



**THÈME 2025 : INNOVER POUR S'ADAPTER AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**



**Membres de l'équipe :**

- Léana Zheng
- Mouad Achahou
- Bruno Quevilly
- Thibaut Mayeux

## VOTRE PROJET

### Titre de votre projet :

*Impact du réchauffement climatique sur les bâtiments existants, d'ici 2100.*

### Description succincte :

Le réchauffement climatique impacte la durabilité des bâtiments, en augmentant les besoins énergétiques et en accélérant la dégradation des matériaux. Les scénarios climatiques du GIEC anticipent ces effets et orientent les stratégies d'adaptation, comme l'utilisation de matériaux biosourcés, la végétalisation ou l'isolation optimisée. Grâce aux outils numériques actuels, il est possible de modéliser ces impacts pour guider des solutions résilientes. Ce projet souligne l'urgence de réviser les normes de construction pour préparer les infrastructures aux défis climatiques à venir.

La première étape de notre démarche consiste à faire un état des lieux des connaissances actuelles, puis à établir un protocole de recherche visant à évaluer les impacts climatiques sur un bâtiment spécifique : le centre des Restos du Cœur, pris ici comme étude de cas représentative. Les objectifs seront de garantir un meilleur confort thermique pour les usagers, tout en réduisant l'empreinte environnementale du bâtiment.

Les scénarios climatiques développés par le GIEC permettent de projeter des futurs en fonction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Ils aident à comprendre les conséquences potentielles du réchauffement climatique sur les écosystèmes, les infrastructures et les sociétés humaines. Ces scénarios se répartissent entre deux générations principales : les RCP (Representative Concentration Pathways), et les SSP (Shared Socioeconomic Pathways) [1]. Ces derniers sont d'ailleurs essentiels pour évaluer la résilience des infrastructures. Le scénario SSP5-8.5 aide à identifier les vulnérabilités critiques des systèmes urbains. Il est donc particulièrement utile pour évaluer les vulnérabilités critiques des bâtiments face à des événements extrêmes, comme les canicules ou inondations, et pour concevoir des infrastructures résilientes à long terme [2].

Afin d'évaluer l'impact des scénarios climatiques sur les bâtiments existants et d'identifier des solutions adaptées, nous exploiterons les scénarios RCP8.5 et SSP5-8.5 qualifiés de pessimistes (absence de contrôle des émissions) pour anticiper l'évolution du climat à moyen et long terme. Nous utiliserons le logiciel Pléiades, spécialisé en simulation thermique et en éco-conception, afin de modéliser le comportement thermique et énergétique d'un bâtiment. Différentes stratégies d'adaptation seront testées, notamment la végétalisation, l'amélioration de l'isolation et l'utilisation de matériaux biosourcés, afin d'identifier celles offrant le meilleur compromis entre confort thermique et performance énergétique.

Cependant, les fichiers météo standards fournis avec les logiciels de simulation ne permettent pas, à eux seuls, de prendre en compte l'évolution progressive du climat jusqu'en 2100. Pour combler cette lacune, nous avons développé une application complémentaire, conçue en Python, capable de générer des fichiers météo prospectifs, alignés sur les scénarios climatiques du GIEC.

Dans un premier temps, l'application a été entraînée sur un large ensemble de données climatiques : fichiers météo actuels, bases de données de projections climatiques, etc. Cette phase a permis d'extraire des modèles mathématiques cohérents avec les scénarios du GIEC notamment le RCP 8.5, correspondant à un scénario pessimiste en cas d'inaction climatique. Une fois entraînée, l'application peut générer, à partir d'un fichier météo classique (format EPW ou autre), des projections climatiques réalistes pour un lieu donné, selon l'horizon temporel souhaité (par exemple : 2030, 2050, 2100). Ces fichiers sont ensuite intégrés automatiquement

dans Pléiades, qui peut alors : modéliser le comportement thermique du bâtiment sous différentes conditions climatiques futures ; évaluer les performances énergétiques et les stratégies de confort thermique à long terme.

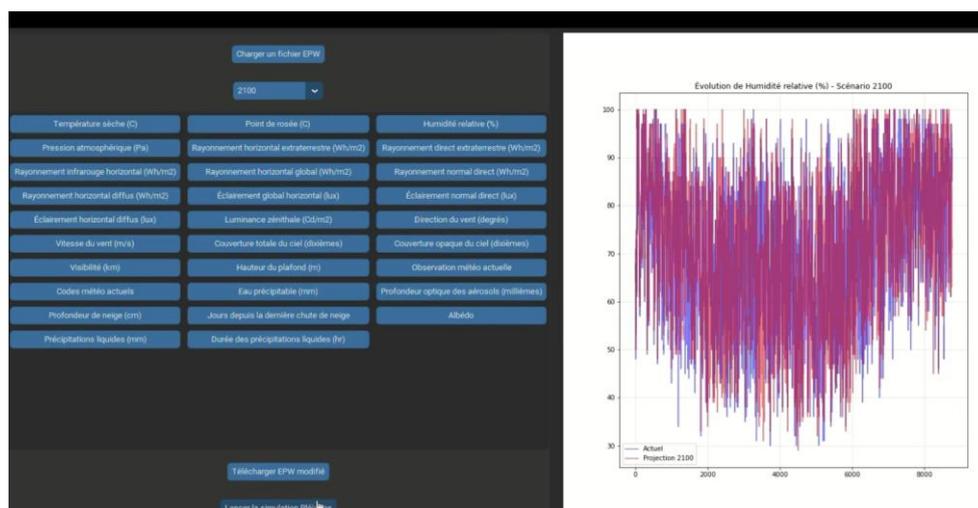


Figure 1 : Interface de l'application créée et résultats obtenus pour la simulation du scénario 2100

### Cas d'étude : les Restaurants du Cœur à Malakoff

Notre projet vise à explorer différentes solutions pour limiter l'impact du réchauffement climatique sur le bâtiment des Restaurants du Cœur, situé au 28 avenue du Maréchal Leclerc, 92240 Malakoff. Ce centre de distribution alimentaire joue un rôle crucial en apportant une aide précieuse aux personnes en difficulté dans la région. Toutefois, la conservation des denrées à une température adéquate demeure un enjeu important, d'autant plus que des problèmes de confort thermique ont été fréquemment observés. Ainsi, nous avons décidé de faire un diagnostic de l'existant et de prévoir des solutions innovantes pour répondre aux enjeux actuels.

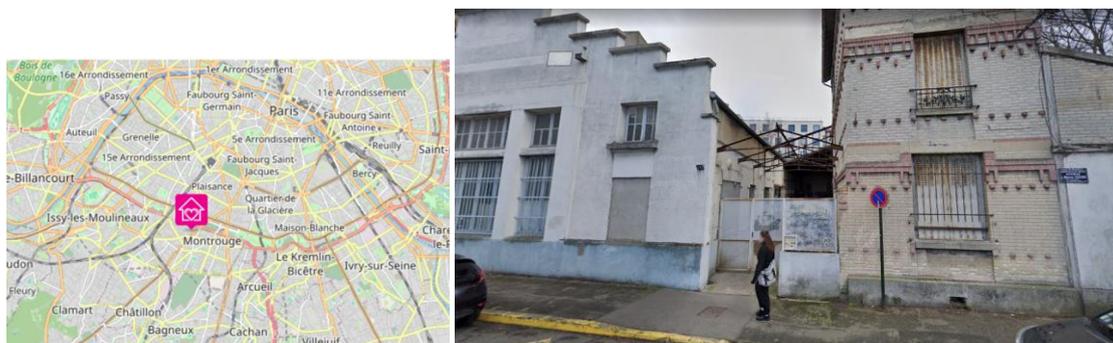


Figure 2 : Localisation des Restaurants du Cœur, source : site internet du resto des coeurs

Figure 3 : Vue extérieure du bâtiment, Google Maps

Lors d'une visite du bâtiment existant, nous avons d'abord pris les mesures des pièces et récupéré les plans du bâtiment. Ensuite, nous avons utilisé un capteur thermique multifonction pour mesurer la température ambiante et l'humidité relative des pièces, y compris la salle de stockage des denrées sensibles à l'humidité. Nous avons constaté des variations de température, avec des températures plus basses aux extrémités du bâtiment par rapport au centre. Cela semble cohérent avec l'absence d'une couche d'isolation intérieure. À la suite de ce constat, nous avons décidé d'étudier plusieurs scénarios de climats futurs. Les simulations nous permettent de tester différentes solutions et d'évaluer l'impact de chacune. Afin d'analyser les performances thermiques de l'existant, nous avons décidé de faire une simulation numérique et d'étudier le comportement thermique du bâtiment.

Le bâtiment a été modélisé dans Pléiades sur un unique niveau. Nous avons également représenté les différents vitrages, notamment ceux du toit, et intégré la composition détaillée de chaque élément du bâtiment, incluant les parois, le plancher, la toiture, les menuiseries et les ponts thermiques..

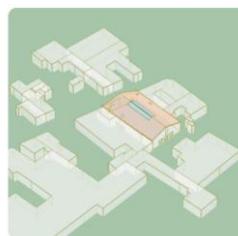
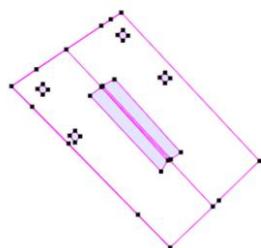


Figure 4 : Maquette 3D de notre bâtiment      Figure 5 : Plan des restos du cœur sur le logiciel Pléiades

Nous ajoutons alors les différents matériaux composant chaque élément du bâtiment, comme la paroi externe composée de murs en béton armé. Les matériaux se retrouvent dans la bibliothèque Pléiades (isolants, murs, enduits, MCP, etc.). Pour une meilleure représentation, nous avons modélisé les parois sur Ubakus avec le cas de référence. Les valeurs d'épaisseur, de conductivité thermique et de masse volumique sont ajoutées à la main, grâce aux informations présentes sur les navigateurs de recherche et à la bibliographie [4]. Pour les matériaux à changement de phase, nous en distinguons trois de fournisseurs différents sur Pléiades : MCP BASF, MCP Dupont, MCP Winco. Ces matériaux à changement de phase diffèrent peu de leur conductivité thermique. Ils ont cependant des valeurs de chaleur spécifique et latente très différente, avec 4140 J/(kg.K) pour le MCP Dupont contre 1200 J/(kg.K) de chaleur spécifique pour le MCP BASF. Pour cette étude, nous avons choisi d'étudier plusieurs scénarios sur les trois composants du bâtiment suivants : parois, planchers et vitrages.

Dans le cadre de l'analyse thermique du bâtiment de référence composé de parois en béton armé, d'un parement intérieur en placoplâtre, d'un enduit extérieur, et d'une toiture en brique creuse, plusieurs solutions d'optimisation énergétique et de confort ont été évaluées à l'aide de simulations numériques. Le scénario initial, sans isolation complémentaire, présente des besoins énergétiques bruts estimés à 102 000 kWh par an, avec 2 % du temps d'occupation passé en dessous de 16 °C (seuil minimal de confort hivernal) et 8 % au-dessus de 28 °C (seuil de confort estival), ainsi qu'un niveau de confort passif « Givoni » limité, et un volume important de degrés-heures de surchauffe (DH), indicateur mesurant l'intensité et la durée des excès thermiques.

Zones	Besoins Chauffage. (kWh)	T° min (°C)	T° max (°C)	Besoins bruts (kWh)	Part de besoins nets (%)	
TOTAL	88180,9	6,1	40,2	102439,8	86,1	
Zones	Seuil min (°C)	Nb < Seuil min (%)	Seuil max (°C)	Nb > Seuil max (%)	Givoni (%)	DH (°C.H)
TOTAL	16	2	28	8	61,1	141,2

Figure 6 : Tableau des résultats obtenus pour le cas de référence

Pour les parois, l'intégration de matériaux biosourcés tels que la laine de bois, la laine de roche et la ouate de cellulose (à 1,5 cm d'épaisseur) a montré une amélioration notable de la performance énergétique. Les besoins ont réduit respectivement de 16 %, 16,2 %, et 15 %. Ceci s'explique du fait de leurs bonnes propriétés isolantes. Toutefois, ces matériaux ont entraîné

une dégradation du confort thermique en période estivale. Les degrés-heures de surchauffe augmentent de 12,5 % pour la laine de bois et la laine de roche, et de 3,5 % pour la ouate de cellulose, qui se distingue par une légère amélioration du confort hivernal (1,4 % du temps en dessous de 16 °C, contre 2 % dans le cas de référence) et par la stabilité du taux de dépassement du seuil de 28 °C. En parallèle, l'étude de trois matériaux à changement de phase (MCP) de type microencapsulé a révélé leur faible contribution à la réduction des besoins énergétiques (baisse de 6 % pour le meilleur cas), mais leur forte capacité à limiter la surchauffe. C'est en particulier le cas pour le MCP Dupont. Bien que de faible épaisseur, il permet une réduction des DH de 8,5 %, et une amélioration du taux de confort Givoni. Nous garderons donc ce MCP pour la suite des modélisations.

Concernant la toiture, trois configurations ont été testées à 2,5 cm d'épaisseur : une toiture végétalisée, un isolant à changement de phase (MCP Dupont) et de la ouate de cellulose. La toiture végétalisée réduit les besoins de 20 %, tout en présentant des bénéfices annexes importants (régulation des îlots de chaleur, gestion des eaux pluviales, biodiversité), bien qu'elle nécessite une mise en œuvre plus lourde en raison des couches supplémentaires (substrat, drainage, étanchéité). Le MCP Dupont, appliqué en toiture, permet une baisse modérée de 4,3 % des besoins, mais se distingue par une réduction marquée de 23 % des surchauffes. La ouate de cellulose appliquée en toiture obtient les meilleures performances globales avec une réduction de 35 % des besoins énergétiques et une baisse de 37 % des DH, confirmant son efficacité thermique.

Par ailleurs, l'introduction d'un double vitrage a entraîné une réduction des besoins de 4,4 %, liée à la limitation des pertes thermiques hivernales, mais s'est accompagnée d'une augmentation de 7,8 % des surchauffes, probablement dû au piégeage du rayonnement solaire en été. Finalement, la combinaison des trois solutions les plus pertinentes telles que la ouate de cellulose pour l'isolation des parois et de la toiture, le MCP Dupont pour le confort d'été, et le double vitrage pour limiter les pertes thermiques, a permis d'atteindre une réduction remarquable de 51 % des besoins énergétiques (baisse à 49 143 kWh/an) et une diminution de 37 % des degrés-heures de surchauffe, démontrant qu'un choix judicieux de matériaux complémentaires peut à la fois réduire la consommation énergétique d'un bâtiment et en améliorer sensiblement le confort thermique tout au long de l'année.

Combinaison des solutions:							Cas de référence						
Ouate + MCP Dupont													
Zones	Besoins Ch. kWh	T° min (°C)	T° max (°C)	Besoins bruts (kWh)	Part de besoins nets (%)		Zones	Besoins Ch. kWh	T° min (°C)	T° max (°C)	Besoins bruts (kWh)	Part de besoins nets (%)	
TOTAL	39362	8.7	36.4	49143	85,4		TOTAL	88180,9	6,1	40,2	102439,8	86,1	
Zones	Seuil min (°C)	Nb < Seuil min (%)	Seuil max (°C)	Nb > Seuil max (%)	Givoni (%)	DH (°C.H)	Zones	Seuil min (°C)	Nb < Seuil min (%)	Seuil max (°C)	Nb > Seuil max (%)	Givoni (%)	DH (°C.H)
TOTAL	16	0,4	28	6,2	67,8	89	TOTAL	16	2	28	8	61,1	141,2

Figure 7 : Tableau de résultat de la combinaison des trois solutions

Enfin, il est pertinent de comparer les conditions climatiques actuelles avec celles projetées pour 2100 selon le scénario RCP 8.5, considéré comme le plus pessimiste. Pour cette analyse, nous avons appliqué la combinaison des trois solutions étudiées (végétalisation, isolation, matériaux biosourcés), avec l'ajout d'une ventilation mécanique afin de pallier les températures extrêmement élevées prévues. Les résultats obtenus ont mis en évidence une économie en besoins bruts : 45,3 % ; une réduction des heures de surchauffe : 14 % ; un temps de dépassement du seuil maximal de 28 °C : 32 % du temps. Ces résultats montrent que, malgré les solutions mises en œuvre, le bâtiment continue à présenter des conditions

thermiques inconfortables pendant près d'un tiers du temps. Néanmoins, les mesures adoptées permettent tout de même de réduire significativement les besoins énergétiques et d'améliorer les indicateurs de confort, tels que les critères de Givoni et le Degré-Heure (DH). Cette analyse souligne que, même avec des solutions combinées et une ventilation supplémentaire, les conditions extrêmes prévues pour 2100 restent difficiles à compenser, ce qui met en lumière l'importance de préparer les bâtiments à des scénarios climatiques extrêmes et d'envisager des stratégies complémentaires pour renforcer la résilience thermique.

Pour conclure, face à l'évolution rapide du climat décrite par les scénarios du GIEC, le secteur du bâtiment se trouve à un tournant critique. Les projections RCP et SSP indiquent que, quelle que soit la trajectoire d'émissions, les impacts sur les bâtiments existants seront significatifs, tant sur le plan du confort thermique que de la résilience structurelle. Parmi les solutions étudiées, les matériaux biosourcés, comme la ouate de cellulose, offrent de bonnes performances d'isolation et une capacité de séquestration du carbone, tandis que les matériaux à changement de phase (MCP) améliorent le stockage thermique passif. Leur efficacité nécessite toutefois une modélisation précise et des ajustements réglementaires pour une adoption à grande échelle.

Parallèlement, des stratégies passives comme les matériaux biosourcés, une ventilation naturelle, des toitures végétalisées, permettent de limiter les consommations énergétiques sans sacrifier le confort, ce qui devient crucial face à l'augmentation des vagues de chaleur estivales. Nos simulations ont montré qu'en combinant isolation des parois, de la toiture et des vitrages, les besoins énergétiques bruts pouvaient être drastiquement réduits, même si l'hypothèse d'une seule grande pièce simplifie la réalité.

#### **Bibliographie :**

**[1]** Les enjeux de l'adaptation au changement climatique du secteur immobilier dans les scénarios transition(s) 2050

[https://resources.taloen.fr/resources/documents/5423\\_Rapport\\_Technique-vf.pdf](https://resources.taloen.fr/resources/documents/5423_Rapport_Technique-vf.pdf)

**[2]** Les scénarios SSP, Decryptagé et recommandations d'utilisation pour une démarche d'adaptation au changement climatique. <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>