

Soumis le: 22/11/2017

Forme révisée acceptée le: 02/10/2019

Correspondant: ikram.ahmari@univ-constantine3.dz



Nature et Technologie

Nature & Technology

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – EISSN : 2437-0312

Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen

Ikram AHMARI*, Ammar KORICHI, Farid GASMI et Salah KRADA

Faculté d'architecture et d'urbanisme, laboratoire Energie et Environnement, université de constantine3, Algérie

Résumé :

A l'heure actuelle, le réchauffement climatique est devenu une problématique planétaire et une urgence incontestable à laquelle on devrait impérativement y faire face. En effet, ce phénomène s'avère comme un enjeu majeur du développement durable. Car ses impacts ne se limitent pas seulement à des questions environnementales ; mais il pourrait entraîner de graves conséquences socio-économiques. Dès lors, une réflexion s'impose sur les actions à entreprendre afin de réduire la consommation énergétique et ainsi limiter les émissions de Gaz à Effet de Serre responsables du réchauffement climatique. Ceci nous rappelle la nécessaire mutation du secteur du bâtiment, notamment en matière d'habitat, étant donné qu'il est considéré comme premier consommateur d'énergie. Il serait donc temps de changer notre regard vers des habitats préconisant l'efficacité énergétique. De ce fait, l'objectif de cet article est d'évaluer l'impact de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale sur la consommation énergétique du bâtiment ; afin de contribuer au développement de solutions passives permettant de concevoir des bâtiments moins énergivores et plus durables. Pour ce faire, nous adoptons une approche analytique in vitro à travers une simulation numérique du bilan énergétique d'un prototype de bâtiment résidentiel de type collectif dans un climat méditerranéen à la ville de Constantine, et ce, à l'aide du logiciel TRNSYS. Les résultats de cette étude ont montré que le renforcement de l'inertie thermique, en l'occurrence, grâce à l'usage de la brique de terre cuite et du liège, a permis une réduction notable des besoins énergétiques ; permettant ainsi de consommer 84 % d'énergie en moins qu'un logement conventionnel contre un surcoût d'investissement de seulement 2 % compensé par une réduction conséquente des dépenses de fonctionnement.

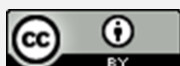
Mots-clés : développement durable, efficacité énergétique, inertie thermique, enveloppe architecturale, logiciel de simulation TRNSYS, bâtiment résidentiel, climat méditerranéen.

Simulation of the Impact of Thermal Inertia on the Energy Consumption of a Residential Building in a Mediterranean Climate

Abstract:

Currently, the global warming has become a planetary problematic and an incontestable urgency that we should imperatively face. Indeed, this phenomenon proves to be a major stake of sustainable development. Because its impacts are not limited to environmental issues but it could lead to serious socio-economic consequences. Therefore, a reflection has become essential on the actions to be undertaken in order to reduce energy consumption and thus limit the Greenhouse gas emissions responsible for global warming. This reminds us of the necessary change in the building sector, especially in terms of housing since it is been considered as the first energy consumer. It would be therefore time to change our look towards for housing that advocate energy efficiency. Thus, the aim of this article is to evaluate the impact of the thermal inertia of the architectural envelope on energy consumption of the building; in order to contribute to the development of passive solutions allowing design buildings that are less energy intensive and more sustainable. Thereby, we adopt an in vitro analytical approach through a numerical simulation of the energy balance of a prototype of residential building of collective type in a Mediterranean climate in the city of Constantine using TRNSYS software. The results of this study showed that the reinforcement of the thermal inertia, in particular by the use of terracotta brick and cork, has allowed a notable reduction in energy requirements; allowing to consume 84 % less energy than conventional housing against an additional investment cost of only 2 %, offset by a consequent reduction in operating expenses.

Keywords: sustainable development, energy efficiency, thermal inertia, architectural envelope, TRNSYS simulation software, residential building, Mediterranean climate.



Cet article est mis à disposition selon les termes de la licence [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

This article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
<i>A</i>	Diffusivité thermique	m ² /h
<i>B</i>	Effusivité thermique	(W/m ² .K) ^{1/2}
<i>C</i>	Chaleur massique	Wh/K.kg
<i>E</i>	Épaisseur de la couche	Cm
<i>U</i>	Coefficient de transmission surfacique	W/m ² K
Latin		
λ	Conductivité thermique	W/m.K
ρ	Masse volumique	Kg/m ³

1. Introduction

Le réchauffement climatique fait maintenant l'objet d'une préoccupation mondiale éminente ; du fait qu'il provoque des dommages irréversibles, aussi bien pour la planète que pour l'homme qui l'habite. Il s'impose donc comme un enjeu majeur du développement durable, car il porte gravement atteinte aux trois dimensions : environnementale, économique et sociale. En effet, ce phénomène n'est pas seulement un problème d'écologie, de protection des écosystèmes, de la biodiversité ou de l'environnement. Mais il affecte également l'économie et les sociétés humaines.

Ainsi, les catastrophes naturelles engendrées par le réchauffement climatique, telles que les cyclones, les ouragans, la sécheresse, les pluies diluviennes, les inondations, les tempêtes et les tremblements de terre, ont des conséquences sociales dramatiques. Nous citerons notamment les crises migratoires et l'apparition d'un nouveau type de réfugié : les déplacés climatiques, ainsi que les pénuries alimentaires et les épidémies. De ce fait, le dérèglement climatique est également considéré comme un problème socio-économique, car d'une part, il affecte la santé et la survie de l'homme et pourrait accroître les inégalités dans le monde en fragilisant davantage les populations déjà vulnérables. D'autre part, la lutte contre ce phénomène et la réparation des dommages et dégâts, liés aux catastrophes qu'il entraîne, coûtent très chère.

A cet égard, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques¹ a approuvé en 2015 un premier accord universel sur le climat, nommé « Accord de Paris » qui est entré en vigueur en Novembre 2016, visant à limiter le réchauffement global à 2°C. Cet accord

contraint les pays l'ayant ratifié à redoubler d'efforts pour réduire leurs émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), générés par leurs consommations énergétiques, et qui sont estimés selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat² [1] comme premier responsable de ce réchauffement climatique. Ainsi, pour réduire de manière drastique les émissions de GES, il faudrait impérativement promouvoir l'économie et la maîtrise d'énergie.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre recherche. Nous nous interrogeons ainsi sur les solutions les plus fiables et viables dans le domaine de l'architecture, notamment les principes de conception permettant d'économiser l'énergie, car c'est dans le secteur du bâtiment que l'effort à faire en matière de rationalisation de l'utilisation de l'énergie est le plus pertinent étant donné qu'il consomme 40 % d'énergie et produit plus de 120 millions de tonnes de GES chaque année [2].

Notre démarche portera sur quatre point :

- Le premier point sera consacré à étayer les éléments de la problématique de la surconsommation énergétique des bâtiments résidentiels, étant donné que le secteur du logement, est statistiquement, le plus gros consommateur d'énergie aussi bien à l'échelle internationale que locale, en l'occurrence notre cas d'étude, celui de la ville de Constantine³ soumise au climat méditerranéen.
- En second lieu, nous nous intéressons au concept de l'efficacité énergétique comme réponse clé à l'enjeu de la maîtrise d'énergie ; en émettant comme hypothèse que le renforcement de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale pourrait améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et ainsi réduire leurs consommations.
- Dans le point suivant, nous détaillerons notre démarche de recherche, concernant toute les éléments de l'étude de simulation du bilan énergétique du prototype de base, les différents scénarios ainsi que les outils de recherche utilisés.

Dès lors, le quatrième et dernier point sera consacré à la discussion et l'interprétation des résultats de cette étude.

1. Problématique du secteur résidentiel :

¹ UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

² GIEC : Organisation intergouvernementale autonome mandaté par les États, membres de l'ONU, pour synthétiser des travaux menés dans les laboratoires du monde entier, en fonction d'un problème précis.

³ Département au Nord-Est de coordonnées GPS : 36° 21' 0" N 6° 35' 60" E

Les statistiques affirment que le secteur du logement est le plus énergivore ; consommant 35 % de l'énergie produite dans le monde et constituant le premier émetteur de GES avec 1,65 Gt [3]. Selon le bilan de l'année 2015 [4], l'Algérie consomme plus de 43 % de la consommation énergétique nationale et ces chiffres devront connaître une hausse avec notamment la réalisation de 1,6 millions d'unités de logements prévus par l'actuel quinquennat 2015-2019.

Selon la direction de SONELGAZ⁴ de Constantine [5], le secteur résidentiel de la ville a consommé, en 2014, 79 % du bilan énergétique local, avec une moyenne de 26 047 kWh/an par logement. Afin d'estimer cette consommation, nous la comparant à la norme exigée par le label allemand « Passivhaus » (maison passive), qui est considéré comme le plus performant en matière d'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels.

Pour ce faire, nous divisons la moyenne de consommation annuelle sur la surface moyenne d'un logement conventionnel d'environ 80 m² pour en déduire la consommation par mètre carré. Il en résulte ainsi une valeur approximative de 326 kWh/m²/an soit presque 3 fois ce qu'exige le label Passivhaus, à savoir 120 kWh/m²/an.

Par ailleurs, si nous considérons les nouveaux tarifs du secteur résidentiel [6], où le prix d'un 1 kWh varie en fonction du niveau de consommation entre 1,779 DA ; 4,179 DA ; 4,812 DA et 5,48 DA correspondant respectivement aux tranches trimestrielles 1 [0-125 kWh], 2 [125-250 kWh], 3 [250-1000 kWh] et 4 [plus 1000 kWh], cette surconsommation énergétique annuelle est estimée à 104 188 DA.

Compte tenu de ce qui précède, une problématique de taille s'impose. Elle nous fait rappeler la nécessaire mutation du secteur résidentiel, notamment en termes de conception architecturale. A cet égard, la réalisation des objectifs d'économie d'énergie et de réduction des émissions de GES devrait passer essentiellement par l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment [7].

2. L'inertie thermique, moyen de promotion de l'efficacité énergétique :

Il nous semble que l'une des principales causes de cette surconsommation énergétique du secteur

résidentiel en Algérie, est probablement l'inadaptation de la conception architecturale au climat local. En effet, vu l'évolution de sa démographie, le nombre de constructions dans toute l'Algérie, notamment en logements est amené à augmenter considérablement. L'absence d'application de réglementation thermique alliée à des contraintes économiques de coût de construction et à des pratiques architecturales importées a longtemps favorisé la réalisation de bâtiments totalement inadaptés aux climats [8]. Ceci a engendré un inconfort thermique général dans les logements, en été comme en hiver, favorisant le recours systématique et prolongé aussi bien au chauffage qu'à la climatisation.

Dès lors, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments pourrait être, à notre sens, une réponse adaptée à l'enjeu capital de la maîtrise des besoins en énergie et de la diminution des rejets polluants de GES.

Dans cette optique, la législation algérienne en vigueur prévoit l'introduction de l'efficacité énergétique dans les bâtiments selon la loi n° 99-09 [9] relative à la maîtrise de l'énergie. En outre, l'Agence de la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE), a lancé en 2016 le Programme National d'Efficacité Énergétique (PNEE) [10], qui a pour principale objectif l'isolation thermique de 100 000 logements. Ainsi, avec ces mesures, c'est plus de 3 milliards de Tonnes Equivalent Pétrole (TEP) qui seront économisées à l'horizon 2030 et cela évitera l'émission de 200 millions de tonnes de CO₂. Il s'agit d'utiliser moins d'énergie pour obtenir les mêmes performances énergétiques [11]. Cette notion recouvre trois approches qui peuvent être combinées ou abordées séparément à savoir : les solutions passives, les mesures actives et le comportement raisonné et responsable des usagers [12].

Dans cette étude, nous mettons plutôt l'accent sur les solutions passives, étant donné qu'elles s'inscrivent dans la phase de conception et d'avant-projet et est donc du ressort de l'architecte. En outre, ces solutions n'exigent pas de consommation énergétique pour leur fonctionnement et sont donc peu coûteuses ; ayant axé sur l'enveloppe du bâtiment et son isolation, le vitrage, la ventilation naturelle et le solaire passif. Car, dans l'optique d'aboutir à des consommations énergétiques annuelles minimales, l'objectif accessible à plus court terme est celui de consolider l'enveloppe du bâtiment (murs, sols et toitures) [13].

⁴ Société Nationale d'Electricité et du Gaz

Parmi les différentes solutions passives mises en œuvre, le choix a été porté principalement sur celles qui sont les plus appropriées au climat local de la ville de Constantine, cas de notre étude, soumise au climat méditerranéen. De ce fait, la notion d'inertie thermique semble être la plus adaptée ; car elle recouvre à la fois l'accumulation de la chaleur et sa restitution après un certain temps ; appelé le temps de déphasage. Ce dernier est dépendant des caractéristiques physiques, dimensionnelles et d'environnement de la paroi de stockage ; donc fonction de l'épaisseur et de la conductivité thermique des matériaux. En outre, une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour, en limitant la surchauffe, afin de la restituer la nuit, quand l'offre solaire vient à manquer [14]. Elle est donc particulièrement intéressante dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante, ce qui nécessite donc un système de chauffage et de climatisation passifs au moyen de l'effet de masse thermique des murs, planchers et toiture avec un déphasage requis de plus de 8h.

L'inertie thermique, introduite et définie par O. Sidler⁵ [15], agit concrètement comme un amortisseur, c'est à dire qu'elle tente de s'opposer à toutes les variations brutales de température, mais c'est aussi un grand absorbeur d'énergie.

Ainsi, cette inertie constitue un atout essentiel pour stocker l'énergie reçue par le bâtiment et la restituer quand cela est nécessaire. Elle permet d'emmagasinier les apports gratuits issus du rayonnement solaire pour réduire les consommations énergétiques liées au chauffage en présence d'une isolation performante. En été, son association à la ventilation nocturne contribue à évacuer l'énergie stockée au cours de la journée limitant ainsi les surchauffes à l'intérieur du bâtiment [16]. C'est donc un facteur essentiel d'économie d'énergie en hiver comme en été pour les locaux à occupation continue à l'instar des logements.

L'inertie thermique est alors définie comme étant une propriété thermique d'un bâtiment, considéré comme un système. Ce système est en contact avec deux ambiances intérieure et extérieure. Il est constitué de parois, elles-mêmes constituées de couches de matériaux. L'inertie est donc représentée par les propriétés thermo-physiques des matériaux composant une paroi potentiellement

multicouche, et activée par des sollicitations dynamiques aux frontières de cette paroi [17]. Dès lors, les caractéristiques de l'inertie thermique peuvent être regroupées pour chaque matériau en ces deux grandeurs intermédiaires [18] :

- La diffusivité thermique « a », qui correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau, exprime la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température. Donc, elle est directement proportionnelle à sa conductivité thermique et inversement proportionnelle à sa chaleur volumique. Elle est calculée par la formule suivante :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times c} \quad (\text{m}^2/\text{h}) \quad (1)$$

où :

λ : Conductivité thermique du matériau (W/m.K) ;

ρ : Masse volumique du matériau (kg/m^3) ;

c : Chaleur massique du matériau (Wh/K.kg).

La diffusivité est sensiblement du même ordre de grandeur pour tous les matériaux de construction (de 1 à 4).

- L'effusivité thermique « b », qui représente la capacité d'un matériau à absorber un flux thermique instantané, est calculée selon la formule suivante :

$$b = \sqrt{\lambda \times \rho \times c} \quad ((\text{W}/\text{m}^2.\text{K})^{1/2}) \quad (2)$$

Du point de vue de leur effusivité, les matériaux de construction sont très différents (de 1 à 100). Ainsi, pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois de l'enveloppe doivent présenter une faible diffusivité et une forte effusivité. Cet objectif peut être atteint par un choix judicieux de matériaux en parois homogènes. L'emploi d'une paroi composite avec une faible diffusivité extérieure et une forte effusivité intérieure permet également de réduire l'amplitude du flux thermique [19].

Une exploitation optimale de l'inertie passe par une sélection appropriée des matériaux de construction lors de la phase d'avant-projet et par le développement de stratégies visant à exploiter leur capacité de stockage [20]. Ainsi, notre choix s'est porté sur la brique de terre cuite ; car d'après les études faites par le Centre National des Etudes et de la Recherche en Industrie du Bâtiment

⁵ « L'inertie d'un bâtiment est une fonction directe de sa capacité thermique, donc du produit de la masse de tous ses composants par leur chaleur spécifique massique ».

(CNERIB), dans le cadre de la conception et la réalisation d'un prototype⁶ de la première habitation durable algérienne [21], si le matériau utilisé dans les pays européens est le bois, pour ses qualités d'isolant thermique, en Algérie, ce sont les matériaux locaux tels que la brique de terre ou béton de terre stabilisé (BTS) et la pierre⁷. En effet, la brique de terre cuite est pourvue d'une valeur de conductibilité thermique extrêmement faible grâce à la composition chimique et minéralogique de l'argile et de la terre cuite [22]. Cet avantage lui confère à la fois une excellente résistance thermique et une grande inertie avec un déphasage important.

En outre, les qualités techniques et esthétiques de la brique de terre cuite se sont adaptées au fil des siècles, pour répondre aux exigences immédiates et futures en matière de durabilité, de confort thermique et acoustique, de bien-être et d'impact environnemental et écologique [23].

A cet égard, les propriétés thermo-physiques de la brique de terre cuite, indiquées dans le tableau ci-dessous (tableau 1), correspondent aux données proposées par le logiciel TRNBuild, avec lequel nous avons modéliser le prototype afin d'effectuer ensuite l'étude de simulation. Ainsi, nous pouvons constater la faible diffusivité et la forte effusivité de ce matériau.

Tableau 1
Propriétés thermo-physiques de la brique de terre cuite

Caractéristiques	
Conductivité thermique (λ)	0,794 kJ/h.m.K
Masse volumique (ρ)	782 kg/m ³
Chaleur massique (c)	0,794 kJ/kg.K
Diffusivité thermique (a)	1,27 10 ⁻³ m ² /h
Effusivité thermique (b)	22,15 (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}

Source : conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

On constate que la réduction des besoins en énergie grâce aux apports solaires repose sur le travail combiné de l'effet de serre des vitrages (pièges à chaleur) et de l'inertie (stockage). Le stockage direct est un processus par lequel le rayonnement solaire, irradiant un matériau, est partiellement absorbé par celui-ci, transformé en chaleur et accumulé en son sein [24]. Ainsi, le recours au mur capteur⁸ accentue cette inertie thermique de par sa constitution d'une masse thermique importante (mur plein béton ou pierre) permettant l'accumulation de la chaleur, couplée à un vitrage exposé au soleil et

permettant, ainsi, de diminuer les pertes par convection (figure1). L'énergie solaire, transmise par le vitrage et absorbée par le mur, chauffe la surface externe du mur capteur ; puis la chaleur migre vers l'intérieur par conduction dans la masse du mur. La chaleur ne parvient à la surface intérieure qu'après un certain temps de déphasage et avec un certain amortissement [25].

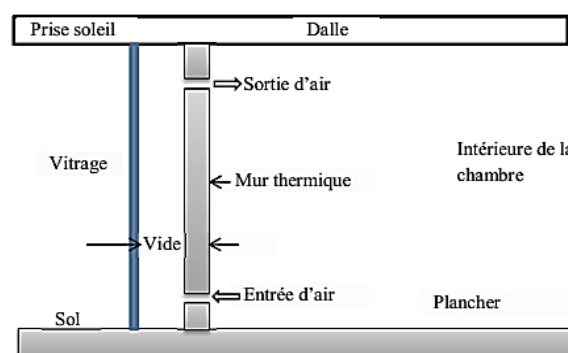


Figure 1 : Schéma de principe du mur capteur

Durant la première décennie de ce siècle, plusieurs améliorations ont été apportées au mur trombe. Ji Jie *et al.* [26] ont étudié un mur Trombe équipé de cellules photovoltaïques PV collées sur la face extérieure du vitrage pour la production de l'électricité. La ventilation à l'intérieur du mur est assurée par un ventilateur fonctionnant en courant direct. Les résultats expérimentaux montrent que la température des cellules PV diminue de 1,28 °C (augmentation des performances des cellules PV) et la température moyenne intérieure augmente de 0,50 °C (augmentation des performances du mur trombe).

Une autre conception innovante du mur Trombe est l'utilisation des matériaux à changement de phase dans le mur de maçonnerie pour stocker la chaleur latente afin de réduire l'épaisseur du mur [27]. Nwachukwu et Okonkwo [28] ont montré qu'un revêtement hautement absorbant sur la paroi du mur avec une faible émissivité permet l'augmentation de la quantité d'énergie thermique transmise au local.

De plus, l'isolation thermique du bâtiment par l'extérieur permet également de tirer parti de l'inertie de l'enveloppe architecturale afin de récupérer les apports solaires en hiver et de réduire l'inconfort en été [29].

⁶ Sélectionnée dans un concours lancé par le programme MED-ENEC (Mediterranean Energy Efficiency in Construction Structure) en 2006

⁷ Ne nécessitent aucune énergie lors de leur extraction et fabrication puisque le plus souvent extraites de l'assiette en question

⁸ Egalement appelé mur Trombe

Plusieurs recherches sont réalisées dans ce sens, S. B. Sadineni *et al.* [30] ont étudié l'impact de l'isolation thermique sur la consommation énergétique dans des appartements à Hong Kong. Les résultats ont montré que les économies avaient atteint 31,4 % rien qu'en insérant des isolants thermiques et en utilisant de la peinture blanche pour minimiser l'absorption du rayonnement solaire.

Les matériaux sont considérés comme isolants lorsque leur conductivité thermique est inférieure à 0,065 W/m.K [31]. C'est la raison pour laquelle, notre choix a été porté sur le liège expansé [32] considéré comme l'un des meilleurs isolants grâce à ses qualités multiples (tableau 2), notamment sa faible conductivité thermique (0,04 W/m.K), en plus d'être localement disponible et à coût modéré, ce qui renforce l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale.

Tableau 2 :
Propriétés thermo-physiques du liège expansé

Caractéristiques	
Conductivité thermique (λ)	0,144 kJ/h,m,K
Masse volumique (ρ)	120 kg/m ³
Chaleur massique (c)	0,484 kJ/kg,K
Diffusivité thermique (a)	2,48 10 ⁻³ m ² /h
Effusivité thermique (b)	2,89 (kJ/h,m ² ,K) ^{1/2}

Source : conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

4. Méthodologie de recherche :

Afin d'évaluer l'impact de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale sur la consommation énergétique du bâtiment ; notre méthode de recherche consiste en une étude de simulation des besoins énergétiques d'un cas d'étude, à l'aide d'un outil de simulation du comportement thermique en régime dynamique. Dans ce qui suit, nous présentons toute la méthodologie de travail.

4.1. Description des paramètres du cas d'étude

La cellule choisie comme prototype pour l'étude de simulation est un appartement F3 d'une superficie de 80 m² situé à un étage intermédiaire et orienté Sud/ Nord selon un axe Est-Ouest. Cet appartement a été conçu de manière à respecter la répartition des pièces et le zonage selon les caractéristiques spécifiques à chaque orientation. En effet, les pièces principales de vie sont du côté Sud en revanche les espaces peu chauffés (dépendances) implantés de façon à constituer une zone tampon du côté Nord (figure 2).

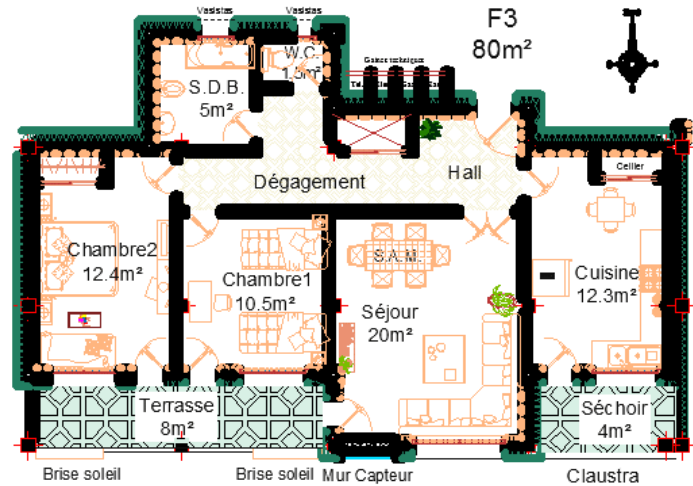


Figure 2 : Vue en plan du cas d'étude. Source : conçu par l'auteur

Dans cette simulation multi-zonale, chaque pièce est modélisée en une seule et unique zone thermique, le

tableau 3 ci-dessous présente les caractéristiques dimensionnelles de chaque zone :

Tableau 3 :
Caractéristiques dimensionnelles des cinq zones modélisées du prototype choisi pour la simulation

Zones	Hauteur sous-plafond (m)	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Surface vitrée (m ²)
1, Séjour	2,60	4,80	4,20	20,00	52,00	2,40
2, Chambre1	2,60	3,30	3,20	10,50	27,30	1,80
3, Chambre2	2,60	4,00	3,10	12,40	32,24	1,80
4, Cuisine	2,60	4,00	3,08	12,30	31,98	1,80
5, Annexes (couloir +SDB+WC)	2,60	/	/	19,60	50,96	2 vasistas 0,4+ 0,25

Source : Conçu par l'auteur

4.2. Outils de recherche utilisés :

L'étude de simulation a été établie à l'aide des trois logiciels expliqués brièvement ci-après :

4.2.1. Metenorm[®] :

Les données météorologiques insérées au niveau du logiciel Metenorm⁹, version 7, sont celles de la station météorologique Ain-El-bey correspondantes à la zone géographique du cas d'étude (figure 3) exactement au coordonnées GPS : 36,17° de latitude Nord ; 6,37° de longitude Est à 694 m d'altitude (zone climatique B).

Constantine (Ain El)

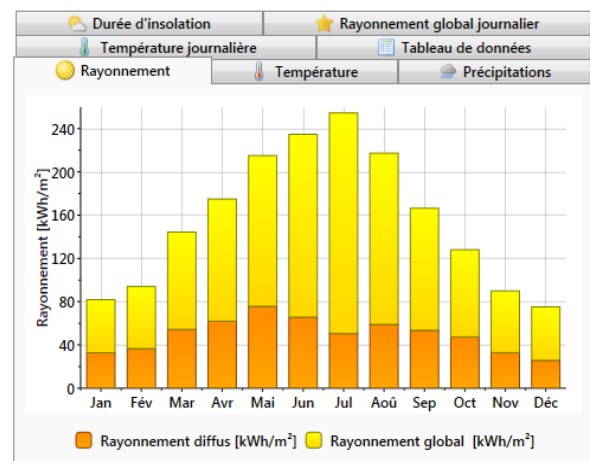


Figure 3 : Simulation climatique de Constantine à l'aide de Météonorm7 -Source : Conçu par l'auteur

4.2.2. TRNBUILD[®]

Utilisé pour la modélisation du prototype avec toutes ses caractéristiques formelles, dimensionnelles et techniques (figure 4).

⁹ Contient des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe

19 Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen

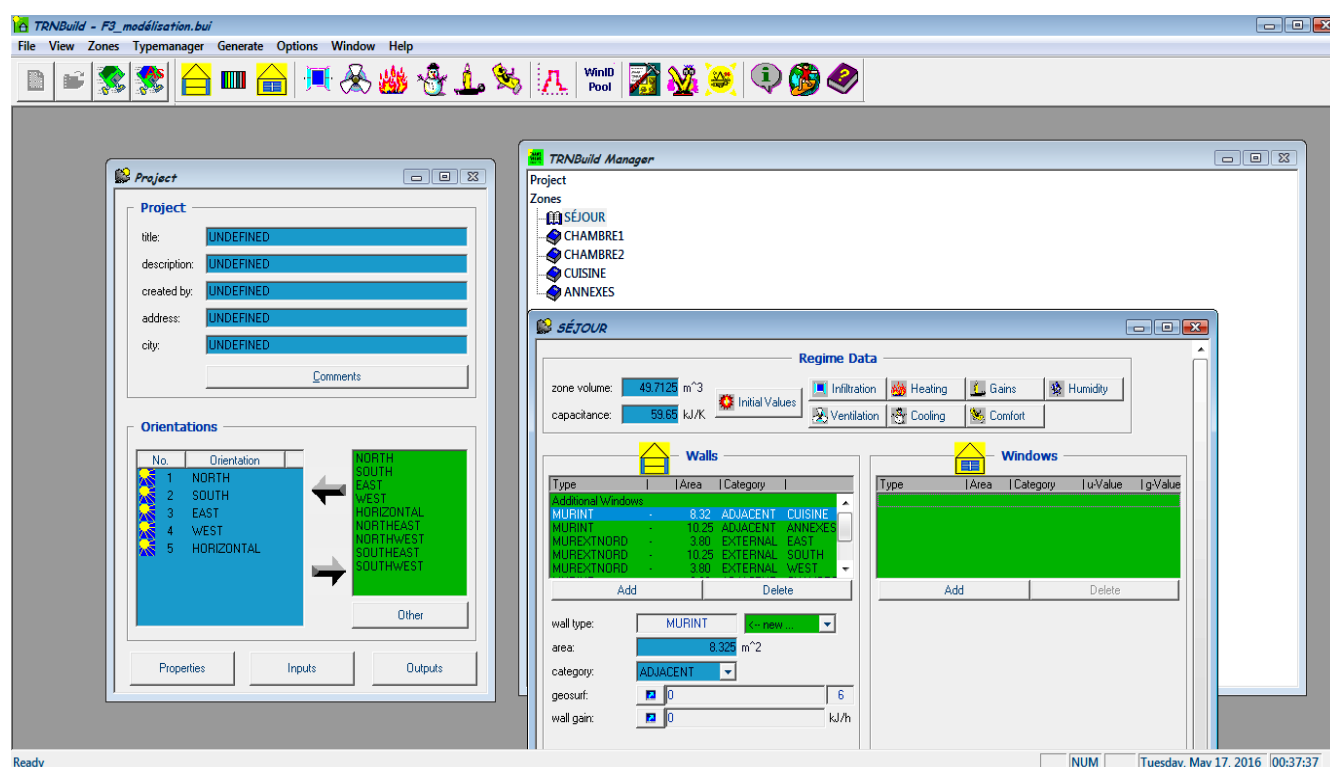


Figure 4 : Interface de simulation du prototype dans TRNBuild

Source : Conçu par l'auteur

4.2.3. TRNSYS® (version 16 (Simulation Studio))¹⁰

Le logiciel TRNSYS est un des outils de référence au niveau international [33] qui présente une précision bien définie sur le comportement dynamique du bâtiment. Il permet de réaliser des simulations thermiques dynamiques (STD) des besoins énergétiques des bâtiments. Et ce, en créant des liaisons entre le fichier modélisé par

TRNBUILD de type 56b avec d'une part, les inputs à savoir le fichier météo de type 109-TMY2 et d'autre part, avec les outputs, c'est-à-dire, le fichier résultat de type 65c (figure 5). Les résultats de simulation des besoins énergétiques de chauffage et climatisation sont donnés, aussi bien sous forme graphique que numérique, à l'aide de tableaux Excel.

¹⁰ (Transient System Simulation Tool) qui a été développé par l'Université de Madison (USA) et codé en Fortran. URL : <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>

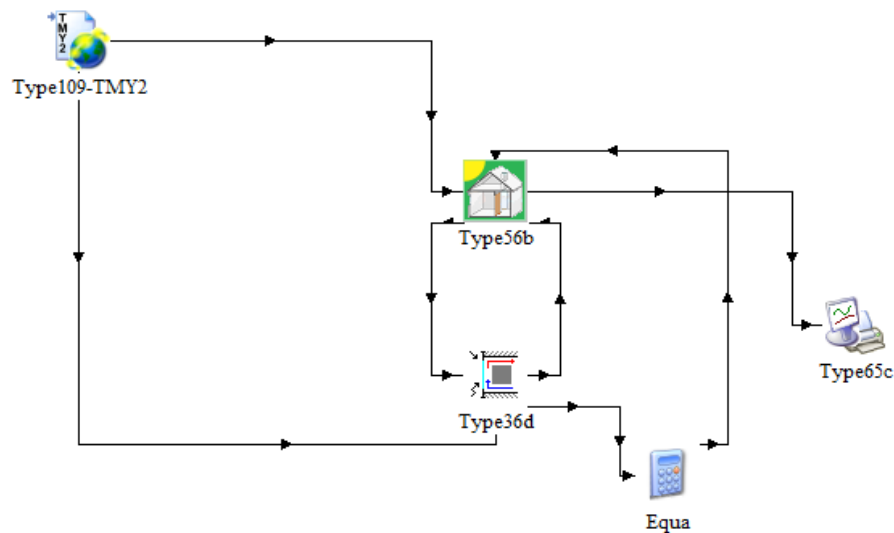


Figure 5 : Interface de Simulation Studio du prototype dans TRNSYS.
Source : Conçu par l'auteur

4.3. Les différents scénarios de simulation :

Dans l'objectif d'évaluer l'impact de chaque élément dans le renforcement de l'inertie thermique du prototype, l'étude de ses besoins énergétiques passe par la réalisation de cinq séries de simulations dynamiques selon cinq scénarios dans lesquels on rajoute un élément à chaque étape :

- *Étape 1 - Construction conventionnelle* : Cette étape constitue l'étape de référence. Les matériaux utilisés dans cette étape sont les matériaux ordinaires avec des épaisseurs courantes à savoir la brique creuse, l'hourdis et le vitrage simple et dont les propriétés thermo-physiques sont indiquées dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés dans l'étape 1

Elément	Composition*	e (cm)	λ (kJ/h,m,K)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kg,K)	a (m²/h)	B (kJ/h.m².K) ^{1/2}	U (W/m²K)
Mur extérieur (30 cm)	Brique creuse	10	1,12	720	0,794	1,96 10 ⁻³	25,30	0,531
	Lame d'air	05	0,22	1	1,227	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Brique creuse	15	1,12	720	0,794	1,96 10 ⁻³	25,30	
Mur intérieur	Brique creuse	10	1,12	720	0,794	1,96 10 ⁻³	25,30	1,651
Plancher intermédiaire (20 cm)	Corps creux (hourdis)	16	4,43	1 300	0,65	5,24 10 ⁻³	61,18	2,323
	Dalle de compression	04	6,32	2 300	0,92	2,99 10 ⁻³	115,64	
Vitrage	Simple vitrage	U =5,74W/m²K						

* De l'intérieur vers l'extérieur

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

- *Étape 2 - Inertie renforcée des murs extérieurs* : Dans ce 2^{ème} scénario, les modifications résident d'une part, dans l'ajout du liège expansé comme isolant par l'extérieur avec des épaisseurs de 12 cm pour la plupart des orientations et 18 cm pour les murs exposés au Nord qui sont peu ensoleillés et doivent donc être particulièrement bien isolés. Cet isolant est collé par un enduit à la chaux en plus

d'un pare-vapeur (film en aluminium) coté intérieur. D'autre part, l'usage de la brique de terre cuite plutôt que la brique creuse ordinaire et enfin la réduction de l'épaisseur de la lame d'air à 2 cm plutôt que 5 cm et ce pour empêcher les courants de convection. Les propriétés thermo-physiques et les épaisseurs des matériaux utilisés sont indiquées dans le tableau 5 ci-après.

21 Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen

Tableau 5 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux rajoutés dans l'étape 2

Elément	Composition*	e (cm)	λ (kJ/h.m.K)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	a (m ² /h)	b (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}	U (W/m ² K)
Mur extérieur (42 cm)	Pare- vapeur	01	1,80	1 700	1	1,06 10 ⁻³	55,32	0,21
	Brique de terre cuite	10	0,79	782	0,794	1,27 10 ⁻³	22,15	
	Lame d'air	02	0,22	1	1,227	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Brique de terre cuite	15	0,79	782	0,794	1,27 10 ⁻³	22,15	
	Enduit à la chaux	02	3,13	1 800	1	1,74 10 ⁻³	75,06	
	Liège expansé	12	0,14	120	0,484	2,48 10 ⁻³	2,89	
Mur extérieur exposé au Nord (48 cm)	Pare- vapeur	01	1,80	1 700	1	1,06 10 ⁻³	55,32	0,16
	Brique de terre cuite	10	0,79	782	0,794	1,27 10 ⁻³	22,15	
	Lame d'air	02	0,22	1	1,227	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Brique de terre cuite	15	0,79	782	0,794	1,27 10 ⁻³	22,15	
	Enduit à la chaux	02	3,13	1 800	1	1,74 10 ⁻³	75,06	
	Liège expansé	18	0,14	120	0,484	2,48 10 ⁻³	2,89	

* De l'intérieur vers l'extérieur

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

- **Étape 3 - Inertie renforcée du plancher et du plafond :** Dans ce 3^{ème} scénario, et comme l'inertie thermique ne se limite pas seulement aux murs mais tient compte de toute l'enveloppe architecturale, en l'occurrence, le plancher et le plafond, les modifications apportées consistent en l'ajout de l'isolant polystyrène expansé dans la composition du

plancher intermédiaire et dont les propriétés thermo-physiques sont indiquées dans le tableau 6 ci-dessous. Par ailleurs, étant donné que le prototype choisi est un appartement situé en étage intermédiaire, la composition du plafond est identique à celle du plancher intermédiaire.

Tableau 6 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux rajoutés dans l'étape 3

Elément	Composition*	e (cm)	λ (kJ/h.m.K)	ρ (kg/m ³)	C (kJ/kg.K)	a (m ² /h)	b (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}	U (W/m ² K)
Plancher intermédiaire (24 cm)	Corps creux (hourdis)	16	4,43	1300	0,65	5,24 10 ⁻³	61,18	0,69
	Dalle de compression	04	6,32	2300	0,92	2,99 10 ⁻³	115,64	
	Polystyrène expansé	04	0,14	25	1,38	4,06	2,20	

* De l'intérieur vers l'extérieur

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

- **Étape 4 - Inertie renforcée des Vitrages :** Dans ce 4^{ème} scénario, les modifications apportées consistent à remplacer le simple vitrage par du double vitrage à basse émissivité avec couche de gaz Argon intégré et dont les propriétés thermo-physiques sont indiquées dans le tableau 7.

Tableau 7 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux rajoutés dans l'étape 4

Élément	Composition	U
Vitrage	Double vitrage à basse émissivité avec couche de gaz Argon intégré	1,43

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

- **Étape 5 - Ajout du Mur Capteur :** Dans ce dernier scénario, les modifications apportées consistent en l'ajout d'un mur capteur d'une surface de 3 m² (1,2 m × 2,5 m), dont les propriétés thermo-physiques sont indiquées dans le tableau 8 ci-dessous, que nous avons inséré au niveau du mur extérieur sud du séjour car cette orientation est la plus passivement profitable.

Tableau 8 :
Caractéristiques thermo-physiques des matériaux rajoutés dans l'étape 5

Elément	Composition*	e (cm)	λ (kJ/h.m.K)	ρ (Kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	a (m ² /h)	B (kJ/h.m ² .K) ^{1/2}	U (W/m ² K)
Mur Trombe (43 cm)	Pierre naturelle (Granit)	30	1,15	500	1	2,3 10 ⁻³	23,98	0,313
	Lame d'air	10	0,22	1	1,23	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Feuille de verre	0,4	4,19	2490	0,83	2,03 10 ⁻³	93,06	
	Lame d'air	2	0,22	1	1,23	179,3 10 ⁻³	0,52	
	Feuille de verre	0,4	4,19	2490	0,83	2,03 10 ⁻³	93,06	

* De l'intérieur vers l'extérieur

Source : Conçu par l'auteur sur la base des données de TRNBUILD

5. Résultats et discussion :

5.1. Résultats :

Les résultats de la simulation des cinq étapes sus-citées sont données par le logiciel TRNSYS selon deux formes ; une numérique sous forme de tableaux Excel et l'autre graphique sous forme de courbes illustrant l'évolution, par heure durant les 365 jours de l'année (8 760 heures), des besoins énergétiques de chauffage et climatisation ainsi

que les températures intérieures de chacune des cinq zones modélisées dans le prototype de simulation (figure 6).

Nous avons synthétisé ces résultats de simulation dans le tableau 9 en mettant en exergue les besoins énergétiques annuels de chauffage par mètre carré ainsi que les besoins énergétiques annuels totaux afin de pouvoir évaluer l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique du prototype de simulation.

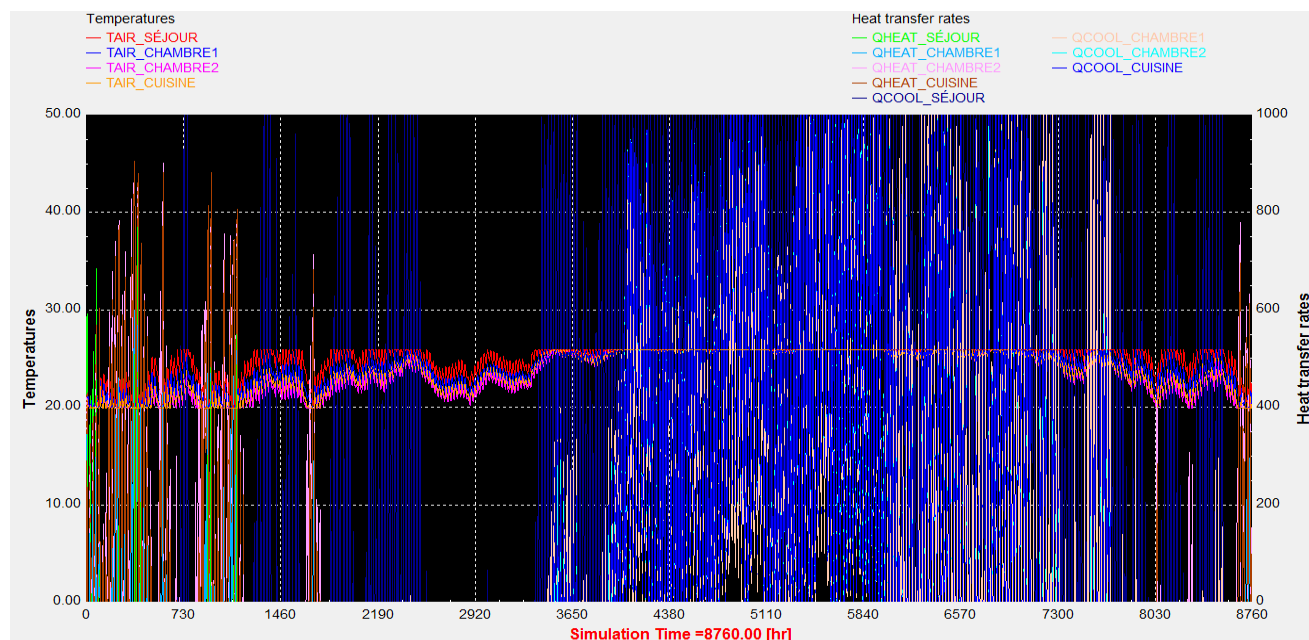


Figure 6 : Evolution annuelle des besoins énergétiques et des températures intérieures d'une étape simulée par TRNSYS
(Source : Conçu par l'auteur)

23 Simulation de l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel dans un climat méditerranéen

Tableau 9 :
Résultats de la simulation par TRNSYS des besoins énergétiques annuels par mètre carré des cinq étapes

Etapes de simulation	Besoins énergétiques annuels de Chauffage par 1m ² [kWh/m ²]	Besoins énergétiques annuels [kWh]
1	270	6 700
2	224	4 345
3	213	4 102
4	126	2 418
5	57	1 088

Source : Conçu par l'auteur

Ses valeurs sont aussi représentées sous forme de graphique en courbes (figures 7a et 7b) permettant ainsi d'apprécier les variations des besoins énergétiques annuels respectivement de chauffage et du total de la consommation énergétique du prototype selon les cinq scénarios de simulation. Les deux courbes montrent que les besoins énergétiques du prototype sont en baisse constante grâce au renforcement de l'inertie thermique à chaque étape de la simulation. Nous pouvons ainsi affirmer notre hypothèse en confirmant que le renforcement de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale permet de diminuer la consommation énergétique du bâtiment. En outre, nous pouvons constater qu'il y a une corrélation négative entre l'inertie thermique et la consommation énergétique du bâtiment ; car les deux valeurs évoluent dans des sens opposés. Nous déduisons ainsi que plus l'inertie thermique du bâtiment sera grande, moins le bâtiment consommera d'énergie.

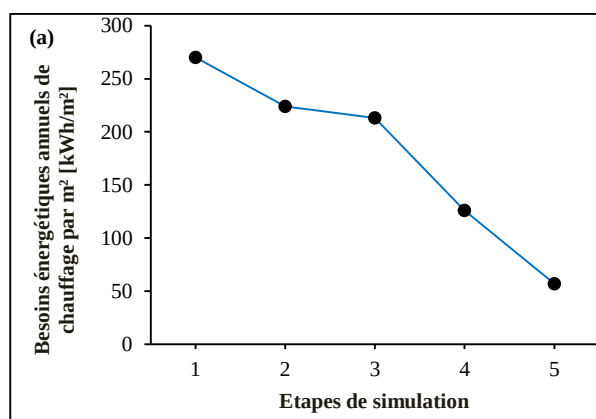


Figure 7a : Variation des besoins énergétiques annuels de chauffage selon les cinq scénarios de simulation

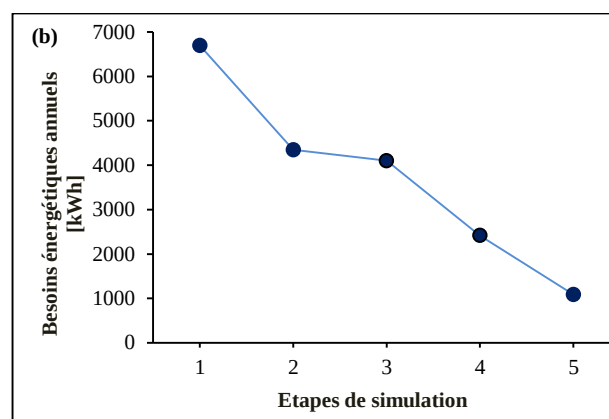


Figure 7b : Variation du total des besoins énergétiques annuels du prototype selon les cinq scénarios de simulation

5-1- Discussion et Interprétations des résultats :

Dans ce qui suit, nous allons discuter et comparer les résultats obtenus pour les cinq étapes de simulation, dans lesquelles nous avons renforcé à chaque fois l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment. Nous avons pensé à relier ces résultats à la dimension économique afin de mettre en valeur l'impact de l'inertie thermique non seulement sur la consommation énergétique du bâtiment mais aussi sur les factures et dépenses du ménage à court et long terme. Nous avons estimé, d'une part, les économies d'argent pouvant être faite annuellement grâce au taux d'énergie économisée pour chaque étape de simulation. D'autre part, nous avons évalué approximativement les éventuels coûts d'investissement pour chaque élément rajouté ou modifié à chaque étape. Ensuite, nous avons procédé à la déduction de ces coûts d'investissement à court terme sur la réduction conséquente des dépenses de fonctionnement à long terme ; en calculant la durée d'amortissement nécessaire pour compenser progressivement ces surcoûts.

A cet effet, les estimations, présentées dans le tableau 10 sont calculées sur la base des prix conventionnels sur le marché national algérien du kWh ainsi que des différents matériaux utilisés dans l'ensemble des étapes de simulation c-à-d :

- Le prix du kWh varie entre 1,779 DA¹¹ ; 4,179 DA ; 4,812 DA et 5,48 DA, le kWh correspondant respectivement aux tranches trimestrielles 1, 2, 3 et 4.
- Le prix d'1 m² de liège est de 840 DA.
- Le prix d'1 m² de polystyrène de 4 cm est de 500 DA.

¹¹ DA : Dinars Algérien

- Le prix d'1m² de double vitrage avec argon est de 600 DA.

Tableau 10 :

Estimation des économies et des surcoûts relatifs aux cinq étapes de simulation

Etapes de simulation	Besoins énergétiques annuels [kWh]	Taux d'économie d'énergie [%]	Economies financières [DA]	Coût d'investissement [DA]	Surcoût [DA]	Durée d'amortissement
1 (référence)	6 700	-	-	-	-	-
2	4 345	35	9 420	80 640 (96 m ² de liège)	71 220 (1 %)	7 ans et demi
3	4 102	4	972	65 807 (156.68 m ² de polystyrène)	64 835 (0,8 %)	6 ans
4	2 418	25	6 736	4 920 (8.2 m ² de double vitrage)	0 (gains > frais)	9 mois
5	1 088	20	5 320	2 400 (3 m ² de mur trombe)	0	5 mois
Total des solutions passives		84	22 448	+15 3767	136 055 (2 %)	6 ans (1 890 DA/mois)

La figure 8 illustre le rapport entre la variation de la consommation énergétique annuelle du cas d'étude et les économies financières estimées selon les différentes étapes de simulation. Ce diagramme en bâtons permet de mettre en évidence la corrélation positive entre la réduction des besoins énergétiques et les économies financières estimées.

En effet, et selon les écarts entre les différentes étapes de simulation, nous constatons bien que l'étape 2, où la réduction des besoins énergétiques est la plus importante, correspond à la valeur la plus élevée des économies financières. Par contre, l'étape 3 correspond à la valeur la plus faible en matière d'économies aussi bien, d'argent que d'énergie.

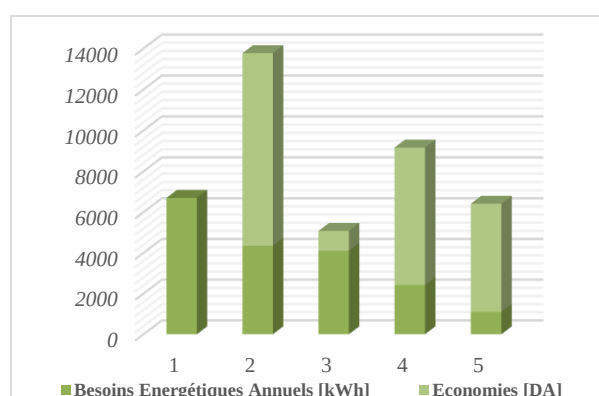


Figure 8 : Diagramme illustrant le rapport entre les besoins énergétiques annuels et les économies financières relatives à chaque étape de simulation

Les détaillée des résultats de chaque étape de simulation sont comme suit :

- Dans la 1^{ère} étape de référence correspondante à l'usage des matériaux conventionnels : la consommation énergétique annuelle est de 6 700 kWh avec 270 kWh/m² pour les besoins de chauffage. Si nous la comparons avec la consommation énergétique moyenne d'un logement situé à la ville de Constantine, et ce, selon les statistiques de SONEGAS de 2015, qui est de 26 047 kWh ; on constate une économie de 70 % en énergie ; l'équivalent de 77 388 DA/an. Cette réduction est possible, à notre sens, grâce à l'orientation favorable Sud/Nord ainsi que l'agencement adéquat des pièces lors de la conception du prototype.
- Dans la 2^{ème} étape correspondante au renforcement de l'inertie des murs extérieurs : Suites aux modifications apportées ; pour rappel le remplacement de la brique creuse ordinaire par la brique de terre cuite et le renforcement de l'isolation des murs par du liège expansé ; nous remarquons que le coefficient de transmission surfacique U du mur est passé d'une valeur de 0,531 W/m²K à 0,210 W/m²K (pour 12 cm d'isolant) et à 0,160 W/m²K pour le mur exposé au Nord (avec 18 cm d'isolant). Cela a permis une économie d'énergie de 35 % ; l'équivalent de 9 420 DA/an économisés contre un surcoût d'investissement de 1 % remboursable dans une durée d'amortissement de 7 ans et demi au rythme de 791 DA/mois. Les résultats de simulation de cette étape sont les plus éminents en matière d'économies d'énergie et d'argent. Nous estimons que

cela est dû au fait que, d'une part, les murs extérieurs représente la plus grande partie de l'enveloppe du bâtiment ; qui est exposée aux fluctuations climatiques et donc considérée comme l'une des principales sources de déperditions nécessitant ainsi un renforcement maximal de son inertie thermique. D'autre part, le choix d'un matériau à forte inertie thermique, tel que la brique de terre cuite, dans la composition du mur combiné avec une isolation par l'extérieur s'avère une solution efficace pour réduire la consommation énergétique du bâtiment.

- *Dans la 3^{ème} étape correspondante au renforcement de l'inertie des planchers* : on constate qu'après l'ajout du polystyrène expansé, le coefficient U des planchers est passé d'une valeur de 2,323 W/m²K à 0,69 W/m²K. Cela a permis une économie d'énergie de 4 % ; l'équivalent de 972 DA/an économisés contre un surcoût d'investissement de 0,8 % remboursable dans une durée d'amortissement de 6 ans au rythme de 900 DA/mois. Le pourcentage de réduction de la consommation énergétique relatif à cette étape est le plus faible. Nous estimons que cela est dû au fait que le prototype choisi est un appartement situé en étage intermédiaire et dont le plancher et le plafond ne sont pas exposés à l'extérieur et donc encore moins aux déperditions.

- *Dans la 4^{ème} étape correspondante au renforcement de l'inertie des vitrages* : on note qu'après l'utilisation du double vitrage avec gaz argon à la place du simple vitrage, le coefficient U des vitrages est passé de 5,74 W/m²K à 1,43 W/m²K. Cela a permis une économie d'énergie de 25 % l'équivalent de 6 736 DA/an économisés contre un surcoût d'investissement très faible et bien inférieure à la valeur économisée annuellement. Ce surcoût est donc remboursable dans moins d'une année, en l'occurrence 9 mois.

- *Dans la 5^{ème} étape correspondante à l'ajout du mur Trombe* : dont le coefficient de transmission surfacique $U = 0,313$ W/m²K, a permis une économie d'énergie considérable de 20 % l'équivalent de 5 320 DA/an économisés contre un surcoût d'investissement très faible et bien inférieure à la valeur économisée annuellement. Ce surcoût est donc remboursable dans moins d'une demi-année, en l'occurrence 5 mois. Ces résultats montrent combien le mur capteur est une solution efficace permettant de réduire considérablement la consommation énergétique du bâtiment.

Nous avons comparé précédemment, les résultats de chaque étape avec ceux de l'étape qui la précède, et ce,

afin d'évaluer l'impact de chaque solution à part. Par contre, pour évaluer l'impact de l'ensemble des solutions adoptées, nous comparons les résultats de simulation des besoins énergétiques de la cinquième étape avec ceux de la première étape de référence. Nous constatons ainsi que la combinaison de toutes ces solutions passives, qui ont été employées dans le but de renforcer l'inertie thermique du bâtiment, a permis une réduction considérable de sa consommation énergétique ; car les besoins énergétiques correspondants à la 5^{ème} étape sont six fois moins importants que ceux de la 1^{ère}. Ceci est l'équivalent de 84 % d'économie d'énergie, faisant diminuer les dépenses de fonctionnement sur le long terme d'une valeur de 22 448 DA/an ; contre un surcoût d'investissement sur le court terme de seulement 2 %, remboursable dans une durée d'amortissement moyenne de 6 ans au rythme de 1 890 DA/mois.

6- Conclusion :

Dans cet article, nous avons mis en exergue l'impact de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale sur l'efficacité énergétique ; et ce, dans le but de proposer des solutions passives permettant de réduire la consommation énergétique des bâtiments. Ceci est dans une optique globale de limiter les émissions de GES, qui ont de graves incidences aussi bien sur l'environnement et le bien être que sur l'économie.

Pour ce faire, notre méthode adoptée consiste à simuler les besoins énergétiques d'un prototype de logement de type collectif à Constantine soumis à un climat méditerranéen. Cette simulation a été réalisée principalement avec le logiciel de simulation TRNSYS 16, utilisant le modèle multizone (type 56). En se basant sur les résultats obtenus lors de cette simulation, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Toutes les solutions adoptées permettent de réduire les besoins énergétiques du cas d'étude. Cela confirme notre hypothèse selon laquelle le renforcement de l'inertie thermique de l'enveloppe architecturale permet de diminuer la consommation énergétique du bâtiment.
- La combinaison entre un matériau à forte inertie thermique, tel que la brique de terre cuite et l'isolation par l'extérieur, semble être la solution adéquate pour tirer le maximum de profit de l'inertie thermique des murs extérieurs. Cette solution a permis d'épargner la plus grande quantité d'énergie, à savoir 2 355 kWh/an, correspondant à 35 % d'économie d'énergie ;

• L'isolation des vitrages est indispensable pour renforcer l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment et ainsi réduire ses besoins énergétiques. Dans notre cas précis, elle a permis un taux de réduction notable de l'ordre de 25 % ;

• Le mur capteur s'avère comme l'une des solutions les plus efficaces permettant de réduire la consommation énergétique du bâtiment. Dans notre cas précis, il a entraîné une baisse suffisamment importante des besoins énergétiques selon un taux de réduction de 20 % ;

Enfin, la réduction maximale des dépenses énergétiques du bâtiment pourrait être obtenue grâce au renforcement optimal de l'inertie thermique de son enveloppe globale, qui comprend les murs extérieurs, les baies vitrées, le plancher ainsi que la toiture. En effet, l'ensemble des solutions passives adoptées dans cette étude a entraîné une réduction colossale des besoins énergétiques du prototype ; en lui permettant de consommer 84 % d'énergie en moins qu'un logement conventionnel contre un surcoût d'investissement de seulement 2 %, compensé par une réduction conséquente des dépenses de fonctionnement sur le long terme d'une valeur de 22 448DA par an.

Références :

- [1] GAUZIN-MULLER D., L'architecture écologique : 29 exemples européens, Paris, Edition Le Moniteur, 2001, 290 p, pp. 13
- [2] GAUZIN-MULLER, *ibid.*, pp.15-16
- [3] SCIAMIA Y., (2007) : Le changement climatique : Une nouvelle ère sur la terre, Edition Petite encyclopédie LAROUSSE, France, pp.78
- [4] Ministère de l'Energie : Bilan énergétique national de l'année 2015 [Document électronique]. Alger (Algérie), 2016, https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/ben2015_5b44b6722ca4c.pdf (Consulté le 22/03/2017)
- [5] Statistiques et prévisions énergétiques à partir de 2008 jusqu'à 2020 selon la direction de Sonelgaz de Constantine d'El Koudia (Algérie), 2015
- [6] Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG- Algérie) (2016). Electricité et gaz : nouveaux tarifs révélés. http://www.creg.gov.dz/Décisions/D_22-15_CD_FR.pdf (Consulté le 24/03/2017)
- [7] EL FGAIER F., (2013) : « Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue ». Thèse de Doctorat en Génie-civil. Ecole Centrale de Lille, pp 113
URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01242549>. (Consulté le 16/08/2017)
- [8] DJELLOUL A., DRAOUI B. et MOUMMI N., Simulation du comportement énergétique des bâtiments au sud algérien, Courrier du savoir, Université Mohamed Khider, Biskra (Algérie), 17 (2013) : 113-119. URL <http://revues.univ-biskra.dz/index.php/cds/article/view/369> (consulté le 30/06/2017)
- [9] Décret exécutif n°2000-90, portant sur la « Réglementation thermique dans les bâtiments neufs », J. Off. Rép. Algérienne, Art. 15, pp.32 et 33 [version électronique]
URL : <https://www.joradp.dz/HFR/Index.htm>
- [10] APRUE (2015) : Lancement en 2016 du nouveau programme d'efficacité énergétique. URL : <http://www.aprue.org.dz/adoption-energ-renouv.html> (consulté le 16/05/2017).
- [11] SOTEHI O. (2018) : « Modes de conversion de l'énergie solaire (Conversions photothermique et photovoltaïque et leurs utilisations dans l'habitat ». Thèse de Doctorat en sciences, Université Frères Mentouri Constantine 1, URL : <http://193.194.84.142/theses/gclim/SOT7317.pdf> (consulté le 15/10/2018)
- [12] BOURSAS A. (2013) : « Etude de l'efficacité énergétique d'un bâtiment d'habitation à l'aide d'un logiciel de simulation ». Mémoire de Magister en génie-civil, Université Constantine1, 145 pages, pp. 68. URL: <https://bu.umc.edu.dz/theses/gclim/BOU6450.pdf>. (Consulté le 17/10/2017)
- [13] AMARA S., BENMOUSSAT A., BENYOUCEF B. et NORDELL Bo (2007). « Evaluation des besoins énergétiques de chauffage et climatisation d'un bâtiment pour le site de Tlemcen ». 13^{ème} Journées Internationales de Thermique (JITH), 2007, Albi, France, pp. 05. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00167356> (Consulté le 11/12/2016)
- [14] LIÉBARD, A. et al. (2004) : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Edition LE MONITEUR, Paris, pp. 368, pp.91.
- [15] SIDLER O. (2003), L'inertie thermique des bâtiments - consommation et confort d'été en climat méditerranéen. In Colloque, Montpellier, France, 15 pages, pp 03. URL : <https://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/44/Inertie%20thermiqu.pdf> (Consulté le 05/04/2017)
- [16] CHAHWANE L., (2011), « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments », Thèse de Doctorat. Architecture, aménagement de l'espace, Université de Grenoble, France, 223 pages, pp 191. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00701170>. (Consulté le 10/04/2017)
- [17] MUNARETTO F. (2014), « Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments ». Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 322 pages, pp. 21 et 22. URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01068784>. (Consulté le 27/02/2019)
- [18] LIÉBARD A. et al. (2004), *op. cit.*, pp.92 et 133.
- [19] LIÉBARD A. et al. (2004), *ibid.*, pp. 133.
- [20] CHAHWANE L. (2011), *op. cit.*, pp. 223.
- [21] RIF N. (2008), L'Habitat durable en Algérie. La première maison bioclimatique sera rurale, Liberté Algérie. URL : <https://www.liberte-algerie.com/actualite/la-premiere-maison-bioclimatique-sera-rurale-57986>. (Consulté le 09/09/2018)
- [22] EL FGAIER F. (2013), *op. cit.*, pp. 96.
- [23] MEDERREG M. E-O (2007), Fabrication des briques en terre cuite et des tuiles. Recueil des fiches sous-sectorielles. EDPme. URL : <https://fr.scribd.com/doc/81825514/Algerie-Fabrication-de-briques-en-terre-cuite-et-de-tuiles-2007>. (Consulté le 11/09/2018)
- [24] LIÉBARD, A. et al. (2004), *op. cit.*, pp. 91.
- [25] LIÉBARD, A. et al. (2004), *ibid.*, pp.72.
- [26] JIE, J. HUA, Y. GANG, P. BIN, J. WEI H., Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan, Building and Environment, 42 (10) (2007) : 3529-3539.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.038>
- [27] TYAGI, V., BUDDHI, D., P CM thermal storage in buildings: A state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11 (6) (2007) : 1146-1166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>
- [28] Nwosu P. Nwachukwu, Wilfred I. Okonkwo., Effect of an Absorptive Coating on Solar Energy Storage in a Trombe wall system, Energy and Buildings, 40 (3) (2008) : 371-374.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.004>
- [29] ADEME (2006) : Isolation par l'extérieur. Bordeaux.
- [30] SADINENI, S. B., MADALA, S., BOEHM, R. F., Passive building energy savings: A review of building envelope

components, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (8) (2011): 3617-3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>

[31] LIÉBARD, A. *et al.* (2004), *op. cit.*, pp. 53.

[32] SOFATPO (2014) : Isolation extérieure en liège expansé, El Harrach, Alger. URL : <http://www.sofatpo.dz/index.php/nos-produits> (consulté le 10/05/2017)

[33] MUNARETTO, Fabio (2014), *op. cit.*, pp. v.
