

L'apport des technologies en matière de simulation numérique

Bruno PEUPORTIER et Patrick SCHALBART

Mines ParisTech et Lab Recherche Environnement Vinci ParisTech

L'ampleur des impacts environnementaux et des coûts externes associés rend nécessaire une transition énergétique et écologique. Ce contexte impose de rénover en profondeur le parc de bâtiments existant. Pour massifier cette rénovation, il est utile de rechercher des solutions à moindre coût et de rassurer les investisseurs en garantissant les performances. Il faut également s'assurer que l'efficacité énergétique ne dégrade ni les autres critères environnementaux ni le niveau de confort thermique, car les bâtiments doivent être résilients face au changement climatique. Pour répondre à ces objectifs, les outils d'écoconception basés sur la simulation numérique peuvent être appliqués aux projets de rénovation.

La démarche d'éco-conception consiste à prendre en compte les aspects environnementaux dans les processus de décision ; elle s'applique en particulier aux projets de rénovation (Peuportier, 2008a). Elle est donc bien adaptée à des objectifs de transition, surtout si elle est menée en phase amont d'un projet, une phase durant laquelle les décisions prises influencent fortement les performances des bâtiments.

Cette démarche est basée sur des outils de simulation thermique dynamique et d'analyse de cycle de vie, qui permettent d'évaluer les consommations énergétiques et les impacts environnementaux en intégrant la fabrication, le transport, la mise en œuvre, le remplacement et la fin de vie des produits de construction, ainsi que les aspects liés à l'étape d'utilisation (consommations d'énergie et d'eau, en particulier). Après une brève présentation de ces outils, nous évoquerons quelques exemples d'application de ceux-ci dans le cadre de l'étude des projets de rénovation.

Les technologies de simulation numérique

L'application de la simulation numérique à l'énergétique des bâtiments s'est développée dans les années 1980 grâce aux progrès des moyens informatiques (Clarke, 1985 ; Dehausse, 1988). Des outils permettant de modéliser de manière réaliste le comportement thermique des bâtiments, c'est-à-dire sur un pas de temps horaire et en considérant plusieurs espaces présentant des températures différentes (appelés « zones thermiques »), ont été développés à cette époque (DOE-2, 1980). Le principe de ces modèles consiste à décomposer un bâtiment en zones, en parois et en couches de matériaux sur lesquelles est appliquée l'équation de la chaleur (Roux, 2015).

Pour diminuer le temps de calcul, des techniques de réduction de modèle ont été appliquées ; elles sont basées sur des fonctions de transfert (Seem, 1987) ou sur l'analyse modale (Bacot, 1984). Cela a permis de réaliser des simulations annuelles portant sur des bâtiments complexes en un temps compatible avec la pratique des bureaux d'études. Plusieurs outils développés sur ces bases, puis validés par rapport à des mesures (Munaretto, 2017), ont été diffusés auprès des professionnels. Un modèle à pas de temps horaire a été introduit dans la réglementation en 2005, l'inertie thermique étant alors considérée de manière simplifiée.

Dans les années 1990, la simulation énergétique a été étendue à l'évaluation des impacts environnementaux, en appliquant l'analyse de cycle de vie (Kohler, 1994 ; Polster, 1995). Son principe consiste à évaluer les impacts considérés sur une chaîne allant de la fabrication des produits de construction et le chantier jusqu'à la fin de vie d'un bâtiment, en passant par les étapes d'utilisation et de rénovation. Un projet européen relatif à la réhabilitation thermique des logements sociaux (Peuportier, 2008b) a permis la réalisation d'un site Internet fournissant un accès à des ressources pédagogiques portant sur les méthodes (dont la simulation énergétique et l'analyse de cycle de vie), les technologies et des études de cas⁽¹⁾.

L'amélioration des performances des ordinateurs permet aujourd'hui de lancer des milliers de simulations, ce qui rend possible l'application de techniques d'optimisation (Rivallain, 2012) et de calculs d'incertitude (Pannier, 2017). Cette possibilité a été utilisée pour élaborer un référentiel concernant la performance environnementale. Plus de 20 000 simulations ont été effectuées sur un échantillon de bâtiments

⁽¹⁾ <https://diren.mines-paristech.fr/Sites/TREES/>

comportant des maisons anciennes ou à énergie positive, des immeubles haussmanniens, des HLM des années 1960, des résidences basse consommation, des bureaux et des écoles, et en considérant plusieurs variantes (par exemple, des structures en bois ou en béton ; un chauffage électrique, au bois ou au gaz) et différents niveaux d'isolation (Wurtz, 2020). Un projet de rénovation peut alors être évalué à l'aune de ce référentiel. Les outils numériques constituent ainsi une aide de plus en plus efficace aux processus de conception et de décision.

Quelques exemples d'application

Par quoi faut-il commencer ?

L'ampleur de la tâche est immense : parmi les quelque 36 millions de logements et le milliard de mètres carrés de bâtiments tertiaires en France, peu sont énergétiquement performants. Si le budget d'un décideur n'est pas suffisant pour pouvoir rénover à court terme l'ensemble des bâtiments de son parc avec une performance très élevée (atteignant, par exemple, le niveau des bâtiments passifs ou à énergie positive), il convient alors d'établir des priorités. Il est communément admis qu'il convient de rénover en priorité les bâtiments les moins performants, en faisant néanmoins abstraction de certains monuments historiques. Cette idée est confirmée par l'application d'une technique d'optimisation (Pannier, 2021) à un ensemble de logements sociaux situés à Montreuil (93) et incluant plusieurs types de bâtiments (des tours et des barres affichant des niveaux de performance différents). Plusieurs mesures d'amélioration sont considérées : isolation thermique, remplacement des fenêtres, changement de système de chauffage, mise en œuvre d'une ventilation avec récupération de chaleur. L'objectif de l'étude menée est de maximiser les économies d'énergie et de minimiser le coût des travaux, lesquels dans le cas considéré peuvent être étalés sur cinq ans, sous réserve d'une contrainte correspondant à une limite, celle du respect du budget annuel disponible.

En croisant le nombre des mesures d'amélioration possibles (enveloppe et équipements) avec celui des bâtiments à traiter et en tenant compte de l'ordre de réalisation des travaux durant les cinq années d'exécution, on obtient de l'ordre de 1 039 combinaisons. Il s'est donc avéré impossible d'évaluer toutes ces solutions. Un algorithme génétique a alors été mis en œuvre. Une solution est définie par un premier chromosome incluant des gènes concernant les mesures d'amélioration possibles pour chaque bâtiment (isolation, fenêtres, chauffage, ventilation) et par un deuxième chromosome définissant à quelle date seront effectués les différents travaux. De génération en génération, l'algorithme évalue les différentes solutions, sélectionne les meilleures, puis les croise entre elles pour obtenir la génération suivante.

L'optimisation permet de visualiser sur un « front de Pareto » (voir la Figure 1 ci-dessous) les solutions dites non dominées, c'est-à-dire pour lesquelles il n'existe pas d'alternative moins coûteuse pour une performance énergétique donnée et pas d'alternative plus performante pour un coût donné.

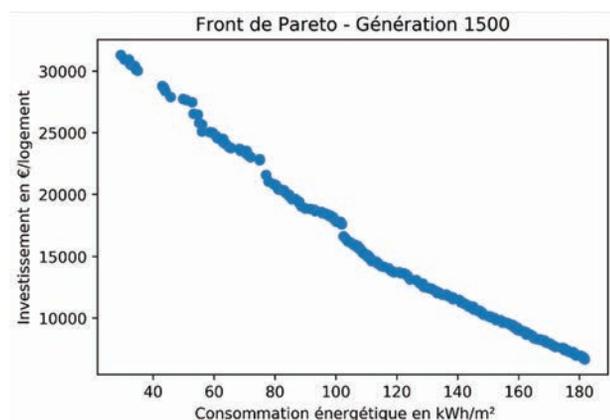


Figure 1 : Coût des travaux et des consommations de chauffage des solutions issues d'un algorithme génétique utilisé dans un cas d'étude concernant un ensemble de logements sociaux situés à Montreuil (Pannier, 2020).

Avec cet outil, il est alors possible, pour un budget donné, d'identifier la solution optimale située sur le front de Pareto. Bien entendu, l'étude d'optimisation peut aussi être menée sur un seul bâtiment, ce qui a été réalisé dans le cadre d'un projet européen (Peuportier, 2002). Cette étude a fait apparaître un optimum relatif à l'épaisseur d'isolation thermique des murs : les premiers centimètres d'isolants réduisent fortement les besoins de chauffage, ce qui compense largement l'énergie nécessaire à leur fabrication ; mais la tendance s'inverse au-delà d'une certaine épaisseur. Dans le cas considéré, l'optimum se situe autour de 30 centimètres, les variations étant très faibles entre 20 et 40 centimètres. Maîtriser les quantités de matériaux permet également de réduire les coûts, ce qui contribue aux objectifs de massification.

Vaut-il mieux rénover un bâtiment ou en construire un nouveau ?

La simulation numérique permet d'opérer une comparaison entre ces deux alternatives : le bâtiment le moins polluant est-il toujours celui que l'on rénove au lieu de le reconstruire ? Ce n'est pas systématique, car la construction neuve, si elle génère des impacts liés à la fabrication des produits, permet généralement des économies d'énergie importantes lors de l'étape d'utilisation. Pour étudier cette question, une comparaison a été effectuée entre une construction neuve et une opération de réhabilitation, en considérant des niveaux de performance standards et passifs (Palacios-Munoz, 2019) (voir la Figure 2 de la page suivante).

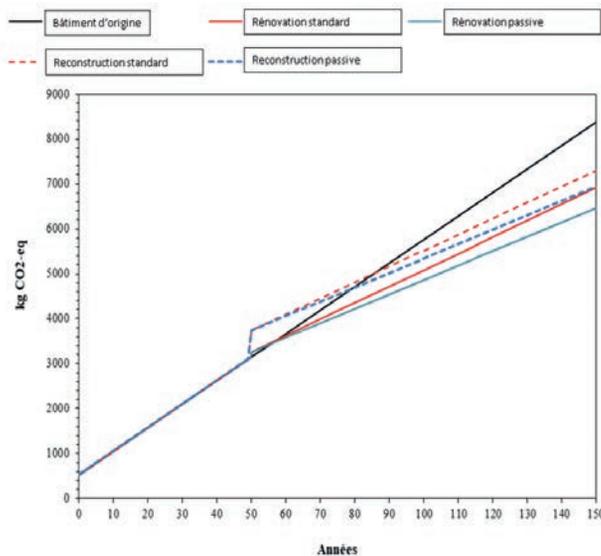


Figure 2 : Émissions de gaz à effet de serre d'un bâtiment existant et celles associées à différentes variantes de rénovation ou de reconstruction au bout de cinquante ans (Palacios-Munoz, 2019).

Dans le cas étudié, la rénovation s'est avérée généralement plus intéressante que la reconstruction, avec toutefois des marges d'incertitude liées, en particulier, aux durées de vie des bâtiments neufs et des bâtiments rénovés.

Peut-on garantir une performance ?

L'un des freins majeurs à la rénovation est lié au financement des projets ; ceux-ci nécessitent en effet des investissements importants. Établir un contrat de performance énergétique a pour but de garantir une économie permettant de récupérer dans la durée les fonds mobilisés. L'entreprise en charge des travaux de rénovation s'engage contractuellement sur une performance, une pénalité étant prévue en cas de dépassement de la consommation annoncée. Pour ne pas induire une pénalité si le dépassement est lié à un aléa climatique ou à un comportement inapproprié des occupants, la consommation garantie est ajustée selon les variations climatiques (température extérieure, par exemple) et le comportement des occupants (par exemple, non-respect de la consigne de température pour le chauffage). Des calculs d'incertitude sont alors réalisés dans le but de limiter le risque de dépassement et éviter le paiement de la pénalité induite (Ligier, 2018).

À partir de la distribution restituée sur la Figure 3 ci-contre, il est possible de déduire le niveau de consommation correspondant à un risque acceptable de dépassement : par exemple, ici, une consommation de l'ordre de 18 800 kWh pour un risque de 5 %. C'est ce niveau qui pourra alors être garanti, moyennant l'ajustement mentionné précédemment.

La rénovation énergétique accroît-elle les surchauffes en périodes de canicule ?

Une opinion largement répandue associe un « effet thermos » à l'isolation thermique, lequel rendrait les bâtiments invivables en été. Dans le cadre du projet Résilience, bénéficiant du soutien de l'Ademe

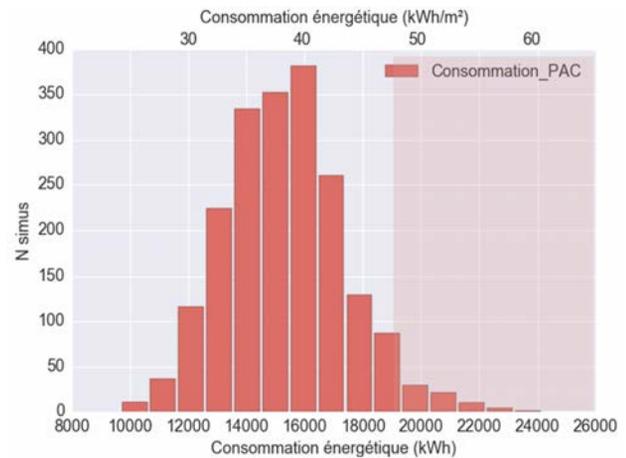


Figure 3 : Distribution des consommations énergétiques obtenues par simulation après tirage au sort des paramètres incertains selon leur distribution de probabilités (Ligier, 2018).

(appel « Vers des bâtiments responsables », édition 2020), un partenariat est mené avec Météo-France, qui élabore des données climatiques prospectives à partir des scénarios du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Ces données alimentent alors la simulation thermique dynamique, ce qui permet d'évaluer les risques de surchauffe pour un échantillon de bâtiments (depuis les immeubles haussmanniens, les maisons anciennes et les HLM des années 1960 jusqu'aux résidences à basse consommation et aux maisons à énergie positive de la période actuelle). Si les occupants ouvrent leurs fenêtres la nuit et s'ils ferment les stores durant les journées chaudes, la température est alors plus basse à l'intérieur qu'à l'extérieur ; dans ce cas, l'isolation thermique protège bien de la chaleur. L'inertie thermique est essentielle pour atténuer les fluctuations de température et conserver la fraîcheur de la nuit. L'isolation par l'extérieur d'une paroi inerte est alors préférable. *A contrario*, les maisons entièrement en bois, très légères, présentent un risque important de surchauffe que la simulation numérique permet d'estimer en fonction du climat. Elle montre par ailleurs l'intérêt d'associer plusieurs matériaux : la figure ci-après restitue un exemple de profil de température sur une semaine en considérant des données climatiques correspondant à la canicule de 2003, pour différents niveaux d'inertie thermique.

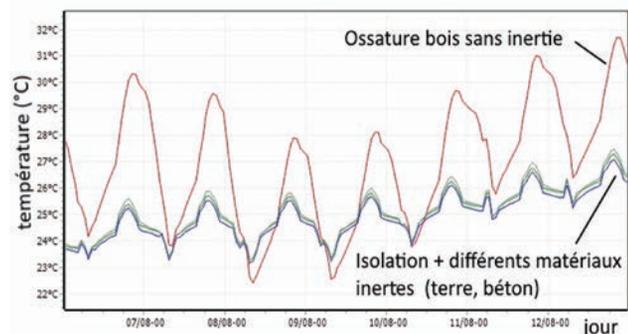


Figure 4 : Profils de température sur une semaine de canicule obtenus par simulation, en comparant plusieurs niveaux d'inertie thermique d'une maison individuelle (résultats obtenus grâce à l'outil Pleiades).

Existe-t-il des leviers supplémentaires d'action à l'échelle de l'îlot, du quartier ou de la ville ?

L'application de la simulation a été étendue à l'échelle d'un projet urbain et testée, par exemple, sur la rénovation du quartier Saint-Vincent-de-Paul dans le cadre du projet ADEME PULSE Paris. Intégrant à la fois des opérations de déconstruction, de réhabilitation et de construction, ce projet ouvre des possibilités supplémentaires en termes de réemploi ou de réutilisation de matériaux. En réduisant le coût des matériaux et du traitement des déchets, l'économie circulaire contribue également à la massification de la rénovation. Parmi les autres leviers d'action, on peut citer la mise en œuvre d'un réseau de chaleur ou d'un système de production d'énergies renouvelables au niveau local. Ainsi, l'installation de modules photovoltaïques sur des toitures bien exposées ou des ombrières de parking permet d'alimenter d'autres bâtiments d'un quartier. Il est également possible de mener des simulations à une échelle plus importante, par exemple en définissant des bâtiments archétypes.

Conclusion et perspectives

Les technologies de simulation numérique constituent une palette d'outils complémentaires : simulation thermo-aérodynamique et énergétique, analyse de cycle de vie, optimisation, propagation d'incertitudes... Ces outils permettent d'étudier un programme de rénovation répondant aux exigences de la transition environnementale. Grâce aux efforts des éditeurs de logiciels, en particulier pour relier ces différents outils au travers d'une interface conviviale, en connexion également avec des maquettes numériques (Building Information Model – BIM), il est possible de mener ce travail de conception dans le cadre des contraintes de temps liées aux pratiques professionnelles. Utilisés par de nombreux bureaux d'études, des architectes, des entreprises de construction ainsi que dans l'enseignement, ces outils sont mobilisables pour massifier des rénovations qui soient à la fois performantes et à coût abordable.

Références bibliographiques

- BACOT P., NEVEU A. & SICARD J. (1984), « Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment », *Revue générale de thermique*, n°267, Paris.
- CLARKE J. A. (1985), *Energy Simulation in Building Design*, Adam Hilger, 382 pages.
- DEHAUSSE R. (1988), *Énergétique des bâtiments*, PYC Édition, 353 pages.
- DOE-2 (1980), "DOE-2 Reference manual, version 2.1", Report LBL-8706, Revision 1, Lawrence Berkeley Laboratory.
- KOHLER N. *et al.* (1994), *Energie- und Stoffflussbilanzen von Gebäuden während ihrer Lebensdauer*, BEW Forschungsprojekt, Schlussbericht, Universität Karlsruhe (TH) ifib.
- LIGIER S., SCHALBART P. & PEUPORTIER B. (2018), « Développement d'une méthodologie pour la garantie de performance énergétique en réhabilitation basée sur la régression quantile », Conférence IBPSA France, Bordeaux.
- MUNARETTO F., RECHT T., SCHALBART P. & PEUPORTIER B. (2017), "Empirical validation of different internal superficial heat transfer models on a full-scale passive house", *Journal of Building Performance Simulation*, doi: 10.1080/19401493.2017.1331376
- PALACIOS-MUNOZ B., PEUPORTIER B., GRACIA-VILLA L. & LÓPEZ-MESAD B. (2019), "The importance of estimating lifespan in LCA of buildings: The case of refurbishment vs. new construction", *Building and Environment*, vol. 160, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106203>
- PANNIER M.-L., RECHT T., ROBILLART M., PEUPORTIER B. & MORA L. (2020), « Élaboration de séquences de rénovation optimales pour un parc de bâtiments », Conférence IBPSA-France, Reims.
- PANNIER M.-L. (2017), *Étude de la quantification des incertitudes en analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers*, thèse de doctorat, École des mines de Paris.
- PEUPORTIER B. (2008a), *Éco-conception des bâtiments et des quartiers*, Presses de l'École des mines, 336 pages.
- PEUPORTIER B., NEUMANN U., DALENBACK J.-O., NESJE A., CSOKNYAI T. & BOONSTRA C. (2008b), "Training for renovated energy efficient social housing", Eurosun 2008 Conference, Lisbon.
- PEUPORTIER B. (2002), "Assessment and design of a renovation project using life cycle analysis and Green Building Tool", Sustainable Building 2002 Conference, Oslo.
- POLSTER B. (1995), *Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse de cycle de vie*, thèse de doctorat, École des mines de Paris.
- RIVALLAIN M., BAVEREL O. & PEUPORTIER B. (2012), "Genetic multi-criteria optimization for existing buildings holistic retrofit", International Symposium Life Cycle Assessment and Construction, Nantes.
- ROUX J.-J. & KUZNIK F. (2015), « Modélisation thermique du bâtiment », in *Énergétique des bâtiments et simulation thermique*, Eyrolles, 446 pages.
- SEEM J. E. (1987), *Modeling of Heat Transfer in Buildings*, thèse de doctorat, University of Wisconsin, Madison.
- WURTZ A. & PEUPORTIER B. (2020), « Application de l'analyse de cycle de vie à un échantillon de bâtiments pour l'aide à l'évaluation des projets », Conférence IBPSA-France, Reims.