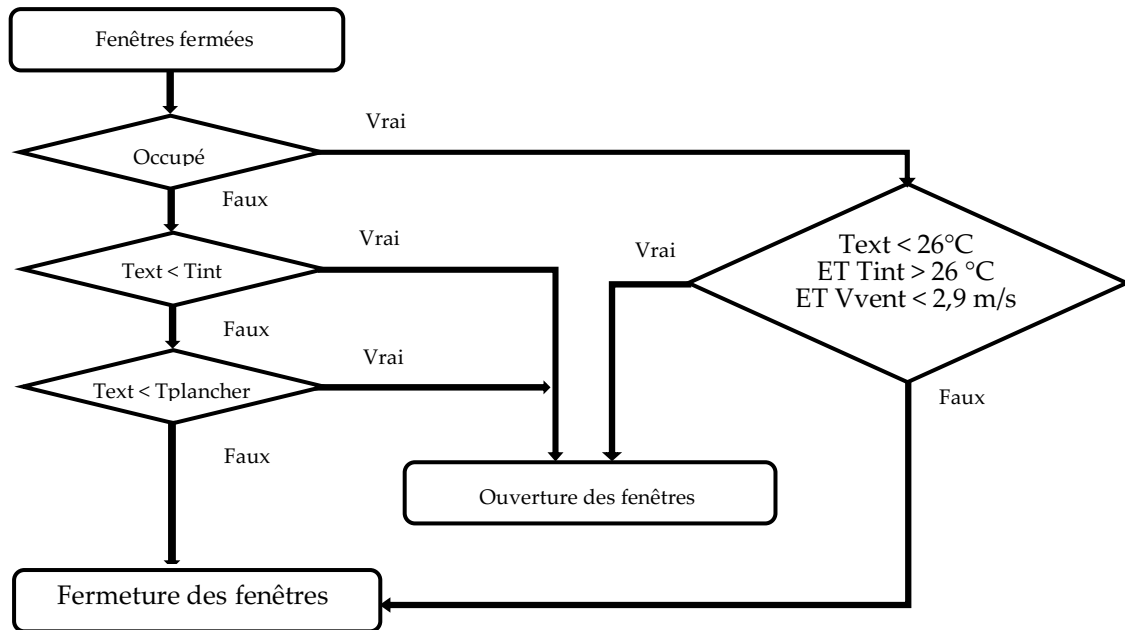


FIGURE 6. Systèmes automatisé des ouvertures des fenêtres

- Intégration de systèmes énergétiques

En partant du cas optimisé sur le confort d'été, les systèmes de production d'énergie sont modélisés afin de répondre aux besoins énergétiques annuels du bâtiment. Il convient de souligner que seule la consommation énergétique associée au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) est considérée dans cette étude, la consommation énergétique liée à l'éclairage, aux appareils électriques et à la ventilation n'est pas prise en compte dans l'analyse. Différents systèmes de production d'énergie sont considérés et comparés :

- Système 1 : Electricité
- Système 2 : Gaz naturel
- Système 3 : Pompe à chaleur (PAC) air/eau
- Système 4 : PAC air/eau + Panneaux photovoltaïque-thermique (PVT)
- Système 5 : PAC air/eau + PVT+ Electricité d'appoint
- Système 6 : PAC air/eau + PV+ Electricité d'appoint

III. RESULTATS

A. Traitement du confort d'été

Les simulations couvrent l'ensemble du bâtiment, mais les résultats présentés concernent spécifiquement le bureau I-1, situé dans l'angle sud-est du 2ème niveau, qui est la pièce où les températures estivales sont trouvées les plus élevées. Le Tab. 3 présente les températures simulées, les Degrés-heures (DH) et les taux d'inconfort (nombres d'heures où la température intérieure est supérieure à 26 °C [h] et rapporté à la durée d'occupation [%]) pour tous les cas en période d'été (15/06-16/09) durant les plages horaires d'occupation (8h-18h, sauf les week-ends et les jours fériés). Entre le cas initial, 0, et les cas 1 et 2, cumulant la surventilation nocturne puis l'ajout de casquettes, les températures moyennes et maximales diminuent ainsi que le nombre de DH et le taux d'inconfort. L'ajout de fenêtre pariéto-dynamique se traduit de façon négative sur l'inconfort d'été, l'intérêt de ce système portant sur la réduction des besoins de chauffage principalement. Le cas 4, ajoutant une ouverture automatisée des fenêtres, permet de respecter les recommandations de la RE2020, considérées à titre indicatif puisque celle-ci ne s'applique pas aux rénovations, avec une température maximale inférieure à 26 °C et un taux d'inconfort de 0% pendant la période d'occupation.

TABLEAU 3. Résultats de traitement d'inconfort d'été

	Cas 0	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Tmoy [°C]	30,6	25,8	23,8	26,8	20
Tmax [°C]	37,9	32,5	29,8	33,7	25,5
DH [°C·h]	3835	973	162	1632	0
Taux d'inconfort [h (%)]	670 (31%)	484 (22%)	153 (7%)	610 (28%)	0 (0%)

B. Intégration de systèmes énergétiques

L'étude sur les systèmes énergétiques est réalisée à partir du cas 4.

- Consommations énergétiques

Les consommations énergétiques des systèmes sont présentées dans la Fig. 7. Le système au gaz naturel consomme le plus d'énergie, avec une consommation de 21 656 kWh (12 kWh/m²). En revanche, le système hybride couplant PAC, panneaux PVT et électricité d'appoint consomme le moins l'énergie, soit 7 280 kWh (4,15 kWh/m²). Il permet une économie de 66% par rapport à l'option au gaz.

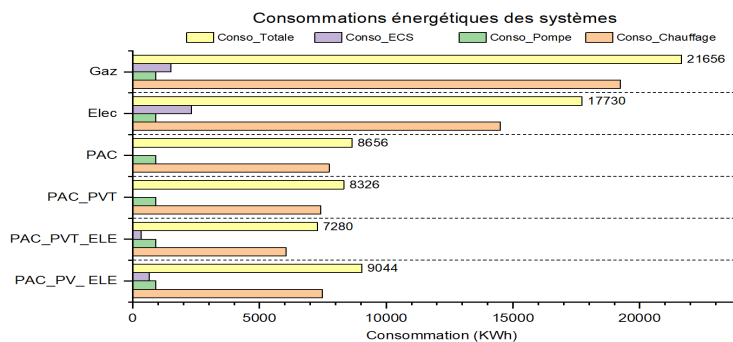


FIGURE 7. Consommations énergétiques selon les systèmes de production

• Résultats de LCC

La Fig. 8 représente les dépenses et les gains des systèmes pendant la durée de vie du bâtiment (valeurs positives pour les gains, valeurs négatives pour les dépenses). Le temps de retour peut être déterminé en identifiant les coordonnées de l'axe X au point d'intersection de chaque système avec la courbe du gaz naturel.

Du point de vue des coûts d'investissement, le système référence au gaz naturel est la meilleure solution. Il ne coûte que 8,6 k€ et présente une économie de 259 k€ par rapport au système de 465 m² de PV. Du point de vue des coût totaux, le système PV incliné à 20° avec une surface de 465 m² équipé d'une batterie est la meilleure solution technique, il permet de récupérer le coût d'investissement en 18 ans et générer un bénéfice cumulé de 1736 k€ à la fin de vie du bâtiment. Au contraire, le système d'électricité ne peut jamais récupérer le coût d'investissement, entraînant des dépenses cumulées de 1423 k€ pendant la durée de vie du bâtiment.

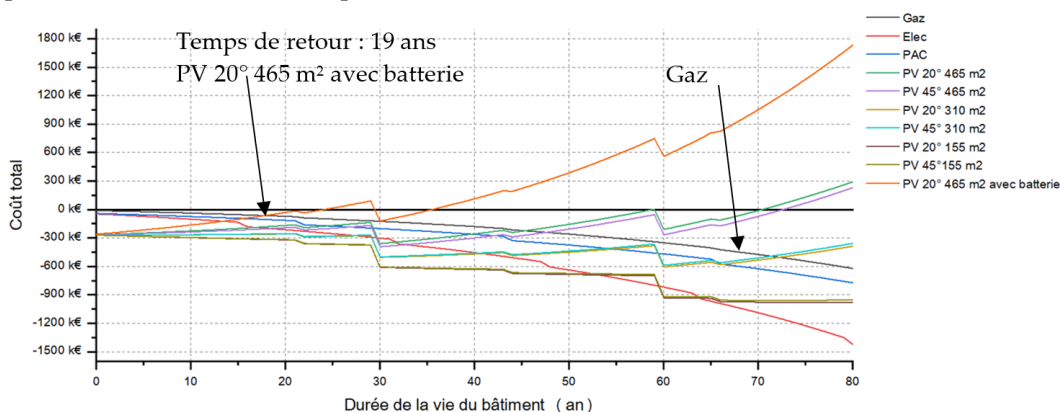


FIGURE 8. Coûts totaux des systèmes pendant la durée de vie du bâtiment

• Résultat d'ACV

Les systèmes PV présentent un impact environnemental positif car ils permettent d'éviter des émissions de carbone. Après déduction de l'électricité consommée pour le chauffage et la production d'ECS du bâtiment, l'excédent d'électricité est vendu sur le réseau.

Le Tab. 4 donne les impacts environnementaux sur la durée de vie du bâtiment estimée à 80 ans. Dans l'ensemble, le système des panneaux PV inclinés à 45° avec une surface 465 m² sans batterie est le plus avantageux du point de vue de l'impact environnemental.

TABLEAU 4. Résultats d'ACV des systèmes

	Gaz	Elec	PAC	PAC + ELEC + PV 20 465	PAC + ELEC + PV 45 465	PAC + ELEC + PV 20 310	PAC + ELEC + PV 45 310	PAC + ELEC + PV 20 155	PAC + ELEC + PV 45 155	PAC + ELEC + PV 20 465 batterie
Réchauffement climatique (kg CO2 eq.)	4.12E+05	1.67E+05	6.71E+04	1.49E+05	1.49E+05	1.04E+05	1.04E+05	5.87E+04	5.87E+04	1.68E+05
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq.)	3.29E-02	1.20E-01	2.03E-01	1.49E-01	1.49E-01	1.48E-01	1.48E-01	1.48E-01	1.48E-01	1.49E-01
Acidification des sols et de l'eau (kg SO2 eq.)	1.29E+03	1.31E+03	6.62E+02	3.06E+01	3.00E+01	4.56E+01	4.52E+01	6.05E+01	6.03E+01	3.06E+01
Eutrophisation (kg (PO4)3- eq.)	4.72E+01	2.45E+02	7.88E+01	1.06E+01	1.06E+01	1.22E+01	1.22E+01	1.39E+01	1.38E+01	1.06E+01
Formation d'ozone photochimique (kg C2H4 eq.)	9.43E+01	9.10E+01	3.95E+01	9.52E+00	9.49E+00	1.02E+01	1.02E+01	1.09E+01	1.09E+01	1.21E+02
Epaissement des ressources abiotiques - éléments (kg Sb eq.)	1.23E+00	4.68E+00	4.24E+00	5.74E+00	5.74E+00	5.08E+00	5.08E+00	4.42E+00	4.42E+00	6.41E+01
Epaissement des ressources abiotiques - combustibles fossiles (MJ)	7.24E+06	5.66E+06	2.78E+06	1.57E+06	1.56E+06	1.20E+06	1.19E+06	8.27E+05	8.26E+05	1.57E+06
Pollution de l'air (m³)	2.16E+06	8.63E+06	2.16E+06	2.23E+06	2.23E+06	2.23E+06	2.23E+06	2.23E+06	2.23E+06	2.41E+06
Pollution de l'eau (m³)	8.90E+05	3.72E+05	8.90E+05	9.41E+05	9.41E+05	9.41E+05	9.41E+05	9.41E+05	9.41E+05	4.83E+10

- Résultats de l'analyse multicritère

Le Tab. 5 présente les résultats de l'analyse multicritère pour chaque système. La valeur minimale de d correspond à la solution optimale. Pour les deux propositions (préférence égale ou choix des décideurs), le système des panneaux PV inclinés à 45° avec une surface de 310 m² représente les valeurs de d les plus faibles. Par conséquent, ce système s'affirme comme le système optimal parmi tous les systèmes étudiés en prenant en compte tous les critères économiques et environnementaux.

TABLEAU 5. Résultats de d des systèmes

	Préférence égale	Choix des décideurs
Gaz	1,11	0,91
Elec	1,13	0,85
PAC	1,06	0,78
PV 20° 465 m²	1,06	0,82
PV 45° 465 m²	1,06	0,82
PV 20° 310 m²	0,92	0,72
PV 45° 310 m²	0,91	0,71
PV 20° 155 m²	1,00	0,75
PV 45° 155 m²	1,00	0,75
PV 20° 465 m² avec batterie	1,13	0,81

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de cette étude, les solutions techniques considérées portent sur le traitement de l'inconfort d'été et l'intégration de différents types de systèmes énergétiques. L'optimisation est réalisée en considérant à la fois les aspects environnementaux et économiques. Il ressort clairement le besoin d'un arbitrage difficile dans un projet de rénovation, que l'analyse multicritère permet d'objectiver. De plus, la possibilité de pondérer ces critères permet d'affirmer les priorités des décideurs.

L'inconfort thermique est amélioré grâce à l'intégration de solutions techniques spécifiques et frugales, permettant de réduire le taux d'inconfort de 31 % à 0%.

Les résultats sur l'étude des systèmes montrent que, du point de vue environnemental, la solution PV d'une surface de 465 m² sans batterie est la plus pertinente sur le plan environnemental. Elle permet de réduire significativement les émissions de CO₂, tout en minimisant d'autres impacts environnementaux tels que l'acidification et l'épuisement des ressources abiotiques. Cependant, le LCC indique que le système PV incliné à 45° d'une surface de 465 m² avec batterie est la solution la plus avantageuse du point de vue économique. Ce système, bien qu'impliquant un investissement initial plus élevé, permet de récupérer les coûts en 18 ans et d'obtenir un gain économique net sur l'ensemble de la durée de vie du bâtiment. En combinant les deux analyses (ACV et LCC), le système PV incliné à 45° et d'une surface de 310 m² sans batterie ressort comme la solution optimale. Ce système représente un compromis équilibré entre les bénéfices environnementaux et économiques.

Cette recherche a confirmé la faisabilité de construire un bâtiment à énergie positive, en tenant compte de l'ensemble des critères. Il reste néanmoins à étalonner le modèle du bâtiment dans son état actuel par des mesures in-situ afin de fiabiliser l'analyse multicritère réalisée.

REMERCIEMENTS

Ces travaux sont réalisés dans le cadre de la Chaire Rénovation Énergétique des Bâtiments de la Fondation Université de Rennes. Les auteurs remercient la Fondation ainsi que tous les partenaires de la Chaire : Groupe Legendre, NGE Bâtiment, Rennes Métropole, Egis, Delta Dore, CETIH-Systovi, Sensing Vision.

REFERENCES

- Ademe 2024, <https://infos.ademe.fr/batiments/2024/ou-en-est-le-secteur-tertiaire-dans-la-baisse-de-sa-consommation-denergie/>
- Andersen, R., Negendahl, K. (2023). Lifespan prediction of existing building typologies. *Journal of Building Engineering* 65, 105696. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105696>
- S. Birchall, et al., (2014). D2.1a Survey on the energy needs and architectural features of the EU building stock. EC FP7 project iNSPiRe, Grant agreement no. 314461, BSRIA,
- R. Bochare, M. Dagliya & M. Kadam (2024). Assessment of economic performance of an industrial building using life cycle cost & refined benefit-cost analysis – A case study, *Journal of Building Engineering*, 83(2024)108397, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108397>
- Z. Bouhmaidi (2023). Etude multicritère pour une rénovation énergétique durable : Cas du bâtiment Legendre situé à Rennes en France
- S. Chae, S. Bae & Y. Nam (2023). Economic and environmental analysis of the optimum design for the integrated system with air source heat pump and PVT, *Case Studies in Thermal Engineering*, 48(2023)103142, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103142>
- Commission.europa (2022). https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_fr
- W. Eichhammer, et al. (2009). Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries, Final report
- M. Fouquet, & A. Levasseur (2015). Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Building and Environment*, 90 (2015) 51-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.022>
- M. Hosein Abbasi (2021). Heat transition in the European building sector: Overview of the heat decarbonisation practices through heat pump technology, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4(2021)101630, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101630>
- Z. Romani, A. Draoui & F. Allard (2021). Metamodeling and multicriteria analysis for sustainable and passive residential building refurbishment: A case study of French housing stock, *Build Simu*, 15, 453–472 (2022), <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0806-7>

A.Takano, M. Hughes, & S. Winter (2014). A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context. *Building and Environment*, 82(2014)526-535. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.02>

H. Zhang, L. Zhou, X. Huang & X. Zhang (2019). Decarbonizing a large City's heating system using heat pumps: A case study of Beijing, *Energy*, 186(2019)115820, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.150>

Y. Zhang & P. Barrett (2012). Factors influencing occupants' blind-control behaviour in a naturally ventilated office building, *Building and Environment*, 54(2012)137-147, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.016>