

Etude du comportement thermique et des impacts environnementaux d'une école parisienne

Aurore Wurtz¹, Charlotte Roux², Florence Jacquinod³, Cédissia About⁴, Adélaïde Feraille¹

¹Navier, ENPC, Institut Polytechnique de Paris, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

²CES – Centre d'Effacité Energétique des Systèmes, Mines de Paris, Université PSL, France

³Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, EIVP, LASTIG, F-75019 Paris, France

⁴Lab'Urba, Univ Gustave Eiffel, Univ Paris-Est Créteil Val-de-Marne, France

RESUME

L'analyse de cycle de vie est une méthode fiable et adaptée à une démarche d'écoconception des bâtiments évitant de nombreux transferts de pollution. Or, elle est encore peu utilisée en phase amont de conception et de rénovation, lorsque les décisions importantes sont prises pour l'ensemble bâti. La nécessité d'outils complexes, de compétences d'expertise et de données spécifiques généralement peu nombreuses ou peu accessibles compliquent son application. Cette communication présente un projet en partenariat avec la ville de Paris, visant à développer une méthodologie pour l'écoconception adaptée aux objectifs et au périmètre de responsabilité des maîtres d'ouvrage. Les développements proposés ici portent sur la collecte de données et l'évaluation du comportement estival d'une école parisienne face aux climats futurs, dans un but d'utilisation des outils en phase amont des projets de conception et de rénovation pour réduire les surchauffes d'été d'une part et les impacts environnementaux d'autre part.

Mots-clefs Analyse de cycle de vie, confort d'été, simulation thermique dynamique, bâtiment, école

I. INTRODUCTION

Le contexte d'urgence climatique contraint l'ensemble des secteurs d'activité à questionner leurs pratiques afin de participer activement à la transition environnementale. Le secteur du bâtiment représente 35 % de la part de la consommation d'énergie finale mondiale, et 37 % des émissions de gaz à effet de serre (United Nations Environment Programme, 2022). Le bâtiment ayant une durée de vie longue, l'ensemble du cycle de vie doit être pris en compte afin d'évaluer les impacts environnementaux de ce dernier. La méthode d'analyse de cycle de vie, de par ses caractères multi-étape et multicritère est adaptée, et permet d'éviter les transferts de pollution (Saadé and Jolliet, 2024). De plus, la performance thermique des bâtiments étant fortement corrélée aux données météorologiques, l'évaluation de l'évolution du comportement des bâtiments selon les climats futurs est importante.

La gestion du parc de bâtiments français existants est un enjeu principal de la transition environnementale, faisant l'objet d'un plan de rénovation énergétique à l'échelle nationale. En 2023, 15,7 % du parc de résidences principales étaient des passoires thermiques selon le commissariat

général au développement durable¹. Le projet ECOMOA, financé par l'ADEME et en collaboration avec la Ville de Paris, a pour objectif de comprendre les contraintes des maîtrises d'ouvrage en termes de rénovation thermique afin de proposer une évolution des outils adaptée aux enjeux environnementaux et aux besoins exprimés. La ville de Paris en tant que maîtrise d'ouvrage a la responsabilité du renouvellement et de la gestion de nombreux bâtiments publics et rencontre des difficultés d'exploitation technique qui sont le plus souvent communes à l'ensemble des bâtiments. Le parc des écoles de la ville de Paris a été sélectionné pour ce travail afin de proposer des solutions généralisables, d'une part car on observe souvent de fortes similarités entre les bâtiments appartenant à une même typologie architecturale, d'autre part car l'usage comparable permet une certaine répliquabilité des résultats.

Ce travail présente l'étude du comportement thermique d'un bâtiment contraint aux climats actuels et futurs, et propose des solutions d'amélioration de la performance thermique du bâtiment en particulier pour renforcer le confort d'été dans les écoles, qui est l'une des principales problématiques actuelles de la Direction Constructions Publiques et Architectures (DCPA) de la ville de Paris. L'intérêt de la ventilation naturelle, basée sur une modification du comportement des occupants, est étudié, et des solutions de rénovation et d'amélioration thermique sont proposées. Les solutions évoquées sont évaluées sur le plan du confort estival et environnemental à l'aide d'une simulation thermique dynamique et d'une analyse de cycle de vie. Le cas de l'utilisation de matériaux biosourcés pour la rénovation est également étudié. Ce travail est appliqué à une école de la ville de Paris.

II. METHODOLOGIE

Ce travail a nécessité en premier lieu une collecte de données concernant le bâtiment étudié et les données météorologiques futures afin de réaliser une maquette numérique du bâtiment, à partir de laquelle sont ensuite évalués le confort estival par simulation thermique dynamique et les performances environnementales par analyse de cycle de vie. Puis différentes solutions d'amélioration du confort thermique, passives et technologiques ont été évaluées et comparées.

A. Collecte de données

Le projet ECOMOA présenté en introduction a pour objectif d'accompagner les maîtrises d'ouvrage pour réduire les impacts environnementaux des territoires. Cinq époques de construction française ont été déterminées afin de représenter les typologies constructives principales des écoles de la ville de Paris. A chacune de ces cinq époques, une école parisienne a été associée et utilisée comme cas d'étude. Les services techniques d'architecture de la ville ont été contactés pour obtenir des données sur ces écoles (plans, projets de restructuration prévus le cas échéant, usage actuel).

A ce stade du projet, les plans d'une seule école ont été récoltés, le travail présenté porte ainsi uniquement sur celle-ci. Les données concernant l'usage n'ont cependant pas pu être obtenues en détail, il a donc été décidé d'utiliser des scénarios adaptés à une école primaire, issus de la méthode de calcul réglementaire Th-BCE, initialement élaborée pour vérifier la conformité d'un bâtiment

¹ <https://www.notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/combien-de-residences-principales-sont-des-passoires-energetiques>

avec la réglementation et disponible en annexe III de l'arrêté du 4 août 2021². Les scénarios de ventilation quant à eux doivent être définis selon la norme. Ils ont été calculés en fonction de la capacité maximale d'accueil corrélée au taux d'occupation, du débit minimal réglementaire, de la surface unitaire et de la hauteur moyenne des pièces. La ventilation est stoppée en fin de journée, une heure après le départ des occupants, et est remise en route le matin, une heure avant l'occupation des locaux, excepté pour les logements dans lesquels la ventilation est continue.

Des données météorologiques futures ont été utilisées pour réaliser des simulations thermiques dynamiques représentatives de la performance thermique du bâtiment au cours de sa durée de vie. Ces dernières ont été élaborées dans le cadre du projet de recherche *Resilience* à partir de données prospectives produites par le Centre National de météorologie à l'horizon 2050 et 2100 pour l'Île-de-France, en considérant des vagues de chaleur de sévérité médiane et extrême (Peuportier et al., 2023).

B. Modélisation

La simulation thermique dynamique et l'analyse de cycle de vie ont été réalisées respectivement à l'aide des moteurs de calcul COMFIE et EQUER du logiciel Pleiades³. L'environnement urbain a été modélisé à partir de la carte en ligne OpenStreetMap⁴, pour créer les masques proches correspondants. La base de données environnementale internationale ecoinvent 3.4 est utilisée pour réaliser les analyses de cycle de vie (Wernet et al., 2016).

D'après les scénarios Th-BCE, une température de 19°C est supposée de 8h à 17h, et une température de 16°C est admise en soirée et en week-end. Les scénarios d'occupation et de puissance dissipée sont déterminés en fonction de la capacité maximale des salles et non de la capacité d'accueil réelle afin de tenir compte des éventuelles évolutions futures. Par exemple, dans les salles de classe aux heures d'enseignement, on considère 28 écoliers et un instituteur. L'occupation et la puissance dissipée diffèrent selon l'usage des pièces, qui sont divisées en 9 zones thermiques d'après une interprétation des plans récoltés auprès des agents de la ville : salles de classe, salle informatique, circulations, sanitaires, salle de repos, logements de fonction, locaux non chauffés, bureaux, salle des professeurs.

Afin d'éviter d'éventuelles erreurs d'estimation des besoins de chauffage, la saison de chauffage est définie en fonction des températures extérieures de l'année de référence 2012. Elle s'étend donc du 24 septembre au 17 juin. Cependant, au cours de cette période, lorsque la température de consigne est atteinte sans chauffage, ce dernier n'est pas allumé donc pas comptabilisé.

C. Solutions de confort thermique

Deux types de solutions d'amélioration du confort thermique sont étudiées, d'une part passives et d'autre part technologiques.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'influence du comportement des occupants sur le confort d'été. Un scénario de surventilation est proposé : lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure, un débit de 3 vol/h est considéré afin de simuler l'ouverture

² Arrêté relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation

³ <https://www.izuba.fr/>

⁴ <https://www.openstreetmap.fr/>

de fenêtres, dans des salles qui ne sont généralement pas traversantes ; dès qu'on observe une inversion de température, ou que la température intérieure est inférieure à 21 °C, la surventilation est arrêtée. Ces conditions sont supposées être réalisées sans tenir compte des difficultés de mise en œuvre. L'intérêt de cette étude est d'étudier la performance thermique du bâtiment en conditions idéales, pour estimer la capacité du bâtiment à fournir des conditions de vie acceptables aux usagers sans rénovation ni installation de climatisation.

Des stores extérieurs sont également mis en place en continu l'été. Leur période d'utilisation a été définie en fonction des températures extérieures de l'année de référence 2012, soit du 09 juin au 21 septembre. Des stores enroulables extérieurs opaques de teinte sombre ont été considérés, avec un scénario de fermeture de 75 %. Ce pourcentage correspond à un taux de mise en œuvre du store opaque.

L'indicateur utilisé pour évaluer le confort d'été est le taux d'inconfort. Il s'agit du rapport entre le nombre d'heures durant lesquelles la température intérieure est supérieure à 27°C et le nombre d'heures d'occupation des zones thermiques. L'école étant considérée non utilisée en juillet et en août, le choix de cet indicateur ne reflète l'inconfort que lors des périodes de mi-saison.

La DCPA initie un projet de rénovation thermique et de restructuration de la cantine – qui n'est pas étudiée dans ce travail du fait de l'usage différent. Le bâtiment est donc voué à être encore utilisé pendant plusieurs décennies, ce qui signifie que l'évaluation du confort d'été au sein du bâtiment et sa résilience face au changement climatique est nécessaire. Nous proposons d'étudier les conséquences de la mise en place d'isolation et de fenêtres en double vitrage sur le confort d'été. Une épaisseur de 15 cm de polyuréthane est ajoutée au plancher bas, 20 cm de laine de verre sont ajoutés aux murs extérieurs, et 30 cm en toiture. L'isolation est supposée par l'intérieur, sans modification des ponts thermiques. Les fenêtres initiales sont remplacées par des fenêtres en double vitrage avec une lame d'argon dont le coefficient de transmission U_w vertical est de 1,2 W/ (m².K).

III. RESULTATS

A. Cas d'étude

L'école Rouvier, située dans le 14^e arrondissement et construite en 1895 est utilisée comme cas d'étude pour représenter les écoles datant de la fin du 19^e siècle, qui ont été construites sous l'impulsion des lois Jules Ferry. La définition administrative de distribution des espaces a mené à une grande unité architecturale des écoles qui ont vu le jour à cette période. Elles représentent aujourd'hui le tiers des bâtiments scolaires encore en usage à Paris⁵. Le bâtiment comprend une structure en briques non isolée, des fenêtres d'origine en simple vitrage, des cloisons en briques creuses, un plancher bas composé de mortier et de bois léger ainsi qu'une toiture en briques et bois léger. La **FIGURE 1** présente la modélisation de l'école sur le logiciel Pleiades avec les bâtiments voisins considérés comme des masques proches en gris.

⁵ <https://archives.paris.fr/r/161/architecture-scolaire-a-paris/> [consulté le 14/04/2025]

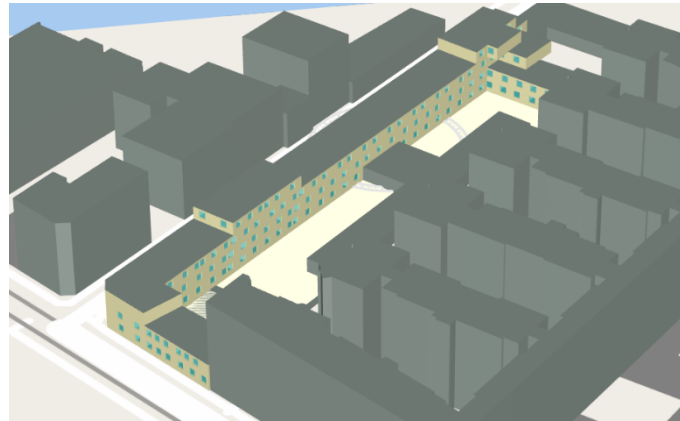


FIGURE 1. Visualisation 3D de l'école primaire

B. Etude du comportement thermique du bâtiment

Dans un premier temps, nous étudions la performance thermique actuelle du bâtiment selon l'année de référence 2012. Pour chaque zone thermique exceptée celle attribuée au local non chauffé, le taux d'inconfort d'été est calculé selon les solutions passives mises en place par les occupants, et présenté **FIGURE 2**. Dans le cas de base, sans mise en place de stores ni de surventilation, la période durant laquelle la température intérieure dépasse 27°C se situe entre le 03 juin et le 31 août.

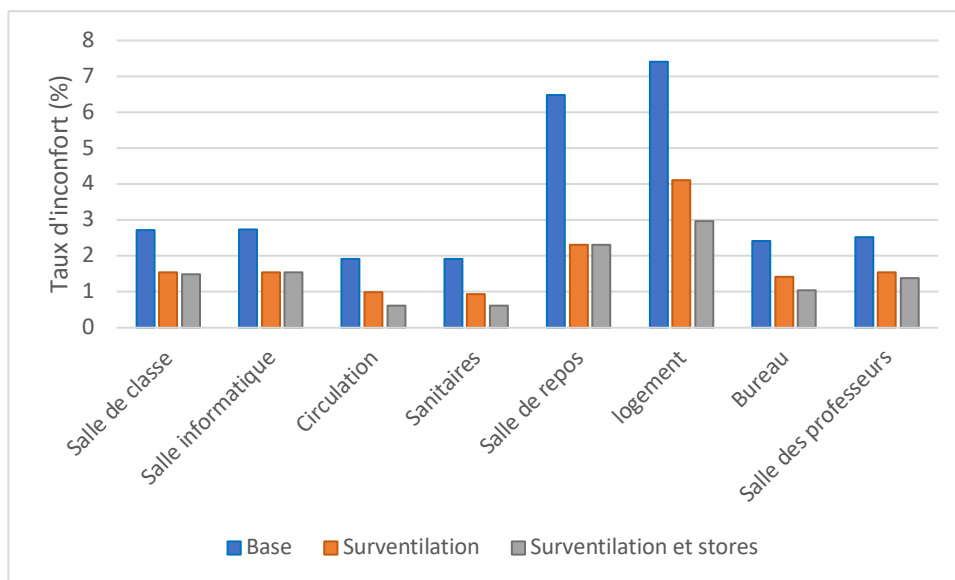


FIGURE 2. Taux d'inconfort d'été dans chaque zone thermique en 2012

Le taux d'inconfort le plus élevé correspond aux logements de fonction, situés au dernier étage du bâtiment. Les murs extérieurs et la toiture de ces logements sont des surfaces déperditives, et la protection solaire des masques proches est moins importante du fait de la hauteur des logements. De plus, les logements sont occupés toute l'année contrairement aux autres zones thermiques qui sont associées à un usage d'école primaire, soit inoccupées en juillet et en août. Le bâtiment modélisé initialement sans surventilation ni stores présente un inconfort de 7,4 % dans les logements de fonction, ce qui correspond à 646 h, soit près de quatre semaines d'inconfort du 03

juin au 31 août, l'inconfort étant défini dans ce cas par une zone thermique occupée présentant une température supérieure à 27°C.

Les deux salles de repos sont situées au sud-est du bâtiment. A cet endroit le bâtiment voisin n'est pas modélisé en tant que masque proche, car un boulevard sépare ce dernier de l'école. La distance entre les deux bâtiments est d'environ 25 mètres, tandis qu'au sud-ouest la distance avec le bâtiment voisin – modélisé en tant que masque proche – est d'environ 8 mètres. De plus, les salles de repos sont uniquement occupées de 13 h à 16 h, un horaire plus propice aux surchauffes. Cela explique, en plus de l'orientation, le taux d'inconfort élevé dans cette zone thermique.

Concernant les salles de classe, sans surventilation ni stores, on observe 44 h d'inconfort d'été, contrairement à 24h avec la mise en place des bonnes pratiques. Cela correspond respectivement à une semaine et deux jours et demi de classe. Dans l'ensemble des zones, la mise en place de surventilation et, dans une moindre mesure, de stores, réduit l'inconfort d'été.

Les surchauffes dans les salles de classe étant l'une des principales problématiques de la DCPA, nous étudions désormais le confort d'été de ces dernières avec ou sans bonnes pratiques, selon différents climats futurs, présentant différentes intensités de vagues de chaleur. Le taux d'inconfort est présenté [FIGURE 3](#).

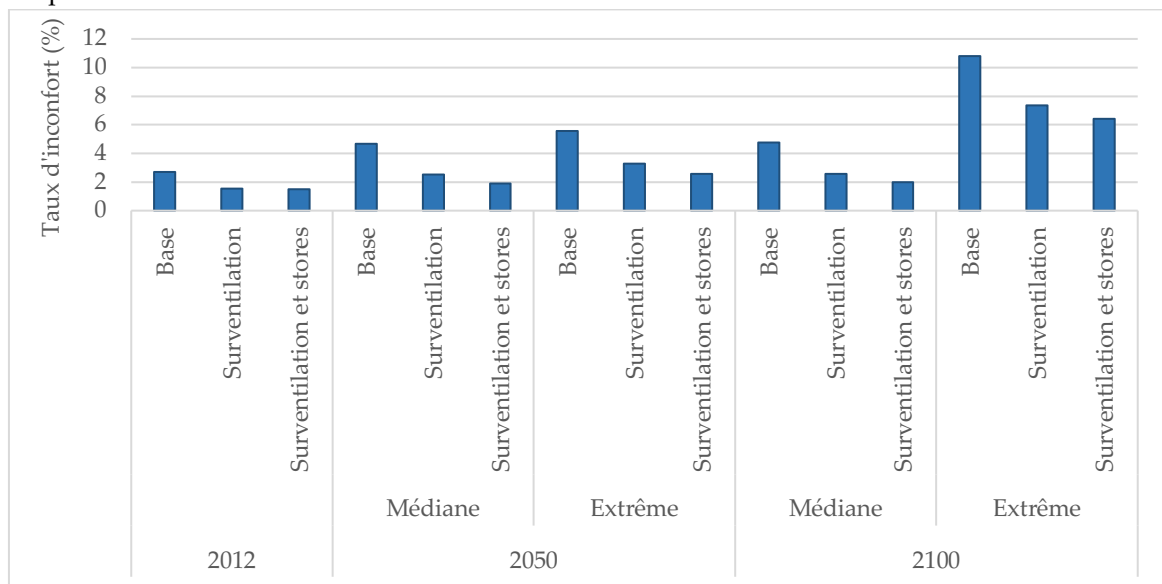


FIGURE 3. Taux d'inconfort des salles de classe en fonction de l'année et de l'intensité des vagues de chaleur

La mise en place des bonnes pratiques permet de maintenir un taux d'inconfort à 3 % dans les salles de classe pour la majorité des fichiers météorologiques, ce qui correspond tout de même à 42 h d'inconfort dans le cas des vagues de chaleur d'intensité extrême en 2050, soit à près d'une semaine de cours. Cependant, le cas d'une vague de chaleur d'intensité extrême en 2100 présente 6,4 % d'inconfort soit 104 h, équivalent à 2 semaines et 1,5 jours de cours. Cette perspective montre l'impossibilité de conserver le bâtiment dans les années futures sans rénovation thermique. Cette proposition va faire l'objet du prochain paragraphe.

C. Solutions technologiques

Dans ce paragraphe, le comportement du bâtiment est étudié dans un climat fixé, correspondant aux données météorologiques de 2100, avec des vagues de chaleur d'intensité extrême. L'inconfort d'été est évalué pour le bâtiment non isolé, avec et sans bonnes pratiques (surventilation et stores extérieurs), ainsi qu'avec et sans isolation par l'intérieur et double vitrage. Les conditions d'isolation sont détaillées au paragraphe II.C. La FIGURE 4 présente le taux d'inconfort d'été pour chaque zone thermique dans chacune des conditions évoquées ci-dessus.

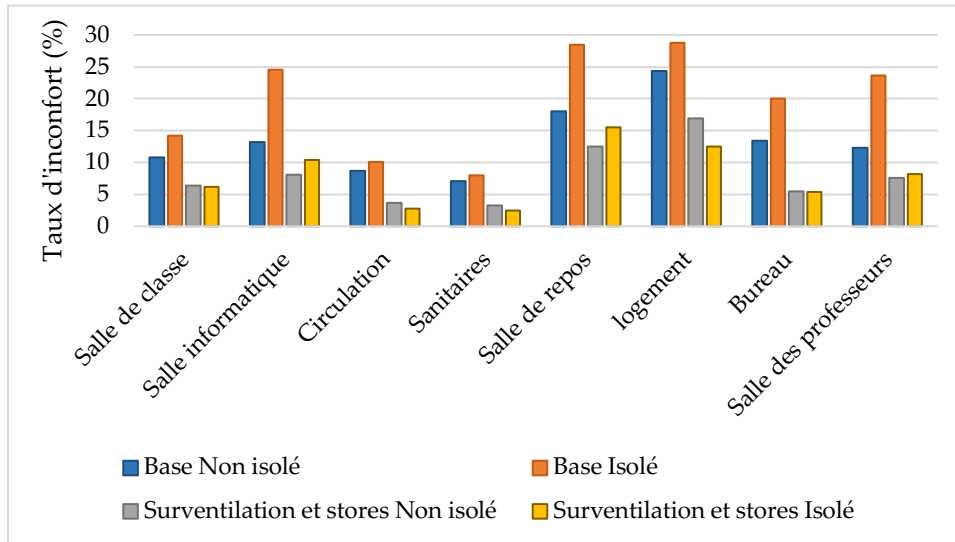


FIGURE 4. Taux d'inconfort d'été des zones thermiques en 2100 pour la vague de chaleur extrême, selon les pratiques des occupants et l'isolation

Dans le cas du bâtiment sans surventilation ni stores, l'amélioration de l'enveloppe dégrade le confort d'été. Les zones n'étant pas ventilées la nuit, les pièces montent en température la journée du fait des apports internes et la température ne peut pas se rafraîchir la nuit. Dans le cas de la mise en place de surventilation et de stores, l'amélioration de la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment augmente le taux d'inconfort dans certaines zones thermiques, et le réduit dans d'autres. L'isolation augmente l'inconfort dans la salle informatique, dans la salle de repos et dans la salle des professeurs. Tandis que les circulations, les sanitaires et les logements voient leur confort s'améliorer avec l'isolation. Ces résultats sont corrélés avec les apports internes, qui sont plus élevés dans la salle informatique (du fait des ordinateurs) et dans la salle de repos (horaires restreints, mais taux d'occupation élevé). En revanche, l'isolation du logement permet d'améliorer le confort d'été, étant donné que ces derniers ont des apports internes plus faibles, et qu'ils sont situés en dernier étage avec de nombreuses parois déperditives. D'autre part, le débit de ventilation réglementaire est très élevé ; les salles de classe, la salle informatique et la salle de repos sont ventilées par un débit allant jusqu'à 4,3 vol/h selon le taux d'occupation. Ainsi, dans ces pièces l'isolation ne permet pas un déphasage voué à maintenir une température confortable la journée, les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur étant trop importants.

Enfin, bien que l'isolation de ce bâtiment ne soit pas concluante en termes de confort d'été, elle permet de réduire considérablement les besoins de chauffage, présentés dans le

TABLEAU 1 pour un bâtiment isolé et non isolé, selon l'année. Ces résultats ont été obtenus suite à la réalisation d'une simulation thermique dynamique considérant un scénario de surventilation de

3 vol/h comme indiqué précédemment, et la mise en place de stores occultants à 75 %. L'intensité de la vague de chaleur n'a pas d'impact significatif sur les besoins de chauffage.

TABLEAU 1. Besoins de chauffage du bâtiment étudié selon l'année de simulation et son isolation (kWh/m²/an)

	2050	2100
Sans isolation	99	67
Isolation et double vitrage	27	17

D. Analyse de cycle de vie

La question des surchauffes d'été est primordiale pour les maîtrises d'ouvrage, mais celle de l'impact environnemental l'est également dans le contexte de transition environnementale. Ce paragraphe propose d'évaluer la performance environnementale du bâtiment étudié, en 2050 avec le fichier météorologique présentant des vagues de chaleur d'intensité extrême.

L'analyse de cycle de vie du bâtiment avant et après isolation est réalisée, avec deux types d'isolants différents : de la laine de verre et du polyuréthane d'une part, un isolant biosourcé de l'autre. Il s'agit de laine de bois dans les murs et en toiture, et des panneaux de fibre de bois pour le plancher.

On considère une consommation d'eau froide équivalente à 3,5 m³ par an et par élève, de 100 litres d'eau froide et 40 litres d'eau chaude par jour et par habitant des logements de fonction, et de 40 litres d'eau froide par jour par employé. L'école compte 19 instituteurs, et on considère 10 employés supplémentaires pour les fonctions supports, l'administratif et le ménage. Les deux logements de fonction hébergent 8 personnes au total, et 336 élèves ont été recensés d'après la DCPA, soit un total de 373 personnes dans l'école pendant 182 jours par an, exceptés les logements qui sont occupés toute l'année. Le mix électrique est établi selon les données provisoires fournies par RTE de l'année 2024. Il est approvisionné à 68 % par du nucléaire, à 28 % par des énergies renouvelables et hydrauliques, et à 4 % de gaz. Le système de chauffage considéré est une chaudière gaz de rendement 0,9.

La fibre de bois et la laine de bois sont considérées comme provenant de forêts gérées durablement, et l'ensemble des composants du bâtiment sont mis en décharge en fin de vie, exceptés les menuiseries en simple vitrage qui sont recyclées, les planchers et les fenêtres double vitrage qui sont incinérés, ainsi que les panneaux de fibre de bois qui sont considérés comme incinérés en fin de vie avec valorisation énergétique. Les impacts de l'ensemble du cycle de vie sont calculés, mais en phase construction seules les fenêtres et l'isolation sont prises en compte, car les autres matériaux sont identiques pour les trois simulations. Enfin, l'ensemble des indicateurs environnementaux des méthodes ReCiPe2016, ImpactWorld+ et plusieurs indicateurs de flux ont été évalués. Une sélection de ces indicateurs est présentée [FIGURE 5](#). Cette sélection est composée d'une part des deux indicateurs de dommages à la biodiversité et à la santé humaine agrégeant l'ensemble des impacts de niveau intermédiaire contribuant à ces catégories. D'autre part, les indicateurs de niveau intermédiaire et de flux présentés [FIGURE 5](#) ont été choisis dans un but d'aide à la décision auprès des maîtrises d'ouvrage.

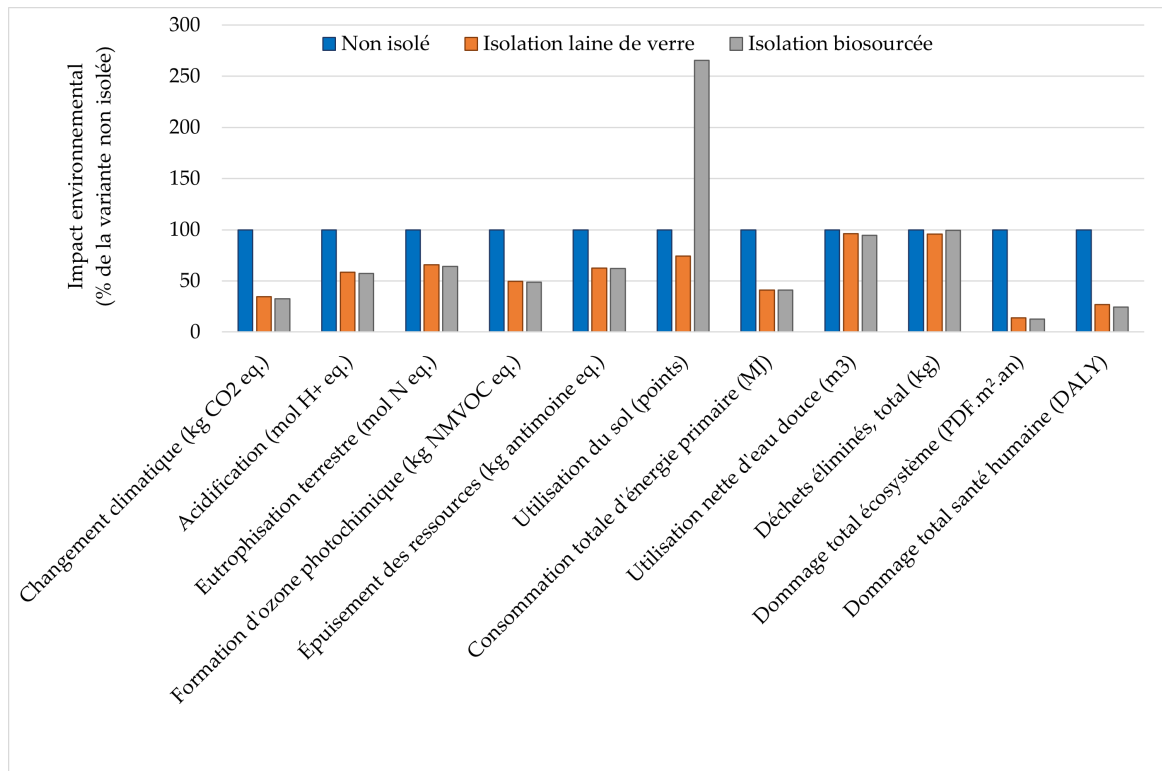


FIGURE 5. Comparaison environnementale du bâtiment selon l'isolation

La mise en place d'isolation réduit l'impact sur le changement climatique, l'acidification, l'eutrophisation terrestre, la formation d'ozone photochimique, la consommation d'énergie primaire, l'utilisation nette d'eau douce, les dommages aux écosystèmes et à la santé humaine. Cela correspond principalement à la réduction des besoins de chauffage. Cependant, l'augmentation des quantités de matières liées au double vitrage et à l'isolation présente un impact sur l'épuisement des ressources. De plus, l'utilisation d'isolant biosourcé augmente l'impact sur l'indicateur sélectionné d'utilisation du sol. Toutefois, à l'échelle des dommages cette problématique ne semble pas significative, car les dommages aux écosystèmes sont réduits par l'isolation biosourcée.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les études réalisées dans ce travail correspondent à un usage d'école qui n'est pas occupée en juillet et en août. Les résultats seraient à reprendre si la ville de Paris entreprenait des activités dans les écoles hors occupation standard (centres de loisirs, stage d'été, hébergement d'urgence etc.). La RE2020 établit de nouvelles exigences en termes de confort d'été avec le calcul des degrés heures. Un seuil bas est fixé à 350 Degrés Heures (DH) en confort adaptatif, en-dessous duquel le bâtiment est jugé confortable. Ce seuil correspond à environ une semaine d'inconfort sur l'année. Bien que la RE2020 ne soit pas applicable dans ce cas car il s'agit d'une rénovation, cet ordre de grandeur montre que la mise en place d'une ventilation de 3 vol/h en conditions de rafraîchissement et de stores extérieurs peuvent suffire à rendre le bâtiment confortable pour les climats futurs s'il n'est pas utilisé en juillet et en août, excepté pour le climat correspondant à l'année 2100 avec des vagues

de chaleur d'intensité extrême. L'inconfort a été calculé selon le nombre d'heures en période d'occupation durant lesquelles la température est supérieure à 27°C. D'autres indicateurs pourraient être plus pertinents, comme les degrés heures qui prennent en compte l'intensité de la vague de chaleur en comptabilisant chaque degré au-dessus de 27°C, la prise en compte du confort adaptatif, ou encore des perceptions individuelles par le calcul des indices PMV et PPD prédisant respectivement le ressenti thermique d'un grand nombre de personnes et le pourcentage de personnes insatisfaites de l'ambiance thermique.

La ventilation est également une problématique importante que ce travail a soulevé. Les débits réglementaires de renouvellement d'air sont très élevés dans les salles de classe, ce qui a des effets contradictoires. D'une part, ce débit permet à l'ambiance intérieure de redescendre en température par exemple le matin tôt en été, lorsqu'il fait encore frais dehors. D'autre part, à partir de la mi-journée, les échanges d'air sont trop importants pour que l'isolation soit efficace. Une réponse à ce problème peut reposer sur une surventilation nocturne adaptée, avec un fort débit la nuit en été. Cependant cette condition est difficile à mettre en œuvre tout en luttant contre les intrusions (ex : oiseaux).

L'isolation considérée dans ce travail est efficace en hiver mais assez peu en été. Cela questionne l'intérêt d'une isolation par l'intérieur pour les surchauffes d'été, et nécessite d'approfondir la gestion des ponts thermiques et de l'inertie. L'isolation devrait être par l'extérieur pour être efficace. Pour conclure, cette communication a présenté le comportement estival d'une école parisienne selon différents climats futurs, et a montré l'intérêt de mettre en place une surventilation nocturne en mode rafraîchissement et des stores extérieurs. L'isolation et la mise en place du double vitrage est utile pour les logements, mais la mise en œuvre par l'intérieur, sans réduire les ponts thermiques, perd de son intérêt pour les salles occupées par les élèves. Enfin, l'analyse de cycle de vie a été réalisée pour le bâtiment avant et après isolation ; l'isolation réduit les impacts environnementaux pour de nombreux indicateurs, bien que le type d'isolation influence grandement les impacts sur l'usage des sols et les dommages à la santé. Ces résultats étant très corrélés au cas d'étude choisi, d'autres écoles seront étudiées dans la suite du projet ECOMOA. Cela constituera une première étape dans l'élaboration d'une représentation du parc des écoles parisiennes.

REFERENCES

- Peuportier, B., Monnier, R., Schalbart, P., ARMINES, Lemonsu, A., Leroy, B., CNRM, François, E., Wurtz, E., Ouvrier-Bonnaz, O., CEA-INES, Ziv, N., Resallience, Serodio, E., Thiers, S., Pionnier, R., Izuba Energies 2023, 2023. Résilience - Rapport final, résultats.
- Saadé, M., Jolliet, O., 2024. Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan, 4e édition. ed, Science et ingénierie de l'environnement. EPFL Press.
- United Nations Environment Programme, 2022. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>