



HAL
open science

L'apport des technologies en matière de simulation numérique

Bruno Peuportier, Patrick Schalbart

► **To cite this version:**

Bruno Peuportier, Patrick Schalbart. L'apport des technologies en matière de simulation numérique. Réalités industrielles. Annales des mines, 2022, 10.3917/rindu1.222.0062 . hal-03801483

HAL Id: hal-03801483

<https://hal.science/hal-03801483v1>

Submitted on 10 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'apport des technologies 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 pas 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.

The scale of the environmental impacts, and the associated external costs, make an energy and ecological transition necessary. This context makes it essential to thoroughly renovate the existing building stock. To massify this renovation, it is useful to seek solutions at lower cost, and to reassure investors by guaranteeing performance. It is also necessary to ensure that energy efficiency does not degrade other environmental criteria, nor the level of thermal comfort, because buildings must be resilient in the face of climate change. To meet these objectives, ecodesign tools based on numerical simulation can be applied to renovation projects.

Mots clés : bâtiment énergie simulation optimisation cycle de vie incertitudes

Keywords : building energy simulation optimisation life cycle uncertainties

La démarche d'écoconception consiste à prendre en compte les aspects environnementaux dans les processus de décision, et 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, 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, cet article montre quelques exemples d'application à l'étude de 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 le comportement thermique de bâtiments de manière réaliste, c'est-à-dire sur un pas de temps horaire et en considérant plusieurs espaces à 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, basées sur des fonctions de transfert (Seem, 1987) ou sur l'analyse modale (Bacot, 1984). Ceci a permis de réaliser des simulations annuelles de bâtiments complexes en un temps compatible avec la pratique des bureaux d'études et plusieurs outils, validés par

rapport à des mesures (Munaretto, 2017), ont alors été diffusés auprès des professionnels. Un modèle à pas de temps horaire a été introduit dans la réglementation en 2005, l'inertie thermique étant considérée de manière simplifiée.

La simulation énergétique a été étendue à l'évaluation des impacts environnementaux dans les années 1990, en appliquant l'analyse de cycle de vie (Kohler, 1994; Polster, 1995). Le principe consiste à évaluer les impacts depuis 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 sur la réhabilitation thermique des logements sociaux (Peuportier, 2008b) a permis la réalisation d'un site internet fournissant des ressources pédagogiques sur les méthodes (dont la simulation énergétique et l'analyse de cycle de vie), les technologies et des études de cas¹.

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 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 en considérant plusieurs variantes (par exemple structure bois ou béton, 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

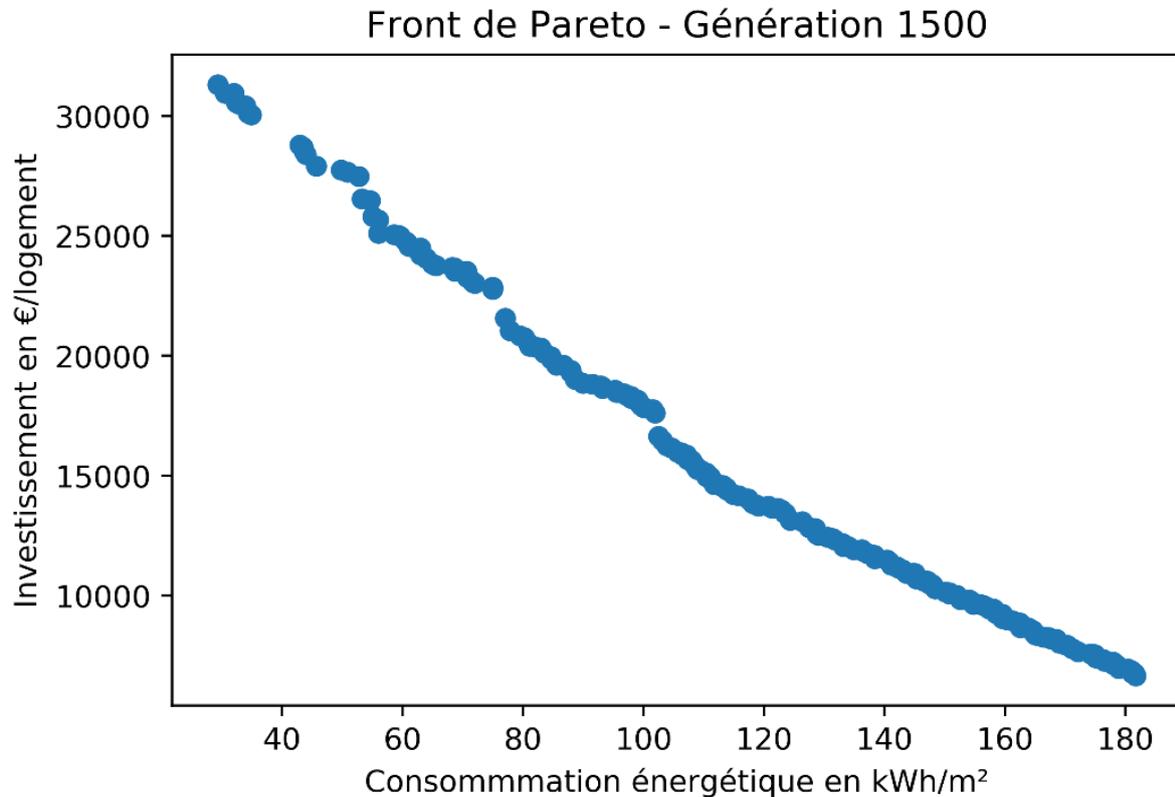
Par quoi faut-il commencer ?

L'ampleur de la tâche est immense : parmi les quelque 36 millions de logements et le milliard de m² de bâtiments tertiaires en France, peu sont énergétiquement performants. Si le budget d'un décideur n'est pas suffisant pour 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 d'établir des priorités. Il est communément admis qu'il convient de rénover en priorité les bâtiments les moins performants, si l'on fait abstraction de certains monuments historiques. Cette idée est confirmée par l'application d'une technique d'optimisation (Pannier, 2021), dans le cas d'un ensemble de logements sociaux situés à Montreuil (93) incluant plusieurs types de bâtiments (tours et barres de différents niveaux de performance). Différentes 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 est de maximiser l'économie d'énergie et de minimiser le coût des travaux, qui dans le cas étudié peuvent être étalés sur 5 ans, sous la contrainte d'une limite de budget annuel disponible.

En croisant le nombre de mesures d'amélioration possibles (enveloppe et équipements), le nombre de bâtiments, et l'ordre dans lequel les travaux sont effectués durant les 5 ans, on obtient de l'ordre de 10³⁹ combinaisons. Il n'est donc pas possible 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 pour chaque bâtiment (isolation, fenêtres, chauffage, ventilation) et par un deuxième chromosome définissant à quelle date sont effectués les différents travaux. De génération en génération, l'algorithme évalue les différentes solutions, sélectionne les meilleures puis les croise pour obtenir la génération suivante.

¹ <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/TREES/>

L'optimisation permet de visualiser sur un « front de Pareto » (cf. la figure 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.

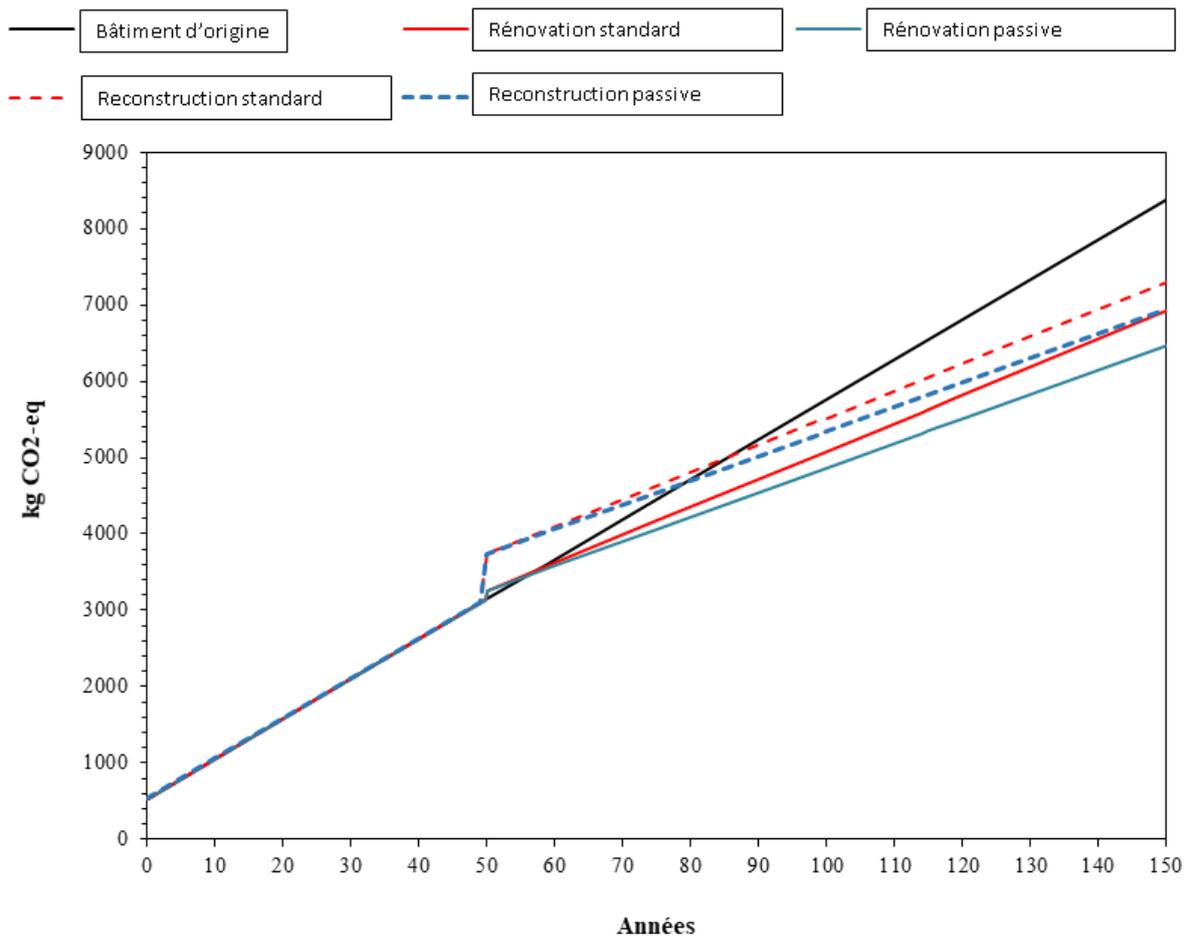


Coût des travaux et consommation de chauffage des solutions issues d'un algorithme génétique dans le cas d'un ensemble de logements sociaux situés à Montreuil (Pannier, 2020)

Il est alors possible, pour un budget donné, d'identifier la solution optimale située sur le front de Pareto. L'optimisation peut aussi bien entendu 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 sur l'épaisseur d'isolation thermique des murs : les premiers centimètres 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 ou reconstruire ?

La simulation numérique permet de comparer ces deux alternatives : le bâtiment le moins polluant est-il toujours celui qu'on ne construit pas, mais que l'on rénove ? 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 à l'étape d'utilisation. Pour étudier cette question, une comparaison a été effectuée entre construction neuve et réhabilitation en considérant des niveaux de performance standard et passif (Palacios-Munoz, 2019).

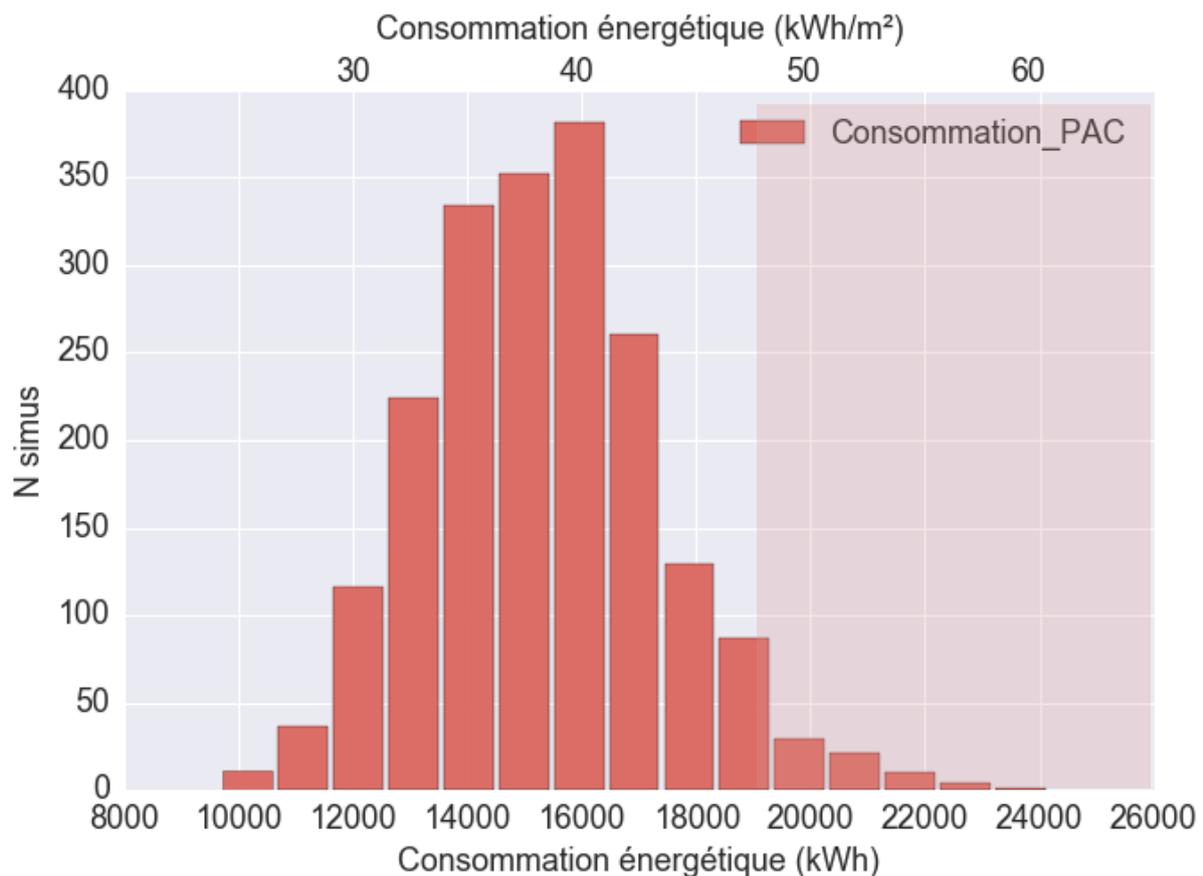


Emissions de gaz à effet de serre du bâtiment existant et de différentes variantes de rénovation ou de reconstruction au bout de 50 ans (Palacios-Munoz, 2019)

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 rénovés.

Peut-on garantir une performance ?

L'un des freins majeurs à la rénovation est lié au financement des projets, qui nécessitent des investissements importants. Etablir un contrat de performance énergétique a pour but de garantir une économie, permettant de récupérer les fonds dans la durée. L'entreprise en charge des travaux de rénovation s'engage contractuellement sur une performance, une pénalité étant prévue en cas de dépassement de consommation. 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 la consigne de température du chauffage). Des calculs d'incertitude sont alors menés dans le but de limiter le risque de dépassement et de pénalité induite (Ligier, 2018).

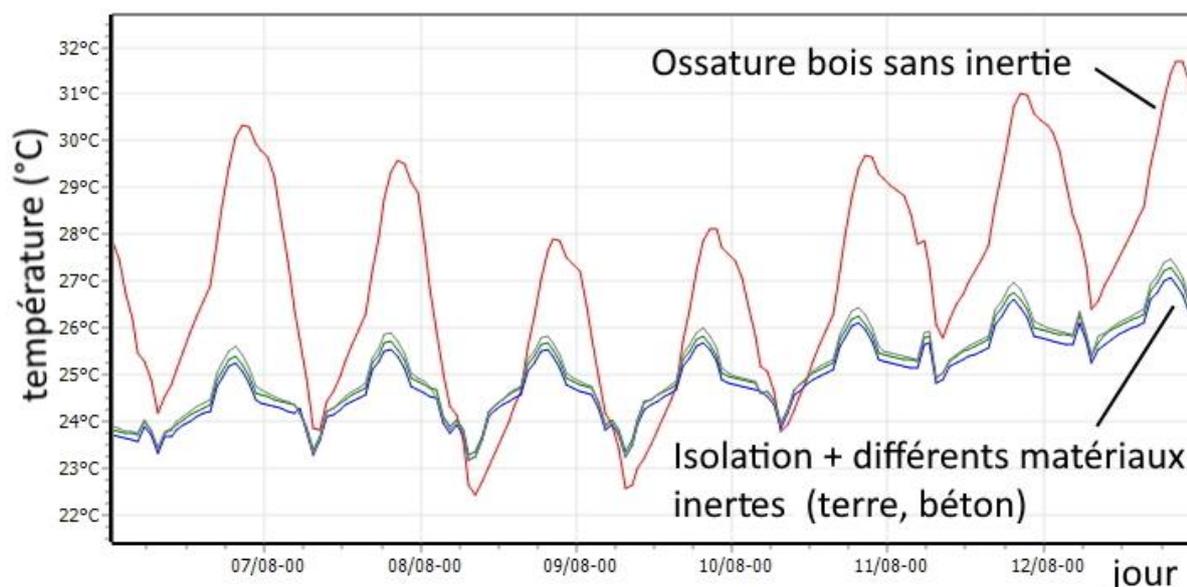


Distribution des consommations énergétiques obtenues par simulation après tirage au sort des paramètres incertains selon leur distribution de probabilités (Ligier, 2018)

A partir de la distribution montrée sur la figure précédente, il est possible de déduire le niveau de consommation correspondant à un risque acceptable de dépassement, par exemple ici de l'ordre de 18 800 kWh pour un risque de 5%. C'est alors ce niveau qui pourra être garanti, moyennant l'ajustement mentionné précédemment.

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

Une opinion largement répandue associe à l'isolation thermique un « effet thermos », qui rendrait les bâtiments invivables en été. Dans le cadre du projet Résilience bénéficiant du soutien de l'ADEME (appel « Vers des bâtiments responsables », Edition 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). Si les occupants peuvent ouvrir les fenêtres la nuit et s'ils ferment les stores durant les journées chaudes, la température est plus basse à l'intérieur qu'à l'extérieur et dans ce cas, l'isolation thermique protège de la chaleur. L'inertie thermique est essentielle pour atténuer les fluctuations de température et conserver la fraîcheur de la nuit. L'isolation à l'extérieur d'une paroi inerte est alors préférable et les maisons entièrement en bois, très légères, présentent un risque important de surchauffe que la simulation numérique permet d'estimer en fonction du climat, montrant l'intérêt d'associer plusieurs matériaux : la figure ci-dessous montre 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.



Profils de température sur une semaine de canicule obtenus par simulation en comparant plusieurs niveaux d'inertie thermique d'une maison individuelle (Résultats de l'outil Pleiades)

Existe-t-il des leviers d'action supplémentaires 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 neuve, 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'énergie renouvelable locale. Ainsi, l'installation de modules photovoltaïques sur des toitures bien exposées ou des ombrières de parkings peut 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.

Conclusions et perspectives

Les technologies de simulation numérique constituent une palette d'outils complémentaires : simulation thermo-aéraulique 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 dans une interface conviviale, en connexion également avec les maquettes numériques (BIM, « Building Information Model »), 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, architectes, entreprises de construction ainsi que dans l'enseignement, ces outils sont mobilisables pour massifier des rénovations 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 p.

- Dehause R. (1988), *Énergétique des bâtiments*, PYC Édition, 353 p.
- 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. and 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, Ecole des Mines de Paris
- Peuportier B. (2008a), *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*, Presses de l'Ecole des Mines, 336p
- Peuportier, B., Neumann, U., Dalenback, J.-O., Nesje, A., Csoknyai T. and 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, Ecole des Mines de Paris
- Rivallain M., Baverel O. and Peuportier B. (2012), Genetic multi-criteria optimization for existing buildings holistic retrofit, International Symposium Life Cycle Assessment and Construction, Nantes
- Roux J.-J. et Kuznik F. (2015), Modélisation thermique du bâtiment in *Energétique des bâtiments et simulation thermique*, Eyrolles, 446p
- 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