

---

# Aide à la conception de bâtiments maximisant la qualité de l'air intérieur et les performances environnementales

Micolier Alice<sup>1,3</sup>, Taillandier Franck<sup>1</sup>, Sonnemann Guido<sup>2</sup>, Ndiaye Amadou<sup>3</sup>, Bos Frédéric<sup>1</sup>, Perry Nicolas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France ([alice.micolier@u-bordeaux.fr](mailto:alice.micolier@u-bordeaux.fr))

<sup>2</sup> Univ. Bordeaux, ISM, UMR 5255, F-33400 Talence, France

<sup>3</sup> INRA Bordeaux, I2M, UMR 5295 F-33400 Talence, France

<sup>4</sup> ENSAM Bordeaux, I2M, UMR 5295 F-33400 Talence, France

---

**RÉSUMÉ.** La pollution dans les bâtiments provenant de sources internes est devenue un problème majeur de santé publique dans la mesure où nous passons en moyenne 80% de notre temps dans des espaces fermés et que c'est l'ensemble de la population qui est concernée. Apprendre à concevoir des bâtiments avec une bonne qualité de l'air intérieur est l'un des défis de demain. Dans ce contexte, cette étude a pour objectif de développer un outil d'aide à la décision qui puisse être utilisé dans la phase de conception d'un bâtiment résidentiel afin de guider les choix de la maîtrise d'œuvre pour assurer une meilleure qualité de l'air intérieur. Cela ne doit cependant pas se faire au détriment de la performance énergétique et environnementale du bâtiment. La méthodologie développée est basée sur l'intégration de différentes méthodes de modélisation (analyse de cycle de vie, modèle agent, simulation d'air intérieur, simulation thermique) afin de répondre à ces enjeux.

**ABSTRACT.** Building pollution from inside sources has been raised as a major public health issue since we spend on average 80% of our time in closed spaces. Study of how to design buildings with good indoor air quality is one of the tomorrow's challenges. In this context, the aim of this study is to develop a decision support tool that can be used in the early design phase of a residential building in order to guide the designer choices about a better indoor air quality. This should not be achieved at the expense of the energetic and environmental performance of the building. Thus, it becomes crucial to find a solution that allow to achieve these goals. The developed conceptual framework is based on the integrative approach of different modeling methods (life cycle analysis, agent based modeling, indoor air simulation, energetic simulation) in order to address these challenges.

**MOTS-CLÉS :** qualité de l'air intérieur, modèle multi-agents, analyse de cycle de vie, outil d'aide à la décision, consommations énergétiques

**KEY WORDS:** indoor air quality, agent-based modeling, life cycle analysis, supporting decision-making tool, energy use

---

---

## 1. Introduction

Le secteur de la construction représente plus de 40% de la consommation totale finale d'énergie en Europe [EU 12]. Des efforts considérables sont faits pour encourager la conception de bâtiments performants sur le plan énergétique ; ainsi, la prochaine réglementation thermique (RT2020) visera à la conception de bâtiment à énergie positive (BEPOS). Afin de réduire au maximum la dépense énergétique, les bâtiments nouvellement construits sont de plus en plus hermétiques au passage de l'air extérieur. Le renouvellement d'air est alors surtout géré via la ventilation mécanique contrôlée (VMC) limitant les échanges d'air entre l'extérieur et l'intérieur, sources de déperditions thermiques. Mais si cette pratique est intéressante thermiquement, la problématique de la qualité de l'air intérieur s'accroît : la concentration en polluants à l'intérieur des bâtiments, qui tend à être de plus en plus élevée, peut avoir des conséquences sur la santé des occupants. De nombreuses études montrent par exemple que le confinement dans de nombreuses écoles primaires françaises cause des problèmes de concentration aux élèves ou des maux de tête [KIR 05]. L'antagonisme existant entre l'objectif de limiter les consommations énergétiques et celui d'assurer une bonne qualité de l'air pose la question de savoir comment concevoir des bâtiments qui soient, tout à la fois, performant thermiquement tout en assurant une bonne qualité de l'air intérieur. Cette question est d'autant plus complexe qu'elle ne peut s'appréhender qu'en considérant l'occupant. Dans le cadre des bâtiments performants énergétiquement, le mode de vie des habitants et leur comportement sont des données qui ne peuvent plus être négligées. Les systèmes devenant de plus en plus efficaces, ce sont eux qui désormais impactent le plus les consommations énergétiques réelles [BON 14]. De même, la qualité d'air intérieur est fortement influencée par le comportement des habitants, de par leurs activités dans le bâtiment et par le processus d'aération, responsable d'échanges avec l'air extérieur.

Cet article présente une approche globale visant à développer un outil d'aide à la décision afin de guider les choix de conception vers une meilleure qualité de l'air intérieur sans dégrader les performances énergétiques et environnementales du bâtiment tout en considérant le comportement des occupants. L'étude se centrera sur le logement collectif, porteur de forts enjeux économiques et pour dans lequel l'occupant a un rôle majeur.

## 2. Les enjeux de l'outil

L'élaboration de l'outil d'aide à la décision souhaité, présuppose de se confronter aux enjeux que pose l'évaluation environnementale d'un bâtiment en phase de conception. Si la problématique de la performance énergétique est désormais bien traitée dans le bâtiment, les questions de durabilité et de respect de l'environnement sont souvent laissées de côté. Cela peut conduire à des risques de transfert d'impacts environnementaux ; diminuer l'énergie nécessaire au chauffage mais augmenter l'énergie grise du bâtiment en est un exemple courant. L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode qui répond à cette problématique grâce à sa capacité d'évaluer les impacts environnementaux globaux sur la période de vie complète du produit. Cela est particulièrement intéressant dans le cadre du secteur du bâtiment pour lequel les échelles de temps sont importantes.

Cependant, le recours à l'analyse de cycle de vie telle que pratiquée actuellement renvoie à trois verrous scientifiques. Le premier concerne la disponibilité des informations requises pour réaliser une ACV. En effet, ceci nécessite de renseigner beaucoup d'informations généralement disponibles qu'en fin de conception du bâtiment. Cependant, c'est dans les phases amont que sont prises les décisions (volumétrie, matériaux, etc.) qui auront le plus de répercussion sur l'impact environnemental du bâtiment. Un compromis est donc nécessaire entre disponibilité des informations et capacité à infléchir la conception. Pour répondre à ce besoin, l'outil proposé, destiné à la Maîtrise d'œuvre, sera utilisable dès la phase d'Avant-Projet Sommaire tel que recommandé par l'ADEME [ADE 14] : à cette phase, assez d'informations sont disponibles pour que les simulations thermiques et d'air intérieur aient du sens mais de nombreux choix impactant ces deux aspects restent à faire.

De plus, l'ACV actuelle échoue à prendre correctement en compte les effets de la pollution intérieure sur la santé humaine. Certains auteurs tels que Hellweg et al. [HEL 09] ont proposé des modèles permettant d'intégrer la pollution intérieure dans les ACV, mais en raison d'une absence importante de données, ces modèles sont encore très simplifiés et incomplets. Les émissions de particules en intérieur sont des phénomènes épisodiques et localisés. Lorsqu'il s'agit de bâtiments résidentiels, un niveau de détail élevé dans la modélisation est nécessaire afin de rendre compte de l'exposition humaine aux différentes sources de pollutions variables dans le temps et l'espace. Afin de surmonter ces limites, une modélisation spécifique de la toxicité de l'air intérieur adaptée au secteur résidentiel doit être élaborée.

Le troisième problème de l'ACV est la négligence de l'impact du comportement des occupants tant sur les consommations énergétiques que sur la pollution intérieure. Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle permettant

de considérer les données dynamiques utiles à la production de l'inventaire. Dans les outils de simulation actuels, la modélisation du comportement se limite à des profils d'occupation. L'enjeu est donc de construire un modèle basé sur une représentation plus détaillée de l'occupant permettant d'intégrer les mécanismes cognitifs, réactifs et délibératifs des êtres humains.

Enfin, une importante source de complexité dans le processus de conception d'un bâtiment provient de la multiplicité des acteurs qui y participent avec chacun leur spécialité, leurs outils, leurs enjeux et leur vision du bâtiment. Le Building Information Modeling (BIM), en permettant aux différentes parties prenantes du projet de travailler sur le même support, répond à cet enjeu. C'est pourquoi la maquette numérique sera l'élément central de ce modèle, apportant toutes les informations nécessaires concernant le bâtiment sous forme de fichiers IFC.

### 3. Description de l'approche

#### 3.1. Structuration de l'outil

L'outil que nous proposons est structuré autour de différents modèles (Fig. 1) : simulation d'air intérieur, simulation thermique, simulation multi-agents ainsi que des modèles cognitifs de comportement, de confort et d'utilisation des appareils électriques. Afin d'évaluer les impacts environnementaux du bâtiment tel qu'envisagé dans la phase conception, il est nécessaire de produire les données d'inventaire ainsi que de déterminer les facteurs de caractérisation. C'est pourquoi des outils de simulation captant les flux dynamiques des consommations énergétiques et d'émission de polluants fourniront des données pour mettre en œuvre la méthodologie d'analyse de cycle de vie.

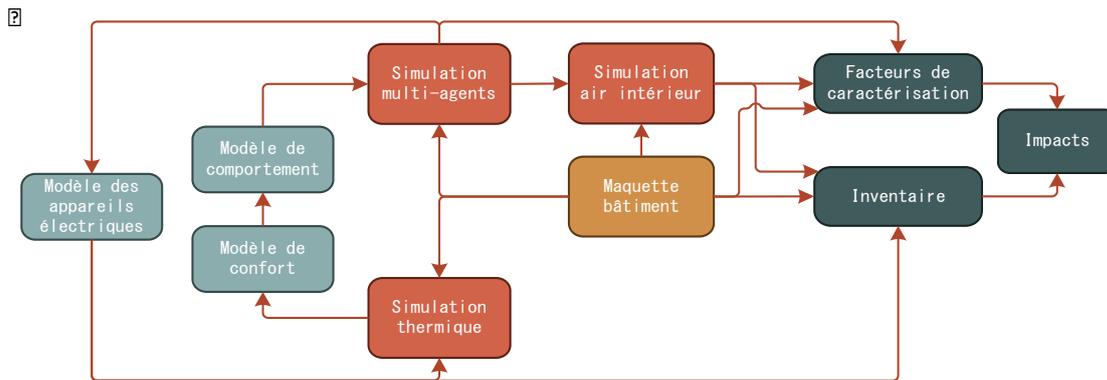


Figure 1. Architecture de l'outil

#### 3.2 Modèle Agent

La modélisation multi-agents est utilisée pour représenter explicitement le comportement humain en simulant les actions réalisées par les habitants au sein du bâtiment qui impactent la qualité de l'air intérieur ainsi que les consommations énergétiques. Certaines sont le produit d'une activité (tabagisme, appareils électroniques, ménage, cuisson) et d'autres, d'un comportement (présence, consigne chauffage et climatisation, utilisation des volets et stores, éclairage artificiel, ouverture des fenêtres et portes, habillement). La modélisation multi-agents permet aussi la prise en compte des interactions avec les autres agents (occupants ou voisins), d'évènements incertains (changement du prix de l'électricité, etc.), du comportement vis-à-vis des dépenses énergétiques et du développement de la conscience écologique (suite à des campagnes de sensibilisation, bouche à oreille, etc.). En offrant d'importantes possibilités, de la flexibilité et un niveau de modélisation fin, l'approche multi-agents représente une solution de plus en plus utilisée pour modéliser le comportement des occupants d'un bâtiment dans le cadre de simulations énergétiques. Elle a été notamment choisie par Amouroux et al. [AMO 13] afin de quantifier l'impact du comportement humain sur la consommation des appareils électriques.

L'outil reposera sur le modèle Li-BIM permettant de simuler le comportement des occupants d'un logement. Li-BIM, développé sous la plateforme GAMA [TAI 12], est un modèle multi-agents intégrant la représentation BIM du bâtiment. Il permet d'importer une maquette numérique réalisée avec des logiciels de BIM classiques afin que la géométrie du bâtiment et tous ses composants soient directement implémentés en tant qu'agents. Le modèle cognitif des occupants est basé sur une architecture de type BDI (Belief-Desire-Intention) permettant à l'agent de s'adapter à son environnement, aux interactions avec les autres, et à ses besoins et objectifs.

### 3.3 Modèle thermique

Les consommations énergétiques à l'échelle du logement peuvent être obtenues à partir de la puissance de fonctionnement de chaque appareil utilisé (chaudière, appareils électriques, etc.) et du comportement des occupants (via le modèle Li-BIM). La présence des occupants et leur utilisation des équipements peuvent générer des gains de chaleur ; par ailleurs les gains d'apport solaire et les échanges thermiques seront déterminés à partir de code de simulation thermique dynamique. La maquette BIM permettra de fournir toutes les informations nécessaires quant à la description du bâtiment (propriétés des matériaux, volumétrie, etc.) ; elle sera complétée par des bases de données météorologiques. Le modèle thermique permettra ainsi de connaître les températures et pourcentage d'humidité à l'intérieur du bâtiment ainsi que les consommations énergétiques.

### 3.4 Modèle d'air intérieur

Le modèle agent ainsi que la maquette BIM contenant toutes les données sur les matériaux utilisés permettront de modéliser les différentes sources de polluants (liées aux matériaux et aux actions des occupants), et ainsi d'obtenir la nature des polluants émis et leur quantité afin de produire l'inventaire de l'ACV. La simulation d'air intérieur permettra quant à elle de décrire le devenir des polluants en prenant en compte les différents phénomènes de transport mis en jeu (resuspension, dépôt, filtration, ventilation, etc.), nécessaire au calcul des facteurs de caractérisation. Le couplage entre la présence d'occupants et ces facteurs de caractérisation permettra d'évaluer leur impact sur la santé humaine.

### 3.5 Modèle de confort

Les actions des occupants et leur bien être seront liés à leur sentiment de confort. Li-BIM sera ainsi complété par un modèle de confort. Il permettra de remplir la base de croyance de l'individu. Les occupants pourront donc s'adapter en fonction de leur ressentis en termes de chaleur et d'inconfort face aux odeurs, courants d'air, etc. La plage de confort thermique [DEA 98] sera établie grâce aux données de températures intérieures et de pourcentage d'humidité simulées à l'aide du modèle thermique et le PMV (Predicted Mean Vote) permettra de déterminer les règles régissant le comportement des occupants.

## 4. Conclusion

Cet article présente la méthodologie utilisée pour la construction d'un outil de comparaison des impacts du cycle de vie de différents scénarios de construction en prenant en compte la qualité de l'air intérieur et le comportement des occupants avec une grande finesse. L'outil passera par la combinaison d'un modèle agent, du BIM, d'un modèle cognitif de haut niveau (architecture BDI), de simulateurs physique (thermique et qualité de l'air) et de l'ACV. Cela permettra le calcul des données dynamiques de l'inventaire ainsi que l'évaluation d'impacts liés directement aux activités et au mode de vie des occupants au sein du bâtiment.

L'outil est aujourd'hui en construction et les différents éléments qui le composent sont en phase de développement et implémentation. Mais il devra permettre d'aider la maîtrise d'œuvre dans les choix de conception pour des bâtiments plus sains et plus durables.

## 5. Bibliographie

- [ADE 14] ADEME, Analyse de cycle de vie des bâtiments en conception : Témoignage et propositions de la communauté francilienne d'expérimentation, 2014.
- [AMO 13] AMOUROUX É., HURAUX T., SEMPE F., SABOURET N., HARADJI Y., Simulating human activities to investigate household energy consumption. *Proceedings of the 5th Int.l Conf. on Agents and AI*, vol. 12, 2013, p. 71–80.
- [BON 14] BONTE M., THELLIER F., LARTIGUE B., Impact of occupant's actions on energy building performance and thermal sensation. *Energy and Buildings*, vol 76, 2014, p. 219–227.
- [DEA 98] DE DEAR R., BRAGER G., *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*, 1998.
- [EU 12] Household energy consumption by end-use in the EU-27 – 29.11.2012 <www.eea.europa.eu>
- [HEL 09] HELLWEG S., DEMOU E., BRUZZI R., MEIJER A., ET AL., Integrating Human Indoor Air Pollutant Exposure within Life Cycle Impact Assessment. *Environmental Science & Technology*, vol. 43(6), 2009, p.1670–1679.
- [KIR 05] KIRCHNER S., Impact de la ventilation dans les écoles sur la santé respiratoire, futures études de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur, 2005.
- [TAI 12] TAILLANDIER P., VO D., AMOUROUX E., DROGOU A., GAMA: A simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2012, p.242–258.