



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA -01-
INSTITUT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
Département d'Architecture

Mémoire de Master en Architecture.

Thème de l'atelier : Architecture et Environnement.

L'IMPACT DE LA COUPOLE SUR LE
CONFORT THERMIQUE
DANS UN CLIMAT ARIDE

Cas : La maison traditionnelle d'El Oued.

Présenté par :

MEROUANE, Rekia, M20072067692.

Encadré(e)(s) par :

Dr MAACHI, I.

Membres du jury :

Président : Dr KAOULA, D. (MCA).

Examineur : Dr BOUKARTA, S. (MCB).

Année universitaire : 2020/2021.

A

Mes chers parents,

*Que ce modeste travail soit le fruit de vos
sacrifices, votre soutien et votre patience ;*

A mes chers neveux Youcef, Yossra & Younes ;

*Sans qui ce travail aurait terminé quelques
mois plus tôt :)*

A la classe la plus pauvre de la société ;

A ceux qui souffrent d'habitation misérable,

Dépourvue de tous les moyens de confort,

Et continuent à vivre sans se plaindre.

Sur le chemin de Hassan Fathy.

Remerciements

Mes plus profonds et sincères remerciements à Allah le tout puissant de m'avoir accordé la santé, la volonté et le courage d'entamer et de terminer cette recherche.

Je tiens à exprimer tous mes remerciements à ma directrice de recherche docteur MAACHI Ismahan pour son suivi, sa disponibilité, son soutien et ses orientations durant l'élaboration de cette recherche.

Je remercie Mr SEMAHI Samir pour ses aides, ses orientations et ses solutions durant toute la période pandémique.

Je remercie également les membres du jury Dr. KAOULA D. et, Dr. BOUKARTA S. d'avoir accepté d'examiner le travail de recherche du présent mémoire.

J'exprime toute ma reconnaissance à mes parents, et à mes sœurs qui m'ont supportée dès le début jusqu'à la fin de cette recherche.

J'adresse tous mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail, et je cite en particulier :

•Toute l'équipe du laboratoire LACOMOFA de l'université de Biskra :

Dr. BESBAS Yasmina ; Dr. LATRECHE Sihem ; Mr. TIBERMACINE Islem ; Mr. KHALLEF Nacer pour leur accueil et leur accompagnement lors de l'apprentissage du logiciel de simulation ; ainsi que tous les membres qui m'ont soutenue et encouragée.

•Tous mes amis et collègues qui ont souvent su choisir les mots juste pour m'encourager et me remonter le moral, en particulier : Hasnaa, Ryan, Soumia et Alliche.

Que Dieu les protèges tous et exauce leurs vœux.

En écrivant ces derniers mots, j'éprouve tant d'émotions mixtes de reconnaissance, de joie et de tristesse d'avoir terminé ce voyage de recherche, tout ce qui a un début a une fin, que cette fin soit le début d'une nouvelle recherche.

Résumé

Après l'indépendance et à ce jour, l'Algérie tente de maintenir son statut parmi les pays par tous les moyens, dans tous les domaines, ce qui a mené à réaliser intensivement des constructions en vue d'atteindre l'objectif de la quantité et la modernité des bâtiments sans la moindre considération du confort des usagers et des éventuelles consommations énergétiques pour assurer ce confort.

Le Sahara Algérien, une région typiquement aride qui est caractérisée par des tissus compacts et des architectures vernaculaires, présente des informations précieuses sur le savoir-faire et les besoins des habitants. Pour but d'exploiter ces informations, il est important d'analyser le comportement de ces constructions et leurs adaptations à l'environnement climatique. Dans le cadre de cette exploitation de données, l'étude s'est focalisée sur le comportement thermique de la maison traditionnelle du Souf, et l'impact de la coupole sur le confort thermique, dans une pièce d'habitation ; et s'est basée sur une méthode qui adopte un triptyque d'approches : investigation, vérification et simulation.

L'objectif majeur de cette étude est de comparer les différentes variables afin de mieux cerner la configuration optimale qui détermine le modèle habitable le plus confortable.

Les résultats de cette recherche ont été validés avec une simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel TRNsys. La simulation numérique des performances énergétiques des bâtiments lors de leurs conceptions, devient progressivement indispensable.

Mots-Clés : Coupole, réglementation thermique Algérienne, comportement thermique, confort thermique, simulation numérique.

ملخص

يعرف العالم تطورا سريعا في مجال البناء تزامنا مع التقدم التكنولوجي الحالي والذي دفع بالدول للتنافس في اقامة مباني تلبي حاجات الناس شكلا وأداء.

الجزائر كدولة تحاول مواكبة هذا التقدم عبر مخططاتها المستدامة غير أنها تعاني من أزمات ساهمت في بروز مشكل السكن كألوية في كل الولايات، مما أدى إلى ظهور حلول سريعة بإنشاء سكنات يطغى عليها الاهتمام بالكم أكثر من الجودة دون أخذ راحة المستخدم بين الاعتبار.

كان لهذا الحل السريع تبعات سيئة في بعض المناطق أهمها الصحراء نظرا لطبيعتها الجافة وخصائصها المناخية الصعبة وثقافة السكان التي تفرض قواعد محددة في عملية البناء لتكييفه مع هذه العناصر المكونة للمكان. هذا ما أدى بنا إلى التوجه نحو دراسة السلوك الحراري للمنزل التقليدي بوادي سوف، وتأثير القبة على الراحة الحرارية للغرف السكنية وفق طريقة ثلاثية المناهج: التحقيق، التحقق والمحاكاة.

تهدف هذه الدراسة إلى مقارنة مختلف المتغيرات للوصول إلى فهم التكوين الأمثل لنموذج السكن الأكثر راحة، بالاعتماد على المعطيات والتحقق من صحة نتائج البحث بالاعتماد على محاكاة حرارية ديناميكية التي أصبحت ضرورية في عملية التصميم للوصول إلى أفضل أداء حراري للمباني.

الكلمات المفتاحية: القبة، التنظيم الحراري الجزائري، السلوك الحراري، الراحة الحرارية، المحاكاة الرقمية.

Abstract

The world knows a rapid development in the field of construction. In conjunction with the current technological progress, which prompted countries to compete in constructing buildings that meet people's needs in form and performance. Algeria is a country that is trying to keep place with this progress through its sustainable plans, but it suffers from crisis that have contributed to the emergence of a housing problem as a priority in all the states, which led to the emergence of quick solutions by creating housing that is dominated by attention to quantity rather than quality without taking user comfort into consideration. This quick solution had bad consequences in some areas, the most important of which was the desert. Due to its dry nature and its difficult climatic characteristics and the population density that imposes specific rules in the construction process to adapt it to these components of the place. This is what led us to go to study the thermal behavior of the traditional house of Souf, and the impact of the dome on thermal comfort, in a residential room; and was based on a method that adopts a triptych of approaches: investigation, verification and simulation.

The main objective of this study is to compare the different variants in order to better identify the optimal configuration, which determines the most comfortable living model.

The results of this research have been validated with dynamic thermal simulation TRNsys software. The numerical simulation of energies performance of buildings should be done during their designs.

Key words: Dome, Algerian thermal regulation, thermal behavior, thermal comfort, numerical simulation.

Table des matières

I – Introduction générale	1
Introduction générale	1
Problématique	3
Hypothèses de recherche	4
Objectifs	4
Méthodologie de recherche	5
Structure du mémoire	5
Chapitre I : Etat de l'art.....	7
Introduction	7
I- Approche bioclimatique	7
1- Le confort thermique dans le bâtiment	7
1.1 Le confort thermique.....	7
1.2 Les paramètres du confort thermique dans le bâtiment.....	8
1.2.1 Les facteurs liés à la nature humaine.....	8
1.2.1.1 La tenue vestimentaire	8
1.2.1.2 Le métabolisme	8
1.2.2 Les facteurs climatiques environnementaux	8
1.2.2.1 La température de l'air (T_a)	8
1.2.2.2 La température des parois (T_p)	9
1.2.2.3 L'humidité relative de l'air (HR)	9
1.2.2.4 La vitesse de l'air	9
1.2.3 Les conditions d'un environnement thermique acceptable	10
1.2.3.1 Conditions environnementales du confort thermique général.....	10
1.2.3.2 Conditions environnementales du confort thermique local.....	10
2- L'approche bioclimatique et le confort thermique en Architecture	11
2.1 Les principes de base de l'architecture bioclimatique.....	11
2.1.1 Les bases de conception d'ensemble.....	11
2.1.1.1 L'implantation.....	11
2.1.1.2 Le zonage climatique	12
2.1.1.3 L'orientation (ensoleillement).....	14
2.1.1.4 La forme et la compacité.....	14
2.1.1.5 L'organisation intérieure et les espaces tampon.....	15

2.1.1.6	La ventilation naturelle.....	15
2.1.2	Les bases de conception de détail.....	17
2.1.2.5	Typologie des baies et vitrages	17
2.1.2.6	Isolation thermique.....	18
2.1.2.7	Le choix des matériaux et couleurs	19
2.1.2.8	L'inertie thermique du bâtiment.....	19
2.2	Les stratégies bioclimatiques pour améliorer le confort thermique	20
2.2.1	La stratégie du chaud (confort d'hiver).....	20
2.2.2	La stratégie du froid (confort d'été)	21
2.3	Les performances thermiques.....	22
2.3.1	Les techniques de protection des toits	22
2.3.1.5	Ombrage du toit.....	22
2.3.1.6	L'isolation thermique	22
2.3.1.7	Surface réfléchive.....	23
2.3.1.8	Refroidissement par évaporation.....	23
2.3.2	Les caractéristiques thermiques des matériaux de construction.....	23
2.3.2.5	Les grandeurs de transfert thermique	23
2.3.2.6	Autres coefficients permettant de définir un matériau	24
II -	Approche thématique	24
1	L'architecture vernaculaire	24
1.1	Définition	24
1.2	La dimension bioclimatique dans l'architecture vernaculaire.....	26
1.2.1	Les facteurs affectant l'habitat vernaculaire.....	26
1.2.1.1	Impact du climat.....	26
1.2.1.2	Impact du site sur l'habitat vernaculaire	26
1.2.1.3	La forme du bâtiment et son influence.....	26
1.2.2	Les aspects bioclimatiques de l'habitat vernaculaire	27
1.2.2.1	Se protéger du soleil.....	27
1.2.2.2	Ventiler ses espaces de vie par une ventilation naturelle	28
1.2.2.3	Amener de la fraîcheur au sein de l'habitat.....	28
1.2.2.4	L'architecture vernaculaire et la durabilité.....	29
1.3	Rafraîchissement passif dans l'architecture vernaculaire.....	29
1.3.1	Les apports thermiques.....	29
1.3.2	Le rafraîchissement passif.....	30

1.3.2.1	Le rafraîchissement passif par ventilation naturelle	30
1.3.2.2	Le rafraîchissement passif par évaporation	30
1.3.2.3	Le rafraîchissement passif par radiation.....	31
2	La coupole et l'architecture vernaculaire	31
2.1	Introduction.....	31
2.2	La coupole comme élément de couverture.....	32
2.2.1	Définition	32
2.2.2	La progression historique de la coupole.....	32
2.2.2.1	Histoire de la coupole avant l'apparition de l'islam.....	32
2.2.2.2	Histoire de la coupole pendant l'apparition de l'islam.....	34
2.2.3	Les typologies des coupoles	35
2.2.4	Les destinations des coupoles.....	35
2.3	Aspect bioclimatique de la coupole.....	36
2.3.1	La compacité	37
2.3.2	Le fonctionnement de façon passive	38
2.4	Des exemples à travers le monde	39
2.4.1	Village El-Gourna-Louxor, en Egypte par Hassan Fathy	39
2.4.2	Habitations rurales, dites "cases-obus", de l'ethnie Mousgoum (Teleuk), au Cameroun	40
2.4.3	En architecture régionale contemporaine, Bassuna, Egypte	41
II-	Approche énergétique	42
1	Contexte mondial	42
1.1	Consommation énergétique au monde	42
1.2	Consommation énergétique au Sud Méditerranéen.....	42
1.3	Les labels de performance énergétique	42
2	Contexte national.....	43
2.1	Contexte du bâtiment algérien.....	43
2.2	Consommation énergétique en Algérie	44
2.2.1	Stratégie nationale de la maîtrise d'énergie.....	44
2.2.2	La réglementation thermique algérienne	44
2.2.3	Les labels et le bâti algérien	45
	Conclusion.....	46
	Chapitre II : Présentation du cas d'étude et méthodologie.....	48
	Introduction.....	48

1.1	Motivation de choix de l'échantillon.....	48
1.2	Présentation de la ville	49
1.3	Présentation générale du projet	49
1.4	Données climatiques	50
1.5	La contribution de la conception bioclimatique dans l'habitat étudié.....	50
1.5.1	A l'échelle urbaine	50
1.5.1.1	L'implantation.....	50
1.5.1.2	L'orientation.....	51
1.5.1.3	Compacité urbaine.....	51
1.5.2	A l'échelle architecturale.....	52
1.5.2.1	L'organisation des espaces intérieurs.....	52
1.5.2.2	La ventilation naturelle.....	53
1.5.2.3	Compacité architecturale.....	54
1.5.2.4	Protection solaire.....	54
1.6	Les techniques et matériaux de construction.....	55
1.7	Caractérisation thermo-physique des matériaux de construction.....	56
1.8	Exemple d'étude référence : Maison témoin.....	56
2	Simulation	57
2.1	Protocole de simulation.....	57
2.2	Présentation du logiciel de simulation.....	58
2.3	Méthodologie de simulation.....	59
2.3.1	Création d'un fichier météorologique	60
2.3.1.1	La zone d'étude sous logiciel meteonorm version 7	60
	Choisir le format du fichier :	60
2.3.2	Du modèle architectural au modèle thermal.....	60
2.3.2.1	Modélisation géométrique sous l'extensionTrnsys3d :	60
2.3.2.2	Définition des entrées et génération des fichiers de simulation (Inputs).....	61
2.3.2.3	Intégration du model sous « TRNSYS-Build ».....	62
2.3.3	Présentation du cas de base et des variables.....	68
	Conclusion.....	71
	Chapitre III : Résultats et discussions	72
	Introduction	72
1	Vérification de la maison témoin	72
1.1	Evolution annuelle des températures intérieures simulées.....	72

1.2	Comparaison des résultats de simulation aux résultats mesurés	74
2	Etude du cas de base.....	74
2.1	Etat des lieux du cas de base	74
2.1.1	Evolution des températures intérieures simulées	74
2.1.2	Evolution mensuelle des consommations énergétiques	77
2.1.3	Evolution annuelle des consommations énergétiques	78
2.2	Etude de la volumétrie de la coupole	78
2.2.1	Proportions de la coupole.....	78
2.2.1.1	Evolution des températures	79
2.2.1.2	Evolution annuelle des consommations énergétiques	80
2.2.2	Forme de la coupole	81
2.2.2.1	Evolution annuelle des températures.....	81
2.2.2.2	Evolution annuelle des consommations énergétiques	83
2.2.3	Ouverture au niveau de la coupole.....	84
2.2.3.1	Evolution des températures	84
2.2.3.2	Evolution annuelle des consommations énergétiques	85
2.3	L'impact des améliorations effectuées	86
2.3.1	Impact de l'isolation.....	86
2.3.1.1	Evolution annuelle des températures.....	86
2.3.1.2	Evolution annuelle des consommations énergétiques	88
2.4	Performance énergétique du cas optimisé	89
2.4.1	Comparatif des consommations énergétiques pour les différentes variantes	90
	Conclusion.....	91
	IV-Conclusion générale.....	92
	V-Références bibliographiques	l
	Liste des abréviations.....	a
	Annexe I : Méthodologie de simulation	i

Table des Figures

Figure 1: Analyse des ombres portées de maisons jumelées.....	11
Figure 2: Les 5 zones du globe terrestre.....	12
Figure 3: Nébulosité jour et nuit.....	13
Figure 4: Choix de l'orientation.....	14
Figure 5: Le rapport forme taille et contact avec la compacité	14
Figure 6: principe de zonage thermique	15
Figure 7 : Ventilation par une seule façade.....	16
Figure 8: Ventilation naturelle par balayage transversal.....	16
Figure 9: Ventilation par cheminée.....	16
Figure 10 : transmission énergétique, simple et double vitrages.....	18
Figure 11 : pertes de chaleur d'une maison individuelle non isolée.....	18
Figure 12 : Effet des parements clairs.....	19
Figure 13 : Le mur en pierre ayant une forte inertie, il emmagasine le froid extérieur.....	20
Figure 14 : Principes diurne et nocturne de la période froide.....	20
Figure 15 : Différents principes de la période chaude.....	21
Figure 16 : Refroidissement par évaporation.....	23
Figure 17 : Les notions associées au concept du bâti vernaculaire.....	25
Figure 18 : Les maisons troglodytes de Matmata, Tunisie.....	25
Figure 19 : Géométrie et orientation des voies d'une ville en région côtière à climat chaud et aride pour canaliser l'air frais.....	27
Figure 20 : Les ouvertures d'un moucharabieh permettant de laisser passer l'air tout en filtrant le soleil.....	28
Figure 21 : L'évolution des approches architecturales des bâtiments performants.....	29
Figure 22 : Le rafraîchissement radiatif direct.....	31
Figure 23 : Toit en voûtes et en coupoles, Sud-Est Algérien.....	32
Figure 24 : Arpadschiah : maisons-ruches, Egée, Iraq.....	33
Figure 25 : Le Panthéon, Rome, 118 apr. J.-C.....	33
Figure 26 : Hagia Sophia, Constantinople, 532 Ap J.-C. Plan, Coupe.....	33
Figure 27 : Mosquée Selim II, Edrine, Turquie, Sinan Pacha ; 1568.....	34
Figure 28 : Coupole sphérique.....	35
Figure 29 : Voûte pyramide.....	35
Figure 30 : coupole sur pendentifs	35
Figure 31 : coupole sur trompes.....	35
Figure 32 : Eglise Orthodoxe, Santorin, Grèce.....	36
Figure 33 : La coupole, salle omnisports, Oscar Niemeyer, Alger.....	36
Figure 34 : Couvertures du bazar de Kashan, Iran.....	36
Figure 35 : Le principe ventilatoire au Panthéon de Rome. Source : Watson, ..1999.....	37
Figure 36 : Effet du vent sur l'Igloo.....	37
Figure 37 : Développement de surface pour un même volume.....	38
Figure 38 : Une seule partie de coupole reçoit les rayons solaires	38
Figure 39 : Mosquée Ibrahim El-Khalil, Tunis ; Coupe principe ventilatoire, Lotfi Rejeb, 2015.....	39
Figure 40 : El Gourna, Coupe urbaine.....	39
Figure 41 : Vue sur le village d'El-Gourna.....	39
Figure 42 : Coupe principes de ventilation d'une pièce avec coupole.....	40
Figure 43 : Les cases-obus, Vue d'ensemble, Cameroun.....	40
Figure 44 : Les cases-obus, Coupe, Cameroun.....	40
Figure 45 : Vues sur les triangles sphériques, mosquée de Bassuna, Egypte.....	41

Figure 46 : Systèmes de certification internationaux.....	43
Figure 47 : Comparatif des consommations des bâtiments (DPE).....	43
Figure 48 : Vue sur l'architecture de la ville d'El Oued.	48
Figure 49 : Situation géographique d'El Oued.....	49
Figure 50 : Données climatiques tirées du logiciel meteonorm (la température).....	50
Figure 51 : Données climatiques tirées du logiciel meteonorm (la précipitation).....	50
Figure 52 : Localisation de la maison, Plan de masse, coupe A-A (la ruelle) - Taghzout.....	51
Figure 53 : étude de l'ensoleillement de la maison (façade Ouest, la cour) pendant la journée...51	
Figure 54 : Plan de la maison traditionnelle, Souf	52
Figure 55 : Coupe A-A de la maison traditionnelle.....	53
Figure 56 : Schéma de principe de ventilation naturelle.....	53
Figure 57 : Axonométrie de la maison soufie.....	54
Figure 58 : Techniques de construction ; a) Mur porteur infrastructure, b) superstructure, c) construction d'une coupole.....	55
Figure 59 : plan de la maison témoin.....	56
Figure 60 : Evolution des températures en printemps.....	57
Figure 61 : Evolution des températures (relevées en période estivale).....	57
Figure 62 : Importation du fichier .idf de la 3D à partir du SketchUp.....	59
Figure 63 : Organigramme illustrant la procédure d'application du logiciel.....	59
Figure 64: Création du fichier météorologique de la zone d'El-Oued.....	60
Figure 65 : Définition des sous-surfaces de la coupole.....	61
Figure 66 : Choix du type de projet.....	61
Figure 67 : Projet final et passage au TRNBuild.....	62
Figure 68 : Représentation des propriétés des zones.....	63
Figure 69 : Introduction des caractéristiques des matériaux.....	64
Figure 70 : Définir les températures de consignes pour le chauffage.....	64
Figure 71 : Introduire les tableaux des différents scénarios.....	65
Figure 72 : Insertion des éléments constructifs.....	65
Figure 73 : activation de la climatisation.....	66
Figure 74 : Les outputs de simulation.....	66
Figure 75 : liaison du projet aux outputs et aux données climatiques.....	67
Figure 76 : Résultat de simulation.....	68
Figure 77 : Organigramme des différentes variables à étudier.....	70
Figure 78 : Evolution annuelle des températures de la chambre Est de la maison traditionnelle témoin.....	73
Figure 79 : évolution des températures de la chambre Est de la maison témoin simulée durant la semaine la plus chaude de l'année.....	73
Figure 80 : évolution des températures relevées en période estivale à 14h.....	74
Figure 81 : évolution annuelle des températures du cas de base.....	75
Figure 82 : évolution des températures du cas de base simulées durant la semaine la plus froide de l'année.....	76
Figure 83 : évolution des températures du cas de base simulées durant la semaine la plus chaude de l'année.....	76
Figure 84 : Bilan de consommation énergétique mensuelle du cas de base.....	77
Figure 85 : bilan comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base et du cas de coupole éliminée.....	78
Figure 86 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec les variantes V1 & V2 pour la saison hivernale.....	79
Figure 87 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec les variantes V1 & V2 pour la saison estivale.....	79
Figure 88 : bilan comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base et des variantes V1 & V2.....	80

Figure 89 : Evolution annuelle des températures de la chambre du cas de base et des variantes V3 et V4.....	81
Figure 90 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec les variantes V3 & V4 pour la saison hivernale.....	82
Figure 91 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec les variantes V3 et V4 pour la saison estivale.....	82
Figure 92 : bilan comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base et des variantes V3 & V4.....	83
Figure 93 : comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec la variante V5 pour la saison hivernale.....	84
Figure 94 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec la variante V5 pour la saison estivale.....	84
Figure 95 : Bilan comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base (coupole avec ouverture) et la variante V5.....	85
Figure 96 : comparaison de l'évolution annuelle des températures du cas de base avec la variante N°6.....	86
Figure 97 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec la variante N°06 durant la semaine la plus froide de l'année.....	87
Figure 98 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec la variante V6 durant la semaine la plus chaude de l'année.....	87
Figure 99 : Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec la variante V6.....	88
Figure 100 : Comparaison des consommations annuelles du chauffage et climatisation des différentes variantes.....	90
Figure 101 : Comparaison des consommations énergétiques annuelles totales des différentes variantes.....	90
Figure 102 : Choix de format de sortie.....	i
Figure 103 : Création de la zone thermique.....	ii
Figure 104 : modélisation de la chambre et nomination de la zone.....	ii
Figure 105 : définition des parois et ouvertures.....	iii
Figure 106 : création d'une surface virtuelle.....	iii
Figure 107 : modélisation de la coupole et la donner une appellation.....	iv
Figure 108 : liaison des deux zones créées.....	v
Figure 109 : intégration du fichier climatique.....	v
Figure 110 : Définir les différentes couches des parois.....	vi
Figure 111 : paramétrage des fenêtres.....	vii
Figure 112 : définir le taux d'infiltration d'air.....	vii
Figure 113 : définir le débit de ventilation.....	viii
Figure 114 : définir les paramètres de l'occupation et de l'équipement dans la chambre.....	ix
Figure 115 : les outputs de simulation.....	x
Figure 116 : liaison du projet aux outputs et aux données climatiques, et définition de la période de simulation dans l'interface Trnsys Simulation Studio.....	xi

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Composition des parois</i>	55
<i>Tableau 2 : Résultats de la caractérisation des roses des sables</i>	56
<i>Tableau 3 : Résultats de la caractérisation des blocs de Tafza</i>	56
<i>Tableau 4 : Caractéristiques thermo-physiques des matériaux</i>	64
<i>Tableau 5 : Consommation énergétique mensuelle du cas de base</i>	77
<i>Tableau 6 : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec le cas de coupole éliminée</i>	78
<i>Tableau 7 : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec V1 et V1</i>	80
<i>Tableau 8 : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec V3 et V4</i>	83
<i>Tableau 9 : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec V5</i>	85
<i>Tableau 10 : Tableau : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec V6</i>	88
<i>Tableau 11 : Consommations énergétiques annuelles cas optimisés</i>	89

1. Introduction générale

I – Introduction générale

Introduction générale

« L'énergie la moins chère est celle qu'on ne consomme pas » (Adage)

Toute réalisation architecturale concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec l'environnement auquel il appartient. Le but de la conception, de la rénovation et de la construction d'un bâtiment est de réaliser ce microcosme en concordance optimale avec son environnement et de donner ainsi au climat une juste place parmi les dimensions fondamentales de toute intervention de l'architecture sur l'environnement [LIEBARD, DE HERDE, 2005]. L'architecture est fatalement climatique, il n'y a architecture que lorsqu'il y a contraintes. Le climat en est une à laquelle on n'échappe pas [LAVIGNE, 2009].

Aujourd'hui, le besoin de construire en facteurs de qualité, quantité, temps à des prix minimalistes, et à l'apparition de la nouvelle technologie de chauffage et de climatisation, cause une rupture entre l'architecture et l'environnement. De ce fait, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'atténuation des impacts climatiques seront les défis à relever au futur. Alors que la consommation énergétique dans l'architecture doit être justifiée, l'architecte concepteur doit en apporter des solutions efficaces et durables. L'économie d'énergie devient ainsi un pilier du projet architectural, tout en intégrant le paramètre environnemental ; notamment sur le plan de crise en cas des circonstances exceptionnelles telle que la pandémie actuelle (Covid-19).

Dans le cadre de la limitation des émissions de gaz à effet de serre en dépit des risques liés au changement climatique de la planète, la maîtrise de l'énergie est un élément indispensable de lutte contre l'effet de serre. Dans le secteur de bâtiment, ceci est lié à la performance énergétique du bâtiment : Des mesures permettant de contrôler la consommation de l'énergie [HUMBERT, 2002]. La maîtrise des éléments passifs, tels que la forme architecturale, l'orientation, les ouvertures, minimise sans aucun doute la consommation énergétique. Notre recherche est placée dans cette approche de maîtrise de l'énergie puisque elle vise à améliorer la conception de la forme de l'enveloppe architecturale ainsi que sa contribution à l'efficacité énergétique.

Depuis l'époque Byzantine, après l'invention des voûtes clavées, de la maçonnerie liée au mortier et, enfin, de l'élaboration des charpentes, la coupole a pu faire son apparition

comme couverture afin d'assurer l'équilibre dans les salles circulaires [ADAM, 1984]. Cette innovation permet de couvrir, sans support intérieur, des espaces libres, plus vastes [RENAULT, 2007]. Ensuite, cette forme de toiture en coupole a été adoptée comme élément engendrant une amélioration de la qualité du confort des bâtiments dans le climat chaud [MANSOURI & SAHNOUNE, 2008]. Du point de vue architectural, le désir d'intégrer un élément fort qui peut contribuer par sa forme esthétique à la bonne image d'un édifice. En revanche, cela a des effets sur la qualité des ambiances : confort thermique, mouvements d'air et même l'acoustique. Il est indispensable que l'architecte traite, lors de la conception, ces qualités pour but que l'utilisateur se réjouira au sein de cet espace de rencontre et de repos ou autre fonction sociale. Il est donc nécessaire de tenir compte de l'environnement dans lequel le projet est implanté : évolution thermique et humidité relative, profil de vent du site, ressource solaire...etc. A cet effet, le comportement thermique des volumes architecturaux, représente à notre avis, une difficulté majeure à la bonne conception en particulier sur l'axe de la maîtrise de l'énergie et du confort.

Dans cette recherche, nous nous concentrerons sur le cas du climat chaud et aride, pour lequel les bâtiments disposent généralement d'un besoin en froid important durant l'été. Nous ciblerons l'utilisation de la ventilation naturelle comme stratégie principale pour assurer le confort d'été dans les bâtiments non climatisés. A partir d'un cas d'étude réel, un bâtiment traditionnel, disposant d'une forme de toiture en coupole sur une pièce d'habitation, situé en zone aride, dans un tissu traditionnel de la ville d'El Oued, nous examinerons donc le cas de confort thermique ; afin d'étudier ce que cet élément architectural peut apporter sur la maison.

Le choix de se reposer uniquement sur un système passif, dépendant des conditions météorologiques, est une contrainte importante et doit s'appuyer sur une étude préalable du site [FAGGIANELLI, 2014]. L'étude de diverses dimensions de la coupole, les périodes d'ouverture des fenêtres, ainsi que l'ensoleillement, est nécessaire dans ce cas. Mais, en cas d'absence des usagers, ou des informations précises sur l'état du bâtiment, la mal-gestion de la ventilation naturelle peut entraîner un inconfort considéré. On compte toucher ces cas, entre investigation et simulations du bâtiment, afin d'optimiser cette gestion.

A partir de 2020, toute construction neuve doit être un bâtiment à énergie positive tout en répondant à la réglementation thermique [RT 2020, France] afin de réduire les besoins des bâtiments neufs en énergies fossiles. L'architecture vernaculaire s'inscrit dans cette

démarche et elle pourrait participer à atteindre cet objectif puisqu'elle présente de nombreux avantages à la fois environnementaux, sociaux et économiques [BENZARTI, 2015].

A travers cette étude, on compte reconnaître de nouvelles techniques bioclimatiques inspirées des constructions vernaculaires de la forme de toiture en coupole, afin de les traduire en stratégies pour qu'elles soient déployées, généralisées et adaptées à l'architecture contemporaine tout en s'appuyant sur l'aspect thermique lié au confort du bâtiment.

Problématique

En Algérie, selon les recommandations architecturales [OULD HENIA, 1993], le secteur du bâtiment a connu une absence d'étude bioclimatique (thermique) au cours du processus de la conception architecturale, sauf l'étude économique en termes qualitatif et estimatif, ce qui explique l'intérêt des intervenants de ce secteur pour agir seulement en phase de construction, négligeant la phase d'utilisation du bâtiment, et donc pas d'optimisation énergétique du bâtiment.

Par conséquent, l'architecture aujourd'hui est une standardisation limitée des formes architecturales généralisées à l'échelle nationale, en dépit de la richesse climatique et spécificités de chaque région et au détriment de l'architecture régionale.

En revanche, l'architecture vernaculaire assure un équilibre entre la conception et la construction, riche en techniques et matériaux locaux, et est parfaitement bioclimatique en matière de confort et de durabilité [AÏT HAMMOUDA-KALLOUM, 2019].

Le modèle de la coupole, connu dans l'histoire, n'est pas uniquement un élément décoratif et traditionnel, mais aussi il peut avoir une fonction importante dans le comportement thermique d'un bâtiment.

Notre travail consiste à explorer une nouvelle stratégie de contrôle des flux d'air, renforçant la ventilation naturelle de l'espace coupole en s'appuyant sur deux systèmes naturels : Tirage thermique et la pression du vent.

Cette interaction nous a emmené à poser les questions suivantes :

- **Quel est l'apport de la coupole dans le confort thermique en zones arides ?**
- **Comment améliorer le confort interne d'une pièce avec une coupole et contribuer au rafraîchissement passif et à la performance énergétique du bâtiment ?**

- **Comment peut-on adapter la forme de la coupole à l'architecture d'aujourd'hui afin de répondre aux exigences réglementaires de la consommation énergétique ?**

Hypothèses de recherche

L'hypothèse de la recherche est que la coupole est à l'origine un élément générateur de confort des bâtiments en périodes estivale et hivernale, en climats chaud, sec et aride, avec une adaptation d'une stratégie de rafraîchissement passif en été, l'architecture peut trouver ainsi une solution à travers les techniques bioclimatiques. Trois hypothèses à vérifier :

- Fusionnée dans une architecture adaptée aux différents contextes climatiques du territoire national, la coupole peut constituer une solution bioclimatique considérable dans l'amélioration de la ventilation naturelle dans le bâtiment en Algérie en termes de contrôle de la température intérieure et d'assurer le confort des occupants.

- La coupole peut constituer un élément indispensable d'un dispositif de rafraîchissement passif, visant à l'amélioration du confort thermique à l'intérieur des espaces tampons dans les périodes de surchauffe, notamment la période estivale.

- Dans le climat chaud, le souci de la ventilation naturelle des bâtiments à une façade mono orientée, peut être résolu par une stratégie basée sur la forme de toiture en coupole. Celle-ci contribue à optimiser le rafraîchissement passif et réduire le taux d'humidité à l'intérieur de ces bâtiments en été, d'une part ; et à augmenter les débits de renouvellement d'air en hiver, d'autre part.

Objectifs

Cette recherche se fera dans l'axe de diminution des consommations énergétiques du bâtiment algérien et l'amélioration du confort thermique des habitants dans le but d'atteindre une efficacité énergétique optimale. Pour ce faire, on compte étudier quelques techniques constructives vernaculaires qui peuvent être explorées ou adoptées dans quelques styles par l'architecture contemporaine dans les circonstances climatiques pénibles.

Notre travail consiste à analyser un cas d'étude qui est la maison traditionnelle d'El-Oued à travers ses éléments architectoniques, ses techniques de construction ainsi que ses matériaux utilisés, et contrôler ce qu'ils apportent en terme de confort thermique et sur le

plan énergétique ; voire améliorer sa performance énergétique sur l'axe de la maîtrise de l'énergie.

Méthodologie de recherche

La méthodologie adoptée pour vérifier les hypothèses posées et les objectifs tracés et afin d'effectuer cette étude qui vise à caractériser le confort thermique dans l'espace habitable, repose sur « l'investigation » à travers les mesures in situ, et « la simulation » par un logiciel.

Dans les circonstances pandémiques, l'investigation sur l'échantillon à étudier (la maison traditionnelle au Souf) est presque impossible à cause des difficultés de déplacement (en ces temps de pandémie). Nous avons pris donc, comme référence les résultats d'enquête qui ont été relevés sur un autre échantillon préalablement étudié dans le cadre d'une recherche de master [NEFIDI, 2017]. Cette enquête s'est tenue sur les périodes printanière et estivale et les résultats servent à vérifier et comparer les résultats de simulation.

Ensuite, la deuxième partie de la méthodologie sert à interpréter et valider les résultats obtenus par la modélisation et la simulation en utilisant le logiciel TRNSYS. La simulation a pour objet d'évaluer l'apport thermique, de déterminer les consommations énergétiques prévisionnelles mensuelles et annuelles et ainsi de choisir les solutions permettant d'obtenir et améliorer le confort thermique à travers une certaine optimisation au niveau de l'enveloppe du bâtiment afin de remédier aux surchauffes pendant la saison estivale.

Structure du mémoire

De façon à apporter des réponses à la problématique précédemment posée, ce mémoire s'organise autour de deux parties : une partie théorique et une partie pratique.

La première partie constitue le chapitre intitulé « état de l'art » et présente une analyse exploratoire sur :

- A- Le confort thermique d'un point de vue bioclimatique.
- B- Les règles et stratégies de base de conception bioclimatique.
- C- Un aperçu du plan énergétique mondial et national, ainsi que les stratégies de rationalisation de l'utilisation de l'énergie dans le bâtiment.
- D- La coupole comme forme architecturale, nous abordons un bref historique évolutif ainsi que fonctionnel de cet élément architectonique.

Le deuxième chapitre comprend la partie « investigation » de la recherche, et est sous-détaillé comme suit :

E- La présentation du cas d'étude à travers son contexte climatique et bioclimatique.

F- La méthodologie de modélisation et de simulation en introduisant les éléments et facteurs qui influent sur le confort thermique du bâtiment et obtenir le calcul des besoins en chauffage et climatisation afin de répondre à la problématique posée.

Le troisième chapitre comprend les résultats de simulation thermique dynamique des différentes variables ainsi que leur interprétation. Ce chapitre ainsi que celui qui le précède forment la partie pratique.

Une conclusion générale englobe les récapitulatifs recueillis de chaque chapitre ainsi que des directives de recherche et des recommandations.

2. Chapitre I : Etat de l'art

Chapitre I : Etat de l'art

Introduction

Aujourd'hui, l'être humain lutte contre l'effet de serre par sa tentative de maîtrise de l'énergie et de limitation des GES émis notamment dans le secteur de bâtiment. Pour ce faire, des méthodes passives et des stratégies moins coûteuses sur le plan énergétique, ont été adoptées afin d'assurer le confort thermique de l'homme dans son espace de vie. Une des techniques y afférant repose sur la technologie d'optimisation des matériaux de construction et leur mise en œuvre de manière adéquate visant une durabilité et performance énergétique des projets.

Le savoir-faire de l'architecture vernaculaire exige l'utilisation des matériaux locaux qui s'adaptent au lieu et au climat pour servir les besoins de l'homme et le confort toujours souhaité dans l'habitat. Les tissus d'habitat traditionnel présentent des solutions pertinentes en ce qui concerne répondant aux contraintes du climat. Ce qui nous a mené dans ce chapitre à explorer un support théorique qui va englober les principes de l'approche bioclimatique, l'approche thématique ainsi que l'approche énergétique ; et le lier à la contribution au confort thermique dans l'architecture traditionnelle.

I- Approche bioclimatique

1- Le confort thermique dans le bâtiment

1.1 Le confort thermique

Le confort thermique peut être défini comme étant « *un état agréable d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et l'environnement* » [SLATER, 1985]. D'après la norme (ISO 7730) ⁽¹⁾, « *il y a situation de confort thermique si deux conditions sont satisfaites : Le bilan thermique de l'individu soit équilibré sans trop solliciter ses mécanismes autorégulateurs ; d'inexistants inconforts locaux dus à la sensation de courant d'air, l'asymétrie de chaleur, la descente de température et à la température du sol.* » [ROULET, 2004]

(1) Les conditions (du bien-être) thermiques modérées, 1984.

On peut le définir comme étant un état de satisfaction d'esprit déterminé par l'équilibre dynamique établi par les échanges thermiques du corps humain et de l'environnement [A.S.H.R.A.E., 2009]. Ces échanges de chaleur (W/m^2), dépendent de plusieurs facteurs variables : physiologiques, comportementaux et environnementaux.

1.2 Les paramètres du confort thermique dans le bâtiment

1.2.1 Les facteurs liés à la nature humaine

1.2.1.1 La tenue vestimentaire

Plus qu'une simple barrière, les vêtements représentent une résistance thermique aux échanges de chaleur convective et radiative entre la peau et l'environnement,

« L'effet des vêtements à des températures de l'air moins de 35°C est de réduire la perte de chaleur «sèche» du corps et ainsi de produire un effet d'échauffement. A des températures de l'air supérieures à 35°C, ils réduisent le gain de chaleur «sèche» en provenance de l'ambiance mais aussi, ils augmentent l'humidité et réduisent la vitesse de l'air en contact avec la peau, ce qui se traduit par une diminution du refroidissement résultant de l'évaporation de la sueur » [GIVONI, 1978].

En général, l'effet des vêtements sur la thermique du corps humain est lié à des paramètres liés aux vêtements (la couleur et la perméabilité à l'air des vêtements) et des paramètres externes (l'humidité, vitesse de l'air, métabolisme) [BOULFANI, 2010].

1.2.1.2 Le métabolisme

Il s'agit de produire la chaleur interne corporelle permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7 °C. Lorsqu'une personne est en mouvement, un métabolisme de travail correspondant à son activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos [LIEBARD et DE HERDE, 2006].

1.2.2 Les facteurs climatiques environnementaux

1.2.2.1 La température de l'air (T_a)

Dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe [NEUF, 1978].

Généralement, pour évaluer le confort thermique dans le bâtiment, la température ambiante de l'air est couplée par la vitesse de l'air, l'humidité ou d'autres paramètres, la prendre toute seule peut induire en erreur et ne donne pas une idée précise sur le confort

thermique. La température ambiante altère la sensation de chaleur, lorsque le niveau de l'humidité est faible et la vitesse de l'air soit élevée, la peau peut rester sèche même à des températures fortes en dépit de l'augmentation de la sueur [BOULFANI, 2010].

1.2.2.2 La température des parois (T_p)

Moins de 4° de différence avec l'air ambiant, la température des parois est utilisée dans le calcul des échanges radiatifs des grandes longueurs d'onde entre l'individu et l'environnement. La température des parois couplée à la température de l'air donne une idée sur le confort ressentie [LIEBARD, DE HERDE, 2006]. La température résultante peut se mesurer approximativement, avec un thermomètre classique.

1.2.2.3 L'humidité relative de l'air (HR)

L'humidité relative de l'air est le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ambiante et la quantité maximale d'eau qu'il peut contenir à cette température [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

Tant que la température est raisonnable, l'humidité relative influence peu la sensation de confort thermique. Quand la température est dans la plage de confort, l'humidité relative varie de 25 jusqu'à 60 %, sans altérer la sensation de bien-être [France AIR, 2006]. Elle détermine la capacité évaporatoire de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la sueur pour que le corps soit en sensation de confort [SALOMON, BEDEL, 2004].

La vapeur d'eau produite due aux activités de l'homme à l'intérieur des habitations contribue à élever le taux d'humidité relative. Et donc, pour éviter les problèmes de condensation superficielle, il est essentiel de limiter l'humidité relative par une meilleure isolation, en chauffant d'avantage ou par une ventilation optimale [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

1.2.2.4 La vitesse de l'air

Elle influence les échanges convectifs et évaporatifs. A l'intérieur des bâtiments, ces vitesses ne dépassent pas 0,20m/s. Au-delà de 0,2 m/s, elle engendre des situations d'inconfort de l'occupant, lié à la présence de courants d'air froids ou chauds [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

L'air extérieur pénètre naturellement dans les bâtiments par ventilation ou par infiltration à travers les défauts d'étanchéité de l'enveloppe. Pour assurer la ventilation des bâtiments, on peut contrôler la vitesse et la direction de l'air par réglage des conduits et ouvertures.

Quant à l'infiltration de l'air qui est due aux défauts de construction, elle cause des courants d'air résultants des différences de pression d'air [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

1.2.3 Les conditions d'un environnement thermique acceptable

Elles sont définies dans la norme 55-1992 et son addenda 1995 de l'ASHRAE. Cette norme spécifie des conditions dans lesquelles 80 % ou plus des personnes en bonne santé trouveront une ambiance confortable [CSST, 2004].

1.2.3.1 Conditions environnementales du confort thermique général

- **Température de l'air ambiant** : (température sèche), la zone de confort va de **18 à 25 °C** [BOULFANI, 2010]. Les températures ambiantes recommandées varient d'une pièce à autre, selon les besoins ainsi que la nature d'activité à exercer dedans.
- **Température opératoire** : A 50% d'humidité relative et une vitesse de l'air jusqu'à 0.15-0.2 m/s, ces températures s'étalent de **23 à 26 °C** en été, et de **20 à 23,5 °C** en hiver. Pour un taux d'humidité supérieur ou inférieur à 50 %, la température opératoire peut se déplacer mais ne doit pas varier de plus de **0,5 °C** à l'heure [LIEBARD, DE HERDE, 2006].
- **Humidité relative** : L'humidité de confort soit entre 30% et 70%. Ces limites ont été établies pour prévenir les complications de santé [LIEBARD, DE HERDE, 2006].
- **Vitesse de l'air** : Dans la zone de température de confort, la vitesse de l'air va jusqu'à 0.2 m/s. Au-dessus de la zone de confort, elle ne devrait pas excéder 0.8m/s [CSST, 2004].

1.2.3.2 Conditions environnementales du confort thermique local

- **différence verticale de la température de l'air** : Dans un local fermé, pour une sensation de confort local, la différence de température ne doit pas dépasser **3 °C** entre les pieds et la tête [CSST, 2004].
- **température des planchers** : La température des planchers ne doit être ni trop chaude ni trop froide, pour minimiser le risque d'inconfort au niveau des pieds [CSST, 2004].
- **courants d'air** : Il est préférable de ne pas dépasser une vitesse moyenne de l'air d'environ 0,15 à 0,2 m/s pour les températures de confort [CSST, 2004].

2- L'approche bioclimatique et le confort thermique en Architecture

L'approche bioclimatique a pour objet de rétablir le lien existant entre l'environnement bâti « l'occupant » et l'environnement naturel « les ambiances » [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

Le principe est de concevoir en exploitant les bienfaits du climat pour chauffer ou rafraîchir l'habitation, afin de consommer le moins d'énergie possible pour un confort thermique équivalent. Cela permet d'obtenir une meilleure autonomie vis-à-vis les énergies non renouvelables en jouant sur les caractéristiques naturelles du site de construction et tenant compte des techniques passives. Ce qui constitue une dimension indispensable à la qualité de la construction.

2.1 Les principes de base de l'architecture bioclimatique

2.1.1 Les bases de conception d'ensemble

2.1.1.1 L'implantation

« Quand on veut bâtir une ville, la première des choses qu'il faut faire est de choisir un lieu sain il doit être élevé qu'il ait une bonne température d'air, qu'il ne soit exposé ni aux grandes chaleurs, ni aux grands froids... » Vitruve [Izard, 1979].

L'implantation judicieuse d'un édifice est la tâche la plus importante de l'architecte. Elle détermine l'éclairage, les apports solaires, les déperditions, les possibilités d'aération, etc., mais aussi les qualités de l'habitat : communications, vues, rapports de voisinage, etc. [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

L'implantation bioclimatique d'un édifice dès sa conception dépend de l'intégration des éléments de l'environnement : le choix du terrain à bâtir en tenant en considération le *climat* de la région, la *topographie* du terrain ainsi que *l'orientation* du bâtiment (bbc) [WRIGHT, 2006].

Une bonne implantation a pour objet de bénéficier au maximum des protections naturelles au vent et au soleil par la végétation existante ; de l'ensoleillement hivernal en évitant les masques portés [DERUAZ & Al., 2008].

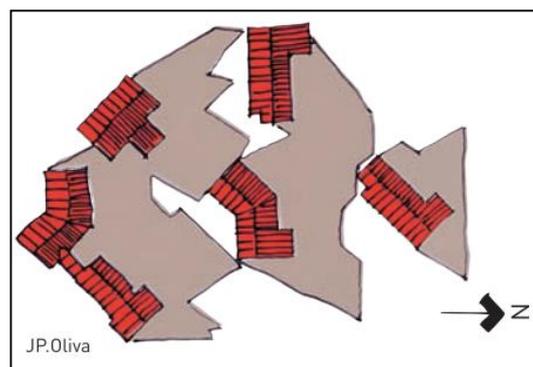


Figure 1: Analyse des ombres portées de maisons jumelées. Source: Oliva, CAUE13, 2008

2.1.1.2 Le zonage climatique

Le climat a toujours joué un rôle déterminant dans la création de la forme bâtie. Il forme un élément essentiel intervenant aux côtés d'autres éléments : culturels, économiques, etc. [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

Une zone climatique est une aire annulaire entourant le globe, caractérisée par des conditions météorologiques générales : l'altitude, la proximité ou l'éloignement de la mer, les courants marins, le voisinage d'une montagne ou d'une forêt. Ces facteurs permettent de distinguer dans les zones climatiques des climats régionaux et locaux et influencent aussi les éléments du climat [RT 2005, France].

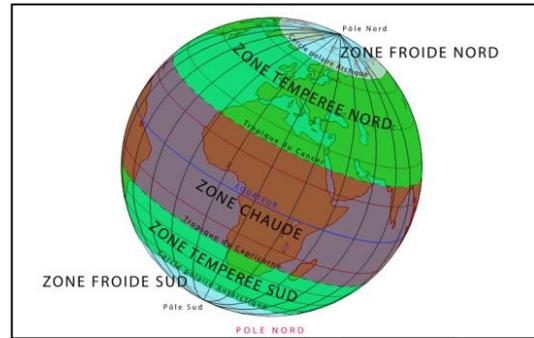


Figure 2: Les 5 zones du globe terrestre.
Source : Saïd El Khatri, 2003.

Chaque zone fixe des règles de conception permettant d'améliorer la prise en compte des apports solaires pour chaque région [EL KHATRI, 2003].

•Les éléments du climat

- Le rayonnement solaire (lumière et chaleur)

Ensemble de radiations électromagnétiques appelés lumières, que celles-ci soient visibles par l'homme ou non, caractérisé par la durée d'insolation et l'intensité de la radiation globale.

La durée d'insolation pour un jour donné dépend de la latitude du lieu et du jour de l'année, et peut être réduite par le relief, la nébulosité, la brume, le brouillard, etc. [EL KHATRI, 2003].

- Les précipitations (pluie et neige)

Les précipitations, avec la température, fixent le climat d'un lieu précis. Elles influencent sur la vie des êtres vivants, ainsi que sur les économies des pays. Grâce au cumul annuel des précipitations on peut classer les climats entre désertique et humide. Elles sont caractérisées par leur : quantité, nature physique, fréquence, durée de chute, intensité (100mm/heure), et leur répartition dans le temps et dans l'espace. Ces caractéristiques influencent sur l'absorption du sol, le drainage, l'utilité agricole, etc. [EL KHATRI, 2003].

- Les vents

C'est la différence de pression entre deux zones. Le vent provoque le déplacement des masses d'air et transporte ainsi les caractères climatiques. Un vent fort, en contact avec la

surface de l'eau ou du corps humain favorise le phénomène de l'évaporation [EL KHATRI, 2003].

Les masses d'air des côtes méditerranéennes sont de deux sortes : vents froids dont l'air circule de la mer vers le continent et les vents chauds, du continent vers la mer.

- Les températures

La température de l'air usuelle est la température de l'air mesurée à l'ombre, dans un abri météorologique, à une altitude de 1m50. Dans les premières couches d'air dessus du sol, la température du sol est supérieure à celle de l'air pendant le jour et inférieure pendant la nuit. [EL KHATRI, 2003].

- La nébulosité (nombre d'orages)

Un ciel nuageux influence sur la répartition des rayonnements solaires (S). Au cours de la journée, une partie de l'énergie solaire (D) atteint le sol en permettant la diminution du réchauffement de la surface terrestre. Au cours de la nuit, il permet la diminution du refroidissement de la terre en réduisant la perte d'énergie de la terre [EL KHATRI, 2003].

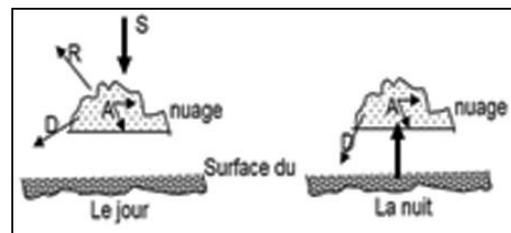


Figure 3: Nébulosité jour et nuit. Source : EL-KHATRI, 2003.

••Types de climats

Les *macroclimats* fréquents autour du globe sont influencés par l'échauffement de l'énergie solaire, des masses de la terre et d'eau. Au niveau régional, le *microclimat* est influencé par l'altitude, la topographie, les modèles des courants de vents et le type de végétation.

Pour une classification liée à la conception bioclimatique, humidité et températures seront incluses [EVANS, 1980]. Les climats sont classés ainsi : *Climats chauds, climats tempérés chauds, climats tempérés froids et climats froids* [GIVONI, 1978].

2.1.1.3 L'orientation (ensoleillement)

L'orientation d'un bâtiment est la direction vers laquelle est tournée sa façade principale qui comporte la plus grande surface vitrée. C'est-à-dire l'axe perpendiculaire à l'axe des blocs [GIVONI, 1978].

Le choix de l'orientation est soumis à de nombreuses considérations : la vue, la position par rapport aux voies, la topographie du site, les sources des nuisances et la nature du climat (l'ensoleillement et les vents dominants) [GIVONI, 1978].

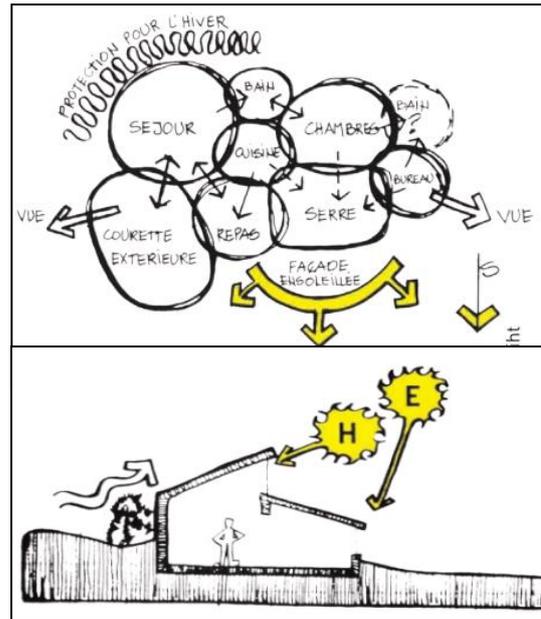


Figure 4: Choix de l'orientation. Source : Wright, CAUE13, 2008.

Sous nos latitudes, pour optimiser la thermique du bâtiment, il s'agira de développer la surface des façades *Sud* qui reçoit le maximum d'insolation en hiver, et de réduire celle des façades *Ouest, Est* et des toitures qui reçoit le maximum d'énergie solaire en été. Cette configuration favorise aussi l'éclairage naturel des pièces à vivre durant la journée et augmente le potentiel de ventilation naturelle du projet. Ce qui minimise la consommation énergétique [DERUAZ & Al., 2008].

2.1.1.4 La forme et la compacité

Le coefficient de forme, ou compacité, est un critère d'évaluation thermique intéressant, mesure le rapport de la surface déperditive au volume habitable (m^2/m^3).

Les déperditions thermiques des bâtiments dues aux différences de températures entre l'ambiance intérieure et les conditions extérieures, se font à travers l'enveloppe par conduction. Elles sont plus importantes à mesure que la surface déperditive augmente pour un même volume. Et donc, le coefficient de forme est grand ; ce qui explique une faible compacité [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

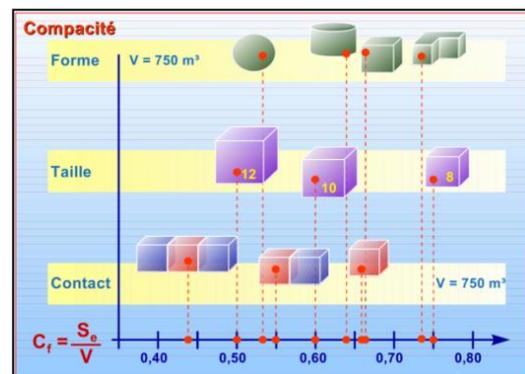


Figure 5: Le rapport forme taille et contact avec la compacité. Source : Liébard, 2006.

Une forme compacte implique une minimisation des surfaces déperditives. Mais une forme hyper compacte n'est pas souhaitable du point de vue architectural et éclairage naturel [LAOUAR & SETITA, 2015].

La compacité varie par rapport à : la forme, la taille et par rapport au mode de contact [LIEBARD, DE HERDE, 2006]. Elle se mesure avec deux rapports :

- Compacité : $C=V/S$ • Coefficient de forme : $CF=S/V$

S : la surface déperditive (mur, toit, etc.) V : le volume à chauffer

Pour un bâtiment de 1000 m², il convient de **ne pas dépasser un ratio CF(S/V) de 0.65 (soit +12% par rapport à une sphère).** ⁽²⁾

2.1.1.5 L'organisation intérieure et les espaces tampon

Connaitre le climat permet d'organiser les espaces en fonction de l'orientation et suivant le type d'activité, le taux de fréquentation de l'espace et ses besoins thermiques. ⁽³⁾

Le zonage thermique permet de créer de différentes ambiances thermiques, mieux adaptées à leurs utilisations et activités ; et des espaces tampons qui constituent une isolation thermique pour protéger

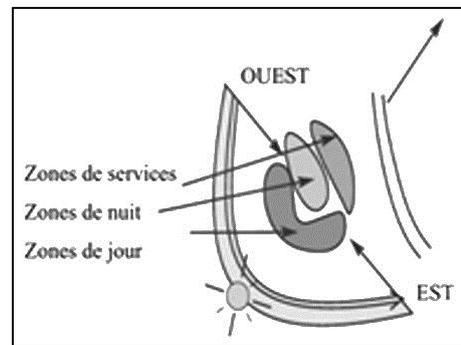


Figure 6: principe de zonage thermique.
Source : Mazari, 2012.

LIEBARD, DE HERDE, 2006. Liébard et A. De Herde, 2006], [BELLARA LOUAFI, 2005]. Cela permet de réduire les besoins calorifiques et frigorifiques des bâtiments et d'en augmenter le confort.

2.1.1.6 La ventilation naturelle

La ventilation intérieure est un facteur très important pour l'hygiène de l'homme et son bien-être. Elle a une influence directe sur le corps humain par l'effet physiologique de la pureté de l'air et de ses mouvements et indirecte par la température ambiante et le taux d'humidité [GIVONI, 1978].

C'est une solution passive de rafraichissement des locaux. Les consommations des ventilateurs dans les bâtiments peuvent représenter 25% de l'usage d'électricité [CIBSE, 2005].

(2) Energie positive, Efficacité énergétique, Construire compact, en ligne sur [http://www.energiepositive.info]

(3) MaisonBioNat, Le zonage de l'habitat, en ligne sur [http://www.maisonbionat.fr]

Elle apporte de la fraîcheur si l'air extérieur est plus froid que l'air intérieur ; elle permet aussi un mouvement d'air qui améliore le confort thermique et la santé de l'occupant ; mais son efficacité varie et dépend des conditions environnementales extérieures. Dans un climat chaud et sec comme l'Afrique du nord, la capacité de refroidissement en été est très limitée et son fonctionnement se limite principalement à la nuit [CUI, 2015].

Vue ses inconvénients, la ventilation naturelle reste une procédure difficile à contrôler : La déperdition thermique en hiver est un problème majeur [KERNALEGUEN, et al, sans date].

• Les stratégies de la ventilation naturelle

Il existe plusieurs stratégies de ventilation naturelle, les trois plus importantes sont :

a-La ventilation unilatérale : L'air extérieur pénètre par une ouverture et sort de la même ouverture ou d'une ouverture sur la même façade [RAOUST, 2012].

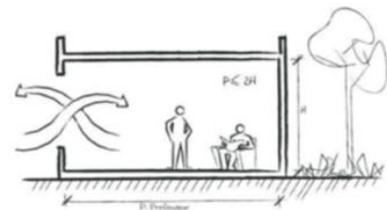


Figure 7 : Ventilation par une seule façade. Source : Raoust, 2012.

b-La ventilation transversale : L'air passe à travers deux ouvertures opposées dont une est disposée dans une zone de surpression alors que l'autre est dans une zone de dépression [GIVONI, 1978].

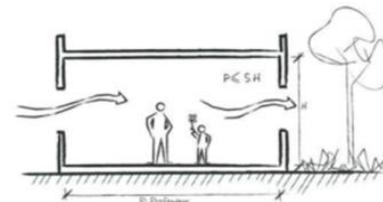


Figure 8 : Ventilation naturelle par balayage transversal. Source : Raoust, 2012.

c-Le tirage thermique : C'est une stratégie qui a pour objet de bénéficier d'une ventilation naturelle avec le minimum de désavantages vu l'absence totale du vent ou tant que la ventilation mono-façade est insuffisante. Il s'agit de la poussée d'Archimède : «..., l'air chaud a tendance à monter et l'air froid à descendre ». [DUTREIX, 2010].

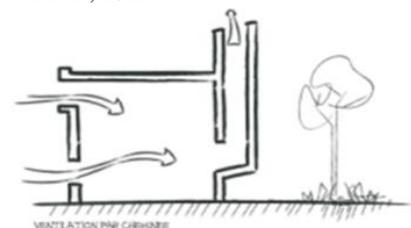


Figure 9 : Ventilation par cheminée. Source : Raoust, 2012.

• Les systèmes de ventilation naturelle

- 'Free cooling' ou rafraichissement naturel, c'est les différentes stratégies passives de ventilation intensive d'un bâtiment [HANNEQUART & SCHAMP, 2010]. On cite deux systèmes de rafraichissement :
- 'Free cooling diurne' :

Les débits doivent être importants afin d'assurer le renouvellement d'air sans provoquer des courants d'air à l'intérieur du bâtiment [BRANDT, 2012].

- 'Free cooling nocturne' ou 'night cooling':

Lorsque les journées sont chaudes ($t^{\circ}_{ext} > t^{\circ}_{int}$), l'efficacité de la ventilation naturelle intensive diurne est nettement réduite. Le refroidissement du bâtiment peut donc être assuré pendant la nuit, lorsque la capacité frigorifique de l'air extérieur est plus élevée [SIMON & HAUGLUSTAINE, 2001].

2.1.2 Les bases de conception de détail

Il s'agit des systèmes passifs de l'utilisation de l'énergie gratuite, tels que le choix des fenêtres, type de vitrage ainsi que le choix des matériaux qui constituent l'enveloppe bioclimatique.

2.1.2.5 Typologie des baies et vitrages

Les baies vitrées sont des outils de captage solaire passifs qui ont pour de rôles multiples : transmission de la lumière, vues sur les extérieurs, possibilités d'aération, etc. [DERUAZ et Al., 2008].

La mise en place des fenêtres qui permettent de combiner les deux stratégies saisonnières opposées (hiver/ été) permet d'assurer le renouvellement d'air des logements [BATIER, 2016].

Le dimensionnement des baies se fait selon l'orientation du bâtiment et le type d'activité, et doit tenir compte de la menuiserie, de la typologie des ouvertures et leurs orientations, ainsi que de la performance thermique du vitrage et des éventuelles occultations (volets, voilages...) ; dans la mesure où l'ouverture ne réduit pas le sentiment de sécurité des occupants [BATIER, 2016].

Il existe plusieurs typologies d'ouverture des fenêtres qui impliquent des taux de renouvellement d'air différents (ouverture à la française, basculante, à jalousie, à imposte...).

Compte tenu de ses effets sur l'éclairage naturel et son potentiel sur les apports solaires, les vitrages se caractérisent par trois facteurs, à savoir :

- Le facteur solaire (g) : Le coefficient de transmission énergétique.
- Le facteur thermique (U) : Le coefficient de transmission thermique.
- Le facteur lumineux (TL) : Le coefficient de transmission lumineuse.⁽⁴⁾

(4) Energie+, vitrage permettant le contrôle solaire, en ligne sur [<https://energieplus-lesite.be>]

L'apport du double vitrage est aujourd'hui certain avec des performances multipliées par 4 ou 6, pour des doubles vitrages avec une lame d'argon et un revêtement faible émissivité ($U_w < 1,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) par rapport à un simple vitrage ($U_w > 6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) [DERUAZ et Al., 2008].

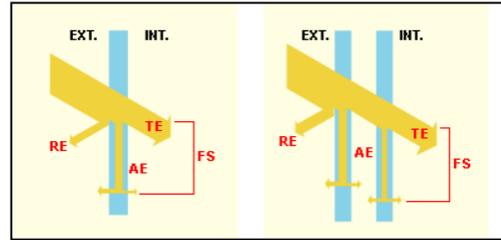


Figure 10 : transmission énergétique, simple et double vitrages. Source : energieplus-lesite.be

2.1.2.6 Isolation thermique

C'est une protection thermique qui sert à la mise en œuvre de quelques techniques de construction afin de limiter les déperditions de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid et assurer la durabilité des constructions en permettant de réduire les consommations d'énergie de chauffage et/ou de refroidissement d'une maison et d'accroître le confort thermique de l'occupant. La séparation des deux milieux se fait par un élément offrant une faible conductivité thermique [BLOCH-LAINE.1977].

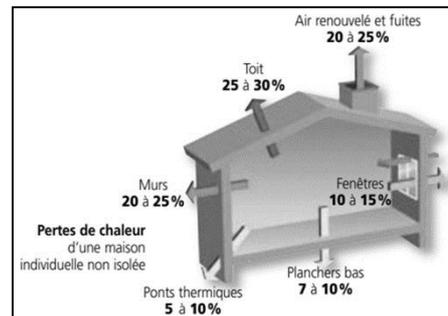


Figure 11 : pertes de chaleur d'une maison individuelle non isolée. Source : ademe.fr

L'isolation est également bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre [ADEME, 2008].

Il existe principalement 3 typologies d'isolation :

- a- **L'isolation thermique par l'extérieur (ITE)**: Elle consiste à installer un "manteau isolant" extérieur sur le bâtiment dans son ensemble afin de faire disparaître les ponts thermiques et d'apporter un meilleur confort d'été conséquent.
- b- **L'isolation thermique par l'intérieur (ITI)** : Elle consiste à poser un isolant contre les murs intérieurs, ce qui est côté pratique en rénovation mais, les ponts thermiques créés altèrent des murs (inertie faible), donc un confort d'été moindre.
- c- **L'isolation thermique répartie (ITR)** : Réalisée avec des structures porteuses isolantes, comme des parpaings avec isolant thermique intégrée, des blocs de béton isolant comme le Siporex et le Monomur. D'autres isolants thermiques existent comme les isolants minces, des isolants à changements de phases, etc. ⁽⁵⁾

(5) ClimaMaison, Isolant thermique, en ligne sur [<https://www.climamaison.com>]

Un isolant thermique est toute paroi ou matériau séparant deux ambiances, constitue un obstacle au transfert de chaleur par conduction, évite les fuites ou l'entrée de chaleur dans un bâtiment. Un bon isolant est un mauvais conducteur de chaleur [MAZARI, 2012].

Généralement, trois groupes d'isolants existent : ceux à base minérale, ceux à base de plastique alvéolaire et ceux à base végétale [Leroy, 2005].

2.1.2.7 Le choix des matériaux et couleurs

Afin de répondre aux recommandations d'une conception bioclimatique, l'idéal est d'utiliser des matériaux non étanches (tels que le bois vernis) qui assurent la régulation de l'humidité et contribuent au confort.

Si les matériaux de construction sont bien choisis, lourds (béton, pierre, adobe) à forte inertie, ils fonctionnent comme des masses d'accumulation de chaleur, servent à stocker l'énergie reçue pendant la journée pour la restituer la nuit [ZEROUALI, 2009]. L'été, Ils permettent d'emmagasiner la chaleur des rayons du soleil mais la fraîcheur est maintenue dans l'habitat.

En choix du meilleur matériau à utiliser, on doit tenir compte de sa couleur également. Pour une construction bioclimatique, les couleurs sombres sont préférables plutôt que les tons clairs parce que ces derniers réfléchissent la lumière sans la transformer en chaleur. Il est donc conseillé d'opter pour des matériaux couleur terre ou marron. ⁽⁶⁾

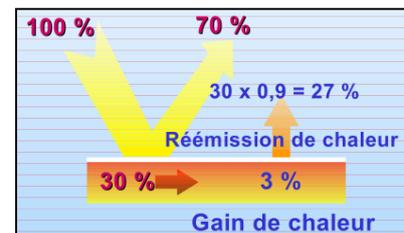


Figure 12 : Effet des parements clairs. Source : Liébard, 2006.

2.1.2.8 L'inertie thermique du bâtiment

L'isolation permet de limiter les déperditions de chaleur. Quant à l'inertie thermique du bâtiment, elle se comporte comme un régulateur, permettant à la maison de garder sa température plus facilement malgré les aléas climatiques. ⁽⁷⁾

(6) L'énergie tout compris, quels sont les matériaux dans la conception bioclimatique ? En ligne sur [www.lenergiesoutcompris.fr]

(7) Eco sources, Ecoconstruction, Bâti et couverture, en ligne sur [www.ecosources.info]

D'après Liebard A., « *l'inertie thermique d'un bâtiment exposé au soleil, est une notion qui reprenne à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant des caractéristiques physiques, dimensionnelles et d'environnement de la paroi de stockage. Elle permet de garder la fraîcheur à l'intérieur la journée et de limiter la chute des températures la nuit* ». [LIEBARD, DE HERDE, 2006]

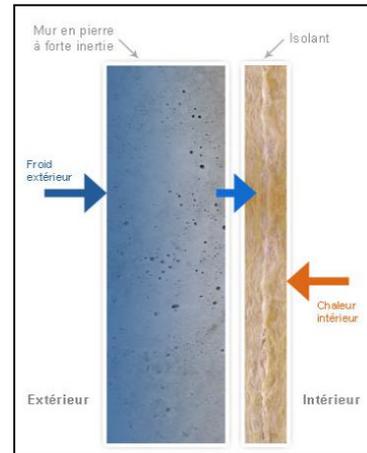


Figure 13 : Le mur en pierre ayant une forte inertie, il emmagasine le froid extérieur. Source : ecosources.info

Plus l'inertie d'un bâtiment est forte, plus il se réchauffe et se refroidit lentement. Cette vitesse est déterminée par deux caractéristiques des matériaux : diffusivité et effusivité [MAZARI, 2012].

2.2 Les stratégies bioclimatiques pour améliorer le confort thermique

La démarche bioclimatique consiste à mettre en place des stratégies passives qui servent à capter les éléments favorables du climat tout en se protégeant des éléments néfastes [WÄLCHLI, 2016].

Deux stratégies sont à adopter suivant les besoins :

2.2.1 La stratégie du chaud (confort d'hiver)

Elle consiste à capter l'énergie solaire et la stocker dans la masse. La redistribution de cette chaleur se fait lorsque les températures extérieures sont plus faibles que les températures intérieures désirées [LAVOYE, 2008]. Pour l'atteindre, il faut répondre à trois exigences :

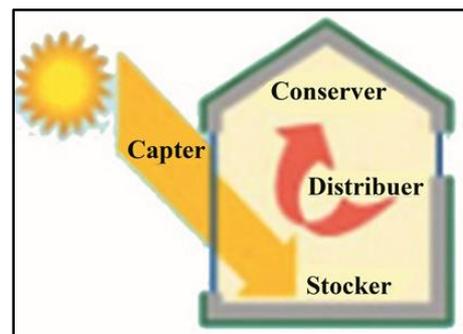


Figure 14 : Principes diurne et nocturne de la période froide. Source : Leroy, 2005.

- a- L'orientation des vitrages vers le Sud.
- b- Choisir des matériaux de construction à grande inertie thermique.
- c- Utiliser des dispositifs de captation des gains solaires. [WÄLCHLI, 2016].

Pour ce faire, il faut maîtriser les quatre principes de base :

- 1- Capter le soleil : en traversant les vitrages, le rayonnement solaire est capté et transformé en chaleur.
- 2- Stocker la chaleur : la chaleur captée est convertie en énergie et emmagasinée pour pouvoir en bénéficier au moment opportun.
- 3- Distribuer la chaleur : les calories stockées sont distribuées dans l'espace habité qui nécessite du chauffage.
- 4- Conserver la chaleur : la chaleur distribuée est retenue et la déperdition des apports internes est évitée également [HADDAM, 2015].

Il existe plusieurs types de dispositifs, on cite quelques-uns :

- **Systèmes solaires** :
 - 1- Actif (systèmes techniques) : Panneau solaire, etc.
 - 2- Passif (conception architecturale intégrée) : Fenêtre, serre, etc.
 - 3- Hybride (fonctionnement tantôt actif tantôt passif) : Capteur-fenêtre, etc.[LIEBARD, DE HERDE, 2006]
- **Serre de captation** : augmente les performances thermiques et peut diminuer les besoins en chauffage de 15-30%.
- **Façade double peau** : Constituée d'une paroi extérieure vitrée et d'une paroi intérieure plus massive. L'espace intercalaire constitue un espace tampon et joue le rôle d'un isolant [DERUAZ, 2008].

2.2.2 La stratégie du froid (confort d'été)

Elle consiste à se protéger des apports solaires, adopter des solutions passives de refroidissement par humidification ou ventilation naturelle, dissiper les surchauffes et limiter les charges internes par une isolation appropriée ou par l'inertie du bâtiment. On applique les principes suivants :

- 1- Se protéger : Il s'agit de se protéger des apports solaires entrées par les ouvertures par une protection fixe (écrans permanents : brise-soleil, auvent, véranda, etc.) ou amovible (écrans saisonniers : végétation).
- 2- Eviter : Il s'agit d'éviter le transfert de la chaleur vers l'intérieur et limiter les gains externes par les matériaux des parois opaques ; par : l'isolation et inertie des murs, la

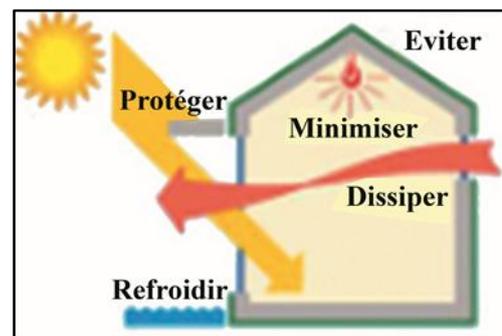


Figure 15 : Différents principes de la période chaude. Source : Leroy, 2005.

présence de végétaux sur les murs verticaux ou toitures, la ventilation des espaces sous-toiture ou de double-peaux..., etc.

3- Dissiper : Il s'agit de dissiper l'air chaud qui entre dans l'habitat pendant la journée, ou l'air chaud produit par les activités à l'intérieur de l'habitat ; par une ventilation nocturne naturelle traversante et/ou verticale.

4- Rafrâchir : Il s'agit d'évacuer la chaleur captée en utilisant le renouvellement d'air par une ventilation naturelle (effet de cheminée ou par le vent) ou par humidification (Plans d'eau, fontaines, végétations..., etc.)

5- Minimiser : Il s'agit de minimiser les apports internes de l'habitat et limiter par conséquent, la consommation d'énergie (éclairage artificiel, climatisation). [LEROY, 2005].

• **Pour les demi-saisons** : L'enveloppe doit pouvoir s'adapter de manière simple aux besoins par une combinaison de ces deux stratégies [ZEROUALI, 2009].

Chaque projet est spécifique et nécessite une étude thermique et stratégie unique.

2.3 Les performances thermiques

2.3.1 Les techniques de protection des toits

Pour refroidir un bâtiment dans le climat chaud et sec, il est nécessaire de contrôler les effets des radiations sur les ambiances intérieures. Les recherches ont montré que 50% des gains thermiques d'une construction sont fournis par le toit tant qu'il reçoit la plus grande quantité des radiations solaires. Afin de réduire cette fluctuation thermique, des techniques passives de protection du toit sont mises en place [RUNSHENG TANG, 2004] :

2.3.1.5 Ombrage du toit

Il peut être fourni par un dispositif efficace tel qu'une couverture séparée (une toile peinte en blanc pour réduire l'absorption du rayonnement), une couverture démontable ou occultation par végétation (pour l'ombrage saisonnier) [SHARMA ANUPAMA et al, 2003]. La mise en place d'une ombre adéquate permet au bâtiment de refroidir plus rapidement la nuit et économise l'énergie de climatisation.

2.3.1.6 L'isolation thermique

L'isolation thermique, par un matériau isolant ou par l'air immobile stocké au-dessus du toit. Ainsi qu'une méthode traditionnelle des pots de terre inversés semble bien efficace pour la protection du toit contre les rayons solaires incidents sauf que cette méthode souffre des

difficultés pratiques parce que le toit est rendu inutilisable et son entretien est difficile [SHARMA ANUPAMA et al, 2003].

2.3.1.7 Surface réfléchive

Les surfaces externes du bâtiment doivent être teintées avec une couleur qui reflète le rayonnement solaire, afin d'avoir l'absorption minimum. Un toit blanchi est généralement utilisé pour réduire le gain solaire à travers ce toit. Une surface claire a un facteur de réflectivité de 0.7 à 0.9, cette valeur peut diminuer à cause du sable cumulé sur le toit, ce qui limite l'efficacité de cette technique [SHARMA ANUPAMA et al, 2003].

2.3.1.8 Refroidissement par évaporation

Le processus de refroidissement passif le plus important est l'évaporation. L'eau s'évapore par la chaleur absorbée de l'intérieur par le toit et le mouvement d'air. La chaleur due aux rayons du soleil incidents sur le toit est également utilisée pour l'évaporation de l'eau, en conséquence, elle ne peut pas être ajoutée au gain thermique intérieur.

La quantité de l'eau évaporée et l'effet de refroidissement augmente avec l'augmentation des rayonnements solaires incidents et la vitesse du vent. Par conséquent, cette technique est très utile pour le refroidissement des bâtiments dans des conditions arides où, le rayonnement solaire élevé et la grande vitesse du vent, sont disponibles [SHARMA ANUPAMA et al, 2003].

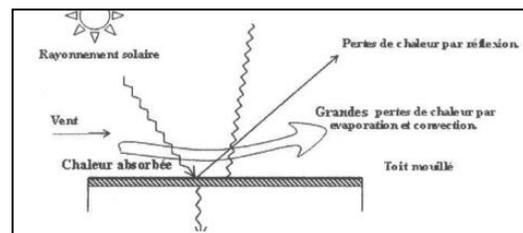


Figure 16 : Refroidissement par évaporation.
Source : Dilip, 2006.

2.3.2 Les caractéristiques thermiques des matériaux de construction

2.3.2.5 Les grandeurs de transfert thermique

- **La conductivité thermique λ** : La conductivité est la propriété des corps à transmettre la chaleur par conduction. Elle est notée λ mesurée en $W/m \cdot ^\circ C$. La conductivité (λ) est le flux de chaleur qui traverse un matériau d'un mètre d'épaisseur par unité de surface et pour un degré Celsius (ou pour 1 Kelvin) de différence de température. Plus λ est grand, plus le matériau est conducteur. Un matériau n'est efficace théoriquement (c.à.d. isolant thermique) que si son $\lambda < 0,065 W/m.K$.

- **La résistance thermique R** : Le flux de chaleur traversant une paroi dépend de son épaisseur (e) et de sa conductivité thermique (λ). La résistance thermique est

l'aptitude d'un matériau de s'opposer à la propagation de l'énergie qui le traverse. $R = e/\lambda$ exprimé en $m^2 \cdot K/W$

Plus R est grand, plus le matériau est isolant. Plus l'épaisseur (e) d'un matériel isolant est grande et plus sa conductivité thermique (λ) est faible, plus ce matériau est performant pour la résistance thermique.

2.3.2.6 Autres coefficients permettant de définir un matériau

- **La capacité thermique C ou Cp** : Ou la chaleur massique ; C'est la capacité du matériau à emmagasiner la chaleur ou de la restituer par rapport à son poids. Elle est définie par la quantité de chaleur à apporter à 1kg du matériau pour élever sa température de 1°C (ou 1 K). Elle est exprimée en J/kg.K.

- **L'inertie thermique** : Elle mesure sa capacité à stocker la chaleur, à en diffuser la restitution et à atténuer l'effet des surchauffes dues aux apports solaires. Elle recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant des caractéristiques physiques de la paroi de stockage. Une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit, est importante dans les climats où la différence de température diurne et nocturne.

Les caractéristiques de l'inertie thermique peuvent être regroupées pour chaque matériau en deux grandeurs intermédiaires : la diffusivité thermique (D) et l'effusivité thermique (Ef). [MDA architectes, 2013].

II - Approche thématique

1 L'architecture vernaculaire

1.1 Définition

« L'homme a lutté avec les matériaux, les contingences, avec sa culture. C'est un duel avec la matière et lorsqu'il a résolu son problème, il avait créé de la beauté. » [Hassan Fathy, sans date].

Le moyen naturel par lequel les communautés créent leur habitat est nommé architecture « vernaculaire », et est souvent « sans architecte » [ICOMOS, 1999].

Adossée à l'architecture traditionnelle qui s'appuie sur la culture d'une société et la transmission de ses savoir-faire constructifs acquis au fil de l'histoire, l'architecture

vernaculaire s'appuie sur les caractéristiques du site sur lequel elle va se déployer et la réponse donnée à ses contraintes. Formes, matériaux et techniques en sont les composantes [AÏT HAMMOUDA-KALLOUM, 2019].

D'après Bernard Rudofsky ⁽⁸⁾, « *L'architecture vernaculaire révèle ce qu'il y a d'essentiel à un moment donné de l'humanité.* » Cette citation renvoie la notion de temps, l'architecture vernaculaire répond aux besoins propres à une époque [RUDOFSKY, 1964].

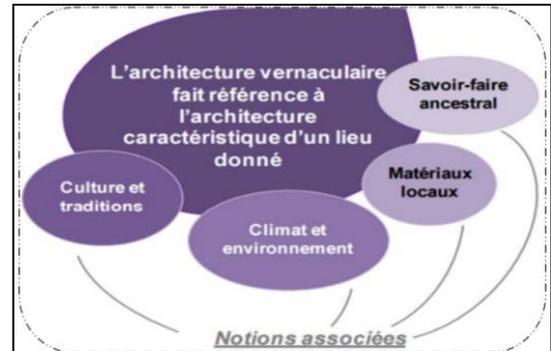


Figure 17 : Les notions associées au concept du bâti vernaculaire. Source : Maaoui, 2017.

Christopher Alexander ⁽⁹⁾ démontre que l'architecture vernaculaire, contrairement à ce que l'on peut prétendre, répond à des règles et à une méthode et n'est pas le fruit du hasard. C'est un processus nécessitant des modifications et adaptations à chaque fois que l'une de ses composantes évolue. Elle offre par l'épaisseur de ses parois et les qualités isolantes de son matériau un confort thermique auquel ne répond pas l'utilisation répandue du parpaing qui en amincit les cloisons et donc la conductivité thermique augmente [AÏT HAMMOUDA-KALLOUM, 2019].

Différents critères d'influence sur l'architecture vernaculaire sont définis dans sept éléments: traits de culture et attributs, environnement, ressources et matériaux de construction, production des systèmes de circulation ou ventilation, symbolisme et embellissement, typologies de formes ainsi que fonctions et usages des constructions [MESLI, 2017].



Figure 18 : Les maisons troglodytes de Matmata, Tunisie. Source : maison-monde.com

(8) commissaire scientifique de l'exposition Architecture without architect au MOMA en 1964.

(9) anthropologue et architecte anglais, a retrouvé et perfectionné la théorie des Pattern languages.

1.2 La dimension bioclimatique dans l'architecture vernaculaire

1.2.1 Les facteurs affectant l'habitat vernaculaire

1.2.1.1 Impact du climat

« *Le climat est une principale donnée de la morphologie des systèmes architecturaux et urbains. Il agit sur toutes les composantes des systèmes architecturaux : éléments, maillage, règle du jeu.* » [DUPLAY, 1985]

Selon Liébard A., Et De Herde, chaque région se caractérise par une culture et un art de bâtir particuliers notamment les zones chaudes et arides, comme en Afrique du Nord. Le matériau choisi permet d'adapter le bâtiment aux variations du climat local [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

Il s'agit de se protéger aux données environnementales du climat ou de les exploiter au profit de la qualité de l'habitat.

On trouve trois types de climat ont effet sur l'habitat vernaculaire : climats régionaux, climats locaux et microclimats.

1.2.1.2 Impact du site sur l'habitat vernaculaire

Afin d'intégrer la conception dans le site, il est indispensable de définir les caractéristiques de ce site en répondant aux exigences et contraintes.

« *L'habitat vernaculaire montre comment le « lieu » architectural se constitue dans un chassé-croisé permanent entre culture, usages, climat et entre esthétique pure et valeurs de la vie quotidienne. En fait, l'architecte même de nos jours doit tenter de trouver la solution idéale pour chaque lieu afin d'avoir une architecture respectueuse à l'environnement et plus adaptée* » [BOUDON, 2013].

1.2.1.3 La forme du bâtiment et son influence

La forme d'architecture vernaculaire est un exemple adéquat à son environnement, façonnée par la culture ainsi que par la nature. Ces deux aspects participent de la forme architectonique.

Nous constatons que les enveloppes visibles des maisons sont différentes d'une situation géographique à une autre ; la fréquence des précipitations influence la pente de toiture : des toits pentus dans les zones à précipitations abondantes, plats dans les zones à climat sec. [RODRIGUEZ, 2013].

1.2.2 Les aspects bioclimatiques de l'habitat vernaculaire

Entre le développement des villes sans soucis du confort d'été et la centralisation de la population dans les grandes métropoles qui augmente la température de l'air, certains procédés vernaculaires permettent de concilier ces deux aspects afin de se protéger du rayonnement solaire et de rafraîchir les rues. [MARINE, 2013] En zones chaudes et arides, on préconise des solutions qui ont pour but de :

1.2.2.1 Se protéger du soleil

Par des systèmes de protection solaire tenant compte de l'orientation.

- **L'Implantation et tracé des rues :** Le plan-masse compact aux ruelles étroites. « Les maisons sont construites imbriquées les unes dans les autres, elles créent de grands volumes habitables par rapport à la surface de mur exposée au soleil. L'ombre baigne rues et ruelles. ». L'étroitesse des rues et leur tracé coudé favorisent la constitution de microclimats et maintiennent un minimum d'ombre et de fraîcheur en période de fortes chaleurs [DONNADIEU, 1977].

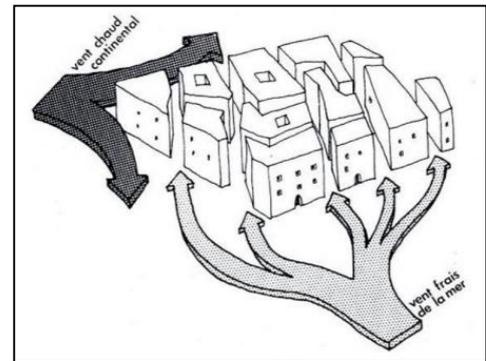


Figure 19 : Géométrie et orientation des voies d'une ville en région côtière à climat chaud et aride pour canaliser l'air frais. Source / Izard, 1979.

- **La hiérarchisation et diversité des espaces :** Soit à l'échelle du groupement d'habitation ou à l'échelle de l'habitation, la hiérarchisation des espaces est omniprésente dans l'habitat vernaculaire pour des raisons culturelles et des raisons climatiques.

La diversité des espaces intérieurs dans l'habitation vernaculaire tend à diminuer la température à l'intérieur : Le Sirdab (cave) par ex, maintient la température intérieure à 30°C et augmente l'humidité de 60-70%, tandis à l'extérieur, il fait 50°C et 15% d'humidité [MAAOUI et BEN M'HIDI, 2017].

- **L'inertie thermique :** Murs massifs et toiture lourde étant donné que la source de chaleur en climat chaud est le rayonnement solaire, l'habitat vernaculaire prône l'utilisation des matériaux locaux à forte inertie thermique afin d'accumuler de la fraîcheur dans les parois durant la nuit et de la restituer le jour [MAAOUI et BEN M'HIDI, 2017].

- **La Toiture-terrasse, toiture en voûte et volume intérieur :** Les toitures terrasses sont largement répandues dans les zones arides. Elles peuvent être utilisées pour faire sécher du linge ou pour dormir la nuit lors des périodes de canicules [ATEK, 2012]. Le toit en voûte

et coupole est plus adapté pour réfléchir les radiations solaires et rendre le volume intérieur plus spacieux.

- **Les matériaux et le choix des couleurs :** Dans l'architecture vernaculaire, le choix des matériaux est local et naturel (brique en terre et paille, sable argileux, la chaux et le palmier) [ATEK, 2012]. Les façades sont recouvertes d'un enduit de terre et de chaux. Les couleurs claires en façade atténuent la capacité d'absorption des rayons solaires par l'enveloppe extérieure.

- **Le Nomadisme :** La migration quotidienne ou saisonnière des pièces ensoleillées aux pièces plus fraîches ou inversement dans le but de recherche du confort [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

- **Le Troglodytisme :** Recouvre l'ensemble des abris humains situés dans le sol, qu'il soit le résultat de l'utilisation de cavités naturelles ou d'une excavation volontaire [LIEBARD, DE HERDE, 2006].

1.2.2.2 Ventiler ses espaces de vie par une ventilation naturelle

- **La Cour intérieure (Patio ou Housh) :** qui est un élément clé de répartition spatiale dans l'habitat vernaculaire aux climats chauds et secs et un régulateur thermique car l'air frais de la nuit y est capté et emprisonné [DONNADIEU & al., 1977].

- **MALKAF ou Tours à vent :** d'origine Perse, utilisé afin de créer une ventilation naturelle à l'intérieure du bâtiment. Il capte le vent plus frais et moins poussiéreux en hauteur, la différence de pression entre le sommet et le bas de la colonne aide à rafraichir l'air intérieur [MAAOUI et BEN M'HIDI, 2017].

- **Les fenêtres et Moucharabieh :** La circulation de l'air dans l'habitat vernaculaire des zones chaudes et sèches est activée par la disposition et la taille des fenêtres.

1.2.2.3 Amener de la fraîcheur au sein de l'habitat

Le taux d'humidité est très réduit en climats chauds et secs, par conséquent, l'architecture vernaculaire a eu recours à des aménagements simples mais très efficaces pour humidifier l'air sec afin de le rafraîchir, tels que : Introduire l'eau et la végétation dans les patios.

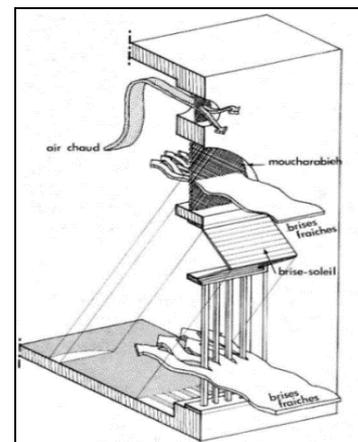


Figure 20 : Les ouvertures d'un moucharabieh permettant de laisser passer l'air tout en filtrant le soleil. Source : Izard, 1979.

1.2.2.4 L'architecture vernaculaire et la durabilité

Il est signalé que les revendications de l'architecture durable ne sont pas nouvelles que c'est une tentative de retour à l'idée d'un concept existant depuis des siècles dans le bâti vernaculaire.

Selon GAUZIN-MÜLLER D., les formes, matériaux et techniques de l'architecture vernaculaire sont nés localement, ce qui fait d'elle une source d'enseignement qui se déploie: l'architecture vernaculaire contient des exemples du chauffage, de la ventilation et du rafraîchissement, de la forme du bâti, etc.

Généralement, les solutions proposées par cette architecture offrent des performances bien moindres que celles obtenues avec les technologies actuelles, mais avec un respect de l'équilibre naturel du site et de son environnement. Elle se base également sur l'idée du recyclage des constructions, ainsi que du respect de la culture sociale pour assurer du confort aux occupants [MAAOUI, BEN M'HIDI, 2017].

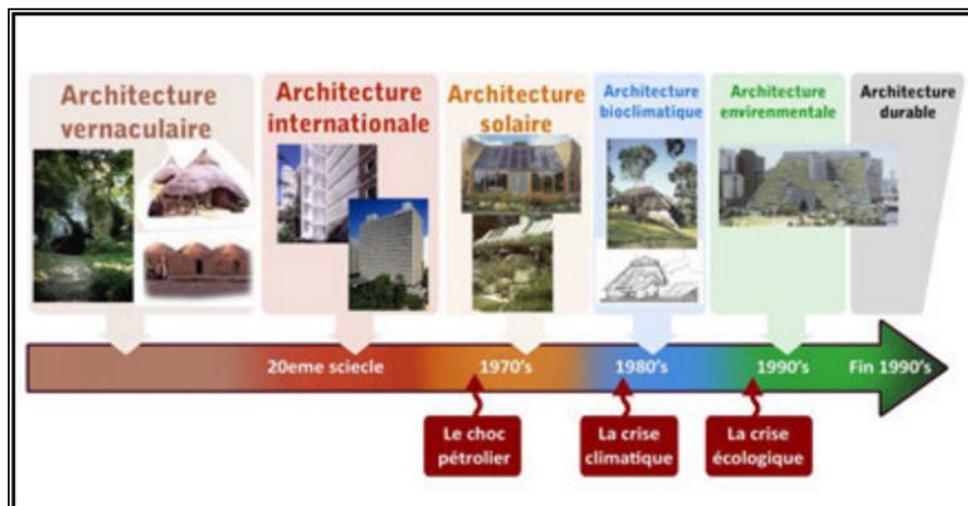


Figure 21 : L'évolution des approches architecturales des bâtiments performants.
Source : Semahi, 2013.

1.3 Rafraîchissement passif dans l'architecture vernaculaire

1.3.1 Les apports thermiques

Ils sont définis par l'usage du bâtiment. L'occupant (l'activité physique) et l'énergie solaire (absorbée par les parois ou pénétrée par les surfaces vitrées) en sont les sources des apports internes et externes.

Afin de permettre au système de rafraîchissement d'assurer le confort thermique des usagers, il est indispensable de réduire ces apports. Pour ce faire, il est possible d'intervenir

sur les matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment, ou de protéger le bâtiment contre les radiations solaires [CADONI, 2012].

1.3.2 Le rafraîchissement passif

C'est une stratégie qui contribue à la maîtrise et la réduction des besoins en climatisation. Il englobe les différents processus et les techniques passives de modulation et de dissipation de la chaleur, et éventuelles mesures préventives pour éviter la surchauffe à l'intérieur des bâtiments, et cela à travers des ressources naturelles environnantes [SANTAMOURIS et ASIMAKOPOULOS, 1996].

Le refroidissement des bâtiments se fait par de différents systèmes passifs à travers l'utilisation de plusieurs dissipateurs de chaleur naturelle entre autres, l'air ambiant, les cheminées d'air et solaires, l'eau, la végétation, etc. [GIVONI, 1994]. Une stratégie de rafraîchissement passif réussie repose sur des conditions. (La stratégie du froid, fig15, pg21)

1.3.2.1 Le rafraîchissement passif par ventilation naturelle

Le rafraîchissement par ventilation est le plus utilisé : le vecteur de transmission des frigories est l'air. Quand l'air passe près d'un corps avec une température plus élevée, il augmente l'évaporation du corps humain en améliorant la dissipation des calories, apportant du rafraîchissement.

Selon SANTAMOURIS, on peut diviser la ventilation naturelle en ventilation de confort et en rafraîchissement naturel convectif : la première est utile dans la journée et permet d'améliorer la sensation de confort des usagers ; quant au rafraîchissement convectif, il prévoit d'utiliser de l'air à une température plus basse que la température intérieure du bâtiment, ce qui advient principalement la nuit. La ventilation nocturne est efficace dans les climats où l'écart de température entre le jour et le soir est important [CADONI, 2012].

1.3.2.2 Le rafraîchissement passif par évaporation

Cette stratégie de rafraîchissement par évaporation est employée dans les zones à climat chaud et sec. Elle permet de ne pas influencer l'hygrométrie de l'espace rafraîchi.

Le phénomène du rafraîchissement est dû au changement d'état de l'eau qui passe de l'état liquide à l'état gazeux ce qui conduit à une réduction de la température. Il a un impact sur l'humidité relative de l'air et il est plus efficace et rapide dans les environnements très secs.

Dans le cas du rafraîchissement par évaporation, nous pouvons parler d'évaporatif direct et d'évaporatif indirect. L'évaporation directe a été employée pour rafraîchir, non seulement des bâtiments, mais aussi des espaces extérieurs. Le rafraîchissement évaporatif indirect consiste à rafraîchir une surface par évaporation, la toiture par exemple, et à mettre en contact cette surface avec l'espace à rafraîchir.

1.3.2.3 Le rafraîchissement passif par radiation

Le rafraîchissement radiatif se base sur la propriété des corps à transférer par radiation de la chaleur vers des objets de température inférieure. Les surfaces les plus influencées par les radiations thermiques de la voute céleste sont les surfaces horizontales, comme la toiture du bâtiment. On peut classifier le rafraîchissement radiatif en deux 'familles' [SANTAMOURIS, 1996] :

a-Le rafraîchissement radiatif direct consiste à exposer la toiture du bâtiment à la voute céleste nocturne. Pour éviter les surchauffes pendant la journée, la toiture devra être protégée par des panneaux isolants amovibles qui seront déplacés pendant la nuit. La toiture emmagasine de la fraîcheur qui serait rendue durant la journée. Ce processus pourrait être inversé en hiver, en exposant la toiture au soleil pendant la journée et en la protégeant pendant la nuit.

b-Le rafraîchissement radiatif indirect consiste à exposer un liquide à la voute céleste, qui serait par la suite stocké dans des réservoirs et utilisé pour rafraîchir les espaces occupés pendant la journée. Ce système de rafraîchissement est plus simple à réaliser [CADONI, 2012].

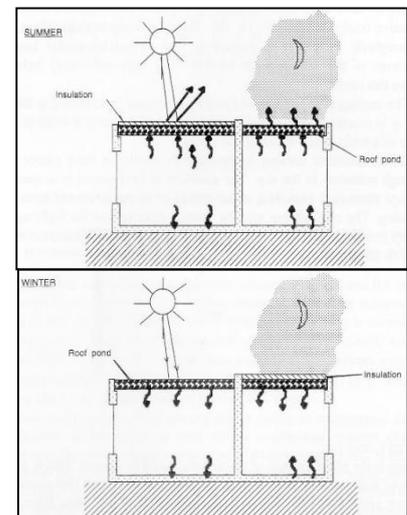


Figure 22 : Le rafraîchissement radiatif direct.

Source : Santamouris, et al., 1996.

2 La coupole et l'architecture vernaculaire

2.1 Introduction

« Du fait de la longueur variable des nervures, de leur flexibilité, du cintrage peu contrôlable, on obtient une arcature irrégulière formée d'arcs en plein cintre, ou outrepassés. » [DONNADIEU, 1977]

Chaque élément de construction est une irrégularité résultante de l'utilisation des matériaux et techniques constructives locaux (vernaculaire), et non un choix. Le Sahara est

riche en matériaux de construction ; mais aucun matériau ne puisse résister à la traction, ce qui rend le choix du type de couverture plus délicat. En utilisant le même matériau, la couverture reçoit 3 à 4 fois plus de rayonnement solaire par m² que n'importe quelle façade extérieure.

Pour que l'ambiance intérieure de l'habitation soit confortable sans climatisation, il faut que la couverture soit lourde (matériaux lourds et homogènes) et épaisse (supérieure à 40 cm) ce qui fait protégée du rayonnement solaire. Ce principe de construction qui présente une inertie thermique suffisante, est connu dans le Sahara Algérien, ainsi que dans plusieurs zones chaudes dans le monde depuis longtemps [MANSOURI, 2008].

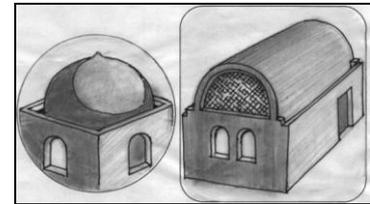


Figure 23 : Toit en voûtes et en coupes, Sud-Est Algérien.
Source : Mansouri, 2008.

Il apparaît que, le type de couverture qui s'avère le plus économiquement adapté au climat saharien est la voûte et la coupole : des couvertures lourdes et épaisses, pouvant comporter des ouvertures en point haut, afin d'éliminer l'air chaud et de rafraîchir l'ambiance [MANSOURI, 2008].

2.2 La coupole comme élément de couverture

2.2.1 Définition

Une coupole est un mode de couvrement hémisphérique qui repose sur une zone de transition octogonale. Le plus souvent elle est elle-même posée sur quatre piliers. La toiture de cette coupole est appelée un dôme [TAHAR, 2017].

Le jargon architectural, définit la coupole comme une voûte de plan circulaire, ovale ou polygonal, dont l'intrados est tracé par la rotation d'un arc sur un axe vertical [BENOIT-CATTIN, DAVOIGNEAU, 2013].

Selon Jean-Jacques Terrin, « Dômes et coupes peuvent être et sont parfois associés mais chacun remplit un rôle différent. Le dôme est une composante du paysage urbain, la coupole, un espace intérieure centralisé. » [TERRIN, 1997].

2.2.2 La progression historique de la coupole

2.2.2.1 Histoire de la coupole avant l'apparition de l'islam

Le rôle primaire de l'architecture avant qu'elle contribue à la construction d'une société, est de protéger l'homme contre les intempéries et autres forces environnantes : un moyen de lutte pour la vie [GODIVIER, 1978]. En imitant les abris des animaux, l'homme primitif

faisait un trou circulaire dans le sol, en formant ses côtés par des pierres, le couvrant par une tente ou un cône formé des branches d'arbres, de paille, d'argile ou de cuir [SALEH LAMEI, sans date].

La forme d'habitation mésopotamienne varie d'une coupole simple à forme parabolique, plan circulaire de Ø 5 à 10m (TEPE GAURA, pisé ; 4000) ; au type des maisons-ruches, combinées avec de petites maisons rectangulaires (ARPATCHIYA, feldspath ; 3500) [GODIVIER, 1978]. Quant à l'architecture égyptienne antique, la coupole circulaire a été trouvée comme toits de plusieurs palais de l'époque du Moyen Empire [SALEH LAMEI, sans date].

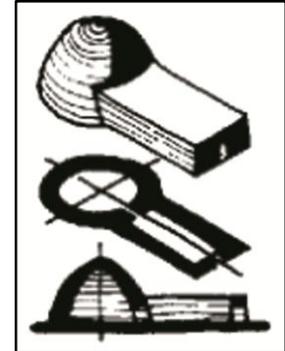


Figure 24 : Arpadschiah : maisons-ruches, Egée, Iraq. Source : Godivier, 1978.

Dans l'architecture égéenne et grecque, ce principe de construction prendra une dimension monumentale dans les bâtiments funéraires : une coupole circulaire avec une forme conique, formée par des assises de pierres liées par un mortier d'argile [GODIVIER, 1978].

Quant à l'architecture romaine, des coupoles en béton ont été utilisées sur des plans circulaires dans chacun des temples, tombes et bâtiments civils. Le Panthéon à Rome, illustre l'association du cylindre avec la coupole sphérique en forme monumentale [GODIVIER, 1978].



Figure 25 : Le Panthéon, Rome, 118 apr. J.-C. Source : Saleh Lamei.

Dans l'Orient gréco-romain, un certain progrès est réalisé : on cherche à reposer la coupole sur une base carrée à l'aide de quatre triangles sphériques : les pendentifs.

Pour une solution idéale, l'architecture byzantine primitive améliora le système à pendentifs : les quatre pendentifs forment une portion de coupole sur plan carré surmontée d'une seconde coupole. On opte aussi pour la coupole sur trompes qui offre une technique simplifiée. La base devient un octogone, sur lequel elle repose. Dans ces deux solutions, la coupole devient relativement indépendante de son socle [GODIVIER, 1978]. (fig. 26)

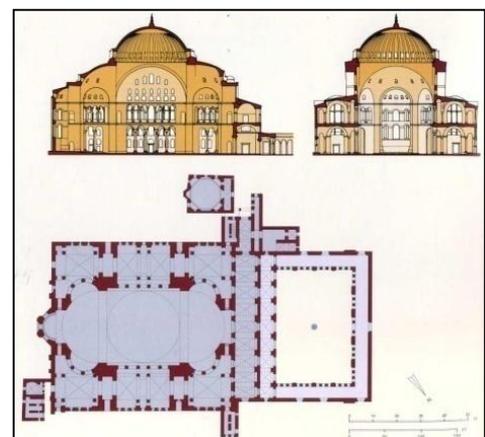


Figure 26 : Hagia Sophia, Constantinople, 532 Ap J.-C. Plan, Coupe. Source : Godivier, 1978.

La coupole a continué à être utilisée sous diverses formes dans l'architecture comme l'apparition de la coupole nervurée, la coupole sur tambour (la Renaissance). La coupole fut également adoptée par l'architecture baroque qui poussa très loin la recherche de nouvelles variantes : le fer marié au verre donna à la coupole la possibilité de franchir des grandes portées.

2.2.2.2 Histoire de la coupole pendant l'apparition de l'islam

La mosquée du Prophète MOHAMMAD (صلى الله عليه و سلم) à Médine n'avait pas de coupole et cet élément architectural n'apparaît pour la première fois dans l'art musulman qu'à la coupole du rocher à El-Qods (époque omeyyade). Nous le retrouvons ensuite à la grande mosquée de Damas et à la grande mosquée de Kairouan (devant le mihrab, ceci est une confirmation architecturale de l'emplacement du mihrab) [MEGULATI, 2008].

A l'ère fatimide, la coupole devant le mihrab a évolué en une coupole plus grande et plus belle : embellissement par les muqarnas pour passer du cercle au carré ; en rajoutant de petites coupoles dans les coins de la mosquée à l'époque mamlouk, Egypte.

L'utilisation des coupoles lisses légèrement en ogive et en bulbeuse (forme d'oignon) dans l'architecture islamique était très répandue en Iran, en Inde et à Samarkand.

En s'inspirant de l'architecture byzantine, la coupole fut utilisée essentiellement comme élément de toiture dans tous les édifices religieux de l'époque ottomane soit en Turquie ou ailleurs. Et ainsi, des coupoles voûtées ont été découvertes dans certains édifices islamiques : mosquée de Cordoue, la grande mosquée de Tlemcen [SALEH LAMEI, sans date]. La coupole a été évoluée dans plusieurs écoles : espano-maghrébine, égyptienne, turque et iranienne. Ceci dans le but d'enrichir l'architecture islamique.



Figure 27 : Mosquée Selim II, Edrine, Turquie, Sinan Pacha ; 1568.
Source : emze.com

Autre que la mosquée, la forme originale de la tombe est avec un toit formé d'une coupole ; et la raison en est que pour les anciens chrétiens, la coupole, haute, représente le ciel [SALEH LAMEI, sans date].

2.2.3 Les typologies des coupoles

Les techniques de construction des coupoles, ont été développées intelligemment, suivant la disponibilité des matériaux : bois en pénurie et terre argileuse en profusion [NOURISSIER et al., 2002]. On distingue deux grandes typologies :

a-Coupole sur plan circulaire : Il s'agit de poser une coupole sur une forme circulaire [GODIVIER, 1978].

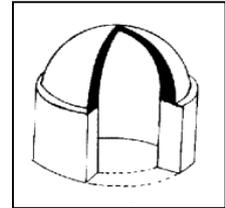


Figure 28 : Coupole sphérique. Source : Godivier, 1978.

b-Coupole sur plan carré : Le passage du plan carré de la pièce à celui de la coupole s'effectue par des pendentifs ou par des trompes [NOURISSIER et al., 2002].

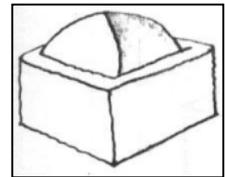


Figure 29 : Voûte pyramide. Source : Mansouri, 2008.

c-Voûte pyramide : L'intersection de deux voûtes, réalise une "fausse coupole" ressemblant à une pyramide à face bombées.

d-Coupole sur pendentifs :

La coupole n'est pas une demi-sphère complète, et son diamètre est égal à la diagonale du carré. La construction commence dans chaque coin par des pendentifs, des sortes de triangles sphériques qui se rejoignent au milieu de l'arête supérieure des murs.

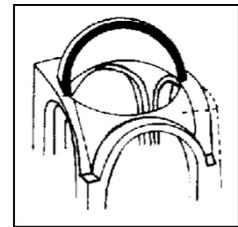


Figure 30 : coupole sur pendentifs. Godivier, 1978.

e-Coupoles sur trompes :

Le passage du carré au cercle, se fait par l'intermédiaire d'un octogone, en "coupant" les coins du carré. On peut le faire par de petites voûtes dans les coins (trompes). La coupole est posée sur l'octogonale, son diamètre étant égal au côté du carré.

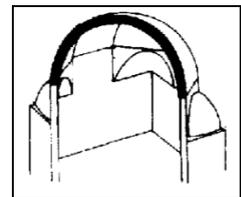


Figure 31 : coupole sur trompes. Sources : Godivier, 1978.

2.2.4 Les destinations des coupoles

La première vocation des coupoles était d'offrir une habitation à l'homme primitif, ensuite un abri après sa mort : une tombe.

Quant à l'époque romaine, la coupole a pu assurer l'équilibre dans les salles circulaires en permettant de couvrir, sans support, des espaces plus vastes [Christophe Renault, 2007]. Et ce depuis, elle a été utilisée dans les lieux de culte : églises, temples, cathédrales. Ultérieurement, l'architecture musulmane a adopté la coupole comme élément de construction dans les mosquées et les écoles (Madrassa).

Du point de vue architectural, c'est un élément fort qui contribue par sa forme esthétique à la bonne image d'une ville. D'autre part, cela a un effet sur la qualité des ambiances : l'acoustique.

Sur le plan thermique, associée à un système de ventilation, la coupole peut fournir un renouvellement d'air à l'intérieur du bâtiment et préserver certaines conditions de fraîcheur telle que les glaciers : stockage de la glace pendant l'hiver ; les bains arabo-ottomans : La forme curviligne de la coupole permet aux gouttelettes d'eau de condenser et de s'écouler le long de la courbe [DRIOUECHE DJAALALI, 2014].

Ainsi, les coupoles ont été utilisées comme toit des marchés : point de rencontre sociale.

2.3 Aspect bioclimatique de la coupole

Au niveau climatique, une étude sur les proportions et la forme montre que les toitures en coupoles sont favorables pour un climat sec et chaud, elles améliorent la qualité du confort des bâtiments.

Notons que et la coupole assure une fonction précise dans les régions arides. L'importante propriété de la forme parabolique de la coupole, au niveau climatique, est de recevoir des intensités réduites des radiations solaires par conséquent une réduction des températures de la surface extérieure, ainsi qu'une réduction de flux de chaleur vers l'intérieure ; Ce qui donne un confort thermique naturel sans utiliser la climatisation artificielle. Une recherche s'est effectuée pour étudier l'influence des facteurs : technologique et climatique sur la



Figure 32 : Eglise Orthodoxe, Santorin, Grèce. Source : La Grèce, app.emaze.com



Figure 33 : La coupole, salle omnisports, Oscar Niemeyer, Alger. Source : mapio.net

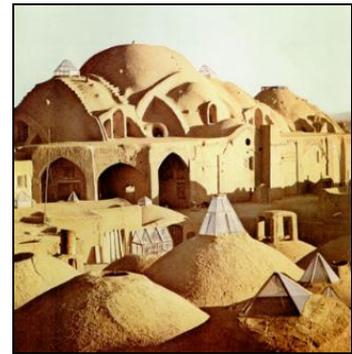


Figure 34 : Couvertures du bazar de Kashan, Iran. Source: Florian Neukirchen, alamy.com

coupole, dont les résultats résument que l'utilisation de ces éléments en zones arides n'est pas du hasard :

- Les plafonds hauts transmettent moins de radiations aux occupants que les toits bas, pour la même surface couverte. Le transfert de la chaleur par convection est moins important avec le toit haut, puisque l'air chaud forme une couche au-dessous du plafond.
- Le haut plafond augmente le volume de l'air dans la construction, ce qui permet à l'air de garder sa pureté. Un tel espace n'exige pas un taux de ventilation élevé, ce qui est essentiel pour ces régions durant la journée.
- La coupole de 90° est plus performante que les toits plats, elle augmente le temps en confort à un maximum de 1.5% avec un facteur d'absorptivité élevé, et diminue la température de intérieure de valeurs qui ne dépassent pas 1°C en été et en hiver, ce qui est favorable en été.
- La grande différence, en hauteur, entre deux ouvertures, donne de meilleures possibilités de dégager l'air chaud par l'effet de cheminée [MANSOURI et SAHNOUNE, 2008].

Le principe ventilatoire est évident au Panthéon de Rome (fig. 35). L'ouverture ronde au sommet du dôme permet d'évacuer l'air chaud par la basse pression créée au-dessus du dôme, forçant l'air frais le remplacer en pénétrant par les ouvertures inférieures [Watson, et al., 1999].

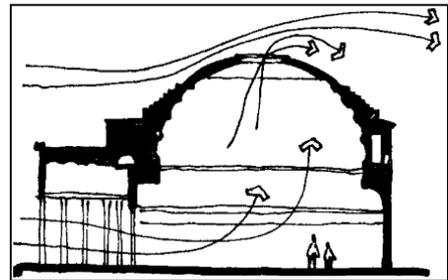


Figure 35 : Le principe ventilatoire au Panthéon de Rome. Source : Watson, 1999.

Dans les régions froides, les petites formes hémisphériques utilisées par les eskimos sont pour défléchir les vents froids dans le but de conserver de la chaleur à l'intérieur [ZEROUAL, 2006].

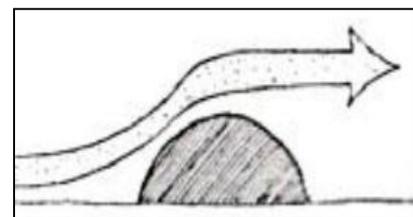


Figure 36 : Effet du vent sur l'Igloo. Source : Pour une anthropologie de la maison, Amos Rapoport, 1972.

2.3.1 La compacité

« L'intérêt des formes concaves a largement suscité l'imagination des architectes dans les années 70 : dômes, demi-sphères, etc., visant toutes à économiser les matériaux et l'énergie en réduisant l'enveloppe. L'architecture vernaculaire, elle aussi a toujours cherché à optimiser le rapport Surface/Volume, notamment par le travail de la toiture. » [LIEBARD et DE HERDE, 2006].

Les dimensions de la coupole influencent directement sur la valeur du C_f en l'augmentant, comme elle influe par conséquence sur la quantité des flux de chaleur transmis de l'extérieur vers l'intérieur [ZEROUAL, 2006].

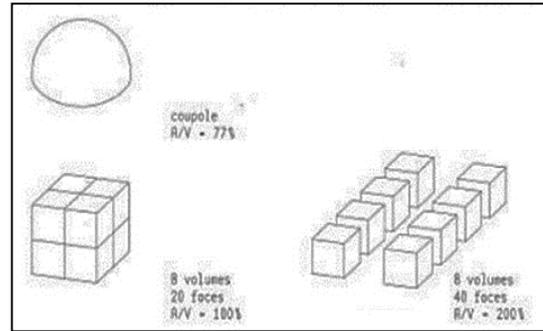


Figure 37 : Développement de surface pour un même volume. Source : ENSAF.

2.3.2 Le fonctionnement de façon passive

La forme de toiture en coupole offre une surface minimale ($1/3$ d'un toit plat) avec un volume important, comme elle présente une grande capacité de réflexion de la radiation solaire ($2/3$ /U) vers le ciel. Elle se réchauffera, donc, moins vite et se refroidira plus vite [ZEROUAL, 2006].

Cet élément de couverture en coupole, adaptés aux besoins thermiques des régions chaudes permettent la réflexion des rayons solaires vers la voûte céleste, l'aération des espaces intérieurs ainsi que le glissement du sable au-dessus de la toiture.

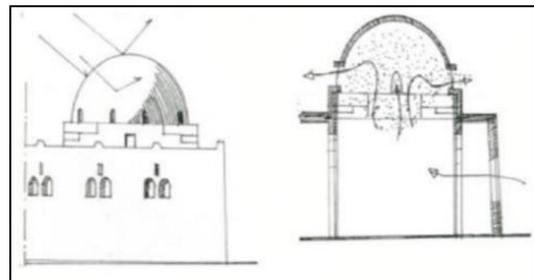


Figure 38 : Une seule partie de coupole reçoit les rayons solaires. Source : Messaoudi, Fellah, 2017.

La coupole permet une meilleure circulation d'air à l'intérieur :

Durant le jour : les rayons solaires sont réfléchis vers la voûte céleste, l'air chaud intérieur est amassé au-dessus du vide créé par la coupole (un grand volume d'air) puis il est évacué et éliminé vers l'extérieur à travers une ouverture située en haut ou sur les côtés de la coupole. Pendant la nuit : grâce à l'effet du refroidissement nocturne, ces surfaces se refroidissent plus rapidement que les surfaces horizontales [FELLAH et MESSAOUDI, 2017].

•• **Le tirage thermique** : est le système de ventilation naturelle le plus répandu actuellement. Afin de réaliser un bon tirage thermique, les entrées d'air sont placées à la base

des murs de façade, et des bouches et un conduit vertical, évacuent l'air par le toit [MESLI, 2017].

De plus de l'évacuation de l'air chaud, l'ouverture au sommet de la coupole sert à assurer l'éclairage de l'espace intérieur [ZEROUAL, 2006].

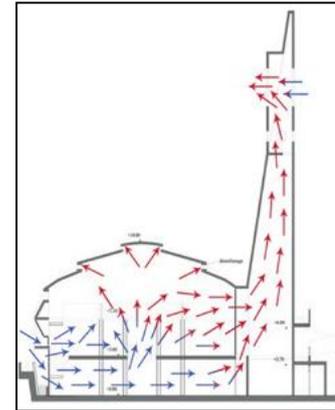


Figure 39 : Mosquée Ibrahim El-Khalil, Tunis ; Coupe principe ventilatoire, Lotfi Rejeb, 2015. Source : hamdanereligiontn.blogspot.com

2.4 Des exemples à travers le monde

2.4.1 Village El-Gourna-Louxor, en Egypte par Hassan Fathy

El-Gourna est un village agricole conçu par Hassan Fathy, et construit par les paysans en qualité des bénéficiaires. L'architecte propose un urbanisme à l'échelle humaine inspiré des traditions locales et l'utilisation, comme matériau de construction, de la brique de terre crue, avec des voûtes sans cintres et coupoles. ⁽¹⁰⁾

Le tissu urbain traditionnel de la ville est compact et cohérent : des rues étroites et des cours spacieuses ou jardin à l'intérieur des maisons, sans abris. Ces deux éléments consistent à stocker l'air frais et pur et l'empêcher de s'échapper. Au centre de la ville comme au centre de la maison, lors d'une radiation solaire intense, l'air chaud monte par conduction ou par tirage thermique, et sera remplacé par l'air frais d'un autre côté de la ville.

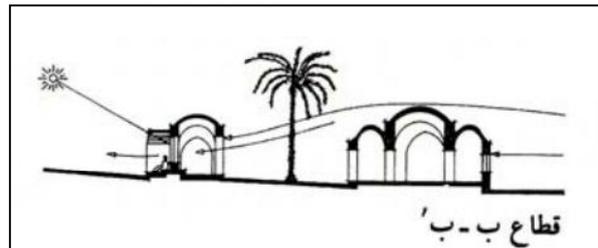


Figure 40 : El Gourna, Coupe urbaine. Source : Hassan Fathy, Natural Energy and Vernacular Architecture, 1988.

En ce qui concerne la maison du paysan, le salon est orienté au sud, recouvert d'une coupole et soutenu par une loggia orientée au nord. La coupole est dotée d'une petite ouverture au sommet qui sert à évacuer continuellement l'air chaud vers l'extérieur ;

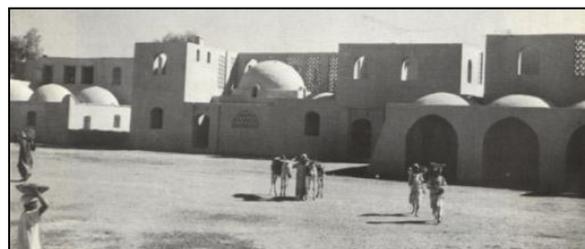


Figure 41 : Vue sur le village d'El-Gourna. Source: Hassan Fathy, Architecture for the poor, 1969.

(10) OpenEdition Journals, Hassan Fathy et les projets de villages touristiques dans l'Égypte des années 1960 et 1970, en ligne sur [<https://journals.openedition.org>]

de ce fait, l'air frais est toujours aspiré par la loggia ombragée.

Ce comportement d'air est assuré par la hauteur importante de la coupole : l'air s'échapperait par la haute ouverture éloignée du sol, produisant un flux d'air plus bas pour refroidir la pièce. A noter que, les grandes ouvertures favorisent des gains thermiques importants. Quant aux petites ouvertures, elles minimisent les gains thermiques [FATHY, 1986].

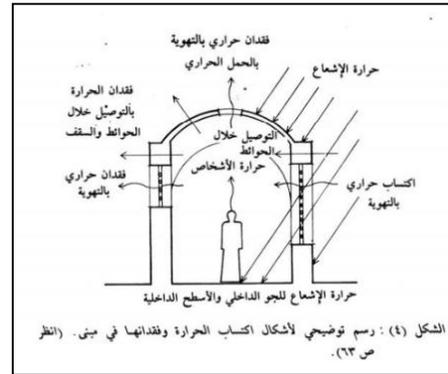


Figure 42 : Coupe principes de ventilation d'une pièce avec coupole. Source : Hassan Fathy, Natural Energy and Vernacular Architecture, 1988.

Cette conception, par ses aspects bioclimatique, socioculturel et esthétique ; a fasciné et inspiré l'architecte Hani Al-Miniaoui à édifier les villages agricoles à Boussada et dans plusieurs endroits en Algérie.

2.4.2 Habitations rurales, dites "cases-obus", de l'ethnie Mousgoum (Teleuk), au Cameroun

En forme de dôme, elles sont construites par le peuple Mousgoum avant le 19^e siècle et disparues dans les années 70 ; celles-ci sont construites dans un but touristique. ⁽¹¹⁾



Figure 43 : Les cases-obus, Vue d'ensemble, Cameroun. Source : le teleuk du peuple Mousgoum, maison-monde.com

Sans fondations, sans échafaudage, sans armature, ni compas ; ces hautes habitations sont faites de boue armée avec de la fibre végétale et d'autres matières organiques assurant la cohésion et l'imperméabilité, séchée au soleil. Ces cases de 20m de hauteur, épousant un plan circulaire de 7m de diamètre, sont adaptées à de bonnes conditions de logement comme la ventilation et les changements climatiques tels que les précipitations. A mesure que les parois montent, elles s'incurvent se rejoignent formant une coupole où une ouverture circulaire d'environ 40cm est réservée au

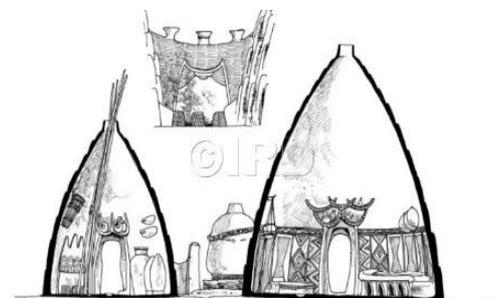


Figure 44 : Les cases-obus, Coupe, Cameroun. Source : Seignobos, Christian, indigo.ird.fr

(11) Christian Seignobos, Fabien Jamin ; La case-obus histoire et reconstruction, en ligne sur [indigo.ird.fr]

sommet des huttes : elle contribue à la circulation de l'air. Cette ouverture aussi appelée « trou de la fumée » est fermée par une dalle ou un pot pendant les pluies pour éviter la pénétration de l'eau dans la maison ; et c'est par là qu'est assurée l'aération et l'éclairage de l'habitat.

Le teleuk est une structure écologiquement durable, construite seulement avec des matériaux locaux trouvés qui sont 100% réutilisables et biodégradables. Le bâtiment est conçu pour maximiser les avantages thermiques des matériaux de construction, permettant à l'intérieur d'être naturellement frais même lors des périodes chaudes. ⁽¹²⁾

2.4.3 En architecture régionale contemporaine, Bassuna, Egypte

La mosquée de Bassuna, conçue par l'architecte Waleed Arafa en 2019, est recouverte d'un système de toit hybride : une grille de poutres en béton, coulée in-situ, formant un carré central (6x6 m) recouvert d'une coupole principale, et 108 ouvertures carrées plus petites (0,82 x 0,82 m).

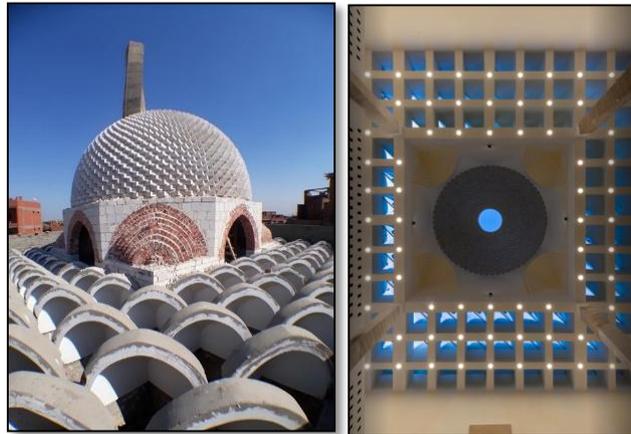


Figure 45 : Vues sur les triangles sphériques, mosquée de Bassuna, Egypte. Source : Waleed Arafa, Essam Arafa, Archdaily.com, 2019.

Les ouvertures carrées sont partiellement recouvertes de portions de coupoles (des triangles sphériques), constituées des demi coupoles, fixes, et panneaux de verre verticaux fonctionnels permettant au vent frais du nord de haute altitude de s'infiltrer dans la mosquée. Ces éléments architectoniques permettent aussi, à la lumière du soleil indirecte non éblouissante pour illuminer naturellement l'intérieur et à l'eau de pluie à collecter et à utiliser pour nettoyer et arroser les plantes. ⁽¹³⁾

(12) Douce Cahute, Le teleuk du peuple Mousgoum, en ligne sur [<https://maison-monde.com/teleuk-peuple-mousgoum/>]

(13) ArchDaily, Matheus Pereira, Basuna Mosque / Dar Arafa Architecture, en ligne sur [www.archdaily.com]

II- Approche énergétique

Introduction :

Dans le bâtiment, l'énergie permet d'éclairer, de chauffer et de ventiler. « *Par la puissance qu'elle confère, elle représente un enjeu économique, social, géographique à l'échelle planétaire. Il n'est donc pas étonnant qu'elle soit l'objet de concurrence commerciale* » [LECERF, 2012].

1 Contexte mondial

1.1 Consommation énergétique au monde

« *La consommation mondiale d'énergie est élevée de 42% entre 1990 et 2008, et sera augmentée de 53% entre 2008 et 2035, c'est-à-dire de 505 quadrillion Btu en 2008 à 770 quadrillion Btu ⁽¹⁴⁾ en 2035. Cette consommation s'accroît principalement dans les pays en dehors de l'OCDE, due à la croissance économique. L'utilisation d'énergie dans des pays non-OCDE augmente de 85% par rapport à une augmentation de 18% pour les économies d'OCDE* » [EIA, 2011].

1.2 Consommation énergétique au Sud Méditerranéen

Dans ces pays, le bâtiment est la cause principale de plus d'un tiers de la consommation d'énergie (38% en moyenne, entre l'énergie et l'électricité). On doit donc, travailler sur ce secteur afin d'intervenir sur le marché : mesures d'efficacité énergétique et intégration des énergies renouvelables.

Concernant l'efficacité énergétique et en fonction des différents progrès réalisés dans le secteur de l'énergie dans les différents pays, certains pays ont des objectifs plus ambitieux que d'autres. Ces objectifs sont définis pour des secteurs spécifiques, avec différents niveaux de détails. La Jordanie et la Tunisie ont les objectifs les plus ambitieux : la stratégie jordanienne vise à réduire la consommation d'énergie de 18% en 2030, la Tunisie s'est engagée à réduire sa consommation d'énergie de 30% d'ici 2030 [www.meetmed.org].

1.3 Les labels de performance énergétique

Un label est un indicateur en termes de confort, de performance énergétique et de respect

(14) Btu : quadrillion British thermal unit, est une unité d'énergie anglo-saxonne, 1 Btu = 2,52. 10⁻⁸ TEP ; TEP : Tonnes d'équivalent pétrole.

de l'environnement. Afin de réaliser des bâtiments à faible consommation d'énergie, le label s'appuie sur des repères et est soumis à des procédures d'évaluation.

• **Les labels globaux internationaux**

D'un point de vue plus large, l'aspect énergétique et le choix du matériau ne forment qu'une partie des interactions du bâtiment avec son environnement. De nos jours, s'appuyer sur la conception architecturale et ses choix des



Figure 46 : Systèmes de certification internationaux.
Source : bluebuildingfoundation.de

dispositifs techniques est primordial afin de contrôler les consommations énergétiques et produire la qualité environnementale du projet. Des approches internationales globales règlementent ce type de conceptions interactions [SEMAHI, 2013].

2 Contexte national

2.1 Contexte du bâtiment algérien

Afin de diminuer la consommation domestique d'électricité, il est important d'investir dans l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'habitat et de leurs équipements électroménagers. Selon une étude du CNERIB, la consommation moyenne d'un appartement en Algérie est estimée à 15,2 m³ par m² par an pour le gaz et à 2200kWh par an pour l'électricité [KABOUCHE, 2012].

Suite à une réflexion sur la consommation active et passive des logements neufs initiée en 1995, l'Algérie a développé des documents techniques réglementaires (DTR) visant à la promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. Ces DTR ont fait l'objet, en 2000, d'un décret portant sur la réglementation thermique concernant les bâtiments neufs à usage d'habitation et tertiaire, et devaient permettre de réduire de 30% la consommation d'énergie des bâtiments neufs, hors poste climatisation [KABOUCHE, 2012].

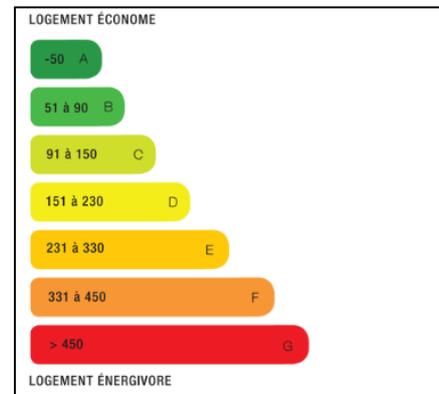


Figure 47 : Comparatif des consommations des bâtiments (DPE).
Source : sdimmo.fr

2.2 Consommation énergétique en Algérie

2.2.1 Stratégie nationale de la maîtrise d'énergie

Un dispositif de mise en œuvre opérationnel, global et cohérent qui s'articule autour de quatre principaux éléments : APRUE, FNME, PNME, CIME a été mis en place.

- Le PNME : cahier des objectifs de la maîtrise de l'énergie à l'horizon de 20 ans ainsi que les orientations programmatiques.

Les priorités énumérées d'un projet de programme pour le PNME ont débouché sur la proposition d'un portefeuille d'actions pour le secteur résidentiel, concernant l'éclairage performant, l'eau chaude sanitaire solaire, les Projets HPE (Haute Performance Energétique) sur le logement social et la Rénovation Thermique dans l'habitat existant [NAIT, 2011].

Afin de protéger l'économie du pays et d'assurer sa sécurité énergétique à long terme ; un processus de transition énergétique est mis en place à travers deux programmes prioritaires : l'application de mesures d'efficacité énergétique qui s'agit des secteurs du bâtiment, du transport et de l'industrie visant à atteindre une économie d'énergie globale de l'ordre de 60 MTep d'ici 2030 ; et le développement des énergies renouvelables qui prévoit l'installation d'une capacité de 22 000 MW d'ici 2030. Les deux programmes ont pour objet d'approvisionner en priorité le marché national pour satisfaire les besoins sans cesse croissants, de préserver les ressources énergétiques pour garantir l'indépendance énergétique future du pays ainsi que d'exporter pour assurer l'autofinancement du pays [AKACEM, 2019].

2.2.2 La réglementation thermique algérienne

En Algérie, la réglementation thermique est portée par le décret exécutif n°2000- 90. ⁽¹⁵⁾ Ceci est pour introduire l'efficacité énergétique dans les bâtiments neufs à usage d'habitation et autres [DALI, 2006].

Des DTR, qui ne s'appliquent qu'aux bâtiments, mentionnent les exigences réglementaires que doivent satisfaire leurs enveloppes, à savoir :

(15) inclus dans la loi Algérienne 99-90 relative à la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment.

- DTR C 3-2 relatif aux règles de calcul des déperditions calorifiques d'hiver pour les bâtiments à usage d'habitation.
- DTR C 3-4 relatif aux règles de calcul des apports calorifiques d'été pour les bâtiments.
- DTR C 3-31 relatif à la ventilation naturelle des locaux à usage d'habitation.
- Arrêté du 27mars 2004 portant approbation du DTR E 4.4 intitulé «Travaux d'isolation thermique et d'étanchéité des toitures en tôles d'acier nervurées».

Cette réglementation renforce de la performance énergétique globale du bâtiment et laisse ainsi de larges possibilités aux concepteurs de choisir entre les performances thermiques globales du bâtiment aussi bien dans le choix des matériaux que la conception du cadre bâti.

La vérification se fait séparément comme suit :

- Pour la période d'hiver, le DTR stipule que pendant la période de chauffage, les déperditions calorifiques par transmission à travers les parois doivent être inférieures à une valeur de référence.
- Pour la période d'été, les apports de chaleur à travers les parois opaques (APO) et vitrées (AV) calculés à 15 h au mois de Juillet (considéré comme le mois le plus chaud de l'année) doivent être inférieurs à une limite appelée 'Apport de Référence' [IMESSAD, et al., 2017].

2.2.3 Les labels et le bâti algérien

Le logement algérien n'a pas respecté les réglementations thermiques exigeantes ; donc on peut affirmer qu'il n'existait aucune réglementation technique pour la réalisation des bâtiments bioclimatiques [OULD-HENIA, 1993].

« La vie quotidienne dans le bâtiment induit des consommations énergétiques, et donc des émissions de GES, à travers le chauffage, la climatisation, la cuisson, etc., en régime d'utilisation, mais aussi dès le processus de construction. En outre, on peut également considérer à quel point les matériaux utilisés et leurs restes sont recyclables » [KABOUCHE, 2012]. *« Cette facture pèse lourd dans le budget du ménage algérien. La consommation d'énergie des bâtiments a augmenté de 30% au cours des 30 dernières années, à cause de l'accroissement du parc de logement. D'autres pays sont vite allés obliger l'utilisation des étiquettes de performance énergétique, pour arriver à réaliser des bâtiments neufs à basse consommation de 80 voire 50 kWh/m²/an, au lieu de 300 kWh/m²*

/an » ⁽¹⁶⁾, et définir des exigences réglementaires des niveaux de performance énergétique des constructions neuves : HPE, BBC, etc.

Les institutions algériennes ne sont pas arrivées encore à ce stade, et le bâtiment algérien reste toujours soumis à des cahiers des charges classiques, négligeant tous les paramètres climatiques. Ceci est dû à l'importation massive et irréfléchie des modèles industrialisés énergivores et insuffisamment maîtrisés par notre pays. En dépit de tout ça, l'OPGI tente à lancer des concours de conception bioclimatiques type HPE (haute performance énergétique), dans plusieurs wilayas, mais l'opération reste insuffisante [KABOUCHE, 2012].

Conclusion

Aujourd'hui, l'amélioration de la qualité de vie de l'homme en termes de l'environnement intérieur du bâtiment et de la diminution de sa consommation énergétique ; sont devenues deux faces de la même monnaie qui contribuent à la protection de l'être humain ainsi que sa planète et ses ressources. En récapitulation de ce chapitre, nous stylisons un ensemble de normes, de concepts et de stratégies bioclimatiques qui sont indispensables lors d'une conception architecturale contributrice au confort thermique. L'architecte concepteur doit aller loin dans sa conception en termes de détails et caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction, et dispositifs et stratégies passifs constituant l'enveloppe du bâtiment, la nature d'interaction de ces éléments avec l'environnement extérieur détermine la performance du bâti.

Le secteur de bâtiment est le plus consommateur d'énergie et émetteur de GES à l'échelle mondiale ainsi que nationale. La majorité de ces consommations sont enregistrées en matière de chauffage et de climatisation. A cet effet, il est indispensable de mettre en œuvre une réglementation thermique pour arriver à une efficacité énergétique meilleure, notamment dans les constructions neuves.

(16) Objectif à atteindre par toutes les institutions européennes, Source : [www. Effinergie.org](http://www.Effinergie.org), consulté en juin 2010.

L'architecture vernaculaire, par son savoir-faire, a su répondre à la problématique de lutte contre la surchauffe, et l'économie de l'énergie tout en utilisant le climat, le site ainsi que les matériaux produits localement.

Ainsi, nous avons présenté à travers ce chapitre, un aperçu historique de l'évolution des coupoles. Ce qui nous a permis d'entreprendre une diversité des formes existantes, des destinations et des aspects bioclimatiques de la coupole ; qui poussent les concepteurs à l'introduire dans leurs projets.

3 Chapitre II :

Présentation du cas d'étude

et

Méthodologie

Chapitre II : Présentation du cas d'étude et méthodologie

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'échantillon de la maison traditionnelle à étudier à travers ses composantes et techniques constructives vernaculaires et bioclimatiques, et son contexte climatique dont l'objectif est d'évaluer et d'améliorer le confort thermique dans cet habitat. En parallèle, nous présentons la maison traditionnelle témoin, où on a effectué notre enquête in-situ au préalable ; les températures relevées serviront d'une base pour confirmer et valider les résultats de simulations numériques.

Une méthodologie détaillée sur les étapes de modélisation et de simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel multi-usage « Trnsys » constitue une partie de ce chapitre.

1.1 Motivation de choix de l'échantillon

L'architecture d'El-Oued est un exemple meilleur de solutions humaines émergentes dans la construction des maisons de façon que les températures à l'intérieur soient moindres autant que possibles des températures extérieures. On observe des villes compactes, des rues étroites, et des murs épais construits avec la brique de boue. Il n'y a qu'au Souf qu'on trouve la coupole (Kouba) présente dans l'architecture des maisons d'habitation traditionnelles, d'où vient le nom « la ville des 1000 dômes », car la coupole réfléchit une bonne partie des rayons solaires en été. [VOISIN, 1985], [KJEILEN, 1996], [DJEBALI, 2005]

De ce fait, nous avons choisis le cas de la maison traditionnelle d'El-Oued comme échantillon afin d'étudier l'impact de la coupole sur la qualité thermique de l'habitat.

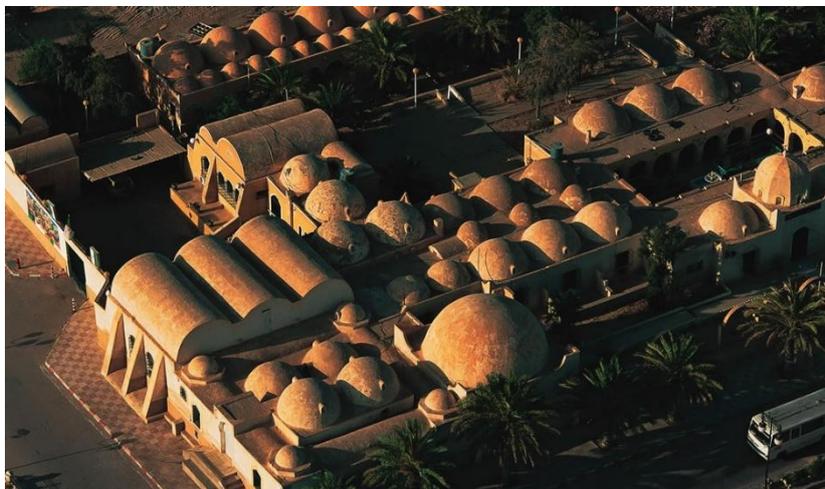


Figure 48 : Vue sur l'architecture de la ville d'El Oued. Source : aps.dz

1.2 Présentation de la ville

La ville d'El Oued ou Oued Souf est une ancienne ville située à environ 650 Km au Sud-Est de la capitale Alger, connue comme la capitale du Souf, surnommée « La ville aux mille coupoles », et se caractérise par un climat désertique et très sec. Sa situation géographique est de : 31°57 de Latitude, 2°59 E de longitude et de 163 mètres d'altitude, d'après les mesures de Colonel Flatters, 2000 [S Djebali ; 2005].

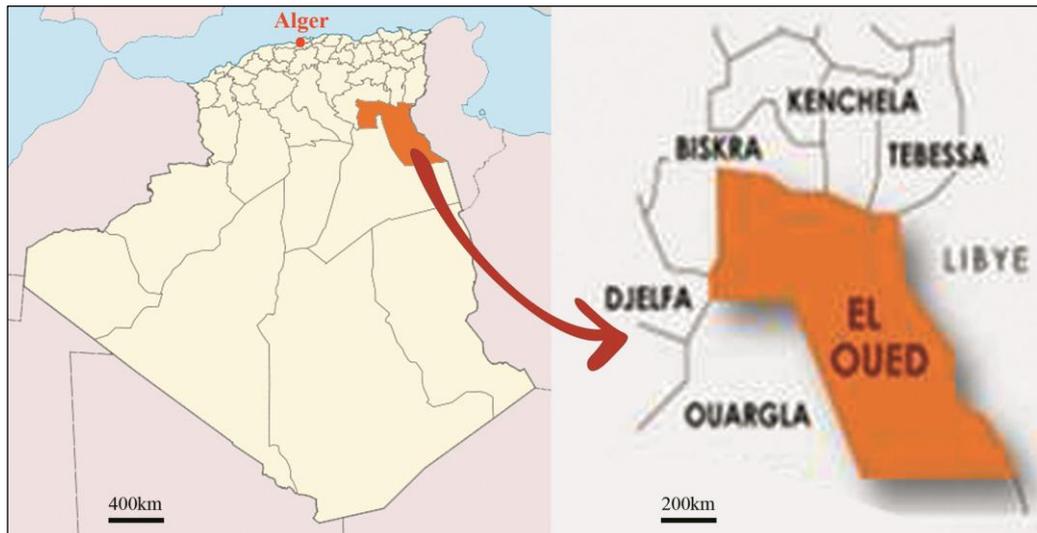


Figure 49 : Situation géographique d'El Oued. Source : Osmane, Rached, 2019.

1.3 Présentation générale du projet

La maison traditionnelle soufie, d'une forme presque carrée, est un résultat de multiplication d'un module de base qui est la cour, mitoyenne aux maisons voisines du Nord, Est et Sud formant le tissu de Taghzout à Guemar ; ce qui explique le caractère multiple des coupoles.

Il n'y a aucune théorie exacte démontrant les inspirations des habitants pour utiliser des coupoles dans leurs maisons ; mais, ces éléments de couverture sont adaptés aux besoins thermiques des régions à climat pénible (chaud et aride). [ZEROUAL, 2006]

1.4 Données climatiques

Le rayonnement solaire et la température sont élevés en été, et faibles en hiver. La température moyenne annuelle est de 21,18°C. Les températures maximales absolues dépassent parfois les 45°C de Juin à Août alors que les minimas absolus descendent au-dessous de 0°C pendant 3 à 4 jours durant l'hiver, de Décembre à Février.

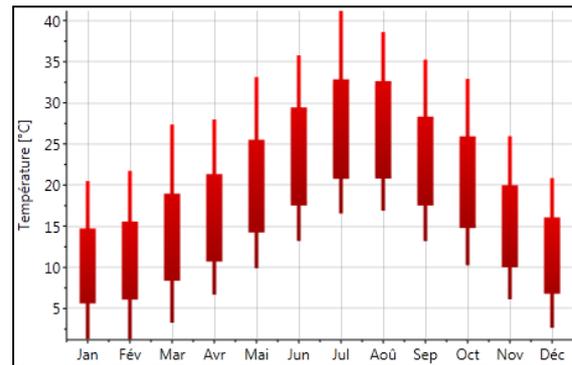


Figure 50 : Données climatiques tirées du logiciel meteonorm (la température). Source : auteur, 2021.

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 76, 80mm, caractérisées par deux maxima de chutes de pluies en Mars et en Décembre. Quant à l'humidité de l'air est très faible : entre un maximum atteignant 69% durant le mois de Décembre et un minimum descendant à 24%.

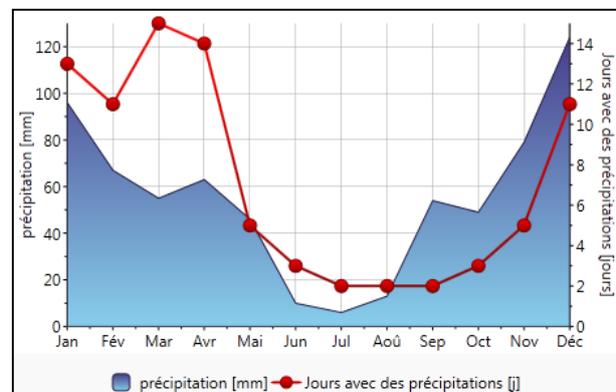


Figure 51 : Données climatiques tirées du logiciel meteonorm (la précipitation). Source : auteur, 2021.

La vitesse moyenne annuelle est de 3,07 m/s avec une direction variable suivant les saisons : le vent du Nord-Ouest (Dahraoui) en printemps, le vent du Nord-Est (Bahri) de la fin Mai à la mi-October avec des vitesses maximales atteignant 15 à 30m/s. Le sirocco (vent du Sud) chaud et sec intervient surtout en été. [ONM, 2016]

1.5 La contribution de la conception bioclimatique dans l'habitat étudié

1.5.1 A l'échelle urbaine

1.5.1.1 L'implantation

La maison objet d'étude est située dans le tissu traditionnel Taghzout à Guemar qui est étonnant par sa linéarité et sa relative aération.

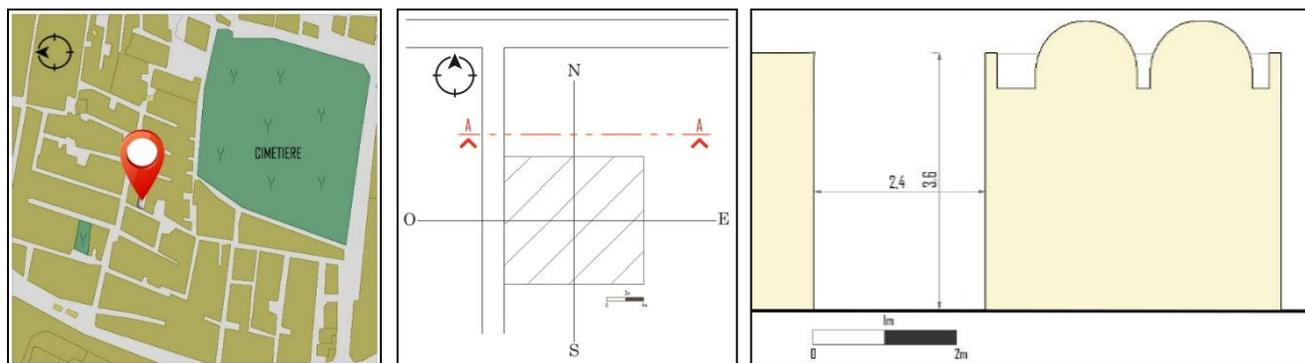


Figure 52 : Localisation de la maison, Plan de masse, coupe A-A (la ruelle) - Taghzout.
Source : Zeroual, 2006 ; traités par l'auteur, 2021.

La coupe montrant la dimension de la rue relative à la hauteur des maisons explique le rapport $W/H = 2,4/3,5 = 0,68$ ce qui ne permet pas un bon ombrage de la façade Ouest notamment la période de surchauffe. Ce qui fait que le confort intérieur de l'espace est conditionné par la minimisation des gains de chaleur dus à la toiture et la façade Ouest qui sont exposées au soleil.

1.5.1.2 L'orientation

La maison est allongée légèrement sur l'axe Est-ouest. Sa façade principale est orientée vers l'Ouest, ainsi que le mur intérieur qui donne sur la cour ; ce qui est défavorable car ils reçoivent les radiations solaires de l'après-midi, de 12 :00 à 15 :00h.



Figure 53 : étude de l'ensoleillement de la maison (façade Ouest, la cour) pendant la journée. Source coupe : Zeroual, 2006 schématisée par l'auteur, 2021.

1.5.1.3 Compacité urbaine

La maison du Souf est associée à d'autres maisons qui lui sont mitoyennes. Ce qui permet la minimisation des surfaces déperditives. Les façades Nord, Sur et Est sont bien protégées des gains de chaleur par le fait de la compacité ce qui rend la maison moins exposée aux gains de chaleurs dus à l'air chaud et à la radiation solaire.

Surface de la maison = 167,23 m²

Surface totale de l'enveloppe = 405,15 m²

Surface des parois exposées = 216,90 m² (53,50%)

Parois verticales : façade Ouest (ext + int) = 57,45 m²

Plancher horizontal (Toiture)= 159,45 m²

Surface des parois non exposées (Murs Nord, Sud et Est) = 188,25 m² (46,50 %)

1.5.2 A l'échelle architecturale

1.5.2.1 L'organisation des espaces intérieurs

Les chambres de la maison traditionnelle « Diar » s'articulent autour d'un espace central commun qui est la cour « EL HAOUCH », où les habitants se rencontrent obligatoirement, car la maison est dépourvue de couloirs. Le rôle de la cour est d'augmenter l'éclairage et l'aération des pièces d'habitation. Chaque pièce est dotée d'une coupole permettant au sable de glisser au-dessus de la toiture.

L'organisation spatiale de la maison traditionnelle du Souf :

-El Haouch (la cour) : sa surface est de 36,04 m² (21,55% de la surface de la maison) dont l'utilisation est polyvalente : le domaine d'évolution aisée de la femme et pour dormir les nuits chaudes de l'été. Souvent dans la cour se trouve un palmier ou un puits.

- S'guiffa : espace en chicane de grande valeur symbolique, servant à soustraire la cour des regards extérieurs, sa surface est de 12,24 m².

- le seuil : la frontière entre deux mondes, le dedans et le dehors, le sacré et le profane.

- Dar Edhiaf : ou le salon, espace polyvalent de réception d'une surface de 18,56 m².

- Dar : ou chambre, espace utilisé la nuit, polyvalent pour permettre le nomadisme saisonnier, l'utilisation des pièces en plein Sud en hiver, en été c'est l'inverse.

- Sabat : la partie couverte de la cour sur 15,40 m², orienté vers le Nord.

- Khabia ou Dar el Khazine : Cuisine, Dépôt,Etc .



Figure 54 : Plan de la maison traditionnelle, Souf.
Source : Zeroual, 2006 traité par l'auteur, 2021.

La majorité des espaces sont peu profonds ; ils dépassent, rarement, le diamètre toléré d'une coupole [ZEROUAL, 2006], [CHAOUUECHE, 2006].



Figure 55 : Coupe A-A de la maison traditionnelle. Source : Zeroual, 2006 traitée par l'auteur, 2021.

1.5.2.2 La ventilation naturelle

En général, la ventilation naturelle de bâtiment est provoquée par une différence de température ou de pression d'air. Dans notre cas d'étude, celle-ci se fait durant la nuit suite à la restitution de la chaleur stockée au niveau des parois de l'enveloppe, alors que dans la journée, elle sera évacuée par les fenêtres et aussi par effet de tirage thermique à travers l'ouverture au niveau de la coupole.

La cour permet aux espaces autour d'elle d'avoir des ouvertures et d'assurer l'aération de l'habitation : lorsque les températures extérieures sont moins élevées, l'air frais pénètre dans les espaces intérieurs par les fenêtres et est évacué par effet de cheminée. Cet élément « la cour » est un dispositif de rafraîchissement d'air dans l'habitat traditionnel du Souf, ce qui permet de l'utiliser pour dormir la nuit durant les saisons chaudes.

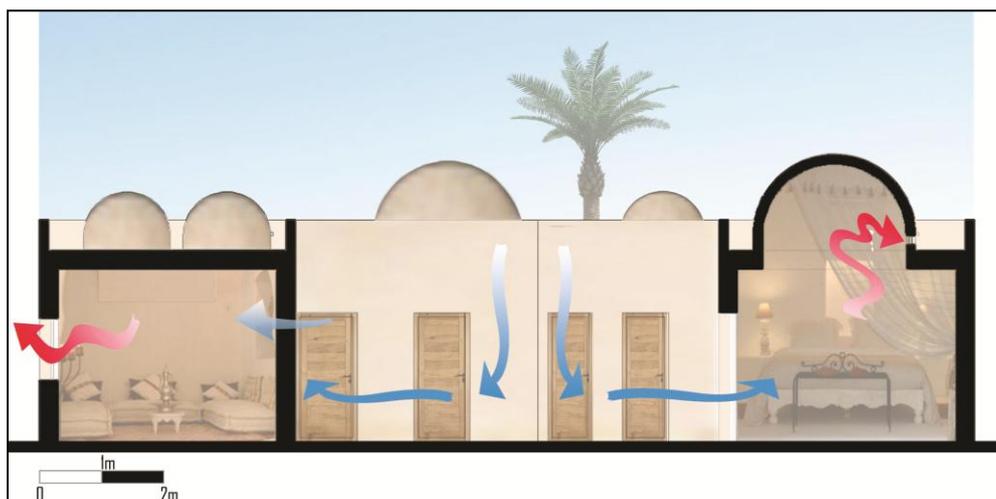


Figure 56 : Schéma de principe de ventilation naturelle. Source coupe : Zeroual, 2006 schématisé par l'auteur, 2021.

1.5.2.3 Compacité architecturale

On constate dans l'habitation du Souf que la surface de la cour est importante ; ce qui lui donne une caractéristique essentielle, qui dépasse la fonction d'un vide laissé pour l'éclairage et l'aération. Le volume de la maison, qui est un parallélépipède d'une base presque carrée et d'une hauteur de 3.00 m, ne lui offre pas un facteur de forme acceptable. De même, L'utilisation d'une couverture en coupole lui fournit un maximum de surfaces exposées aux gains de chaleur avec un minimum de volume.

Surfaces totales de l'enveloppe : 405,15 m²

Surface des parois verticales :

- Façade ouest (ext +Int) : 57,45 m² •Façade est (ext. +Int) : 57,45 m²
- Façade sud (ext. +Int) : 64,40 m² •Façade nord (ext. +Int) : 64,40 m²

Surface des planchers horizontaux :

Toiture : 159,45 m²

Volume de la maison : 535,69 m³

Le facteur de forme : $Cf = S/V = 405,15 / 535,69 = 0.75$

Les dimensions de la coupole influencent directement sur la valeur du coefficient de forme en l'augmentent, comme elle influe par conséquence sur la quantité des flux de chaleur transmis de l'extérieur vers l'intérieur. Le facteur de forme sans coupoles est de : $335,95/501,39 = 0,67$.

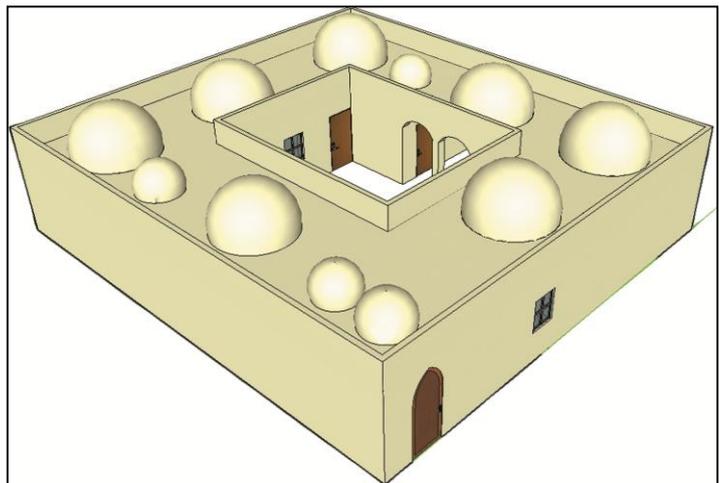


Figure 57 : Axonométrie de la maison soufie. Source : Zeroual, 2006 modélisée par l'auteur, 2021.

1.5.2.4 Protection solaire

Dans cet exemple la cour est utilisée comme un espace agréable pour dormir les nuits chaudes de l'été. Pendant le jour, la surface importante de la cour en relation avec la hauteur des parois 3,5m (H/L est donc : $3,5/6,8 \approx 0,5$) influe négativement sur les rayons solaires transmis vers l'intérieur. En effet pour lutter contre ces effets négatifs, les habitants ont créé un espace semi couvert ombragé et orienté vers le Nord à l'intérieur de l'habitation appelé le « Sabat », ce qui leur permet le repos et la protection contre le soleil pendant l'après-midi.

Les fenêtres sur la façade sont protégées des rayons solaires par les masques d'occultation créés par les ruelles étroites (maisons d'en face), leur surface est presque négligeable par rapport à la surface de la façade 1,15%.

La toiture en coupoles est partiellement protégée des radiations solaires par l'ombre projetée des coupoles, des murs de clôture (au niveau de la terrasse) qui font 0.50 m de hauteur et par la forte réflexion des surfaces concaves des coupoles.

1.6 Les techniques et matériaux de construction

L'enveloppe de la maison qui constitue la structure constructive porteuse est composée de :

- Murs réalisés par la rose des sables, leur épaisseur peut atteindre 45 cm, leur rôle essentiel est de séparer l'intérieur de l'extérieur et permettre une isolation phonique.
- Coupoles, ces éléments forment l'unité de mesure des dimensions de la chambre ; construits pour des raisons climatiques mais notamment pour des raisons techniques.

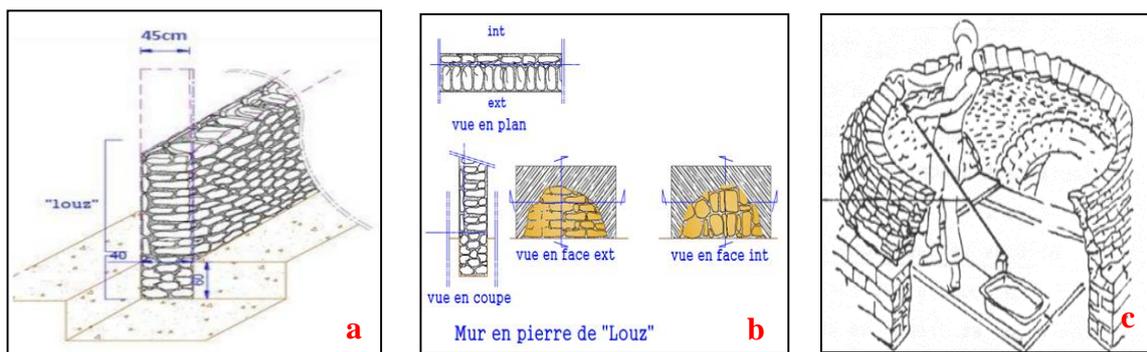


Figure 58 : Techniques de construction ; a) Mur porteur infrastructure, b) superstructure, c) construction d'une coupole.

On utilise la rose des sables comme matière première avec le plâtre dans la construction, associée au gypse qui est utilisé comme un liant, obtenu par la cuisson du bloc Tafza. Ce matériau se présente sous forme de blocs de forme irrégulière.

Ces deux composants locaux représentent un matériau lourd à forte inertie thermique, correspond aux principes de l'architecture bioclimatique.

Tableau 1 : Composition des parois. Source : Nefidi, 2017.

Élément constructif	composition	Matériaux
Mur Extérieur		a : plâtre de gypse. b : rose de sable. C : plâtre de gypse.
Plancher		a : Sable sec. b : rose de sable. C : plâtre de gypse.
Toiture		a : plâtre de gypse. b : rose de sable. C : plâtre de gypse.

1.7 Caractérisation thermo-physique des matériaux de construction

Afin de déterminer les propriétés thermo-physiques des matériaux locaux utilisés dans la construction des éléments constructifs de notre cas d'étude, des échantillons ont été préparés sur site, et le découpage a été fait au sein du CNERIB, selon les normes exigées pour le fonctionnement de l'instrument de mesure CT-mètre⁽¹⁷⁾ [NEFIDI, 2017].

Tableau 2 : Résultats de la caractérisation des roses des sables, Nefidi, 2017.

Essai	λ (W/m.K)	Cp(KJ /Kg .K)
1	0.9	1793.5
2	0.98	1900.5

Les mesures effectuées sur les échantillons nous ont permis d'avoir les résultats suivants :

Tableau 3 : Résultats de la caractérisation des blocs de Tafza, Nefidi, 2017.

Essai	λ (W/m.K)	Cp(KJ /Kg .K)
1	0.44	1412.3
2	0.50	1549.6

1.8 Exemple d'étude référence : Maison témoin

Une étude faite par [NEFIDI, 2017], montre que les températures extérieures d'une maison traditionnelle à Oued Souf étaient plus élevées de 5 à 10°C par rapport à l'intérieur de la maison.

L'intervention a été faite au niveau du tissu ancien à Bab Dahraoui au niveau de la commune de Guemmar au Nord de la région d'Oued Souf.

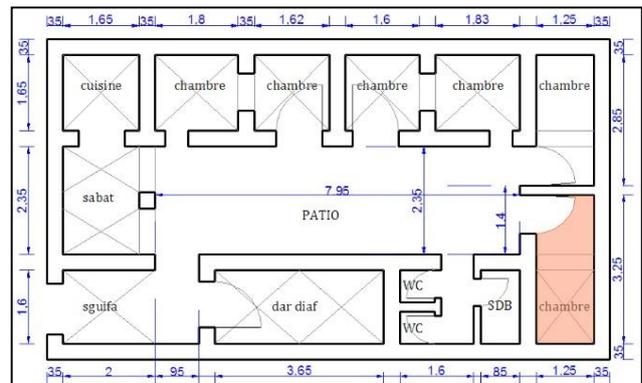


Figure 59 : plan de la maison témoin. Source : Nefidi, 2017.

Pour l'étude expérimentale, deux campagnes de mesure ont été effectuées durant la période estivale et la période printanière dans le but de mesurer les températures à l'intérieur et l'extérieur de la maison étudiée, à l'aide d'un thermomètre. Le thermomètre a été placé à l'intérieur de la chambre et l'autre à l'extérieur de la maison ; dont les résultats de l'étude expérimentale sont les suivants :

(17) un appareil permettant de mesurer la conductivité thermique de matériaux

1- Période estivale :

Les prises des mesures ont été faites durant le pic de chaleur (14h) par [NEFIDI, 2017] dans la *chambre Est*.

Les résultats obtenus ont montré que les températures extérieures varient de 40°C à 45°C, par contre les températures intérieures varient de 30°C à 35°C. L'écart entre les températures extérieures et intérieures varie de 5 à 10°C.

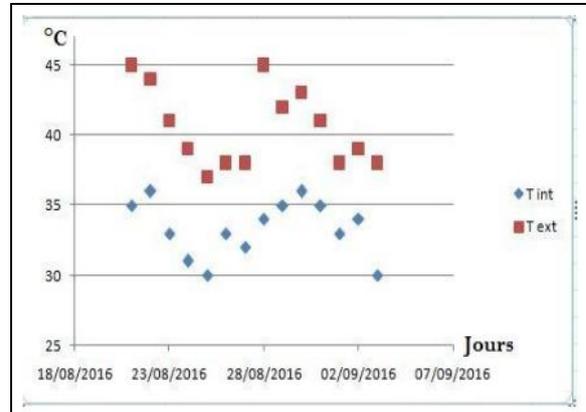


Figure 60 : Evolution des températures (relevées en période estivale). Source : Nefidi, 2017.

2- Période printanière :

Les mesures ont été effectuées dans la *chambre Sud* :

D'après les résultats obtenus, on a constaté que les températures extérieures varient de 14°C à 24°C, par contre les températures intérieures restent presque constantes et sont égales de 18 à 20°C.

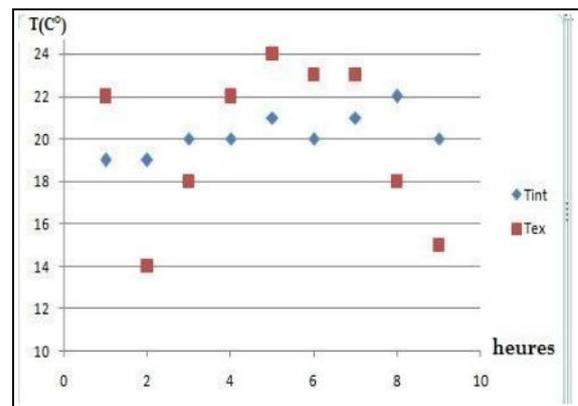


Figure 61 : Evolution des températures en printemps. Source : Nefidi, 2017.

Synthèse

D'après les résultats obtenus du travail de recherche effectué par [NEFIDI, 2017], on synthétise que la différence entre les températures extérieures et intérieures varient entre 5°C et 10°C. Ce qui nous mène à étudier le comportement thermique relatif au volume et à l'enveloppe de l'habitat traditionnel ; et à examiner le confort thermique éventuel à travers une série de simulations thermiques dynamiques.

2 Simulation

2.1 Protocole de simulation

Notre recherche s'appuie sur une méthodologie qui sert à évaluer la maison traditionnelle soufie à partir d'un modèle virtuel, ce dernier comprend le comportement thermique du cas

d'étude s'étalant sur une durée définie. Pour ce faire, nous optons pour effectuer des simulations thermiques dynamiques (STD) à l'aide de **TRNSYS 17 « TRaNsient SYstem Simulation »** qui permet de réaliser cette étude prévisionnelle selon la météo locale, la position géographique, l'orientation, l'occupation, etc. [DELMAS, 2014].

La simulation se fera sur notre cas de base afin de déterminer les températures intérieures ainsi que les consommations et besoins en chauffage et climatisation ; ensuite planifier les STD sur différentes variables pour ressortir les configurations du cas optimum.

En se référant au DTR C3-2, on fixera le scénario de consigne de thermostat à une température du confort de 21° en hiver et de 25° pour l'été.

2.2 Présentation du logiciel de simulation

TRNSYS est un logiciel graphique flexible et très précis en ce qui concerne les inputs ; il permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment et de son équipement (systèmes de chauffage, climatisation) pour simuler le comportement thermiques de systèmes transitoires. Il a été créé par l'Université du Wisconsin (USA) et développé par le CSTB.

Il est composé de deux parties. La première est un moteur qui lit et traite les fichiers d'entrées et trace les variables système, permet de déterminer les propriétés thermo-physiques et interpolent les fichiers de données externes. La deuxième partie de TRNSYS est une bibliothèque de composants, comprend environ 150 modèles allant des pompes aux bâtiments multizones. TRNSYS permet d'effectuer les calculs après l'importation du fichier « idf » de la 3D conçu et modélisés par l'interface TRNSYS3D en SketchUp.

Parmi les atouts de TRNSYS17 :

- Flexibilité : possibilité de définir des équations pour définir la logique de contrôle des équipements.
- Extensibilité : possibilité d'ajouter des modules de calcul et des interfaces utilisateur.
- Possibilité de modéliser la maquette virtuelle par le module 3D disponible sous Google SketchUp. ⁽¹⁸⁾

(18) TRNSYS, en ligne sur [www.trnsys.com]

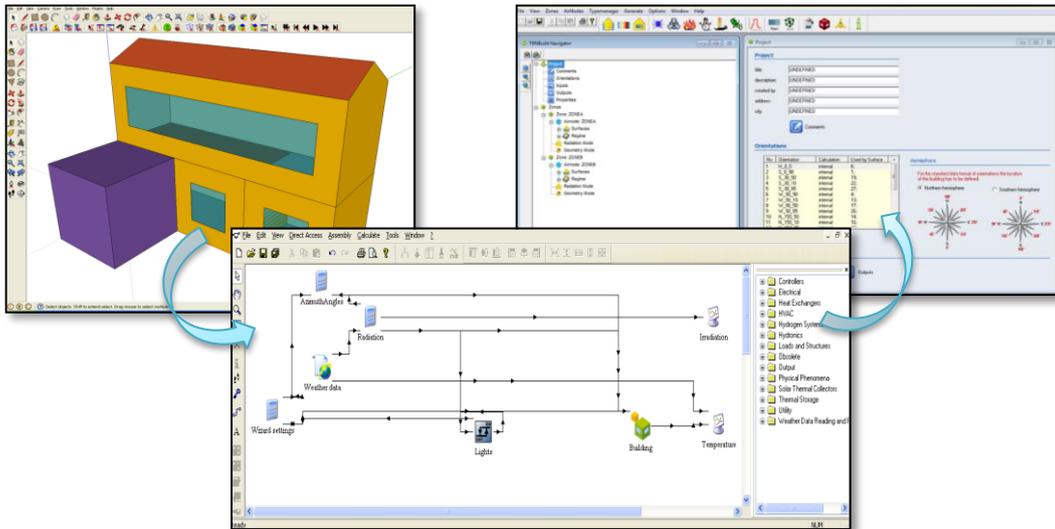


Figure 62 : Importation du fichier .idf de la 3D à partir du SketchUp.

2.3 Méthodologie de simulation

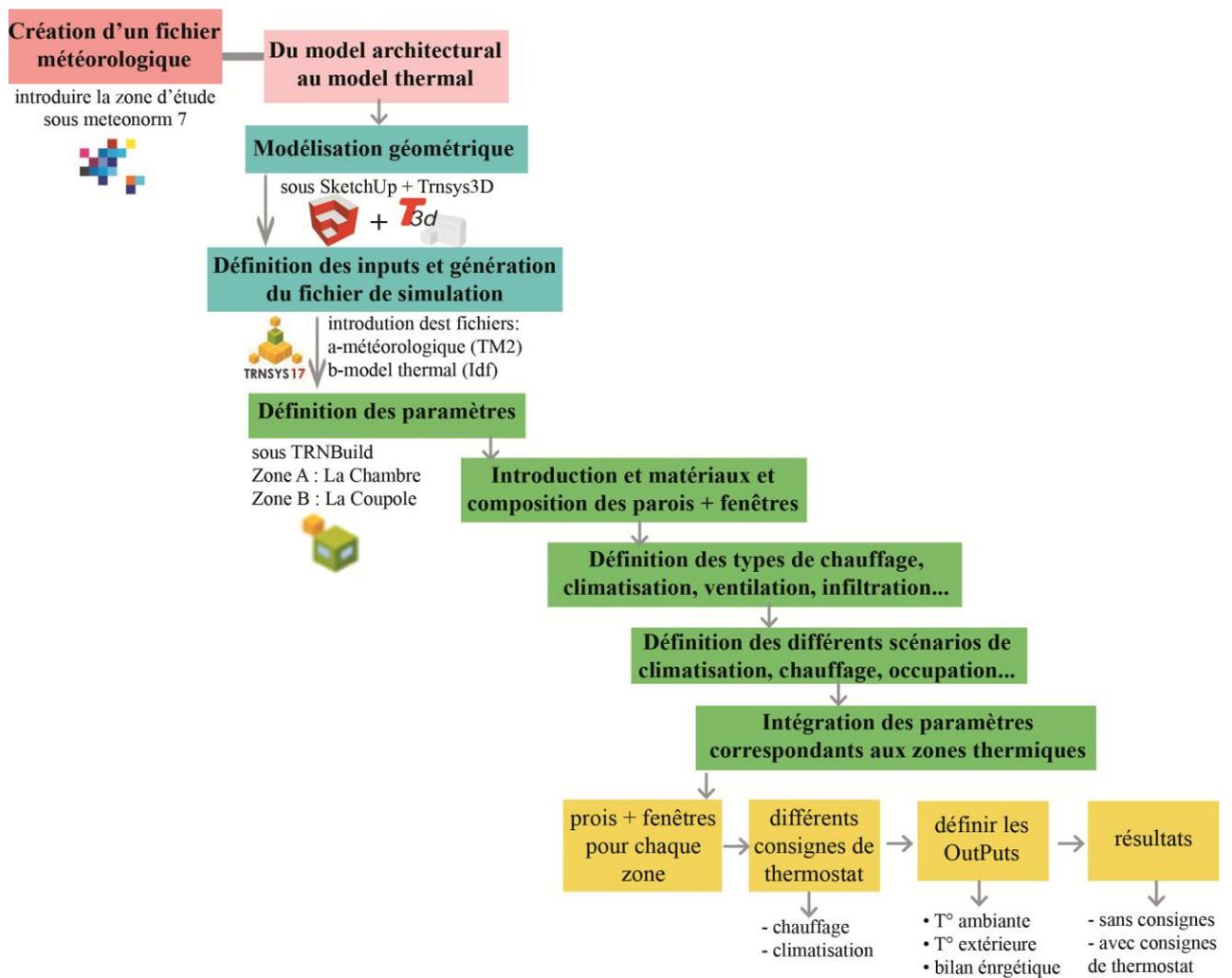


Figure 63 : Organigramme illustrant la procédure d'application du logiciel. Source : Auteur, 2021.

2.3.1 Création d'un fichier météorologique

2.3.1.1 La zone d'étude sous logiciel meteonorm version 7

Il est nécessaire de localiser la zone d'étude afin d'extraire les données météorologiques.

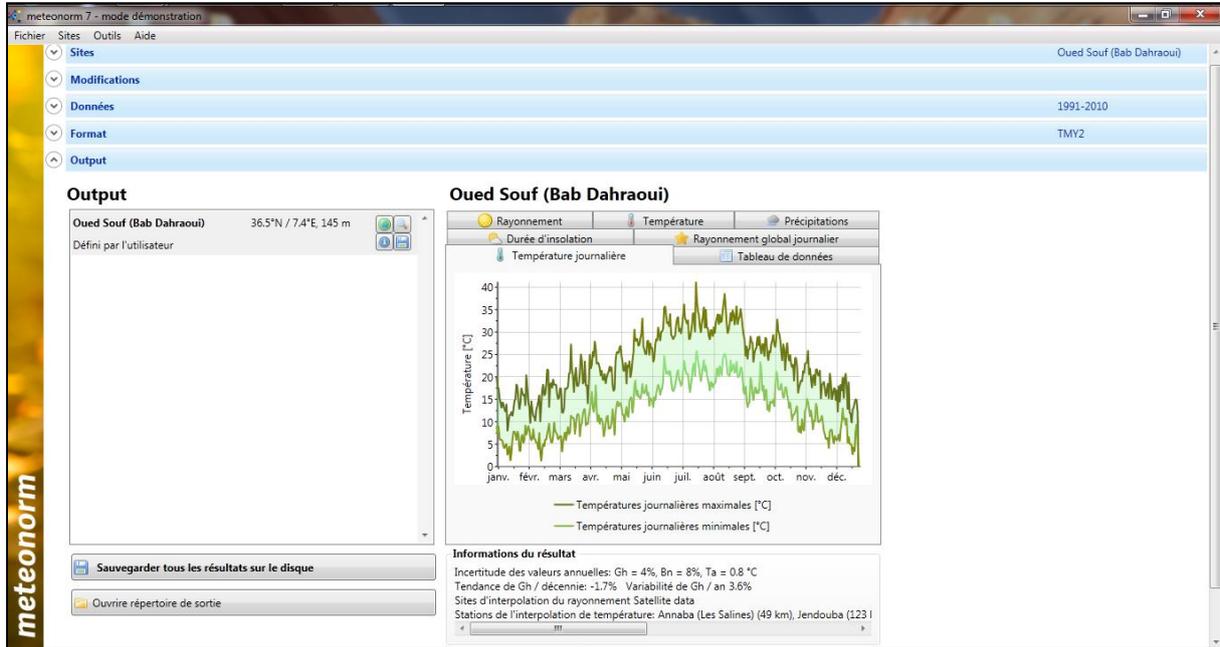


Figure 64 : Création du fichier météorologique de la zone d'El-Oued. Source : auteur, 2021 depuis meteonorm7.

Choisir le format du fichier :

Pour la simulation thermique dynamique sous TRNSYS17, il est prescrit de sauvegarder les données météorologiques sous format **TM2** (voir annexe 01).

2.3.2 Du modèle architectural au modèle thermal

2.3.2.1 Modélisation géométrique sous l'extension Trnsys3d :

La modélisation géométrique de la zone (chambre) simulée se fait sous l'extension *Trnsys3d* à l'aide du *SketchUp*.

Après avoir modélisé la maquette de la pièce en deux zones : la chambre 'Zone A' et la coupole 'Zone B' (voir annexe 01) ; on définit les différents types de parois et ouvertures.

Les murs sont définis comme mur extérieur (external wall) ou adjacent (adjacent wall) et le toit de la chambre et les sous-surfaces de la coupole sont définis comme toiture (roof) (Fig62).

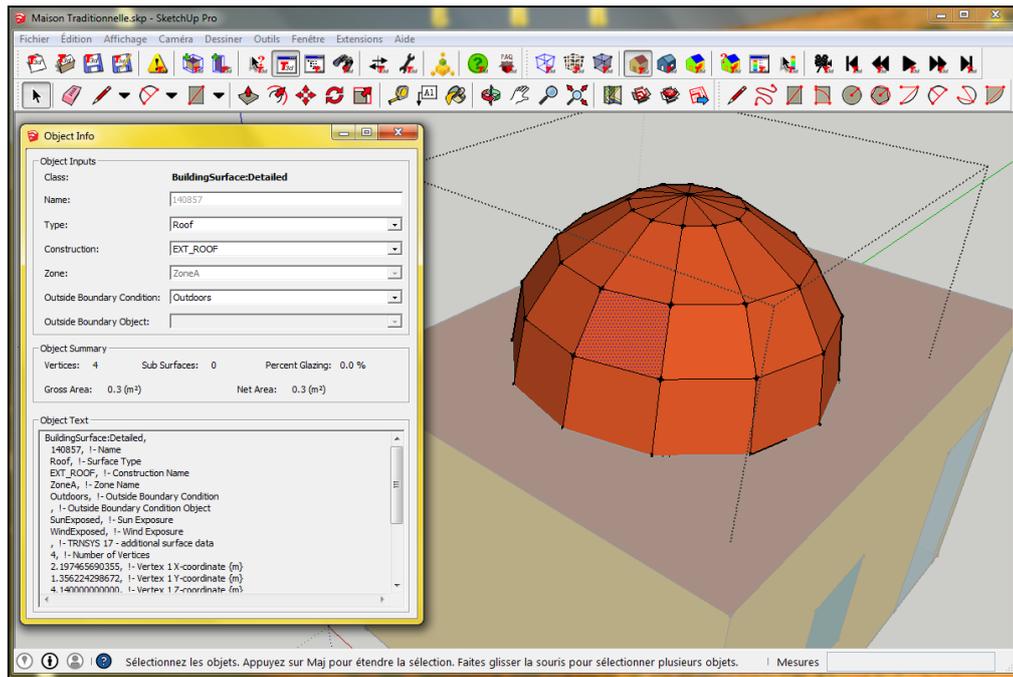


Figure 65 : Définition des sous-surfaces de la coupole. Source : auteur depuis SketchUp 2015.

2.3.2.2 Définition des entrées et génération des fichiers de simulation (Inputs)

Une fois la modélisation de la géométrie du bâtiment terminée, il est recommandé de sauvegarder le fichier **.idf** à partir du fichier *SketchUp* en utilisant le plugin *Trnsys3d*, afin qu'il soit importé par *TRNSYS Simulation Studio*. 🧑‍🔧

La commande "New" nous permet de commencer un nouveau projet ; puis choisir le type du projet : « 3D Building Project (Multizone) ».

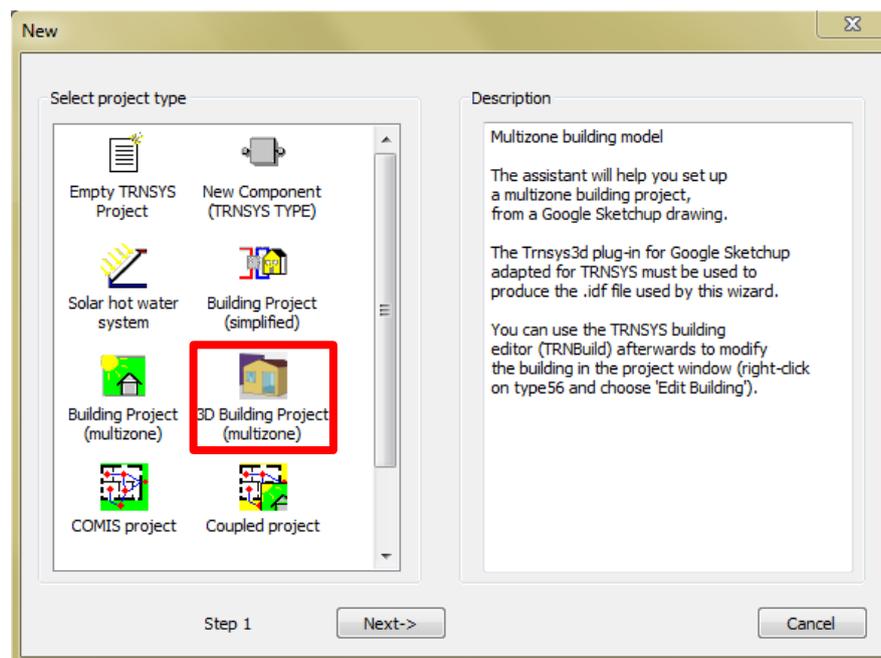


Figure 66 : Choix du type de projet. Source : auteur depuis Trnsys17.

On peut introduire le fichier climatique convenable « TM2 » ainsi que le fichier « .idf » contenant le modèle thermique (voir annexe 01). Cette étape nous permet d'aboutir au projet final dans l'interface « Trnsys Studio ».

Pour définir les entrées et paramétrer les zones de la géométrie réalisée, on clique sur puis sur "Edit Building"  qui nous emmène à « TRNBuild ».

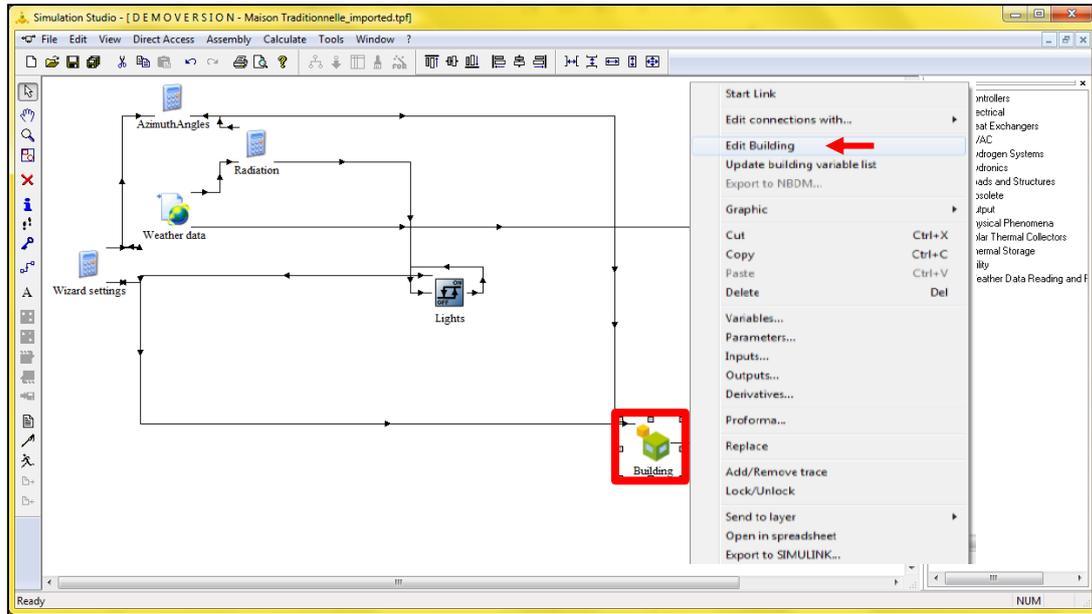


Figure 67 : Projet final et passage au TRNBuild. Source : auteur depuis Trnsys17.

2.3.2.3 Intégration du model sous « TRNSYS-Build »

2.3.2.3.1 Définition des paramètres du model

Dans cette fenêtre, on peut caractériser les murs, planchers et fenêtres, leurs compositions, types de matériaux et couches, ombrage, et autres caractéristiques. Toutes autres données relatives à notre projet peuvent être entrées afin de pouvoir lancer la simulation à partir de *Trnsys Studio* et faire sortir les comparaisons des températures ainsi que calculer les besoins en chauffage et climatisation.

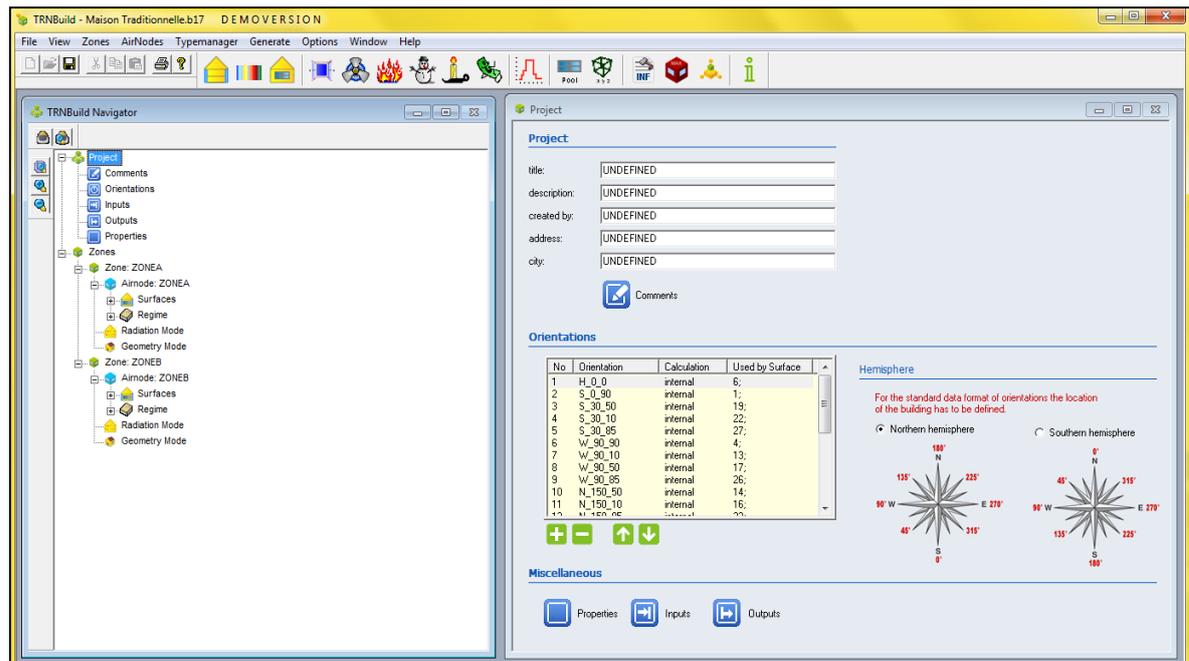


Figure 68 : Représentation des propriétés des zones. Source : auteur depuis Trnsys17.

2.3.2.3.2 Introduction des matériaux, des parois et des fenêtres

Pour définir les matériaux, il est nécessaire d'introduire les grandeurs spécifiques : la conductivité thermique, la capacité thermique et la masse volumique tout en se référant au DTR C3-2.

Dans l'étape suivante (voir annexe 01), on définit les couches de chaque paroi séparément, de l'extérieur vers l'intérieur, matériau et épaisseur compris, ainsi que le coefficient convectif d'une paroi selon la réglementation notée dans le DTR C3-2.

De la même façon, on définit les types de vitrages des fenêtres et éventuelles caractéristiques existants dans la base de données du logiciel.

Tableau 4 : Caractéristiques thermo-physiques des matériaux,

DTR C3-2.

Matériaux	Conductivité ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	Chaleur spécifique ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)	Masse volumique (kg/m^3)
Chaux	0.87	1080	1800
Plâtre	0.35	936	800
Béton	1.75	1080	2300
Mortier ciment	1.4	1080	2200
Carrelage	2.1	936	2200
Liège (isolant)	0.044	1512	150



Figure 69 : Introduction des caractéristiques des matériaux. Source : auteur depuis Trnsys17.

2.3.2.3.3 Définir les types de chauffage et de climatisation

En se référant au DTR C 3-2, la température de consigne du chauffage est de $21^\circ C$ et elle peut varier selon les occupations. On saisit de la même façon la température de consigne du refroidissement ($24 - 25^\circ C$).

On définit de la même façon, les types d'infiltration et de ventilation pour la maison traditionnelle au souf (voir annexe 01).

Il est nécessaire de respecter les scénarios d'occupation pour s'approcher au plus près de la réalité.



Figure 70 : Définir les températures de consignes pour le chauffage. Source : Auteur depuis Trnsys17.

2.3.2.3.4 Définition des différents scénarios

Ces deux fenêtres nous permettent de définir les différents scénarios d'occupation, de ventilation, de chauffage et de climatisation etc. On peut introduire deux types de scénarios : journalier et hebdomadaire.

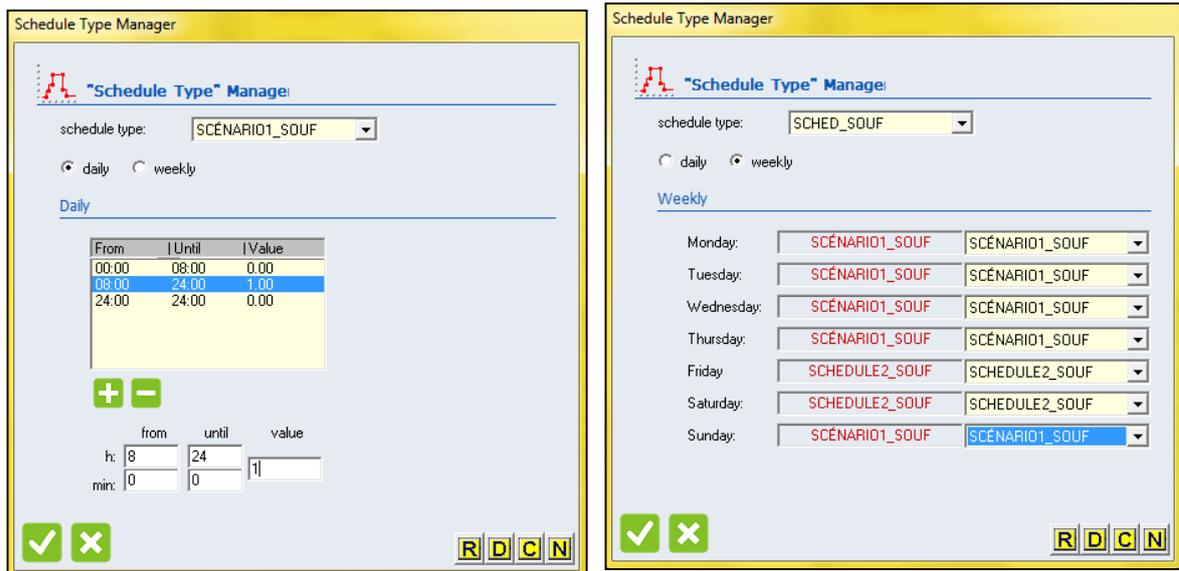


Figure 71 : Introduire les tableaux des différents scénarios. Source : auteur depuis Trnsys17.

2.3.2.3.5 Intégration des paramètres correspondant aux zones thermiques

a- Saisie des parois et des fenêtres pour chaque zone

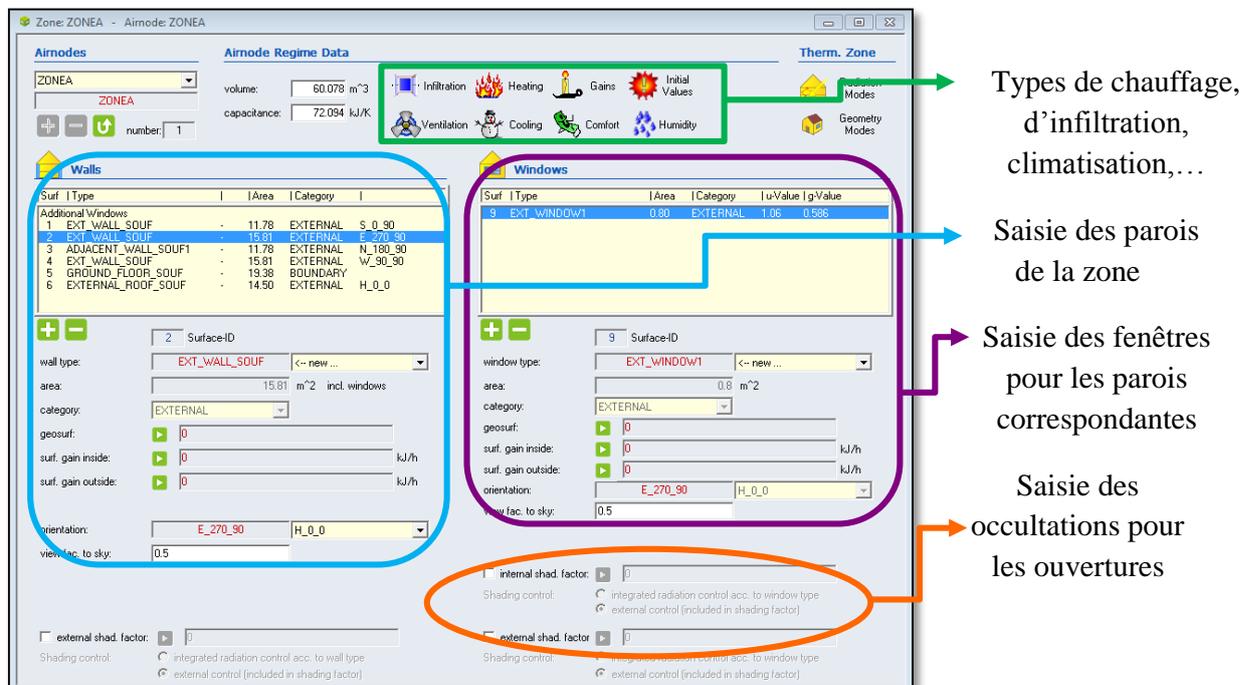


Figure 72 : Insertion des éléments constructifs. Source : auteur depuis Trnsys17.

b- Saisie des consignes de thermostat

Afin de déterminer les besoins en chauffage et climatisation, il faut activer le chauffage et la climatisation par «on» dans le menu de la zone thermique qu'on souhaite simuler.

La même manipulation est nécessaire pour les infiltrations, la ventilation et les apports internes.

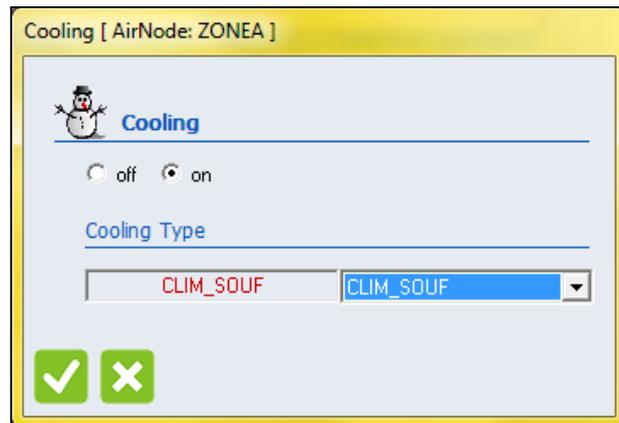


Figure 73 : activation de la climatisation.
Source : auteur depuis Trnsys17.

c- Définition des 'OUTPUTS'

Lorsqu'on termine la saisie des données (inputs), nous devons déterminer la nature des résultats ; ainsi, nous devons sélectionner la zone que nous souhaitons simuler (voir annexe 01). Dans ce cas, nous cherchons à calculer :

- La température ambiante à l'intérieur (T_a) de la chambre par rapport à la température extérieure (T_{dry_Ext}).
- Le bilan énergétique des besoins en chauffage et climatisation pour la zone simulée.

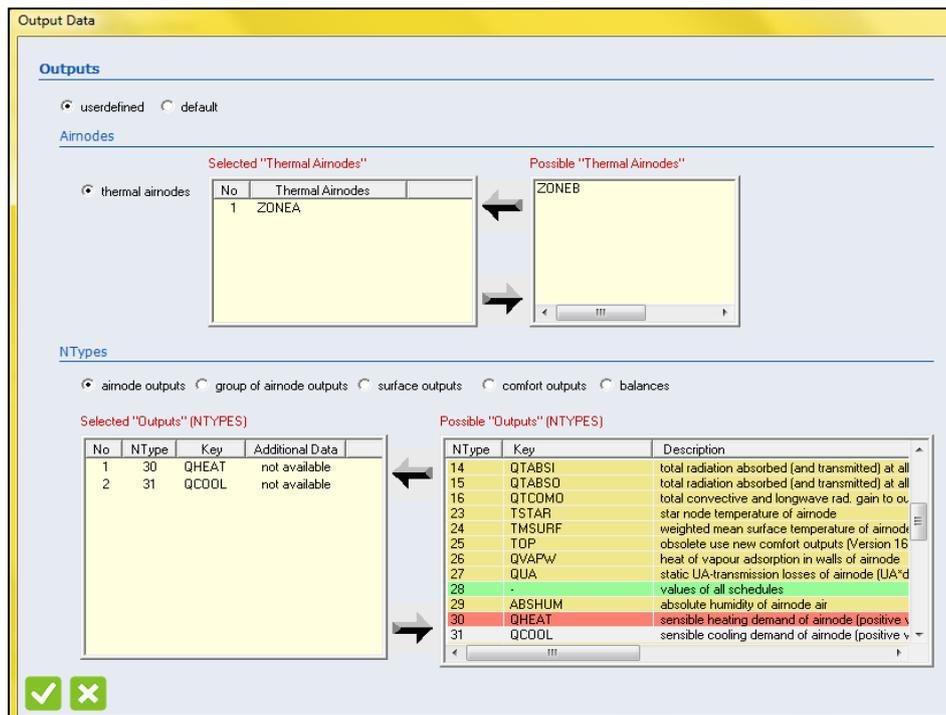


Figure 74 : Les outputs de simulation. Source : auteur depuis Trnsys17.

d- Interprétation des résultats

1- Réglages et paramètres

Après avoir sauvegardé et généré les inputs et les outputs sur *TRNbuild*, il reste quelques paramètres à régler avant le lancement de la simulation sur l'interface *Trnsys Simulation Studio* (voir annexe 01).

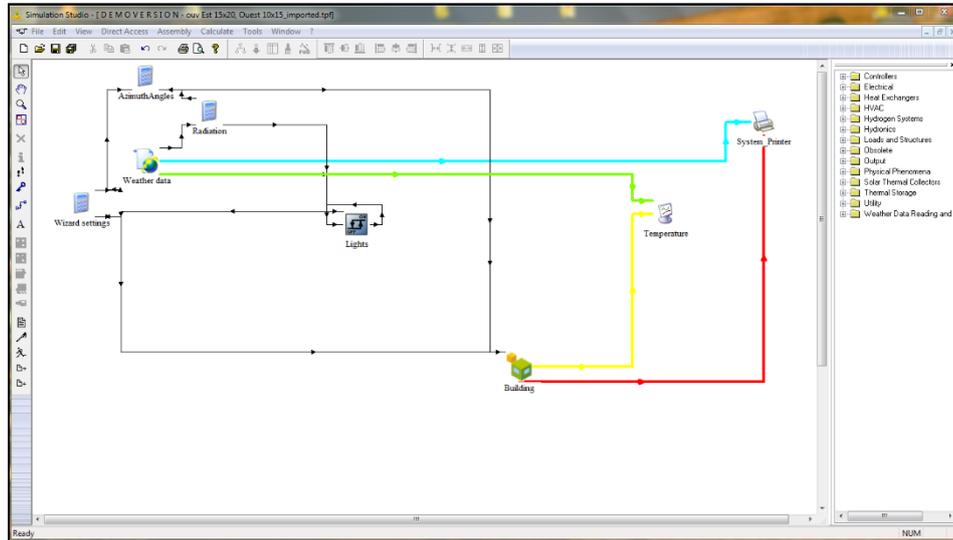


Figure 75 : liaison du projet aux outputs et aux données climatiques. Source : auteur depuis Trnsys Simulation Studio 17.

2- Résultats

Afin de comparer les températures intérieure et extérieure, on doit lancer la simulation sans consignes de thermostat pour la zone simulée. Si on souhaite calculer les besoins et consommations en chauffage et climatisation, ces derniers doivent être en mode « ON ». On peut extraire les résultats de simulation sur un fichier sous format excel (.xls) simple à utiliser.

La figure N° 76 montre l'évolution comparative des températures en fonction de temps. Les températures extérieures sont présentées en rouge et les températures à l'intérieur sont celles en bleu.

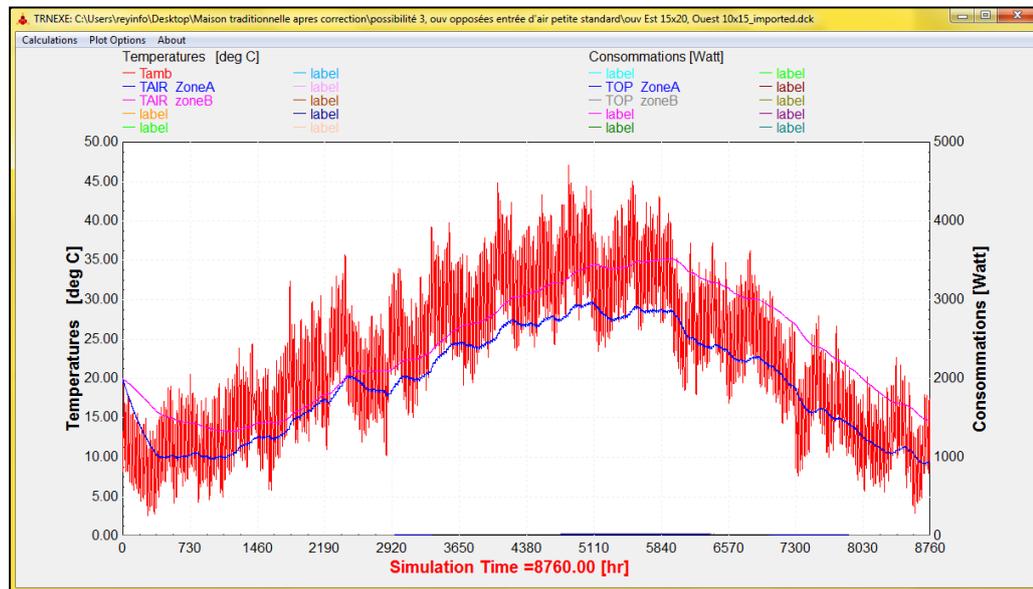


Figure 76 : Résultat de simulation. Source : auteur depuis Trnsys17.

2.3.3 Présentation du cas de base et des variables

L'étude des apports thermiques passe par deux cas différents mais conçus dans le même tissu traditionnel sous les mêmes conditions météorologiques. Le premier dit « maison témoin », dans lequel s'est déroulée l'enquête in-situ, sert uniquement à confirmer et valider les résultats du logiciel. Le deuxième dit « maison traditionnelle » sert à étudier les apports thermiques ainsi que les consommations énergétiques visant à améliorer le confort thermique de la maison. Nous allons nous concentrer sur la chambre Sud-Ouest (façade principale) pour les raisons suivantes :

- La façade principale reçoit le plus des gains de chaleur,
- La chambre est un espace de vie qui nécessite un rafraîchissement pour qu'il soit confortable,
- De plus de la porte qui donne sur la cour, la chambre est dotée d'une fenêtre qui donne sur le *Sabat* qui un espace ombragé,
- Disponibilité d'une coupole à diamètre important $\varnothing=2,60$ m.

Une série de simulations thermiques dynamiques sont effectuées lors des différentes configurations de l'enveloppe extérieure du bâtiment en termes de volume et d'ouverture au niveau de la coupole.

Les résultats de chaque simulation permettent de déduire les températures internes et les consommations énergétiques en commençant par le cas de base. L'intervention sur le cas de base sert à modifier les paramètres afin d'arriver aux variables des cas optimums pour proposer le cas optimisé. Donc, deux types des inputs seront distingués :

Les données identiques communes entre le cas de base et les variantes ; s'agissant de :

- **La volumétrie de la pièce : proportion, taille, surface, etc.**
- **Les données météorologiques.**
- **Les apports internes et consignes de thermostat.**

Les données qui vont évoluer le gain énergétique ainsi que l'amélioration du confort thermique. Ce qui a pour effet :

- **L'impact de l'isolation.**

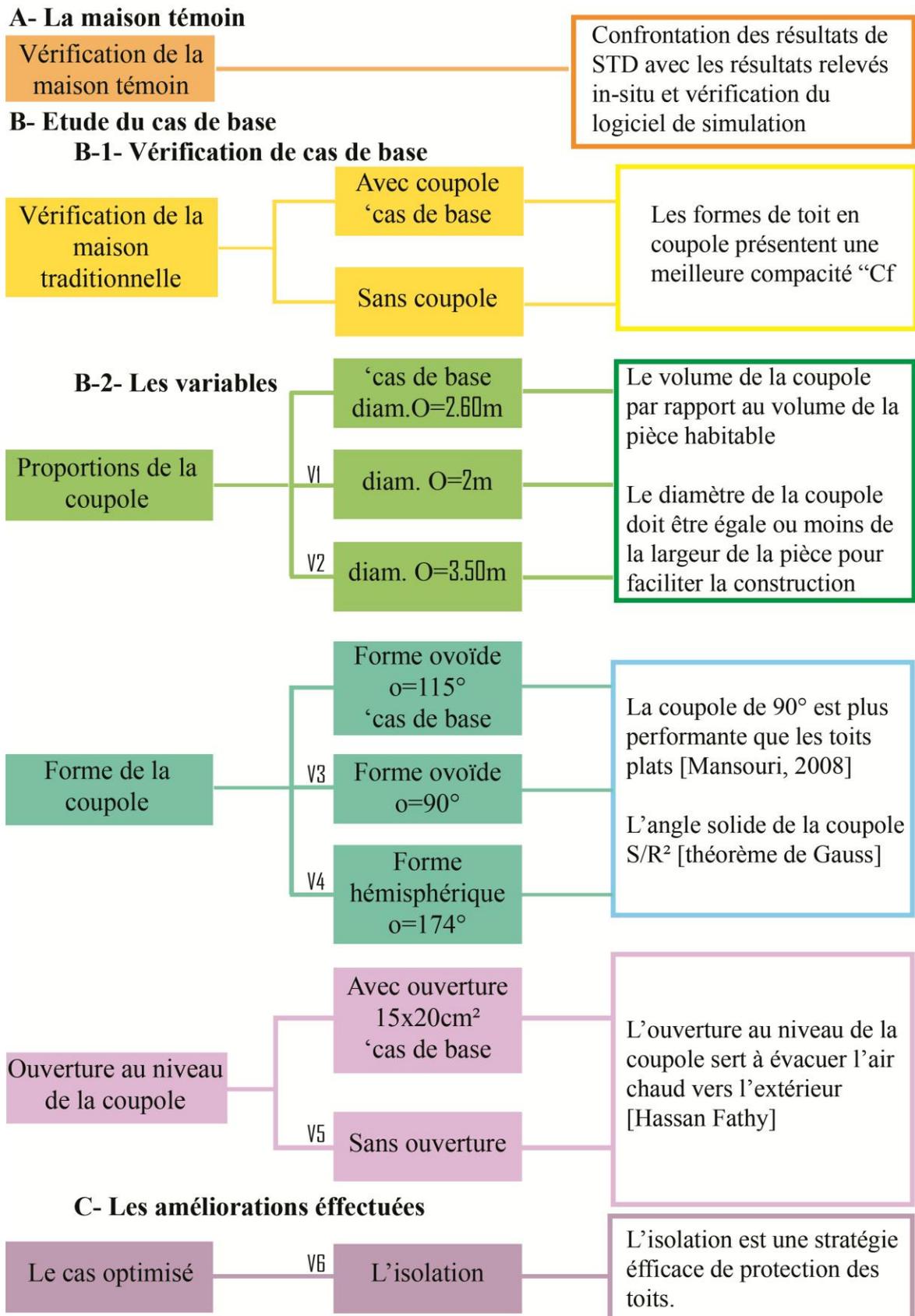


Figure 77 : Organigramme des différentes variables à étudier. Source : auteur, 2021.

Conclusion

Dans cette partie du chapitre, nous avons pu extraire quelques principes bioclimatiques mis en place dans l'architecture de la maison traditionnelle du Souf, ce qui contribue au maintien du confort thermique en climat chaud et aride. Ces principes résident dans les concepts que ce soit en compacité de la forme notamment la coupole, orientation, distribution des espaces à l'intérieur ou caractéristiques thermiques des matériaux des parois.

Ensuite, nous avons procédé à une série de simulations thermiques dynamiques tenant en compte les données préalablement extraites, en commençant par la maison témoin pour vérifier la maison traditionnelle objet d'étude qui sert de cas de base. Les simulations numériques ont pour rôle d'évaluer le confort thermique ainsi que le calcul des besoins énergétiques dans le cas de base et des différents variables pour arriver au cas optimum.

4 Chapitre III :

Résultats et discussions

Chapitre III : Résultats et discussions

Introduction

L'enveloppe du bâtiment est l'élément le plus déterminant à prendre en considération lors d'une conception architecturale liée à des contributions environnementales et de recherche de confort thermique. Dans ce sens, la conception architecturale nécessite des appuis à la décision ajustée, afin que cette décision soit précise et plus proche de la réalité à base d'une simulation numérique grâce aux logiciels d'analyse thermique.

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur les résultats obtenus à l'aide de différentes simulations, en termes de température ambiante intérieure et de prévision des consommations. Nous allons discuter les résultats donnés par la simulation du cas de base et des cas modifiés pour obtenir le cas optimisé du point de vue du confort thermique et de l'efficacité énergétique.

Ce principe nous permet de déterminer l'impact de l'élément architectonique qui est la coupole ainsi que l'impact de chaque configuration indépendamment tout en comparant les résultats de performance énergétique des différentes variables.

1 Vérification de la maison témoin

Notre travail dans cette étape consiste à configurer le logiciel de simulation avec les données spécifiques de la maison témoin ainsi que les données météorologiques d'El-Oued pour but de vérification du logiciel. On détermine la durée de simulation selon les mesures in-situ préalablement prélevées afin d'obtenir les résultats expérimentaux d'évolution de la température de l'air à l'intérieur de la zone et les comparer aux résultats théoriques relevés dans la même période, et ce afin de valider les résultats du logiciel.

1.1 Evolution annuelle des températures intérieures simulées

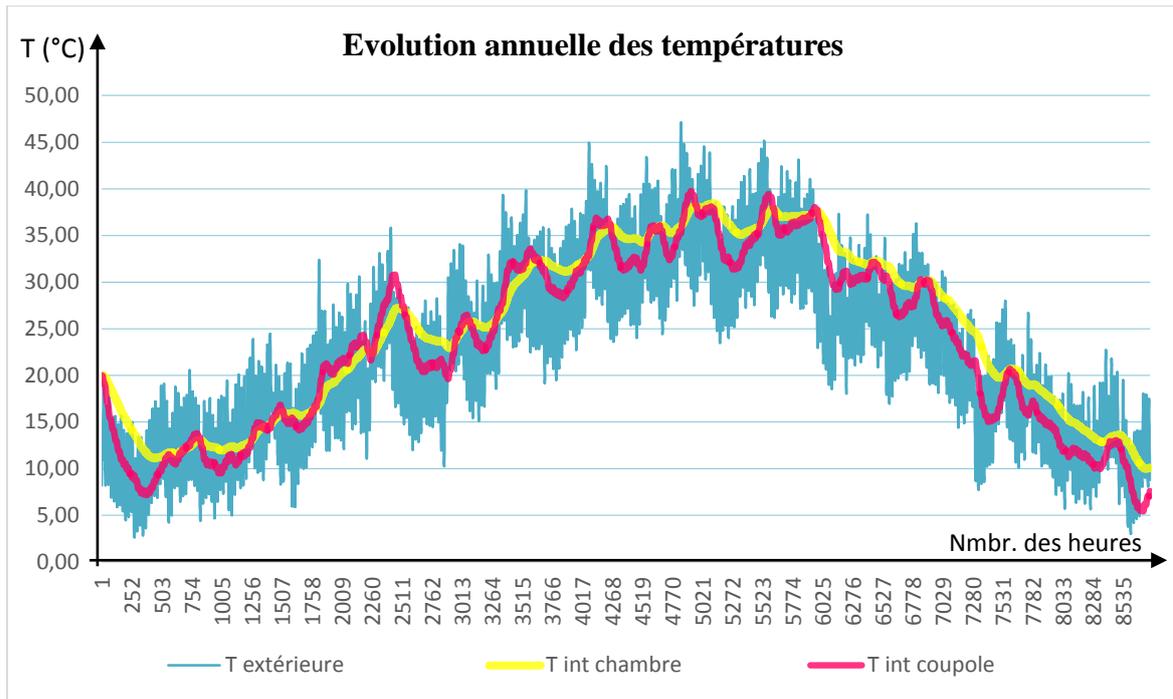


Figure 78 : Evolution annuelle des températures de la chambre Est de la maison traditionnelle témoin. Source : Simulation par Trnsys17 réalisée par l'auteur.

Le graphique ci-dessus (figure 78) présente l'évolution des températures tout au long de l'année dans la chambre « Est » de la maison témoin comparées aux températures extérieures. On peut remarquer ici que l'écart des températures extérieures et intérieures est plus de 5°C, cela s'explique par que les gains solaires de la maison traditionnelle sont limités.

➤ Saison estivale

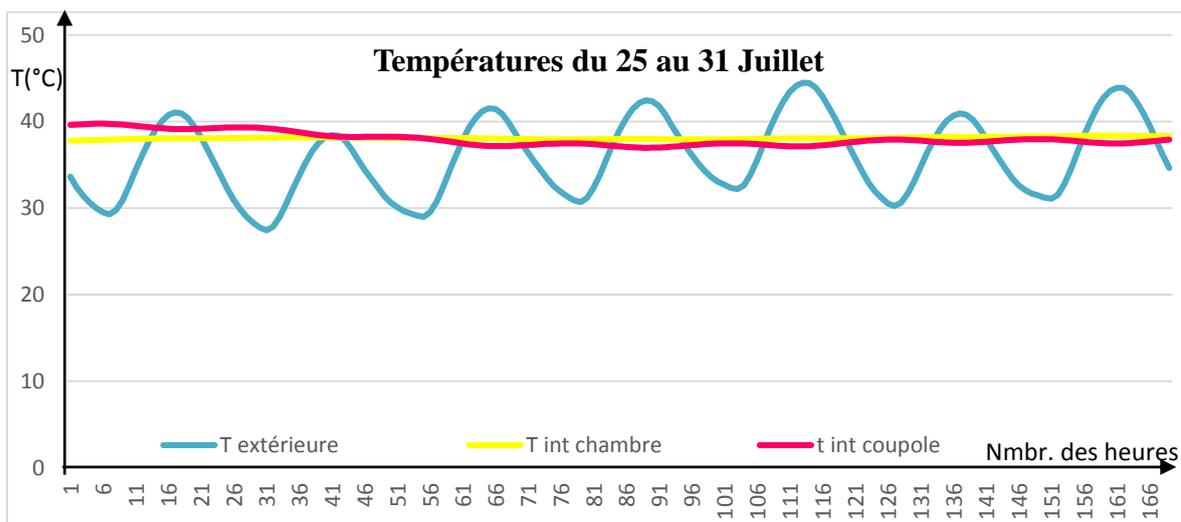


Figure 79 : évolution des températures de la chambre Est de la maison témoin simulée durant la semaine la plus chaude de l'année. Source : simulation par Trnsys17 effectuée pat l'auteur.

1.2 Comparaison des résultats de simulation aux résultats mesurés

Le graphe ci-dessus (fig. 79) présente l'évolution des températures durant la période estivale dans la chambre « Est » de la maison témoin comparées aux températures extérieures. On constate ici que les températures extérieures varient de 30°C à 45°C, par contre les températures intérieures sont en maximum de 37°C en moyenne. L'écart entre les températures extérieures et intérieures varie de 5 à 10°C.



Figure 80 : évolution des températures relevées en période estivale à 14h. Source : Nefidi, 2017.

La confrontation des données relevées in-situ (figure 80) avec les données simulées confirme que l'écart entre les températures extérieures et intérieures peut atteindre 10°C durant la période estivale. Ceci s'explique par l'efficacité de la maison traditionnelle.

La synthèse obtenue lors de cette vérification nous permet d'étudier plus précisément la maison traditionnelle.

2 Etude du cas de base

2.1 Etat des lieux du cas de base

Dans cette étape, nous allons configurer le logiciel de simulation avec les données spécifiques du cas de base ainsi que les données météorologiques d'El-Oued. On précise la durée (le début et la fin) dans laquelle on veut simuler afin de déduire les résultats d'évolution de la température de l'air à l'intérieur de la zone à étudier ainsi que les consommations énergétiques dans la même période.

2.1.1 Evolution des températures intérieures simulées

Les graphiques ci-dessous (figure 81) présentent l'évolution annuelle des températures dans la chambre Sud-Ouest de la maison, comparées aux températures extérieures. Ensuite,

nous soulignons les périodes estivale et hivernale afin d'obtenir des résultats plus clairs des cas désavantageux.

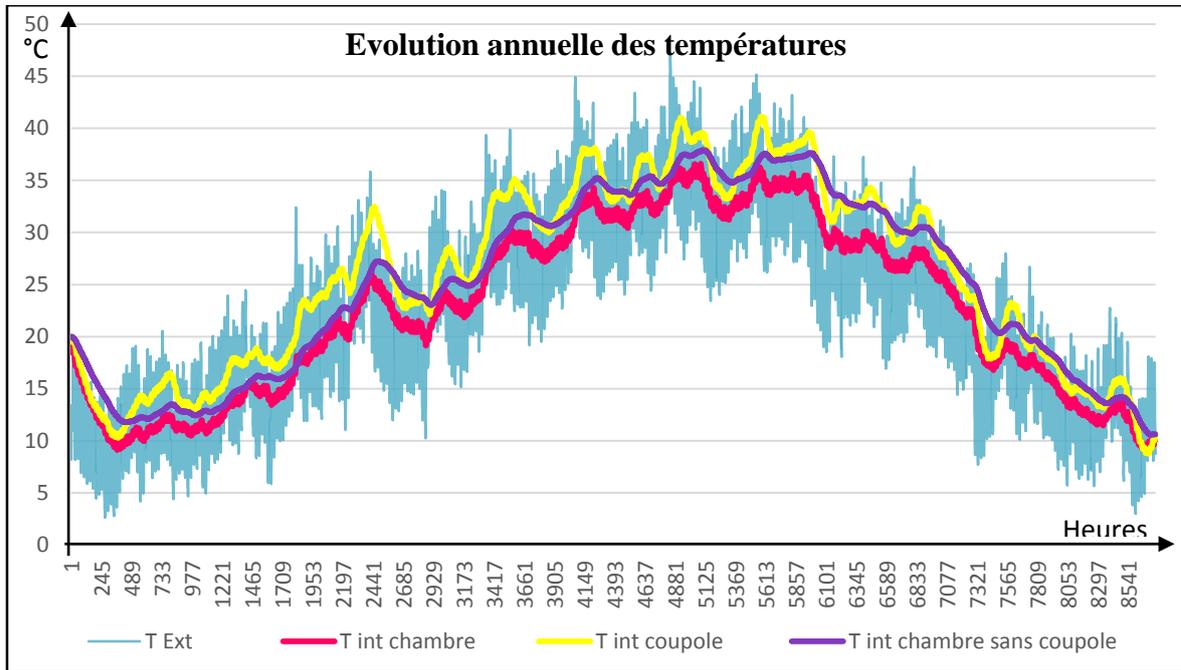


Figure 81 : évolution annuelle des températures du cas de base. Source : simulation par Trnsys17 effectuée par l'auteur.

D'après la figure n° 78, on voit qu'au niveau de la coupole, la température est plus élevée par contre dans la chambre, la température est basse. Cela se justifie par le fait que l'air chaud soit plus léger est donc il est accumulé au niveau de l'espace de la coupole par l'effet du tirage thermique.

En comparant le volume de la chambre y compris la coupole au volume de la chambre dans le cas de coupole éliminée ; la température intérieure de la chambre évolue simultanément à la température extérieure avec une différence de 3°C maximum en été et 2°C en hiver. A l'intérieur, elle varie de 10°C à 12°C en hiver et de 35°C à 36°C en été, alors que celle de l'extérieure varie, elle de 05°C à 20°C en hiver et de 29°C à 44°. L'écart de température est de 5°C à 10°C.

➤ Saison hivernale

La (figure 82) illustre l'évolution de la température de l'air extérieur et celle de l'intérieur de la chambre pour le cas de coupole comprise et le cas de coupole éliminée. On constate que les températures de la chambre sans coupole sont supérieures à celles de la chambre avec coupole, et les hausses de températures sont au niveau de la coupole.

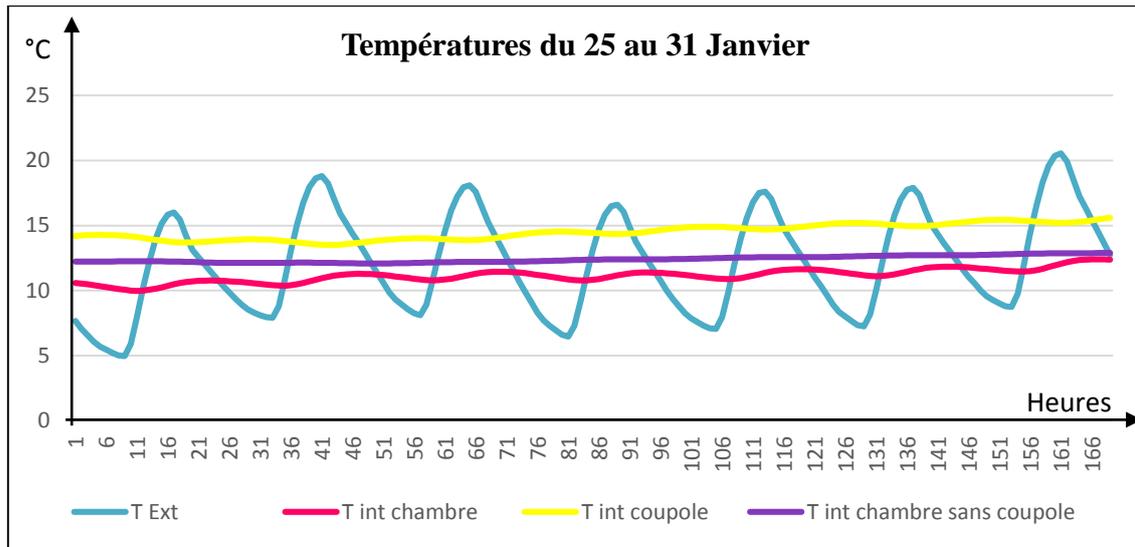


Figure 82 : évolution des températures du cas de base simulées durant la semaine la plus froide de l'année. Source : simulation par trnsys17 effectuée par l'auteur.

Pour la semaine la plus froide de l'année, les températures enregistrées sont très basses variant entre 5°C et 20°C, ce qui influe directement sur la température interne, cette dernière est située autour de 12°C la journée et 10°C la nuit. Nous constatons aussi que la variation de température est de 2°C entre jour et nuit. Egalement, on peut remarquer qu'au niveau de la coupole la température est plus élevée par contre dans la chambre la température est basse, cela se justifie par le fait que l'air chaud est plus léger et donc il est accumulé au niveau de l'espace de la coupole.

➤ **Saison estivale**

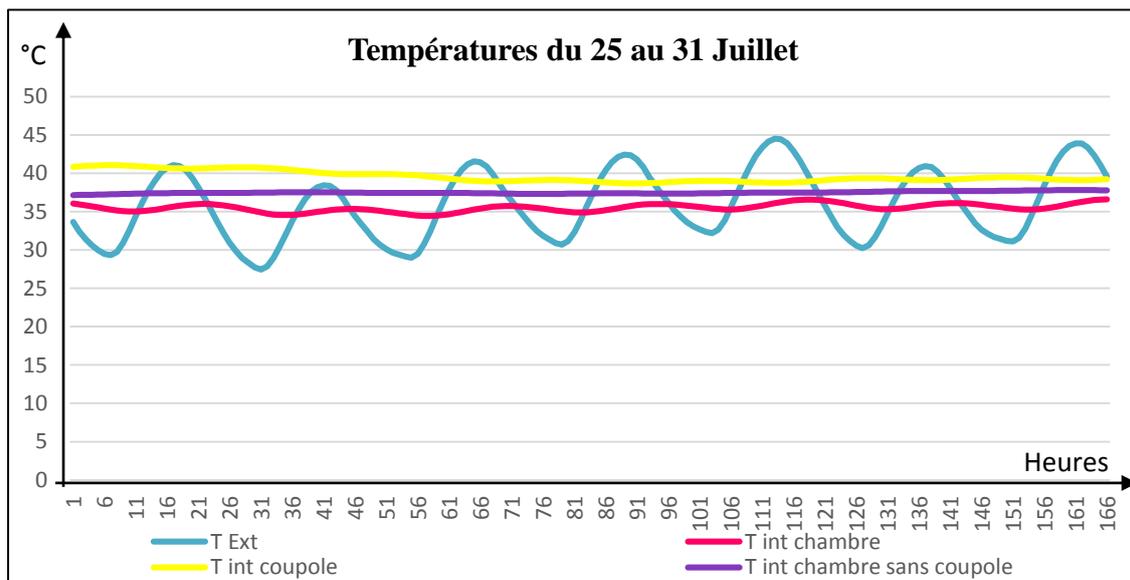


Figure 83 : évolution des températures du cas de base simulées durant la semaine la plus chaude de l'année. Source : simulation par trnsys17 effectuée par l'auteur.

D'après la (figure 83), on constate que la température à l'intérieur des deux cas de la chambre pour la dernière semaine du mois de Juillet évolue de la même manière que la température de l'air extérieur. La température à l'intérieur de la chambre est presque constante en moyenne de 35°C pour le cas de base. On a constaté que la température entre le jour et la nuit varie de 1 à 3°C. Cette stabilité se justifie par le facteur de forme (compacité). Ce qui fait de la coupole un élément qui apporte une amélioration du confort thermique au niveau de la chambre en dessous de la coupole.

2.1.2 Evolution mensuelle des consommations énergétiques

Tableau 5 : Consommation énergétique mensuelle du cas de base. Source : auteur, simulation par Trnsys17.

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Chauffage (KWH)	81,59	51,37	18,22	2,86	0	0	0	0	0	0,05	22,76	68,09
Climatisation (KWH)	0	0,45	13,31	35,94	92,37	143,84	200,80	190,96	115,27	60,38	4,12	0,03

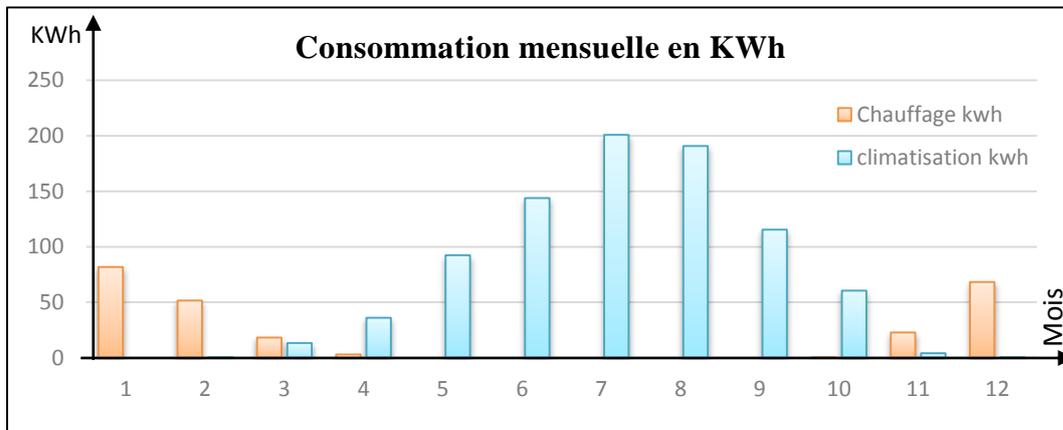


Figure 84 : Bilan de consommation énergétique mensuelle du cas de base. Source : simulation par trnsys17 effectuée par l'auteur.

D'après le graphe au-dessus (figure 84), on constate que le besoin en chauffage est de 81,59 KWh pour le mois de Janvier, et le besoin en climatisation est de l'ordre de 200,80 KWh de pour le mois de Juillet.

2.1.3 Evolution annuelle des consommations énergétiques

Tableau 6 : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec le cas de coupole éliminée. Source : Auteur, simulation par Trnsys17.

Besoin énergétique	Cas de base	Cas de coupole éliminée
Chauffage (KWh)	244,96	221,39
Climatisation (KWh)	857,53	929,20
Consommation totale (KWh)	1102,49	1150,59
Performance énergétique (KWH/m ² .an)	65,62	68,48
Energie économisée (%)		-4,35

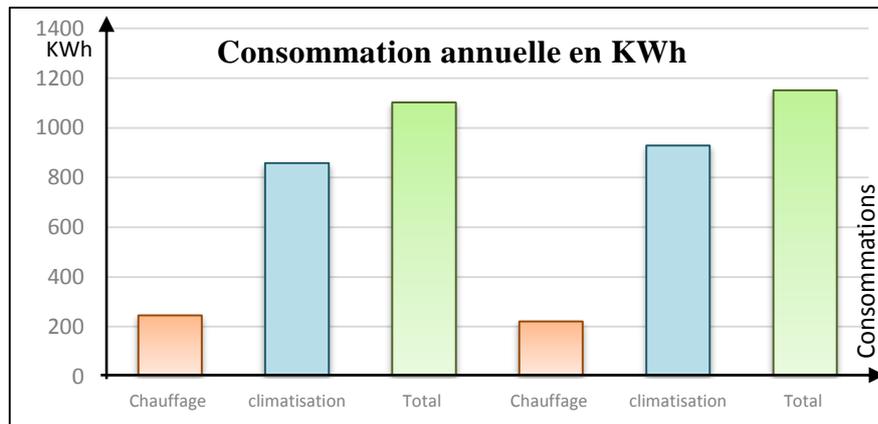


Figure 85 : bilan comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base et du cas de coupole éliminée. Source : simulation : simulation réalisée par l'auteur.

Les consommations énergétiques annuelles de chauffage et de climatisation du cas de base se sont avérées être de 244,96 (KWh) pour le chauffage et de 857,53 (KWh) pour la climatisation soit une consommation totale annuelle de 1102,49 (KWh) (figure 85).

La performance énergétique de notre cas de base est de l'ordre de 65,62 KWh /m².an (On a divisé la consommation totale annuelle par la surface de la chambre 16,80 m² pour faire ressortir cette performance).

2.2 Etude de la volumétrie de la coupole

2.2.1 Proportions de la coupole

2.2.1.1 Evolution des températures

➤ Saison hivernale

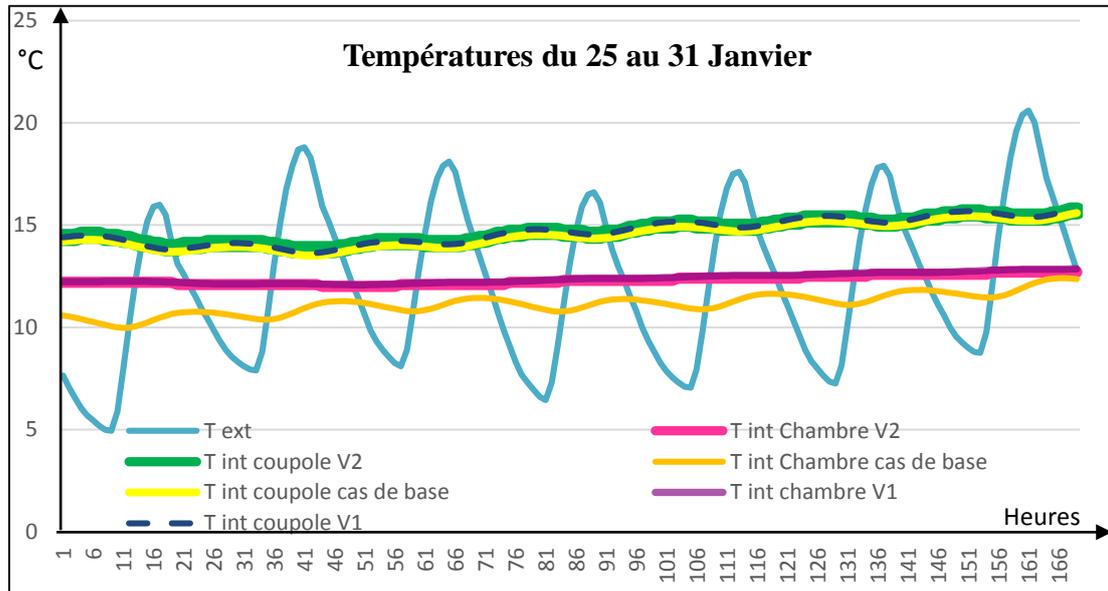


Figure 86 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec les variantes V1 & V2 pour la saison hivernale. Source : simulation par Trnsys17 réalisée par l'auteur.

On peut constater d'après le graphique ci-dessus (fig. 86), que la température au niveau de la chambre du cas de base est inférieure en la comparant à la température aux niveaux des variantes V1 et V2 ; ce qui est justifié par le phénomène du tirage thermique (l'air chaud a tendance de monter et l'air chaud à descendre). [DUTREIX, 2010]

➤ Saison estivale

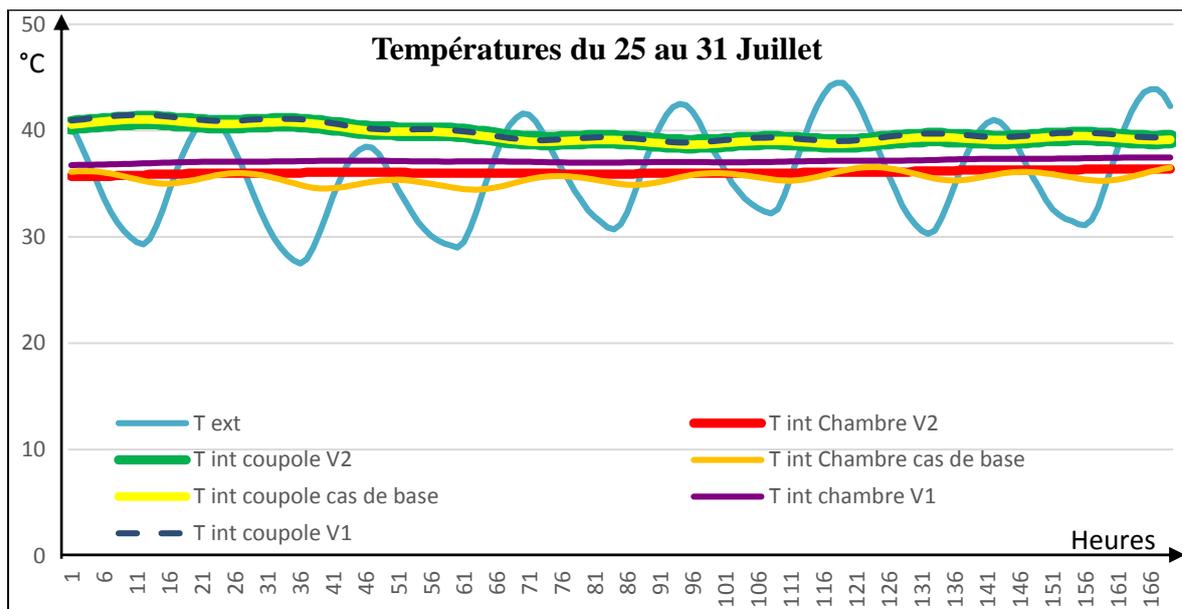


Figure 87 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec les variantes V1 & V2 pour la saison estivale. Source : simulation par trnsys17 réalisée par l'auteur.

On peut remarquer d'après le graphique ci-dessus (fig. 87), que la température au niveau de la chambre du cas de base est inférieure en la comparant à la température aux niveaux des variantes V1 et V2, et donc la configuration optimale de proportion de la coupole est celle du cas de base $\varnothing=2,60\text{m}$.

Les figures 86 et 87 montrent l'évolution de la température de l'air intérieur de la chambre et des coupoles dans les cas des variantes V1 et V2 par rapport au cas de base. On constate que les températures de la chambre du cas de base sont inférieures à celles de la chambre dans les cas des variantes V1 et V2, ce qui est favorable en saison estivale contrairement à la saison hivernale.

2.2.1.2 Evolution annuelle des consommations énergétiques

Tableau 7 : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec V1 et V1.
Source : Auteur, simulation par Trnsys17.

Besoin énergétique	Cas de base	Variante N°1	Variante N°2
Chauffage (KWh)	244,96	219,58	217,99
Climatisation (KWh)	857,53	916,88	906,25
Consommation totale (KWh)	1102,49	1136,46	1124,24
Performance énergétique (KWH/m ² .an)	65,62	67,64	66,91
Energie économisée (%)		-3,07	-1,96

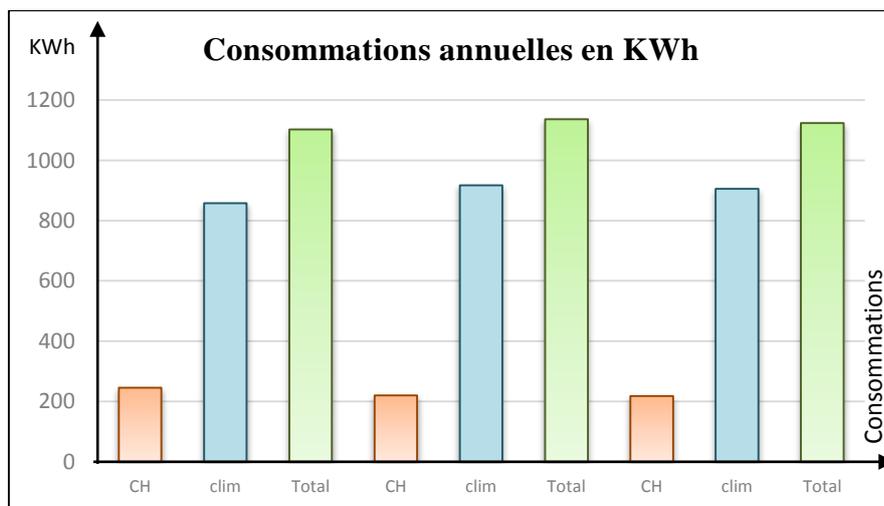


Figure 88 : bilan comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base et des variantes V1 & V2. Source : simulation par trnsys17 effectuée par l'auteur.

Les consommations énergétiques annuelles de chauffage et de climatisation du cas de base se sont avérées être plus économiques que celles des variantes V1 et V2 (figure 88).

2.2.2 Forme de la coupole

2.2.2.1 Evolution annuelle des températures

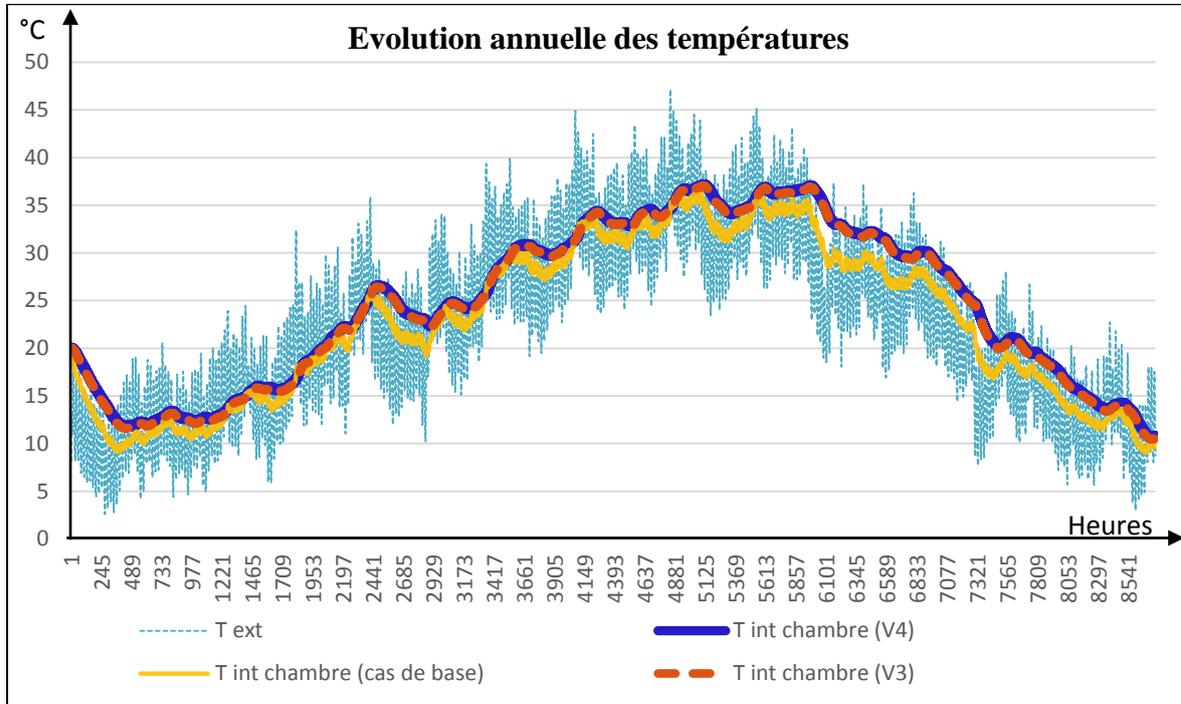


Figure 89 : Evolution annuelle des températures de la chambre du cas de base et des variantes V3 et V4. Source : simulation par trnsys17 effectuée par l'auteur.

D'après le graphique ci-dessus (fig. 89), on constate que la température à l'intérieur de la chambre du cas de base $\Theta = 115^\circ$ est plus basse par rapport à la température ambiante de la chambre dans les cas des variantes V3 et V4. Cela se justifie par la configuration délicate de l'angle solide, ce qui fait de la coupole du cas de base, la forme la plus favorable.

➤ Saison hivernale

D'après la figure 90, on constate que les températures de la chambre du cas de base sont inférieures à celles de la chambre dans les cas des variantes V3 et V4 ce qui est défavorable pour la saison hivernale. On peut justifier ce phénomène de restitution lente de la chaleur par les caractéristiques thermo physiques des matériaux de construction (l'inertie thermique).

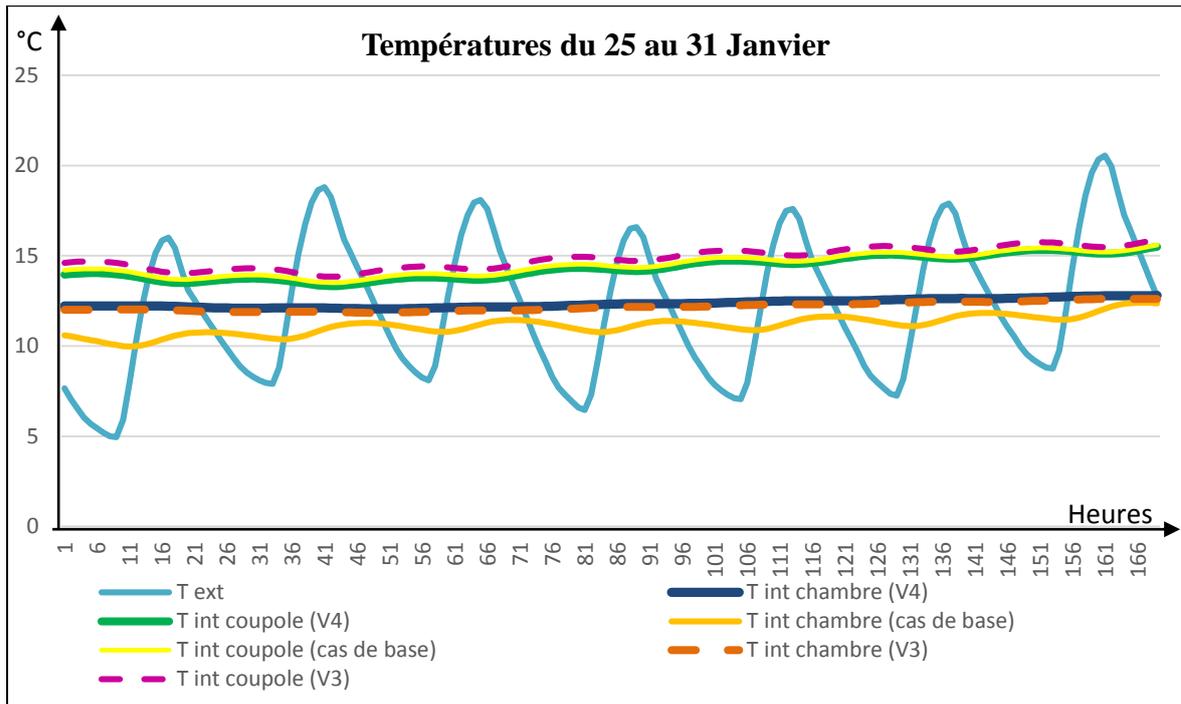


Figure 90 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec les variantes V3 & V4 pour la saison hivernale. Source : simulation par trnsys17 réalisée par l'auteur.

➤ Saison estivale

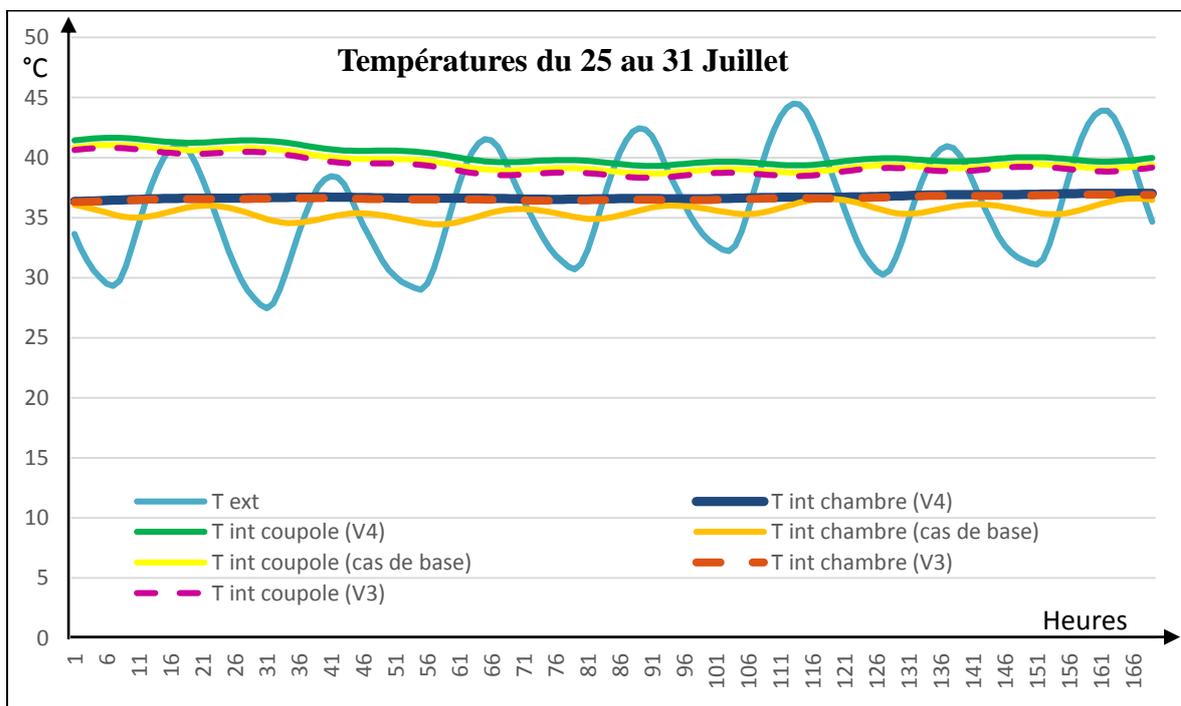


Figure 91 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec les variantes V3 et V4 pour la saison estivale. Source : simulation par trnsys17 réalisée par l'auteur.

Le graphique (fig. 91) montre l'évolution comparative de la température à l'intérieur du bâtiment dans le cas de base, V1 et V2. Les comportements de la température intérieure dans

la coupole sont presque identiques pour les 3 cas, quant à la température intérieure dans la chambre du cas de base est plus basse en la comparant à la température intérieure de la chambre des V3 et V4.

Pour les 3 cas, la température intérieure de la chambre est plus basse et la température ambiante de la coupole est plus élevée, ce qui est justifié par l'effet du tirage thermique.

D'après la figure 89, on constate que les températures de la chambre du cas de base sont inférieures à celles de la chambre dans les cas des variantes V3 et V4, ce qui n'est favorable qu'en saison estivale. En revanche, les résultats des températures intérieures au niveau de la coupole des 3 cas sont presque identiques et donc la forme de la coupole influe directement sur la température de l'espace en dessous de cette coupole.

2.2.2.2 Evolution annuelle des consommations énergétiques

Tableau 8 : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec V3 et V4. Source : auteur, simulation par Trnsys17.

Besoin énergétique	Cas de base	Variante N°3	Variante N°4
Chauffage (KWh)	244,96	219,10	219,12
Climatisation (KWh)	857,53	914,21	913,79
Consommation totale (KWh)	1102,49	1133,31	1132,91
Performance énergétique (KWH/m².an)	65,62	67,45	67,43
Energie économisée (%)		-2,78	-2,75

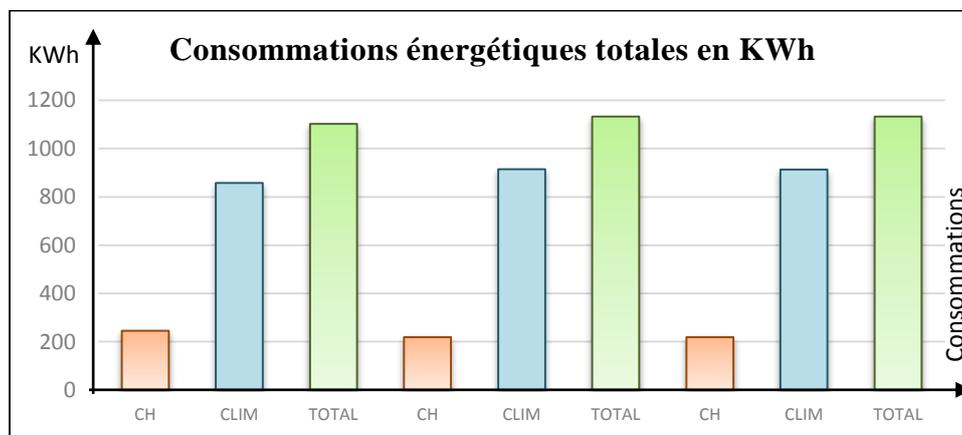


Figure 92 : bilan comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base et des variantes V3 & V4. Source : simulation par trnsys17 effectuée par l'auteur.

Les besoins en chauffage et climatisation du cas de base se manifestent plus économiques que celles des variantes V3 et V4 (Figure 92).

2.2.3 Ouverture au niveau de la coupole

2.2.3.1 Evolution des températures

➤ Saison hivernale

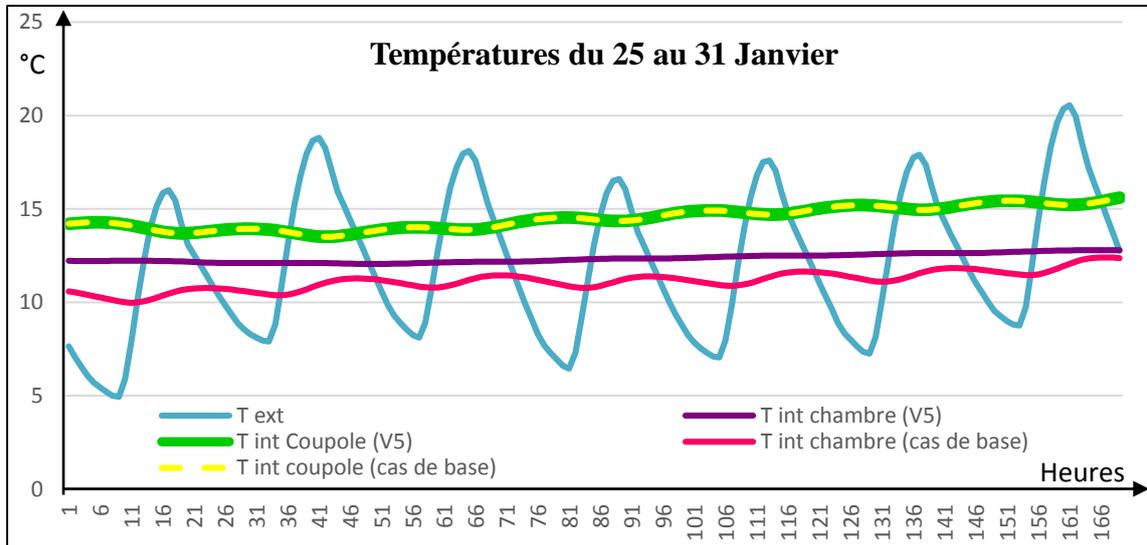


Figure 93 : comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec la variante V5 pour la saison hivernale. Source : simulation par trnsys17 réalisée par l'auteur.

On peut remarquer ici qu'à l'intérieur de la chambre qui est en dessous de la coupole avec ouverture, la température est plus basse par rapport à la température intérieure de la chambre sous coupole sans ouverture. Et donc, il est fortement recommandé de garder l'ouverture fermée pendant la saison hivernale.

➤ Saison estivale

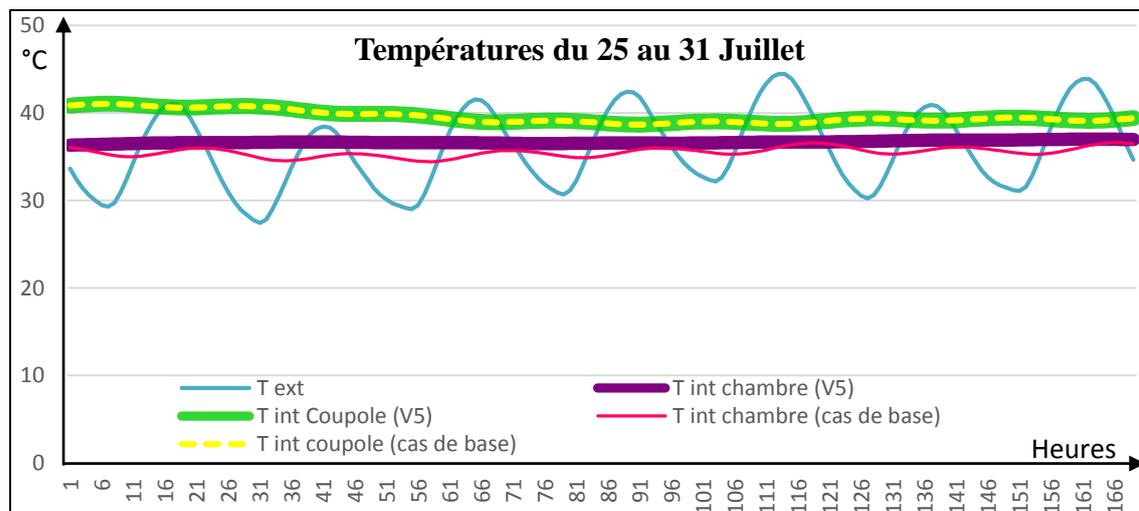


Figure 94 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec la variante V5 pour la saison estivale. Source : simulation : simulation par trnsys17 réalisée par l'auteur.

D'après les figures 93 et 94, on constate que les températures de la chambre du cas de base (coupole avec ouverture) sont inférieures à celles de la chambre dans les cas de la variante V5 tout au long de l'année, ce qui est plus avantageux en saison estivale. En revanche, les résultats des températures intérieures au niveau de la coupole des 2 cas sont identiques. Ce qui montre l'importance de l'ouverture au niveau de la coupole qui a un effet direct sur la température intérieure de la chambre.

2.2.3.2 Evolution annuelle des consommations énergétiques

Tableau 9 : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec V5. Source : auteur, simulation par Trnsys17.

Besoin énergétique	Cas de base	Variante N°5
Chauffage (KWh)	244,96	218,85
Climatisation (KWh)	857,53	912,05
Consommation totale (KWh)	1102,49	1130,90
Performance énergétique (KWH/m ² .an)	65,62	67,31
Energie économisée (%)		-2,57

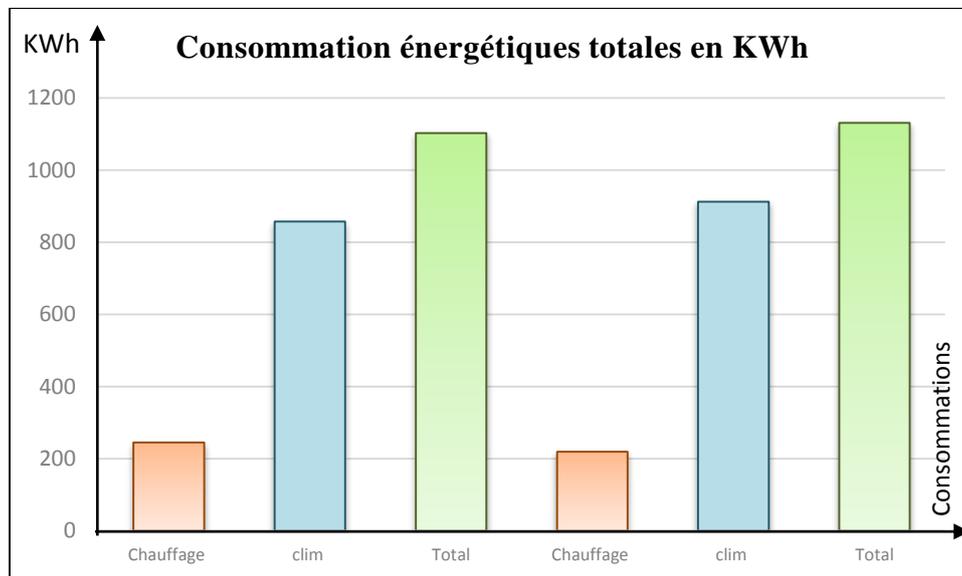


Figure 95 : Bilan comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base (coupole avec ouverture) et la variante V5. Source : simulation par trnsys17 effectuée par l'auteur.

Les besoins en chauffage et climatisation du cas de base sont plus économiques que celles de la variante V5 (figure 95).

D'après toutes les simulations effectuées dans le but d'étudier la forme et les proportions de la coupole ainsi que l'ouverture au niveau de cette dernière dans le climat chaud et aride, on constate que le cas de base est le plus performant cas, et le volume de la coupole reflète un facteur de forme meilleur pour ce cas.

Par l'effet du tirage thermique, les hausses des températures sont au niveau de la coupole ; ce qui nécessite des configurations spécifiques afin d'améliorer le confort thermique de cet espace. Egalement, il est recommandé de fermer l'ouverture au niveau de la coupole en période hivernale.

2.3 L'impact des améliorations effectuées

2.3.1 Impact de l'isolation

Pour but de protéger le toit des radiations solaires, nous avons pensé à isoler thermiquement la coupole par l'extérieur (variante N°6).

2.3.1.1 Evolution annuelle des températures

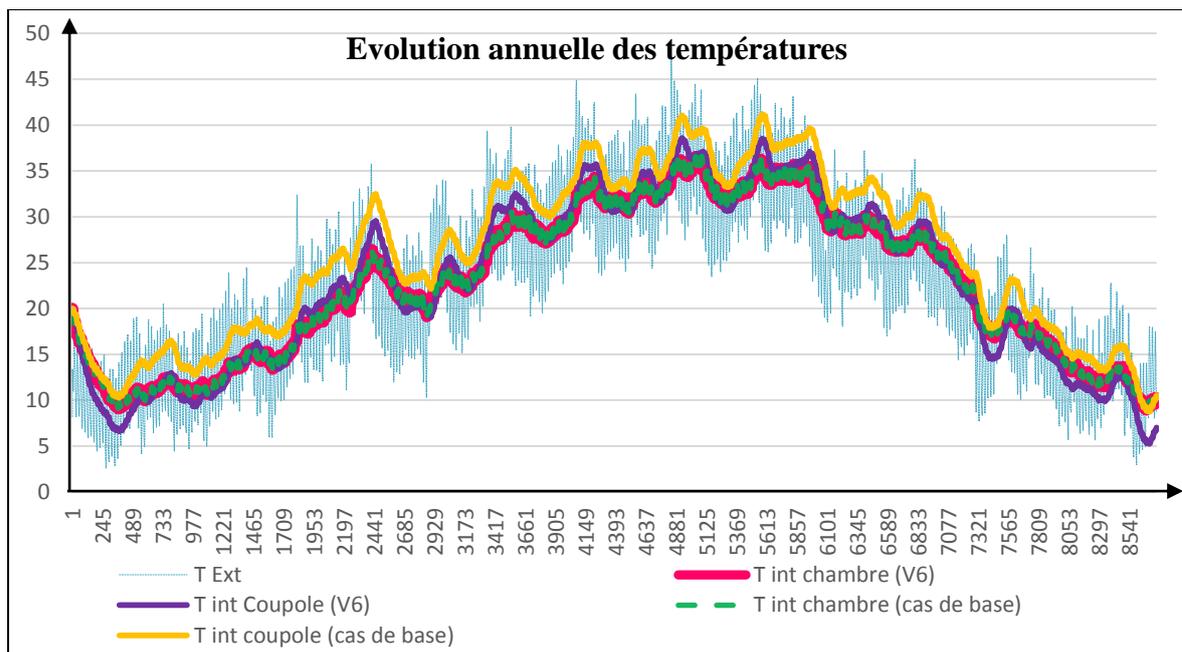


Figure 96 : comparaison de l'évolution annuelle des températures du cas de base avec la variante N°7. Source : simulation par trnsys17 réalisée par l'auteur.

D'après le graphe ci-dessus (figure 96), on constate que les températures intérieures de la chambre de la variante N°6 sont identiques à celles du cas de base. En revanche, les températures intérieures de la coupole isolée sont inférieures à celles du cas de base avec

une différence de 3°C en moyenne. L'isolation a limité les échanges de chaleur avec l'extérieur.

➤ Saison hivernale

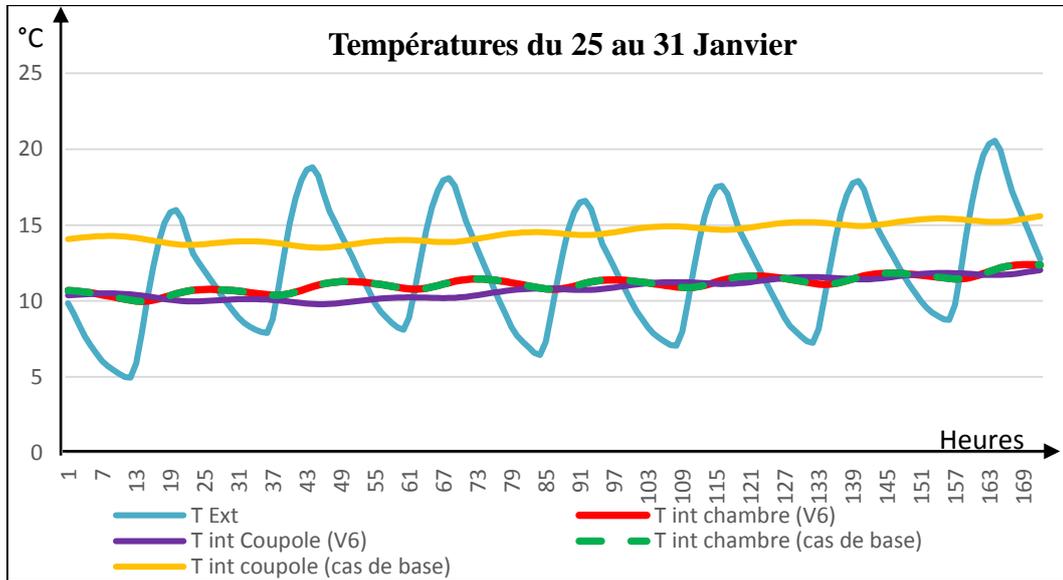


Figure 97 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec la variante N°06 durant la semaine la plus froide de l'année. Source : simulation par trnsys17 réalisée par l'auteur.

La Figure 97 montre l'impact de l'isolation sur la température intérieure de la coupole pour la variante N°6. La température intérieure suite à l'isolation de la coupole se situe au tour de 10°C à 12°C. En période hivernale, l'isolation ne peut pas apporter aux occupants une sensation désagréable.

➤ Saison estivale

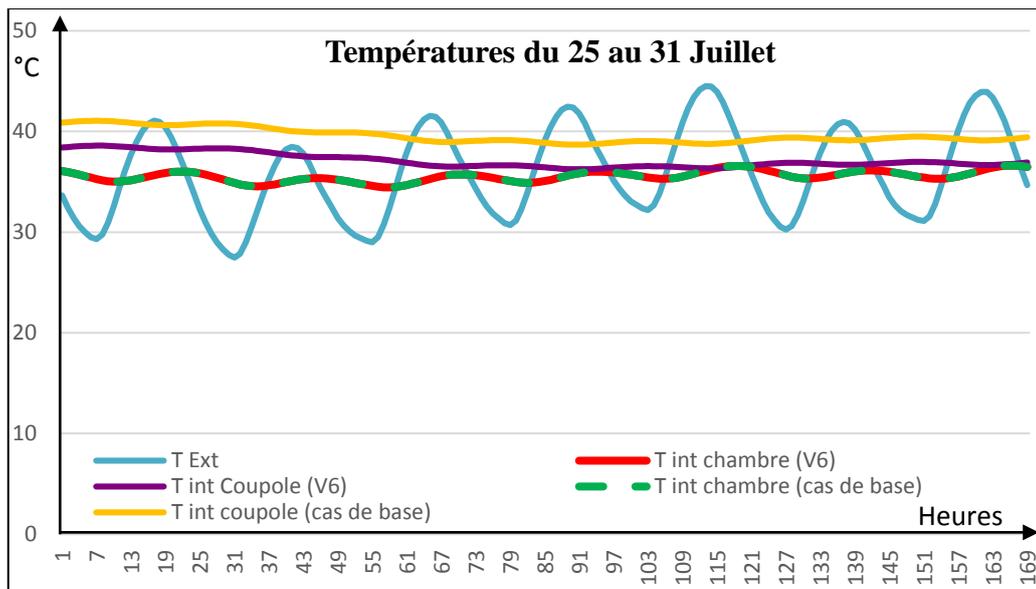


Figure 98 : Comparaison de l'évolution des températures du cas de base avec la variante V6 durant la semaine la plus chaude de l'année. Source : simulation par trnsys17 réalisée par l'auteur.

D'après la figure 98, on constate que l'isolation du toit a considérablement amélioré la température à l'intérieur de la coupole, elle varie en moyenne entre 36°C et 38°C. Cette amélioration a été enregistrée suite à une diminution de température de 3°C. L'amplitude de la variation de la température est ramenée à 1°C entre le jour et la nuit durant la dernière semaine du mois de Juillet.

L'isolation a amélioré la qualité du confort thermique en diminuant la température au niveau de la coupole, ceci est justifié par caractéristiques thermo-physiques avantageuses du matériau isolant.

2.3.1.2 Evolution annuelle des consommations énergétiques

Tableau 10 : Tableau : Etat comparatif des consommations énergétiques annuelles du cas de base avec V6.
Source : auteur, Simulation par Trnsys17.

Besoin énergétique	Cas de base	Variante N°6
Chauffage (KWh)	244,96	65,55
Climatisation (KWh)	857,53	644,04
Consommation totale (KWh)	1102,49	709,59
Performance énergétique (KWH/m ² .an)	65,62	42,23
Energie économisée (%)		+35,64

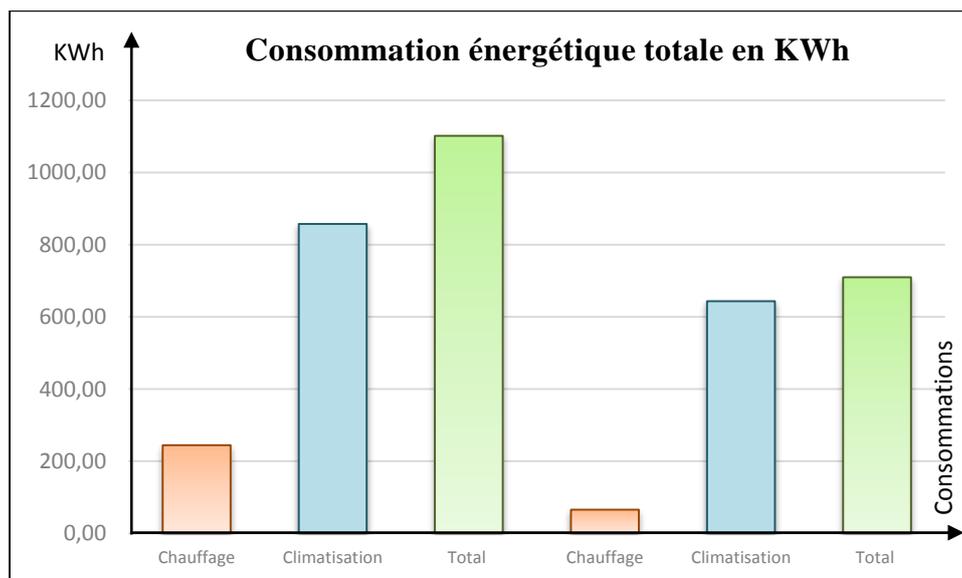


Figure 99 : Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec la variante V6.
Source : simulation par trnsys17, l'auteur.

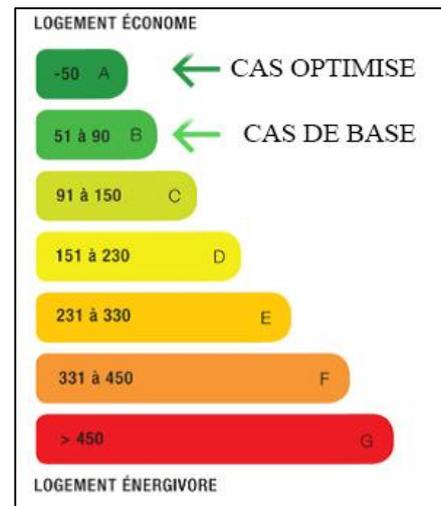
L'isolation de la coupole (variante N°6) apporte un gain total de 35,64%, en permettant une baisse de consommation énergétique en chauffage et en climatisation simultanément (fig. 99).

L'efficacité de l'isolation suffirait à améliorer la qualité de confort à l'intérieur sans avoir besoin d'activer l'extraction d'air chaud dans la coupole.

2.4 Performance énergétique du cas optimisé

Tableau 11 : Consommations énergétiques annuelles cas optimisés.
Source : auteur, simulation par Trnsys17.

Besoin (KWh)	Cas de base	Cas optimisé
Chauffage (KWh)	244,96	65,55
Climatisation (KWh)	857,53	644,04
Consommation totale	1102,49	709,59
Performance	65,62	42,23
Economie (%)		+35,64



Nous avons introduit quelques configurations à notre cas de base en essayant d'appliquer les démarches bioclimatiques dans le but de l'optimiser.

Ensuite, on a opté pour appliquer une stratégie d'isolation du toit en coupole ce qui a résulté un gain énergétique meilleur de 35,64% ce qui a permis d'améliorer le confort thermique à l'intérieur de la coupole en empêchant la descente de chaleur vers la chambre.

Nous avons pu donc, arriver à une performance énergétique de 42,26 KWh/m².an, ce qui représente une économie d'énergie de 35,64%. Par conséquent, le cas de base optimisé est passé de la classe B à la classe A en indice d'efficacité énergétique selon le DPE.

2.4.1 Comparatif des consommations énergétiques pour les différentes variantes

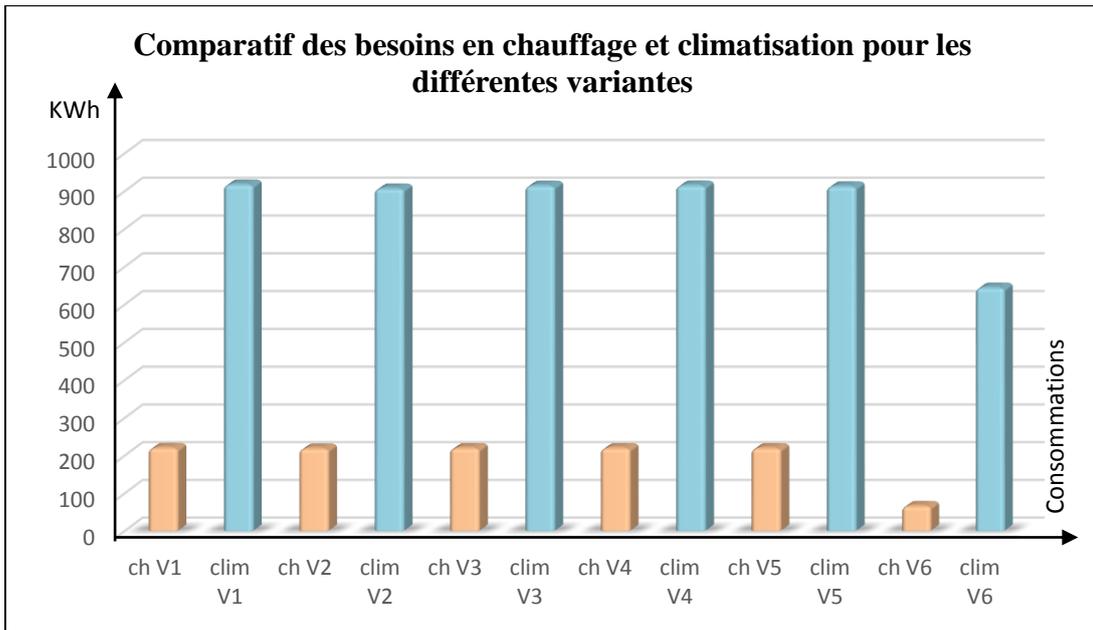


Figure 100 : Comparaison des consommations annuelles du chauffage et climatisation des différentes variantes. Source : résultats générés par Trnsys17 réalisés par l'auteur.

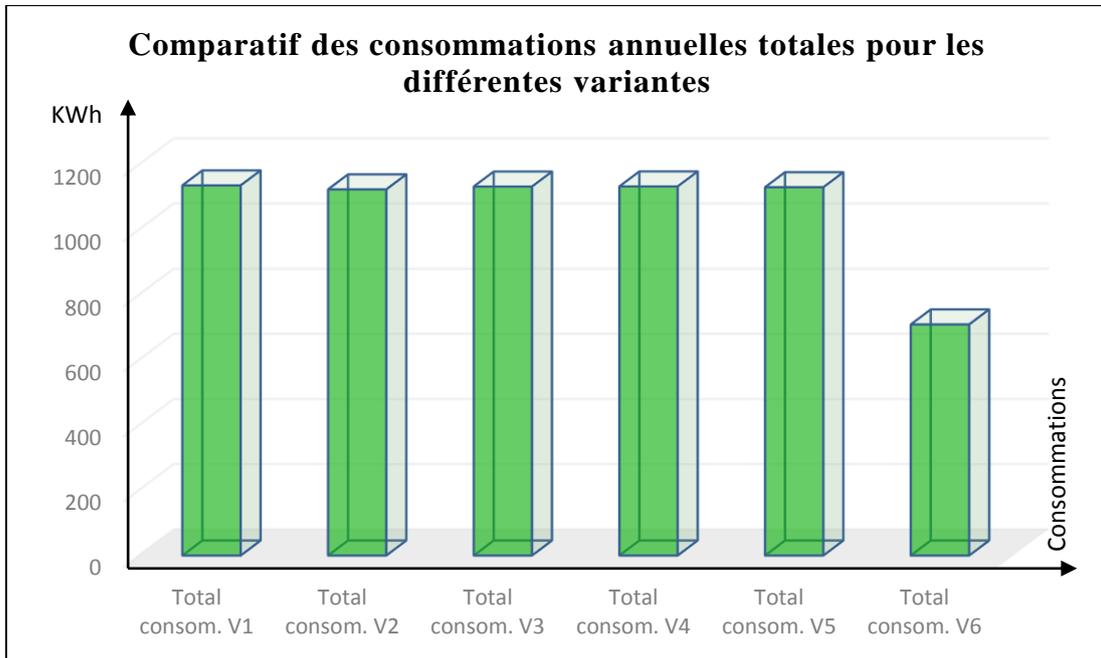


Figure 101 : Comparaison des consommations énergétiques annuelles totales des différentes variantes. Sources : résultats générés par trnsys17 réalisés par l'auteur.

Conclusion

Ce chapitre peut être considéré comme une étape complémentaire ajoutée au travail d'extraction des informations recueillies dans les chapitres précédents. En premier lieu, nous avons présenté une série de simulations menées dans le cadre d'une analyse de comportement thermique des différentes variables mises en question de la maison traditionnelle du Souf. Les simulations nous ont permis d'avoir les consommations prévisionnelles de chaque cas.

En second lieu, nous avons configuré le cas de base en mettant en place des stratégies d'amélioration afin d'obtenir le cas optimisé caractérisé par un maintien de confort thermique et d'une performance énergétique meilleure.

En conclusion de ce chapitre, la variable appliquant la stratégie d'isolation de la coupole, a indépendamment apporté des améliorations considérables en termes de confort thermique à l'intérieur du bâtiment et d'économie d'énergie.

5 Conclusion générale

IV-Conclusion générale

Aujourd'hui, la faille entre l'architecture et l'environnement continue de grandir sans cesse, et les consommations et besoins en chauffage et climatisation relatifs augmentent. Par conséquent, pour protéger l'homme et la planète et préserver ses ressources naturelles, des organisations mondiales se sont mobilisées afin de réduire l'émission importante des gaz à effet de serre à travers l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment en construisant avec la nature : l'environnement climatique.

Dans tout projet architectural, on doit tenir compte des ambiances et des composantes de l'enveloppe dès la première phase de conception. C'est dans cette phase qu'on doit intégrer les lignes et préoccupations qui vont lui donner sa forme ; tel que l'impact des phénomènes climatiques sur l'environnement bâti. Ces mesures permettent à l'architecte concepteur d'aboutir à une conception cohérente, notamment l'enveloppe du projet qui est souvent exposée aux variations des conditions climatiques et aux effets de stratifications des températures, engendrant des désagréments de sensation à l'intérieur du même bâti.

L'objectif de ce travail était de déterminer le comportement thermique engendré par la coupole afin de contribuer à l'amélioration de la conception architecturale adéquate au climat chaud et aride d'El Oued, qui se caractérise par des surchauffes importantes en été. L'influence de ces surchauffes sur l'enveloppe architecturale du bâti peut être une source d'inconfort thermique dans les espaces habités en contact direct avec cette enveloppe ou des espaces adjacents. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, celui de comprendre le comportement thermique de ces espaces dotés de coupoles durant les périodes hivernale et estivale, d'une part ; et d'évaluer leurs consommations prévisionnelles relatives, d'autre part.

Notre choix d'étude est tombé sur la maison traditionnelle du Souf, afin de styliser les concepts bioclimatiques et techniques de construction vernaculaire durable, et les mettre en référence pour qu'ils soient enseignés comme une inspiration ou un exemple.

Nous avons tenté de suivre les démarches de maîtrise de la consommation énergétique des bâtiments et l'amélioration du confort thermique de l'habitat dans le cadre de l'amélioration d'efficacité énergétique.

Dans le chapitre état de l'art, il était nécessaire d'introduire ce travail en soulignant le confort thermique et le savoir-faire vernaculaire ainsi que sa contribution à la conception bioclimatique tout en basant sur les aspects comportementaux de la forme en coupole. Cette

analyse nous a permis de cerner les paramètres architecturaux susceptibles d'apporter des effets sur le confort thermique, il semblait donc nécessaire d'étudier un cas concret. Ensuite, en appuyant sur un outil de simulation thermique dynamique virtuelle d'un cas existant nous avons déterminé précisément les températures intérieures et évaluer le confort thermique à l'intérieur de cet espace.

La série de simulations effectuées nous a mené à choisir la variable la plus économique en terme de consommation énergétique, tout en passant par une hypothèse générale : *La coupole est un élément générateur du confort en périodes estivale et hivernale, en climat chaud et aride.*

Les différentes configurations effectuées pour étudier la contribution de la coupole au confort thermique, en termes de la forme, les proportions et les ouvertures au niveau de la coupole, ont apporté une amélioration du confort thermique de 2 à 3°C dans la pièce habitable. Cependant, les matériaux de construction utilisés pour l'enveloppe ont permis un écart de température de 5 à 10°C tout au long de l'année ; mais cette configuration n'a pas permis une amélioration de confort à l'intérieur de la coupole, ce qui nous a menés à intégrer une isolation au niveau de la coupole. La configuration d'isolation présente le cas optimisé, la variable la moins énergivore, avec un gain énergétique de 35,64%.

Pour conclure, la forme de coupole apporte une amélioration de confort thermique à l'intérieur de la maison traditionnelle. Mais, les améliorations les plus importantes du confort sont engendrées par la modification des matériaux, en appliquant la stratégie d'isolation. En fait, pour ce type de climat, l'inertie thermique des matériaux prend le rôle générateur du confort thermique.

On ne peut pas accentuer la conclusion sans marquer les limites de cette recherche, qui sont relatives à la méthodologie adoptée et les résultats y afférents. On peut marquer les suivantes :

- La recherche concerne un cas d'étude dans un temps précis. En effet, l'investigation in-situ est faite dans un moment limité et non pas étalée sur toute la période estivale, ce qui influe sur la généralisation des résultats. Ainsi, le cas d'étude est représenté par un seul échantillon, la recherche aurait plus de résultats pertinents si on aurait plusieurs échantillons.
- L'outil d'évaluation demande un temps d'apprentissage très long afin de permettre de réaliser et maîtriser une simulation de comportement thermo-aéraulique.

A l'issue de cette recherche, et au futur, nous souhaitons modéliser l'aéraulique du bâtiment afin de caractériser les différents phénomènes de ventilation naturelle dans l'habitat vernaculaire algérien ; et ainsi, de donner suite aux recherches destinées au développement des techniques de construction des toitures en termes de forme et de matériaux.

6 Références bibliographiques

V-Références bibliographiques

Les livres :

ADAM JP., 1984. *La construction romaine, matériaux et techniques*, éd. A. et J. Picard, Paris, France.

A.S.H.R.A.E , 2009. *Fundamental Handbook, Chapitre 9: Thermal Comfort*. Ed. Inch Pound, New York.

Benoit-Cattin R., et Davoigneau J., 2013. *Thesaurus de la désignation des œuvres architecturales et des espaces aménagés. L'inventaire éd. n°07*, France, 182p.

Boudon P., 2013. *L'architecture des lieux : sémantique de l'édification et du territoire*. éd. Infolio, Gollion, Suisse, 286p.

Dethier J., 1981. *Des Architectures de Terre ou l'avenir d'une tradition millénaire*. Centre de création industrielle Georges Pompidou, imprimerie moderne du Lion, Paris, 192p.

Doat P., et al., (CRAterre), 1979. *Construire en terre*. Ed. Alternative et parallèles, Collection AnArchitecture, 265p.

Donnadieu C. & P., et Didillon Henriette & J-M., Donnadieu Catherine, 1977. *Habiter le désert - Les maisons mozabites*. éd. Mardaga, Bruxelles, Belgique, 254p.

Duplay Claire & Michel, 1985. *Méthode illustrée de création architecturale*. éd. Le Moniteur, Paris, France, 448p.

Fathy Hassan, 1986. *Natural Energy and Vernacular Architecture*. The united nation university, Tokyo, Japan, 219p.

Givoni B., 1978. *L'homme, l'architecture et le climat*. Editions du Moniteur, Paris, France, 461p.

Godivier J.L., 1978. *Atlas d'architecture mondiale : Des Origines à Byzance*. Ed. Stock, Paris, France, 284p.

Izard J.L., et Guyot A., 1979. *Archi-bio*. Éd Parenthèses, Roquevaire, France, 132p.

J-M. Bloch-Laine, 1977. *Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments*. Ed Eyrolles, Paris, France.

Liébard A., et De Herde A., 2006. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. Éd Le Moniteur, France, 776p.

Mostafa S.L. *The Domes In Muslim Architecture*, Dar An-Nahda Al-Arabiya, Beirut, Liban, 116p.

Nourissier G.; Reguant J.; Casanovas X., et Christophe G., 2002. *Architecture Traditionnelle Méditerranéenne*. Corpus, école d'Avignon, France, 144p ; disponible en ligne sur : https://issuu.com/asociacionrehabimed/docs/corpus_fra , page consultée le 09/10/2020.

Renault C., 2007. *Les styles de l'architecture de la préhistoire à nos jours*, collection histoire de l'art. Ed. Librairie Eyrolles, Paris, France.

Roulet CA., 2004. *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Presses polytechniques et universitaires Romandes, Italie, 358p.

Rudofsky B., 1964. *Architecture without architects: a short introduction to non-pedigreed architecture*. Editions Doubleday and Company, Garden City N.Y., 104p.

Salomon, T., et Bedel, S., 2004. *La maison des [néga] watts, Le guide malin de l'énergie chez soi*. Ed. Terre vivante. Mens, France. 151p.

Watson, D., et al., 1999. *Time-saver standards for architectural design data*. Ed. McGraw-Hill, USA.

Wright D., 2004. *Manuel d'architecture naturelle*. Éd Parenthèses, France, 256p.

Xavier C.; 2007. *Méthode RehabiMed : Architecture Traditionnelle Méditerranéenne*. RehabiMed, l'Union Européenne, 401p.

Les mémoires et thèses :

Akacem I., 2019. *Évaluation et amélioration d'efficacité énergétique et du confort thermique d'une réinterprétation d'un héritage architectural traditionnel en zone aride : Cas du Ksar Tafilelt*. Mémoire de Master : Architecture bioclimatique, institut d'architecture et d'urbanisme - Université de Blida, 118p.

Atek A., 2012. *Pour une réinterprétation du vernaculaire dans l'architecture durable : cas de la Casbah d'Alger*. Thèse de Magister : Architecture et Développement durable, Université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou, Algérie, 144p.

Batier C., 2016. *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen D'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales*. Thèse de doctorat : Mécanique, Génie civil et Architecture, Université de Montpellier, France, 290p.

Bellara Louafi S., 2005. *Impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective, Cas de la nouvelle ville Ali Mendjeli, Constantine*. Mémoire de Magistère : Architecture bioclimatique. Université de Constantine, 265p.

Boulfani Warda., 2010. *Les ambiances thermiques d'été dans l'habitat de la période coloniale à patio – cas d'étude une maison à patio à Jijel*. Mémoire de magistère : Architecture, formes, ambiances et développement durable. Université de Biskra, 321p.

Chaouche-Bencherif M., 2006. *La Micro-urbanisation et la ville-oasis; une alternative à l'équilibre des zones arides pour une ville saharienne durable CAS du Bas-Sahara*. Mémoire de Doctorat en Sciences : Urbanisme, université Mentouri de Constantine, Algérie, 439p.

Cadoni G., 2012. *Les systèmes de rafraîchissement passifs dans l'architecture contemporaine et la conception bioclimatique du bâtiment*. Thèse de Doctorat en Architecture, ENSA Marseille, France, 630p.

CUI Shuqing, 2015. *Modélisation de la ventilation naturelle en vue d'une conception optimisée d'ouvertures vitrées*. Thèse de doctorat : énergétique et génie des procédés. L'école nationale supérieure des mines, Paris, 202p.

FAGGIANELLI GA., 2014. *Rafraichissement par la ventilation naturelle traversante des bâtiments en climat méditerranéen. Thèse de Doctorat en énergie : énergie et génie des procédés. Ecole doctorale environnement et société, université de Corse.*

Haddam Muhammad Abdalkhalaq Chuayb, 2015. *Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat. Thèse de doctorat en sciences physiques : Physique Electronique et Modélisation. Université de Tlemcen, 150p.*

Kabouche A., 2012. *Architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires, cas d'étude : simulation sous trnsys16.1 d'un appartement d'une tour multifonctionnelle à Constantine. Mémoire de magistère : Architecture bioclimatique, université Mentouri – Constantine, 215p.*

Laouar K., et Setita S., 2015. *Le confort thermique et la qualité d'air dans les établissements de santé. Mémoire de Master : Architecture et durabilité architecturale. Université de Oum El Bouaghi, 109p.*

Maaoui A., et Ben M'hidi H.E., 2017. *La dimension bioclimatique dans l'habitat vernaculaire : Cas d'étude la maison a patio. Mémoire de Master: Architecture et durabilité architecturale, Université d'Oum El Bouaghi, Algérie, 126p.*

Mansouri S., 2008. *Les proportions dans l'architecture musulmane, l'influence des facteurs : technologique et climatique. Thèse de doctorat : Architecture. Université de Constantine, 308p.*

Marine B., 2013. *L'architecture vernaculaire et la modernité architecturale : la relation au paysage. Mémoire de Master : Architecture, ENSA Paris Val de Seine, France, 114p ; Disponible en ligne sur : <https://fr.calameo.com/read/002828889533c7959a7bf> , Page consultée le 27/06/2020.*

Mazari M., 2012. *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'Architecture de Tamda (Tizi-Ouzou). Mémoire de Magistère : Architecture et développement durable. Université de Tizi-Ouzou, 167p.*

Meguellati Atef, 2008. *Modélisation paramétrique, Coupes d'Orient & d'Occident. Mémoire de Master Design Global : Modélisation et Simulation des Espaces Bâties, Ecole d'Architecture de Nancy, France, 76p.*

Mesli H., 2017. *Construire une architecture bioclimatique par le retour aux origines traditionnelles : Cas de Taghit. Thèse de magistère en architecture : Ville et architecture au Sahara, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 224p.*

Messaoudi Alazhar et Fellah Taher, 2017. *Conception d'un bâtiment semi-enterré et simulation de son comportement thermique. Mémoire de Master en Génie Mécanique : Génie Energétique, université Kasdi Merbah – Ouargla, Algérie, 74p.*

Nait N., 2011. *La réhabilitation énergétique dans les logements collectifs existants cas du climat semi aride de Constantine. Mémoire de magistère : Architecture bioclimatique, Université Mentouri – Constantine, 270p.*

Rodriguez G., 2013. *Modélisation de la réponse de l'architecture au climat local. Thèse de doctorat : Mécanique, Ecole doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur - Bordeaux I, France, 218p.*

Semahi S., 2013. *Contribution méthodologique à la conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie : Développement d'une approche de conception dans les zones arides et semi-arides*. Thèse de Magister : Architecture et environnement, EPAU, Algérie, 150p.

Tahar Med., 2017. *Complexe culturel Religieux*. Mémoire de Master en Architecture : Patrimoine, Institut d'architecture et d'urbanisme de Blida, Algérie, 27p.

Zeroual D., 2006. *Impact des gains de chaleur sur la morphologie des bâtiments cas des climats chauds et arides*. Mémoire de Magistère : architecture bioclimatique, université Mentouri de Constantine, Algérie, 228p.

Zineddine S., 2019. *La sensorialité dans l'architecture de Fernand Pouillon en Algérie indépendante*. Thèse de Doctorat : Architecture, environnement et patrimoine, Université Mohamed Khider – Biskra, 585p.

Benoit-Cattin R. et Davoigneau J., 2013. *Thesaurus de la désignation des œuvres architecturales et des espaces Aménagés*, éd. L'Inventaire général du patrimoine culturel, France.

Les articles, catalogues, guides et revues :

ADEME, 2018. *Guide pratique d'isolation thermique : isoler sa maison*, ANGERS, France, 15p ; disponible en ligne sur : <http://www.enrchoix.idf.ademe.fr/ressources/reduire-consommation-energie/guide-pratique-isoler-sa-maison.pdf> , page consultée le 07/10/2020.

ADEME, 2008. *Améliorez le confort de votre maison, l'isolation thermique*, Angers, France, 32p.

Aït Hammouda-Kalloum K., Janvier 2019. *du vernaculaire au durable, un état des lieux du patrimoine architectural à Adrar*. 57-66 *African Review of Science, Technology and Development V 04, N.01*, 10p.

Atasoy N., Bahnassi A., et Rogers M., 1984. *XIVe exposition itinérante de reproductions d'œuvres d'art de l'UNESCO*. UNESCO, Paris, France, 95p.

Athmani W., et , Sriti L., 2018. *Impact of passive cooling techniques on the thermal behavior of residential buildings in hot and arid regions -An experimental study*. LACOMOFA Laboratory, College of Architecture, Biskra , Algeria, 12p.

Avems, 2010. *Guide de la ventilation naturelle et hybride "VNHY"*, Habitat collectif et individuel, France, 76p ; disponible en ligne sur : <https://www.ademe.fr/guide-ventilation-naturelle-hybride-vnhyr-conception-dimensionnement-mise-oeuvre-maintenance> , page consultée le 07/10/2020.

Benzarti S., 2015. *Vers une réinterprétation des techniques bioclimatiques vernaculaires pour répondre aux enjeux de l'architecture contemporaine*. ENSA Paris, France, 1p.

CIBSE, 2005. *Natural ventilation in non-domestic buildings*, London, UK, 87p.

Collection technique CIMBETON, 2007. *Béton et confort thermique*, revue technique du centre d'information sur le ciment et ses applications, Infociment, n° B 40, France, 63p.

CSST, 2004. *Guide : Confort thermique à l'intérieur d'un établissement*. Québec, disponible sur : <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/Publications/> , page consultée le 06/10/2020.

- Deruaz S., 2008. *Guide : Manuel énergétiquement efficace pour la maison individuelle*. CAUE13, Marseille, France, 31p.
- Driouèche Djaalali N., 2014. *Un bain à coupoles dans une demeure algéroise de l'époque ottomane*. *Insanyat*, n°63-64, p. 83-92, 10p.
- El Khatri S., 2003. *Manuel du cours de climatologie*, centre national de recherches météorologiques, Casablanca, Maroc, 25p.
- Evans M., 1980. *Housing, climate and comfort*, the architectural press, London.
- France air, 2006. *Guide technique de la diffusion d'air*. France, 66p, disponible sur : <https://www.airsystems.ro/assets/memento-diffusion.pdf>, Page consultée le 06/10/2020.
- ICOMOS, Octobre 1999. *Charte du patrimoine bâti vernaculaire*, Mexique, 3p.
- Imessad K., et al., 2017. « *Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment* », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 20 N°4, p 591
- Lavoye F., 2008. *Fiche technique prisme N°4 : L'architecture bioclimatique*, l'IEPF, Québec, Canada, 9p.
- Lecerf C., ICEB, 2012. *Guide bio-tech : L'énergie grise des matériaux et des ouvrages*, ARENE, Île-de-France, 132p ; disponible en ligne sur : <https://www.asso-iceb.org/documents/guide-biotech/>, page consultée le 27/07/2020.
- Leroy A., 2005. *Architecture écologique*, support de cours Licence en génie civil : ingénierie du bâtiment, faculté des sciences de la Rochelle, France, 51p ; disponible en ligne sur : <https://fr.calameo.com/read/000000742d1a44dd0d573>, page consultée le 28/06/2020.
- Leroy A., 2005. *Architecture solaire*, support de cours Licence en génie civil : ingénierie du bâtiment, faculté des sciences de la Rochelle, France, 24p ; disponible en ligne sur : <https://fr.calameo.com/read/0000007422a75814a985a>, page consultée le 28/06/2020.
- MDA Architectes, 2013. *Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments dans le Maghreb*, GIZ, Québec, 146p.
- Nahar N.M., Sharma P., Purohit M.M., 2003. « *Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions* », *Building and Environment*. Jodhpur, India, 8p.
- Nefidi H., 2017. *Etude thermique d'une maison traditionnelle en Algérie, cas d'Oued Souf*. LTSM, Université de Blida 1, Algérie, PET Vol.31 pp.19-23, 5p.
- Nerouchef M., *Les zones climatiques de la terre*, PDF, disponible en ligne sur : <https://www.enseignons.be/preparations/7715-les-zones-climatiques/> page consultée le 06/10/2020.
- NEUF: « *Climat intérieur/ confort, Santé, confort visuel* » *Revue européenne d'architecture* N°77, P 12. Novembre - Décembre 1978.
- OMM N°100, 2018. *Guide des pratiques climatologiques*, Genève 2, Suisse, 174p ; Disponible en ligne sur : <http://public.wmo.int/fr>, page consultée le 22/06/2020.

Ould-Henia M., 1993. « *Recommandations architecturales* ». ENAG, Algérie.

Raoust M., ICEB, 2012. *Guide bio-tech ventilation naturelle et mécanique*, ARENE, Île-de-France, 60p ; disponible en ligne sur : <https://www.asso-iceb.org/documents/guide-biotech/> , page consultée le 07/10/2020.

Runsheng Tang, et Etzion Y., 2004. « *On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings.* », *Building and Environment*, N. 39.

Sharma Anupama, Dhote K., et Tiwari R., April 2003. « *Climatic Responsive Energy Efficient Passive Techniques in Buildings* », Vol 84, 10p.

Supic P., *L'aspect bioclimatique de l'habitat vernaculaire*, *Architecture & Comportement* Vol. 10, n°1, p. 27 - 47. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 21p.

Support de cours, ENSAF, *Bioclimatique des vides : stratégies passives*, 2017, France, 113p.

Wälchli C., 2016. *Guide-conseil : comment concevoir sa maison bioclimatique ?*, Union régionale des CAUE des Pays-de-la-Loire, France, 7p ; disponible en ligne sur : <https://www.caue-finistere.fr/wp-content/uploads/2016/08/maisonbioclimatique-1.pdf> , page consultée le 21/06/2020.

Zerouali M., 2009. *Architecture et développement durable, Chapitre 1 : approche introductive*, *Le Quotidien d'Oran* : 24 - 01 – 2009, en ligne sur <http://www.djazairess.com/fr/lqo/5115058>.

Les sites web :

Archdaily, <https://www.archdaily.com/915616/basuna-mosque-dar-arafa-architecture> , page consultée le 20/07/2020.

Aprue, www.aprue.org.dz

Climamaison, <https://www.climamaison.com/lexique/isolant-thermique.htm>, page consultée le 07/10/2020.

Ecosources, <https://www.ecosources.info/>, page consultée le 07/06/2020.

Energie Positive, <http://www.energiepositive.info/fr/reduire-besoin/construire-compact.html> , page consultée le 23/06/2020.

Energie +, <https://energieplus-lesite.be>, page consultée le 20/06/2020.

<https://energieplus-lesite.be/techniques/enveloppe7/composants-de-l-enveloppe/vitrages/vitrage-permettant-le-controle-solaire/>

L'énergie tout compris, <https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-et-informations/entretien-des-installations/quels-sont-les-materiaux-dans-l-architecture-bioclimatique-48249> , page consultée le 06/06/2020.

Dictionnaire environnement en ligne sur : https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/

Fluiditec Expertise et conception énergétique, <https://www.fluditec.com/>, Page consultée le 23/06/2020.

MaisonBioNat, en ligne sur <https://www.maisonbionat.fr/livres-eco-construction/manuel-architecture-naturelle/>, page consultée le 06/06/2020.

Météo-consult, <http://seme.cer.free.fr/plaisance/vents-meteo-marine.php>, Page consultée le 26/06/2020.

Meet-Med “ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY STRATEGIES AND POLICIES”, disponible en ligne sur: www.meetmed.org

National Geographic, www.nationalgeographic.fr, page consultée le 23/06/2020.

Researchgate, <https://www.researchgate.net/>, page consultée le 22/06/2020.

Liste des abréviations

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France).

APRUE : Agence nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (Algérie).

A.S.H.R.A.E: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (USA).

Avems : Association professionnelle des industriels français pour la valorisation en ventilation de l'extraction mécanique-statique ou statique (France).

CAUE : Conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement (France).

CAUE13 : Conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement des bouches du Rhône (France).

CNERIB : Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (Algérie).

CSST : Commission de la santé et de la sécurité du travail (Canada).

DPE : Diagnostic de Performance Energétique (réalisé en France).

ENSAF : Etablissement d'Enseignement Supérieur à Clermont-Ferrand (France).

ICEB : Institut pour la Conception Environnementale du Bâti (France).

ICOMOS : International Council on Monuments and Sites : Conseil international des monuments et des sites (France).

IEPF : Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (Canada).

OCDE : Organisation pour la Coopération et le Développement Economiques (Organization for Economic Cooperation and Development) (France).

OMM N°100 : Organisation Météorologique Mondiale

O.N.M. : Office National de la Météorologie (Algérie).

S.T.D. : Simulation Thermique Dynamique

Annexes

Annexe I : Méthodologie de simulation

a- Création d'un fichier météorologique :

Le format **TM2** est un fichier de météo horaire, contient pour une année complète, les valeurs horaires de la température sèche, humidité relative, les radiations, la direction des vents, la pression de l'air et le rayonnement solaire.

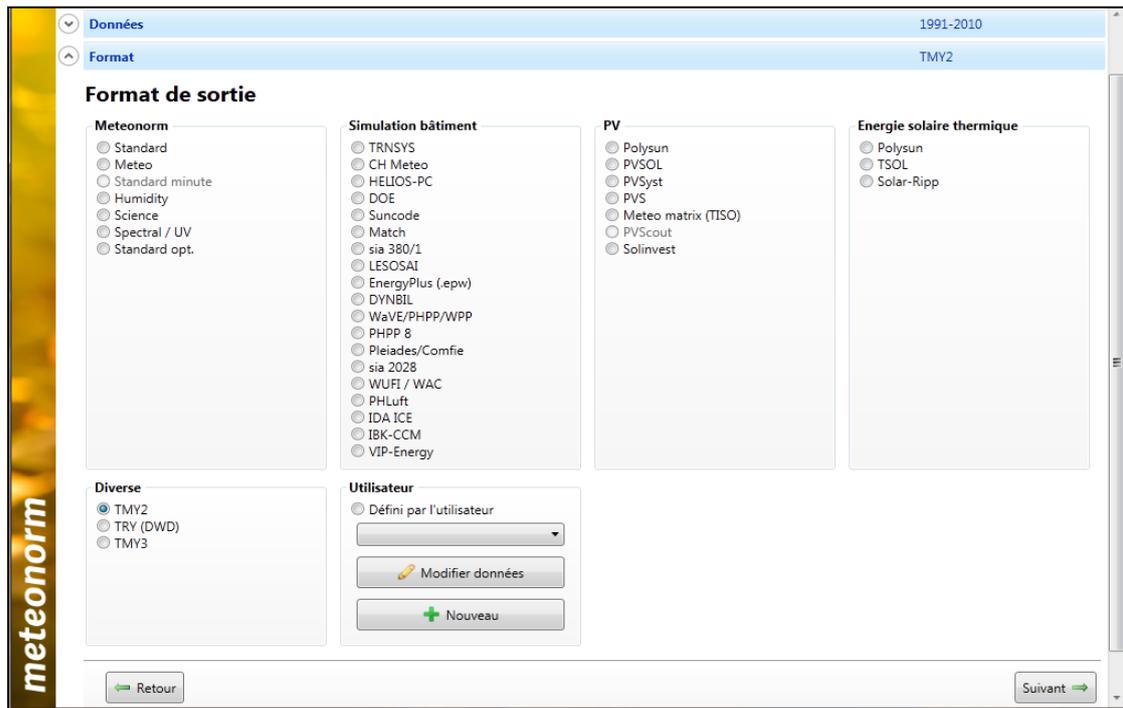


Figure 102 : Choix de format de sortie. Source : auteur depuis meteonorm7.

b-1- Modélisation géométrique sous l'extension *Trnsys3d* :

La modélisation géométrique de la zone (chambre) simulée se fait sous l'extension *Trnsys3d* à l'aide du *SketchUp*.

Dans le but de s'approcher, au plus près du volume réel, les mesures du plan sont prises à partir des axes des murs. L'axe en vert représente le nord.

On clique sur la commande « New Trnsys3d Zone »  afin de dessiner la géométrie de la première zone thermique (la chambre). Nous devons répéter l'opération pour créer la deuxième zone (la coupole).

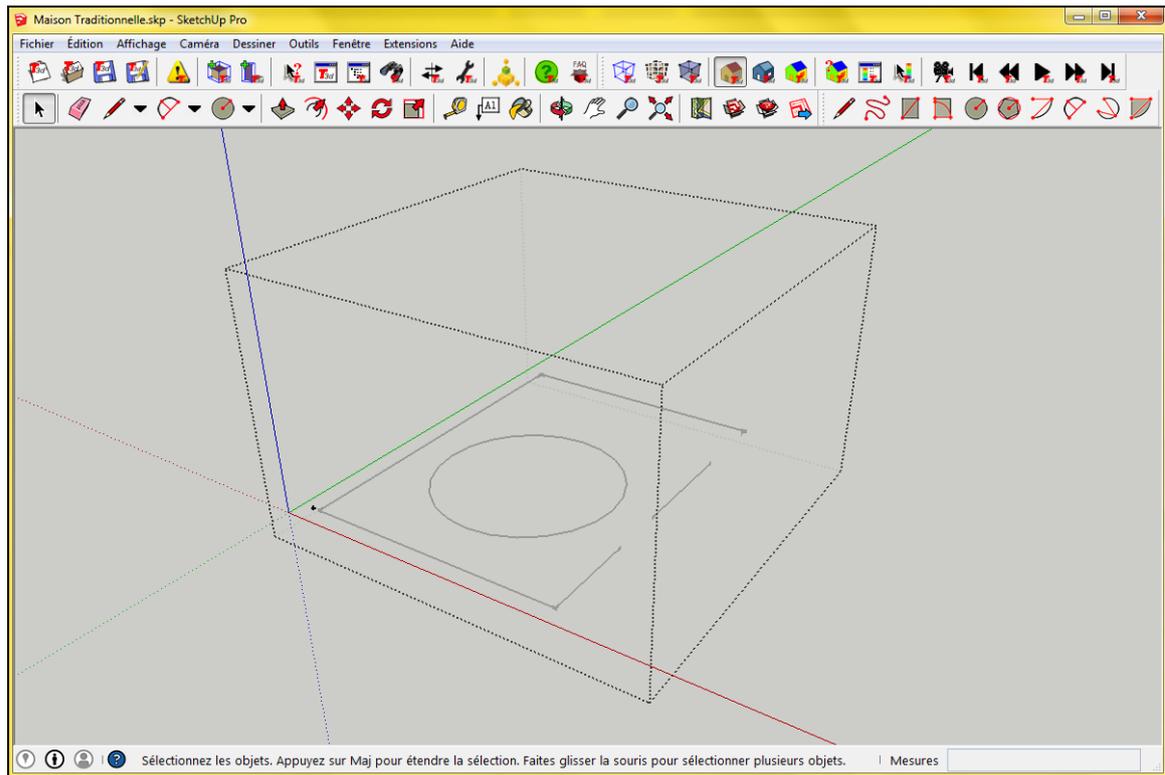


Figure 103 : Création de la zone thermique. Source : auteur depuis SketchUp 2015.

Après avoir dessiné la géométrie de la chambre ainsi que les ouvertures existantes, on clique sur la zone pour la donner une appellation.

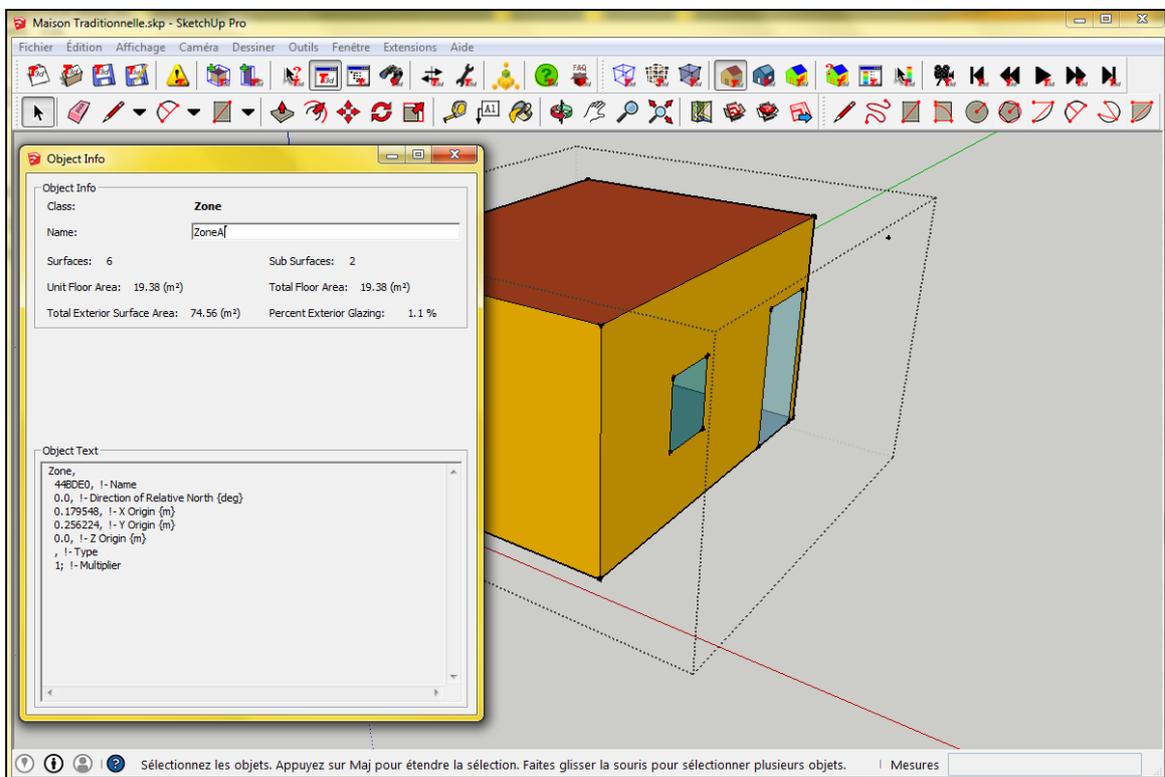


Figure 104 : modélisation de la chambre et nomination de la zone. auteur depuis SketchUp 2015.

On peut définir les types des parois en murs extérieurs (EXT_WALL) et murs adjacents (ADJ_WALL). La porte de la chambre est aussi nommée par EXT_WALL, type de surface : Door ; la fenêtre est nommée par EXT_WINDOW.

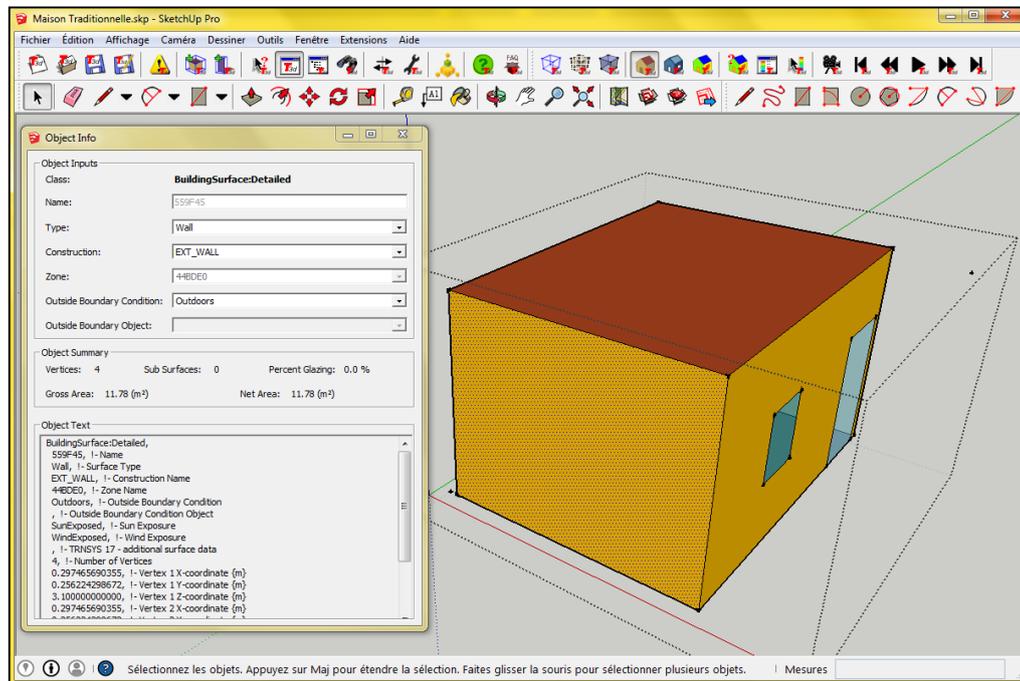


Figure 105 : définition des parois et ouvertures. Source : auteur depuis SketchUp 2015.

L'aire définie par l'intersection de la chambre et la coupole sera représentée comme une surface virtuelle.

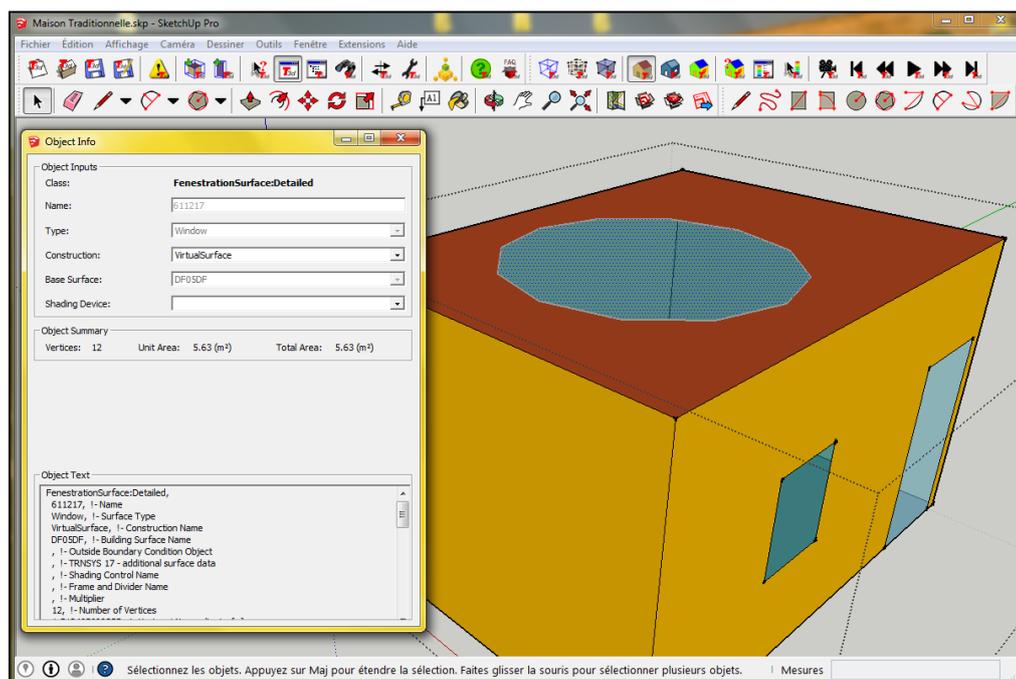


Figure 106 : création d'une surface virtuelle. Source : auteur depuis SketchUp 2015.

Pour la deuxième zone thermique, on peut dessiner une coupole à base polygonale en respectant son diamètre initial. La surface de la coupole est décomposée en sous-surfaces géométriques simples afin de faciliter leur paramétrage ultérieurement.

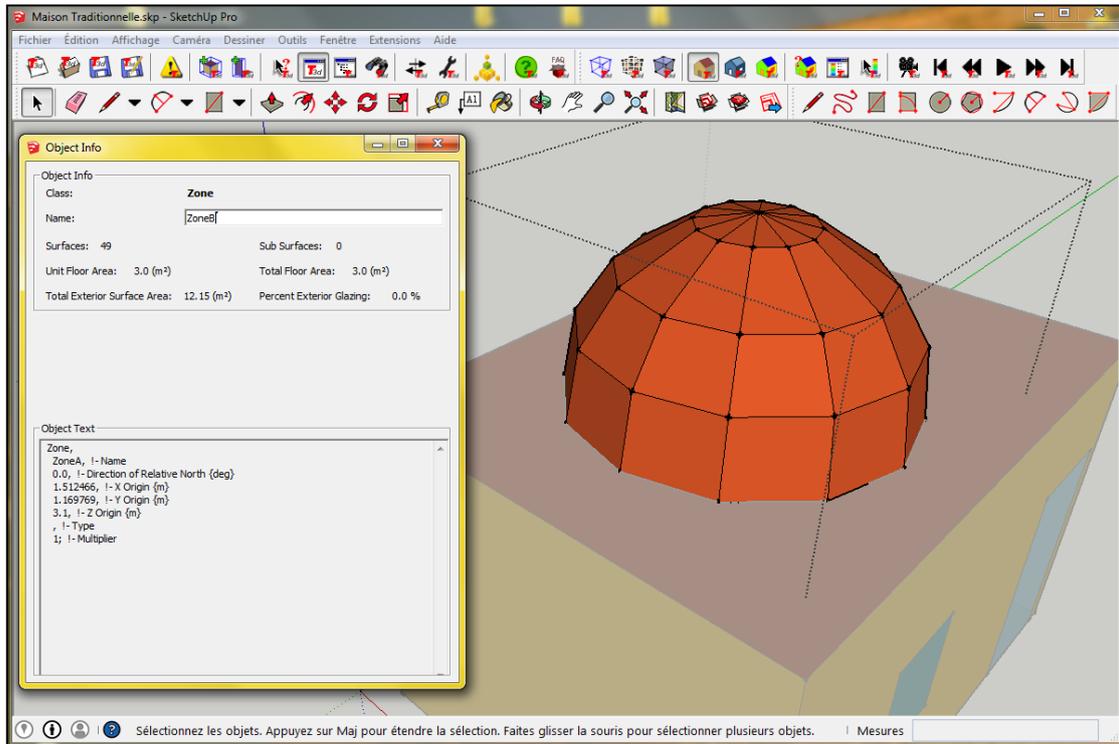


Figure 107 : modélisation de la coupole et la donner une appellation. Source : auteur depuis SketchUp 2015.

On sélectionne les deux zones puis on clique sur la commande « Surface Matching » afin de lier les deux zones. (Encadrer entire...)



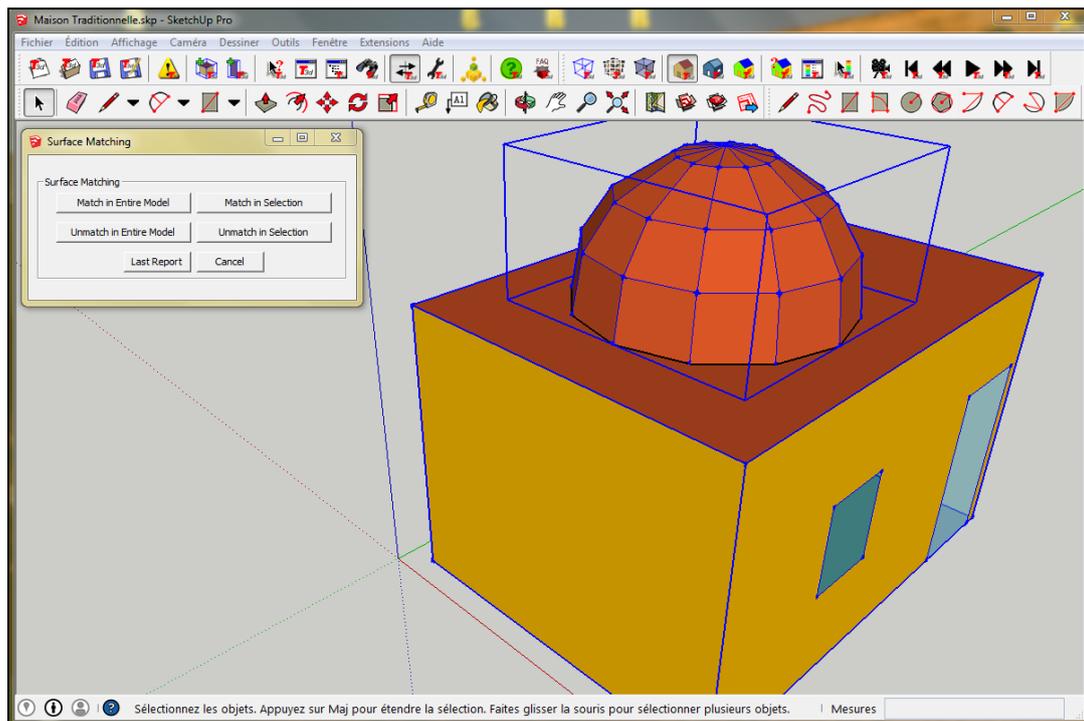


Figure 108 : liaison des deux zones créées. Source : auteur depuis SketchUp 2015.

b-2- Définition des entrées et génération des fichiers de simulation (Inputs)

Après avoir choisis le type du projet, il suffit de cliquer sur parcourir (Browse) et d'introduire le fichier climatique convenable (TM2). L'étape suivante, permet de choisir la commande « Open Idf & Create project » pour importer le fichier .idf préalablement élaboré ; et aboutit au projet final dans l'interface « Trnsys Studio ».

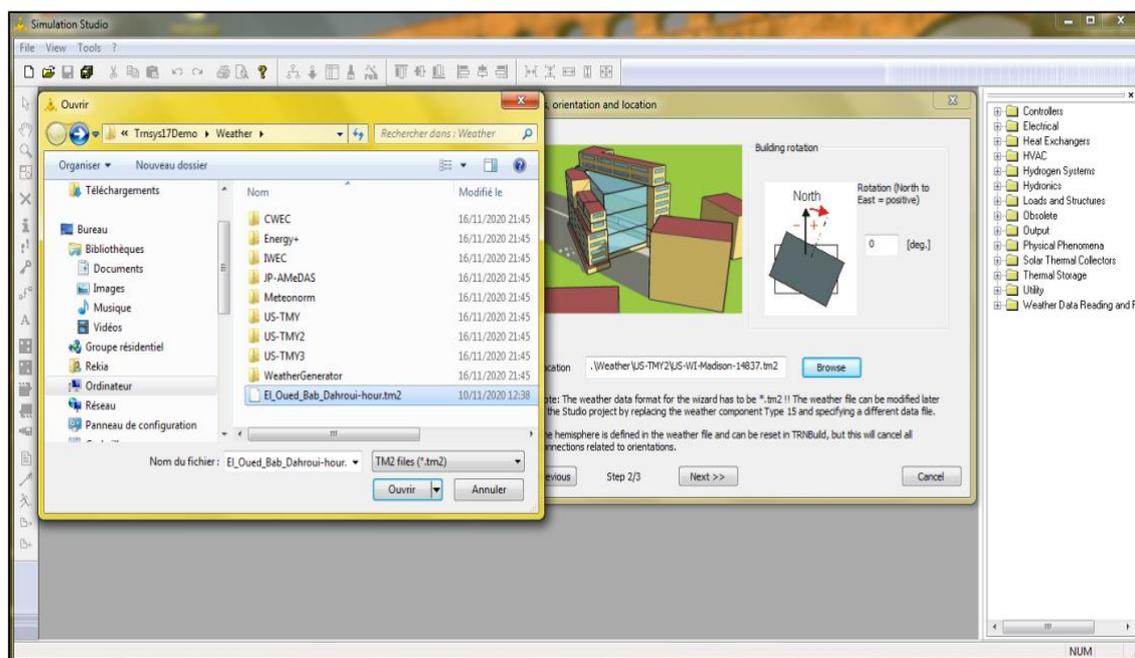


Figure 109 : intégration du fichier climatique. Source : auteur depuis Trnsys17.

b-3- Intégration du model sous « TRNSYS-Build »

1- Composition des parois

A l'aide de la commande « Wall Type Manager »  on définit les couches de chaque paroi séparément, de l'extérieur vers l'intérieur, matériau et épaisseur compris, ainsi que le coefficient convectif d'une paroi selon la réglementation notée dans le DTR C3-2.

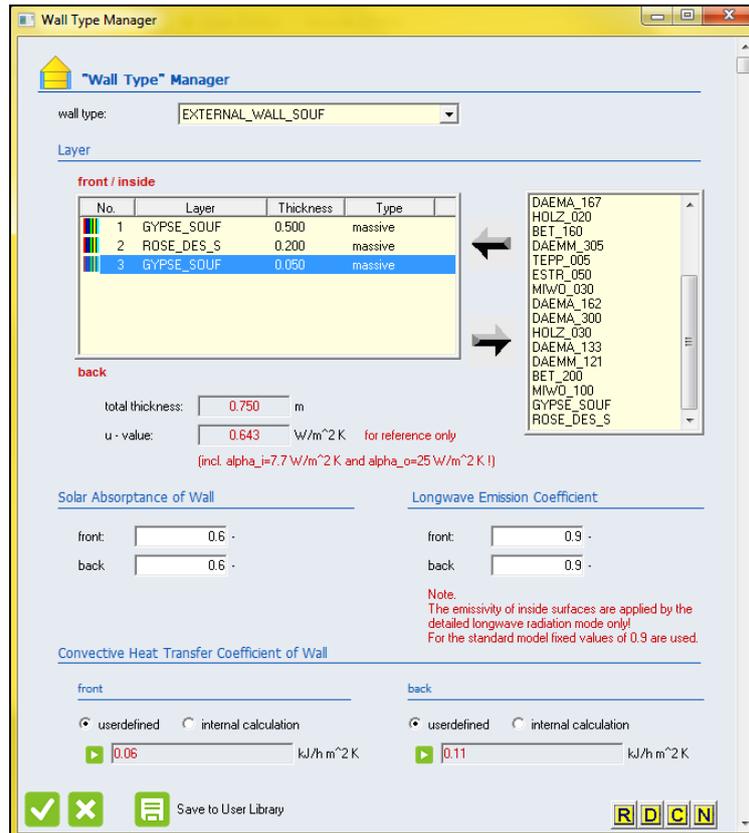


Figure 110 : Définir les différentes couches des parois. Source : auteur depuis Trnsys17.

2- Définition des fenêtres

On définit les types de vitrages des fenêtres et éventuelles caractéristiques existants dans la base de données du logiciel, en un simple clic sur la commande «Window Type Manager». 

Les dimensions des fenêtres sont définies préalablement au stade de la modélisation géométrique sur *Tnsys3d*.

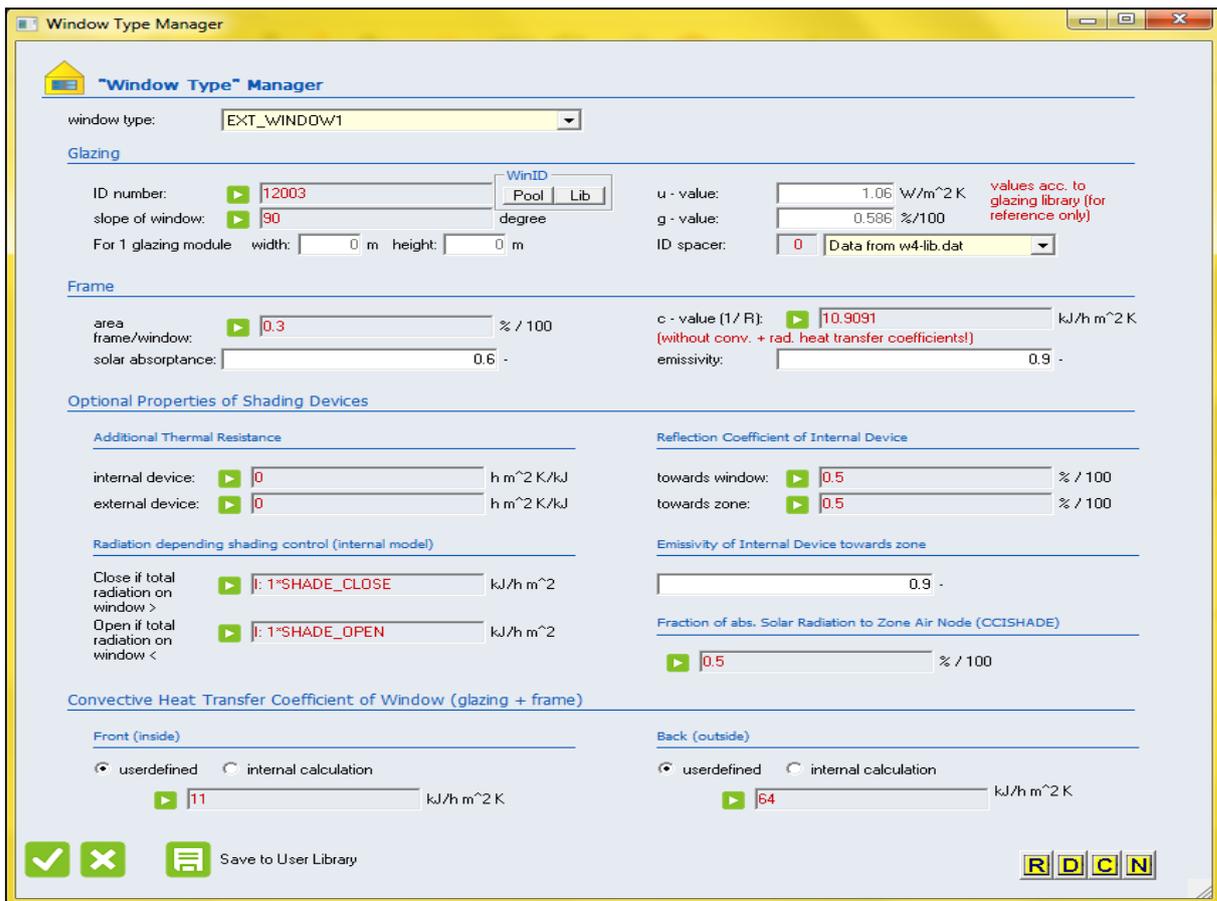


Figure 111 : paramétrage des fenêtres. Source : auteur depuis Trnsys17.

3- Type des infiltrations :

Le taux de renouvellement d'air lié aux infiltrations peut être utilisé en INPUT. Dans le cas d'une maison soufie traditionnelle, les infiltrations sont considérablement importantes.



Figure 112 : définir le taux d'infiltration d'air. Source : auteur depuis Trnsys17.

4- Type de la ventilation :

On doit saisir le taux de renouvellement d'air lié à la ventilation en vol/h. Il est recommandé de rentrer la température de l'air extérieur entrant par cette ventilation : T extérieur ou «outside» pour une ventilation simple-flux.

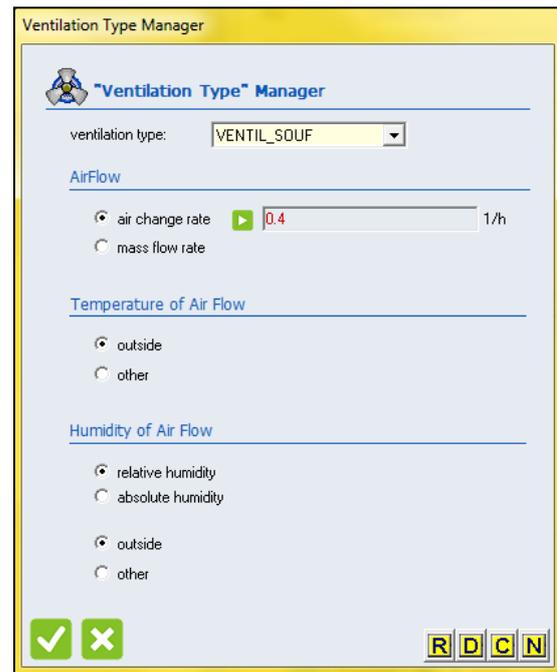


Figure 113 : définir le débit de ventilation.
Source : auteur depuis Trnsys17.

5- Définition des charges internes (gains) :

Il est également nécessaire de paramétrer l'occupation et l'équipement dans la pièce d'habitation. Une chambre parentale est occupée par deux (02) personnes qui sont fréquemment allongées ou assises sur leur lit. Leur métabolisme est défini selon la norme ISO 7730.

Gains [AirNode: ZONEA]

Persons

off ISO 7730 Table Seated at rest degree of activity
 on VDI 2078 Table

scale: geo position:

Computer

off
 on

Artificial Lighting

off related floor area: m²
 on total heat gain control strategy

W/m² incandescent li
 convective part scale

% incandescent lamp geo position:

Other Gains

Type	Scale	Geo Position

Figure 114 : définir les paramètres de l'occupation et de l'équipement dans la chambre. Source : auteur depuis Trnsys17.

6- Définition des 'OUTPUTS' :

Nous devons sélectionner la zone que nous souhaitons simuler. En un simple clic sur  puis sur le signe plus.  

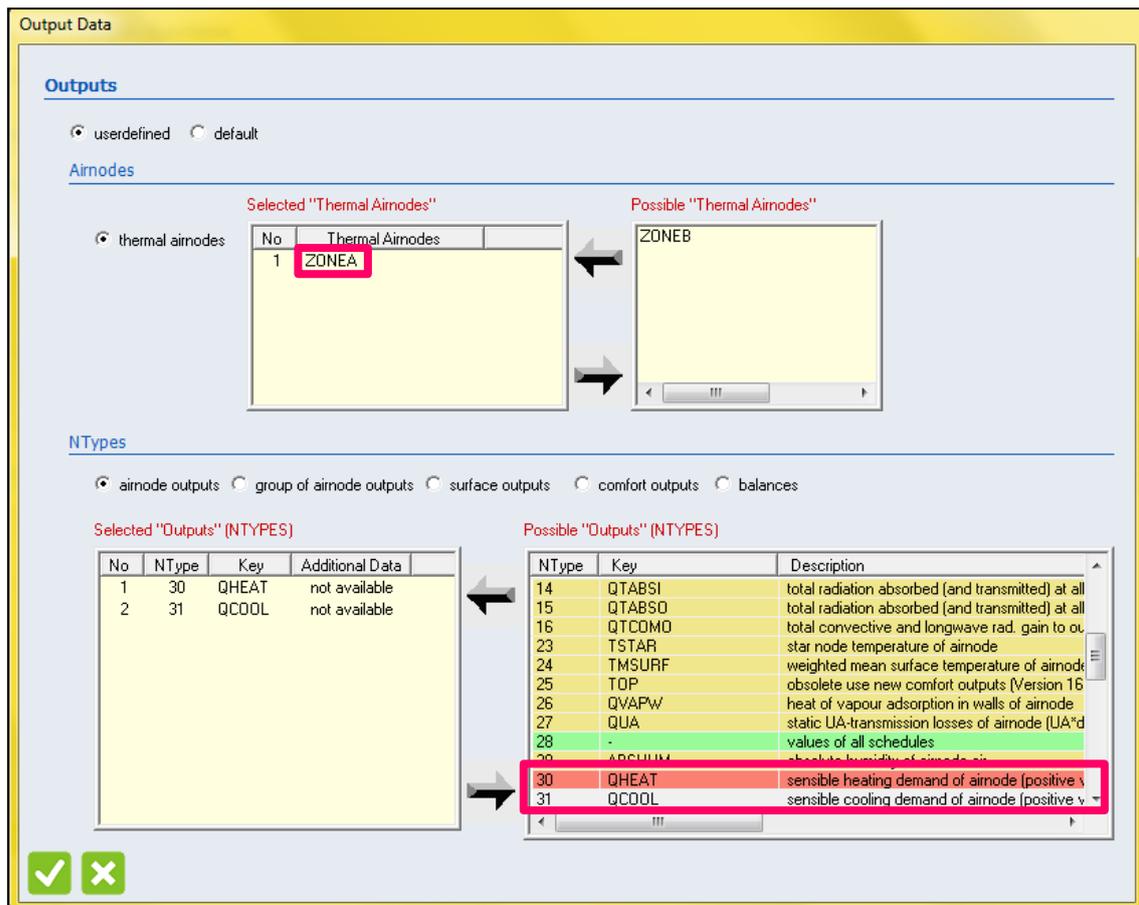


Figure 115 : les outputs de simulation. Source : auteur depuis Trnsys17.

c-Interprétation des résultats :

1- Réglages et paramètres :

Les paramètres à régler avant le lancement de la simulation sur l'interface *Trnsys Simulation Studio* sont les suivants :

- La liaison entre le bâtiment et le système d'impression (System_Printer) nous permet de lier les outputs aux graphes d'impression.
- La liaison entre les données climatiques (Weather_Data) et de système d'impression (System_Printer) va porter les valeurs de la température extérieure à imprimer.
- La précision du temps de la simulation (le début et la fin) à compter par heure : une année est estimée à 8760h.

Une fois le réglage de ces paramètres est achevé, on lance la simulation en un simple clic sur l'icône « Run ». 

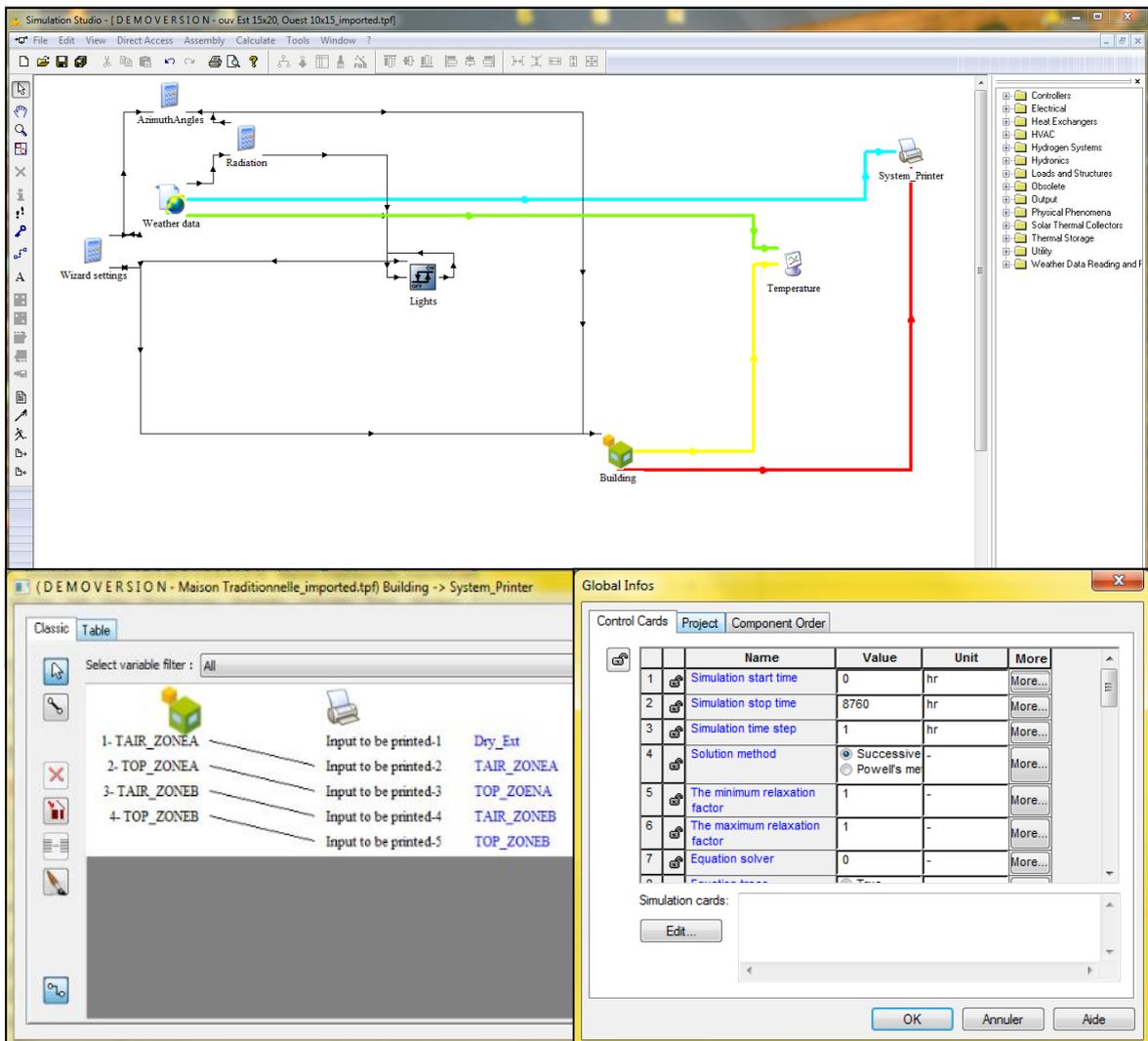


Figure 116 : Liaison du projet aux outputs et aux données climatiques, et définition de la période de simulation dans l'interface Trnsys Simulation Studio (source : auteur depuis Trnsys17).

2- Résultats :

Afin de comparer les températures intérieure et extérieure, on doit lancer la simulation sans consignes de thermostat pour la zone simulée. Si on souhaite calculer les besoins et consommations en chauffage et climatisation, ces derniers doivent être en mode « ON ».

On peut extraire les résultats des variations de la température extérieure, la température intérieure ainsi que les consommations, sur un fichier sous format excel (.xls).