

L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) D'UN BATIMENT DURABLE PAR L'ETUDE DU SYSTEME D'ISOLATION THERMIQUE : CAS D'UN BATIMENT DE BUREAUX DANS LA VILLE DE BISKRA, ALGERIE

THE LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF A SUSTAINABLE BUILDING BY THE STUDY OF THE SYSTEM OF THERMAL INSULATION: CASE OF A BUILDING OF OFFICES IN THE CITY OF BISKRA, ALGERIA

AZZEDINE DAKHIA, NOUREDDINE ZEMMOURI

Département d'Architecture, Université Mohamed Khider, Biskra.

RESUME

La présente étude traite du cas d'un bâtiment de bureaux, situé dans la ville de Biskra (Algérie), caractérisée par un climat chaud et sec. Elle utilise la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) qui se déroule selon un protocole normalisé (normes ISO 14000 et 14040), favorisant une meilleure compréhension de l'incidence environnementale. Cette dernière constitue une stratégie d'une politique internationale de protection de l'environnement et d'économie d'énergie.

Ce travail est particulièrement dédié à l'évaluation de l'empreinte environnementale associée aux divers matériaux de construction et des assemblages entrant dans les systèmes de bâtiment tels que : murs extérieurs, cloisons intérieures, planchers intermédiaires et planchers terrasses, menuiserie, etc. Il s'appuie sur les bases de données Eco-Invent et sur le logiciel nova-EQUER qui est chaîné aux applications de la simulation thermique dynamique (STD) du bâtiment par les logiciels Pleiades et Comfie. L'objectif est de fournir une aide à la décision pour la conception du bâtiment public, et de minimiser les impacts sur l'environnement sans réduire le niveau de confort de ce dernier. Aussi, il est question de mettre en évidence l'influence significative du système d'isolation thermique, comme un choix technique parmi d'autres (matériaux, systèmes constructifs, choix architectural, isolation, système de ventilation, chauffage, climatisation etc.....) sur les consommations énergétiques dans un bâtiment situé dans les régions arides à climat chaud et sec.

MOTS CLES: Bâtiment durable, Analyse du cycle de vie, Développement durable, Impacts environnementaux, Optimisation énergétique, système d'isolation thermique, régions semi-arides.

ABSTRACT

This study deals with the case of an office building located in the city of Biskra (Algeria) that is characterized by a hot and arid climate. The life cycle assessment (LCA) is used as a research method according to a normalized protocol (standards ISO 14000 and 14040) and promotes a better understanding of the environmental impact. This latter constitutes a strategy of an environmental protection and energy saving international politics.

This research work aims specifically the evaluation of the environmental footprint associated with the diverse building materials and the various construction assemblies including external walls, internal partitions, intermediate floors and roof terraces, carpentry, etc. This approach is a means to this end because it allows the impartial comparison of materials and assemblies, over the course of their entire lives, based on quantifiable indicators of environmental impact. This investigation is based on Eco-Invent databases and on the nova-Equer software that are linked to the building dynamic thermal simulation (DST) applications by means of Pleiades and Comfie softwares. Life cycle assessment clarifies the environmental trade-offs associated with choosing one material over another and, as a result, provides an effective basis for comparing alternate designs for this building. Its objective is to supply a decision-making support for public buildings design, and to minimize their environmental impacts without reducing their internal comfort level. Hence, it reveals the significant influence of the thermal insulation system, as a technical choice among others (materials, constructive systems, architectural choice, insulation, system of ventilation, heating, cooling, air conditioning etc..) on the energy consumption in a building situated in a region with a hot arid climate.

KEYWORDS: Sustainable building, Life cycle assessment, Sustainable development, environmental Impacts, energy

optimization, thermal system insulation, semi-arid regions.

ملخص

تتناول هذه الدراسة حالة مبنى اداري (مكاتب) يقع في مدينة بسكرة (الجزائر) التي تتسم بمناخ حار وجاف. يعتمد العمل على منهجية تحليل دورة الحياة التي تجري وفق بروتوكول تطبيق معايير موحدة (المعيار ايزو 14000 / 14040) الذي يسمح بفهم افضل للبيئة. ويشكل هذا الاخير استراتيجية ضمن سياسة دولية لحماية و الحفاظ على البيئة و توفير الطاقة. ان هذا العمل موجه خصيصا لتقييم الاثر البيئي المرتبط بمختلف مواد البناء التي تشكل نظم انشاء المباني مثل: الجدران الداخلية, الجدران الخارجية, الاسقف المتوسطة و العلوية للسطح و كذا التلبيس و النجارة الخ...

و البرنامج يستند الى قواعد البيانات Eco-Invent وبرنامج المحاكاة Nova-Equer الذي يرتبط مع تطبيقات المحاكاة الحرارية الدينامكية للمبنى بواسطة برنامج Comfie-Pleiades. و الهدف من ذلك هو تقديم دعم لصنع القرار لتصميم المباني العامة, و التقليل الى ادنى حد من الاثار المترتبة على البيئة دون تخفيض مستوى الراحة للمبنى.

ذلك لتسليط الضوء على تأثير بعض الخيارات التقنية, نظام العزل الحراري, مواد البناء و النظام الانشائي, الطابع المعماري, العزل و نظام التهوية, نظام التدفئة و التكييف, الخ... والتقليل من استهلاك الطاقة للمبنى المتواجد في المناطق شبه الجافة.

الكلمات المفتاحية: المبنى المستدام, نظام العزل الحراري, تحليل دورة الحياة, التنمية المستدامة, الاثار البيئية, تحسين نظام الطاقة, المناطق شبه الجافة.

1 INTRODUCTION

Le bâtiment s'impose du fait qu'il soit le secteur le plus consommateur d'énergie, dans le monde, dépassant ainsi les 45% de la consommation totale d'énergie, et avec 50% du total des ressources naturelles exploitées (ADEME, 2015). Il participe à une importante émission de polluants ; aussi bien dans l'air (30% du total des émissions de CO₂, gaz à effet de serre), que dans l'eau (un quart des rejets eutrophisants) avec plus de 40% des déchets de produits (Thiers, 2008). Les enjeux capitaux sont donc de réduire les consommations d'énergie dans ce secteur crucial, ainsi que la diminution des multiples impacts de la construction sur l'environnement.

Il est donc important d'une part, d'améliorer la performance énergétique des bâtiments, et d'autre part, de disposer d'outils multicritères, suffisamment fiables, permettant de mettre en évidence les sources des impacts environnementaux (effet de serre, eutrophisation, consommation d'eau...), d'un bâtiment durant tout son cycle de vie ; impacts issus dès sa construction, durant son utilisation, et sa rénovation jusqu'à la fin de sa vie (la démolition), ainsi que de les évaluer.

La réduction des besoins en énergie dans le bâtiment s'opère essentiellement par une bonne isolation et une étanchéité très performante permettant d'atteindre l'objectif de bâtiment à basse énergie BBC.

De plus, augmenter la performance thermique d'un bâtiment implique à la fois une multiplication de composants de son enveloppe qui devient un élément à considérer en priorité dans la réduction des impacts environnementaux.

Le présent travail s'inscrit dans cette ligne de conduite, permettant de concevoir des parois de bâtiments performantes, efficaces et respectueuses des économies d'énergies et de l'environnement.

Notre approche multicritère s'applique par une analyse de cycle de vie ACV, réalisée sur un bâtiment de bureaux, en

l'occurrence le Siège de l'Agence Foncière Urbaine de Biskra, et ayant comme objectifs : i) définir quelle phase de vie de ce bâtiment et quels éléments doivent être particulièrement pris en considération, et ii) durant quelle phase il serait important d'agir afin de réduire l'impact que ces éléments ont sur l'environnement.

Aussi, un autre objectif, est de mener une évaluation quantitative précise des impacts environnementaux de ce bâtiment tout le long de son cycle de vie, et dans le contexte des zones semi-arides à climat chaud et sec, permettant ainsi aux acteurs dans le secteur du bâtiment de faire le choix le plus cohérent (de systèmes constructifs et de matériaux de construction, d'équipements, etc...) par rapport à leurs objectifs, en veillant sur l'équilibre entre performances énergétiques à atteindre et performances environnementales à justifier.

2 L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE COMME APPROCHE

L'Analyse de Cycle de Vie d'un produit est principalement associée à des objectifs de certification, de diagnostic de l'existant, d'évaluation d'une situation existante et figée. À l'inverse, l'analyse de cycle de vie des bâtiments est orientée vers des objectifs d'évolution d'un système, d'analyse de politique publique d'habitat, de bâtiments tertiaire et/ou de bureaux etc..., d'aide à la décision et d'évaluation de l'empreinte environnementale (Joliet et al, 2010). La présente étude cherche à dégager des résultats à partir d'une analyse de cycle de vie comparative entre plusieurs configurations de murs extérieurs. Ces derniers composent l'enveloppe d'un bâtiment récemment réalisé avec des matériaux classiquement utilisés dans ce type de constructions publiques. Cette analyse permettra : i) d'évaluer et de quantifier toutes les consommations d'énergie en fonction de leurs diverses sources (climatisation, chauffage, ventilation et éclairage, etc...), ii) parvenir à une optimisation énergétique qui déterminera ainsi tous les impacts environnementaux engendrés tout au long du cycle de vie du bâtiment, et donc iii) évaluer le

degré d'adaptation climatique et environnementale du bâtiment par rapport au contexte climatique chaud et sec.

3 MÉTHODOLOGIE

L'analyse du cycle de vie d'un bâtiment rassemble les 04 phases suivantes : fabrication, transformation, utilisation et destruction (démolition) (Belengini, 2006).

Cette méthode repose sur une démarche en 4 étapes (Fig. 1):

1. La définition des objectifs et du champ de l'étude.
2. L'analyse de l'inventaire.
3. L'évaluation de l'impact.
4. L'interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs initiaux.

Ensuite, les résultats de cette analyse du cycle de vie sont exploités en dégagant des orientations vers des propositions d'amélioration, planification stratégique, politique publique, marketing, etc.

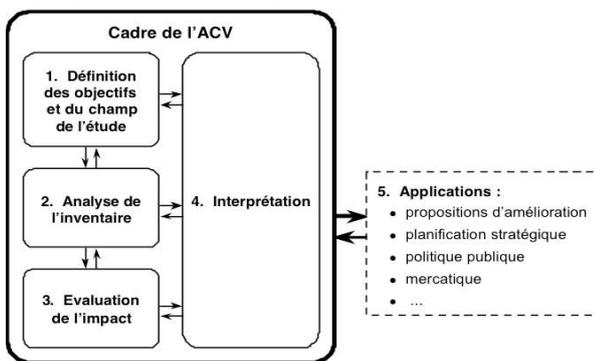


Figure01: Cadre d'une analyse du cycle de vie (ISO 14040-44)

4 CAS D'ETUDE

A Biskra, où se situe le bâtiment étudié, les températures maximales sont enregistrées (données climatiques de la ville enregistrées par la station météo de Biskra en 2017), au cours de la période estivale en Juillet et atteignent 45,2°C, tandis que les températures minimales moyennes sont relevées au cours de la période hivernale où 2,2°C est le minimum enregistré en Janvier.

Le Siège de l'Agence Foncière Locale de la Wilaya de Biskra est un bâtiment neuf réalisé en 2012.

Ce bâtiment a été réalisé suite à un concours d'Architecture ayant comme objectif de : concevoir un bâtiment modèle : i) respectant les principes du développement durable notamment en termes de qualité environnementale et de consommation d'énergie, ii) présentant un langage architectural multiple avec l'utilisation d'un standard de systèmes et techniques constructives (structure en béton, maçonnerie extérieure en briques de terre cuite, enduits , bois , céramiques, plâtres, etc.), et iii) conservant les éléments architectoniques de la région d'une part, et

l'intégration d'autres éléments modernes (baie vitrée et des murs rideaux) d'autre part.

Notre bâtiment est de 03 niveaux, avec une hauteur totale de 14.00m. Il occupe une emprise au sol de 1200m², avec une surface totale bâtie de 360m², et une hauteur de plancher 4.00 m. Il est à souligner que les façades du bâtiment (Sud-ouest ...) ne sont pas respectueuses des orientations recommandées pour une architecture dans une région aride à climat chaud et sec (Konya A., 1984) ni sont équipées de protections solaires optimales.

Le bâtiment est construit avec un système de poteaux poutres en Béton Armé (système traditionnel), et une enveloppe très diversifiée dont les composantes sont (figure 02, Bâtiment cas d'étude):

- Paroi mono-mur de 15cm en briques creuses de terre cuite.
- Paroi double 30cm en briques creuses de terre cuite avec lame d'air de 5cm.
- Élément Moucharabieh en bois rouge.
- Paroi complètement vitrée 'mur rideau'.



Figure 02: Bâtiment; Siège de l'Agence Foncière de Biskra, cas d'étude. Source: Auteur 2017

L'isolation thermique réalisée dans ce bâtiment est très élémentaire relativement aux développements connus dans le secteur du bâtiment durant ces dernières décennies. Elles se limitent aux parois opaques et au type d'isolation conventionnelle, de type répartie (paroi double avec une lame d'air de 05 cm). Pour le reste des éléments de l'enveloppe extérieure (baies diverses), aucune isolation n'a été effectuée.

5 SIMULATION

Nous proposons une analyse de cycle de vie ACV d'un bâtiment de bureaux à Biskra caractérisée par un climat chaud et sec. Nous avons utilisé le logiciel de simulation du comportement thermique en régime dynamique STD 'Comfie-Pleiades' (version 3.6.9.0, 2016) qui sont chaînés

au logiciel de l'étude de l'empreinte environnementale tout au long du cycle de vie du bâtiment, nova-Equer, (version 1.6.9.0, 2016).

5.1 Outils de simulation

Dans notre étude, on utilise trois outils de simulation, dont chacun a son propre rôle dans le protocole expérimental.

En entrée de la simulation nous avons introduit la description géométrique et thermo-physique du bâtiment par le logiciel Alcyone, ainsi que ses masques proches. On définit, alors les zones thermiques du bâtiment, zones dont le comportement thermique devrait être équivalent (Popovici 2008).

Ensuite et à partir de données sur les matériaux de construction, les scénarios d'occupation et la situation météorologique, on calcule les besoins en chauffage et en climatisation du bâtiment pour une période donnée (jusqu'à un an) par le logiciel la simulation thermique dynamique Comfie-Pleiades.

Enfin, on utilise le logiciel Nova-Equer pour l'évaluation de la qualité environnementale du bâtiment. Les besoins de chauffage et de climatisation calculés par le logiciel Comfie sont exportés vers Nova-Equer. Des données d'entrées supplémentaires doivent être fournies au logiciel pour effectuer l'analyse de cycle de vie, telles que le mix énergétique de l'électricité consommée, la possibilité ou non de recycler les déchets ménagers, le type de transport utilisé par les usagers, etc...

5.2 Protocole de la simulation

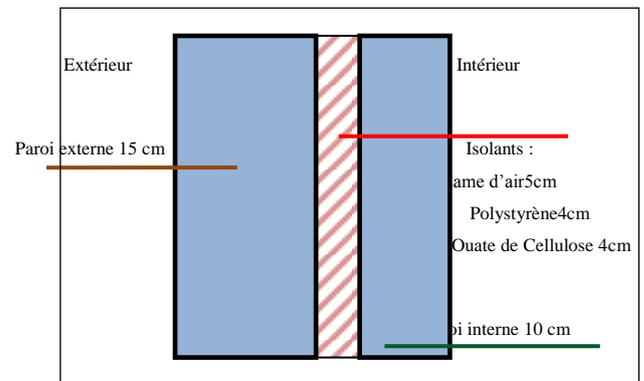
Nous avons modélisé un bâtiment de bureaux, et nous avons identifié les matériaux isolants les plus performants entrants dans la composition de son enveloppe, ainsi que nous avons apporté des réponses à la meilleure technique de mise en œuvre de l'isolation de l'enveloppe de ce bâtiment.

Nos premiers critères de choix d'un isolant sont d'ordre écologique : i) matières premières renouvelables et recyclables, ii) peu d'énergie grise et d'émissions de CO₂ pour leur fabrication, et iii) faible impact sur la qualité de l'air intérieur et la santé humaine. Les performances des isolants sont mesurées classiquement par le lambda ou la conductivité thermique (aptitude à transmettre la chaleur). Pendant la saison chaude, où les murs doivent contribuer à éviter les surchauffes, on s'intéressera plus particulièrement à la capacité thermique ou au déphasage des isolants, qui leur permet d'emmagasiner la chaleur pour la restituer avec un certain déphasage.

Dans la première simulation, nous avons intervenu au niveau de la nature et du type d'isolant utilisé pour les murs de l'enveloppe du bâtiment (lame d'air, polystyrène, Ouate de cellulose). Nous avons obtenu des résultats de l'étude thermique et de l'analyse environnementale, nous avons fait une comparaison des différentes configurations, et

donc nous validons l'isolant parmi ceux étudiés dans cette première phase du travail (figure3).

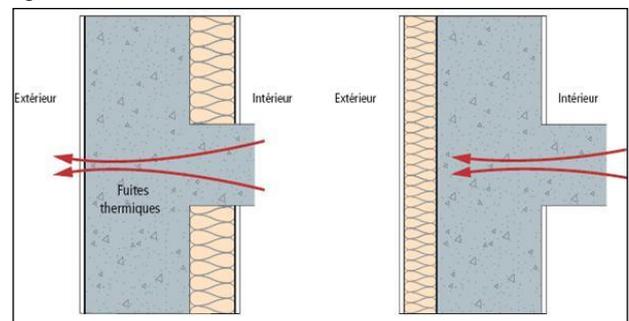
Suite à cela, il sera question que nous vérifions :i) la technique de mise en œuvre de l'isolation qui déterminera les niveaux de qualités thermiques du bâtiment à atteindre, ii) les optimisations énergétiques, ainsi que iii) les impacts environnementaux engendrés.



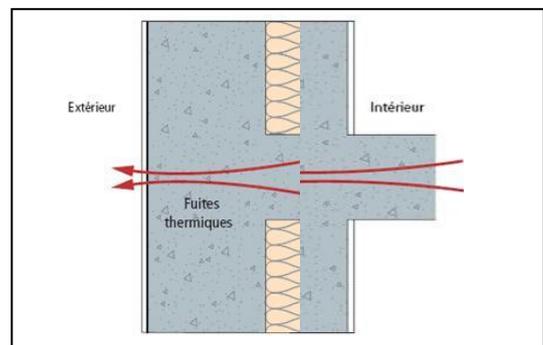
Isolation Conventiennelle.

Figure 03: Configurations des murs extérieurs. Source Auteur 2017

Donc, la seconde simulation, nous avons intervenu sur le type d'isolation de l'enveloppe du bâtiment (isolation répartie, isolation par l'intérieur, ou par l'extérieur) tout en préservant l'utilisation des mêmes matériaux isolants (figure4).



1. Isolation par l'Intérieur 2. Isolation par l'Extérieur



3. Isolation répartie

Figure 04: Type d'isolation des murs extérieurs. Source Auteur 2017

Nous comparons ensuite les performances du bâtiment, après cette simulation, à deux références ; l'une correspond au standard constructif actuel, et l'autre aux meilleures pratiques constructives reconnues par les spécialistes du domaine. Ainsi, nous définissons trois variantes:

- La variante Standard respectant les niveaux d'exigences réglementaires en construction neuve.
- La variante Base correspondant aux choix techniques et architecturaux retenus pour ce

bâtiment.

- La variante Meilleures Pratiques correspondant aux techniques existantes les plus performantes (généralisation de la ventilation double flux, sur-isolation, traitement des ponts thermiques).

Nous allons ensuite faire une classification basée sur les résultats de cette simulation en matière de performance énergétique et d'impact environnemental (Tableau1).

Tableau 01: Les indicateurs environnementaux évalués.
Source: Auteur 2017

Indicateur Environnemental	Unité
Demande cumulative d'énergie	G
Eau utilisée	m ³
Epuisement des ressources abiotiques	kg antimoine ^e q.
Déchets produits	T
Déchets radioactifs	dm ³
Effet de serre (à 80 ans)	t CO ₂ eq.
Acidification	kg SO ₂ eq.
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq
Dommage à la qualité des écosystèmes dus à l'écotoxicité	PDF*m ² *an Potentially Disappeared Fraction*m ² *an
Dommage à la santé	DALY Disability Adjusted Life loss Years

5.3 L'objet de la simulation

En entrée de la simulation, nous avons introduit la description géométrique du bâtiment par le logiciel Alcyone, définissant ainsi toutes les données du bâtiment (sa géométrie, ses matériaux,...) et les données du site (orientation, voisinage, environnement,) ainsi que les données météo de la ville de Biskra 'météo normes' (version7.1.0.0, 2016).

Pour cette simulation, on définit une unité fonctionnelle égale à 1.00 m² de surface d'un bureau paysagé ayant les dimensions : 10m x 5m et une hauteur s/plafond de 3.80m, soit donc une surface habitable de 47.70 m² (figure5).

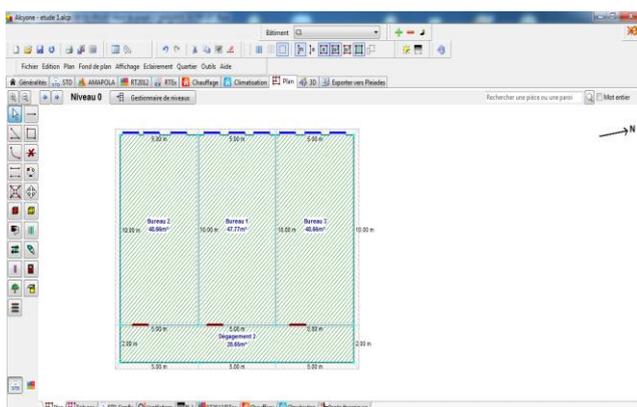


Figure 05: Saisie graphique du bureau à simuler par Alcyone.

Source: Auteur 2017

Le bureau est situé au premier (1er) étage du bâtiment considéré, avec des mitoyennetés des deux côtés et une orientation Sud-ouest, et sans aucune protection solaire

envisagée. Le bureau à simuler n'a que la surface en façade qui est en contact direct avec l'extérieur.

On décompose l'unité fonctionnelle étudiée, d'un système constructif en plusieurs sous systèmes tels que les éléments de la structure en béton armé, les matériaux composant l'enveloppe (les murs extérieurs), les cloisons intérieures, les revêtements, enduits et peintures, les planchers intermédiaires et planchers terrasses, la menuiserie et le type de vitrage (simple, double ou triple vitrage), ainsi que les éléments de l'aménagement extérieur (espace d'eau, végétation,...) qui influent sur le bilan énergétique et par la suite sur les impacts engendrés.

5.3.1 Premier niveau d'analyse : Type 'd'isolant'

En premier lieu, notre intervention consiste que nous modifions d'abord l'isolant au niveau de l'enveloppe du bâtiment sans pour autant changer la composition initiale des murs (paroi extérieure 15cm/isolant/paroi intérieure de10cm). On introduit deux autres isolants, en raison de leurs remarquables caractéristiques thermiques et environnementales. Il s'agit donc du Polystyrène expansé de 04cm et la Ouate de Cellulose de 04cm d'épaisseur.

En somme, nous avons trois variantes pour la simulation de l'isolant (figure3) :

Variante initiale1: Paroi dite 'traditionnelle 'composée de matériaux couramment utilisés : paroi extérieure 15cm/ lame d'air 5cm/paroi intérieure 10cm (avec une isolation conventionnelle).

Variante02: la même paroi avec isolation légère (polystyrène expansé de 4cm).

Variante 03: la même paroi avec isolation plus importante (Ouate de cellulose de 4cm).

La Ouate de cellulose présente (AFNOR, 2015): i) une meilleure conductivité thermique(λ) 0.042 W/m.K, ii) une chaleur spécifique 1900kJ/kg.K et surtout iii) un temps de déphasage très intéressant de 12h (Tab.2). Issu du recyclage de papiers et cartons, la Ouate de cellulose, matériau

écologique, présente un bilan environnemental positif. Elle favorise un excellent confort d'été, avec une quantité très réduite de l'énergie grise utilisée 50kwh/m³, sans aucun effet de serre et surtout par son traitement en fin de vie (recyclable dans sa totalité, à 100%) (Tab.3).

Tableau 02 : Caractéristiques Techniques des isolants:

Source AFNOR, 2015

Caractéristiques Isolant	Caractéristiques Techniques et Isolantes du matériau					
	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Densité (kg/m ³)	Résistance à la diffusion vapeur d'eau Sd (m)	Chaleur spécifique (kJ/kg.K)	Temps de Déphasage Heure	Capacité hygrosopique
Lame d'air de 5cm	0.026	1	0	1000	03	Non
Polystyrène expansé de 4cm	0.032	10	20	1450	04	Non
Ouate de Cellulose de 4cm	0.042	23	2	1900	12	Moyenne

5.3.2 Deuxième niveau d'analyse : Type 'd'isolation'

Dans cette étape du travail, nous allons définir le meilleur des systèmes d'isolations de l'enveloppe du bâtiment par rapport à leurs performances énergétiques et environnementales.

Finalement, nous distinguons les trois variantes pour la simulation de l'isolation (figures 3 et 4) :

- Variante initiale1 : Paroi dite 'traditionnelle' où l'isolant est placé entre les deux murs de l'enveloppe en façade (paroi extérieure 15cm/ isolant /paroi intérieure 10cm). L'épaisseur de cet isolant variera en fonction de sa nature.
- Variante02 : l'isolation par l'intérieur où l'isolant est placé adjacent à l'espace étudié.
- Variante03 :l'isolation par l'extérieur où l'isolant est placé en contact direct avec l'air extérieur.

5.4 Les conditions de simulations.

Le milieu naturel de l'environnement physique à simuler étant la ville de Biskra (Algérie), on considère que la Température de confort est comprise entre 19 et 25°C. Par ailleurs, on définit les principales conditions de la simulation énergétique communes à toutes les configurations (types d'isolants et d'isolations), comme suit :

Consigne de températures de 20°C constante.

Scénario de Ventilation= normale et sur-ventilation l'été.

Scénario de Chauffage = 20°C le jour, avec un arrêt la nuit.

Scénario de Climatisation =25°C, avec un arrêt la nuit.

Scenarion de la puissance dissipée : 4100 W

Occupation des espaces est de : la plage horaire 100% de 07h à 17.00h avec une pose de 12.00h à 13.00h la semaine ouvrable, et 00% le reste du temps.

Les apports internes sont de : 40 Wh/m².

Apport énergie : 12 à 14 W/m².

Apport des Occupants sont de : (hiver) 83 à (été) 132Wh/personne.

Apport des équipements : PC de 110 à 160W, Imprimante laser 150- 250 et

Imprimante jet d'encre 20- 60 – et Photocopieuse 1000 W.

D'un autre côté, les données nécessaires à l'analyse de cycle de vie du bâtiment sont structurées en cinq 5 thèmes principaux : i) les matériaux de construction, ii) l'énergie, iii) l'eau, iv) les déchets, et v) le transport des usagers.

Et en ce qui concerne l'étude environnementale ACV du bâtiment, on définit les conditions de simulation de ce bâtiment, comme suit:

Durée d'analyse du bâtiment est de 80ans.

Durée de vie des équipements est de 20 ans.

Durée de vie de la menuiserie est de 30 ans.

Durée de vie des revêtements est de 10 ans.

Un système de chauffage à gaz de ville est considéré.

Un système de Climatisation électrique à air est considéré.

Les éléments de l'enveloppe et les planchers du bâtiment sont paramétrés par les bases des logiciels de simulation thermiques Pléiades-Comfie, et environnementales Nova Equer.

6 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

déterminé leurs bilans environnementaux respectifs (Tab3).

Par rapport aux caractéristiques thermiques, techniques et isolantes des matériaux utilisés (Tab.2), nous avons

Tableau 03: Caractéristiques Environnementales des isolants
Source AFNOR, 2015

Caractéristiques Isolant	Bilan environnemental				
	Énergie grise (utilisée) (kWh/m3)	Effet de serre (kgCO2/UF)	Traitement en fin de vie	Confort d'Été Obtenu	Nature de l'isolant
Lame d'air de 05cm	/	/	/	6/20	/
Polystyrène Expandé de 04cm	450	10	Mise en Décharge 100%	9/20	Synthétique
Ouate de Cellulose de 04cm	50	-10	Recyclable 100%	18/20	Issu du Recyclage

Les résultats (Tab.4) de cette simulation thermique dynamique STD nous ont permis de définir l'ensemble des besoins en énergie (énergie pour le chauffage, la

climatisation, et l'éclairage, et l'eau utilisée,..) pour assurer le niveau de confort, quel que soit la composition du mur étudié.

Tableau 04 : Besoins en Energie des compositions du mur :
Source Auteur 2017

Variantes Besoins d'Energie		Isolation Répartie			Isolation par l'Extérieur		Isolation par l'Intérieur	
		V1 /Lame d'air	V2 /Polystyrène	V3 /Ouate Cellulose	V4 /Polystyrène	V5 /Ouate Cellulose	V6 /Polystyrène	V7 /Ouate Cellulose
Energie Chauffage	Kwh	10 082,00	888,00	881,00	9 327,00	8 694,00	9 344,00	8 628,00
Energie Chauffage / m ²	Kwh / m ²	19,00	9,00	9,00	18,00	17,00	18,00	17,00
Energie Climatisation	Kwh	30 772,00	20 350,00	20 169,00	29 567,00	28 774,00	29 384,00	28 851,00
Energie Climatisation /m ²	Kwh / m ²	59,00	213,00	211,00	57,00	55,00	56,00	55,00

Après avoir comparé les résultats(Tab.5), nous avons classé les différentes alternatives de compositions du mur selon nos constats des remarquables écarts des besoins en énergie.

Par rapport au critère thermique, et quel que soit la variante

étudiée, nous avons opté pour l'utilisation de la Ouate de cellulose dans la composition du mur extérieur, car cette dernière présente les plus faibles valeurs de besoins en énergie relativement aux autres matériaux isolants. Nous classons, alors, le Polystyrène dans le deuxième rang suivi de la lame d'air (Tab.5).

Tableau 05 : Classement des variantes des murs par rapport au critère thermique / Besoins en Energie
Source Auteur 2017

Variantes Classement par Besoins d'Energie		Isolation Répartie			Isolation par l'Extérieur		Isolation par l'Intérieur	
		V1 /Lame d'air	V2 /Polystyrène	V3 /Ouate Cellulose	V4 /Polystyrène	V5 /Ouate Cellulose	V6 /Polystyrène	V7 /Ouate Cellulose
Energie Chauffage		3	2	1	2	1	2	1
Energie Climatisation		3	2	1	2	1	2	1
Classement par Besoins Energie		3	2	1	2	1	2	1

Suite aux résultats de cette approche de cycle de vie ACV de notre bâtiment étudié (Tab6), nous confirmons que

l'empreinte environnementale est résultante du taux de consommations énergétiques et du degré des performances

thermiques. On déduit par conséquent que l'optimisation énergétique du bâtiment dépend de ses performances thermiques, et donc une forte relation entre : ' Performances énergétiques à atteindre et performances environnementales à justifier '.

Nous avons fait une évaluation comparative de l'empreinte environnementale des trois matières isolantes, et nous avons confirmé que ces éléments sont plus ou moins impactant.

Tableau 06 : Impacts Environnementaux des compositions du mur.
Source Auteur 2017

Variante Impact Environnemental	Isolation Répartie			Isolation par l'Extérieur		Isolation par l'Intérieur	
	V1 / Lame d'air	V2 /Polystyrène	V3 /Ouate Cellulose	V4 /Polystyrène	V5 /Ouate Cellulose	V6 /Polystyrène	V7 /Ouate Cellulose
Effet de serre (t CO2 eq.)	797,21	753,98	751,46	586,65	533,69	755,70	747,99
Acidification (kg SO2 eq.)	2 619,51	2 486,56	2 515,38	2 324,18	2 125,00	2 492,59	2 504,99
Demande cumulative d'énergie (GJ)	17 920,88	16 927,74	16 980,94	21 585,12	19 808,80	16 955,46	16 880,20
Eau utilisée (m³)	35 821,18	35 133,86	35 379,54	37 519,84	35 975,52	35 162,42	35 319,37
Déchets inertes produits (t)	476,58	470,60	471,93	453,43	447,21	470,85	471,46
Epuisement ressources abiotiques (kg E-15)	6,22	5,88	5,93	9,93	8,56	5,88	5,89
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	854,80	843,15	844,98	820,81	2 104,83	843,66	844,06
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	1 390,97	1 324,13	1 331,02	1 173,57	1 074,94	1 327,00	1 325,74
Ecotoxicité aquatique (m³)	14 916 261,98	14 066 767,68	14 308 094,30	13 908 914,16	12 312 913,35	14 105 868,40	14 241 240,52
Déchets radioactifs (dm³)	23,18	22,03	22,43	44,35	38,26	22,04	22,28
Toxicité humaine (kg)	3 413,08	3 249,66	3 283,02	3 007,39	2 771,97	3 257,05	3 270,15
Odeur (m³ air)	8 570,37	8 060,43	7 894,46	4 845,60	4 378,50	8 077,86	7 852,38

Nous constatons aussi que les résultats obtenus du (Tab 6) révèlent que le 'mur base de Ouate de Cellulose' impacte moins l'environnement que 'le mur base Polystyrène expansé' ou celui du mur conventionnel avec une lame d'air, quel que soit l'indicateur considéré, et ce relevé dans

des proportions.

D'après les résultats des impacts environnementaux (Tab 7a, 7b, et7c) durant le cycle de vie du bâtiment, nous avons affirmé que la phase d'utilisation est celle dont l'impact est le plus élevé.

Tableau 07a : Impacts Environnementaux par phase du cycle de vie: Source Auteur 2017.

Mur isolé avec Polystyrène expansé
a1 :Mur avec l'isolation répartie avec Polystyrène expansé

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	80,29	672,86	-0,96	1,80	753,98
Acidification (kg SO2 eq.)	332,54	2 133,01	0,48	20,54	2 486,56
Demande cumulative d'énergie (GJ)	979,87	15 903,85	14,63	29,39	16 927,74
Eau utilisée (m³)	550,30	34 568,14	1,64	13,78	35 133,86
Déchets inertes produits (t)	25,08	95,31	0,08	350,12	470,60
Epuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0,27	5,59	0	0,01	5,88
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	37,77	802,09	0,08	3,21	843,15
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	205,13	1 096,30	0,37	22,33	1 324,13
Ecotoxicité aquatique (m³)	757 587,95	13 249 259,85	899,69	59 020,18	14 066 767,68
Déchets radioactifs (dm³)	2,37	19,54	0,02	0,11	22,03
Toxicité humaine (kg)	499,21	2 723,71	2,05	24,69	3 249,66
Odeur (Mm³ air)	256,22	7 802,16	0,03	2,02	8 060,43

a2: Mur isolé par l'intérieur avec Polystyrène expansé

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	80,29	674,58	-0,96	1,80	755,70
Acidification (kg SO2 eq.)	332,54	2 139,03	0,48	20,54	2 492,59
Demande cumulative d'énergie (GJ)	979,87	15 931,57	14,63	29,39	16 955,46
Eau utilisée (m³)	550,30	34 596,70	1,64	13,78	35 162,42
Déchets inertes produits (t)	25,08	95,57	0,08	350,12	470,85
Épuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0,27	5,60	0	0,01	5,88
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	37,77	802,61	0,08	3,21	843,66
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	205,13	1 099,17	0,37	22,33	1 327
Ecotoxicité aquatique (m³)	757 587,95	13 288 360,57	899,69	59 020,18	14 105 868,40
Déchets radioactifs (dm³)	2,37	19,55	0,02	0,11	22,04
Toxicité humaine (kg)	499,21	2 731,09	2,05	24,69	3 257,05
Odeur (Mm³ air)	256,22	7 819,58	0,03	2,02	8 077,86

Tableau 07b : Impacts Environnementaux par phase du cycle de vie: Source Auteur 2017.

Mur isolé avec Ouate de Cellulose

b1 : Mur avec l'isolation répartie avec Ouate de Cellulose

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	80,37	670,24	-0,96	1,80	751,46
Acidification (kg SO2 eq.)	333,53	2 160,79	0,48	20,57	2 515,38
Demande cumulative d'énergie (GJ)	982,43	15 954,45	14,63	29,44	16 980,94
Eau utilisée (m³)	550,65	34 813,46	1,64	13,80	35 379,54
Déchets inertes produits (t)	25,12	96,04	0,08	350,69	471,93
Épuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0,28	5,64	0	0,01	5,93
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	37,86	803,82	0,08	3,22	844,98
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	205,74	1 102,55	0,37	22,36	1 331,02
Ecotoxicité aquatique (m³)	760 879,50	13 487 198,95	899,69	59 116,16	14 308 094,30
Déchets radioactifs (dm³)	2,37	19,94	0,02	0,11	22,43
Toxicité humaine (kg)	500,58	2 755,66	2,05	24,73	3 283,02
Odeur (Mm³ air)	256,90	7 635,50	0,03	2,03	7 894,46

b2 : Mur isolé par l'intérieur avec Ouate de Cellulose

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	80,37	666,78	-0,96	1,80	747,99
Acidification (kg SO2 eq.)	333,53	2 150,41	0,48	20,57	2 504,99
Demande cumulative d'énergie (GJ)	982,43	15 853,71	14,63	29,44	16 880,20
Eau utilisée (m³)	550,65	34 753,28	1,64	13,80	35 319,37
Déchets inertes produits (t)	25,12	95,56	0,08	350,69	471,46
Épuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0,28	5,60	0	0,01	5,89
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	37,86	802,91	0,08	3,22	844,06
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	205,74	1 097,27	0,37	22,36	1 325,74
Ecotoxicité aquatique (m³)	760 879,50	13 420 345,17	899,69	59 116,16	14 241 240,52
Déchets radioactifs (dm³)	2,37	19,78	0,02	0,11	22,28
Toxicité humaine (kg)	500,58	2 742,79	2,05	24,73	3 270,15
Odeur (Mm³ air)	256,90	7 593,43	0,03	2,03	7 852,38

b3: Mur isolé par l'extérieur avec Ouate de Cellulose

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	83,29	449,60	-0,96	1,76	533,69
Acidification (kg SO2 eq.)	345,99	1 758,43	0,48	20,10	2 125
Demande cumulative d'énergie (GJ)	999,98	18 765,42	14,63	28,77	19 808,80
Eau utilisée (m³)	562,50	35 397,89	1,64	13,49	35 975,52
Déchets inertes produits (t)	24,29	80,16	0,08	342,68	447,21
Épuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0,29	8,26	0	0,01	8,56
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	37,83	2 063,78	0,08	3,14	2 104,83
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	217,68	835,04	0,37	21,85	1 074,94
Ecotoxicité aquatique (m³)	834 117,06	11 420 130,83	899,69	57 765,76	12 312 913,35
Déchets radioactifs (dm³)	1,99	36,15	0,02	0,11	38,26
Toxicité humaine (kg)	492,97	2 252,78	2,05	24,17	2 771,97
Odeur (Mm³ air)	314,82	4 061,67	0,03	1,98	4 378,50

Tableau 07c : Impacts Environnementaux par phase du cycle de vie: Source Auteur 2017

Mur avec une isolation répartie avec lame d'air

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Démolition	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	80,29	716,08	-0,96	1,80	797,21
Acidification (kg SO2 eq.)	332,54	2 265,95	0,48	20,54	2 619,51
Demande cumulative d'énergie (GJ)	979,87	16 896,99	14,63	29,39	17 920,88
Eau utilisée (m³)	550,30	35 255,46	1,64	13,78	35 821,18
Déchets inertes produits (t)	25,08	101,30	0,08	350,12	476,58
Épuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0,27	5,93	0	0,01	6,22
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	37,77	813,74	0,08	3,21	854,80
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	205,13	1 163,15	0,37	22,33	1 390,97
Ecotoxicité aquatique (m³)	757 587,95	14 098 754,16	899,69	59 020,18	14 916 261,98
Déchets radioactifs (dm³)	2,37	20,69	0,02	0,11	23,18
Toxicité humaine (kg)	499,21	2 888,02	2,05	24,69	3 413,98
Odeur (Mm³ air)	256,22	8 312,10	0,03	2,02	8 570,37

Aussi, la phase de construction (une durée réduite par rapport au cycle de vie du bâtiment) avec des impacts essentiellement dans: l'acidification, la demande cumulative d'énergie, d'eau utilisée, la production d'ozone photochimique, et de dégager des déchets inertes, et des odeurs. Par contre, la phase de rénovation ne génère pas d'impact, et la phase de fin de vie présente des impacts sur les déchets inertes.

Après comparaison des diagrammes radars1, 2, et 3, pour les variantes de composition du mur, nous avons enregistré que la configuration mur base Ouate de cellulose est la plus intéressante, du point de vue optimisation énergétique et environnementale, relativement aux autres compositions du mur.

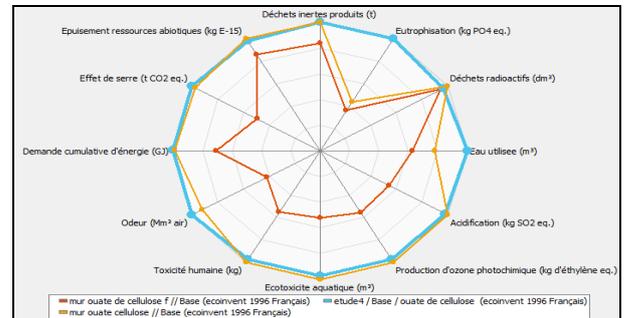


Diagramme radar2 : Cas d'isolation base de Ouate de cellulose.

Source: Auteur 2017

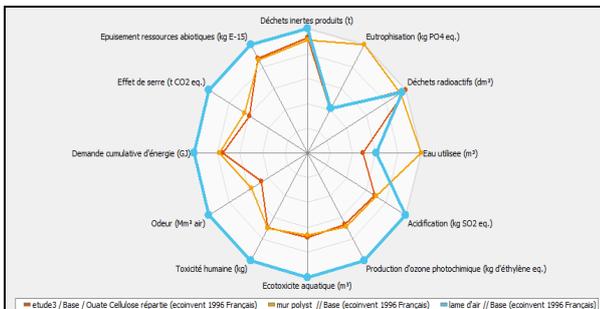


Diagramme radar1 : Cas de l'isolation répartie.

Source: Auteur 2017

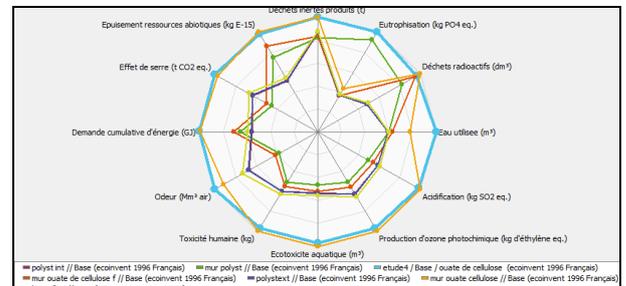


Diagramme radar3 : cas des 7 variantes de composition du mur.

Source: Auteur 2017

Aussi, l'un des résultats(Tab6)les plus importants qu'on cherche à déterminer à partir de la simulation, est la technique de l'isolation, nous avons remarqué que

l'isolation par l'extérieur des murs de l'enveloppe du bâtiment présente les impacts environnementaux les plus faibles tels que: l'effet de serre, l'acidification, la quantité cumulée d'énergie, et la quantité d'eau utilisée de même que pour les odeurs et la toxicité humaine, ces indicateurs présentent des écarts très remarquables par rapport aux autres techniques d'isolation. Et donc, le critère énergétique associé au bilan environnemental sont favorables au profit d'une isolation par l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment.

Nous optons donc pour une isolation par l'extérieur pour l'enveloppe du bâtiment, c'est une technique facile dans sa mise en œuvre, très rapide, élimine les ponts thermiques et bénéficie de l'inertie thermique des murs. Nous classons en second rang l'isolation répartie ou conventionnelle, réalisée en neuf seulement, elle assure un niveau de confort mais avec des consommations énergétiques très importantes sur tout le cycle de vie de bâtiment. Par contre, nous classons en dernier l'isolation par l'intérieur qui présente des inconvénients : i) elle favorise les ponts thermiques et les points de condensation, ii) prive de l'inertie thermique des murs, iii) réduit l'espace intérieur, en plus du iv) surtout dans les consommations énergétiques.

7 CONCLUSION

L'objectif de la présente étude était de quantifier et de comparer les impacts environnementaux de trois murs pourvus d'isolants dont la matière est d'origine diverses : i) synthétique : le Polystyrène expansé, ii) issus du recyclage : la Ouate de Cellulose ; comparés à un mur isolé conventionnellement (paroi double en brique de terre cuite avec lame d'air). La méthode d'évaluation environnementale employée est l'Analyse de Cycle de Vie, conformément aux Normes ISO 14040 à 14044. Elle associe différents matériaux de construction et des assemblages entrant dans l'enveloppe des bâtiments (murs extérieurs), en s'appuyant sur la base de données Eco-Invent et sur le Logiciel d'analyse de cycle de vie Nova-Equer qui est chaîné aux logiciels de simulation thermique dynamique (Pleiades-Comfie).

En comparant globalement les résultats des différentes configurations des murs, on constate que pour la totalité des impacts, la Ouate de cellulose est un matériau plus respectueux de l'environnement que les autres matériaux isolants. Le polystyrène expansé donne de résultats thermiques très acceptables, mais très impactant sur l'environnement.

Aussi, les techniques d'isolation jouent un rôle très déterminant sur l'aspect énergétique, lié étroitement aux impacts environnementaux engendrés. Par conséquent la performance thermique d'un bâtiment est tributaire d'une optimisation énergétique à atteindre et des performances environnementales à justifier. Ces derniers démontrent que l'isolation par l'extérieur est la plus efficace et elle présente des degrés d'impacts très proches que ceux de l'isolation répartie mais avec moins d'efficacité énergétique. L'isolation par l'intérieur présente plus d'inconvénients énergétiques que d'avantages thermiques. Par conséquent,

l'isolation par l'extérieur est la plus performante dans la mesure où elle élimine notamment les ponts thermiques, et permet de bénéficier de l'inertie thermique des parois. Il convient par ailleurs, dès lors que la Ouate de cellulose serait davantage utilisée dans la construction, en tant que matériau écologique issu de la récupération et du recyclage, et non plus comme un déchet. Aussi, il serait plus intéressant d'opter pour la technique de l'isolation par l'extérieur pour plus de gains d'énergie, d'économie et de moins d'impacts environnementaux engendrés.

L'étude a enfin, permis une aide à la décision pour le choix des matériaux isolants les plus performants, avec une maîtrise des techniques d'une isolation optimale d'un bâtiment de bureau sans réduire son niveau de confort. Ainsi, une performance énergétique d'un bâtiment est garantie avec de moindres impacts environnementaux recensés.

REFERENCES

- [1] ADEME(2005), Note de synthèse externe, Introduction à l'analyse du cycle de vie(ACV).
- [2] ADEME, (2015), Climat, air et énergie; Chiffres-clés. Edition 2015.
- [3] AFNOR, (Association Française de Normalisation). NF P01-010, Qualité environnementale des produits de construction, déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction. 2004. ISSN 0335-3931.
- [4] Belengini, G. A. (2006) , Life cycle assessment tools for sustainable development: Case studies for the mining and construction industries in Italy and Portugal. *Thèse de doctorat. Université technique de LISBOA, Institut supérieur technique.*
- [5] Chevalier J., (2009) Analyse du cycle de vie - Utilisation dans le secteur de la construction. Article publié le : 10 avril 2009, 32 pages
- [6] Ecoinvent, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent Center. [En ligne] <http://www.ecoinvent.org/>.
- [7] Garatia E.,Herde (de)A., (2006) Thermique des immeubles de bureaux UCL- Presses Universitaires de Louvain La Neuve, Belgique.
- [8] INIES. Base de données INIES. Base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, pour l'évaluation de la performance des ouvrages.
- [9] Jolliet O.et al,(2010), Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan. 2e édition mise à jour et augmentée. Lausanne : Presses Polytechniques et universitaire, Collection gérer l'environnement, ISBN : 978-2-88074-886-9.
- [10] Konya, A., 1984, Design primer for hot climates; drawings by Charles Swanpeoel, Paperback édition.
- [11] Manuel d'utilisation ; guide de l'utilisateur des logiciels Alcyone, Pleiades+Comfie et

- [12] Nova-Equer, Saisie graphiques des projets et simulation. Izuba Energies.
- [13] (OIN) Organisation Internationale de Normalisation(2006), Norme ISO 14040, Analyse du cycle de vie, Principes et cadre.
- [14] (OIN) Organisation Internationale de Normalisation(2006), Norme ISO 14044, Analyse du cycle de vie, Exigences et lignes directrices.
- [15] Pannier M., (2014). Analyse de cycle de vie des maisons passives de la plateforme INCAS. Centre d'Efficacité Energétique des Systèmes, Mines Paris Tech & Armines, France.
- [16] Peuportier B., (2003), *l'éco-conception des bâtiments*. Ecole des Mines de Paris, France.
- [17] Peuportier B., (2010), *l'étude d'un modèle simplifié pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments*. Ecole des Mines de Paris, France.
- [18] Peuportier B., (2008), *l'éco-conception des bâtiments et des quartiers*. Ecole des Mines de Paris.
- [19] Peuportier Popovici E., (2006), Contribution à l'analyse de cycle de vie des quartiers, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 209 p., France.
- [20] Thiers S., (2008), Bilans Énergétiques et Environnementaux de Bâtiments à Énergie Positive Thèse de doctorat: spécialité Energétique ; Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Paris, France.
- [21] Trachte S., Herde (de)A.(2014) , Sustainable Refurbishment School Buildings, UCL– Presses Universitaires de Louvain, lab. architecture et climat, Université Catholique de Louvain, Belgique.