

## Application de l'analyse de cycle de vie à un échantillon de bâtiments pour l'aide à l'évaluation des projets

Aurore Wurtz\*<sup>1</sup>, Bruno Peuportier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mines ParisTech, Université de Recherche PSL  
CES – Centre d'efficacité énergétique des systèmes,  
60 Bd St Michel 75006 Paris, France  
\*aurore.wurtz@mines-paristech.fr

---

### RESUME.

*L'analyse de cycle de vie (ACV) va jouer un rôle clé pour répondre aux enjeux environnementaux actuels, il est indispensable de disposer d'outils fiables et faciles d'accès. Cette communication propose une aide à l'évaluation des projets par la méthode de l'ACV, en élaborant un référentiel de performance pour plusieurs indicateurs environnementaux. Sur le principe des étiquettes énergétiques existantes, différents niveaux d'impacts environnementaux sont répertoriés et classés sur une échelle de A à G. L'étude est effectuée sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments, et se base sur des échantillons pour trois types de bâtiments : logements individuels, collectifs et bâtiments de bureaux. Les résultats se présentent sous forme d'étiquettes environnementales pour douze indicateurs environnementaux tels que l'énergie primaire, les émissions de CO2 et les impacts sur la santé et la biodiversité.*

**MOTS-CLÉS :** Analyse de cycle de vie (ACV), Simulation Thermique Dynamique (STD), étiquettes environnementales

---

### ABSTRACT.

*Life cycle assessment (LCA) plays a key role in resolving the current environmental challenges, it is important to have reliable tools allowing an easy interpretation of the results. This paper presents a project evaluation support based upon the LCA methodology, by creating benchmarks for several environmental indicators. Different levels of environmental impacts are classified on a scale ranging from A to G, on the basis of existing energy labels. The study is carrying out the whole building life cycle, and is based on three samples of buildings: individual and collective housing, and office buildings. The results present environmental labels for several indicators, such as primary energy, CO2 emissions or impacts on health and biodiversity.*

**KEYWORDS:** Life cycle assessment (LCA), Building Energy Simulation (BES), environmental labels

---

## 1. INTRODUCTION

Le bâtiment est le secteur économique représentant la plus grande part de la consommation d'énergie finale en France. Selon la Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, la France a pour objectif de réduire de 40 % ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à ses émissions de 1990 et de 20% sa consommation d'énergie finale, par rapport à celle prévue en 2020. Le secteur du bâtiment est responsable de près de 20% des émissions de CO<sub>2</sub> en France ; la filière a pour objectif de réduire de 49% ses émissions en 2030 par rapport à 2015, et vise une décarbonation complète du secteur à l'horizon 2050. Diminuer la consommation énergétique des bâtiments et augmenter leur performance environnementale devient alors indispensable.

Les actuelles décisions de construction déterminent les impacts environnementaux des prochaines décennies, du fait de la longue durée de vie des bâtiments. Cette communication propose des références d'ACV pour trois types de bâtiments ; des logements individuels, collectifs et des bâtiments de bureaux, dans le but de divulguer des ordres de grandeur afin d'aider les concepteurs à évaluer la performance environnementale de leur projet.

Des valeurs extrêmes d'indicateurs environnementaux sont tout d'abord calculées pour chaque échantillon, correspondant à la meilleure performance environnementale (par exemple un bâtiment à énergie positive), et à la pire (par exemple un bâtiment Haussmannien ou un HLM non isolés) que l'on peut trouver dans chaque échantillon. Des performances environnementales sont ensuite déterminées par la réalisation de nombreuses simulations faisant varier certains paramètres du bâtiment. Ces simulations sont lancées par l'intermédiaire d'un programme python couplé aux modèles de simulation thermique dynamique (STD) et d'ACV du logiciel Pléiades, avec la base de données ecoinvent 3.4.

Les résultats se présentent sous la forme d'étiquettes environnementales, présentant des références allant des classes A à G. Elles sont établies pour chaque indicateur environnemental étudié, et prennent en compte la totalité du cycle de vie du bâtiment.

## 2. DEFINITIONS ET CADRE DE L'ETUDE

### 2.1. LES OBJECTIFS DE L'ACV

L'analyse de cycle de vie est une méthode qui permet d'évaluer les impacts environnementaux des matériaux, systèmes et procédés en prenant en compte les substances émises et extraites de l'environnement, sur la totalité du cycle de vie. Ainsi pour le cas du bâtiment, on prendra en considération tous les flux, depuis l'extraction des matières premières pour la fabrication des matériaux, jusqu'à la démolition du bâtiment et le traitement des déchets, en passant par le transport des matériaux, la construction du bâtiment, son utilisation (étape d'occupation) et sa rénovation.

L'un des objectifs d'une ACV est de déterminer l'étape du cycle de vie qui génère le plus d'impact, afin que les concepteurs puissent adapter leur projet en connaissant les enjeux. Cette méthode permet ainsi de ne pas « déplacer la pollution » d'une étape de cycle de vie à l'autre ou d'un indicateur à l'autre. En effet, la réduction d'un impact environnemental peut en augmenter un autre, et le même processus peut s'appliquer entre les différentes étapes du cycle de vie, ou entre des lieux différents

(par exemple la voiture électrique réduit les impacts en ville mais les augmente dans les centrales électriques).

L'unité fonctionnelle et le cadre de l'étude doivent être définis préalablement ; l'unité fonctionnelle comprend la fonction principale du système étudié, la quantité de référence, le niveau de performance et la durée de vie du système. Par exemple une possibilité de description de l'unité fonctionnelle des logements individuels serait : une maison individuelle de 90 m<sup>2</sup> pour 4 habitants durant 100 ans avec un niveau de confort fixé. Le cadre de l'étude comprend toutes les unités fonctionnelles, la description ainsi que les limites du système, les hypothèses et le type d'impacts ainsi que la méthodologie choisie pour l'étude.

## 2.2. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les valeurs des indicateurs environnementaux sont basées sur l'inventaire des émissions et extractions, dans une base de données choisie. La base de données ecoinvent 3.4 a été utilisée dans cette étude, et les indicateurs environnementaux suivants sont issus d'un séminaire associant des spécialistes internationaux de l'ACV: demande d'énergie cumulative, émissions de gaz à effet de serre, eau utilisée, déchets produits, déchets radioactifs, dommages sur la santé humaine, dommages sur la biodiversité, épuisement des ressources abiotiques, occupation des sols, acidification, eutrophisation, production d'ozone photochimique.

## 2.3. LES OUTILS NUMERIQUES

### 2.3.1. Généralités

L'étude a été effectuée intégralement sur le logiciel Pléiades. Cet outil de simulation énergétique est destiné à l'éco-conception et à l'optimisation énergétique du bâtiment. Afin de répondre à ces objectifs, le logiciel est composé de 6 modules : Une bibliothèque qui fournit des données sur les matériaux et autres produits de construction, un modéleur graphique, un éditeur qui permet de lancer des STD, un outil BIM pour l'import de maquettes numériques, un module ACV et enfin les résultats des simulations. L'organisation des modules de Pléiades est présentée sur la figure 1.

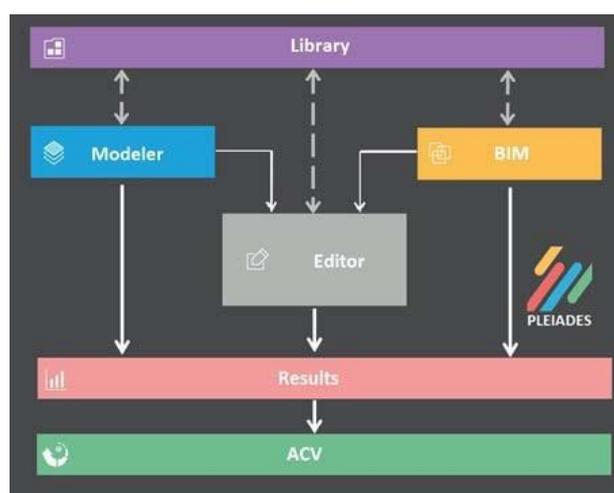


Figure 1 : Organisation des outils du logiciel Pléiades, source : Izuba

### 2.3.2. L'interface Amapola

Amapola est un module complémentaire du logiciel Pléiades qui ajoute une dimension statistique à la simulation en proposant une garantie de performance énergétique, une modélisation stochastique de l'occupation des bâtiments et un outil d'optimisation. Ce dernier a été utilisé dans ces travaux afin de créer de nombreuses variantes en modifiant certaines composantes du bâtiment, comme le type et l'épaisseur des matériaux ou le type et la taille des vitrages.

## 3. METHODOLOGIE

### 3.1. CONTEXTE

Ce travail est mené dans le cadre de l'annexe 72 du programme Energie dans les Bâtiments et les Collectivités, porté par l'Agence Internationale de l'Energie. Les objectifs de ce projet sont l'établissement d'une méthodologie commune pour l'ACV et la création de références environnementales pour différents types de bâtiments dans le but de divulguer des outils d'aide à la décision à destination des concepteurs. Les bases de données utilisées sont propres aux différentes régions ou pays, mais les mêmes cas d'étude sont proposés afin de permettre une comparaison internationale des différents outils et travaux de recherche effectués.

### 3.2. DESCRIPTION DE LA METHODE

#### 3.2.1. Création des labels A et G

Trois types de bâtiments ont été choisis pour mener à bien cette étude, les logements individuels, collectifs et les bâtiments de bureaux. Des bâtiments existants ont été sélectionnés pour représenter le meilleur et le pire des cas de chaque échantillon. Ainsi les bâtiments choisis pour établir le label A ont un maximum d'isolation, du double ou triple vitrage, des panneaux photovoltaïques et sont considérés être situés à Nice. A l'inverse, les bâtiments choisis pour définir le label G ont peu d'isolation, que du simple vitrage et sont considérés comme situés à Trappes. Ils sont référencés dans le tableau 1.

|         | Logements individuels           | Logements collectifs   | Bâtiments de bureaux                            |
|---------|---------------------------------|--|---|
| Label A | Maison à énergie positive, 2018 | Immeuble résidentiel, 2016                                     | Bureaux à haute performance énergétique, 2015   |
| Label G | Maison non isolée, 1950         | Bâtiment Haussmannien non rénové, 1880<br>HLM non rénové, 1960 | Variante dégradée, sans isolation ni système PV |

Tableau 1 : Présentation des bâtiments choisis pour établir les références environnementales

Dans un premier temps plusieurs variantes d'ACV de ces bâtiments ont été effectuées, pour créer les labels extrêmes, A et G. Pour un même bâtiment, on a comparé les variantes suivantes :

- Structure du bâtiment (béton, bois ou pierre, selon les bâtiments)
- Moyen de production de chauffage (pompe à chaleur, convecteur électrique, gaz ou bois)
- Présence ou non de panneaux photovoltaïques pour le label A

Suite à ces simulations, on définit les labels A et G pour chaque indicateur environnemental ; la valeur déterminant le label A correspond au plus faible impact obtenu entre toutes les simulations du

même échantillon, et le label G au plus grand impact environnemental. Ainsi, les labels obtenus ne correspondent pas à une seule simulation, ils proviennent de différentes variantes selon les indicateurs environnementaux.

### 3.2.2. Création des labels intermédiaires

Une fois les labels A et G déterminés, les étiquettes environnementales sont créées à l'aide d'une variation paramétrique couplée à l'ACV. Certains paramètres sont modifiés afin d'étendre l'échantillon à différents besoins de chauffage et matériaux de construction notamment. Les simulations fournissent en sortie une série d'impacts environnementaux pour chaque échantillon de bâtiments.

Cette variation paramétrique est effectuée à l'aide d'un programme python combiné avec l'interface Amapola ; dans un premier temps les paramètres à modifier sont indiqués sur Amapola, un fichier présentant toutes les variantes à calculer est alors créé. A partir de ce fichier les simulations STD et ACV sont lancées pour toutes les variantes et les résultats sont stockés séparément. Une fois tous les impacts environnementaux obtenus, on garde ceux des étapes de construction, rénovation et de fin de vie, tandis que les besoins de chauffage, résultats des STD, sont repris dans le script python afin de calculer l'impact environnemental correspondant à l'étape d'utilisation des différentes variantes avec le mix choisi. Les impacts de toutes les étapes sont ensuite regroupés et analysés de manière à obtenir les sorties souhaitées.

Enfin, on remarquera que pour effectuer des centaines de simulations, grâce à l'utilisation des applications du logiciel Pléiades, il est possible de lancer seulement une simulation thermique dynamique et une analyse de cycle de vie par l'interface. Les autres sont ensuite lancées automatiquement par le script Python, avec l'aide d'Amapola.

### 3.3. HYPOTHESES COMMUNES POUR L'ACV

L'ACV complète d'un bâtiment devient rapidement très complexe car on pourrait prendre en compte le transport des occupants, les déchets ménagers, le mobilier etc. Dans ce projet, on choisit de ne pas prendre en compte ces paramètres car ils ne font pas partie du bâti, dont on cherche à évaluer les performances. On prend cependant en compte les éléments de plomberie et les appareils électriques du bâtiment sous la forme d'un ratio par surface habitable. On ajoute également l'impact des fondations en utilisant un ratio par surface d'emprise au sol.

L'ACV nécessite également des hypothèses communes de durée de vie des matériaux ; on supposera une durée de vie de 30 ans pour les portes et fenêtres, 20 ans pour les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation, 10 ans pour les revêtements et une durée de vie égale à celle du bâtiment, soit 100 ans, pour les autres matériaux. On fixe également la consommation d'eau chaude sanitaire des différents bâtiments, l'efficacité des systèmes et la composition du mix électrique. Les consommations d'électricité de base ont été calculées à partir d'un mix moyen récent et les consommations de chauffage ont été déterminées quant à elles à l'aide d'un mix moyen correspondant à une analyse conséquentielle dynamique (Roux, 2016). Enfin, le cuivre et l'acier galvanisé sont supposés être recyclés en fin de vie, le béton est recyclé sous forme de graviers concassés, le bois et les plastiques tels que le polystyrène sont incinérés, tandis que le reste des éléments est considéré être mis en décharge lors de la fin de vie du bâtiment. Le recyclage est modélisé en considérant 50% des

impacts évités (par rapport à la fabrication à neuf) en fabrication et 50% en fin de vie, de manière à valoriser l'usage de matériaux recyclés mais aussi la conception de bâtiments facilement démontables.

## 4. RESULTATS ET ANALYSE

### 4.1. ELABORATION DES LABELS A ET G

Les valeurs du label G de l'échantillon des logements collectifs ont été déterminées à partir de la comparaison de neuf simulations différentes ; les impacts de trois types de chauffage (électrique, gaz ou bois) ont été calculés pour deux bâtiments : un HLM et un bâtiment Haussmannien. Le type de structure (béton ou bois) du HLM a également été modifié. Le label A est étudié en parallèle sur l'immeuble résidentiel construit en 2016 avec 12 simulations (variation de la structure, du moyen de production de chauffage, et de la présence ou non de panneaux photovoltaïques). Ces variations sont également effectuées sur les deux autres échantillons de bâtiments, on obtient alors les labels A et G.

| Impact environnemental  | Logements collectifs |          | Logements individuels |          | Bâtiments de bureaux |          |
|---|----------------------|----------|-----------------------|----------|----------------------|----------|
|   | Label A              | Label G  | Label A               | Label G  | Label A              | Label G  |
| Effet de serre (kgCO <sub>2</sub> eq.)                                  | 1,46E-02             | 1,60E-01 | 1,48E-02              | 3,64E-01 | 1,39E+02             | 2,50E+03 |
| Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq.)                                  | 1,88E-01             | 1,46E+00 | 1,99E-01              | 3,25E+00 | 3,28E+03             | 2,31E+04 |
| Demande d'énergie cumulative (GJ)                                       | 7,92E-01             | 4,80E+00 | 1,02E-01              | 9,98E+00 | -1,48E+04            | 6,33E+04 |
| Eau utilisée (m <sup>3</sup> )  | 3,10E+00             | 3,70E+00 | 2,96E+00              | 5,11E+00 | 2,01E+03             | 1,79E+04 |
| Déchets produits (t)  | 1,54E-02             | 5,63E-02 | 1,51E-02              | 1,11E-01 | 2,62E+02             | 8,37E+02 |
| Eutrophisation (kg PO <sub>4</sub> eq.)                                 | 4,94E-02             | 9,45E-02 | 5,19E-02              | 1,58E-01 | 5,39E+02             | 1,45E+03 |
| Production d'ozone photochimique (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.) | 5,18E-02             | 7,10E-01 | 5,76E-02              | 1,82E+00 | 7,12E+02             | 1,17E+04 |
| Production de déchets radioactifs (dm <sup>3</sup> )                    | 2,47E-03             | 1,36E-02 | -1,03E-03             | 2,65E-02 | -8,07E+01            | 1,59E+02 |
| Occupation des sols (m <sup>2</sup> .year)                              | 7,52E-01             | 4,26E+01 | 1,03E+00              | 1,13E+02 | 2,04E+04             | 7,17E+05 |
| Epuisement des ressources abiotiques (kg Sb eq.)                        | 8,64E-03             | 1,55E-02 | 9,10E-03              | 9,12E-03 | 3,80E+02             | 4,02E+02 |
| Domage à la biodiversité (PDF.m <sup>2</sup> .year)                     | 1,10E+01             | 6,23E+01 | 1,23E+01              | 1,35E+02 | 1,54E+05             | 9,46E+05 |
| Domage à la santé (DALYs)   | 1,36E-04             | 4,32E-04 | 1,43E-04              | 9,57E-04 | 1,78E+00             | 6,55E+00 |

Figure 2 : Labels A et G déterminés pour les trois types de bâtiments (impact/m<sup>2</sup><sub>SHAB/an</sub>)

### 4.2. PRESENTATION DES ETIQUETTES ENVIRONNEMENTALES

Afin de créer chaque étiquette environnementale, de nombreuses simulations ont été lancées. Selon les variantes, on a pu faire varier l'épaisseur de l'isolation, le type de fenêtres ou la performance énergétique des portes.

#### 4.2.1. Logements individuels

Dans le cas des maisons individuelles, le calcul du label G est fait sur la base d'une maison Phénix située en Ile-de-France. Cette dernière a une faible performance énergétique, on va alors s'en servir pour créer les labels intermédiaires, en améliorant progressivement la performance de la maison. Les variantes effectuées sur cette maison sont les suivantes :

|                    | Cas de base             | Variation                         |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Isolation des murs | 2 cm                    | 2, 5, 10, 15, 20 et 25 cm         |
| Isolation du toit  | 4 cm                    | 1, 4, 10, 15, 20, 25 et 30 cm     |
| Type de fenêtre    | Fenêtres simple vitrage | Fenêtres double et triple vitrage |
| Porte extérieure   | Bois                    | Porte en bois très isolée         |

Tableau 2 : Description des variantes choisies pour la création des étiquettes environnementales

Cette variation paramétrique correspond à plus de 700 variantes qui sont générées par le script python décrit au paragraphe 3.2.2. Les étiquettes environnementales des douze indicateurs environnementaux

sont alors créées, et à titre d'illustration les émissions de CO<sub>2</sub>, l'eau utilisée et les déchets radioactifs produits lors du cycle de vie des logements individuels sont présentées en figure 3 par m<sup>2</sup> de surface habitable (SHAB) et par an.

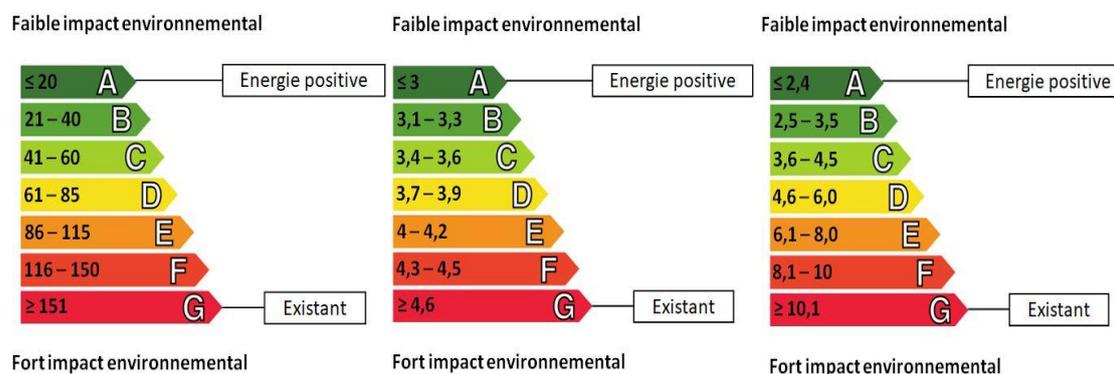


Figure 3 : Etiquette environnementale des maisons individuelles pour les émissions de CO<sub>2</sub> (à gauche) en kg/m<sup>2</sup>/an, l'eau utilisée (au milieu) en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>SHAB</sub>/an, les déchets radioactifs (à droite) en cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>SHAB</sub>/an

#### 4.2.2. Logements collectifs

Trois bâtiments sont considérés pour calculer les références de l'échantillon des logements collectifs. Le type de fenêtre varie entre le simple vitrage et le double vitrage basse émissivité. L'épaisseur de l'isolation des murs extérieurs, des planchers et plafonds varie de 0 cm à 20 ou 30 cm selon les cas, avec un pas de 5 cm. Les résultats montrent que dans cet échantillon, l'émission de CO<sub>2</sub> varie entre 13 et 110 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup>SHAB/an. On montre ici les étiquettes environnementales pour l'émission de CO<sub>2</sub> et les dommages à la biodiversité générés par les logements collectifs.

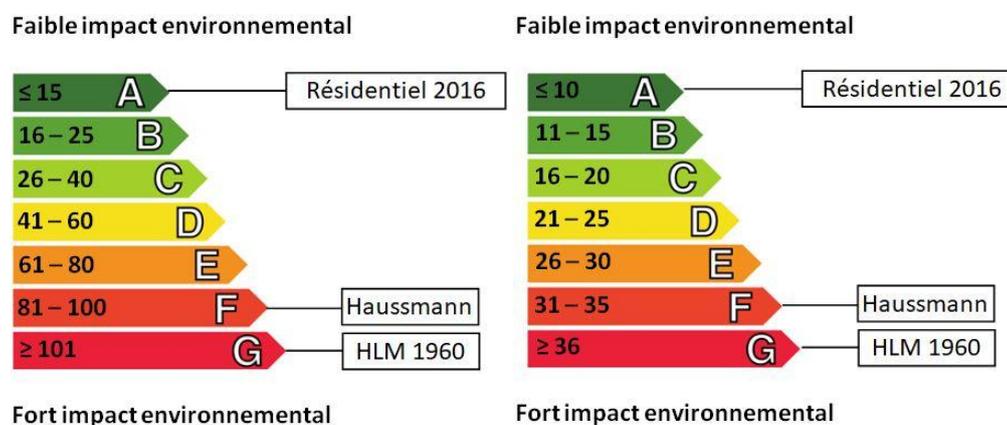


Figure 4 : Etiquettes environnementales des logements collectifs pour les émissions de CO<sub>2</sub> (à gauche) en kg/m<sup>2</sup><sub>SHAB</sub>/an, et pour les dommages à la biodiversité (à droite) en PDF.m<sup>2</sup>.an/m<sup>2</sup><sub>SHAB</sub>/an

#### 4.2.3. Bâtiments de bureaux

Sur le même principe que les deux échantillons de bâtiments présentés dans les paragraphes précédents, les impacts environnementaux des bâtiments de bureaux sont calculés. Les simulations sont faites sur un bâtiment existant, et les émissions de CO<sub>2</sub> obtenues varient entre 10 et 100 kg de CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup><sub>SU</sub>/an (surface utile). Les étiquettes de cet indicateur environnemental ainsi que de la demande d'énergie cumulative sont présentées sur la figure 5.

