

# Impact du zonage climatique sur l'efficacité énergétique d'un bâtiment en Tunisie

Naima Guedich #1, Rahma Ben Amor #2

#1,2Département Génie Civil, Institut Supérieur des Études Technologiques de Sfax 1, Nabeul 2, Tunisie

1naima.guedich@hotmail.fr

2rahmabenamor@gmail.com

## Résumé—

La Tunisie est un des rares pays en développement qui a accordé une très grande importance à l'instauration d'une politique nationale dans le domaine de l'énergie, de l'environnement et de développement viable. Cette politique est basée essentiellement sur l'utilisation rationnelle de l'énergie et la diminution des émissions des gaz à effet de serre. Le secteur de bâtiments, surtout les bâtiments neufs représentent un gisement très important d'économie d'énergie de ce fait, les efforts se sont de plus en plus orientés vers la conception des bâtiments confortables thermiquement avec une consommation énergétique bien maîtrisée.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier dans une première partie, l'impact de quelques choix effectués lors de la phase de conception d'un bâtiment résidentiel situé dans la zone de Tunis sur sa consommation énergétique, le résultat est vérifié vis-à-vis de la réglementation Tunisienne. Diverses solutions intéressantes et efficaces sont proposées, ce qui permet de faire un choix pertinent économe en énergie.

On présente dans une deuxième partie l'effet de l'emplacement géographique, la nature et la spécificité du climat sur la consommation énergétique en discutant la fiabilité du découpage proposé par la réglementation thermique. Pour cela on fait appel à un des outils de simulation, le logiciel CLIP qui permet de déterminer pour chaque cas étudié la classe de performance énergétique. La troisième partie permet de mettre en évidence la rentabilité de l'isolation à travers une étude économique de surcoût.

**Mots clés—** Consommation d'énergie – isolation – orientation – ombrage – efficacité énergétique – zonage climatique – climat – surcoût

## I. INTRODUCTION

La Tunisie a connu durant les dernières années une croissance socio-économique assez importante touchant différents secteurs. Elle s'est traduit sur le plan énergétique par un déséquilibre marqué par des ressources d'énergie primaire en recul de près de 6% par an, chutant de 7,8 Mtep en 2010 à 5,4 Mtep en 2016, et des besoins en énergie primaire en croissance de plus de 2% par an, passant de 8,3 Mtep en 2010 à 9,2 Mtep en 2015[1].

Le contexte national est marqué par l'aggravation du déficit énergétique et l'accroissement de la dépendance à l'égard des importations des énergies fossiles, rendant le renforcement de l'efficacité énergétique comme une nécessité pour permettre à la Tunisie de retrouver sa sécurité énergétique, de réduire la vulnérabilité de ses équilibres et encore de préserver l'environnement par la diminution des émissions des gaz à effet de serre. Sur la période 2010-2017, l'évolution du paysage énergétique Tunisien a été marquée par un certain nombre de problèmes qui se sont traduits par une baisse des ressources énergétiques de 38%, une augmentation des besoins énergétiques de 14% et un accroissement de la dépendance énergétique qui s'est élevée à 49% en 2017 [2]

Pour combler ce déficit, la Tunisie semble vouloir accélérer sa politique en matière d'efficacité énergétique non seulement pour protéger l'environnement mais aussi pour réduire sa facture énergétique qui devrait représenter en 2018 plus de 33% de son déficit commercial [3].

Afin d'atteindre les objectifs inscrits dans sa politique énergétique les acteurs dans le domaine de bâtiments doivent mettre en œuvre des actions économes et efficaces permettant de réaliser des économies d'énergie à moindre coût, en respectant le confort des occupants. Le mode de conception des bâtiments produit massivement des gaz à effet de serre dus essentiellement à l'utilisation des équipements de chauffage et de climatisation pour assurer le confort thermique des occupants car un bâtiment devrait assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur. Lorsqu'il est inadapté à son climat, il a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en saison froide. Ces bâtiments consomment de grandes quantités d'énergie pour assurer un confort acceptable [4].

Le travail réalisé est une contribution à l'effort de la maîtrise de l'énergie dans le secteur de bâtiment, dont le but est de déterminer les meilleures dispositions et mesures permettant d'avoir un bâtiment peu énergivore qui s'intègre parfaitement au climat et à la topographie de son environnement selon trois axes distincts et complémentaires.

Le premier consiste à étudier l'effet de quelques paramètres d'efficacité énergétique sur la consommation énergétique du

bâtiment essentiellement l'orientation du vitrage, son type et son pourcentage, l'ombrage et la nature des matériaux de construction. Les résultats trouvés sont par la suite vérifiés vis-à-vis de la réglementation tunisienne. On analysera dans une deuxième partie, la fiabilité des résultats trouvés par rapport au découpage proposé par la réglementation thermique. Pour mettre en évidence l'effet de l'isolation thermique, on présente dans une troisième partie une étude économique illustrant le surcout engendré par l'isolation et sa rentabilité économique dans le temps.

## II. CADRE ET APPROCHE

Le travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments en bénéficiant des avantages du site de construction et la morphologie de l'environnement existant. Les mesures d'efficacité énergétique proposées dans cette étude visent la conception des bâtiments peu énergivores, ce qui permet de renforcer la stratégie de développement durable adoptée par le pays.

### A. Description De Cas D'étude

Le choix s'est porté sur un bâtiment à usage d'habitation de type villa de superficie 230 m<sup>2</sup> situé à la zone de Tunis et dont la façade principale est orientée Nord. Le bâtiment comporte 4 façades exposées au vent, chacune est constituée par des murs extérieurs et des fenêtres. La figure 1 représente l'architecture du cas d'étude choisi.

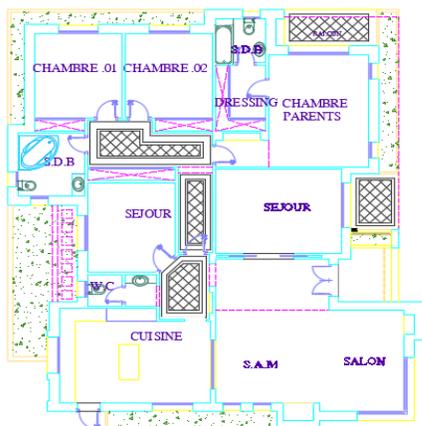


Fig. 1. Plan du bâtiment étudié.

### B. Paramètres étudiés

Le but de cette partie est de déterminer les meilleurs techniques à mettre en œuvre lors de la conception et l'exécution pour rationaliser la consommation de l'énergie, les mesures étudiées sont représentés par la figure 2.

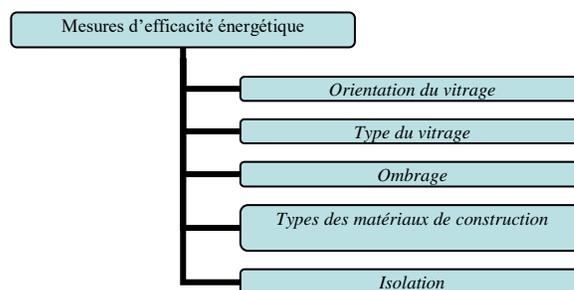


Fig. 2. Mesures d'efficacité énergétique.

#### 1) Orientation du vitrage

Le vitrage joue un rôle important dans le comportement thermique d'un bâtiment, néanmoins son orientation n'est pas à négliger. Les apports solaires dépendent de la trajectoire du soleil et de la durée d'exposition, ils sont ainsi liés à la position du soleil qui change d'une direction à une autre. C'est à travers cette réflexion que l'influence de ce paramètre a été analysée. Dans notre cas d'étude les baies vitrées sont concentrés sur la façade principale Nord. On calculera les déperditions thermiques dans ce cas puis on abordera les différents cas d'orientation de la façade principale.

#### 2) Type du vitrage

Les fenêtres sont nécessaires dans un bâtiment pour le confort et pour bénéficier des apports solaires. Cependant elles constituent un véritable gouffre énergétique surtout en hiver [5], l'idée est d'étudier l'influence de différents types de vitrages à installer pour voir leurs effets sur la consommation d'énergie. Les caractéristiques thermiques des vitrages utilisés sont regroupées dans le tableau I.

TABLE I.  
 CARACTERISTIQUES THERMIQUES DES VITRAGES.

Fenêtre	Coef de transmission U [W/m2K]	Facteur solaire
Simple vitrage	6.172	0.95
Double vitrage	3.163	0.85
Double vitrage faiblement émissif	1.658	0.48
Triple vitrage	1.2	0.45

#### 3) Ombrage

Le choix de la position d'ombrage doit dépendre des conditions d'ensoleillement de ce fait, les apports solaires en hiver sont les bienvenus car ils permettent d'économiser une quantité importante d'énergie. Par contre en été ils sont à éviter puisqu'ils causent des surchauffes. La solution optimale à envisager est donc différente selon l'orientation de la façade et l'environnement du bâtiment. Pour le cas étudié le facteur ombrage est absent vue l'absence de la végétation et des protections solaires de tout type. On proposera dans ce cas une création d'ombrage par des dispositions mobiles amovibles

permettant de réduire les apports en chaleur en été tout en permettant leurs pénétrations en hiver.

#### 4) Types des matériaux de construction

Les matériaux de construction doivent faire l'objet d'un choix judicieux car les besoins énergétiques dépendent fortement de la qualité de l'enveloppe du bâtiment, de ce fait les matériaux utilisés peuvent soit augmenter ou baisser les besoins selon leurs caractéristiques thermiques. Pour analyser l'effet de ce facteur quatre différents types de matériaux de construction pour les parois verticales ont été examinés.

Le premier type est un mur mono cloison formé par des briques creuses, la description de la composition des différentes couches du mur de l'intérieur vers l'extérieur est donnée par le tableau II.

TABLE II.  
 COMPOSITION DE MUR DE BRIQUES CREUSES

Matériaux	Enduit plâtre	Briques de 12 sur chant	Enduit de mortier
Épaisseur e [cm]	1	20	2.5
Conductivité [W/m°K]	0.35	0.47	1.15

Le deuxième est un mur en double cloison d'épaisseur 35 cm. Les caractéristiques de différentes couches ainsi que leurs épaisseurs et leurs conductivités thermiques sont présentées dans le tableau III.

TABLE III.  
 COMPOSITION DE MUR DOUBLE CLOISON.

Matériaux	Enduit plâtre	Briques 12 sur chant	lame d'air	Briques plâtrières	Enduit ciment
Épaisseur e [cm]	1	20	5	6.5	2.5
Conductivité [W/m°K]	0.35	0.47	0.3	0.47	1.15

Le troisième type étudié est un mur traditionnel formé en pierres de tailles d'épaisseur 45 cm, les caractéristiques des différentes couches sont illustrées dans le tableau IV.

TABLE IV.  
 COMPOSITION DE MUR EN PIERRES.

Matériaux	Enduit mortier	Pierres de taille	Enduit mortier
Épaisseur e [cm]	2.5	40	2.5
Conductivité [W/m°K]	1.15	1.77	1.15

Le dernier mur testé est un mur écologique formé en blocs de terre comprimés comme s'est indiqué par le tableau V.

TABLE V.  
 COMPOSITION DE MUR EN BRIQUES DE TERRE COMPRIMEE.

Matériaux	Enduit mortier	Blocs de terre comprimés	Enduit mortier
Épaisseur e [cm]	2.5	40	2.5
Conductivité [W/m°K]	1.15	1.3	1.15

On se propose également d'identifier le coefficient de transmission thermique U global des différents murs extérieurs. Le tableau VI présente les coefficients de transmission des différents types des murs extérieurs.

TABLE VI.  
 COEFFICIENTS DE TRANSMISSION DES MURS EXTERIEURS.

Type de mur	Coefficient de transmission U [W/m²°K]
Mono cloison	1.53
Double cloison avec lame d'air	1.05
Mur en pierres	2.25
Briques de terre comprimée	1.92

Pour la toiture, on garde la même structure en étudiant uniquement l'effet de variation de la composition des murs extérieurs. Les épaisseurs et la conductivité thermique des couches constituant la toiture sont présentées par le tableau VII.

TABLE VII.  
 COMPOSITION DU PLANCHER HAUT TERRASSE.

Matériaux	Épaisseur e [cm]	Conductivité [W/m°K]
Carrelage	3	0.47
Mortier	2.5	1.15
Lit de sable	2	0.33
Étanchéité	0.4	0.23
Enduit de ravaillage	1	1.15
Béton	15	1.75
Corps creux	16	0.94
Mortier	2	1.15

#### 5) Isolation

Le rôle de l'isolation thermique est de s'opposer au passage des flux de chaleur qui tendent à traverser l'enveloppe d'un bâtiment à travers des zones faibles thermiquement. Ces zones sont multiples et estimés aux portions suivants : toiture 30%, murs 25%, fenêtre 13%, ponts thermiques 5%, sol 3%, [6]. Plus le flux échangé entre l'ambiance intérieure et extérieure est important plus le confort thermique n'est plus garanti. La solution étant d'affaiblir ces transferts en intercalant des matériaux de bonnes performances thermiques. Pour cela, on essaiera d'appliquer une isolation au niveau de la toiture et des murs.

### C. Effet du Climat

Le bâtiment est en interaction permanente avec son environnement, la consommation énergétique est en relation étroite avec l'environnement extérieur qui change selon la saison et l'emplacement géographique. Pour mettre en lumière l'effet de ce paramètre plusieurs régions sont testées, ces régions sont réparties dans Nord, le centre et le Sud. Les régions analysées sont les suivantes :

- Tunis, Nabeul pour le Nord
- Kef et Béja pour les hauts plateaux Nord
- Kairouan pour le centre
- Tozeur, Kebili, Médenine et Gabes pour le Sud

### D. Méthode de calcul

Les transferts thermiques au sein de l'enveloppe sont traités par simulation numérique. Sachant qu'une paroi de bâtiment peut donner lieu à trois transferts thermiques différents :

- la conduction au sein de la paroi,
- la convection entre les faces de la paroi et les ambiances fluides qu'elle sépare,
- le rayonnement à travers des rayons infrarouges.

L'étude thermique est élaborée par le logiciel de simulation numérique « CLIP », le principe est de diviser le bâtiment en éléments simples murs, planchers et vitres. Le logiciel permet de situer dans chaque cas, la consommation énergétique du bâtiment par rapport à la réglementation thermique tunisienne.

## III. ANALYSE ET INTERPRETATION

### A. Étude Paramétrique

Le bâtiment étudié présente une façade principale Nord, Pour mettre en évidence l'effet de l'orientation du vitrage, les besoins énergétiques en hiver et en été ont été calculés. Les baies vitrées sont considérées uniquement sur la façade étudiée en gardant une surface constante pour les différents murs extérieurs, le vitrage utilisé est simple d'épaisseur 6 mm. Les résultats trouvés ont été comparés par rapport aux quatre directions. La figure 3 montre les besoins énergétiques en hiver liés au confort thermique, on remarque que la direction la plus favorable énergétiquement est la direction Sud puisqu'elle présente le moins des besoins. En la comparant à la direction Nord on constate une augmentation importante des besoins qui passent progressivement de 40 KWh/ m<sup>2</sup> à 50 KWh/ m<sup>2</sup>. Cette constatation s'explique par le fait que la paroi exposée direction Sud offre un meilleur ensoleillement en hiver du fait qu'elle est éclairée naturellement pendant les heures les plus intéressantes de la journée. La direction Nord ne reçoit pratiquement pas des apports solaires utiles en saison froide elle est ainsi pénalisante en hiver causant souvent une sensation d'inconfort thermique qui peut être accentué par l'apparition de moisissures.

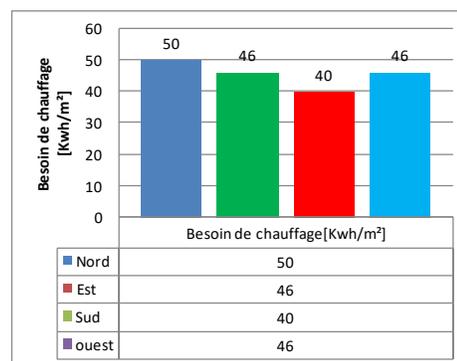


Fig. 3. Besoin énergétique de chauffage.

Le passage d'une orientation Nord à une orientation Sud permet un gain de 20 % en hiver. En été la direction Nord est toujours à l'abri du soleil. Pour le Sud, les apports solaires sont limités puisque selon la trajectoire du soleil elle se trouve en dessus du bâtiment. L'utilisation des protections solaires pour les vitrages peut réduire considérablement les rayonnements solaires. En comparant les besoins annuels de chauffage et de climatisation, on peut conclure que la direction Sud reste toujours la plus avantageuse. La figure 4 montre l'évolution des besoins annuels pour les quatre directions.

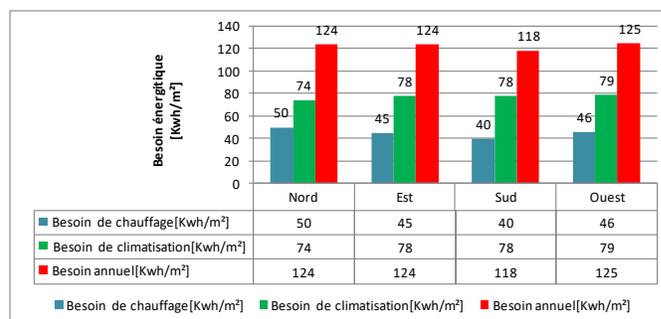


Fig. 4. Besoins énergétiques annuels des différentes orientations.

L'Est est la deuxième direction à privilégier après le Sud, le problème majeur est la direction des rayons solaires qui pénètrent directement par les ouvertures ce qui est difficile à réduire par les protections solaires. Pour l'Ouest les rayons solaires arrivent au moment le plus chaud de la journée en été ce qui est peu toléré par l'utilisateur.

Le gain annuel en privilégiant une direction Sud par rapport à une direction Nord est d'environ 5 %, ce gain correspond à un taux relatif de baies vitrées d'environ 20 %. Il peut être amélioré pour des taux plus élevés des baies vitrées. La figure 5 montre l'évolution de la valeur du gain en fonction de pourcentage de baies vitrées. D'après les résultats on peut affirmer que l'orientation du vitrage permet une réduction considérable d'énergie surtout pour les grandes surfaces vitrées. Cette réduction peut atteindre environ 9.4 % pour le cas d'un taux relatif de baies vitrés de 50%.

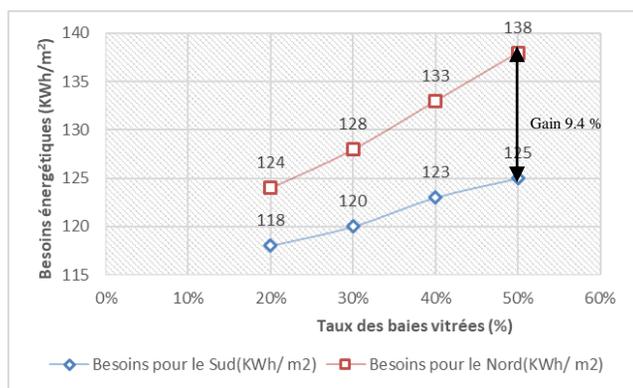


Fig. 5. Évolution des besoins énergétiques annuels en fonction du taux relatif des baies vitrées.

L'optimisation de l'orientation des baies vitrées conduit à choisir une orientation principale Sud, une minimisation des surfaces vitrées orientées direction Nord, des surfaces vitrées raisonnées et réfléchies pour les orientations Est et Ouest ce qui contribuerait à l'amélioration de l'éclairage naturel en hiver et la ventilation naturelle en été lorsque les fenêtres sont ouvertes [7].

Considérant une façade principale Sud, le but étant toujours d'améliorer la performance thermique du bâtiment. On considère maintenant la géométrie réelle du bâtiment étudié, on s'intéresse dans cette partie à l'étude de l'impact de la qualité du vitrage sur la consommation énergétique du bâtiment, les résultats du besoin annuel en fonction du type de vitrage sont représentés dans la figure 6.

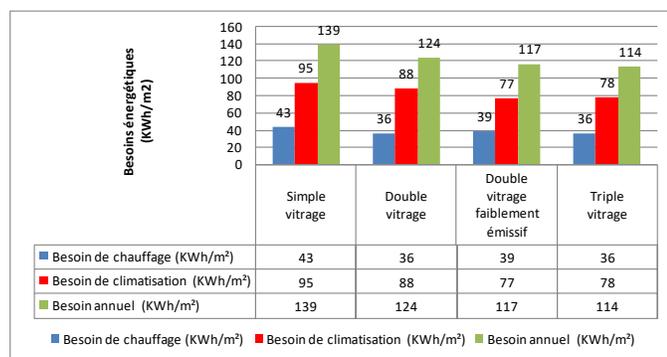


Fig. 6. Variation des besoins énergétiques annuels en fonction du type de vitrage utilisé.

On remarque que le triple vitrage est le plus efficace thermiquement, en deuxième place on a le double vitrage faiblement émissif. Le gain réalisé en privilégiant ce type de vitrage est de 15.8% par rapport à un vitrage simple cela est expliqué par sa nature puisqu'il comporte un revêtement spécial qui diminue la chaleur perdue vers l'extérieur. Vu que le triple vitrage n'est pas largement commercialisé, on garde le choix d'un double vitrage faiblement émissif pour ce cas d'étude.

L'efficacité du vitrage peut être améliorée par la création de l'ombrage, ce facteur est fortement lié au pourcentage des rayons solaires pénétrant dans le bâtiment. Les apports

solaires constituent une source d'ensoleillement en hiver, mais ils sont une source de surchauffe pendant l'été, ils doivent être ainsi réduits pour une meilleure sensation de confort. À cet effet plusieurs pourcentages d'ombrage ont été analysés. La figure 7 illustre la variation des besoins énergétiques en été en fonction de ce paramètre. Les résultats obtenus montrent que plus le pourcentage d'ombrage est important plus les besoins énergétiques sont réduits.

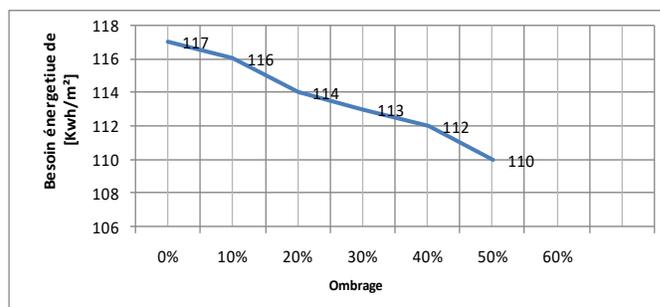


Fig. 7. Évolution du besoin énergétique en été en fonction du pourcentage d'ombrage.

L'analyse des résultats trouvés permet de tirer une direction principale Sud avec un double vitrage faiblement émissif et tel que le pourcentage d'ombrage est de 50%. La performance énergétique du bâtiment dépend encore des types des matériaux utilisés. Ce paramètre a été étudié pour le cas des parois verticales, la figure 8 montre la variation du besoin énergétique annuel en fonction du type du matériau utilisé pour les murs extérieurs.

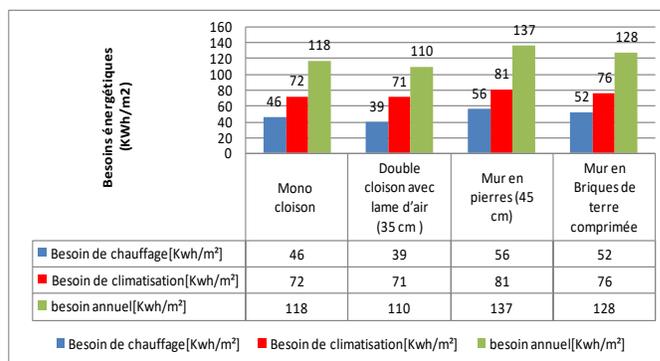


Fig. 8. Variation des besoins énergétiques en fonction des matériaux de construction choisis.

On remarque qu'en privilégiant un mur double cloison avec une lame d'air, le besoin énergétique est réduit de 6.78 % par rapport à un mur mono cloison, de 14 % par rapport à un mur en BTC et de 19.7 % par rapport à un mur en pierres. La réduction du besoin est justifiée par la nature du mur double cloison formé par des briques alvéolées, l'air se trouve ainsi immobilisé dans les pores ce qui permet de supprimer la transmission d'énergie par convection de même pour la lame d'air de 4 cm puisqu'elle jouera le rôle d'un isolant thermique permettant une nette amélioration de la performance thermique de la paroi.

Les murs en pierres et en BTC offrent un confort thermique élevé surtout l'été. Ce confort est justifié par leurs capacités

thermiques importantes, ces matériaux permettent d'absorber, emmagasiner puis diffuser l'énergie avec un déphasage dans le temps. Cette notion diffère de l'isolation qui fonctionne par l'atténuation du flux de chaleur entre le local et l'extérieur, l'inertie quant à elle s'oppose aux changements, elle atténue les fluctuations de température et de flux.

L'association des choix précédents pour l'orientation, le type de vitrage, l'ombrage et le choix des matériaux ont permis d'améliorer la performance thermique du bâtiment. L'isolation est aussi parmi les mesures les plus efficaces en termes de réduction des déperditions thermiques [7]. Pour mettre en évidence l'effet de ce facteur on se propose d'insérer différents types d'isolants pour les murs extérieurs et la toiture. Pour la toiture on garde les mêmes couches du plancher haut terrasse et on intercale une couche de polystyrène extrudé de conductivité thermique  $0.035 \text{ W/m}^2\text{K}$  et d'épaisseur 7 cm. La valeur du coefficient de transmission de la toiture passe ainsi de  $1.71 \text{ W/m}^2\text{K}$  à  $0.386 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Pour les murs extérieurs, la lame d'air est remplacée par la laine de roche de conductivité  $0.04 \text{ W/m}^2\text{K}$ . L'intercalation de cette couche d'isolant a permis de baisser le coefficient de transmission des murs extérieurs de  $1.05 \text{ W/m}^2\text{K}$  à  $0.49 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Les résultats présentés dans le tableau VIII montrent que les besoins énergétiques annuels ont été diminués d'environ 46.5%, ce gain a permis non seulement une amélioration du confort thermique mais encore une réduction de la facture d'électricité. Les performances souhaitées dépendent de la nature et de l'épaisseur de l'isolant utilisé. Pour les murs extérieurs le choix de 4 cm est justifié par l'épaisseur de la lame d'air, pour la toiture plus on augmente l'épaisseur plus l'isolation est meilleure toutefois les contraintes coût et facilité d'exécution sont à prendre en considération.

TABLE VIII.  
BESOINS ENERGETIQUES AVANT ET APRES L'ISOLATION

Besoins énergétiques sans isolation [KWh/m <sup>2</sup> ]	Besoins énergétiques avec isolation [KWh/m <sup>2</sup> ]
110	59

Ce qui précède a montré l'intérêt de tout paramètre pour optimiser la consommation et améliorer le confort. On retiendra qu'un seul paramètre ne suffit pas pour assurer un confort optimal. La prise en considération de tous les paramètres permet d'atteindre une valeur considérable du gain permettant multiple avantages sur différents plans.

### B. Effet Du Climat

Les paramètres analysés précédemment ont pour but de trouver les meilleurs dispositions et mesures permettant de rationaliser la consommation énergétique. La quantité d'énergie économisée est fonction d'un autre facteur qui est le climat car les spécifications climatiques influencent énormément l'intensité des échanges entre l'enveloppe thermique du bâtiment et le milieu extérieur. Bien que la Tunisie est un pays qui présente une petite surface non étendue, la nature du climat est différente d'une zone à une autre selon son emplacement géographique. La consommation

énergétique obtenue pour les différentes régions testées sont représentés dans le tableau IX.

TABLE IX.  
LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES REGIONS.

Région	Besoin de climatisation [KWh/m <sup>2</sup> ]	Besoin de chauffage [KWh/m <sup>2</sup> ]	Besoins annuels [KWh/m <sup>2</sup> ]
Tunis	71	39	110
Nabeul	71	39	110
Gabès	61	36	97
Béja	77	68	144
Kef	78	69	148
Kairouan	76	46	121
Tozeur	105	33	138
Kébili	105	33	138
Médenine	81	36	118

Les résultats montrent une variation de la consommation énergétique d'une région à une autre. Tunis et Nabeul sont situées au Nord, ils présentent la même valeur de consommation qui est proche de la valeur de consommation de Gabès malgré son emplacement géographique au Sud. De même Kef et Béja présentent des valeurs rapprochées qui sont largement supérieures à la consommation énergétique au Kairouan situé au centre du pays. Pour les régions du Sud, la consommation énergétique de Médenine est inférieure à Tozeur et Kébili qui ont le même besoin énergétique. La différence entre les valeurs trouvées peut être expliquée par les spécificités climatiques et géographiques de chaque région.

Tunis et Nabeul sont des zones côtières situés au Nord caractérisées par un climat tempéré. Leurs emplacements à proximité de la mer leur offre un climat méditerranéen maritime caractérisé par un été sec et chaud et des hivers frais, pluvieux et humides. L'irradiation solaire est moyennement élevée en hiver.

Gabès présente un climat maritime aussi, qui se caractérise par des faibles amplitudes journalières de température, été comme hiver.

Kef et Béja se trouvent au Nord-Ouest loin de la mer, elles sont caractérisées par un climat très continental, leur emplacement géographique au centre des terres est responsable d'un été chaud et d'un hiver plus froid et glacial que les régions qui bénéficient des effets adoucissants de la mer. Le rayonnement solaire dans ses régions est faible surtout en hiver ce qui justifie l'augmentation importante des besoins de chauffage en hiver.

Kairouan se trouve au centre du pays, son climat est continental avec un hiver frais et un été très chaud. Le rayonnement solaire est plus intense durant l'hiver par rapport à Kef et Béja.

Pour Tozeur et Kébili, le plateau continental, présente une pente très douce, et très étendue leur emplacement au sud leur offre un climat sec et aride caractérisé par des journées fortement ensoleillées et des nuits douces et modérées d'où un besoin de chauffage très faible par rapport aux autres régions.

Médenine est situé au Sud – Est du pays, elle appartient à l'étage bioclimatique aride avec un hiver doux, son

emplacement limité par la mer méditerranée lui offre un climat plus toléré par rapport à Tozeur et Kébili [8].

Les résultats obtenus justifient le découpage géographique de la Tunisie en trois zones climatiques réglementaires qui sont [9] :

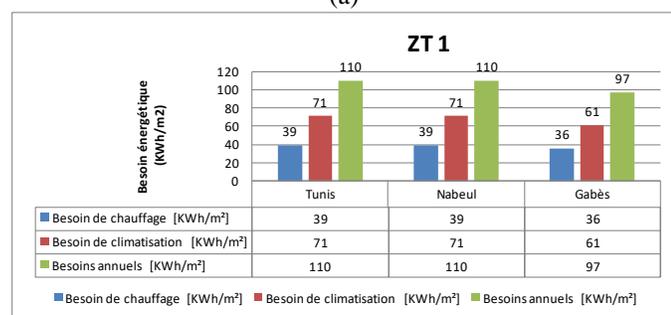
- La ZT1 appelée zone méditerranéenne qui renferme le littoral allant du gouvernorat de Bizerte à celui de Gabès.
- La ZT2 des hauts plateaux du Nord constituée par le Nord et le Centre hors littoral, s'étendant du gouvernorat de Jendouba au gouvernorat de Gafsa.
- La ZT3 qui renferme les gouvernorats de Tozeur, de Kébili et de Tataouine.

Avec l'instauration de cette réglementation, le permis de bâtir ne sera délivré que lorsque le bâtiment analysé sera conforme aux exigences minimales d'économie d'énergie selon son appartenance à une zone climatique réglementaire.

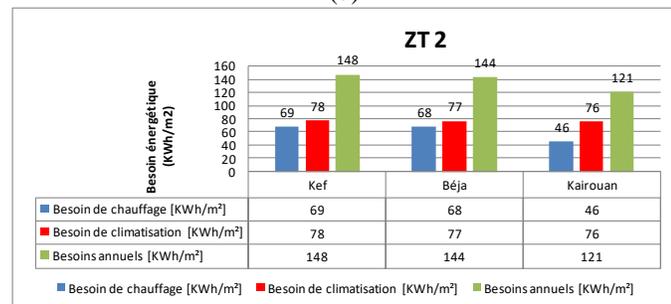
Bien que les résultats obtenus confirment ce zonage climatique, la consommation énergétique varie pour des régions appartenant à la même zone climatique.

Même si le besoin annuel est proche pour les régions appartenant à la même zone climatique réglementaire, les besoins de chauffage et de climatisation sont différents. La figure 9 illustre les besoins énergétiques des régions pour chaque zone réglementaire.

(a)



(b)



(c)

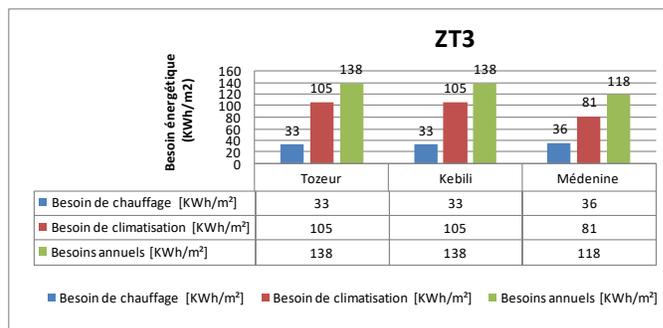


Fig. 9. Besoin énergétique des régions pour chaque zone.

Gabès appartient à la zone climatique réglementaire 1 qui renferme les gouvernorats qui présentent des limites avec la mer méditerranée. Ce critère est pris en considération pour l'élaboration du zonage climatique, les faibles amplitudes de températures en été et le climat aride tempéré justifie la baisse du besoin énergétique par rapport à Nabeul et Tunis.

Béja, Kef et Kairouan sont trois régions appartenant au Nord et au centre hors littoral, ils font partie de la même zone climatique réglementaire 2 ce qui suppose la même nature du climat. Les régions de Kef et de Béja ont un emplacement géographique caractérisé par des altitudes importantes et par la suite une consommation énergétique très élevée surtout en hiver à l'opposé de Kairouan qui présente une pente moyenne ainsi des besoins modérés en hiver.

Tozeur et Kébili présentent presque le même besoin annuel, Médenine appartient à la même zone 3 mais elle présente un besoin inférieur, cela est justifié par l'été moins sec d'où des besoins de climatisation moins importants.

L'analyse de la figure 9 montre que le modèle de découpage réglementaire proposé ne prend pas en considération les modifications des milieux urbains qui influencent les microclimats ni les modes d'adaptation dans chaque région climatique. On s'aperçoit qu'il est difficile de transposer une méthode de calcul mise au point à partir des conditions climatiques spécifiques d'une région à l'autre, car cela peut entraîner un certain nombre de problèmes sur les plans thermiques des enveloppes architecturales, énergétiques et hygrothermiques dans le bâtiment [8].

L'élaboration du zonage réglementaire s'est basée sur les données suivantes [9] :

- La température minimale quotidienne
- L'humidité relative moyenne
- L'irradiation globale quotidienne sur le plan horizontal
- La durée quotidienne d'ensoleillement

Les données prises en considération sont des données climatiques. Le tableau X illustre les valeurs de température de base et l'humidité relative dans le cas de chauffage et climatisation pour les différentes régions analysées.

TABLE X.  
TEMPERATURE DE BASE ET L'HUMIDITE RELATIVE DES REGION

Région	Température de Base [C°]		Humidité relative [%]	
	Chauffage	Climatisation	Chauffage	Climatisation
Tunis	4	33	94	41
Nabeul	4	33	94	41
Gabes	7	34	85	40
Béja	2	37	96	27
Kef	2	36	90	22
Kairouan	4	37	79	27
Tozeur	5	40	74	19
Kebili	5	40	74	19
Médenine	5	40	74	14

Le tableau X montre que les régions appartenant à la même zone climatique réglementaire présentent les mêmes valeurs de température pour le calcul des besoins de chauffage et de refroidissement, tel que le cas de la zone 3 où les valeurs de température sont les mêmes pour les trois régions. Pour l'humidité relative elle varie dans un ordre décroissant du nord vers le sud et des pays présentant une limite avec la mer vers les pays qui se trouvent au centre.

L'effet du relief, la composition géologique et les ressources naturelles ont été négligés lors de l'élaboration du zonage. Cela justifie les valeurs différentes du besoin de chauffage et de climatisation pour chaque région car une zone climatique doit comporter les régions présentant les mêmes spécifications par contre, on trouve Gafsa et Jendouba appartenant à la même zone climatique réglementaire pourtant, le climat y est assez différent. Cette différence des besoins énergétiques ne provient pas uniquement du climat mais encore de la spécificité de l'emplacement géographique de Gafsa caractérisé par des fortes altitudes avec une moyenne de 313 m par rapport à 143 m à Jendouba. Le tableau XI présente les altitudes des différentes régions étudiées de la zone 2.

TABLE XI.  
ALTITUDES DES DIFFERENTES REGIONS

Région	Kef	Béja	Kairouan
Altitude [m]	518	258	60

Le zonage climatique recommandé a été élaboré pour raffiner le découpage en prenant en considération les données géographiques et même socio-économiques ce qui permet donc d'avoir une information plus pointue et une différenciation au niveau de l'architecture et, par conséquent, offrir la possibilité d'économiser davantage d'énergie. Ceci est possible par le découpage de la Tunisie en 10 régions climatiques selon un deuxième zonage appelé zonage recommandé sous la forme suivante :

Région RT1 : Les plateaux du Nord Est

-Gouvernorat de Bizerte

Région RT2 : Les plaines du Nord Est

-Gouvernorats de l'Ariana, Ben Arous, Mannouba, Nabeul, Tunis et Zaghouan

Région RT3 : Les plaines du Centre Est

-Gouvernorats de Mahdia, Monastir, Sfax et Sousse

Région RT4 : Les plaines du Sud Est

-Gouvernorats de Gabès et Médenine

Région RT5 : Les plateaux du Nord-Ouest

-Gouvernorats de Béja et Jendouba

Région RT6 : Les Montagnes du Nord-Ouest

-Gouvernorats de Siliana et le Kef

Région RT7 : Les plaines du Centre Ouest

Gouvernorats de Kairouan, Kasserine et Sidi Bouzid

Région RT8 : Plateaux et Montagnes du Sud-Ouest

-Gouvernorat de Gafsa

Région RT9 : Les Oasis de Montagnes du Sud

Gouvernorats de Kébili et Tozeur

Région RT10 : Les plaines Désertiques du Sud

-Gouvernorat de Tataouine, Délégation de Matmata et

Délégation de Médenine

Ce découpage confirme d'une façon précise les résultats de consommation énergétique obtenus pour les différentes régions testées.

En tenant compte des paramètres climatiques et géographiques on peut choisir la solution architecturale optimale pour chaque région [11].

Pour les régions qui présentent un taux élevé de radiations solaires, on doit penser à intégrer l'inertie thermique en utilisant des murs en briques de terre crue ou en pierres de tailles. Ces murs permettent de bénéficier des apports solaires gratuits qui vont être stockés pendant la journée pour être diffusés la nuit en saison froide. Cette technique fait partie du patrimoine architectural des pays de sud connus par ce style tel que Tozeur et Zarzis.

Pour les régions présentant un rayonnement solaire faible, l'isolation thermique demeure la meilleure solution permettant d'assurer un confort thermique tout en minimisant la consommation énergétique.

### C. Estimation Du Cout De L'installation De L'isolant

D'après l'étude paramétrique on peut considérer que l'isolation est la mesure la plus efficace pour la réduction des besoins énergétiques. Il est intéressant par la suite de déterminer le surcoût engendré par cette solution par le biais d'une étude économique.

Tout projet est constitué par une série d'étapes consécutives qui se déroulent selon un ordre chronologique pour donner l'aspect final attendu du projet. Les travaux de construction peuvent être divisés selon leurs natures, les besoins en matériaux, matériel et main d'œuvre. Le coût de réalisation des travaux varie selon l'emplacement, la durée et la solution technique employée. Pour pouvoir estimer le coût global il faut pouvoir déterminer le coût de chaque étape de construction. La surface et la qualité demandée et exigée par la maitre d'ouvrage influence intensivement le coût des travaux. Pour déterminer le coût global du projet il faut déterminer la quantité de chaque article afin d'avoir le coût des différentes étapes. Le tableau XII illustre les coûts de réalisation de chaque étape dès la phase de fondation jusqu'à la phase d'exploitation du bâtiment.

TABLE XII.  
COUTS DES DIFFERENTES OPERATIONS DU CAS D'ETUDE.

Opération	Coût [DT]
Fondation	33000
Gros œuvre	36000
Maçonnerie + Enduit	23500
Revêtement	16100
Étanchéité	5750
Menuiserie	58000
Électricité + Plomberie	32000
Peinture	13000
Divers	9000
Coût total	226350

Les travaux d'isolation sont nécessairement accompagnés par un coût supplémentaire dû à l'installation de l'isolant, pour pouvoir déterminer le surcoût, il faut savoir le coût de différents éléments avant et après la pose de l'isolation. Le tableau XIII illustre le coût de ces éléments par m<sup>2</sup>.

TABLE XIII.  
COUT DES DIFFERENTS ELEMENTS AVANT ET APRES L'ISOLATION.

Éléments	Surface [m <sup>2</sup> ]	Coût avant l'isolation [DT/m <sup>2</sup> ]	Coût après l'isolation [DT/m <sup>2</sup> ]
Double cloison 35 cm	178.35	65	82
Vitrage	33.65	240	320
Toiture	230	110	145
Total	-	44968.75	58742.7

D'après les résultats trouvés on peut conclure que l'opération d'installation de l'isolant représente une valeur de 13773.95 DT. Cette valeur n'est pas très considérable, elle représente 6.1 % du coût global du projet. L'investissement dans l'isolation permet multiples avantages sur différents plans. L'isolant appliqué au niveau de la toiture et des murs extérieurs permet d'assurer non seulement un confort thermique mais encore une réduction de la facture d'électricité.

Les économies financières dépendent de plusieurs facteurs notamment la nouvelle valeur de performance énergétique du bâtiment après isolation et le coût d'approvisionnement, selon le type d'énergie prévue. Les économies en terme de consommation d'énergie sont visibles dès les premières factures. En revanche, le retour sur investissement n'interviendra qu'au bout de quelques années.

La consommation énergétique annuelle du bâtiment avant et après l'isolation est calculée en multipliant la valeur de la performance énergétique par la surface habitable. La quantité consommée est répartie sur des factures d'électricité établis chaque 2 mois comme s'est indiqué sur le tableau.

TABLE XIV.  
COUT DES DIFFERENTS ELEMENTS AVANT ET APRES L'ISOLATION

	Performance énergétique (KWh/m <sup>2</sup> )	Consommation annuelle (KWh)	Quantité consommée par facture (KWh)
Avant isolation	110	25300	4216
Après isolation	59	13570	2261

En suivant la tarification appliquée par la société Tunisienne d'électricité et du gaz (STEG), qui divise le prix d'énergie selon la tranche de consommation. On obtient un temps de retour sur investissement de 6,46 ans. Ce temps représente le nombre d'années nécessaire pour que les économies sur les charges couvrent le coût initial des travaux d'isolation. Le délai de récupération, bien que c'est un indicateur qui ne prend pas en compte l'aspect temporel de l'argent, il donne une bonne information sur le délai nécessaire pour récupérer la mise de départ. À partir de la septième année on a que des gains. De point de vue environnemental, les rejets de gaz polluants sont encore considérablement diminués ce qui ne se chiffre pas financièrement

Cette phase de calcul est préliminaire elle a pour objectif de mettre en valeur l'effet de l'isolation et de montrer que la valeur de surcoût n'est pas très marquante comparée aux gains réalisés. À savoir confort thermique, diminution de la consommation énergétique, baisse de la facture d'électricité et préservation de l'environnement par la minimisation des émissions de CO<sub>2</sub>. Les valeurs trouvées montrent l'intérêt de l'isolation pour les différents types des bâtiments, elles sont encourageantes pour les acteurs dans le secteur du bâtiment permettant une forte amélioration de la qualité de l'enveloppe du bâtiment et une rentabilité économique dans le temps.

#### IV. CONCLUSION

Dans ce travail on a présenté en première partie une étude paramétrique dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique d'une villa, les résultats trouvés ont permis de mettre en lumière l'importance des paramètres orientation, type des vitrages, ombrage, choix des matériaux de construction et isolation dans la réduction des besoins énergétiques. Exploiter ces paramètres avec succès permet d'avoir un logement qui s'intègre parfaitement à son environnement est tel que l'énergie consommée est bien maîtrisée.

Renforcer ces paramètres par l'utilisation des lampes à basse consommation, d'appareils électroménagers efficaces, et des chauffe-eau solaires permet d'améliorer son efficacité énergétique.

Du côté économique, le coût d'installation d'isolant ainsi que le temps de retour sont intéressants et motivant pour le consommateur final.

Le choix des techniques et des mesures d'efficacité énergétique doit se faire en se référant au climat et à

l'emplacement géographique du cas étudié pour obtenir une efficacité optimale.

Le choix des solutions à adapter doit se faire selon la température de base de la région, l'humidité relative, le taux de radiations et l'effet du relief.

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments constitue une source importante d'économie d'énergie dans les pays en développement, étant donné la part que représentent les bâtiments dans la demande d'énergie commerciale.

Les bâtiments avec inertie thermique importante représentent un des atouts pour mieux gérer les apports de chaleur. On peut sans risquer de se tromper affirmer qu'elle induira une économie d'énergie, surtout pour les régions présentant un climat chaud et aride, l'augmentation de l'épaisseur et des surfaces des murs extérieurs et des cloisons intérieures permet le stockage d'une quantité plus importante d'énergie ce qui permet de réduire la quantité d'énergie consommée. L'inertie thermique est ainsi la meilleure solution pour les bâtiments appartenant à la zone climatique 3. Dans ce travail une étude préliminaire a été présentée dont le but d'obtenir un bâtiment à basse consommation. L'application des résultats de cette étude pour la conception des bâtiments permet de baisser fortement l'énergie consommée ainsi renforcer la stratégie du développement viable du pays. D'autres paramètres comme la production de l'électricité à

partir des énergies renouvelables dans le bâtiment est à étudier afin de renforcer les résultats trouvés pour cette étude.

#### REFERENCES

- [1] *Les défis du mix énergétique en Tunisie* Par Mohsen Tiss 5 février 2018
- [2] *NOTE DE SYNTHÈSE* Commission relance du PST 01 JUIN 2018 CHEBIL F, Politique énergétique en Tunisie, l'Institut Tunisien de la Compétitivité et des Études Quantitatives, Mai 2017.
- [3] Mercredi 27 Juin 2018, Gérard Tur, *La Tunisie multiplie les mesures d'efficacité énergétique*
- [4] Nicolas Morel et Edgard Gnansounou, « *Énergétique du bâtiment* », Septembre 2007
- [5] N. Bouacha L. Zeghradnia, *L'isolation dans les projets de bâtiments entre le choix et l'exigence*, Décembre 2015
- [6] C. Inard, P. Depecker et J. Roux, 'Un Modèle Simplifié pour la Prédiction du Champ de Température dans les Bâtiments', *Revue Générale de Thermique*, Vol. 36, N°2, pp. 113 -
- [7] *Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment* K. Imessad, R. Kharchi, S. Bouchaib, A. Chenak, S. Hakem A. Hamidat, S. Larbi-youcef, S. Sami et F. Sahnoune, 2017
- [8] Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, *Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale : Tome 1 : conception des nouveaux bâtiments*, janvier, 2002
- [9] Agence nationale pour la maîtrise de l'énergie, *Données climatiques de base pour le dimensionnement des installations de chauffage et de refroidissement*, Juillet, 2005
- [10] Agence nationale pour la maîtrise de l'énergie, *Initiation à la réglementation thermique et énergétique des logements neufs*, Aout 2007
- [11] Agence nationale pour la maîtrise de l'énergie, *Zonage climatique de la Tunisie*, 2004