

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد – تلمسان

كلية التكنولوجيا

Université Abou Bakr Belkaïd - Tlemcen

Faculté de Technologie



قسم الهندسة المعمارية

Département d'Architecture

Mémoire

Pour l'obtention du Diplôme de Magister en Architecture

Option

La ville, Patrimoine et Urbanisme

Thème

**Patrimoine architectural, entre technicité, confort et durabilité :
Cas de la maison de L'Oukil du Sanctuaire de Sidi Boumediene.**

Préparé par : Mme BELAID née GHAF FOUR Wafa

Soutenu le 03 Juillet 2014

Devant le jury composé de :

M ^f GHOMARI FOUAD	Professeur	UABB	Tlemcen	Président
M ^f OUISSI MOHAMMED NABIL	Maître de conférences A	UABB	Tlemcen	Encadreur
M ^f DJEDID ABDELKADER	Maître de conférences A	UABB	Tlemcen	Examineur
M ^{me} BENSAFI KHADIDJA	Maître assistante A	UABB	Tlemcen	Invitée
M ^f CHENINE ABDERRAHIM	Maître assistant A	USTO	Oran	Invité

Année Universitaire : 2013/2014

Mémoire

Pour l'obtention du Diplôme de Magister en Architecture

Option

La ville, Patrimoine et Urbanisme

Thème

**Patrimoine architectural, entre technicité, confort et durabilité :
Cas de la maison de L'Oukil du Sanctuaire de Sidi Boumediene.**

Préparé par : Mme BELAID née GHAFfour Wafa

Dédicaces

A mes parents

A mon époux Salim

A mes enfants : « Selma » et « Mohammed Khalil »

A mes frères

A mes beaux-parents

Remerciements

Je tiens particulièrement à faire part de ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, M^r Ouissi Mohammed Nabil, qui a, dès le début de ce travail manifesté son vif intérêt. Ses encouragements, ses conseils avisés et sa disponibilité ont été le moteur qui a motivé la réalisation de mon travail de recherche.

J'exprime également mes vifs remerciements à M^{me} Salem Zinai Souria, pour la valeur de ses pertinentes observations et ses précieuses directives tout au long de ce mémoire et auprès de qui j'ai trouvé, aide sans réserve.

Je tiens à remercier M^r Ghomari Fouad de m'avoir honoré en acceptant de présider ce jury.

Mes remerciements s'adressent aux examinateurs: M^r Djedid Abdelkader et M^{me} Bensafi Khadîdja, en leur exprimant mes profonds respects et en espérant de ma part, que je saurais tirer profit de leurs remarques, conseils et orientations pour la continuation de ce travail.

J'adresse également mes remerciements à M^r Chenine Abderrahim d'avoir bien voulu faire part du jury.

Je tiens aussi à remercier l'équipe de génie-énergétique et en particulier M^r Saim Rachid pour m'avoir initiée et aidée dans l'utilisation du logiciel Fluent.

Je voudrais aussi remercier M^r Ait Ouhamou Malek, architecte du bureau d'études ATTATR pour la documentation qu'il m'a fournit.

Résumé:

De par son emprise géographique particulière et son histoire, Tlemcen jouit d'un patrimoine aussi riche que varié. A cet effet, il serait opportun d'accorder une attention toute particulière à son patrimoine architectural en vue de le sauvegarder et de le mettre en valeur par l'identification des matériaux et techniques constructives. Ce qui permettra de redécouvrir ce savoir-faire constructif, dans le but d'une meilleure intervention dans la restauration du bâti.

La construction en terre est très présente dans l'architecture traditionnelle du nord de l'Algérie. Le manque d'études menées sur ces typologies constructives a conduit à l'oubli de l'existence de ces savoir-faire dans nos villes.

L'objectif est de mettre en relief l'incidence de la typologie constructive selon les matériaux et techniques dans le contexte de leurs réalisations sur le confort thermique comme critère d'évaluation du patrimoine bâti, tandis que s'éveille une curiosité pour les matériaux traditionnels qui ont fait leurs preuves en matière de respect environnemental et de confort de toute nature.

Le confort thermique est considéré comme un élément important de la qualité des ambiances thermiques intérieures. Ce critère ne peut être assuré que par celui de l'inertie thermique des matériaux et de la prise en considération des paramètres de l'architecture bioclimatique, à savoir la ventilation naturelle. Cette technicité a contribué à rendre ce patrimoine viable et durable par le confort résultant d'un espace de vie centré autour du patio.

L'intérêt de notre travail de recherche se focalisera sur le patrimoine architectural de la maison de l'Oukil, fruit du savoir-faire de la période mérinide, trouvant sa consécration dans le sanctuaire de Sidi Boumédiène. Ce patrimoine se caractérise par une typologie constructive massive qui témoigne actuellement d'un effort croissant de revalorisation. Nous proposons à travers cette étude, de lever le voile sur le patrimoine architectural en terre et à postériori, sur le mode constructif de la construction traditionnelle. La typologie constructive de cette maison présentant une structure massive, expose des murs en terre banchée avec parements en briques pleines de terre cuite disposées en alternance avec du mortier de chaux, des soubassements en pierre, des planchers en rondins de bois et des planchers à voûtains en brique pleine et IPE métallique et un enduit à base de chaux. Ces réponses techniques révèlent toute l'intelligence constructive de l'époque.

A l'issue de l'identification des différentes typologies constructives de notre cas d'étude, nous avons entrepris une simulation numérique pour l'évaluation du confort thermique.

Mot clés: confort thermique, matériaux, inertie thermique, patrimoine, techniques constructives.

Abstract:

By its particular geographical influence and history, Tlemcen has a rich and varied heritage. To this end, it would be appropriate to pay particular attention to its architectural heritage with a view to preserve and enhance it by identifying constructive materials and techniques. This will rediscover this knowledge constructive, to a better involvement in the restoration of buildings.

Earth construction is very present in the traditional architecture of northern Algeria. The lack of studies on these constructive typologies led to the forgetfulness of the existence of such knowledge in our cities of Algeria.

The aim is to highlight the impact of constructive typology depending on the materials and techniques in the context of their work on thermal comfort as a benchmark built heritage, while awakens curiosity in traditional materials which have been proven in environmental compliance and comfort of any kind.

Thermal comfort is considered an important element of the quality of indoor thermal environment, this criterion cannot be assured by the criterion of the thermal inertia of materials and consideration of the parameters of bioclimatic architecture, namely natural ventilation. This technicality has helped to make this viable and sustainable heritage comfort resulting from a living space centered around the patio.

The interest of our research will focus on the architectural heritage of the house of Oukil, reflects the expertise of the Merinid period, finding enshrined in the sanctuary of Sidi Boumediene. This heritage is characterized by a massive constructive typology currently reflects a growing effort revaluation. We offer through this study, to lift the veil on the earthen architectural heritage and a posteriori, on the constructive method of traditional construction. Constructive typology of the house with a massive structure, exhibits banchee earth walls with siding solid brick terracotta arranged alternately with lime mortar, stone basements, floors made of logs and floors voutains solid brick and metal IPE and a coating of lime. These technical answers reveal any constructive intelligence at the time.

Following the identification of different constructive typologies of our case study, we conducted a numerical simulation for the evaluation of thermal comfort.

Key words: thermal comfort, materials, thermal inertia, heritage, construction techniques.

ملخص:

بواسطة نفوذها الجغرافية المعينة و تاريخها، تلمسان تزخر بتراث غني و متنوع. لهذه الغاية، سيكون من المناسب أن نولي اهتماما خاصا للتراث المعماري بهدف الحفاظ عليه و تعزيزه من خلال تحديد مواد و تقنيات البناء، مما يساهم في إعادة اكتشاف هذه المعرفة البناء بهدف مشاركة أفضل في ترميم المباني.

إن البناء بالتراب موجود جدا في العمارة التقليدية في شمال الجزائر، لكن عدم وجود دراسات تخص أنماط البناء أدت إلى نسيان وجود هذه المعرفة في مدننا.

الهدف هو تسليط الضوء على تأثير تصنيف البناء اعتمادا على المواد و التقنيات في سياق عملها على الراحة الحرارية التي تعتبر كمقياس للعمران المبني، في حين يوظف الفضول في المواد التقليدية الذي ثبت في الالتزام البيئي و الراحة على كل حال.

كما تعتبر الراحة الحرارية عنصرا هاما لجودة البيئة الحرارية في الأماكن المغلقة، وهذا المعيار لا يمكن أن يتأكد إلا إن أخذنا بمعيار الجمود الحراري للمواد و نظرنا في معالم العمارة المناخية البيولوجية، وهي التهوية الطبيعية. وقد ساعدت هذه التقنية في جعل هذا التراث يشمل راحة سلمية و مستدامة مما ينتج عنه مكان للعيش يتمحور حول الفناء.

فإن الفائدة من أبحاثنا تركز على التراث المعماري لبيت "الوكيل" الذي يعكس خبرة الفترة المرينية، و نجد المنصوص عليها في مجمع سيدي بومدين، ويتميز هذا التراث من خلال هذا البناء الضخم الذي يعكس حاليا جهودا متنامية لتقييمه. نحن نقدم من خلال هذه الدراسة رفع الستار على التراث المعماري الترابي و أيضا على طريقة البناء التقليدي. كما أن تصنيف البناء للمنزل ذو الهيكل الضخم الذي يشمل جذران ترابية طابية مرتبة بالتناوب مع انحياز الطين الصلب و هاون الجير مرتكزة على قاعدة حجرية، السقف متكون من أرضيات من الخشب الأسطواني مغطاة بطبقة سميكة من التراب و وجود سقف ذو روافد مع الألواح المقوسة من الطوب الصلب و طلاء من الجير. هذه الأجوبة التقنية تكشف عن كل الخبرة البناءة في ذلك الوقت. عقب تحديد الأنماط البناءة المختلفة من دراستنا الحالية، أجرينا المحاكاة العددية لتقييم الراحة الحرارية.

الكلمات الرئيسية: الراحة الحرارية، المواد، الجمود الحراري، التراث، تقنيات البناء.

Table des matières

Introduction Générale

1. Introduction.....	1
2. Objet de la Recherche	3
1.1. L'objet d'étude dans la ville de Tlemcen	3
1.2. Motivation du choix de l'objet d'étude	3
3. Problématique	3
4. Objectifs de la recherche.....	6
5. Méthodologie de la recherche	6
6. Structure du travail.....	7

Chapitre I :

Patrimoine architectural en terre.

1. La notion de patrimoine	9
1.1. Evolution de la notion de patrimoine	10
1.2. La protection du patrimoine	11
2. Architecture de terre composante majeure du patrimoine architectural	11
2.1. Intérêts de la construction en terre	13
2.1.1. Les intérêts socio - économiques	14
2.1.2. Les intérêts écologiques et environnementaux	15
2.1.3. Impacts sur la santé et le bien-être	16
2.1.4. Intérêt culturel	16
2.2. Les architectures de terre, l'avenir d'une tradition millénaire	17
2.2.1. Ancienneté des architectures de terre	17
2.2.2. Force et solidité des architectures de terre	18
2.2.3. Diversité des formes des architectures de terre.....	18
2.2.4. Variété des fonctions des architectures de terre.....	19
2.2.5. Usage des architectures de terre par les nantis et les démunis.....	19
2.2.6. Urbanité des architectures de terre.....	19
2.2.7. Ruralité des architectures de terre.....	20
2.2.8. Hauteur des bâtiments en terre.....	20
2.2.9. Confort des architectures de terre	20
3. Techniques des constructions en terre	21
3.1. Propriétés des constructions en terre	22
3.1.1. La résistance mécanique	22
3.1.2. La durabilité	22

3.1.3.	Un agent conservateur	23
3.1.4.	La résistance au feu.....	23
3.2.	Les pathologies.....	23
3.2.1.	Pathologies liées à l'eau	24
3.2.2.	La pathologie structurelle	24
3.2.3.	Les principes de bonne conception architecturale	24
3.3.	Recommandations essentielles pour la restauration des ouvrages anciens en terre.....	25
3.3.1.	L'importance d'un bon diagnostic	25
3.3.2.	La terre ne fait pas bon ménage avec l'eau.....	25
3.3.3.	Faire respirer le bâtiment	25
3.3.4.	La terre crue ne travaille bien qu'en compression	26
3.3.5.	La reprise des fissures	26
3.3.6.	Le sol du rez-de-chaussée	26
3.3.7.	La création de nouveaux planchers.....	26
3.3.8.	Les baies et autres ouvertures	26
3.3.9.	Les enduits en terre	26
4.	Situation de l'architecture de terre	27
4.1.	Sa situation dans le monde	27
4.1.1.	La réglementation	27
4.1.2.	La formation	28
4.2.	L'architecture de terre en Algérie	28
4.2.1.	La réglementation sur la construction en terre.....	29
4.2.2.	La formation en architecture de terre.....	30
A.	La formation professionnelle.....	30
B.	L'enseignement technique	31
C.	La formation sectorielle.....	31
D.	La recherche	31
4.3.	Préservation des architectures de terre	31
4.3.1.	Le projet TERRA	32
4.3.2.	Le programme Africa 2009.....	32
4.3.3.	Le contrat global de développement « Isère, porte des Alpes »	32
5.	Conclusion	33

Chapitre II :

Architecture, confort et durabilité.

Introduction.....	35
1. L’habitat et les paramètres du confort	35
1.1. Le confort thermique.....	35
1.1.1. Définition	35
1.1.2. Bilan thermique et confort	36
1.1.3. Echanges thermiques avec l’ambiance	37
1.1.4. Facteurs de confort.....	38
A. Le métabolisme	38
B. L’habillement	38
C. La température ambiante de l’air T_a	38
D. La température des parois T_p	38
E. L’humidité relative de l’air (HR) (hygrométrie).....	39
F. La vitesse de l’air	39
1.2. Le confort thermique dans l’approche bioclimatique	40
1.2.1. L’approche bioclimatique dans l’architecture	40
A. L’implantation.....	40
B. La densité urbaine.....	41
C. Le zonage climatique.....	41
D. La thermocirculation	41
E. La forme de l’enveloppe (compacité).....	41
F. L’orientation du bâtiment	42
G. Les vents.....	43
H. Exposition des façades	43
I. Les revêtements extérieurs de l’enveloppe.....	43
J. L’utilisation de la végétation et de l’eau	43
K. La ventilation naturelle.....	44
1.2.2. Stratégies bioclimatiques pour améliorer le confort thermique.....	44
A. Le confort d’hiver.....	45
B. Le confort d’été	45
2. Principes de conception en climat méditerranéen.....	45
2.1. Le climat méditerranéen.....	45
2.2. Recommandations architecturales	46
2.2.1. Le choix des matériaux	46
2.2.2. L’implantation	46

2.2.3.	Organisation intérieure	47
2.2.4.	Fonction climatique du patio	47
2.3.	L'architecture vernaculaire	47
2.4.	Dispositifs architecturaux de l'habitat vernaculaire méditerranéen	48
2.4.1.	Les tours à vents « Melkef »	48
2.4.2.	La porosité à l'air des parois	48
2.4.3.	Le moucharabieh.....	49
2.5.	Architecture vernaculaire vers la durabilité	49
3.	Les performances thermiques	49
3.1.	L'isolation thermique	49
3.2.	La conductivité thermique.....	49
3.3.	La capacité thermique	49
3.4.	La résistance thermique.....	49
3.5.	La diffusivité thermique	50
3.6.	L'effusivité thermique (chaleur subjective)	50
3.7.	L'inertie thermique.....	50
4.	Exemples de bâtiments vernaculaires à grande inertie thermique	50
4.1.	Le nouveau Gournas	51
4.1.1.	Une architecture vernaculaire	51
4.1.2.	Le climat, l'architecture et les matériaux.....	51
4.1.3.	L'orientation du soleil et du vent	51
4.1.4.	Le malkaf, ou capteur d'air	51
4.2.	Ghadamès, la perle du désert	53
4.2.1.	Un environnement hostile	54
4.2.2.	Une ville climatisée.....	54
4.2.3.	Se protéger de la chaleur.....	55
4.2.4.	Une enquête sur le confort thermique dans la saison d'été à Ghadamès, Libye	55
A.	Présentation	56
B.	Enquête sur le terrain.....	56
C.	Résultats	56
D.	Conclusions	58
4.3.	Maison Tabayi en Iran :	58
5.	Conclusion	59

Chapitre III :

Technicité des matériaux locaux.

Introduction.....	61
1. Présentation de la technique de construction en pisé « la terre banchée »	61
1.1. Aperçu historique sur la construction en terre banchée dans le monde	61
1.1.1. L'antiquité	61
1.1.2. Le moyen âge	62
1.1.3. L'époque moderne	64
1.2. Le procédé constructif.....	64
1.2.1. Le Soubassement, le plancher et les ouvertures.....	66
1.2.2. La terre	66
1.2.3. Les outils.....	67
A. Les banches	67
B. Les dames (ou pisoirs)	68
1.3. Propriétés du pisé	68
1.3.1. Constituants	68
1.3.2. Structure, texture, états hydriques.....	68
1.3.3. Stabilisation	69
1.3.4. Thermique du pisé	69
1.3.5. Acoustique du pisé.....	70
1.3.6. Eau et hygrométrie	70
1.4. Le renouveau du pisé	70
2. Le pisé en Algérie et en méditerranée.....	75
2.1. Différentes variantes du pisé dans le bassin méditerranéen	75
2.2. Le pisé en Algérie	76
2.2.1. Mise en œuvre.....	77
2.2.2. Ouvrages associés	77
2.2.3. Outils.....	78
2.2.4. Performances Thermiques	78
2.3. Pathologies du pisé.....	78
2.3.1. L'érosion directe	78
2.3.2. Ravine	79
2.3.3. Le sillon destructeur.....	79
2.3.4. Salpêtre	79
2.3.5. Le décollement de l'enduit	79

2.3.6.	Le coup de sabre, le tassement.....	79
2.3.7.	Le flambement et la fissuration.....	80
2.3.8.	Les fissures de poinçonnement ou de cisaillement.....	80
2.4.	Mesures à prendre pour entretenir les murs en pisé.....	81
2.4.1.	Réparer les murs.....	81
A.	Reprise des fissures.....	81
B.	Préparer les cavités et les murs.....	82
C.	Réparer une base érodée.....	82
D.	Reprises importantes aux angles.....	83
3.	Techniques de construction associées et compatibles avec la terre banchée.....	83
3.1.	Mur en pierre brute hourdée.....	83
3.1.1.	Ouvrages associés.....	84
3.1.2.	Traitements de pathologies des murs en pierre brute hourdée.....	84
3.2.	Mur en briques de terre cuite.....	86
3.2.1.	Principe constructif.....	86
3.2.2.	Ouvrages associés.....	87
3.2.3.	Traitements de pathologies des murs en briques de terre cuite.....	87
3.3.	Mur mixte en pierre et briques de terre cuite.....	88
3.4.	Badigeon à la chaux, à la terre, organique et au plâtre.....	88
3.4.1.	Pathologies.....	88
3.4.2.	Entretien.....	89
3.5.	Enduit à la chaux (lissé, taloché).....	89
3.6.	Revêtement de céramique.....	89
3.6.1.	Pathologies et entretien.....	89
3.7.	Plancher en bois avec support de sol empilé, pierre ou terre cuite.....	89
3.8.	Plancher en bois avec support de sol végétal, roseaux, branchages :.....	90
3.9.	Couverture en mortier de chaux.....	91
3.9.1.	Pathologie et entretien.....	91
4.	L'importance du diagnostic.....	93
4.1.	Le pré-diagnostic.....	93
4.2.	Les études pluridisciplinaires.....	93
4.3.	Le diagnostic final.....	94
5.	Conclusion.....	94

Chapitre IV :

Cas d'étude : Typologie constructive et simulation numérique sur la maison de L'Oukil.

Introduction.....	97
1. Présentation de la ville de Tlemcen	97
1.1. Le site, localisation et orientation	97
1.2. Le climat de Tlemcen.....	98
1.3. L'eau et le paysage comme critères d'implantation.....	100
1.4. Bref historique sur l'occupation de Tlemcen	101
1.5. Stratégie urbaine adoptée par les Mérinides à Tlemcen.....	102
2. Présentation du sanctuaire de Sidi Boumédiène	103
2.1. Présentation du quartier d'El-Eubbâd	103
2.2. Le personnage de Sidi Boumédiène	105
2.3. Contexte historique du sanctuaire	106
2.4. Etude spatiale et formelle.....	107
2.5. Espaces bâtis du sanctuaire	108
2.5.1. La mosquée	108
2.5.2. La médersa	110
2.5.3. Le mausolée	112
2.5.4. Le hammam	113
2.5.5. La salle d'ablutions et les latrines.....	113
3. Présentation du cas d'étude : La maison de L'Oukil du sanctuaire de Sidi Boumediène	114
3.1. Aperçu historique	114
3.2. Situation	114
3.3. Présentation architecturale	115
3.3.1. Organisation et typologie de la maison.....	115
A. Le Rez-de-chaussée	115
B. L'étage :.....	117
C. La terrasse.....	117
3.3.2. Composantes spatiales de la maison	118
A. L'entrée (Squifa)	118
B. Le patio (Wast ed-dar).....	119
C. La galerie	120
D. Les chambres	121
E. Les escaliers.....	121
F. Les espaces de service	122

3.4.	Dispositions constructives.....	122
3.4.1.	Matériaux de construction	122
A.	Le pisé	122
B.	La pierre.....	123
C.	La brique pleine en terre cuite	124
D.	La chaux aérienne.....	124
E.	Le bois	124
F.	Le marbre blanc.....	125
G.	El Quiraté.....	125
3.4.2.	Composantes structurelles et typologies constructives :.....	125
A.	Les fondations	126
B.	Les murs porteurs	126
C.	L'ossature	126
D.	Les planchers.....	127
E.	La couverture et les revêtements	128
F.	Les franchissements.....	129
G.	L'escalier	130
3.5.	Dispositifs architecturaux.....	130
3.5.1.	Boiserie	130
3.5.2.	Cheminée	131
3.5.3.	Evacuation des eaux pluviales	131
3.6.	Interventions effectuées sur la maison de L'Oukil	131
3.6.1.	Période coloniale.....	131
3.6.2.	Période de post indépendance (1996-1999).....	132
A.	Le diagnostic technique sur la maison de l'Oukil	132
B.	La restauration de la maison de l'Oukil	133
3.6.3.	Période de la préparation de la manifestation de Tlemcen Capitale islamique, 2011 :	
	138	
4.	Simulation informatique du confort thermique par le logiciel Fluent	138
4.1.	Introduction	138
4.2.	Choix de l'outil logiciel	138
4.3.	Description du logiciel	139
4.4.	Diagramme psychrométrique	140
4.5.	La ventilation naturelle	142
4.6.	Simulation numérique du confort thermique	142
4.6.1.	Création de la géométrie sous le Logiciel GAMBIT	142

4.6.2.	Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles	144
4.6.3.	Définition des conditions aux limites dans GAMBIT	145
4.6.4.	Définition du problème sous le logiciel FLUENT.....	145
4.6.5.	Calcul avec FLUENT	149
4.7.	Résultats de la simulation.....	150
4.7.1.	Modélisation du cas d'étude	150
4.7.2.	Confort thermique, graphe des températures :.....	150
4.7.3.	Simulation du confort thermique	151
4.7.4.	Résultats de la simulation	151
A.	Contours de vitesse de l'air	152
B.	Contours des températures intérieures.....	153
4.7.6.	Comparaison et interprétation des résultats	160
5.	Conclusion	164

Conclusion générale

1.	Synthèse globale	166
2.	Limites du travail	168
3.	Perspectives de recherche	169

Liste des figures

Figure 1 : Repères chronologiques de la construction en terre.....	1
Figure 2 : Mosquée de Djenné (Mali).....	12
Figure 3: Maison à Beurières (France)	12
Figure 4: Zone de répartition des architectures de terre et bien inscrit sur la liste du Patrimoine mondial de l'UNESCO.....	13
Figure 5: Maison à Cherchel en pisé	13
Figure 6: Le cycle écologique vertueux des architectures de terre : de la terre à la terre.....	13
Figure 7: Intérêt du matériau terre	14
Figure 8: Comparaison des couts énergétiques de la brique de terre et du parpaing en béton	15
Figure 9: Utilisation du matériau terre au bassin méditerranéen	17
Figure 10:	
A- tombeaux de la nécropole de Bagawat édifiés il y a 1500 ans	17
B-Vestiges d'un stûpa édifié au VI ^e ou au VII ^e siècle à Yâr, dans la région du Tourfan, en chine	17
Figure 11:	
A- Village fortifié de Bololahn en afghanistan.....	18
B- Enceinte fortifiée de la ville de Marrakech.....	18
Figure 12:	
A- Mausolée du prophète Hud, au Yemen du sud	18
B- Maisons rurales à dades au Yemen.....	18
C- Maison notable au Yemen du nord	18
Figure 13:	
A- Fours à glace en Iran.....	19
B- Château d'eau à Ain-Salah, Algérie.....	19
C- Porte d'accès à la ville de Timimoun, Algérie.....	19
Figure 14:	
A- Ville de Marrakech	19
B- Le centre de Tabriz, Iran.....	19
Figure 15: Village de la région des Aurès, Algérie	20
Figure 16: Maison urbaine, ville de Shibām, Yémen	20
Figure 17:	
A- Salon de la demeure d'un notable, Yémen	21
B- Intérieur d'une maison notable, Liban	21
Figure 18: La roue des techniques	22
Figure 19: Pthologies dûes à l'eau et au vent	23

Figure 20: Le schéma de bonne conception architecturale d'un bâtiment en terre	25
Figure 21: Facteurs de sensation thermique	37
Figure 22: Echanges thermiques entre l'homme et son environnement.....	37
Figure 23: Polygone du confort	39
Figure 24: Relations entre les paramètres de confort et les modes d'échanges de chaleur	39
Figure 25: Paramètres de l'implantation.....	40
Figure 26: Densité urbaine. Medina de Tlemcen.....	41
Figure 27: Principes du zonage.....	41
Figure 28: Variation de la compacité.....	42
Figure 29: Variation des apports énergétiques en fonction de la hauteur du rayonnement solaire.....	42
Figure 30: Repères de la position du soleil.....	42
Figure 31: Le vent et la topographie	43
Figure 32: Techniques utilisées à l'exposition universelle de Séville en 1992 (Espagne).....	44
Figure 33: Ventilation par tirage d'air	44
Figure 34: Concepts de la stratégie du chaud	45
Figure 35: Concepts de la stratégie du froid	45
Figure 36: La fonction climatique du patio	47
Figure 37: Principe des tours à vent	37
Figure 38: Dispositifs de refroidissement de l'air par vaporisation d'eau.....	38
Figure 39: Le vieux Gourna.....	51
Figure 40: Coupe du système d'aération de l'école des filles	51
Figure 41: Plan du Gourna el-Gedida, 1946.....	52
Figure 42: la mosquée du nouveau Gourna	52
Figure 43: Le khan, plan, façade nord	52
Figure 44: Façade du théâtre.....	53
Figure 45: L'école des garçons, plan et façade.....	53
Figure 46: Plan, cour de l'école des filles.....	53
Figure 47: Vues sur Ghadamès	54
Figure 48: Vue aérienne sur Ghadamès.....	54
Figure 49: Coupes sur un fragment de maisons à Ghadamès	55
Figure 50: Ruelles de Ghadamès	55
Figure 51:	
A- Vieux type de bâtiments à Ghadamès.....	56
B- Nouveau type de bâtiments à Ghadamès, 1997	56

Figure 52: Comparaison de la sensation de confort thermique globale pour les anciens bâtiments et les nouveaux bâtiments	57
Figure 53: Plan de la maison. Tabayi en Iran	58
Figure 54: Ventilation naturelle de la maison Tabayi en Iran	58
Figure 55: Cycle de production du pisé	65
Figure 56: Outillage du pisé	65
Figure 57: La banche	67
Figure 58 : La banche kabyle.....	68
Figure 59: Pisoirs traditionnels	68
Figure 60: Hôpital régional d'Adrar au Sahara, Algérie, réalisé en 1942	70
Figure 61: Plan et coupe d'une maison du village de Mostapha Ben Brahim.....	71
Figure 62: Groupe expérimental d'habitations rurales, édifiées en 1972 à Zéralda, Algérie	71
Figure 63: Nouveau village agricole de Maadher, près de M'sila en Algérie construit en parpaings de terre stabilisée en 1980 par deux architectes, les frères El Miniawy.....	72
Figure 64: Logements en pisé au domaine de la terre	73
Figure 65: Mur en pisé du vestibule de l'hôpital régional de Feldkirch.....	73
Figure 66: Ecole des arts, université autonome Benito Juarez	74
Figure 67: La Luz, vue aérienne et façades	74
Figure 68: Présence de cordons de mortier de chaux entre lit+ Soubassement..... en pierre(France).....	75
Figure 69: Les lignes de banchages sont souvent marquées par les lits de chaux	76
ou de pierre intercalés (Portugal).....	76
Figure 70: Emprise Géographique du pisé en Algérie.....	76
Figure 71: Variantes du pisé en Algérie	77
Figure 72: Mur en pisé alterné de pierre, Algérie.....	77
Figure 73: Traitement d'angle	77
Figure 74: Outils de coffrage du pisé en Algérie.....	78
Figure 75: Erosion en bas de mur en pisé.....	79
Figure 76: Tassement dans un mur en pisé.....	80
Figure 77: Pathologies du pisé.....	80
Figure 78: Principe de drain pour mur ancien	81
Figure 79: Témoin en plâtre sur une fissure	82
Figure 80: Exemple de reprise de fissure	82
Figure 81: Principe de réparation d'une cavité	82
Figure 82: Réparation de l'érosion basale du château de Paderne	83
Figure 83: Principe constructif d'un mur en pierre brute hourdée	83

Figure 84:	
A- Nettoyages des joints	85
B- Humidification a l'eau	85
C- Consolidation par coulis de chaux	85
Figure 85:	
A- Nettoyage des trous par soufflage d'air comprimé en suite par humidification	85
B- Machine de pompe d'injection	85
C- Injection du coulis de chaux	85
Figure 86: Coupe de la Technique simple en appareil assisé	86
Figure 87: Principe constructif d'un mur en pierre brute hourdée	88
Figure 88: Coupe sur le plancher	89
Figure 89: Principe constructif du plancher en bois avec support de sol végétal, roseaux, branchages	90
Figure 90: Diagramme des températures mensuelles moyennes et d'humidité relative de Tlemcen	99
Figure 91: Diagramme des précipitations de Tlemcen	99
Figure 92: Vents dominants annuels	100
Figure 93: Localisation des édifices mérinides	102
Figure 94: Vue du complexe de sidi Boumediène vers 1875	104
Figure 95: Situation du complexe de Sidi Boumediene	105
Figure 96: Plan d'ensemble du sanctuaire de Sidi Abou- Mediane	106
Figure 97: Implantation des édifices du sanctuaire de Sidi Boumediene	108
Figure 98: La mosquée de sidi Boumédiène vers 1875	108
Figure 99: Porche d'entrée de la mosquée de sidi Boumédiène	109
Figure 100: Vue en plan et coupe de la mosquée	110
Figure 101: Accès de la medersa de sidi Boumédiène	110
Figure 102: Vue en plan et l'étage de la medersa	111
Figure 103: Accès du mausolée de sidi Boumédiène	112
Figure 104: Vue en plan du mausolée	112
Figure 105: Vue en plan du hammam	113
Figure 106: Vue en plan de la salle d'ablution et latrines	113
Figure 107: Plan de masse de la maison de L'Oukil	114
Figure 108: Ouverture des chambres sur patio	116
Figure 109: Plan du rez-de-chaussée	116
Figure 110: Ouverture de la chambre sur la galerie de l'étage	117
Figure 111: Plan de l'étage	117
Figure 112: Terrasses de la maison	118

Figure 113: Plan de terrasse.....	118
Figure 114: Vue de l'extérieur et de l'intérieur de l'entrée	119
Figure 115: Coupe sur la maison	120
Figure 116: Tirants en rondins de bois ancrés ans le mur	120
Figure 117: Intérieur d'une chambre; banquettes et niches	121
Figure 118: Coupe à l'intérieur d'une chambre.....	121
Figure 119: Escalier	122
Figure 120: Cuisine et latrines	122
Figure 121: Mur en terre banchée.....	123
Figure 122: Mur pisé à parements composés d'assises de briques.....	123
Figure 123: Mur en pierre.....	123
Figure 124: Arcade à la brique	124
Figure 125: Composition structurelle et appareillages de la maison de L'Oukil	124
Figure 126: Maçonnerie massive.....	126
Figure 127: Arc brisé outrepassé	126
Figure 128:	
A-Plancher avec rondins de bois	127
B- Différents constituants du plancher avec rondins de bois.....	127
Figure 129:	
A-Plancher à voûtains en brique pleine et IPE	128
B- Différents constituants du plancher à voûtains en brique pleine et IPE	128
Figure 130: Situation des planchers au niveau du plan	128
Figure 131:	
A- Revêtement en terre cuite	129
B- Revêtement en Zelidj.....	129
Figure 132: La voûte en berceau et enduit à chaux	129
Figure 133: Linteau en bois	129
Figure 134: Porte de la chambre en bois	130
Figure 135: Cheminée au niveau de la terrasse	131
Figure 136: Evacuation des eaux pluviales.....	131
Figure 137: Vue de la maison avant les travaux de restauration	132
Figure 138: Démolition d'une extension au niveau de la terrasse	133
Figure 139: Décapage des enduits	133
Figure 140: Reprise des enduits.....	134
Figure 141: Coulage de la chape de terre et de la chape de béton.....	135

Figure 142: Consolidation des planchers.....	135
Figure 143: Injection de coulis de chaux	136
Figure 144: Diagramme psychrométrique de la ville de Tlemcen.....	141
Figure 145: Ventilation à travers le patio	142
Figure 146: Modélisation de la géométrie, vue en plan.....	143
Figure 147: Modélisation de la géométrie, vue en perspective	143
Figure 148: Etapes de maillage.....	144
Figure 149: Finalisation du maillage	145
Figure 150: Export de la géométrie vers Fluent	146
Figure 151: Définition du modèle de turbulence	147
Figure 152: Définition des matériaux	147
Figure 153: conditions aux limites	149
Figure 154: contrôle de solutions	149
Figure 155: Modélisation du cas d'étude.....	150
Figure 156: Choix de surfaces étudiés.....	150
Figure 157: Contours de vitesse de l'air au plan A	152
Figure 158: Contours de vitesse de l'air au plan B.....	152
Figure 159: Typologie constructive avec plancher en rondin de bois	153
Figure 160: Contours de température intérieure au plan A	153
Figure 161: Variation de température intérieure au plan A.....	154
Figure 162: Contours de température intérieure au plan B.....	154
Figure 163: Variation de température intérieure au plan B	155
Figure 164: Typologie constructive avec plancher en voutains en brique+IPE.....	155
Figure 165: Contours de température intérieure au plan A	156
Figure 166: Variation de température intérieure au plan A.....	156
Figure 167: Contours de température intérieure au plan B.....	157
Figure 168: Variation de température intérieure au plan B	157
Figure 169: Typologie constructive avec plancher collaborant en voutains de brique+IPE et une chape en béton.....	158
Figure 170: Contours de température intérieure au plan A	158
Figure 171: Variation de température intérieure au plan A.....	159
Figure 172: Contours de température intérieure au plan B.....	159
Figure 173: Variation de température intérieure au plan B	160

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les opérations de construction en terre en Algérie	29
Tableau 2: Échantillon des résultats de mesure des bâtiments anciens et nouveaux dans Ghadamès, 1997	57
Tableau 3 : Récapitulation sur la technique de construction traditionnelle « terre banchée » et ses ouvrages associés en Algérie	92
Tableau 4 : Les principes d'intervention dans un ancien bâti	94
Tableau 5: Tableau comparatif entre les normes de techniques de restauration et les techniques utilisées dans la restauration de la maison de L'Oukil	137
Tableau 6: Les différentes formes de maillage des faces	140
Tableau 7 : Caractéristiques des matériaux utilisés.....	148
Tableau 8: Tableau récapitulatif de comparaison et d'interprétation des résultats de la simulation	163

Introduction Générale

1. Introduction

La prise en charge des monuments historiques, est aujourd'hui une pratique normalisée.

Les recommandations visant la protection du patrimoine bâti n'ont cessé de se multiplier, en intégrant à chaque fois les nouveaux problèmes liés aux pratiques de la restauration et de la conservation.

Aujourd'hui, plusieurs opérations de restauration de monuments historiques sont lancées à travers tout le territoire national, avec une véritable stratégie de conservation et de mise en valeur du patrimoine qui est engagée par l'état algérien depuis quelques années, particulièrement depuis la promulgation de la loi 98-04 visant l'élargissement de la notion de patrimoine aux biens culturels matériels et immatériels, et définissant les règles de sa protection et de mise en valeur.

Le plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur des secteurs sauvegardés dicte "les règles générales et les servitudes d'utilisation des sols et fixe également les conditions architecturales selon lesquelles est assurée la conservation des immeubles et du cadre urbain"¹.

Parmi ces missions, figure l'identification des matériaux et techniques constructives relevant du savoir-faire traditionnel local. La connaissance des techniques constructives traditionnelles et des matériaux locaux utilisés, est une étape indispensable à la réussite d'un projet de restauration. Les comportements mécaniques et physico-chimiques des différents matériaux doivent être compatibles, afin d'assurer l'homogénéité structurelle et l'intégrité physique du bâti et éviter des dégâts qui pourraient s'avérer irréversibles en préservant l'authenticité matérielle et constructive. La lecture de l'évolution historique d'un monument, ou d'un tissu urbain ne saurait s'effectuer sans la connaissance des matériaux et techniques qui garantissent l'identification de différentes phases constructives. La mise en œuvre des matériaux et les outils de travail laissent des empreintes qu'on ne peut lire sans une connaissance préalable des techniques constructives².

Les maçonneries de pierre et de briques de terre cuite présentant différentes configurations accusées dans plusieurs villes traditionnelles du nord du pays, l'autre façon de construire les murs dans certaines de nos villes est la technique du pisé, faisant appel à la terre comme matériau principal. De prime abord, ce procédé constructif est plutôt réservé aux ouvrages défensifs des époques médiévales et précoloniales. La forte épaisseur des murs des remparts, forts et batteries trouve une réponse technique et économique dans l'utilisation de la terre, les vestiges des remparts de Mansourah, de

¹ Décret exécutif n° 03-324 du 9 Chaâbane 1424 correspondant au 5 octobre 2003 portant modalités d'établissement du plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur des secteurs sauvegardés.

² MILETO Camilla, «L'analyse stratigraphique de l'architecture et son application à l'architecture traditionnelle », in Méthode REHABIMED, II. Réhabilitation bâtiments, ed Col·legi d'Arquitectes de Barcelona, 2007.

Ténès et de Honaine présentent de beaux témoignages en la matière. Et quelques-uns des centres historiques algériens, révèlent une autre réalité, des pans de murs et des maisons effondrées laissent apparaître la substance matérielle en terre.

Un constat s'impose; à priori la technique du pisé a été utilisée dans la construction traditionnelle en Algérie, que ce soit dans l'architecture défensive et publique ou dans l'architecture domestique.

Les pays du pourtour méditerranéen sont particulièrement attachés à la recherche sur le procédé constructif du pisé, ceci trouve une explication dans l'importance du patrimoine bâti en pisé dans cette région. Des pays comme l'Espagne, le Portugal, la France et le Maroc, ont fourni une large documentation sur le pisé traditionnel.

Parmi les caractéristiques qui font la richesse de ce patrimoine, citons sa diversité, à la mesure de la diversité des techniques constructives et des climats. En effet, pour produire un cadre de vie qui répond à ses aspirations, l'homme a toujours cherché un compromis entre la disponibilité des matériaux locaux et son environnement afin d'assurer son bien-être et son confort.

L'achèvement du confort ne peut se faire sans son adéquation avec le mode de vie des habitants. L'architecture traditionnelle a toujours impliqué l'utilisation de ressources naturelles pour servir les besoins de l'homme qui, à son tour, s'est adapté au lieu et au climat dans la construction de son cadre de vie. En climat méditerranéen, l'adaptation du tissu à patio avec des techniques traditionnelles permet de concilier l'adaptation climatique et l'adaptation socioculturelle. De même, nous identifierons, l'apport du site, du climat, des matériaux et techniques constructives ancestrales, où se définira la percée méthodologique aux études d'architecture vernaculaire.

Dans ce contexte, notre architecture traditionnelle est connue par la diversité des techniques qui l'ont érigée. Nous nous intéressons au patrimoine architectural de la période mérinide, dont un des témoignages les plus emblématiques est le sanctuaire de Sidi Boumédiène à Tlemcen construit au 14^e siècle (1331- 1351) et est classé patrimoine national. Parmi les secrets de la durabilité de ce patrimoine, ses qualités inhérentes telles que, la technicité des matériaux qui le constituent (pisé, pierre, brique cuite et bois), et d'autres qualités que l'on reconnaît à ce patrimoine comme, sa capacité à s'adapter et à répondre aux exigences du confort notamment le confort thermique.

Pour vérifier la validité de nos hypothèses, nous avons pris comme cas d'étude, la maison de L'Oukil, une maison du patrimoine, une des composantes du sanctuaire de Sidi Boumédiène, que nous avons modélisé afin de vérifier, par le biais d'une simulation par le logiciel Ansys Fluent, comment elle répondait au confort thermique.

Notre mémoire a l'ambition d'aborder ce patrimoine par une double problématique, celle de la compatibilité des matériaux avant et après la restauration d'une part, et du confort thermique intérieur d'autre part.

Le présent travail se veut une modeste contribution dans le domaine de la recherche lié à l'art de bâtir traditionnel et l'identification des techniques de sa mise en œuvre ainsi que les compromis nécessaires à son adaptation.

2. Objet de la Recherche

1.1. L'objet d'étude dans la ville de Tlemcen

L'objet de notre étude concerne la ville de Tlemcen, constitué par le sanctuaire de Sidi Boumédiène et plus particulièrement la maison de l'Oukil, dont le bâti présente de nombreux échantillons de techniques constructives traditionnelles (le pisé : terre banchée en alternance de pierres et de briques cuites avec lits de mortier de chaux, bois...).

Depuis des temps mémoriaux, la maison était à l'origine une zâwiya pour les pèlerins, elle fut totalement reconstruite par le "Bey El Kabîr" de Mascara, vers la fin du 18^e siècle, elle devient la résidence du Moqadam de Sidi Boumédiène, ensuite quelques remaniements pendant l'occupation française ont eu lieu. Donc une lecture historique du monument permet d'identifier les différentes phases de constructions et de comprendre la complexité du bâti.

Les considérations citées précédemment nous ont conduit à une réflexion qui a dicté notre choix quand à l'objet de notre étude.

1.2. Motivation du choix de l'objet d'étude

- L'existence de différents appareillages dans les murs, l'utilisation de la terre banchée en alternance de la pierre ou de la brique cuite, ou bien la pierre seulement ou la brique uniquement.
- La durabilité et la pérennité de la maison qui nous interpelle.
- La connaissance du secret de la durabilité de ce patrimoine par ses qualités inhérentes, sa capacité à s'adapter et à répondre aux exigences de confort.

3. Problématique

Les villes traditionnelles algériennes ont connu la construction en terre, et particulièrement le pisé qui intègre des formes différentes. Des parements en briques de terre cuite, de pierres, ou de mortier de chaux, interviennent dans la configuration de ces murs pour répondre à des problèmes

spécifiques, liés soit à l'aspect économique, soit à la résistance des structures en terre, dénotant en tout cas la maîtrise de la technique. Ces constructions doivent être préservées et transmises aux générations futures, mais cela ne saurait se réaliser sans la connaissance de ce procédé constructif qui guidera le choix des projets de restauration.

La durabilité des architectures de terre est en effet parfaitement incontestable car ces architectures ont traversé les siècles pour nous parvenir. Cela signifie que la vulnérabilité à l'eau des architectures de terre est un mythe construit sur la réalité de la perte des savoir-faire constructifs traditionnels et surtout de la culture d'entretien. En réalité, la terre, en tant que matériau de construction, présente une très bonne capacité de résistance à l'eau à la seule condition d'être mise en œuvre dans les règles de l'art.

A chaque époque, cette architecture a fourni à l'humanité des solutions pour répondre aux contraintes spécifiques de son temps, elle propose des pistes face aux défis énergétiques et climatiques³. En effet, c'est un matériau naturel, recyclable, écologique ne nécessitant que peu de transformations, donc économique et respectueux de la santé de l'homme. Autant d'atouts pour que cette architecture regagne dans les esprits la place qu'elle occupe dans la réalité.

A partir des années 1980, un regain d'intérêt mondial pour la construction en terre, impulsé à partir de l'Afrique par l'architecte égyptien Hassan Fethi, se manifeste sur tous les continents, avec un retour aux traditions du passé et des savoir faire vernaculaires.

*« Ces architectures sont aujourd'hui, plus que nul autres, ancrées dans la vision contemporaine du progrès, et que c'est pour cette raison qu'après avoir longtemps été considérées comme des architectures pauvres, elles ont aujourd'hui la faveur des riches. »*⁴

En fait, la terre remplace avantageusement le béton dans la définition des parois d'enveloppe en vue de disposer d'une inertie thermique suffisante pour assurer des amortissements et des accumulations des flux de chaleur, grâce à sa conductivité thermique assez faible et à sa capacité calorifique assez élevée. On peut même dire que pour jouer ce rôle de « volant thermique », la terre est le matériau idéal pour stocker une chaleur sensible. C'est pourquoi les architectes « bioclimatiques » pensent de plus en plus souvent à ce matériau lors de l'élaboration de leurs projets⁵ et cela pour réguler les ambiances intérieures, et assurer ainsi le confort pour les occupants.

³ FONTAINE Laetitia, ANGER Romain, Bâtir en terre du grain de sable à l'architecture, Ed Belin, p 10, 2009.

⁴ TERKI Yasmine « terres d'Afrique et d'ailleurs ». Dans l'exposition dédiée aux architectures de terre dans le monde auteur et commissaire de l'exposition, Ministère de la culture, 2eme festival culturel panafricain d'Alger, p3, 2009.

⁵ BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan, archi terre, p 56, Ed Parenthèses, 1978.

Dans le contexte actuel, les architectes font retour au passé et aux savoir-faire traditionnels par l'utilisation du pisé qui se présente comme une alternative pour une construction plus respectueuse de l'homme et son environnement, elle propose des pistes face aux défis énergétiques et climatiques.

Le pisé, qu'il ait été mis en œuvre dans le passé ou qu'il soit contemporain, constitue une réponse extrêmement pertinente à ces préoccupations. En effet, c'est un « véritable matériau écologique » : inépuisable et recyclable, économe en énergie, à forte inertie thermique, aux propriétés acoustiques élevées, aux capacités d'assainissement de l'air, et aux grandes qualités esthétiques, s'intégrant bien au site et présentant des formes variées.

Le confort thermique ne peut être obtenu que si la conception architecturale a pris en charge l'intégration des matériaux de construction de hautes performances thermiques capables de répondre aux critères de conductivité et d'inertie thermique.

En nous inscrivant dans cette optique de préservation du patrimoine architectural ancien et d'une technique de construction traditionnelle mise en adéquation avec la durabilité de ce patrimoine, nous aspirons à établir un confort intérieur à savoir le confort thermique.

D'où nos questions de départ

- Pour une préservation des architectures en terre, quelles seraient les mesures à prendre pour garantir l'authenticité d'un monument qui nécessite une intervention ?
- De quelle manière interviennent les différentes typologies constructives qui constituent le patrimoine architectural de la maison de l'Oukil selon le contexte de leurs réalisations vers la recherche du confort dans sa dimension physiologique à savoir thermique ?

Hypothèse

- La préservation des constructions traditionnelles de la maison de L'Oukil du sanctuaire de Sidi Boumédienne s'est faite dans le respect du matériau qui la constitue et a permis de conserver l'authenticité de ce patrimoine. Les interventions successives effectuées dans la maison, présentant des typologies constructives à forte inertie, et de haute performance thermique ont contribué au confort.

4. Objectifs de la recherche

Ce travail a pour objectif d'étudier les différentes techniques de constructions traditionnelles que comporte notre cas d'étude, de voir les différentes pathologies de chaque matériau, comment y remédier, et de vérifier la valeur du confort thermique dans chaque cas de typologie constructive selon les interventions successives qui ont touché la maison.

L'impact de l'inertie thermique des matériaux et de la ventilation naturelle, qui joue le rôle de régulateur thermique en s'adaptant aux exigences de climat sur le confort thermique, sera aussi étudié, ajouté à l'effet de la typologie constructive.

5. Méthodologie de la recherche

Afin de mener à bien cette initiation à la recherche une certaine démarche méthodologique est plus que nécessaire en vue d'une bonne gestion du temps et une meilleure maîtrise du sujet.

Globalement, le travail est divisé en deux (02) phases, à savoir, une phase de recherche théorique suivie par une deuxième phase d'analyse et d'investigation sur terrain.

A. Phase de recherche théorique

Cette phase consiste en la constitution d'une base documentaire relative aux sujets traités.

L'essentiel de cette première étape de la recherche sera consacré à la lecture d'un corpus de documents portant sur les thèmes du confort thermique et système constructif du pisé ainsi qu'au pisé de Tlemcen.

Ouvrages, mémoires, articles, etc., doivent être exploités d'une façon judicieuse pour maîtriser les deux concepts.

Le recours à l'historique des thèmes abordés, nous permettra la mise en place d'un soubassement théorique permettant la compréhension des différents intérêts de la construction en terre et l'élaboration d'un système d'évaluation, afin de tirer les meilleurs enseignements pour mieux agir aujourd'hui.

B. Phase de diagnostic

Pour cette deuxième phase, il nous faut le maximum de données concernant notre cas d'étude s'agissant de la maison de L'Oukil.

Pour nous permettre de récolter les informations nécessaires au bon déroulement de notre recherche, un travail de terrain s'impose. A cet effet, nous ferons appel à deux techniques d'investigations et d'enquêtes : l'observation et la simulation.

- *L'observation* constituant le relevé métrique, photographique et l'observation des constituants pour constituer le document graphique.
- Un travail de modélisation de notre cas d'étude suivi d'opérations de simulation portant sur les aspects du confort thermique suivi d'une interprétation de résultats.

6. Structure du travail

Notre recherche se scinde en cinq chapitres successifs, prélués d'une **introduction générale**.

Le premier chapitre met la lumière sur le patrimoine architectural en terre, montre son intérêt et ses atouts, présente quelques opérations de revalorisation de l'architecture de terre en dictant quelques recommandations sur sa restauration.

Le deuxième chapitre met en exergue l'architecture durable, en étayant les principes de l'approche bioclimatique, détermine les paramètres du confort, en particulier la notion du confort thermique dans l'architecture vernaculaire du bassin méditerranéen avec des illustrations et des exemples.

Le troisième chapitre identifie les différentes variantes de matériaux et de techniques locales associées à la terre banchée, en les illustrant à travers leurs mises en œuvre, leurs propriétés, leurs pathologies et les mesures à prendre pour les conserver et les restaurer.

Le quatrième chapitre portera sur notre cas d'étude à savoir la maison de l'Oukil du sanctuaire de Sidi Boumédiène à travers ses composantes structurelles et typologies constructives, suivie d'une simulation numérique pour l'évaluation du confort thermique.

Le mémoire aboutira enfin à une **conclusion générale** permettant de vérifier notre hypothèse de départ. On proposera par la suite d'éventuelles perspectives de recherche.

Chapitre I :

Patrimoine architectural en terre.

Introduction

L'attention portée au patrimoine est fondamentale. On peut affirmer qu'aujourd'hui le patrimoine architectural en terre parvenu jusqu'à nous est important. Autant d'atouts qui lui donnent une originalité s'exprimant à travers l'emploi des matériaux et techniques de construction, l'adoption des formes, l'application du savoir faire humain et le rôle de chaque bâti considéré comme vecteur d'une culture constructive.

La construction en terre recèle de nombreuses caractéristiques, grâce aux qualités inhérentes du matériau. Les constructions sont en effet, résistantes au feu, elles régulent la température et l'humidité à l'intérieur des espaces et sont aussi durables que celles réalisées en béton! Mais évidemment, il est nécessaire de respecter les règles essentielles de l'art de bâtir en terre crue, de garantir les œuvres, car dans le cas contraire les constructions deviennent l'objet de pathologies et peuvent présenter un état du bâti (fissurations, humidité) qui menace à terme d'effondrement les constructions. Ces désordres pathologiques des constructions sont souvent les éléments les plus perceptibles par la population et fournissent les meilleurs arguments aux détracteurs des projets en terre crue.

Ce chapitre met la lumière sur le patrimoine architectural en terre, montre son intérêt, ses atouts. Il fait le point sur l'état de l'art en matière de l'architecture de terre en montrant comment remédier à ses pathologies ainsi que des recommandations sur sa restauration, et présente quelques opérations de revalorisation de l'architecture de terre crue dans le monde pour une prise de conscience de son importance. Afin d'évaluer la situation de l'architecture de terre, il met la lumière sur la réglementation et la formation.

1. La notion de patrimoine

Le patrimoine au sens où on l'entend aujourd'hui dans le langage officiel et dans l'usage commun est une notion toute récente qui couvre tout ce qui est hérité et transmis par les ancêtres : patrimoine culturel, naturel, archéologique, religieux...

Du dictionnaire le Littré, le patrimoine représente le « bien d'héritage qui descend suivant les lois des pères et des mères aux enfants ». Cependant, d'après N. Oulebsir, citant A.Chastel, au-delà du fait qu'il s'agisse de biens à transmettre, cette notion qui à l'origine, « *puise ses racines dans le concept chrétien de l'héritage sacré de la foi et se matérialise par le culte d'objets privilégiés : les écritures sacrées, les reliques, les icônes* »¹, associe au fondement du patrimoine le caractère de vénération.

¹ OULEBSIR Nadir, Les usages du patrimoine, monuments, musées et politique coloniale en Algérie (1830-1930), Ed. Maison des sciences de l'homme, 2004, p.13.

F. Choay, quant à elle, définit le patrimoine comme «*l'expression qui désigne un fond destiné à la jouissance d'une communauté élargie aux dimensions planétaires et constitué par l'accumulation continue d'une diversité d'objets qui rassemble leur commune appartenance au passé: œuvres et chefs-d'œuvre des beaux-arts et des arts appliqués, travaux et produits de tous les savoir-faire des humains.* »².

Actuellement, si on se réfère à la définition de Patrice Beghain³, chaque objet ayant une empreinte temporelle et faisant référence à une époque historique ou culturelle d'un endroit, possède une dimension patrimoniale, et est le témoin d'une étape dans l'évolution du territoire et donc de l'homme. Il est le vecteur de l'identité entre les générations qui ont vécu sur un même territoire, le seul lien qui perdure, mais qui évolue à travers le temps.

1.1. Evolution de la notion de patrimoine

Le patrimoine est un concept qui a connu une évolution, passant des monuments à différents types de biens patrimoniaux relevant non seulement du domaine de l'archéologie mais touchant différents édifices urbain ou rural, industriel ou religieux, public ou privé..., allant aujourd'hui aux ensembles bâtis, et embrassant toutes les périodes historiques, y compris la période contemporaine.

L'idée de patrimoine était intimement liée à la Grèce antique, où ce terme désignait la terre qui satisfaisait les besoins de base d'une famille. Cette terre était transmise de père en fils et d'une génération à une autre, sans être ni vendue, ni échangée⁴. Avec le droit romain, elle fut renforcée comme l'indique l'origine latine de terme «*patrimonium*», qui vient de «*pater monère*»: ce qui appartient au père de famille.

Par l'avènement de l'âge des lumières, cette période a marqué le début d'un immense recensement, fondé sur le relevé et la représentation des monuments bâtis⁵. La notion de patrimoine fut institutionnalisée avec la révolution française après la destruction et le vandalisme de plusieurs monuments et sanctuaires en liaison avec l'ancien régime. Ces biens du passé sont entrés dans la sphère publique.

Avec le temps, la notion de patrimoine s'est étendue à d'autres domaines tels que le patrimoine non bâti, culturel, et le patrimoine immatériel.

En 1978, la direction des monuments historiques devient la direction du patrimoine et la notion «*monument historique*» a cédé la place à son générique «*patrimoine*».

² CHOAY Françoise, L'allégorie du patrimoine, Éd du Seuil, Paris, 1992, 275 p.

³ BEGHAIN Patrice, Le patrimoine : culture et lien social, Collection Presses de Science Politique, Bibliothèque de la Conservation du Patrimoine de la Savoie, Chambéry, p115.

⁴ DOUMIT LM, la valorisation du patrimoine endokarstique libanais, Thèse de Doctorat de Géographie Option «*Aménagement Touristique et Culturel*», 2007.

⁵ CHOAY Françoise. *Op. cit.*, 275 p.

1.2. La protection du patrimoine

Les états membres de l'UNESCO ont adopté une convention du patrimoine mondial en 1972, qui reconnaît l'obligation d'assurer l'identification, la protection, la conservation, la mise en valeur et la transmission aux générations futures du patrimoine culturel et naturel.

*" Parmi les multiples opérations destinées à mettre le monument historique en valeur et à le transformer éventuellement en produit économique, j'évoquerai, simples jalons concrets de mon propos, quelques unes de celles qui ont l'incidence la plus directe sur les édifices et sur leur approche par le public. De la restauration à la réutilisation, en passant par la mise en scène et l'animation, la mise en valeur du patrimoine historique présente des formes multiples, aux contours imprécis, qui souvent se confondent ou s'associent."*⁶

A partir de cette citation, on déduit que la **conservation et la restauration** sont les fondements de toute mise en valeur et de protection du patrimoine.

2. Architecture de terre composante majeure du patrimoine architectural

Ce patrimoine architectural recouvre l'ensemble des édifices " maçonnés en terre crue, qui témoigne d'un savoir faire technique et artistique du vernaculaire traditionnel encore vivace et debout relatant le passé glorieux. C'est une richesse au niveau du social, de l'environnement et du symbolisme.

La terre n'est pas sûrement le premier matériau utilisé par l'homme, il avait recours aux éléments déjà présents dans la nature, tels que la pierre, par exemple. Les trouvailles archéologiques témoignent de l'importance du matériau terre dans toutes les civilisations, la terre fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et servait la quotidienneté autant que le prestige des plus glorieuses civilisations de l'antiquité⁷.

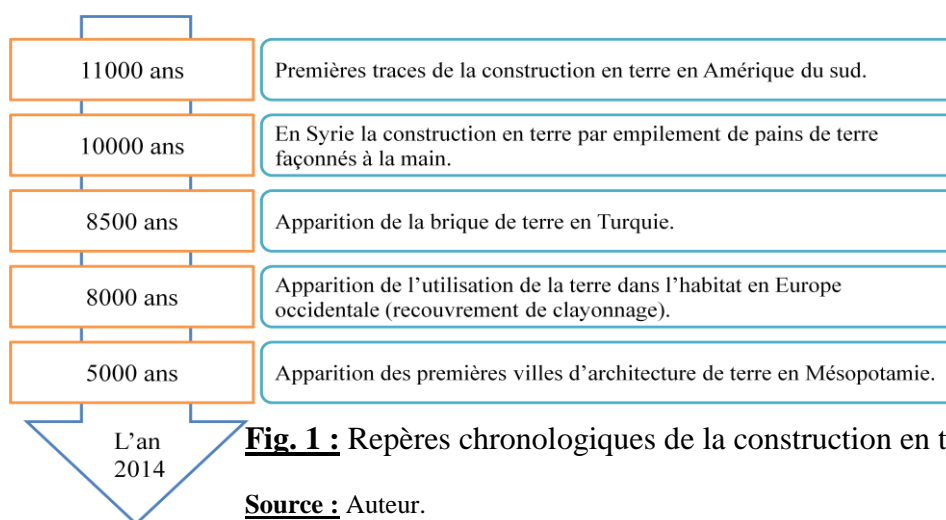


Fig. 1 : Repères chronologiques de la construction en terre.

Source : Auteur.

⁶ Ibid, p.158.

⁷ HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert, Traité de construction en terre, Ed Parenthèses, Marseille, 1989, pp 16-17.

Dans les vallées fertiles de la Mésopotamie, de l’Egypte, de l’Inde et de la chine, les terres alluvionnaires et la paille ont permis la mise au point des technologies multiformes, pour se diffuser en Afrique, les premières utilisations remontent à 8000 ans⁸, on peut citer par exemple la pyramide de Saqqarah, par la suite, son utilisation s’étend sur tout le continent, produisant une diversité et une richesse architecturale exceptionnelle, citons l’exemple de la mosquée de Djenné qui le plus grand édifice construit en adobe.

On trouve en Europe : en France, au Portugal, en Espagne, quelques constructions en terre qui témoignent de l’universalité de la technique.



Fig. 2 : Mosquée de Djenné (Mali).

Source : CRATerre, Ville anciennes de Djenné, 2010, ed CRATerre, p01.



Fig. 3: Maison à Beurières (France).

Source : MORISET Sébastien, MISSE Arnaud, rénover et construire en pisé, Parc naturel régional L Forez, 2010, p14, disponible sur : <http://pise-livradois-forez.org>.

Les crises énergétiques ont fait resurgir l’intérêt porté au matériau terre, pour ses qualités thermiques. D’après les statistiques de United High Commision for Refugees (UNHCR), près de 30% de la population mondiale habite actuellement dans de l’habitat en terre. Il est également important de remarquer que près de 17% des bâtiments inscrits au patrimoine mondial de l’humanité sont en terre⁹, ce qui montre la longévité qu’offre ce matériau de construction.

⁸ JLOK Mustapha, Habitat et patrimoine au Maroc Présaharien, mémoire de fin d’étude Professionnelles approfondies, 1999-2001, Egypte, p08.

⁹ PIGNAL Bruno, Terre crue : Techniques de construction et de restauration, Ed. Eyrolles, 2005, p10.

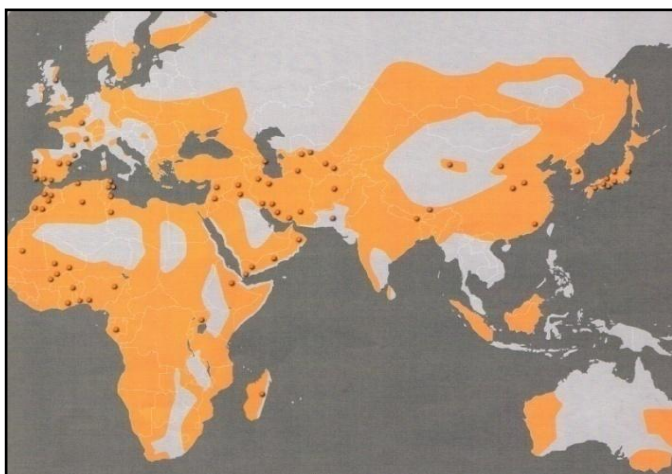


Fig. 4: Zones de répartition des architectures de terre inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO.

Source : FONTAINE Laetitia, ANGER Romain, *Bâtir en terre*, Ed Belin, 2009, p13.

En Algérie, un vaste patrimoine en terre se situe sur tout le territoire, à savoir le sud algérien par ses ksours ainsi qu'un héritage architectural au nord algérien dans les villes de Cherchel, la kasbah d'Alger, en Kabylie et à Tlemcen où on trouve des constructions en terre uniquement, ou à appareillage mixte : pisé, brique et pierre.



Fig. 5: Maison à Cherchel en pisé.

Source : MEDA corpus, A8 –Mur en terre banchée (Pisé) Algérie, *Architecture traditionnelle méditerranéenne*, p07, disponible sur : <http://www.meda-corpus.net>.

2.1. Intérêts de la construction en terre

La construction en terre a prouvé sa durabilité et sa bonne intégration dans le paysage. De son extraction et sa mise en œuvre, ce matériau ne subit aucune transformation polluante. En cas de destruction, il peut être réutilisé pour ériger d'autres murs. Il est recyclable à l'infini¹⁰.

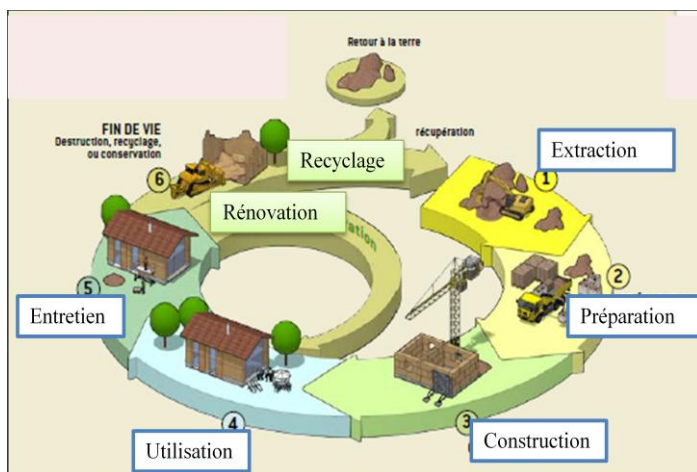


Fig. 6: Le cycle écologique vertueux des architectures de terre : de la terre à la terre.

Source : MORISET Sébastien, MISSE Arnaud. *Op. cit.*, p01.

¹⁰ MORISET Sébastien, MISSE Arnaud. *Op. cit.*, p01.

Les raisons pour l'intérêt actuel de la terre crue sont multiples.

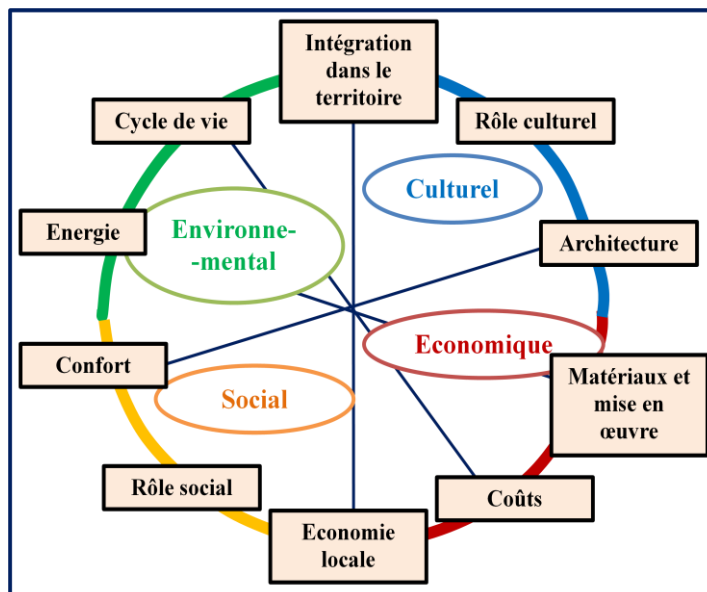


Fig. 07: Intérêt du matériau terre.

Source : MORISET Sébastien, MISSE Arnaud.

Op. cit., p01, traité par l'auteur.

2.1.1. Les intérêts socio - économiques

L'avantage économique constitue probablement l'aspect le plus démonstratif des intérêts que représente la revalorisation de l'architecture de terre. Les faibles coûts des réalisations en terre peuvent agir comme un levier social pour améliorer considérablement les conditions de vie des gens.

Plusieurs exemples dans le monde illustrent l'action effective de la revalorisation de l'architecture de terre sur la vie sociale et économique d'une société. Elle permet d'offrir une variété de logements allant du social collectif à l'habitat de haut standing¹¹, et même des équipements publics.

Au Maroc, la réalisation de logements sociaux « Tan Tan » montre que l'utilisation de la terre dans la construction avec un savoir-faire local appuyé d'une technologie adaptée peut faire baisser sensiblement le prix des logements qui peut atteindre 50% du prix de réalisation avec des matériaux conventionnels¹² (béton, brique cuite, aggloméré de ciment...).

Dans notre pays, les études menées récemment au Centre National d'Etudes et de Recherches intégrées au Bâtiment (CNERIB), montrent que l'utilisation de briques en terre crue comme remplissage d'une ossature en béton armé peut réduire de 32% le coût global des habitations, comparées à l'utilisation des matériaux conventionnels¹³.

¹¹ DUBOST Olga, Environnement et ville durable, les matériaux, Ed Weka, Octobre 2011, p2.

¹² CRATerre, Marrakech 87 Habitat en terre, Ed. CRATerre, Grenoble, 1987, p 222.

¹³ CNERIB, Conception de logements économiques à base de produits localement disponibles, Ed CNERIB, 2000, p31.

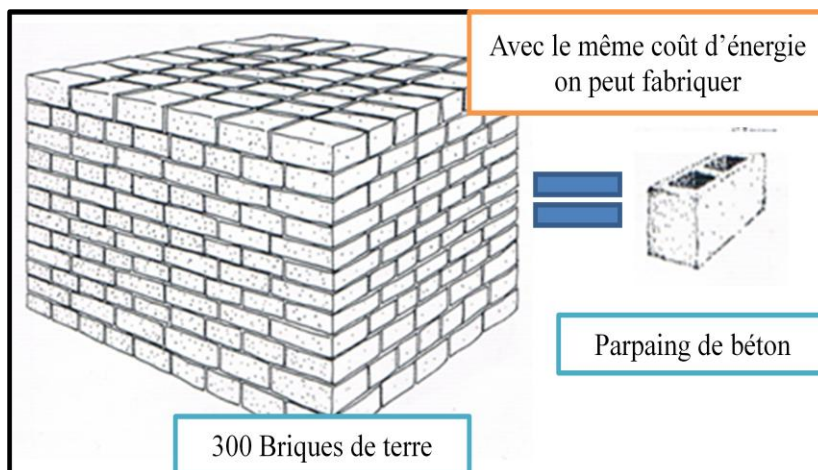


Fig. 8: Comparaison des coûts énergétiques de la brique de terre et du parpaing en béton.

Source : BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan, *Archi de soleil*, Ed Parenthèses, 1978, p43.

Elle offre un grand marché pour l'emploi qui assimile une main d'œuvre locale¹⁴. La terre en tant que matériau localement produit favorise un développement économique local et peut être un bon moyen de stabilisation des populations rurales tentées par la migration vers les grandes villes à cause de la pauvreté¹⁵.

2.1.2. Les intérêts écologiques et environnementaux

Dans le monde, le souci environnemental constitue un nouveau défi à l'architecture qui doit désormais s'insérer dans le concept de développement durable en pensant aux solutions moins nuisibles à l'environnement et qui ne compromettent pas l'avenir des générations futures. L'architecture de terre se propose comme l'une des solutions les plus prometteuses du fait qu'elle ne génère pas d'émission de carbone lors de sa production. De plus, le matériau est biodégradable, recyclable¹⁶, elle ne génère pas ou très peu de déchets de chantier.

Elle exige peu d'énergie fossile pour sa préparation, sa mise en forme et sa mise en œuvre, ce qui est un avantage certain par rapport au béton armé et à la brique cuite. Enfin, les possibilités d'associations complémentaires avec d'autres matériaux eux aussi naturels et peu gourmands en énergie constituent un atout supplémentaire pour la terre : fibres végétales, bois, pierre, galet, etc.¹⁷

Les pays industrialisés sont de plus en plus sollicités pour diminuer les émissions de gaz carboniques donc la revalorisation de l'architecture de terre représente l'une des alternatives proposées par les chercheurs pour réduire ces taux¹⁸.

La qualité d'isolation de la terre utilisée dans la construction permet d'économiser de l'énergie. En effet, les expériences menées en Allemagne montrent que le procédé de la terre couvrante connu tout

¹⁴ HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert. *Op.cit.*, p 191

¹⁵ Ministère de l'habitat (Maroc), Actes du séminaire sur la construction en matériaux locaux, avril 1986, p 269

¹⁶ LITTLE Becky, MORTON Tom, *Building with earth in Scotland*, Ed. CRU, Edinburgh, 2001, p 11

¹⁷ DUBOST Olga. *Op. cit.*, p2

¹⁸ LITTLE Becky, MORTON Tom. *Op. cit.*, p9.

autant sous les climats chauds que les climats froids, permet d'atteindre des gains en énergie allant de 50% à 90% pour une couche d'argile expansée couverte de 40 cm de terre gazonnée comparé à l'isolation classique de toitures¹⁹.

2.1.3. Impacts sur la santé et le bien-être

La terre est un matériau sain, non toxique, qui ne dégage pas de substances nocives et notamment pas de COV (composés organiques volatils). Mais, l'intérêt principal de la terre est sa forte capacité de régulation naturelle de l'humidité et de la température²⁰. Rappelons que le pouvoir isolant et l'inertie thermique dépendent de la masse volumique. Une paroi lourde (pisé, BTC, adobe, bauge, avec des densités allant jusqu'à 1,7 ou 2,3 environ) accumulera la chaleur du soleil et la restituera lentement quelques heures plus tard par rayonnement, en fonction de l'épaisseur du mur, ce qui réduit les mouvements d'air et de poussières²¹. De plus, avec des murs de l'ordre de 30 à 50 cm d'épaisseur, le confort d'été devient appréciable, surtout en période de canicule, sans recours à la climatisation²².

Citons un autre avantage, les murs en terre régulent l'hygrométrie de l'air intérieur à la condition bien sûr de proscrire tout épiderme étanche (enduit ciment, peinture plastique, faïence, résine). Par exemple, une brique de terre crue peut retenir jusqu'à 3 % environ de son poids en vapeur d'eau²³.

2.1.4. Intérêt culturel

L'architecture de terre est très ancienne. Elle peut remonter jusqu'à la période mésolithique qui marque le début de la sédentarisation de l'homme (10000-5000 ans avant l'ère Chrétienne)²⁴.

Aujourd'hui 17% des sites partiellement ou totalement bâtis en terre crue composent la liste de l'héritage mondial de l'UNESCO²⁵ : Tel est le cas de la ville de «Shibam » au Yémen qui compte 500 tours d'habitations en terre pouvant atteindre la vingtaine d'étages et qui comporte une tradition millénaire vivante de construction en terre. Le site de Mati en Syrie qui date de plus de 4000 ans, les pueblos du sud-ouest des Etats-Unis et plusieurs autres sites patrimoniaux majeurs de l'humanité répartis à travers tous les continents²⁶.

L'intérêt pour ce patrimoine est apparu en 1972 avec les conférences internationales sur la conservation de l'architecture de terre, qui ont débuté en Iran, La dernière et huitième conférence a été tenue à Torquay, en Angleterre, en Mai 2000. Le développement de ce champ de recherche se fait à petits pas pour former les bases d'une nouvelle discipline. Les cours de formation pour les

¹⁹ HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert. *Op.cit.*, p166

²⁰ Ibid.

²¹ DUBOST Olga. *Op. cit.*, p2

²² Ibid.

²³ LITTLE Becky, MORTON Tom. *Op. cit.*, p 9

²⁴ HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert. *Op.cit.*, *Op.cit.*, p 18

²⁵ <http://www.getty.edu/conservation/resources/>

²⁶ Ibid.

professionnels de la conservation « The Pan-American Courses on the Conservation and Management of Earthen Architectural and Archaeological Héritage "PAT" » tenus depuis 1989 jusqu'en 1999 ont permis de former des compétences et d'ouvrir de nouveaux horizons de recherche sur la conservation de ce patrimoine qui inspire son utilisation dans le futur.

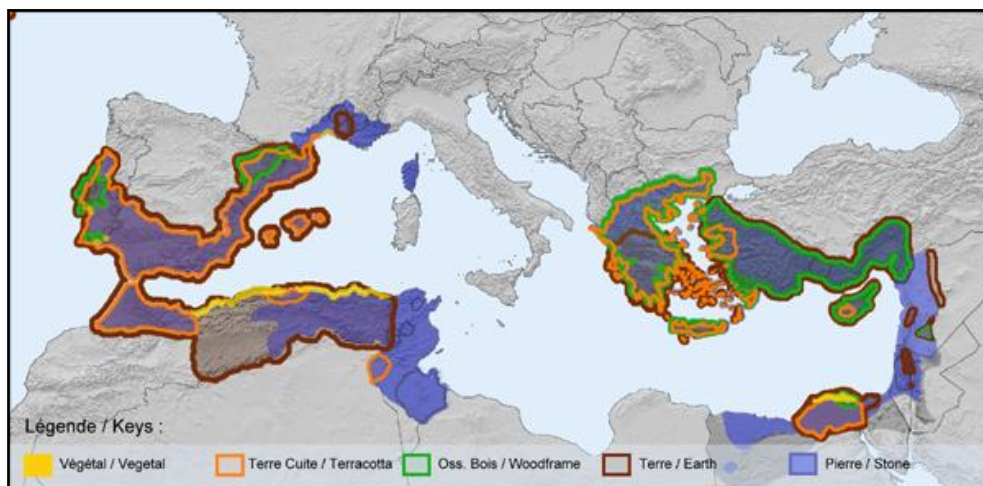


Fig. 9: Utilisation du matériau terre dans le bassin méditerranéen.

Source : MEDA corpus, Architecture traditionnelle méditerranéenne, cartes, disponible sur : <http://www.meda-corpus.net>.

2.2. Les architectures de terre, l'avenir d'une tradition millénaire

2.2.1. Ancienneté des architectures de terre

Les origines des traditions populaires de l'architecture de terre remontent aux sources de l'histoire des villes de l'humanité. C'est en terre crue, en effet, que furent édifiées en Mésopotamie, il y a quelques 10000 ans, les premières agglomérations urbaines : Jéricho semble avoir été la plus ancienne²⁷. La célèbre Babylone était aussi bâtie en terre, de même que la fameuse Tour de Babel.

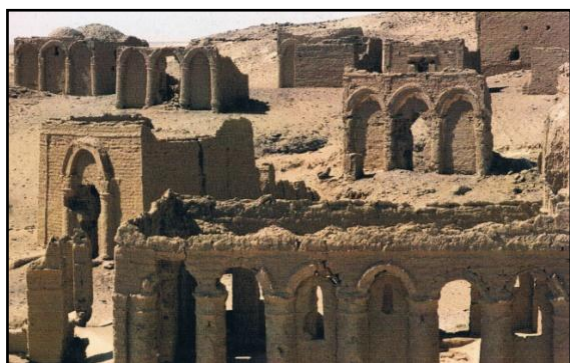


Fig. 10: A- tombeaux de la nécropole de Bagawat édifiés il y a 1500 ans.



B- Vestiges d'un stûpa édifié au VI^e ou au VII^e siècle à Yâr, dans la région du Tourfan, en chine.

Source : DETHIER Jean, Des architectures de terre, l'avenir d'une tradition millénaire, Ed Centre Georges Pompidou, Lyon, 1982, pp 23-24.

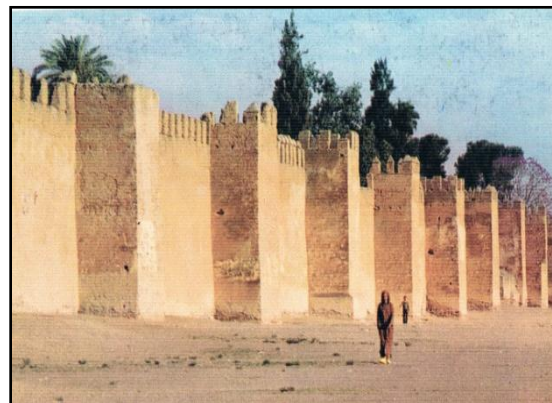
²⁷ DETHIER Jean. *Op. cit.*, p21.

2.2.2. Force et solidité des architectures de terre

L'analyse sereine du patrimoine ancien existant à travers le monde prouve sa durabilité. Les vastes enceintes urbaines défensives construites dès le XIIe siècle autour de multiples villes d'Afrique (Marrakech, Fès, Rabat...)²⁸, d'Europe méridionale ou du Moyen-Orient attestent de la force et de la solidité que peuvent témoigner les constructions en terre soigneusement édifiées.



Fig. 11: A- Village fortifié de Bololahn en afghanistan.



B- Enceinte fortifiée de la ville de Marrakech.

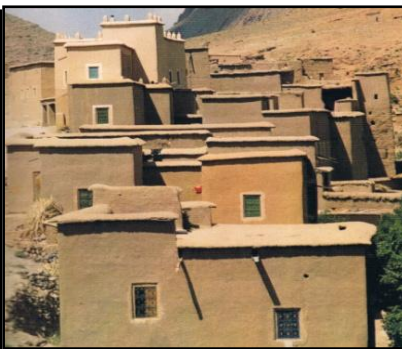
Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, pp 30-31.

2.2.3. Diversité des formes des architectures de terre

Avec la terre crue, les bâtisseurs ont réussi, à édifier des architectures d'une extraordinaire diversité de formes, à élaborer une étonnante diversité de langages architecturaux où s'expriment avec éloquence les originalités culturelles des usagers. Elles s'adaptent en de multiples et subtiles variations, aux conditions particulières du milieu social et économique, géographique et climatique²⁹.



Fig. 12: A- Mausolée du prophète Hud, au Yemen du



B- Maisons rurales à dades au Yemen.



C- Maison notable au Yemen du nord.

Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, pp 32-38-39.

²⁸ Ibid, p 27.

²⁹ Ibid, p 33.

2.2.4. Variété des fonctions des architectures de terre

En plus de l'habitat, ce même matériau, a permis de construire une gamme de bâtiments variés.



Fig. 13: A- Fours à glace en Iran

B- Château d'eau à Ain-Salah, Algérie.

C- Porte d'accès à la ville de Timimoun, Algérie.

Source DETHIER Jean. *Op.cit.*, pp 42-46-47.

2.2.5. Usage des architectures de terre par les nantis et les démunis

La construction en terre crue existe aussi bien dans les pays économiquement riches que pauvres. Mais désormais un processus mental « moderne » amène les uns, souvent les privilégiés de la société, à apprécier la terre pour son caractère confortable et chaleureux, maternel et sécurisant, pur et écologique, tandis que les autres, souvent les plus démunis, se sentent souvent enfermés dans un archaïsme qu'ils perçoivent comme une architecture des pauvres.

2.2.6. Urbanité des architectures de terre

C'est en terre crue, que les civilisations les plus diverses ont édifié des villes entières. Des unes, il ne reste à travers le monde que des vestiges archéologiques, bâtis il y a 10000 ans, quand à d'autres, elles persistent toujours.

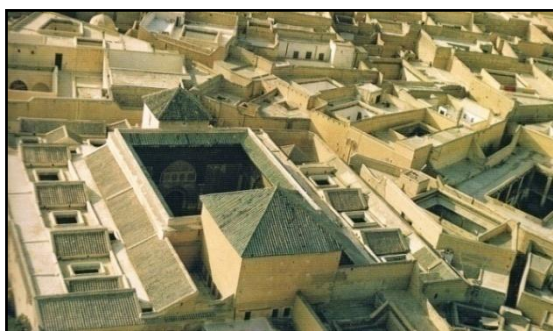


Fig. 14: A- Ville de Marrakech.



B- Le centre de Tabriz, Iran.

Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, pp 79-82.

2.2.7. Ruralité des architectures de terre

Dans les villages, l'architecture de terre prend tour à tour des structures de groupements très compacts, parfois défensifs et d'apparence urbaine, ou d'habitats dispersés où s'expriment un individualisme plus marqué.

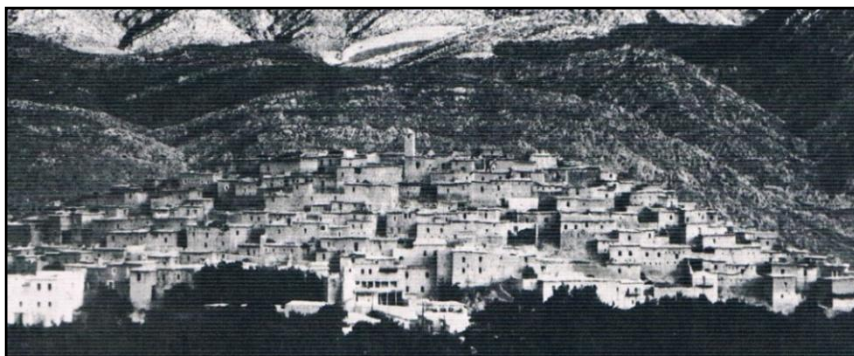


Fig. 15: Village de la région des Aurès, Algérie.

Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, p86.

2.2.8. Hauteur des bâtiments en terre

Des recherches archéologiques récentes permettent de croire que la célèbre « Tour de Babel » fut bien édifiée avec ce matériau au cœur de Babylone au VII^e siècle avant notre ère³⁰. La hauteur se manifeste à travers les minarets des mosquées. Un autre exemple est la ville de Shibam, ville toute en terre, appelée Manhattan du désert, avec des maisons élevées (Fig.16), et édifiées sur 30 mètres de hauteur.

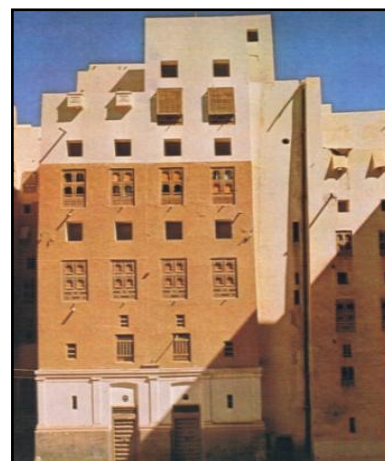


Fig. 16: Maison urbaine, ville de Shibām, Yémen.

Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, p115.

2.2.9. Confort des architectures de terre

Dans les maisons édifiées en terre règne souvent une singulière harmonie; elle est dûe à la fois au même matériau et à la qualité des espaces et des rythmes architecturaux. Mais le confort des architectures de terre n'est pas seulement spirituel; il est aussi thermique! Il y fait frais en été et chaud en hiver. Par leur nature, les murs épais en terre protègent des excès climatiques extérieurs et participent à une régulation thermique naturelle qui, traditionnellement, assure des économies d'énergie appréciable³¹.

³⁰ Ibid, p111.

³¹ Ibid, p123.

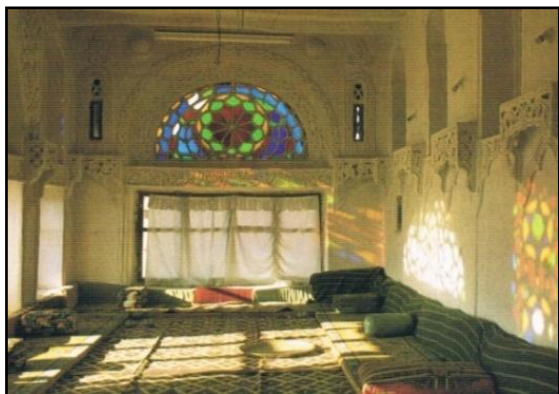
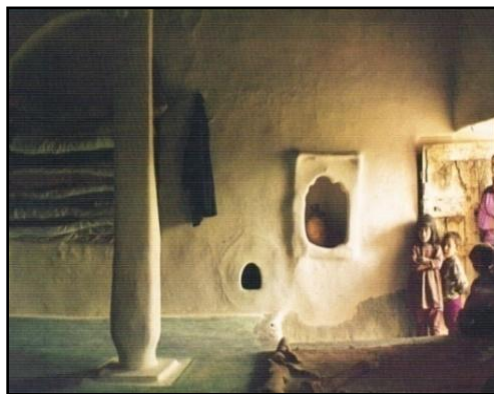


Fig. 17: A- Salon de la demeure d'un notable, Yémen.



B- Intérieur d'une maison notable, Liban.

Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, p 127.

3. Techniques des constructions en terre

Une richesse formelle et technique se présente à travers une douzaine de procédés constructifs³², connus à travers le monde, à partir desquels dérivent près d'une centaine de variantes qui peuvent être traditionnelles ou modernes³³.

Les éléments déterminants de la technique sont d'ordre culturel (transmission d'un savoir-faire), climatique, matériel (matériaux disponibles sur un site) ; l'importance d'un facteur plutôt qu'un autre varie fondamentalement suivant la structure socio- économique d'un peuple (civilisation agricole, nomade, commerçante...)³⁴.

Six techniques principales, les plus pratiquées sont connues sous les dénominations de « adobe », « pisé », « terre-paille », « torchis », « bauge » et « blocs comprimés ». (Fig. 18).

Parmi ces six techniques principalement utilisées, trois d'entre elles demeurent traditionnelles, soit, celles du torchis, de la terre-paille et de la bauge. Une technique ancienne, notamment utilisée au Moyen Âge, opère un retour intéressant dans la mouvance écologique et environnementale, la motte de gazon découpée, mais reste encore d'un emploi limité. Trois autres font l'objet d'une évolution récente spectaculaire associée à la modernisation de l'outillage de production et des modes de mise en œuvre, à savoir celles de l'adobe, du pisé et du bloc de terre comprimée.

³² DOAT Patrice, HAYS Alain, HOUBEN Hugo, MATUK Silvia, VITOUX François, Construire en terre, CRATerre, Grenoble, 1979, p11.

³³ FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op. cit.*, p26

³⁴ BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan, *archi terre*. Ed Parenthèses, 1978, p 9.

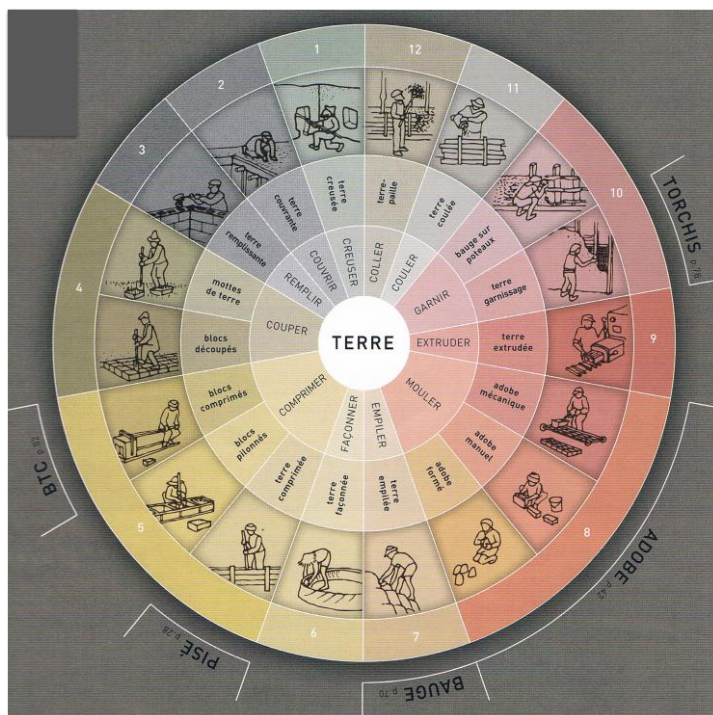


Fig. 18: La roue des techniques.

Source : FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op.cit.*, p27.

3.1. Propriétés des constructions en terre

En plus de ses qualités de régulateur hygrothermique et d'isolant thermique, la construction en terre comporte bien d'autres qualités.

3.1.1. La résistance mécanique

Le terre résiste bien à la compression mais ne résiste pas à la traction, spécialement à l'état humide. Quand elle est utilisée comme éléments porteurs, les forces doivent être acheminées dans la masse des éléments, ce qui explique leur épaisseur³⁵.

3.1.2. La durabilité

La terre peut être aussi durable que le béton de ciment, c'est ce qu'affirment les recherches menées dans ce sens au CRATerre (centre de recherche d'architecture de terre). La durabilité relève aussi bien de la mise en œuvre des règles constructives que du matériau. En effet, si un ouvrage respecte les règles architecturales, il supporte bien les effets du temps.

³⁵ HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert. *Op. cit.*, p146.

3.1.3. Un agent conservateur

Dans les anciennes constructions en terre, les planchers en bois et les fibres végétales contenues dans l'épaisseur des murs en terre ne périment pas. C'est ce qui démontre cette qualité de la terre à conserver l'état des produits. Ce phénomène s'explique par la capillarité du matériau et son équilibre hygrothermique³⁶.

3.1.4. La résistance au feu

La terre est un matériau incombustible qui procure aux constructions une bonne résistance au feu. D'après les normes allemandes, même un ouvrage réalisé en terre paille (1700 kg/m^3) résiste bien au feu³⁷.

3.2. Les pathologies

Afin de mieux profiter des avantages des constructions en terre, il est nécessaire de se prémunir contre certaines pathologies. Les constructions en terre sont en effet très sensibles à l'eau, nous signalons que sous l'action du vent, ces constructions s'altèrent et se dégradent au sommet et à la base du mur. Il faudra faire très attention à ces pathologies car elles sont le premier facteur qui nuit à la durabilité des ouvrages en terre.

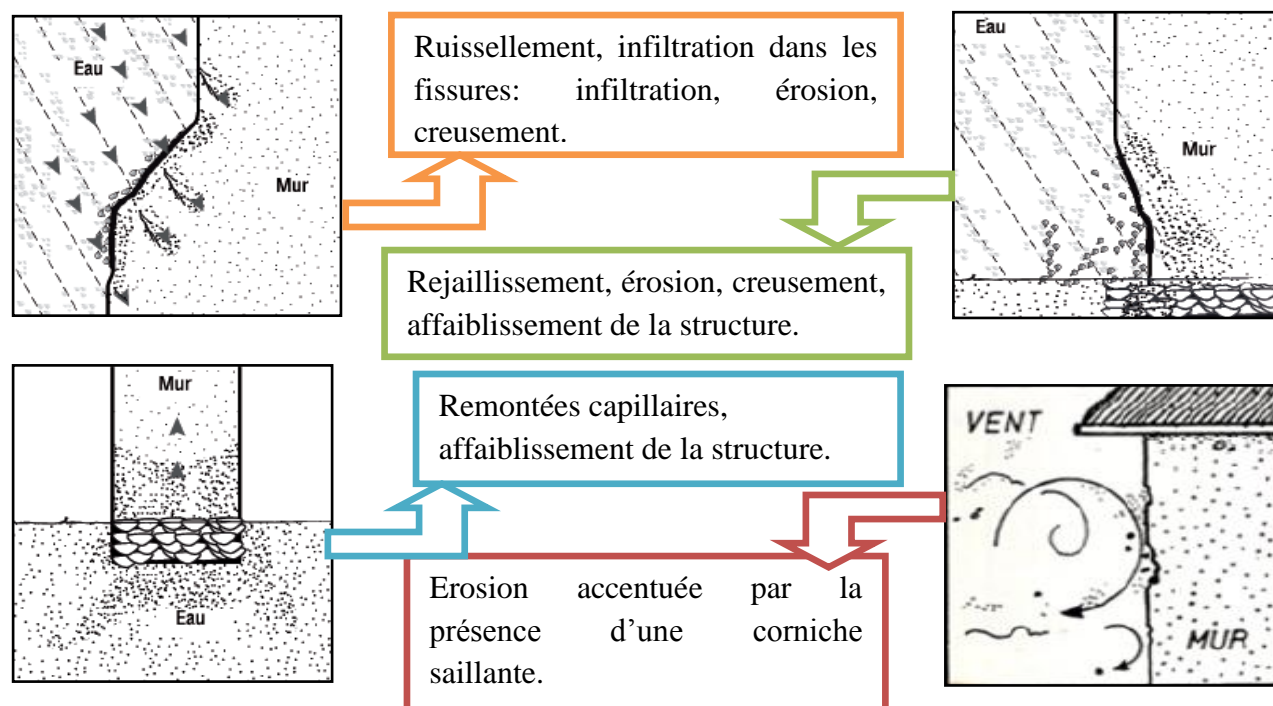


Fig. 19: Pathologies dues à l'eau et au vent. **Source :** Construire avec des matériaux naturels, les recommandations de conception architecturale en terre, Ed. Techniques de l'Ingénieur, 2013, p04. (CRATerre).

³⁶ LITTLE Becky, MORTON Tom. *Op. cit.*, p 11.

³⁷ Ibid.

3.2.1. Pathologies liées à l'eau

Les pathologies liées à l'eau sont relativement bien connues. Pour que l'eau affecte les constructions en terre, il faut réunir trois conditions³⁸:

- présence de l'eau à la surface du bâtiment;
- présence d'ouvertures dans cette surface qui permettraient à l'eau de s'infiltrer;
- présence d'une force qui fait pénétrer l'eau dans les ouvertures.

Pour cela, plusieurs solutions sont possibles; les bonnes fondations et le soubassement protègent le bas du mur, la protection des sommets et l'élimination des ruissellements. Il ne faut pas imperméabiliser les surfaces des murs qui ont besoin de respirer, éloigner les bâtiments des sources d'eau désagréable reste la meilleure solution qu'il est possible d'atteindre par le drainage périphérique. Les cycles d'imprégnation et de séchage ne sont pas très graves, c'est la stagnation de l'eau qui peut causer des désordres tels que l'altération des matériaux et l'altération de l'enveloppe du bâtiment.

3.2.2. La pathologie structurelle

Le CRATerre identifie cinq types de pathologies³⁹, elles sont typiquement identifiées par l'apparition de fissures ou par la décomposition du matériau. Elles peuvent aller à partir de l'apparition de simples fissurations, puis des bombements (ventres), des écartements, de faux aplombs, jusqu'à engendrer à long terme, un déséquilibre causant l'effondrement des constructions.

Les fissures et flambements sont les manifestations principales des désordres causés par les contraintes localisées (poinçonnement, flambement, effondrement).

3.2.3. Les principes de bonne conception architecturale

Les principes de bonne conception architecturale sont des règles universelles simples qui exploitent les qualités du matériau pour offrir des réalisations à l'abri de ces pathologies⁴⁰ et garantissent la durabilité des œuvres.

³⁸ Ibid.

³⁹ CRATerre, construire en terre, Ed An Architecture, 1979, pp 244-245.

⁴⁰ KEBAILI Nourreddine, l'architecture de terre contemporaine en Algérie ; mémoire de magister en architecture, EPAU, Alger, 2006, p 29.

- **Protection de la basse du mur :**

A : soubassement.

B : soubassement en pierre.

C : renfort des angles et leur base.

D : firme de pente pour évacuer l'eau.

- **Protection du mur :**

E : calepinage des banchés en pisé.

F : calepinage des blocs comprimés ou des adobes.

G : angles chanfreinés.

- **Protection du haut du bâtiment :**

J : chapeau débordant.

K : bande d'enduit haute.

L : protection du mur à la sortie de gargouille.

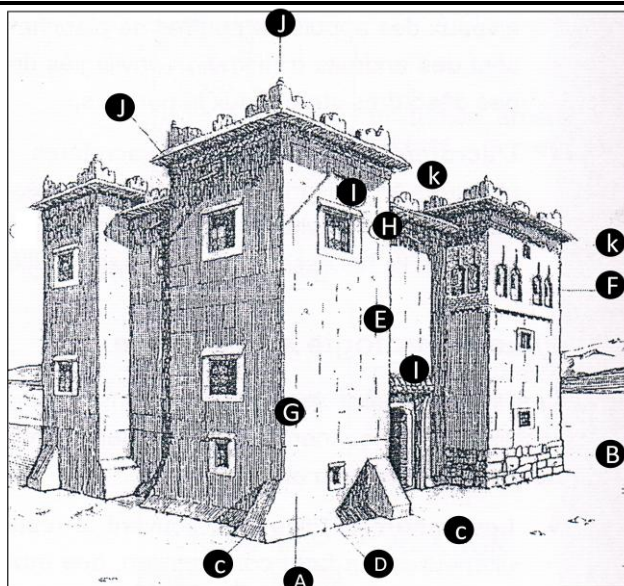


Fig. 20: Le schéma de bonne conception architecturale d'un bâtiment en terre.

Source : Construire avec des matériaux naturels, les recommandations de conception architecturale en terre *Op. cit.*, p05.

3.3. Recommandations essentielles pour la restauration des ouvrages anciens en terre

En restauration ou réhabilitation, il faut surtout éviter de bouleverser le système d'équilibre initial du bâtiment. Nous citerons des recommandations assorties d'une description de modes d'intervention pour garantir l'authenticité du bâti ancien en terre.

3.3.1. L'importance d'un bon diagnostic

Il faut bien observer les symptômes mais surtout en comprendre les causes. Un bon diagnostic distingue et analyse les problèmes « extrinsèques », liés à l'environnement du bâtiment, les problèmes « intrinsèques », liés au bâtiment lui-même, à l'évolution de ses matériaux, structures et systèmes construits.

3.3.2. La terre ne fait pas bon ménage avec l'eau

Elle est particulièrement sensible aux effets de la pluie qui ruisselle le long des murs (voie d'eau en toiture, chéneau ou descente dégradée), qui rejaillit en pied de mur, et aux remontées d'humidité par ascension capillaire (terrain saturé d'eau, mal drainé, rupture de canalisation).

3.3.3. Faire respirer le bâtiment

Une règle essentielle doit être rappelée : un édifice en terre et ses abords immédiats doivent « respirer » : l'humidité, sous quelque forme qu'elle soit, doit pouvoir s'évaporer, être évacuée par des drains.

3.3.4. La terre crue ne travaille bien qu'en compression

Elle résiste très mal aux efforts en traction et au cisaillement. Des charges excessives et concentrées peuvent causer un tassement et des fissures très reconnaissables, ou « coups de sabre »⁴¹, qui partent du bas des murs, évoluent en diagonale et s'élargissent vers le haut.

3.3.5. La reprise des fissures

Les fissures « mortes », même larges, comme les cavités, peuvent être facilement rebouchées au mortier de terre sablo-argileuse. Les fissures « vivantes » (si les témoins au plâtre se sont fissurés) peuvent exiger un traitement plus lourd : consolidation du sol et des fondations par injection de béton.

3.3.6. Le sol du rez-de-chaussée

Il faut préférer la pose d'un pavement en carreaux de terre cuite sur sable stabilisé ou chape de mortier maigre de chaux et sable recouvrant une couche de terre compactée sur hérisson de pierres⁴².

3.3.7. La création de nouveaux planchers

La restauration peut poser le problème de la restructuration des planchers avec un rehaussement ou un abaissement des niveaux. Il faut préférer la réalisation de planchers traditionnels en bois plutôt que celle de planchers en béton armé. Aujourd'hui, les solutions de planchers en poutres de bois et panneaux de fibres agglomérées, cloués ou vissés, sont courantes et tout à fait adaptées à la restauration ou à la réhabilitation des ouvrages en terre. Il faut donc ancrer ces poutres au-delà du mi-mur et surtout bien installer leur assise sur une semelle de répartition de la charge. Cette assise peut aussi être réalisée en briques maçonneries⁴³. Le rebouchage des cavités réalisées par l'ancrage des poutres, autour de celles-ci, peut être effectué au mortier de chaux et sable ou encore au plâtre qui opère une légère expansion au séchage.

3.3.8. Les baies et autres ouvertures

Il est tout à fait possible de réaliser des reprises de maçonnerie en pisé coffré, en briques de terre, les reprises ou créations de tableaux de baies peuvent être faites en briques cuites hourdées à la chaux ou en bois massif.

3.3.9. Les enduits en terre

Une première couche peut alors être réalisée avec une terre assez argileuse, qui collera bien, mais qui fissurera au séchage. Une couche de finition devra être ensuite réalisée avec une terre plus argilo-sableuse, mêlée de paille hachée. Il faudra éviter de trop charger ces enduits de reprise à la terre (faible épaisseur) car ils n'adhéreraient pas suffisamment. En finition, ils recevront un enduit qui sera réalisé en chaux et sable. Les chaux le plus indiquées sont de dénomination « naturelle » ou chaux

⁴¹ Construire avec des matériaux naturels, les recommandations de conception architecturale en terre *Op. cit.*, p 13.

⁴² *Ibid*, p 13.

⁴³ *Ibid*, p14.

«calcique »⁴⁴ (CL90 ou CL80) et peuvent être mélangées à des chaux moyennement hydrauliques (NHL2) selon des dosages bien répertoriés.

4. Situation de l'architecture de terre

4.1.Sa situation dans le monde

4.1.1. La réglementation

Sur le plan international, des codes de bon emploi ont été élaborés par l'ONU entre 1958 et 1964, concernant la construction en béton de terre stabilisée. En 1973 le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) a établi un texte normatif à l'occasion du projet Cissin à Ouagadougou Burkina Faso⁴⁵, la Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Recherche sur les Matériaux et les Constructions (RILEM) et le Conseil International du Bâti pour la Recherche l'Étude et la Documentation (CIB) possèdent depuis 1987 un comité technique sur la construction en terre qui élabore des recommandations et spécifications qui peuvent être adoptées comme normes⁴⁶.

Les seuls codes complets qui traitent spécifiquement de la construction en Bloc de terre comprimée (BTC) se trouvent en Allemagne et en Nouvelle Zélande⁴⁷. D'autres pays ont développé des recommandations ou des prescriptions, tels que le Maroc et la Côte d'Ivoire qui sont continuellement mis à jour. Aux Etats Unis la construction en adobe est intégrée aux codes nationaux de construction. Le « National Bureau of Standards » a publié plusieurs documents durant les années 1940. Pendant les années 1970 le "Uniform Building Code (UBC)" était publié au niveau national. Il a subi des modifications pour être adopté dans les différents états, ses règles concernent les briques de terre "adobe" fait à la main.

En 1982, à l'occasion du projet du "*Domaine de la terre de la ville nouvelle de l'Isle d'Abeau*" en France, un cahier de charges a été élaboré. Il constituait une référence pour les différents intervenants. Le centre du CRATerre à Grenoble, développe un code du BTC pour le gouvernement français qui a été achevé en 2002. Il est élaboré sur la base d'une concertation entre 22 pays où il sera appliqué.

Les actions des organismes internationaux encouragent les pays à se lancer dans les voies de la revalorisation de l'architecture de terre.

⁴⁴ Ibid, p14.

⁴⁵ HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert. *Op. cit.*,p89.

⁴⁶ Ibid

⁴⁷ <http://www.terra-ram.com/>

4.1.2. La formation

Dans le monde, le programme Chaire UNESCO, (grâce à la coordination scientifique de l'équipe du CRATerre et la Division de l'Enseignement Supérieur de l'UNESCO en étroite collaboration avec le Getty Conservation Institute (GCI) et l'ICCROM), travaille pour la diffusion du savoir scientifique de l'architecture de terre, notamment par l'implantation et le développement de la formation au niveau des universités et des centres scientifiques et techniques. Les bénéficiaires de ce programme ne cessent d'augmenter et jusqu'à présent, ils sont au nombre de treize institutions dans le monde dont cinq en Afrique; en l'occurrence, l'Afrique du sud, le Burkina Faso, le Nigeria et l'Ouganda et six sont en Amérique; une au Brésil, trois écoles en Colombie, une au Mexique et une autre au Pérou. Une seule institution se trouve en Asie, en Inde avec l'Auroville Building Centre et enfin l'Italie accueille le seul centre d'Europe⁴⁸.

Le rapport de la réunion internationale des partenaires de la Chaire UNESCO - consortium TERRA tenue à Grenoble en France; en octobre 2001 ; montre qu'il y a bien une dynamique d'enseignement supérieur et de formation professionnelle sur l'architecture de terre dans le monde.

Le centre international de la recherche en architecture de terre, "CRATerre", installé à Villefontaine en France s'adresse à tous les professionnels du bâtiment (architectes, ingénieurs, entrepreneurs et artisans) en pratiquant un programme théorique et pratique sur la production du matériau, la conception architecturale et la conservation du patrimoine architectural en terre. Cette dernière formation est dispensée avec le concours de l'ICCROM (Centre International d'Etudes sur la Conservation et la Restauration des Biens Culturels) et s'est consolidée avec le projet TERRA qui est un programme de collaboration entre plusieurs partenaires pour la recherche, la planification et l'expérimentation, la formation et la diffusion du savoir scientifique axé principalement sur la conservation du patrimoine architectural en terre et est déclarée souvent sous les labels: architecture durable, développement durable ou bio construction⁴⁹.

4.2.L'architecture de terre en Algérie

Dans ce paragraphe nous étudierons la situation de la réglementation et de la formation en architecture de terre en Algérie.

⁴⁸ CRATerre-EAG, Enseigner l'architecture de terre dans le monde, Ed CRATerre-EAG, Grenoble, 2001, p3.

⁴⁹ Ibid.

Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) mène ses recherches sur l'architecture de terre depuis plus de vingt ans. Plusieurs projets ont pu voir le jour tel que le montre le tableau qui suit :

Années	Réalisations
1969	la réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna.
1971	une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Moustafa ben Brahim près de Sidi Bel Abbés, réalisés en pisé.
1975	le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissante.
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en thoub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaâda sont réalisés en BTS
1981	40 logements sont réalisés à Chéraga près d'Alger en blocs de terre comprimée
1984	un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en blocs de terre comprimée.
1984	un prototype fut réalisé au CNERIB en blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en blocs de terre comprimée
1986	10 logements sont réalisés à Reggane en blocs de terre comprimée
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion immobilière en blocs de terre comprimée
1994	44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en blocs de terre comprimée
1998	un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB
2006	Un projet intitulé « réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.

Tableau 1 : Les opérations de construction en terre en Algérie.

Source : CNERIB.

Selon le rapport du CNERIB, l'Algérie compte plusieurs techniques se distinguant par leurs procédés de production⁵⁰. Jusque-là nous n'avons pas encore rencontré d'études spécifiques sur les techniques pratiquées en Algérie. L'ouvrage de P. Odul⁵¹ ne présente que quelques exemples et ne s'étale pas sur l'ensemble des procédés traditionnels algériens.

4.2.1. La réglementation sur la construction en terre

L'Algérie ne dispose pas encore d'une réglementation propre à la construction en terre mais elle semble avoir établi ses bases grâce aux recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée approuvées en 1987. En 1988 le Centre Nationale d'Etudes et de

⁵⁰ CNERIB, Conception de logements économiques à base de produits localement disponibles. *Op. cit.*, p 01

⁵¹ ODUL Pascal, Des architectures de terre en Algérie, projet earth construction technologies appropriate to developing countries, Belgique, 1983.

Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) a publié un document intitulé « Béton de terre stabilisée » qui renferme trois parties essentielles;

- Recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée.
- Guide technique du BTS (Béton de terre stabilisée).
- Notice pour l'utilisation de la presse BTS.

Il se compose de deux parties essentielles; celle de la production des blocs de BTS et celle de sa mise en œuvre. L'utilisation du BTS est proposée comme alternative au « thoub » et au pisé produit localement. Cette technique nouvelle vise à améliorer la qualité de durabilité de la terre crue afin de préserver son utilisation et profiter de ses qualités thermiques.

Ce document constitue une étape importante dans le sens d'une normalisation de la construction en terre et ouvre la voie à un large usage de la construction en BTS. Il permet aussi aux services de contrôle et de suivi de superviser la réalisation et juger de la conformité des produits et des réalisations⁵².

Cependant pour la maîtrise de l'œuvre, la réglementation algérienne présente un désavantage dénoncé depuis bien longtemps par H. Fathy⁵³. Elle prévoit une rémunération au pourcentage du coût d'objectif de l'ouvrage⁵⁴. Cela peut constituer un obstacle pour la diffusion des techniques constructives peu onéreuses et empêcher les maîtres d'œuvres de s'initier à l'architecture de terre qui se veut économique, les réalisations avec d'autres matériaux coûteux leurs seraient plus profitables.

En conclusion, nous pouvons dire que l'Algérie affiche un retard par rapport à d'autres pays qui ont élaboré leurs propres normes pour la construction en terre.

4.2.2. La formation en architecture de terre

A. La formation professionnelle

Actuellement c'est l'Institut National de la Formation Professionnelle (INFP) qui est chargé de l'élaboration des programmes de formation. Selon le programme, la construction en terre ne fait pas partie du contenu de la formation dans les Instituts et centres de formation.

⁵² Sabri M, Lalle M, Guide de gestion des marchés publics, Ed Sahel, Alger, 2000, p93

⁵³ FATHY Hassan, Construire avec le peuple, Ed Sindbad, Paris, 1970, p 229

⁵⁴ Arrêté interministériel du 15 mai 1988 portant modalité d'exercice et de rémunération de la maîtrise d'œuvre en bâtiment. (JORA. n°43 du 26 octobre 1988 pp 1152 -1162).

B. L'enseignement technique

Le rapport de synthèse de la réunion internationale sur l'enseignement de l'architecture de terre évoque les tentatives d'enseignement universitaire dans les centres algériens⁵⁵. Il pourrait s'agir de cours spécifiques, ou d'ateliers spéciaux ou bien de tentatives individuelles. Actuellement l'enseignement de l'architecture est orienté vers les technologies de pointe sans avoir négliger le volet des techniques constructives traditionnelles du patrimoine local⁵⁶.

C. La formation sectorielle

Jusqu'à présent, la formation dispensée par le CNERIB (seul organisme à offrir cette formation en Algérie) n'a touché que le personnel technique de l'administration et n'est pas dispensée de façon continue. Sur la base d'une convention avec le CNERIB, le personnel du secteur de l'habitat peut bénéficier d'une formation intensive⁵⁷ qui concerne le matériau depuis l'extraction de la terre jusqu'au produit fini pour le BTS uniquement.

D. La recherche

Depuis sa création en 1982, et pour remplir sa mission d'études et de recherches intégrées du bâtiment le CNERIB s'est lancé sur l'étude des matériaux locaux, et sur l'habitat économique⁵⁸.

Actuellement et dans le cadre de la coopération scientifique et technique avec ses partenaires étrangers, le centre s'est orienté vers la mise en œuvre de technologies appropriées qui visent à développer et à élargir les applications des matériaux locaux, affiner l'application de ces matériaux aux contextes physiques, sociaux et économiques et enfin, définir et adapter les méthodes de production de ces matériaux suivant les contextes. Ces objectifs seront atteints à travers plusieurs actions entre autres, la formation à tous les niveaux et la divulgation de la formation.

Jusqu'à présent deux axes de recherche ont été développés au CNERIB dans le but de garantir les matériaux et les structures en terre :

- La connaissance du matériau.
- L'utilisation de la terre dans la construction⁵⁹.

4.3. Préservation des architectures de terre

Aujourd'hui, le devoir de conserver ces patrimoines venus du passé est une étape importante pour les transmettre aux générations futures, ils sont les témoignages vivants de savoir-faire séculaires et du

⁵⁵ Chaire Unesco-consortium Terra, Enseigner l'architecture de terre dans le monde bilan et perspectives, Ed. CRATerre-EAG, Grenoble, 2001.p3

⁵⁶ ZEROUALA Mohammed Salah, « L'enseignement de l'architecture en Algérie », in Construire n°37, Alger, 1990, p 18

⁵⁷ <http://www.cnerib.edu.dz/>

⁵⁸ Olivier M, Évolution des recherches effectuées au CNERIB sur la construction en terre (rapport de mission), CNERIB, Alger, 1988, p 05

⁵⁹ Ibid, p 10

génie créateur humain. Les cultures constructives liées au pisé bien qu'encore vivaces dans certaines régions du monde, doivent être sauvegardées et pérennisées, afin de faire parvenir cet héritage témoignant de la grande ingéniosité des civilisations passées aux populations futures.

Parmi les différents programmes œuvrant à la préservation et la promotion de l'architecture de terre, nous pouvons citer:

4.3.1. Le projet TERRA

Le projet TERRA, en 1997, a pour mission l'étude et la conservation de l'architecture de terre, dans les domaines de la recherche, de la formation, de la planification et de l'expérimentation, ainsi que de la diffusion. Parmi les objectifs du projet:

- Établir l'état actuel des connaissances sur la conservation du patrimoine en terre.
- Caractériser les propriétés du matériau et déterminer les causes de sa dégradation.
- Développer et évaluer les procédures d'intervention à travers des essais de laboratoire et de terrain.

4.3.2. Le programme Africa 2009

Le projet est né de la coordination de (CRATerre, ICCROM, le centre du patrimoine mondial de l'UNESCO). L'objectif principal du programme est l'amélioration à long terme des conditions pour la conservation du patrimoine culturel immobilier, grâce à sa meilleure intégration au sein d'un processus de développement durable. Le programme a surtout permis la conservation entre autre des mosquées de Tombouctou, les palais Ashanti et les tombes des rois du Buganda à Kasubi⁶⁰.

4.3.3. Le contrat global de développement « Isère, porte des Alpes »

Ce projet s'intégrant dans un vaste programme de valorisation économique des potentialités culturelles de la région, ses objectifs principaux sont la sensibilisation des élus dans le but de les encourager à préserver, restaurer et réhabiliter le patrimoine bâti ayant un intérêt touristique et à inciter de nouvelles constructions publiques, ainsi que l'animation et la promotion à travers des conférences et événements culturels à l'instar de « La route du pisé », et la formation des professionnels. Le projet a abouti à la mise en place de plusieurs manifestations culturelles autour du pisé, «Tout autour de la terre », «Grains d'Isère », la sensibilisation des politiques et du public à travers des ateliers pédagogiques et de découverte à l'exemple de « Grains de bâtisseurs ».

⁶⁰ www.craterre.org/action:programmes.

5. Conclusion

L'architecture de terre est une composante majeure du patrimoine architectural du fait qu'elle représente près de 17% des bâtiments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité. Elle a prouvé sa durabilité et sa pérennité par le fait qu'elle persiste jusqu'à ce jour.

Sur le plan technologique, l'architecture de terre, a depuis longtemps, montré ses capacités techniques et sa richesse architecturale dans les milieux ruraux et urbains, a prouvé des intérêts sur le plan économique, environnemental, culturel, sur la santé de l'homme et a aussi contribué à son confort.

Quand aux pathologies des architectures de terre, telles que la vulnérabilité à l'eau, aux vents et aux efforts de compression, elles ont leurs solutions pour des constructions qui sont faites suivant les règles de l'art. En cas de restauration, il faudra aussi suivre les modes d'intervention pour garantir l'authenticité du bâti ancien en terre.

Les carences observées dans les domaines de la formation, la réglementation et la connaissance à propos des traditions constructives en terre sur le territoire national, laissent supposer que le blocage psychologique persiste que se soit chez la population ou bien chez les responsables.

Notre recherche sur l'état de l'art de l'architecture de terre, nous a permis de bien cerner sa part dans le patrimoine architectural, et de bien comprendre ses concepts. Ainsi on a pu ressortir ses avantages, nous allons tenter d'identifier et d'étudier un de ces avantages à savoir le concept de confort thermique ressenti dans les constructions en terre ainsi que les facteurs de la durabilité de l'architecture vernaculaire dans le prochain chapitre.

Chapitre II :

Architecture, confort et durabilité.

Introduction

Composer avec le climat a toujours été l'objectif principal de l'architecture traditionnelle, c'est ce qu'on appelle aujourd'hui la conception architecturale bioclimatique soucieuse de l'impact des composantes environnementales telles que la température, le degré d'humidité, les vents, sur le confort thermique.

L'architecture traditionnelle vernaculaire a toujours impliqué l'utilisation de ressources naturelles pour servir les besoins de l'homme qui, à son tour, s'est toujours adapté au lieu et au climat en cherchant le confort dans la construction de son cadre de vie, en adéquation avec ses croyances et son mode de vie en communauté. Le tissu à patio des médinas constitue une solution intéressante répondant autant aux contraintes du climat méditerranéen, caractérisé par ses étés chauds et ses hivers doux à frais, qu'à celles, culturelles, de préservation de l'intimité d'une société conservatrice. C'est pour cela que nous avons essayé de mettre la relation entre l'architecture et le climat au sein d'une architecture traditionnelle vernaculaire.

Il s'est vu pertinent dans ce chapitre, de mettre en exergue l'architecture durable, en étayant les principes de l'approche bioclimatique : *implantation, compacité, ensoleillement, vents, topographie...*, ensuite déterminer les paramètres du confort : *température, humidité, vitesse de l'air...*, outre la notion du confort thermique dans l'architecture vernaculaire du bassin méditerranéen.

1. L'habitat et les paramètres du confort

1.1. Le confort thermique

1.1.1. Définition

Le confort est une notion étroitement liée à la sensation de bien-être et qui ne possède pas de définition absolue¹. A l'époque médiévale, le terme latin *Confortare* signifiait le renforcement et la fortification ; au XVIII^e siècle, le terme confort signifiait un bien-être matériel ; le terme ne fut introduit en France qu'au XIX^e et était très lié aux classes sociales de l'époque (noblesse, bourgeoisie, ouvrière).

K. Slater (1985) indique que le confort est un terme si nébuleux à définir, et si subjectif, qu'un consensus universel sur son sens est presque impossible à obtenir. Toutefois, il en précise les dimensions en le définissant comme étant 'un état agréable d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et l'environnement'. Cet état agréable d'harmonie, comme le

¹ BELAKHEL Azeddine, Confort et maîtrise des ambiances, Département d'architecture de Biskra 2^e année, cours, 2012, disponible sur: <http://www.univ-Biskra.dz/belakhal/Cours/S2-6.pdf>, p01.

précise la définition du dictionnaire pour le terme confort, est l'état d'une personne qui exprime un sentiment de bien-être que l'on pourrait aussi 'partiellement' interpréter comme absence de gêne². En architecture, on distingue le confort physiologique et le confort psychologique³.

- 1- le confort physiologique est étroitement lié aux exigences thermiques, de lumière (éclairage), sonores, olfactives...etc.
- 2- Celui psychologique, peut être réparti en deux genres :
 - Visuel (perception de l'espace, contact avec l'extérieur, visibilité...etc.).
 - Non-visuel (déroulement des activités, intimité, privacité...etc.).

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique, et ne dépend pas seulement de la température mais aussi de l'hygrométrie de l'air ambiant « *confort thermohygrométrique* »⁴. Il est déterminé par « *l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement* »⁵. Il est atteint grâce à quatre mécanismes : la conduction, la convection, l'évaporation et le rayonnement. Il est donné par l'ensemble des interactions entre l'occupant et l'enveloppe bâtie. « *Complexe, il peut être décrit avec de nombreux paramètres physiologiques, psychologiques, physiques, quantitatifs ou qualitatifs, plus au moins incertains et imprécis. Pluridisciplinaire, il est tout ce qui contribue au bien-être, et s'exprime par une sensation agréable procurée par la satisfaction de besoins physiologiques et l'absence de tensions psychologiques* »⁶.

1.1.2. Bilan thermique et confort

Le bilan des échanges thermiques engendrés par le milieu, conditionne le confort de l'individu. Ainsi, la sensation thermique est le résultat de plusieurs facteurs, dont l'harmonisation, conduit à l'équilibre thermique ou neutralité thermique.

Nous allons voir dans la figure suivante (Fig. 21) les facteurs de sensation thermique.

² MAZOUZ Said, confort thermique, département d'architecture de l'université de Biskra, 1 année post-graduation, cours, p55.

³ HAMEL Khalissa, confort thermique, Département d'architecture de Biskra, Master I : Architecture et environnement, Sciences pour l'architecture, cours2, 2013, disponible sur : <http://www.univbiskra.dz/enseignant/hamel/Confort%2520thermique%252001.pdf>.

⁴ FERNANDEZ Pierre, LAVIGNE Pierre, Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements et méthodes, Ed Le moniteur, Paris, 2009, p93.

⁵ LIEBARD Alain, DE HERDE André, Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatique : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Ed Obser'er, Paris, 2005, p 27.

⁶ CARTIN R, MOUJALLED B et GUARRACINO G, complexité du confort thermique dans les bâtiments, 6ème congrès Européen de Science des Systèmes Paris, 19-20 septembre 2005.

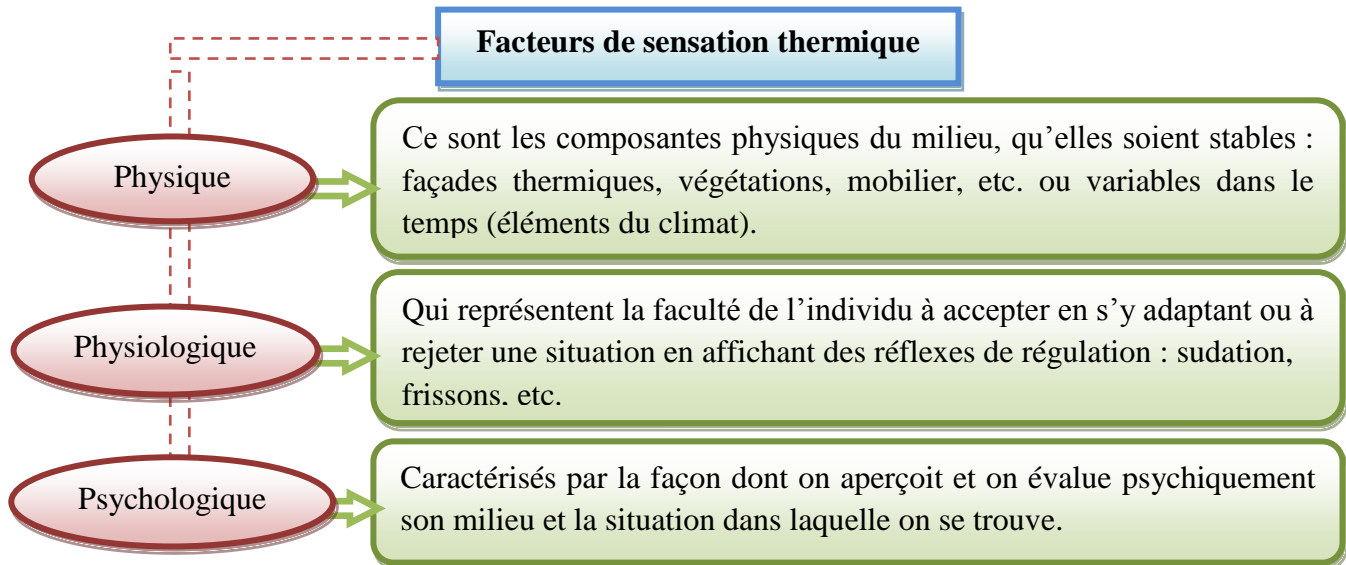


Fig. 21: Facteurs de sensation thermique.

Source: BOUTABA Samir, confort thermique entre mesure et perception, mémoire de magister en Architecture, Biskra, département d'architecture, université de Biskra, 2007, p90.

1.1.3. Echanges thermiques avec l'ambiance

Plus de 50% des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau).

Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35% du bilan alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (<1%).

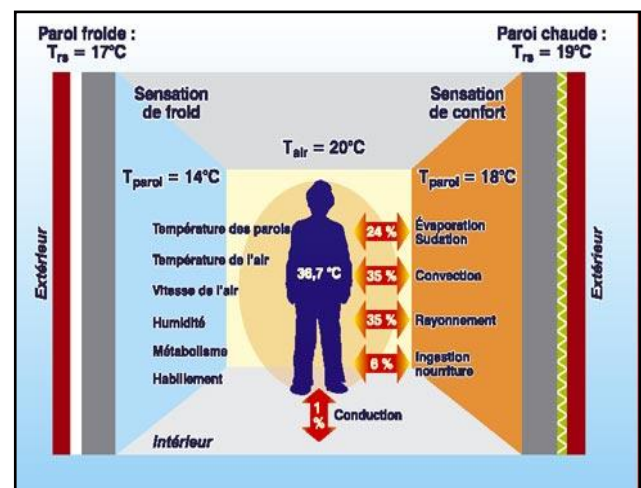


Fig. 22: Echanges thermiques entre l'homme et son environnement.

Source : LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p28.

Le corps perd également 6% de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

Cette importance de nos échanges par rayonnement explique que nous sommes très sensibles à la température des parois qui nous environnent (Fig. 22).

Le bilan thermique à l'équilibre s'écrit comme suit⁷ :

$$C_{\text{res}} + E_{\text{res}} + K + C + R + E + H = 0$$

C_{res} : Echanges de chaleur au niveau des voies respiratoires par convection.

E_{res} : Echanges de chaleur au niveau des voies respiratoires par évaporation.

K : Echanges thermiques au niveau de la peau par conduction.

⁷ FERNANDEZ Pierre, LAVIGNE Pierre. *Op. cit.*, p95.

C : Echanges de chaleur au niveau de la peau par convection.

R : Echanges de chaleur au niveau de la peau par rayonnement.

E : Echanges de chaleur au niveau de la peau par évaporation de la sueur.

H : La production de chaleur interne du corps. (au repos : $H=M$ « métabolisme », $H=M-W$ « W : travail mécanique »).

Le sens des échanges thermiques est fonction de la différence de température. Il y a des déperditions (négatif) si la température opérative est inférieure à la température cutanée, sinon se sont des gains thermiques (positif) qui s'ajoutent à l'être humain rendu échauffé par l'ambiance qui l'entoure⁸.

1.1.4. Facteurs de confort

Le confort thermique dépend de paramètres majeurs : physiologiques, comportementaux et environnementaux.

A. Le métabolisme

C'est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.

B. L'habillement

Il représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.

C. La température ambiante de l'air T_a

C'est le premier paramètre à contrôler, il ne peut donner une idée précise du confort prévalent dans une ambiance quelconque. La mesure de la température de l'air (T_{air}) se fait à l'aide d'un thermomètre au bulbe protégé du rayonnement solaire et du rayonnement des parois du local⁹. L'intervalle du confort va généralement de 18° à 25°C.

D. La température des parois T_p

Elle donne une idée sur l'inertie thermique d'une paroi. Elle se fait à l'aide d'une sonde de contact ou sonde à rayonnement infrarouge. Pour l'architecte, il suffit de choisir des matériaux de construction et de les agencer de façon à obtenir une paroi présentant un coefficient de conductibilité thermique valable (égale ou inférieure à 1,2) et à toujours veiller à ce que la différence de température entre la paroi et l'air ambiant ne dépasse pas les cinq degrés Celsius¹⁰.

⁸ BOUTABA Samir. *Op. cit.*, p91.

⁹ CABIROL Thierry, FAURE Daniel, ROUX Daniel, chauffage de l'habitat et énergie solaire, tome1: Confort thermique et techniques de chauffage, Ed Edisud, 1982, p60.

¹⁰ NOHA Said, la notion de confort thermique : entre modernisme et contemporain, cours en ligne, Grenoble : ENSA, publication ENSAG, Cours, 2010, p60, disponible sur : <http://www.grenoble.archi.fr>.

La température du confort ressentie T_{rs} est dite encore température opérative ou température résultante sèche : $T_{rs} = (T_a + T_p) / 2$ ¹¹.

E. L'humidité relative de l'air (HR) (hygrométrie)

C'est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température. L'intervalle de confort, bien que dépendant d'autres paramètres dont la température et la vitesse de l'air, peut aller de 20 à 80%, au dessous de 20% l'air devient trop sec au point de provoquer des irritations aux lèvres et aux yeux notamment, au dessus de 80%, l'air devient trop humide¹².

F. La vitesse de l'air

Elle détermine les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. Elle influence le confort dès qu'elle est supérieure à 0,2m/s.

C'est en effet à partir de cette vitesse qu'un courant d'air peut être ressenti par un individu moyen. Les courants d'air peuvent agir positivement sur le confort dans une ambiance chaude et humide¹³.

Les mécanismes d'autorégulation du corps humain laissent apparaître une zone où la variation de confort thermique est faible : c'est la plage de confort thermique¹⁴.

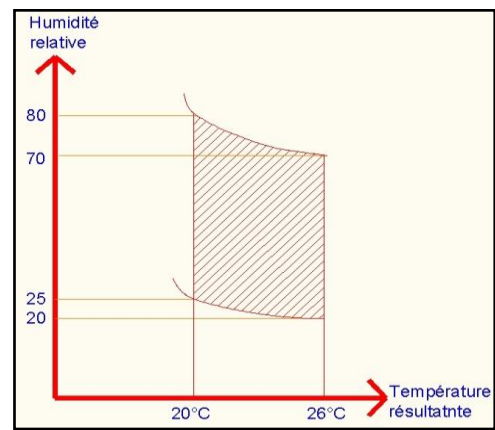


Fig. 23: Polygone du confort.

Source : CABIROL Thierry, FAURE Daniel, ROUX Daniel. *Op.cit.*, p62.

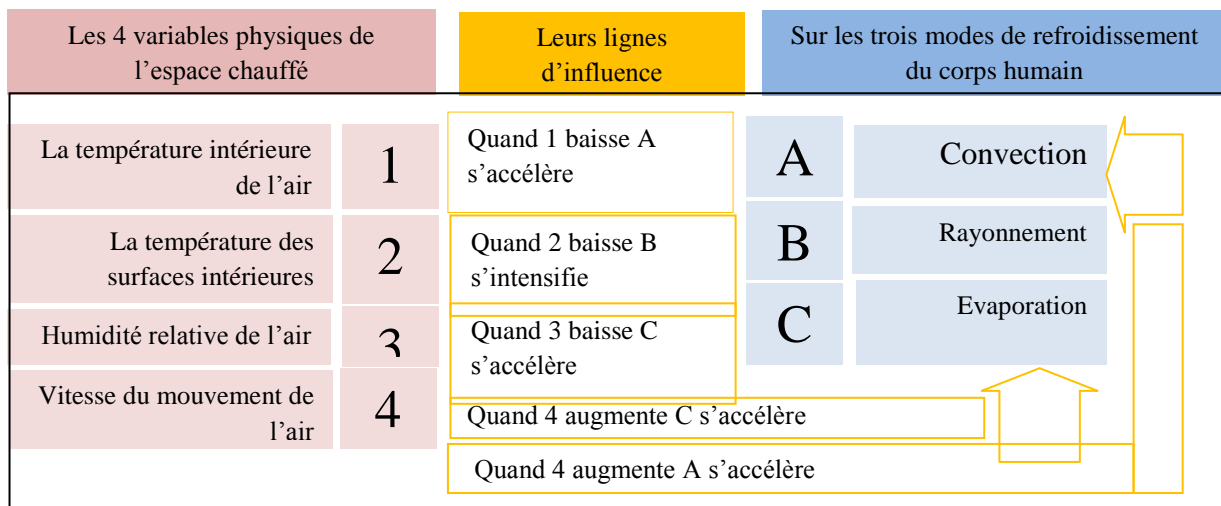


Fig. 24: Relations entre les paramètres de confort et les modes d'échanges de chaleur.

Source : MAZARI Mohammed, Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public, thèse de magister, université de Tizi Ouzou, 2012, p15.

¹¹ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op cit.*, p 28.

¹² CABIROL Thierry, FAURE Daniel, ROUX Daniel. *Op cit.*, p33.

¹³ Ibid, p30.

¹⁴ Energie +, version 7, Architecture et climat, Université catholique de Louvain(Belgique) 2012, réalisé avec le soutien de la Wallonie –DGO4- Département de l'énergie et du bâtiment durable.

1.2. Le confort thermique dans l'approche bioclimatique

1.2.1. L'approche bioclimatique dans l'architecture

L'approche bioclimatique est une réponse à la mise en relation entre l'homme et sa capacité à la recherche du confort, son architecture, et le climat.

Victor Olgy¹⁵ est le premier qui a tenté de rétablir le lien fondamental existant entre l'environnement bâti et l'environnement naturel. Ce concept trouve son ancrage dans l'architecture vernaculaire que Hassan Fethy a appelé « architecture sans architectes », basée sur une connaissance intuitive du lieu et du climat¹⁶. Cette architecture « populaire » élaborée par les usagers comme une réponse directe à leurs besoins et leurs valeurs, témoigne d'un grand respect pour l'environnement.

Jadis, la démarche bioclimatique que l'on considère aujourd'hui une nouveauté n'est en fait que le prolongement de certains savoir-faire que se transmettaient des « non-architectes », en utilisant les matériaux locaux capables d'améliorer le confort thermique et l'environnement¹⁷. Dans l'architecture vernaculaire, l'homme est à la fois constructeur et utilisateur, son savoir-faire technique dépend de trois milieux interactifs ; l'humain, le naturel et le matériel.

Nous énumérerons les différents paramètres de conception de l'architecture bioclimatique à prendre en charge, et nous préciserons qu'elle nécessite un traitement spécifique des données météorologiques¹⁸. Elle propose des solutions architecturales qui doivent répondre à un résultat thermique voulu, qui seraient conformes aux exigences de l'utilisateur.

A. L'implantation

Pour une implantation réussie du bâti, on doit tenir compte autant du relief environnant, de la course annuelle du soleil que de l'orientation des vents dominants. L'implantation va aussi déterminer l'éclairage¹⁹, les apports solaires recherchés en saison froide, ainsi que les mouvements naturels de l'air.

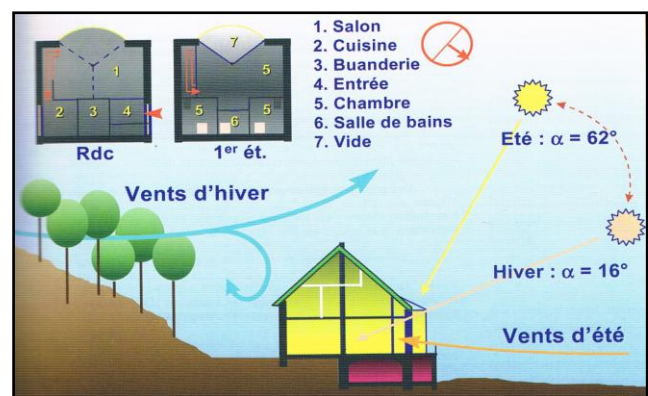


Fig. 25: Paramètres de l'implantation.

Source : LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p63.

¹⁵ OLGAY Victor, «Design with Climate- A Bioclimatic, Approach to Architectural Regionalism», Princeton University Press, USA, 1963.

¹⁶ COCH Helena, « Bioclimatism in Vernacular architecture, Architecture: confort, energy», Renewable and Sustainable Energy Reviews 2, Pergamon, UK, 1998, pp67-87.

¹⁷ LAVIGNE Pierre, Architecture climatique : une contribution au développement durable, Ed edisud, Aix-en-Provence, France, 1994, p.13.

¹⁸ IZARD Jean Louis, GUYOT Alain, Archi bio, Ed parenthèses, 1979, p 14.

¹⁹ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, 2005, p 63.

B. La densité urbaine

Le tissu joue un rôle important dans la modification du climat et dans la création d'un microclimat urbain. Les formes urbaines denses peuvent modérer le microclimat et améliorer les conditions de confort pour les habitants par réduction des surfaces de contact avec l'extérieur. L'accolement du bâti permet la réduction des déperditions en climat chaud. (Fig. 26).

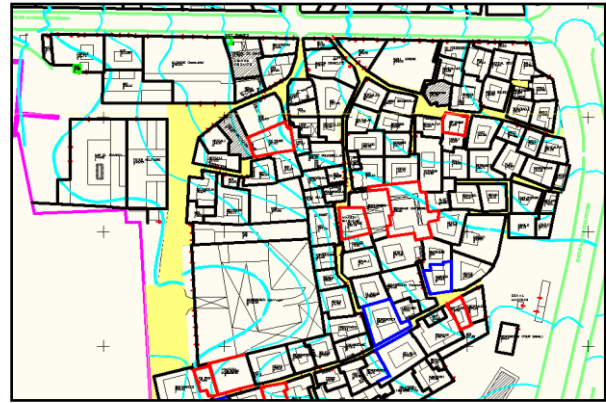


Fig. 26: densité urbaine. Medina de Tlemcen-Quartier R'hiba.

Source : Bulgar project, septembre 1985.

C. Le zonage climatique

Il permet d'adapter une ambiance thermique, l'occupation des divers espaces d'un bâtiment varie, les zones habitées en permanence le jour ou la nuit nécessitent le plus de chaleur en hiver et sont séparées de l'extérieur par des espaces intermédiaires, dits « tampon »²⁰, qui joue le rôle de transition et de protection thermique. Cette hiérarchisation des espaces assure la transition entre l'extérieur et l'intérieur et augmente le confort²¹.

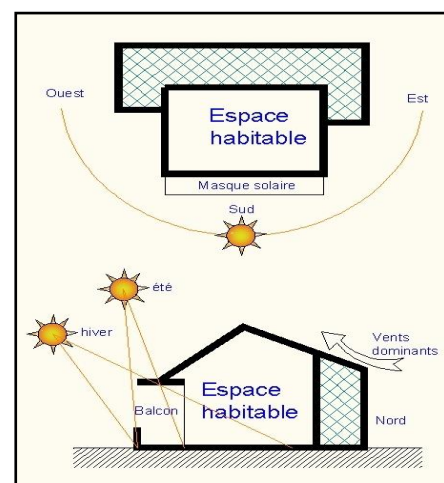


Fig. 27: Principes du zonage.

Source : Architecture et climat, traité par l'auteur.

D. La thermocirculation

Lorsque sous l'effet du rayonnement solaire, une paroi intérieure s'échauffe, elle cède une partie de la chaleur accumulée à l'air ambiant par convection. A cet instant, l'air acquiert un mouvement ascendant créant un appel d'air plus frais ; les mouvements d'air dus aux gradients de température ont une allure plutôt verticale²².

E. La forme de l'enveloppe (compacité)

Une forme bâtie autant compacte que possible permet de réduire les déperditions thermiques, qui sont fonction de la surface des parois en contact avec l'extérieur ou avec le sol. La compacité est calculée comme le rapport entre le volume et la surface de déperdition, correspondant à l'enveloppe extérieure du bâtiment²³.

²⁰ BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan. *Op. cit.*, p27.

²¹ HAUGLUSTAINE Jean-Marie, SIMON Francy, « La conception globale de l'enveloppe et l'énergie, guide pratique pour les architectes », février 2006.

²² Ibid, p66.

²³ Ibid, p68.

La compacité varie par rapport ²⁴ :

- à la forme (à volume constant),
- à la taille (à forme constante),
- au mode de contact (à forme et volume constants).

L'architecture vernaculaire, a toujours cherché à optimiser le rapport surface / volume, notamment par la densité du tissu et de la typologie introvertie « patio ».

F. L'orientation du bâtiment

Une bonne orientation suppose une bonne compréhension de la géométrie solaire, elle permet la combinaison entre les apports solaires en hiver avec une protection du soleil en été et en mi-saison.

Il est admis que toute forme allongée suivant l'axe Est-Ouest présente les meilleures performances thermiques.

En Algérie, l'orientation sud est la plus privilégiée. En effet, pendant la période hivernale les ouvertures vers le sud nous permettent de capter les rayons solaires, contrairement à la période estivale où la position du soleil est haute. (Fig. 29).

La position relative du soleil est repérée par son azimut (c'est l'angle horizontal formé par un plan vertical passant par le soleil et le plan méridien du point d'observation) et sa hauteur angulaire (c'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan de l'horizon), c'est la course solaire.

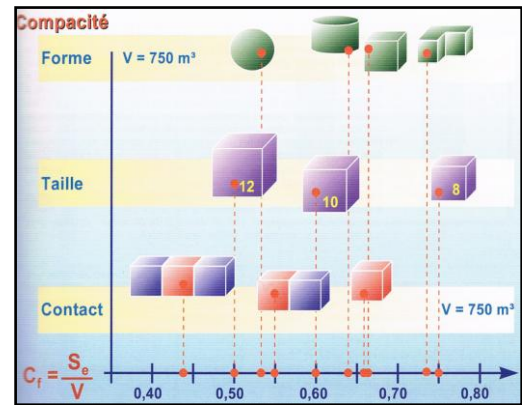


Fig. 28: Variation de la compacité.

Source : LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p83.

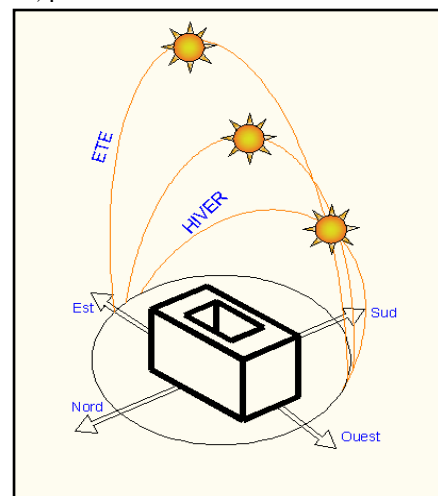


Fig. 29: Variation des apports énergétiques en fonction de la hauteur du rayonnement solaire.

Source : BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan. *Op.cit.*, p 17, traité par l'auteur.

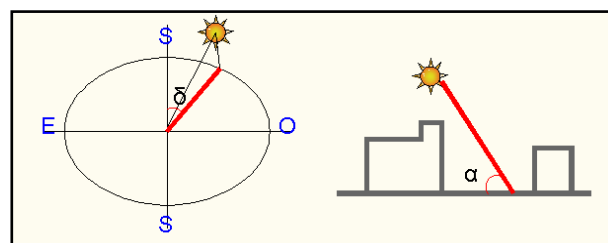


Fig. 30: Repères de la position du soleil.

Source : BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan. *Op.cit.*, p 17, traité par l'auteur.

²⁴ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op. cit.*, p 83.

G. Les vents

Le vent est un déplacement d'air, essentiellement horizontal, d'une zone de haute pression (masse d'air froid) vers une zone de basse pression (masse d'air chaud).

La topographie du site et l'environnement de proximité du bâti influent sur la potentialité de la ventilation naturelle. Le potentiel de ventilation naturelle dépend de l'orientation de l'habitat par rapport au vent et de sa position dans le relief²⁵.

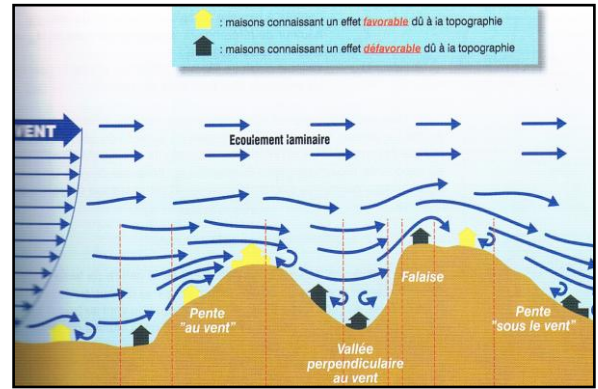


Fig. 31: Le vent et la topographie.

Source : LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p142.

H. Exposition des façades

Les échanges de chaleur, les déperditions thermiques et les apports de chaleur ainsi que les apports solaires proviennent principalement des ouvertures. L'inclinaison la plus efficace se situe entre 45° et la verticale 90°²⁶. La toiture, la cinquième façade, est la partie la plus exposée en été. Il est recommandé, pour éviter les surchauffes²⁷, d'orienter les prises de jour de façon à éviter autant que possible les pénétrations solaires directes.

Dans le cas de tissus à patio, cette façade est la principale source d'éclairage naturel et de régulation climatique.

I. Les revêtements extérieurs de l'enveloppe

Cheng. V²⁸ affirme que l'application de la couleur de surface claire sur une façade est un moyen très efficace pour réduire la température intérieure et participe donc à la protection solaire du bâti en climat chaud.

J. L'utilisation de la végétation et de l'eau

Par sa masse thermique élevée, l'eau atténue les fluctuations de température. En retirant de la chaleur à l'air pour passer à l'état de vapeur, elle réduit la température ambiante. La végétation procure de l'ombrage et réduit donc l'isolation directe sur les bâtiments et les occupants²⁹ (fig. 32); elle fait écran aux vents tout en favorisant la ventilation, et diminue les pertes par convection du bâtiment.

²⁵ Ibid.

²⁶ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, Paris, 2005, p 67.

²⁷ KHALEF Naima, Etude de patrimoine architectural de la période ottomane : entre valeurs et confort, thèse de magister, université de Tiziouzou, 2012.

²⁸ GIVONI Baruch, l'homme, l'architecture et le climat, Ed Parenthèses, 1986, p43.

²⁹ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, 2005, p77.

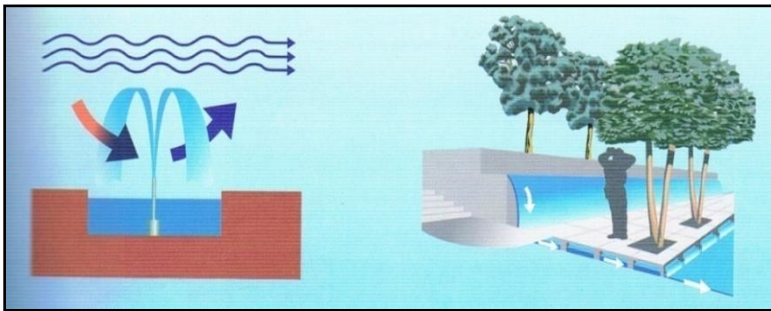


Fig. 32: Techniques utilisées à l'exposition universelle de Séville en 1992 (Espagne).

Source : LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p140.

K. La ventilation naturelle

Elle permet de renouveler l'air vicié par de l'air frais et sain, elle permet un mouvement d'air qui joue sur le confort thermique³⁰. Selon Gandemer G³¹, la ventilation naturelle est provoquée par une différence de température ou de pression entre les façades d'un bâtiment.

La ventilation naturelle a deux grands « moteurs », une façade au vent est en surpression ou sous le vent qui est en dépression, et le tirage thermique³² qui est le renouvellement d'air par effet de cheminée (Fig. 33), il est efficace en hiver et les nuits d'été.

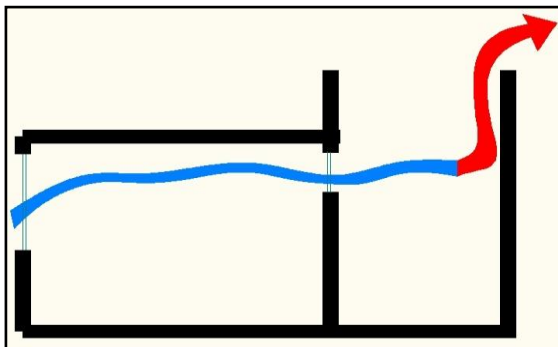


Fig. 33: Ventilation par tirage d'air.

Source: Auteur.

Donc dans nos climats, on favorise la ventilation nocturne qui permet de rafraîchir la construction et d'éviter les surchauffes en journée. Ce mécanisme est cependant conditionné par l'organisation interne du bâtiment et l'utilisation des dispositifs architecturaux qui doivent permettre la libre circulation de l'air, ainsi que par la disposition des ouvertures et leurs grandeurs. Nous analyserons par la suite des exemples de l'architecture vernaculaire qui proposent des typologies d'habitat adaptés aux climats et aux matériaux locaux.

1.2.2. Stratégies bioclimatiques pour améliorer le confort thermique

En été comme en hiver, l'architecture bioclimatique a développé des stratégies passives, profitant des aspects favorables de l'environnement, pour créer une ambiance intérieure confortable :

³⁰ MAZARI Mohammed. *Op. cit.*, p46.

³¹ GANDEMER Jaques , GUYOT Alain, intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Ed Ministère de l'équipement, Direction de l'aménagement foncier et de l'urbanisme, 1976.

³² FERNANDEZ Pierre, LAVIGNE Pierre. *Op.cit.*, p290.

A. Le confort d'hiver

Au confort d'hiver répond la stratégie du chaud : capter la chaleur du rayonnement solaire, la stocker dans la masse du matériau à forte inertie thermique, la conserver et enfin la distribuer dans l'habitat tout en régulant³³.

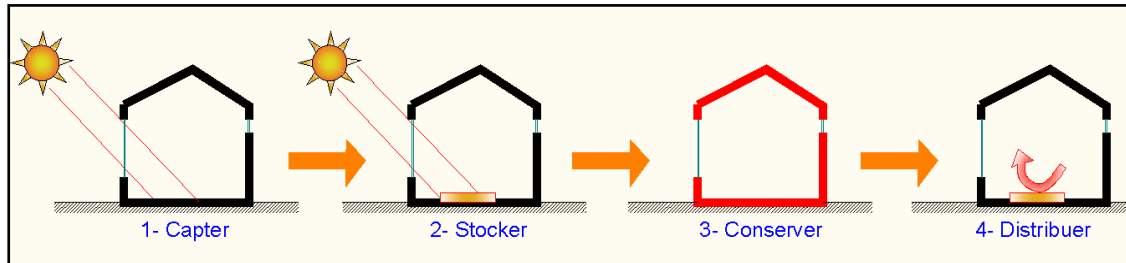


Fig. 34: Concepts de la stratégie du chaud.

Source : LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p31, traité par l'auteur.

B. Le confort d'été

Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement³⁴.

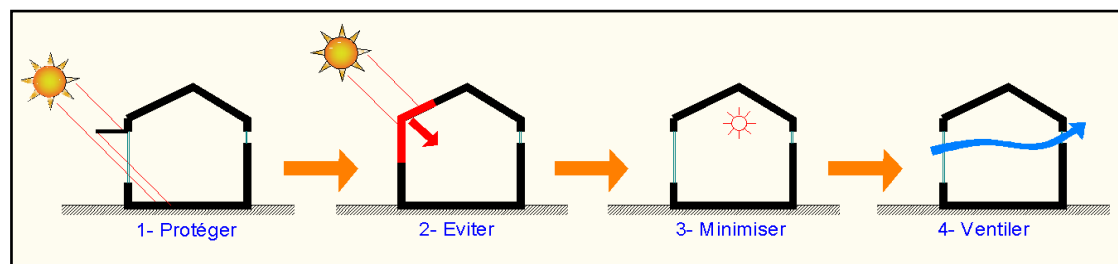


Fig. 35: Concepts de la stratégie du froid.

Source : LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p32, traité par l'auteur.

2. Principes de conception en climat méditerranéen

2.1. Le climat méditerranéen

Le climat méditerranéen s'étend des latitudes 30° à 40° au nord de l'équateur. En été, les températures moyennes maximales varient de 25° à 38 °C le jour et de 16° à 30 °C la nuit³⁵. En saison, l'humidité relative est élevée, 70 à 80 %, les vents locaux sont faibles et la brise de mer joue un rôle régulateur et rafraîchissant. Par contre en hiver, les températures moyennes maximales diurnes atteignent 8° à 21° et les températures nocturnes varient de 0° à 18 °C, l'humidité relative est de 60 à 70 %.

³³ BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan. *Op. cit.*, p44.

³⁴ Ibid, p32.

³⁵ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p113.

2.2.Recommandations architecturales

En climat méditerranéen, il est nécessaire de favoriser les mouvements d'air par le biais de petites ouvertures face aux vents avec la typologie du patio qui joue le rôle du tirant thermique, la ventilation diurne est très efficace tant que la température extérieure ne dépasse pas la température de confort. Cependant, dès que les températures diurnes extérieures deviennent trop élevées, la ventilation nocturne combinée au principe d'inertie permet de maintenir des limites de confort acceptable, en d'autres termes, répondre à une double stratégie du froid et du chaud³⁶.

Aussi l'utilisation des couleurs claires en revêtement de façade renforcent la protection solaire.

2.2.1. Le choix des matériaux

L'intégration de la réflexion de l'architecture vernaculaire, avec des matériaux locaux, à faible contenu énergétique et faible impact environnemental³⁷ permet de rechercher un confort tout en proposant des solutions appropriées aux modes d'habitat³⁸.

Les matériaux utilisés, massifs, disponibles sur place, tels que la terre pour le pisé ou pour l'adobe, ou la pierre associée à l'épaisseur des parois ainsi que des toitures lourdes³⁹ assurent une bonne inertie ainsi que le badigeonnage des murs par des enduits à base de chaux permettant de réfléchir le rayonnement solaire et évitant un échauffement excessif.

Pour le choix de ces matériaux, on doit prendre en considération la notion de durabilité. Leur pérennité est assurée par leur résistance dans le temps, c'est le cas des murs massifs en pisé, pierres ou mixte. Ainsi, il faut participer au développement local⁴⁰ par la valorisation des ressources locales : main d'œuvre, savoir-faire et matériaux.

2.2.2. L'implantation

Les Médinas du sud de la méditerranée sont constituées de maisons mitoyennes de hauteur moyenne, formant un tissu complexe et dense, avec une stratégie d'accolement du bâti qui permet une réduction considérable des surfaces exposées au soleil en été. Le réchauffement de la masse des maisons est évité grâce aux ombres portées dues à l'étroitesse typique des ruelles.

³⁶ Ibid, p 121.

³⁷ FERNANDEZ Pierre, LAVIGNE Pierre. *Op. cit.*, p30.

³⁸ LIEBARD Alain, DE HERDE André *Op. cit.*, p 132.

³⁹ Ibid, p 25.

⁴⁰ Ibid, p 132.

2.2.3. Organisation intérieure

Une organisation centrée autour du patio est l'élément principal jouant le rôle de puits de lumière et de régulateur thermique. Ce seul « dehors » en dedans est le principal intermédiaire entre l'intérieur et l'extérieur. Toutes les pièces lui font face, y puisant jour et fraîcheur.

2.2.4. Fonction climatique du patio

Les patios n'ont pas de toiture. On dispose de 2 fois plus de lumière naturelle dans des locaux jouxtant une cour que dans des locaux jouxtant un atrium⁴¹. Dans le climat méditerranéen, il est considéré comme régulateur climatique et devient l'espace de lumière, d'eau et de végétation⁴².

« Le patio permet de passer constamment du soleil à l'ombre, de l'humide au sec. Dans un pays où le climat est contrasté avec un soleil très chaud d'une intensité lumineuse violente et air froid ou humide, les maisons, fermées aux regards, mais ouvertes au vent offrent des pièces pleines d'ombre et de courants d'air »⁴³. (Fig. 36).

Les matériaux traditionnels tels que la pierre, la terre, le bois, par effet de capillarité absorbent l'eau qui peut alors s'évaporer de leurs surfaces et ainsi empêcher l'air intérieur de se réchauffer par convection⁴⁴, les avantages du patio sont multiples : inertie thermique du sol, réduction de l'exposition au soleil par un ombrage maximal, stratification de l'air avec réservoir d'air frais au fond du patio, réduction de l'exposition aux vents, et aux poussières, etc.

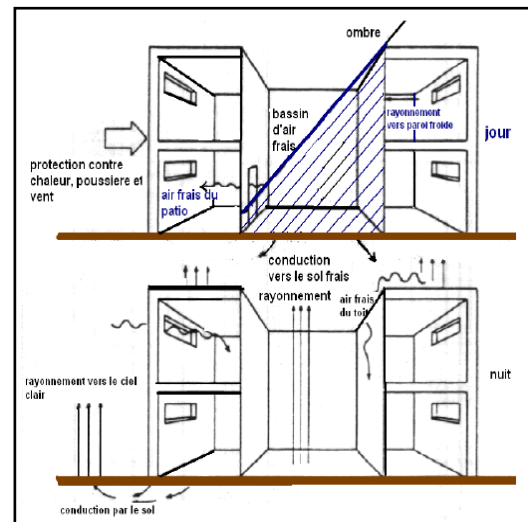


Fig. 36: La fonction climatique du patio.

Source: SCUDO Gianni, « Climatic design in the Arab courtyard houses Environmental Design ». *Op.cit.*, p1.

2.3. L'architecture vernaculaire

L'adjectif vernaculaire tire son origine du mot latin vernaculus qui signifie selon le dictionnaire historique de la langue française ce qui est « relatif aux esclaves nés dans la maison » et au figuré « qui est du pays, indigène »⁴⁵.

L'architecture savante est l'architecture vernaculaire (archi du lieu ou « sans architecte »). Elle est le témoignage d'une réflexion profonde sur l'habitat local. Le climat n'est pas le seul moteur de ce mode

⁴¹ Ibid., p 176.

⁴² RAVEREAU André, La casbah d'Alger, et le site créa la ville, Ed Sindbad, 1989, p59.

⁴³ PETONNET C, «Espace, distance et dimension dans une société musulmane», In : L'Homme, 1972, tome 12n°2, pp.47-84.

⁴⁴ SCUDO Gianni, « Climatic design in the Arab courtyard houses Environmental Design », Journal of the Islamic Environmental Centre, 1988, p1.

⁴⁵ REY A, vernaculaire, in Dictionnaire historique de la langue française, v3, Paris, dictionnaire Le Robert 1993, p4035.

de construction, comme l'a montré A. Rapoport dans "Pour une anthropologie de la maison", en 1972⁴⁶. Il constitue un facteur important, intervenant aux côtés d'autres facteurs culturels, sociaux, économiques, etc. Cette architecture est donc façonnée par le climat (orientation, type de fenêtre, etc.), les matériaux disponibles, l'état de la technologie, l'organisation du travail et les rapports sociaux.

2.4. Dispositifs architecturaux de l'habitat vernaculaire méditerranéen

2.4.1. Les tours à vents « Melkef »

Elles constituent un dispositif technique pour la ventilation naturelle dans l'habitat traditionnel : c'est une sorte de canal cheminée conduisant les brises d'air en hauteur afin de les diriger vers le bas des pièces à ventiler⁴⁷. L'air introduit est rafraîchi avant de pénétrer dans l'habitat et les problèmes de poussières liés à la ventilation sont diminués grâce à l'humidité relative de l'air plus élevée⁴⁸.

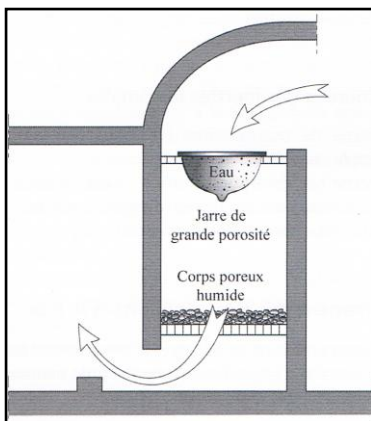


Fig. 38: Dispositifs de refroidissement de l'air par vaporisation d'eau.

Source : FERNANDEZ Pierre, LAVIGNE Pierre. *Op.cit.*, p344.

2.4.2. La porosité à l'air des parois

Les façades de l'habitat traditionnel sont peu poreuses. En climat méditerranéen, il est préférable de placer les ouvertures du côté de la façade sous le vent afin de créer à l'intérieur de l'habitat une zone dépressionnaire plutôt que l'inverse⁵⁰. Le taux minimum de porosité est de 25%. Les ouvertures verticales doivent être protégées des pluies obliques par des débords.

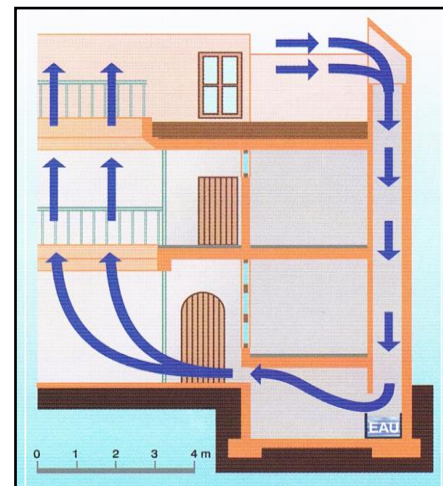


Fig. 37: Principe des tours à vent.

Source : LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op.cit.*, p175.

Leurs sommets sont généralement en forme d'entonnoir, orientés face aux vents. La forte inertie des matériaux du conduit peut rafraîchir l'air efficacement. Ce système est amélioré par la suspension de jarres poreuses placées dans le canal et de bassins d'eaux situés en contrebas⁴⁹. Cela permet d'humidifier le filet d'air sec et d'abaisser ainsi sa température grâce à l'évaporation de l'eau.

⁴⁶ RAPOPORT Amos, Pour une anthropologie de la maison, Ed Dunod, Paris, 1972, p08.

⁴⁷ MANSOURI Yasmine, ALLARD Francis, MUSY Marjorie, Conceptual implementation of ventilation strategy, 18th International IBPSA Conférence, Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003.

⁴⁸ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op. cit.*, p175.

⁴⁹ SAFARZADEH H, BAHADORI M.N, «Passive cooling effects of courtyards», Elsevier, 2004, p3.

⁵⁰ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op. cit.*, p 160.

2.4.3. Le moucharabieh

C'est un dispositif d'ouverture poreux, généralement en bois, précieux avec sa décoration et qui permet une ventilation naturelle.

2.5. Architecture vernaculaire vers la durabilité

L'architecture vernaculaire est bâtie sur la base de matériaux locaux, naturels et écologiques, répondant à un bon rendement énergétique en termes d'inertie et de résistances thermiques. Ces procédés traditionnels pourraient être une base de réflexion pour la conception d'architecture durable, et qui mettrait en symbiose l'homme et son milieu naturel.

3. Les performances thermiques

En conception bioclimatique, les transferts thermiques qui nous intéressent, ceux issus des événements climatiques extérieurs et ceux des apports intérieurs, sont variables dans le temps.

3.1.L'isolation thermique

Au plan architectural, le concept de compacité règle les problèmes de déperditions thermiques, par la suite l'avènement de l'isolant libère l'architecture de la contrainte de forme, l'isolation thermique permet à la fois de réduire les consommations d'énergie, et d'accroître le confort.

3.2.La conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau est égale au flux de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde et par mètre carré de surface, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1°C ⁵¹. Elle s'exprime en $(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$.

3.3.La capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau désigne son aptitude à stocker de la chaleur, elle est exprimée en Watt heure par mètre cube Kelvin $(\text{Wh}/\text{m}^3.\text{K})$.

3.4.La résistance thermique

La résistance thermique R d'un matériau traduit sa capacité à empêcher le passage de la chaleur, pour une épaisseur donnée⁵². Elle s'exprime selon la formule : $R=e / \lambda$, où, R est la résistance thermique $(\text{m}^2.\text{K}/\text{W})$, e épaisseur de l'isolant (m) et λ conductivité thermique $(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$.

⁵¹ CABIROL Thierry, FAURE Daniel, ROUX Daniel. *Op. cit.*, p20.

⁵² Ibid, p 22.

3.5. La diffusivité thermique

C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle s'exprime en $m^2/heure$. On parle de déphasage de 10 à 12 h quand il permet d'atténuer les différences de température entre le jour et la nuit. "a", la diffusivité thermique s'exprime par : $a = \lambda / \rho \times c$.

3.6. L'effusivité thermique (chaleur subjective)

L'effusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à absorber ou à restituer une puissance thermique ($(W/m^2.K)^{1/2}$).

3.7. L'inertie thermique

D'après Liebard A « *l'inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant de la paroi de stockage, Une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. Ceci est particulièrement intéressant dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante.* »⁵³. Le maximum de température atteint sur la face extérieure n'est pas immédiatement ressenti sur la face intérieure de la paroi⁵⁴.

4. Exemples de bâtiments vernaculaires à grande inertie thermique

Les habitations traditionnelles possèdent des qualités architecturales usant de moyens simples mais performants, répondant positivement aux sévérités climatiques. En période caniculaire, la forte inertie des matériaux est capable d'atténuer les variations de température en stockant la chaleur excessive des journées d'été pour la restituer la nuit. En hiver, le patio permet d'emmagasiner les précieuses calories pour faire face aux jours et nuits froids. En réalité « *la science de la construction traditionnelle correspond à une connaissance exacte et raisonnée, fondée sur l'expérimentation du comportement en œuvre des matériaux de construction..., exclusivement expérimentale et qui s'est développée sans aucune théorisation mathématique. Son caractère scientifique est parfois occulté à nos yeux* »⁵⁵.

Les exemples suivant feront l'objet d'une illustration des traditions de la construction vernaculaire qui expriment une adaptation thermique particulière pour s'adapter à la rigueur du climat.

⁵³ LIEBARD Alain, DE HERDE André. *Op. cit*, p 91.

⁵⁴ Ibid, p 133.

⁵⁵ COIGNET Jean, Réhabilitation : arts de bâtir traditionnel connaissances e techniques, Aix-en-Provence, Ed Edisud, 1987, p21.

4.1. Le nouveau Gourna

Le village du vieux Gourna a été construit sur un site qui était plein de tombeaux de nobles car les gournis n'avait pas su gérer leur trésor.

Ceci poussa le département des antiquités à prendre des mesures concrètes pour Gourna. Alors pour revaloriser ce site, il a été construit un nouveau village loin des vestiges⁵⁶.



Fig. 39: Le vieux Gourna.

Source : FATHY Hassan, construire avec le peuple, Ed Jérôme Martineau, 1970, planche 28.

4.1.1. Une architecture vernaculaire

L'intention était de rendre au gournis l'héritage d'une forte tradition d'inspiration locale, entraînant la coopération active de clients et d'artisans habiles⁵⁷. Cette architecture traditionnelle s'adaptait à son environnement, issue du paysage avec des formes naturelles s'inspirant de « la voûte nubienne » lancée dans l'espace sans cintre ni échafaudage⁵⁸.

4.1.2. Le climat, l'architecture et les matériaux

La haute Égypte se caractérise par un climat chaud et aride, la brique de boue est un mauvais conducteur de chaleur, mais peu solide donc nécessitant des murs épais qui conservent la chaleur de la journée pour la restituer la nuit⁵⁹; ce régime de température peut être modifié avec l'introduction d'une cour intérieure pour que l'air froid descende.

4.1.3. L'orientation du soleil et du vent

La circulation de l'air qui est un facteur important du confort, peut être modifiée par des ouvertures qui doivent être situées sous le vent dominant : c'est-à-dire mettre des ouvertures du côté opposé au vent et de petites ouvertures face au vent.

4.1.4. Le malkaf, ou capteur d'air

Le capteur d'air utilisé dans les écoles de Gourna se compose d'une gaine de ventilation en forme de cheminée avec une large ouverture placée très haut, face au vent dominant, à l'intérieur est placé un plateau métallique incliné rempli de charbon de bois mouillé pour humidifier l'air.

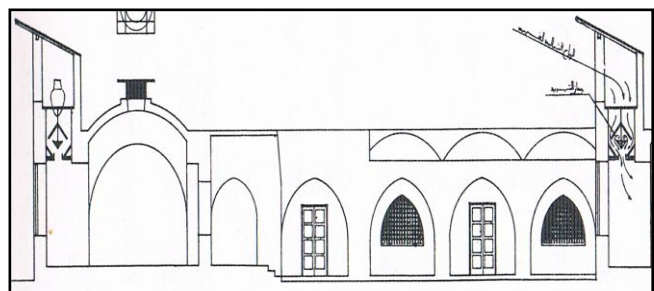


Fig. 40: Coupe du système d'aération de l'école des filles.

Source : FATHY Hassan. *Op.cit.*, planche 100

⁵⁶ FATHY Hassan. *Op.cit.*, pp 44-48.

⁵⁷ Ibid, pp80-86-89.

⁵⁸ EL-WAKIL Leila, Hassan Fathy dans son temps, publication dans Hassan Fathy, une ambition égyptienne, 2012, p05.

⁵⁹ FATHY Hassan. *Op.cit. Op. cit.*, p 93.

En Égypte, les villageois préfèrent regrouper leurs maisons en une masse presque monolithique regroupée autour d'une petite place. Le plan des maisons est irrégulier, ce qui rappelle la variété et l'originalité de conception qui s'adaptera aux gens qui y vivront. Chaque maison comporte une cour, et chaque groupe de maisons est disposé autour d'une place appelée « cour du pache ».

L'économie du nouveau Gourná reposait forcément sur le commerce des produits manufacturés : « l'artisanat » et « l'exposition du tissage et de la poterie ». Gourná fut même un lieu de visite pour les touristes de la vallée des tombes⁶⁰. L'apprentissage des métiers d'artisanat dans le khan fut largement développé.

Quatre quartiers ont été construits pour loger les groupes tribaux, un marché à l'entrée de la ville et une place centrale où fut bâtie une mosquée.

Le théâtre et le hall d'exposition permanente, étaient construits à la brique de boue. Deux écoles furent prévues, une pour les garçons et l'autre pour les filles. (Fig. 42, 43, 44, 45 et 46).

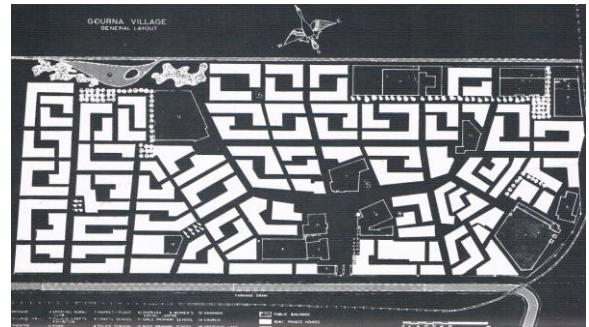


Fig. 41: Plan du Gourná el-Gedida, 1946.
Source : FATHY Hassan. *Op. cit.* planche 66.



Fig. 42: La mosquée du nouveau Gourná.

Source : FATHY Hassan. *Op.cit.*, planches 74-75.

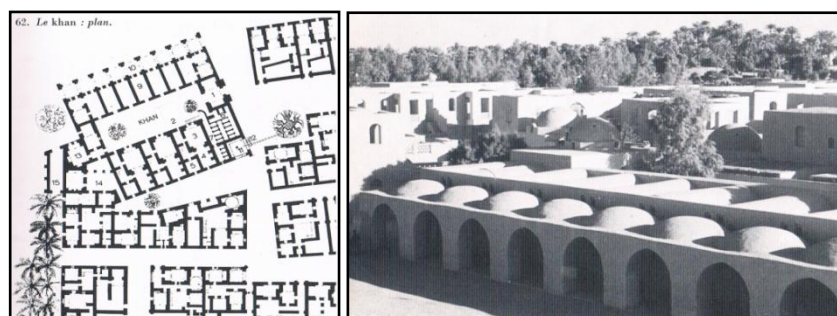


Fig. 43: Le khan, plan, façade nord.

Source : FATHY Hassan. *Op.cit.*, planches 62-64.

⁶⁰ Ibid, p116.

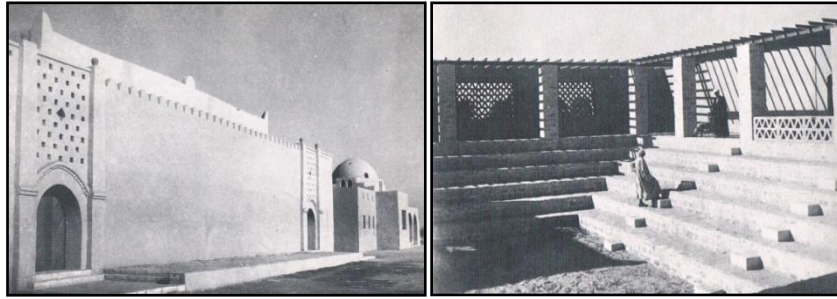


Fig. 44: Façade du théâtre.

Source : FATHY Hassan. *Op.cit.*, planches 91-92.

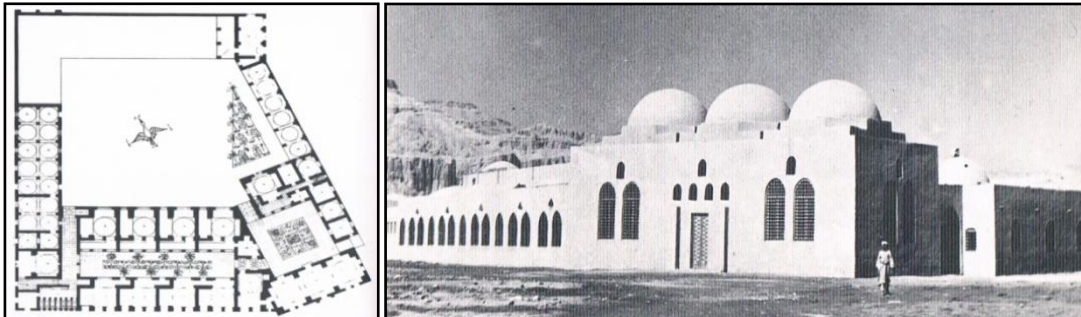


Fig. 45: L'école des garçons, plan et façade.

Source : FATHY Hassan. *Op.cit.*, planches 93-94.

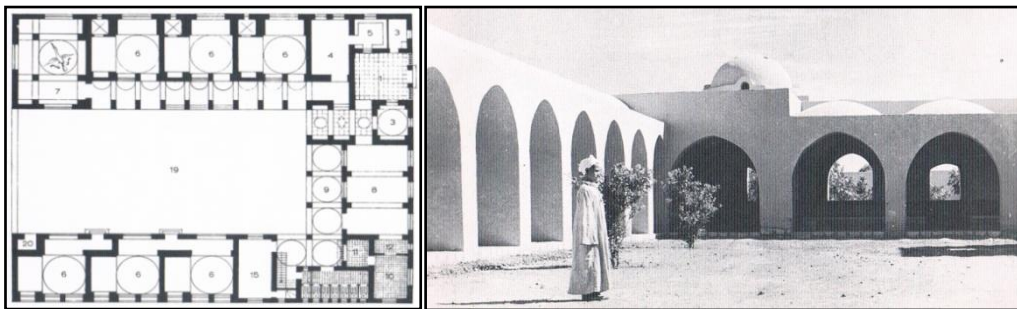


Fig. 46: Plan, cour de l'école des filles.

Source : FATHY Hassan. *Op.cit.*, planches 99-101.

4.2. Ghadamès, la perle du désert

Bâtie dans une oasis en Libye, à la Lisière de la Tunisie et de l'Algérie, Ghadamès surnommée en langue arabe « la perle du désert », compte parmi les plus anciennes cités présahariennes. À la croisée de nombreuses routes caravanières, elle fut pendant des siècles une des cités les plus commerçantes de la région pour sa situation stratégique, à la croisée des pistes entre Méditerranée et Sahara⁶¹. Aujourd'hui, elle est classée au patrimoine mondial de l'UNESCO : Ici, un modèle exemplaire d'habitat durable est né, par pure nécessité.

⁶¹ FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op.cit.*, p18.



Fig. 47: vus sur Ghadamès.

Source : <http://www.desbellesphotos.blogspot.com/2013/06/la-perle-du-desert-ghadames-libye.html>.

4.2.1. Un environnement hostile

La fournaise du désert impose la construction d'un habitat naturellement frais et climatisé. C'est en réponse à cette triple contrainte - thermique, agricole et défensive qu'est née une ville très compacte et faite de hautes maisons collées les unes aux autres.



Fig. 48: vue aérienne sur Ghadamès.

Source :

<http://www.desbellesphotos.blogspot.com/2013/06/la-perle-du-desert-ghadames-libye.html>.

4.2.2. Une ville climatisée

Sur les terrasses de la vieille ville, un badigeon uniforme de plâtre blanc réfléchit les rayons du soleil afin de limiter les surchauffes. Les maisons sont construites autour et au-dessus d'un réseau labyrinthique d'étroites ruelles couvertes avec des puits de lumière⁶², qui rafraîchissent la ville. Cette ventilation naturelle se prolonge depuis la rue vers l'intérieur des maisons à travers l'utilisation des tours à vent. (Fig. 49 et 50).

⁶² Ibid, p 18.

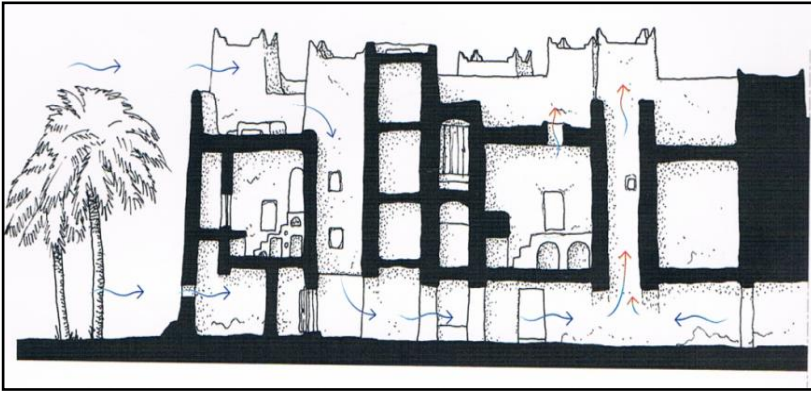


Fig. 49: Coupes sur un fragment de maisons à Ghadamès.

Source : FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op.cit.*, p21.

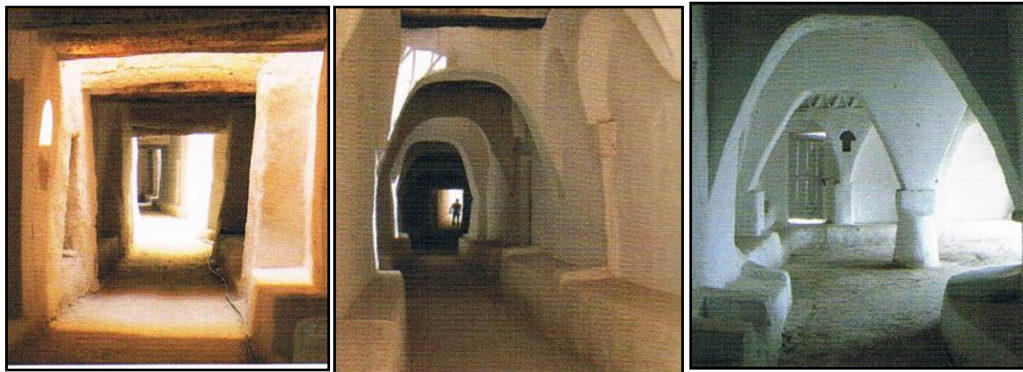


Fig. 50: Ruelles de Ghadamès.

Source : FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op.cit.*, p20.

4.2.3. Se protéger de la chaleur

La fraîcheur provient des murs et planchers massifs en terre crue, qui amortissent les écarts de température entre la nuit et le jour. Malgré la grande portée des poutres de palmiers qui surplombent la pièce principale, une énorme dalle en terre de 50 cm d'épaisseur s'ajoute, elle est constituée de deux couches «éponges» légères et poreuses, l'une de graviers de gypse et l'autre de terre pulvérulente qui absorbent l'eau de pluie, allègent la terrasse et l'isolent de la chaleur de la journée et du froid de la nuit.

4.2.4. Une enquête sur le confort thermique dans la saison d'été à Ghadamès, Libye

C'est une sorte d'enquête de confort thermique dans les deux types de bâtiments; l'ancien (traditionnel) et le nouveau (contemporain). L'enquête a été réalisée pendant les saisons d'été 1997 et 1998, présentant un climat sec et chaud de l'Afrique du Nord.

Des questionnaires ont été recueillis auprès des résidents de 51 bâtiments: 24 vieux bâtiments utilisent des systèmes de ventilation naturelle avec cours et 27 nouveaux bâtiments utilisent des systèmes de climatisation.

A. Présentation

Situé dans le désert du Sahara libyen, le sol de Ghadamès comporte l'argile et la pierre. L'usage des matériaux locaux existants, tels que des palmiers, de l'argile et de pierres a bien servi pour construire les bâtiments traditionnels⁶³.

Le climat est caractérisé par la température élevée de l'air, un rayonnement solaire élevé, de faibles pluies, une faible humidité et de nombreuses tempêtes de sable. En été, il fait chaud toute la journée, la température de l'air s'élève à plus de 47°C, tombant à 30°C pendant les nuits. En hiver, le temps est froid pendant la nuit, la température tombant à 0°C pendant la nuit.



Source: EALIWA M.A, TAKI A.H, HOWARTH A.T, SEDEN M.R, An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames, Libya, publication Building and Environment, Elsevier Science, 1999, p 232.



Fig. 51: A- Vieux type de bâtiments à Ghadamès. B- Nouveau type de bâtiments à Ghadamès, 1997.

B. Enquête sur le terrain

Les températures de l'air ont été enregistrées à l'aide de thermocouples (de type T, cuivre / constantan). Ces valeurs ont été enregistrées toutes les 15 min et les valeurs moyennes ont été calculées toutes les heures. Les vitesses de l'air ont été mesurées en utilisant un anémomètre omnidirectionnel. Les températures moyennes ont été mesurées à l'aide d'un thermomètre à globe standard, l'humidité relative a été mesurée aussi.

C. Résultats

- *Votes subjectifs* : Des questionnaires ont été recueillis auprès de 51 bâtiments, à la fois les anciens et les nouveaux bâtiments. Cette figure montre la sensation globale du confort thermique⁶⁴.

⁶³ EALIWA M.A, TAKI A.H, HOWARTH A.T, SEDEN M.R, An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames, Libya, publication Building and Environment, Elsevier Science, 1999, disponible sur www.elsevier.com/locate/buildenv, p 232.

⁶⁴ Ibid, p 234.

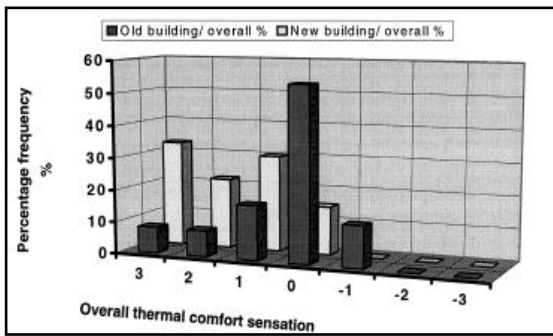


Fig. 52: Comparaison de la sensation de confort thermique globale pour les anciens bâtiments et de nouveaux bâtiments.

Source: EALIWA M.A, TAKI A.H, HOWARTH A.T, SEDEN M.R. *Op.cit.*, p232.

Il montre que 54% des répondants se sentent neutres dans les anciens bâtiments et seulement 15% des répondants dans les nouveaux bâtiments se sentent neutres. Par ailleurs, 13% des personnes ont déclaré comme étant un peu frais dans les bâtiments anciens par rapport à 0% dans les nouveaux bâtiments, avec 8% d'entre eux avec la sensation de chaleur dans les vieux bâtiments, et 33% de sensation de chaleur dans les bâtiments neufs. Ces résultats suggèrent donc que les occupants ont une impression d'ensemble plus élevée de confort thermique dans les anciens bâtiments que dans les nouveaux bâtiments.

En outre, l'enquête a montré que 62% des habitants dans des immeubles anciens ne veulent pas un changement dans leur environnement intérieur, tandis que 38% veulent plus de fraîcheur. Par comparaison, seulement 41% des occupants des nouveaux immeubles ont voté pour qu'il n'y est aucun changement avec 59% pour plus de fraîcheur. Les habitants des anciens bâtiments sont plus satisfaits de leur environnement.

- *Mesures physique* : Seuls 11 bâtiments (5 anciens et 6 nouveaux) ont été impliqués dans à la fois les études objectives et subjectives. Le tableau suivant montre les résultats de mesure physiques:

Bâtiments	Text	Ti	Hr	V	R
nouveau	43	34	45.9	0.04	0.6
nouveau	40	34	35.5	0.05	0.6
ancien	36.2	29	25	0.2	0.6
ancien	39.1	32	29	0.19	0.6

Tableau 02: Échantillon des résultats de mesure des bâtiments anciens et nouveaux dans Ghadamès, 1997.

Source: EALIWA M.A, TAKI A.H, HOWARTH A.T et SEDEN M.R. *Op. cit.*, p232.

Text, température de l'air extérieur;

Ti, température à l'intérieur;

Hr, humidité relative;

V, vitesse de l'air;

R, résistance thermique.

D. Conclusions

Les résultats suggèrent que les gens ont une impression presque unanime de confort thermique dans les anciens bâtiments comparé aux nouveaux bâtiments.

4.3. Maison Tabayi en Iran :

C'est une maison à patio, avec des murs massifs en adobe enduit en mortier de terre, avec revêtement de terre cuite posé au mortier de chaux pour permettre aux sols de respirer. Elle comporte un salon d'hiver situé au nord; sa grande baie vitrée ouverte au sud permet de capter les rayons solaires, que l'arbre sans feuilles laisse passer. (Fig. 53).

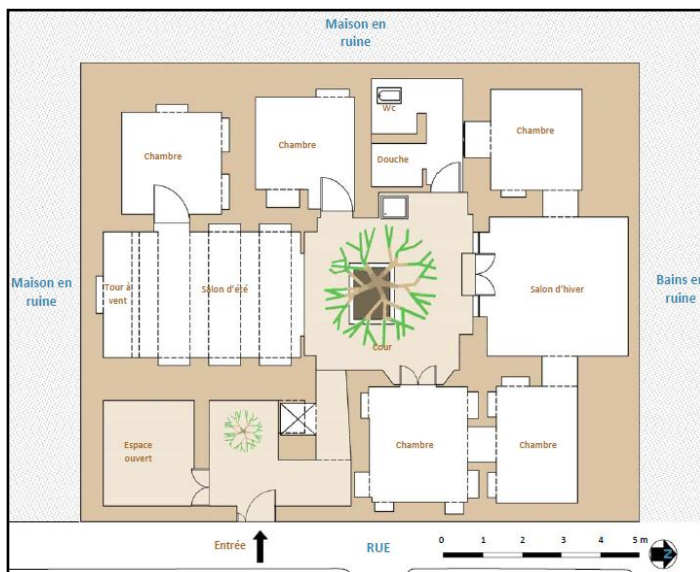


Fig. 53: Plan de la maison Tabayi en Iran

Source : MORISET Sébastien, Conservation et réduction des risques à Ardakan, Ed CRAterre, 2010, p 06, disponible sur : www.craterre.org.

Alors que le salon d'été est le plus grand espace au sud, entièrement ouvert, qui sert de pièce de vie, ce lieu ne reçoit jamais le soleil et bénéficie d'une ventilation constante grâce à la tour à vent haute de 4 mètres qui la coiffe. La tour à vent, ouverte au nord, est une cheminée solaire qui crée des flux d'air ascensionnels⁶⁵. L'arbre, pourvu de feuilles en été, apporte la fraîcheur à la cour grâce à son ombre.

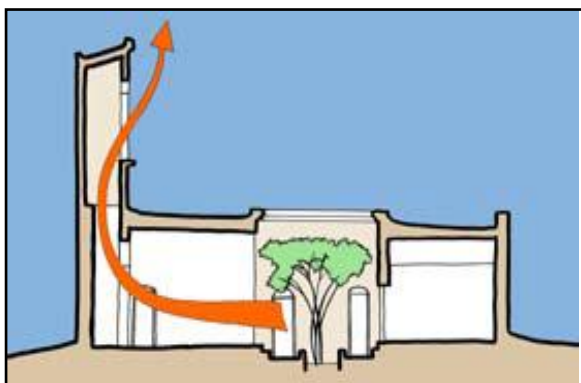


Fig. 54: Ventilation naturelle de la maison Tabayi en Iran

Source : MORISET Sébastien. *Op.cit.*, p 06.

⁶⁵ MORISET Sébastien. *Op.cit.*, p 06.

5. Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous concluons qu'un ensemble de concepts théoriques et pratiques a été forgé autour du confort thermique ressenti dans les constructions en terre ainsi que les facteurs de la durabilité de l'architecture vernaculaire.

Le confort thermique, qualité vitale pour l'espace habité, exige, pour être assuré, de composer harmonieusement avec le climat en garantissant la qualité de l'air par une ventilation efficace, c'est la démarche bioclimatique.

Dans l'architecture vernaculaire, l'enjeu est d'assurer les conditions du confort thermique par l'utilisation des matériaux traditionnels, locaux, recyclables et à forte inertie thermique, ainsi que des stratégies architecturales de protection contre la chaleur et le froid. Nous remarquerons qu'un regain d'intérêt pour ce patrimoine se manifeste ces deux dernières décennies.

Dans le climat méditerranéen, les facteurs environnementaux ont joué un rôle majeur dans le développement des maisons traditionnelles à patio avec des techniques constructives traditionnelles. Il en ressort que ces gestes vernaculaires ont généré un savoir-faire qui répond aux besoins et aspirations, qu'ils soient d'ordre culturels, sociaux ou environnementaux. Ces espaces sont réfléchis comme lieu de repos et de confort.

Après avoir porté notre regard sur le confort thermique, l'architecture vernaculaire dans le climat méditerranéen et sa durabilité, nous avons balayé les principes de l'approche bioclimatique. C'est pourquoi nous allons traiter dans le chapitre suivant l'apport de la contribution de l'architecture vernaculaire à travers le savoir-faire et les techniques constructives comme support méthodologique de notre cas d'étude : la maison de l'Oukil.

Chapitre III :

Technicité des matériaux locaux.

Introduction

La terre banchée a probablement été utilisée dans la construction depuis l'ère néolithique jusqu'à nos jours. Ce procédé constructif est simple et élaboré à la fois, simple par la nature même de sa matière; la terre, mais élaboré par sa mise en œuvre. L'homme a cependant compris depuis longtemps que le principe de compactage de la terre fournirait des constructions et des édifices très résistants et solides capables de traverser les temps. Ainsi le pisé a pu servir à édifier tout type de constructions, des plus élémentaires au plus sophistiquées; de l'abri familial à la muraille défensive des grandes villes, temples, palais, forteresses, citadelles, casbahs, ksours, mosquées, églises. Ces bâtiments révèlent l'intelligence des traditions de la construction qui ont traversé des millénaires.

Nous allons dans ce chapitre tenter d'identifier les différentes variantes de techniques utilisées dans l'objet d'étude et cela en décelant le concept de durabilité et technicité des matériaux, le matériau principal étant la terre banchée. Nous avons donc essayé d'illustrer cette technique à travers un aperçu historique de son utilisation, sa mise en œuvre, ses propriétés, ses pathologies et les mesures à prendre pour le conserver et le restaurer. Nous avons abordé aussi le renouveau de cette technique ainsi que les différentes variantes associées avec ce principe constructif.

1. Présentation de la technique de construction en pisé « la terre banchée »

1.1. Aperçu historique sur la construction en terre banchée dans le monde

1.1.1. L'antiquité

Il semblerait que l'exemple attesté comme le plus ancien dans la construction en pisé soit la grande muraille de Chine, ou plus exactement certains tronçons (V^e- III^e s. av. J-C); mais les archéologues ont mis au jour des vestiges de murs construits en pisé qui semblent avoir été bâtis par la culture Longshan (2600-1900 av. J-C) vers la fin du néolithique, « *une période qui marque aussi la création de villes en Chine* »¹. Les vestiges de la ville de Jiaohe (Chine), un centre de commerce relié à la route de la soie, édifiée en pisé et en adobe datent de III^e s. av. J-C².

Mais c'est probablement en basse Mésopotamie et en Iran durant le néolithique que l'on pourrait faire remonter les premières formes de pisé, les fouilles des sites de Oueili et Djaffarabad ont restitué des briques de grande taille allant jusqu'à 1m de long mais d'épaisseur faible de 15 à 20cm, "*les fouilleurs pensent que ces briques auraient pu avoir été non pas modelées à la main mais pressées entre deux planches*"³.

¹ REAL Ronald, Earth architecture, Ed Princeton Architectural Press, 2008, p17

² ZERHOUNI Selma, GUILLAUD Hubert, MOUYAL Elie, L'architecture de terre au Maroc, Ed ACR Edition, Paris, 2001, p36

³ SAUVAGE Martin, « Les débuts de l'architecture de terre au Proche Orient », in MEDITERRA 2009, Proceedings, Edicom Edizione, Monfalcone, Italie. pp189-198.

D'autres fouilles, ont eu lieu en Espagne dans une ancienne ville phénicienne, La Fonteta dont la période d'existence est située entre VII^e et le VI^e s. av. J-C. Les murs des vestiges seraient en terre massive de largeur variant en 30 et 45cm, la présence d'un joint horizontal de deux pellicules de chaux laisse supposer une véritable existence de la technique du coffrage à cette époque⁴.

Plinie rapporte dans son ouvrage Histoire du Monde ce qui suit: « *Que dirons nous des murailles de pisé qu'on voit en Barbarie (Carthage) et en Espagne, où elles sont appelées murailles de forme puisqu' on en forme la terre entre deux ais, cette terre ainsi pressée, résiste à la pluie, aux vents, et au feu, il n y a ni ciment ni mortier qui soit plus dur que cette terre, ce qui est si vrai, que les guettes et lanternes qu 'Hannibal fit construire en Espagne, et les tours qu'il fit bâtir sur les cimes des montagnes sont encore existantes, néanmoins elles sont en pisé* ⁵ ». On pourrait donc penser que les techniques relatives au pisé sont restées pérennes là où elles existaient déjà depuis la période punique. Par ailleurs, Varron rapporte que la technique était utilisée aux alentours de Rome pour construire des murs de protection des fermes agricoles⁶.

1.1.2. Le moyen âge

Depuis le moyen âge, le Maghreb et l'Espagne ont connu une amplification d'usage du pisé, d'abord dans les ouvrages défensifs (enceintes, forteresses) comme en témoignent l'enceinte d'Agadir (Tlemcen VIII^e s), le rempart aghlabide de Sfax (IX^e s)⁷, la forteresse de Banos de la Encina de l'époque califale en Andalousie (X^e s)⁸, l'enceinte ziride à Grenade (XI^e s), les remparts almoravides de Marrakech et de Tashgimout (XII^e s)⁹ et les murailles almohades de Séville, Fès, Rabat, ainsi que les célèbres remparts nasrides de l'Alhambra de Grenade, le rempart hafside de Tunis, et les enceintes mérinides d'El Mansourah¹⁰.

Il faudra attendre la Moqadema d'Ibn Khaldoun au XIV^{ème} siècle pour pouvoir comprendre réellement quelle était cette technique appelée *tabiya* en Afrique du Nord, l'auteur retrace les étapes de confection de ce type de murs, il cite « ... et l'on y verse un mélange de terre et de chaux que l'on foule ensuite avec des pilons faits exprès pour cet objet. Quand la masse est bien comprimée, et que la terre est suffisamment combinée avec la chaux, on y ajoute encore de la terre à plusieurs reprises, jusqu'à ce que le vide soit tout à fait comblé. Les particules de terre et de chaux se trouvent alors si bien mélangées qu'elles ne forment qu'un seul corps. Ensuite on place ces planches sur la partie du

⁴ ROUILLARD Pierre, GILLED RAT Eric, SALA SELLES Féliciana, L'établissement protohistorique de La Fonteta (fin VIII^e-fin VI^e siècle av J.-C), Vol2, Ed Casa de Velazquez, Madrid, 2007, p143, 144.

⁵ COINTREAU François, L'école d'architecture rurale, ou Leçons; second cahier, Paris, 1791, p 15

⁶ GUILLAUD Hubert, ALVA Alejandro A, «Historical earth architecture and construction in the Mediterranean region what future for such an exceptional cultural legacy? », In Proceedings of the First International Congress on Construction History, 2003, p1110.

⁷ MARÇAIS Georges, L'architecture musulmane d'occident, Ed Arts et métiers graphiques, 1954, p36

⁸ BARRUCAND Marianne, BEDNORZ Achim, Architecture maure en Andalousie, Ed Taschen, 2002, p115.

⁹ Ibid, p141.

¹⁰ MARÇAIS Georges. *Op.cit.*, p571

mur déjà formée, on y entasse encore de la terre et l'on continue ainsi jusqu' 'à ce que les masses de terre, rangées en plusieurs lignes superposées, forment un mur dont toutes les parties tiennent ensemble, comme si elles ne faisaient qu'une seule pièce. Ce genre de construction s'appelle tabia (pisé) ; l'ouvrier qui la fait est désigné par le nom de taouwab (piseur) »¹¹.

Les rares témoignages de l'architecture domestique au moyen âge nous parviennent d'Espagne et du Maroc, les recherches archéologiques ont permis de constater des maisons de villages qui ont été construits en pisé, Musa en Catalogne, Bufile et Montroy dans la province de Valence¹² et Saltés en Andalousie¹³. L'emploi du pisé dans ces sites devrait remonter au XII^e et XIII^e siècle¹⁴.

Au Maroc, la construction en pisé dans les palais de Moulay Ismail ainsi que les maisons de Meknès, de Fès et de Marrakech, dans le prolongement de la tradition mérinide a utilisé la brique et le pisé¹⁵. Les Casbahs et Ksour du Maghreb eurent recours à la technique du pisé, une partie des villes septentrionales de l'Algérie et du Maroc du XV^e et XVI^e comptent un certain nombre d'habitations ou d'édifices élevés en pisé.

La France connaît elle aussi l'émergence d'un foyer d'apparition de la technique du pisé sur le littoral méditerranéen, d'abord à Marseille où les fouilles archéologiques ont exhumé les premiers exemples de construction en pisé datant de la fin du XII^e s¹⁶, ensuite dans un îlot du quartier médiéval de Saint Mathieu et le quartier suburbain à Narbonne du XIII^e s¹⁷. Plus au Nord, dans la région Rhône-Alpes, le Forez remontant au XIII^e s. La présence des constructions en pisé dans le Sud Est de la France, pourrait accréditer l'hypothèse selon laquelle la technique aurait été diffusée à partir de la Catalogne, qui l'aurait acheminé depuis l'Andalousie, qui l'aurait elle même importé du Maghreb.

En Amérique, bien que les civilisations précolombiennes aient déjà fait usage du pisé et de l'adobe¹⁸, l'usage du pisé ne connaît un véritable essor qu'avec l'arrivée des européens sur le nouveau continent, par les espagnols, comme en témoignent les ruines de La Isabela, le premier établissement fondé par Christophe Colomb en 1493¹⁹. La première ville de fondation espagnole en Amérique du Nord

¹¹ IBN KHALDOUN, Les prolégomènes, T2, traduit en français par Mac Guckin De Slane, édition numérique, p283

¹² BAZZANA André, HUBERT Etienne, «Matériaux et techniques de construction, quelques réflexions à propos de l'habitat villageois dans Al andalus », in Castrum, Volume 6, Ed Casa De Vélazquez, 2000, p30.

¹³ Ibid

¹⁴ MOLENAT Jean Pierre, PASSINI Jean, « L'emploi de la terre dans la construction en nouvelle castille à la fin du moyen âge », in L'architecture de terre en méditerranée, Rabat, 1999, pp.121-131.

¹⁵ MARÇAIS Georges. *Op.cit*, p396, p403.

¹⁶ BAUDREU Dominique, DE CHAZELLES Claire-Anne, GUYONNET François, «Maisons médiévales du sud de la France bâties en terre massive: état de la question », in M.S.A.M.F, 2008, pp149-160.

¹⁷ DE CHAZELLES Claire-Anne, GUYONNET François, «La construction en pisé du Languedoc-Roussillon et de la Provence, du Moyen- âge à l'époque moderne (XIII e- XIX e s)», in Echanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue 2, La construction en terre massive : pisé et bauge, Ed L'Esprou, Monpeulier, 2005, pp.109-139.

¹⁸ ZERHOUNI Selma, GUILLAUD Hubert et MOUYAL Elie. *Op cit.*, p33.

¹⁹ REAL Ronald. *Op.cit*, p17.

St Augustine (Floride) était bâtie avec un pisé mélangeant la terre aux coquillages²⁰. Le pisé nommé *taipa* dans ces régions, a été largement utilisé en Amérique du Sud depuis la colonisation jusqu'à nos jours dans plusieurs contrées du Brésil, du Pérou et du Chili²¹.

1.1.3. L'époque moderne

Le pisé réapparaît au XVIII^e siècle en France, dans les paysages ruraux de la région de la Provence. Le pisé présente souvent dans ces constructions des cordons de chaux entre chaque banchée²². Les pensées physiocrates du siècle des lumières (XVIII^e) s'intéressant à l'amélioration des conditions de vie des populations rurales et de leur habitat vont contribuer à ce renouveau du pisé. C'est ainsi qu'un certain François Cointeraux, va promouvoir la construction en pisé à travers de nombreuses publications, on en compte pas moins de 72 fascicules, dans lesquels il documente et valorise le pisé traditionnel, et lance le procédé du « nouveau pisé ».

Il a été à l'origine de diverses constructions, aussi bien des maisons urbaines et rurales adaptées aux diverses classes sociales. La région Rhône-Alpes renferme un important patrimoine en pisé de la période Cointeraux. En Angleterre, grâce à la traduction de l'architecte Henry Holland l'architecture de pisé rayonnera jusqu'aux États Unis et en Australie²³.

Le pisé a été introduit en Australie avec les colons britanniques vers la fin du XVIII^e et XIX^e siècle, sous l'impact des ouvrages de Cointeraux, la technique a été répandue dans plusieurs régions du pays²⁴.

Le pisé a ainsi traversé les temps et les continents, de l'antiquité à nos jours, de l'Asie jusqu'aux Amériques, cette technique constructive a produit un patrimoine aussi varié qu'innombrable, qu'il est aujourd'hui nécessaire de redécouvrir et de préserver pour le transmettre aux générations futures.

1.2. Le procédé constructif

Le pisé est appelé encore, dans plusieurs langues : en latin *pinsare*, piser; aujourd'hui *pinciare* en italien, ou mode de la terre compactée dans un coffrage, pisé : *rammed earth* en anglais, terre battue dans les termes de maçonnerie du Sud-Ouest de la France; *tapial* en espagnol; *leuh* en marocain²⁵.

La technique du pisé consiste à construire des murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages²⁶, avec une maçonnerie de terre relativement graveleuse, sans adjonction de paille coupée, d'humidité peu excessive, comprimée à l'intérieur d'un coffrage, par

²⁰ EASTON David, WRIGHT Cynthia, *The rammed earth house*, Ed Chelsea Green Publishing, USA, 2007, p9.

²¹ Ibid, p10.

²² Ibid, p11.

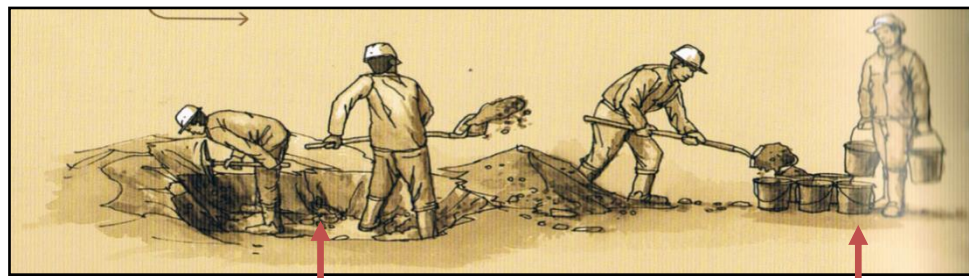
²³ Ibid, p11.

²⁴ ZERHOUNI Selma, GUILLAUD Hubert et MOUYAL Elie. *Op.cit*, p37

²⁵ JEANNET Jacky, PIGNAL Bruno, SCARATO Pascal, *bâtir en pisé technique conception réalisation*, publication de « pisé, terre d'avenir », 2002, p04.

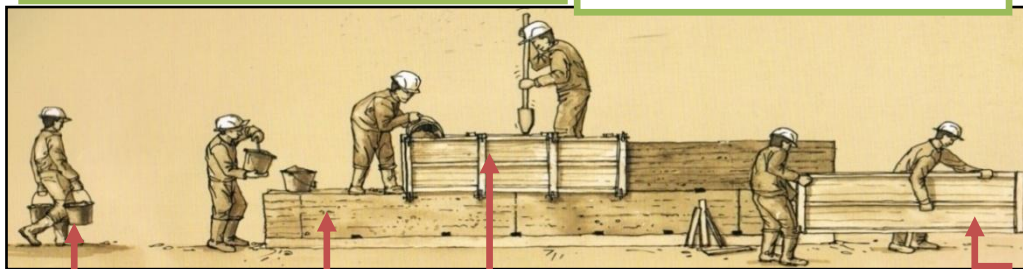
²⁶ FONTAINE Laetitia. *Op. cit.*, p28.

couches successives²⁷, des lits de terre crue (10 à 15 cm maximum) à l'aide d'un pisoir, sorte de masse en bois manipulée manuellement²⁸, ensuite le mur est décoffré immédiatement. (Fig. 55).



La terre est extraite du sol, directement sur le site de construction.

On remplit des seaux avec la terre humide et pulvérulente.



Les seaux sont versés dans le coffrage

La terre est étalée en fine couche dans le coffrage

La terre est compactée avec une masse appelée « pisoir »

Le mur est décoffré

Fig. 55: Cycle de production du pisé.

Source : FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op.cit.*, p28.

Dans les bâtiments traditionnels, les murs sont généralement épais de 60 cm ou plus et s'amincissent. Dans les bâtiments contemporains, les épaisseurs sont souvent plus réduites (40 cm environ) et constantes. Les banchées constituent généralement des « pseudo-blocs » de 50 à 60 cm de hauteur²⁹.

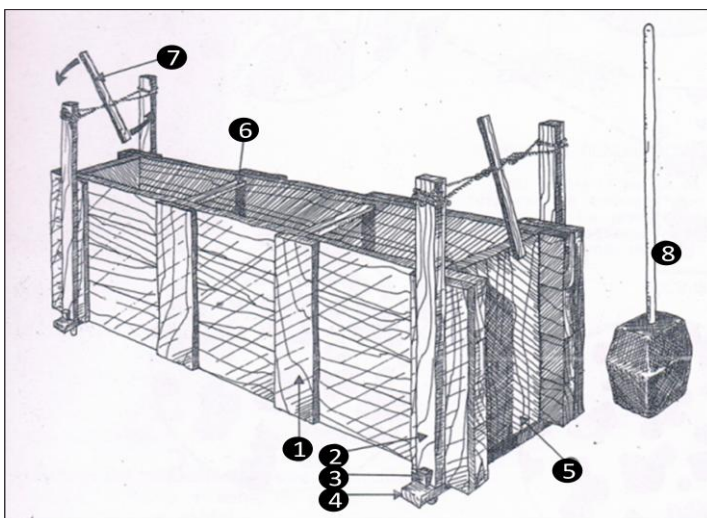


Fig. 56: Outillage du pisé.

1) banche latérale. - 2) montant. - 3) coin de bois permettant la fixation des montants. 4) traverse sur laquelle sont fixés les montants. - 5) planches de bout. - 6) bois d'espacement. - 7) bois et corde de serrage des montants. - 8) pisoir.

Source : BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan. *Op. cit.*, p 9.

²⁷ DUBOST Olga. *Op. cit.*,p4.

²⁸ BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan. *Op. cit.*, p 9.

²⁹ DUBOST Olga. *Op. cit.*,p4.

Les avantages du pisé sont³⁰ :

- Homogénéité du mur.
- Réalisation d'une grande épaisseur en une seule opération.
- Aucun parasite dans les murs.
- Pas de retrait au séchage.
- Pas de pourrissement
- Construction avec peu de bois.
- Bonne tenue aux incendies.

Ses inconvénients³¹:

- Il craint la pluie et les ruissellements (nécessite un enduit de terre+sable ou paille, ou un enduit bâtard chaux+sable).
- Il nécessite un séchage complet des murs avant de réaliser les planchers ou la charpente (sinon il ya mauvaise résistance à la compression).
- Il nécessite une protection contre la pluie pendant toute la période de séchage.
- Il nécessite relativement plus de main d'œuvre que l'adobe.
- Il nécessite une excellente étanchéité en fondation afin d'éviter les remontées d'humidité.
- Il y a aussi la rigidité de la forme (orthogonale).

1.2.1. Le Soubassement, le plancher et les ouvertures

Le soubassement des murs en pisé est en pierre ou en briques de terre cuite, le but étant de remédier aux remontées capillaires, et ruissellements des eaux, c'est le prolongement des fondations, ainsi les débordements des couvertures pour protéger des murs des eaux pluviales : «avoir de bonnes bottes, et un bon chapeau ». Actuellement les soubassements sont en béton de ciment, ou de béton de terre stabilisé, le dessus du soubassement est revêtu d'un matériau étanche.

Les planchers d'étages reposent sur des solives et des poutres qui s'appuient sur le mur en pisé par l'intermédiaire d'une pièce de répartition des charges, les ouvertures, ainsi que les angles, sont renforcés par l'emploi de matériaux résistants aux chocs (pierre, brique de terre cuite) ou par l'intégration de mortier de chaux lors de la mise en œuvre du matériau.

1.2.2. La terre

Aujourd'hui, il est admis généralement qu'une bonne terre à pisé est constituée de 0 à 15% de gravier, de 40 à 50% de sable, de 20 à 35% de limon et de 15 à 25% d'argile³². D'autres matières

³⁰ BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan. *Op. cit.*, p 10.

³¹ Ibid, p10.

³² DOAT Patrice, HAYS Alain, HOUBEN Hugo, MATUK Silvia, VITOUX François. *Op.cit.*, p 17.

peuvent rentrer dans la composition des anciens pisés, des tessons de tuiles ou de céramique, de la chaux en poudre ou en blocs, des ossements animaux présents dans la terre. Aujourd'hui, le pisé peut être stabilisé au ciment ou à la chaux, et dans ce cas un processus de préparation de la terre se met en place, d'abord le criblage afin de débarrasser la terre des plus gros cailloux, ensuite la pulvérisation et le malaxage³³.

1.2.3. Les outils

A. Les banches

Traditionnellement, les banches (planches de coffrage) étaient de 80cm de hauteur en moyenne et de 1.40 à 3m de longueur, constituées de 3 ou 4 planches en bois assemblées parfois par des rainures et languettes et par des montants en bois soutenant les planches.

La base des montants est fixée à des clés qui traversent l'épaisseur du mur qui laissent parfois des trous dans le mur une fois décoffré, les montants sont emboîtés dans des mortaises taillées dans les clés, ils sont calés avec des coins. A leurs sommets les montants sont reliés soit par des jougs, soit par cordes. La tête de banche ferme la banchée, elle est constituée de planches en bois maintenues par des planchettes. (Fig.57).

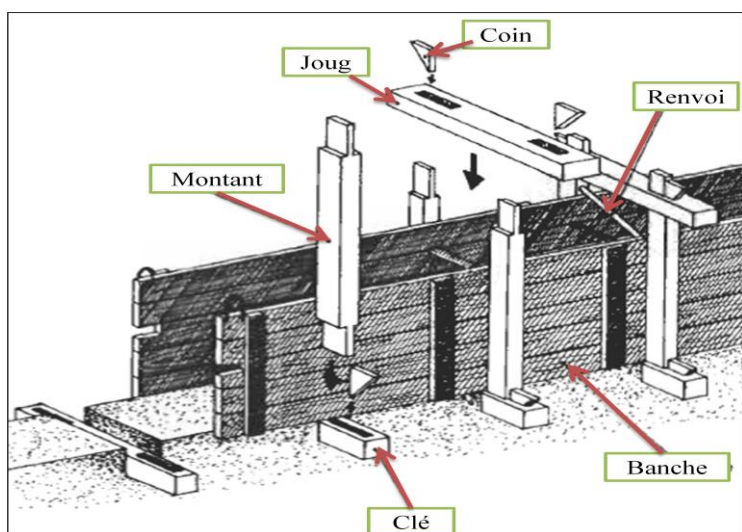


Fig. 57: La banche.

Source : Techniques du bâtiment, La construction et l'architecture de terre, Ed Techniques de l'Ingénieur, p 17. D'après le CRATerre.

Dans certaines régions de l'Algérie, les planches sont nommées *matra*³⁴, l'ensemble du coffrage est connu sous le terme *tad 'abit* en Kabylie, les montants qui les soutiennent sont appelés *tiouq'afine*, les coins fixant les madriers se nomment *libari*, le coffrage est fermé par des portes que l'on appelle *labour't*, et la dame connue sous le nom de *d'bouze*³⁵.

³³ HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert. *Op.cit.*, p 199.

³⁴ MEDACorpus, Architecture Traditionnelle Méditerranéenne, A8-Mur en terre banchée (pisé) Algérie, www.meda-corpus.net.

³⁵ MAUNIER René, La construction collective de la maison Kabyle, Ed Institut d'ethnologie. Paris, 1926, pp42- 43.

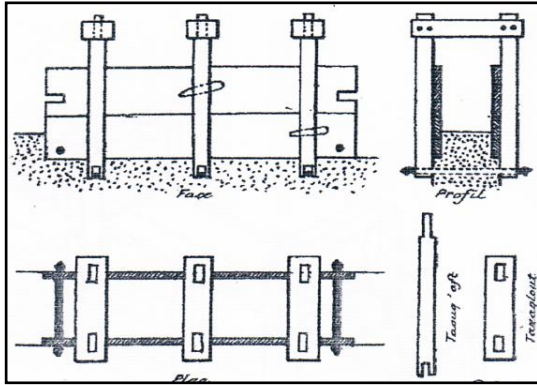


Fig. 58: La banche kabyle.

Source: R, Maunier. Op. cit., p42.

B. Les dames (ou pisoirs)

C'est l'outil par lequel la terre est damée et compactée afin qu'elle atteigne une cohésion suffisante après le décoffrage : il est appelé psoir, dame, pison, ou pilon *El markaz*³⁶ au Maroc, rékkàl ou sawàtta³⁷ en Algérie.

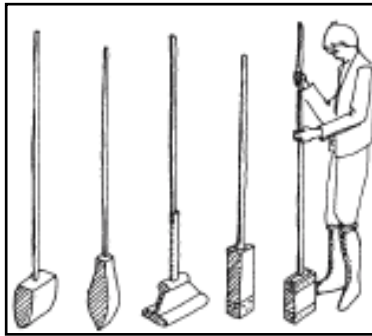


Fig. 59: Pisoirs traditionnels

Source: MINKE Gernot., Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture, Ed Birkhauser, Berlin, 2006.. Op. cit., p53.

1.3. Propriétés du pisé

1.3.1. Constituants

Le matériau terre rassemble différents constituants³⁸ :

- Constituant gazeux : principalement l'air,
- Constituant liquide : principalement l'eau,
- Constituant solide la matière minérale issue de la désagrégation de la roche mère, ainsi que la matière organique provenant des organismes végétaux et animaux.

D'un autre point de vue la terre est composée de deux éléments:

- Un élément inerte : la structure (pierre, gravier, sable) qui ne réagit pas à l'eau,
- Un élément actif: le liant (l'argile) qui réagit à l'eau.

1.3.2. Structure, texture, états hydriques

Le pisé nécessite une structure continue de type poudingue (les éléments inertes sont pris dans une masse d'argile), avec une texture en terre argilo-sableuse à prédominance sableuse³⁹.

³⁶ ZERHOUNI Selma, GUILLAUD Hubert et MOUYAL Elie. Op.cit., p132.

³⁷ Ibid, p133.

³⁸ Ibid p10.

³⁹ Ibid p10.

Le pisé nécessite une terre "peu humide" à "humide. La teneur en eau optimum TEO de la terre est une donnée essentielle au moment du pisage, sur le chantier. La TEO du pisé se situe entre 8 et 12%.

1.3.3. Stabilisation

La stabilisation, la plus utilisée dans le langage courant, est l'incorporation d'un adjuvant (chaux ou ciment) lors de la préparation du mélange avant compactage, le stabilisant aura pour but de lier les particules du mélange entre elles, de l'empêcher d'absorber de l'eau, d'éviter ainsi les retraits ou variations⁴⁰. Un grand nombre de stabilisants existe, ceux hérités de l'architecture traditionnelle ou bien ceux découverts depuis peu⁴¹. Cet adjuvant vise à:

- renforcer la cohésion de l'argile de la terre et la solidité du produit fini;
- réduire les problèmes de gonflement d'argile en cas de pathologie;
- améliorer la protection vis à vis de la pluie.

Puisqu'il s'agit d'une prise dans la masse du pisé, c'est la chaux hydraulique naturelle qui est à préconiser. Il s'agit de sa capacité de transfert hygrométrique, très importante pour l'aspect sanitaire et le confort de la maison. Alors que le ciment a tendance à griser la couleur du matériau terre, la chaux a tendance à l'éclaircir.

1.3.4. Thermique du pisé

On attribue couramment des qualités hors du commun aux maisons de terre, c'est «frais l'été et chaud l'hiver». Pour des constructions en pisé, on peut retenir deux choses⁴²:

- Un mur de pisé de 50 cm d'épaisseur a un bon comportement thermique; il ne nécessite pas l'ajout d'isolant supplémentaire (un doublage d'isolation en face intérieure améliore certes l'isolation, mais au détriment de l'inertie thermique).
- Le confort thermique du pisé est essentiellement lié à sa capacité thermique, compte tenu de sa masse (900 à 1000 kg pour un mur de 50 cm d'épaisseur). Un mur de pisé assure ainsi un amortissement et un déphasage idéal de 12 heures de l'onde de chaleur. Ceci explique le grand confort thermique.

L'évolution de la structure du pisé avec le temps et les saisons, les échanges hygrométriques permanents sont autant de phénomènes qui font évoluer sa résistance thermique et l'étanchéité des murs. Il faut tenir compte également de la très grande inertie due à sa masse importante. Tous ces éléments contribuent au confort incontestable des maisons en pisé.

⁴⁰ Ibid p16

⁴¹ BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan. *Op. cit.*, p06.

⁴² JEANNET Jacky, PIGNAL Bruno, SCARATO Pascal. *Op.cit.*, p20.

1.3.5. Acoustique du pisé

Un mur en pisé est relativement élastique et souvent irrégulier, il limite la réverbération des sons et sa masse importante absorbe bien les vibrations, en particulier les fréquences basses. La combinaison de ces facteurs fait du pisé un matériau très intéressant sur le plan acoustique⁴³.

1.3.6. Eau et hygrométrie

L'eau est pratiquement le seul véritable ennemi du pisé, il convient donc de l'en protéger efficacement, c'est là le rôle essentiel que jouent le sous-bassement et le toit. Par contre, les échanges avec l'air ambiant, assurés par des enduits obligatoirement respirants, sont permanents et entraînent une variation continue et essentielle du taux d'humidité contenue dans le mur⁴⁴. Les conséquences et l'intérêt de ces échanges au fil des saisons sont de tout premier ordre sur les qualités des murs et sur le confort qu'offre la maison.

1.4. Le renouveau du pisé

Ce n'est que pendant les situations de crises violentes, induisant une rupture de production des matériaux, que le retour aux techniques traditionnelles de terre se fera sentir. Ce sont les grands noms de l'architecture moderne qui se sont impliqués dans la construction en terre. Le Corbusier publia en 1941 un ouvrage « Les Murondins » sur la construction en terre afin de remédier à la pénurie des matériaux industrialisés⁴⁵. L'architecte américain Frank Lloyd Wright en fera de même avec l'adobe, il concevra le Potery House au Texas en 1943, qui ne sera réalisé qu'en 1985⁴⁶.

Ce sont des bâtiments en terre que construira la France dans ses colonies, les années 1920-1930 qui ont vu émerger de nombreux forts et villes de garnison en pisé au Maroc et dans le sud algérien⁴⁷, la plus remarquable de ces initiatives, fut la construction en 1942 de l'hôpital régional d'Adrar en pisé par l'architecte Michel Luyckx, ce bâtiment constitue la première synthèse réussie au XX^e siècle entre les rapports des techniques traditionnelles améliorées et la volonté d'un langage architectural Il s'est révélé, après 40 ans d'utilisation, très fiable sur le plan technique et climatique.

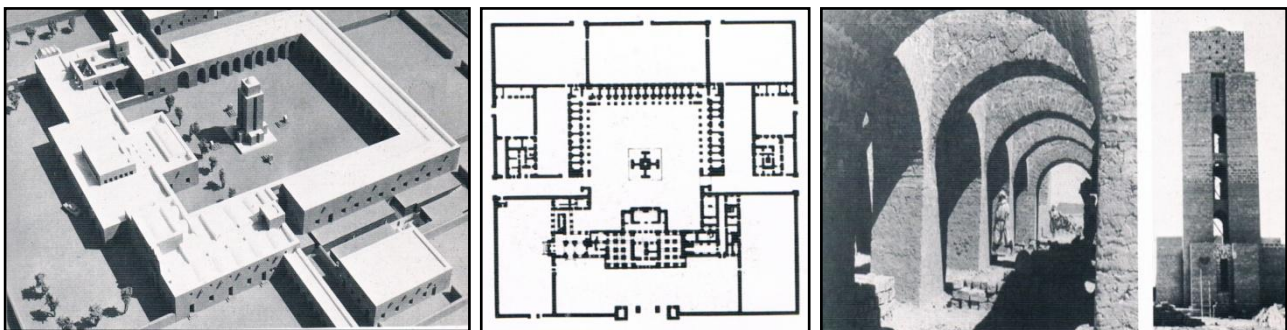


Fig. 60: Hôpital régional d'Adrar au Sahara, Algérie, réalisé en 1942 .

Source: DETHIER Jean. *Op.cit.*, pp160-161.

⁴³ Ibid, p8.

⁴⁴ Ibid, p9.

⁴⁵ DETHIER Jean. *Op.cit.*, p153.

⁴⁶ Ibid. p52.

⁴⁷ Ibid., p91.

Il faudra attendre les années 1970 et les conséquences des crises économiques et énergétiques suite au choc pétrolier de 1973, pour assister à une remise en cause des idéologies et modes d'action exploités jusqu'alors. C'est dans ce cadre que la construction en terre sera réactualisée, offrant des intérêts environnementaux et économiques intéressants contrairement aux autres matériaux énergivores. La terre fera l'objet d'une renaissance dans la construction fondée sur des bases scientifiques associant la recherche, l'expérimentation et la sensibilisation. A travers le monde, le pisé a connu une actualisation notamment grâce à plusieurs architectes comme David Easton, Steven Dobson, David Olivier, Martin Rauch et les architectes et ingénieurs du groupe CRATerre.

Les études de Cointeraux, ont conduit à une normalisation de la mise en œuvre du pisé, des améliorations ont été apportées, les coffrages sont plus légers et plus faciles à déplacer⁴⁸, le compactage mécanique moins contraignant et plus rapide que le *pisoir* traditionnel.

En Algérie, l'état a lancé le projet en 1970 visant à encourager l'utilisation de matériaux locaux dans la construction de logements sociaux. Le village de Mostapha Ben Brahim situé à 30 km de Sidi Bel Abbes était la première opération pilote de la construction en terre. Le projet a livré 192 logements en blocs creux de ciment, et 30 maisons en pisé stabilisé et BTS.

Les murs sont montés sur des soubassements en béton maigre, sur lesquels reposent des fondations élargies en B.A. Les murs porteurs extérieurs sont larges de 40 cm en pisé stabilisé, la dalle est en parpaing, les murs intérieurs sont en parpaing creux de ciment, les enduits extérieurs en mortier bâtard crépi, et les enduits intérieurs à base de chaux.

Le coffrage utilisé était de type intégral métallique, les dames métalliques ont été utilisées pour le compactage le long des coffrages et au milieu avec des dames pneumatiques.

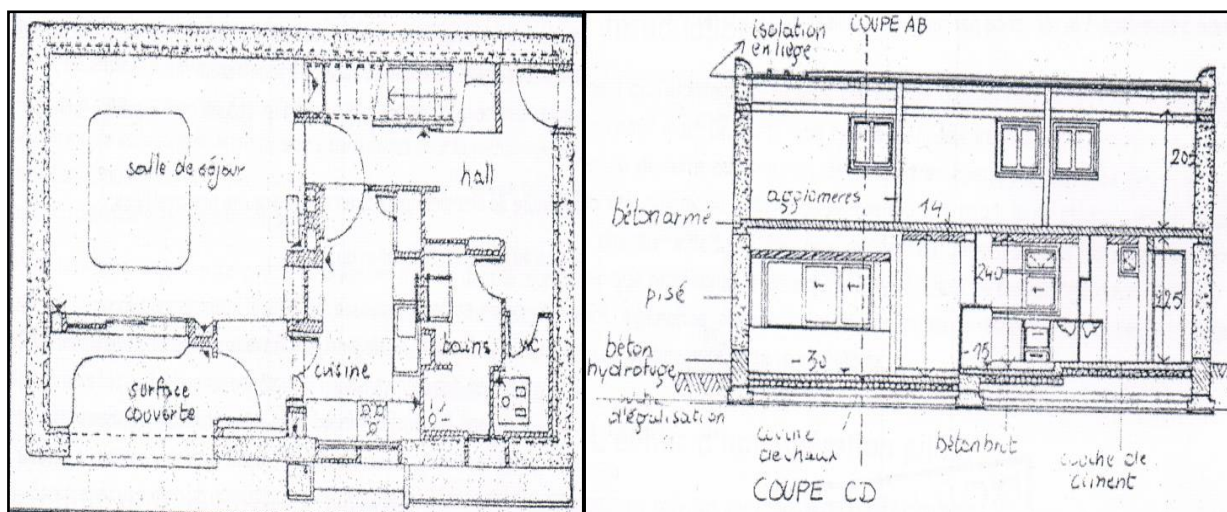


Fig. 61: Plan et coupe d'une maison du village de Mostapha Ben Brahim.

Source : KEBAILI Nourreddine. *Op. cit.*, p39.

⁴⁸ HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert. *Op.cit.*, p 200.

L'Algérie a tenté l'expérience plusieurs fois et avec différents systèmes constructifs en terre. A Zéralda, il a été réalisé trois prototypes destinés aux gardes forestiers sur le domaine présidentiel au début des années 1970 avec la technique du pisé coulé semblable à la mise en œuvre du béton de ciment, la terre était stabilisée avec 7% à 8% de chaux hydrauliques, les coffrages qui faisaient toute la périphérie des maisons étaient déplacés tous les trois jours, le temps de séchage de la terre⁴⁹.



Fig. 62: Groupe expérimental d'habitations rurales, édifiées en 1972 à Zeralda, Algérie.
Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, p154.

Au milieu des années 1980, l'expérience a été menée par les frères Al Minyaway disciples de Hassan Fathy, dans le village de Maadher à M'sila, il a été réalisé 120 logements en béton de terre stabilisée au ciment recouvert par des voûtes dans le même matériau. Une enquête menée en 2006 ayant pour but l'évaluation des habitats en terre, a conclu qu'à Maadher ce n'est pas le matériau terre qui est mal perçu par les habitants, mais plutôt la fonction et la forme architecturale qui ne satisfaisait pas les besoins des habitants⁵⁰.



Fig. 63: Nouveau village agricole de Maadher, près de M'sila en Algérie construit en parpaings de terre stabilisée en 1980 par deux architectes, les frères El Miniaway.

Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, p185.

Après l'exposition universelle « Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire » au centre Georges Pompidou, vient le projet «Domaine de la terre» dans la région Rhône-Alpes qui a déjà un important patrimoine en pisé. Il comporte un ensemble de soixante cinq logements sociaux

⁴⁹ DETHIER Jean, Architectures de terre, Atouts et enjeux d'une tradition millénaire de construction méconnu : Europe, tiers monde, états unis. *Op.cit.*, p192.

⁵⁰ *Ibid.*, p169.

situé près de Lyon⁵¹, devant servir de démonstration, autant pour les pays industrialisés, que pour les pays en voie de développement.



Fig. 64: logements en pisé au domaine de la terre.

Source : <http://www.cite-sciences.fr/>.

Ce quartier expérimental d'habitat, s'étend sur trois hectares divisés en 11 îlots composés de groupes d'immeubles soit de logements groupés, soit de maisons individuelles⁵². Cette opération est considérée comme une réussite, le défi de réhabiliter et de revivifier les techniques constructives traditionnelles dans la construction contemporaine a été relevé⁵³.

Grâce à Martin Rauch, la texture particulière du pisé prend une dimension symbolique. En 1992, il réalise une œuvre d'art monumentale, un gigantesque mur courbe de 133 m de longueur, 6 m de hauteur et 35 cm d'épaisseur, afin de décorer le long vestibule de l'hôpital régional de Feldkirch en Autriche, placé derrière une serre inclinée. Il met en valeur la texture horizontale des lignes du pisé, en compactant des couches de terre de couleurs nuancées⁵⁴. Le mur prend l'aspect d'une roche sédimentaire et devient une métaphore du cycle géologique de la matière minérale.

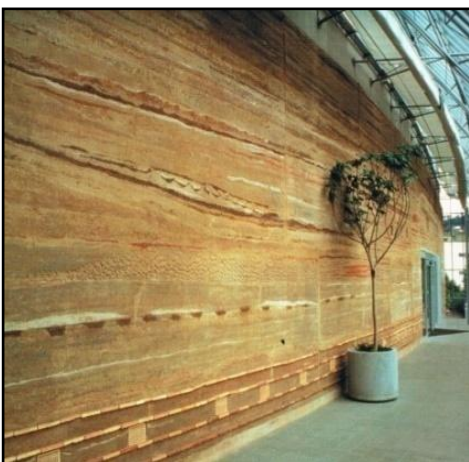


Fig. 65: Mur en pisé du vestibule de l'hôpital régional de Feldkirch.

Source : FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op. cit.*, p 58.

⁵¹ DETHIER Jean. *Op.cit.*, p58.

⁵² CRATERre, DOAT Patrice, Construire en terre, Ed Alternative et parallèles, Paris, 1985, p20.

⁵³ LELEVRE Pierre, «Retour d'expérience Le Domaine de la terre », in Ecologik n°12, 2010.

⁵⁴ FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op. cit.*, p 57.

A Oxaca, au Mexique et grâce à l'utilisation de murs en pisé, l'atelier d'architecture Mauricio Rocha a réussi à éviter le recours à la climatisation de la nouvelle école des arts. Les murs épais de 60 à 70 cm, la terre est mélangée à 15% de ciment et offre une bonne isolation thermique et acoustique. La ventilation naturelle transversale est assurée par des ouvertures latérales verticales.



Fig. 66: Ecole des arts, université autonome Benito Juarez.

Source : <http://www.eartharchitecture.org/>.

L'architecte américain Antoine Predock a achevé en 1975 dans la banlieue de la ville d'Albuquerque, au Nouveau Mexique un quartier d'habitat suburbain de « La Luz » qui groupe 100 logements luxueux. « La Luz » est une réalisation exemplaire car elle prouve aussi que l'architecture de terre peut s'adapter aux expressions culturelles les plus traditionnelles comme aux plus modernes⁵⁵. Cette réalisation est considérée comme un témoignage majeur de la culture américaine contemporaine : elle est classée au « National Register of Historic Places ».

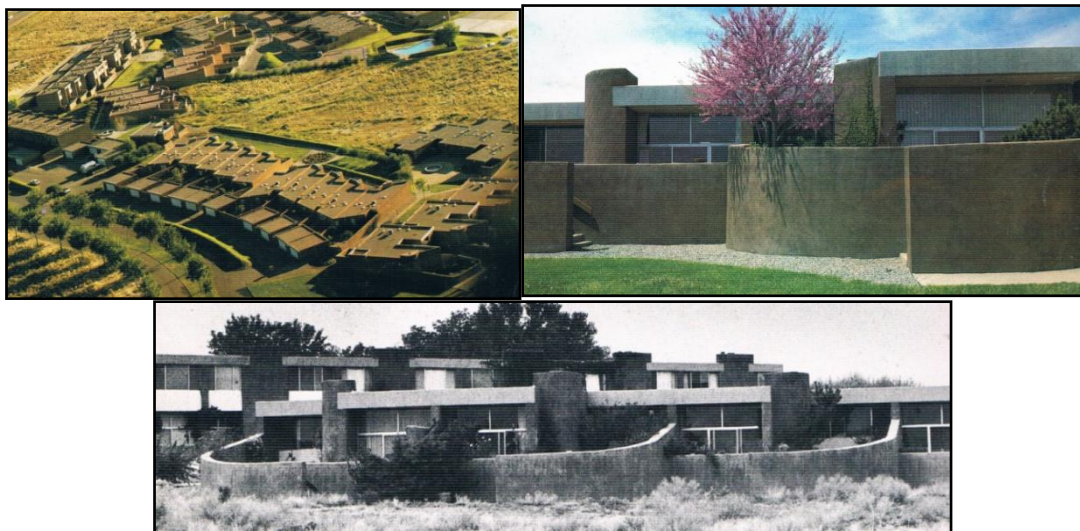


Fig. 67: La Luz, vue aérienne et façades.

Source : DETHIER Jean. *Op.cit.*, pp178-179.

⁵⁵ DETHIER Jean. *Op cit.*, p178.

2. Le pisé en Algérie et en méditerranée

L'Algérie a partagé avec les autres pays du bassin méditerranéen des similitudes sur le plan architectural et constructif. La construction en pisé est un exemple des échanges entre les pays du pourtour méditerranéen, ou en tout cas de la rive Ouest de la méditerranée.

Cependant chaque région utilise la technique selon ses propres spécificités, la nature de la terre, les aléas climatiques et la nature du bâti qui imposent des variations locales dans chaque population. Ceci a engendré la naissance de plusieurs variantes du pisé, généralement différenciées par l'introduction d'autres matériaux à la terre et leur agencement dans la structure (angles ou piliers en pierres ou en briques cuites), ainsi que leur mise en œuvre dans le coffrage.

2.1. Différentes variantes du pisé dans le bassin méditerranéen

Le principe de mise en œuvre de la technique du pisé reste le même (coffrage, damage...), c'est l'addition d'autres matériaux tels que la terre, le sable et la chaux qui fait la différence, que ce soit au niveau de la composition du mélange à damer ou dans le schéma général des murs. Le recours à d'autres matériaux s'explique soit par la volonté de construire plus résistant, soit par souci d'économie ou de rapidité.

- En France et en Espagne, l'application de cordons de mortier de chaux entre les lits de terre ou entre les banchées, est assez habituelle, l'utilisation de cette technique répond à une préoccupation liée à la protection du mur de l'érosion⁵⁶, ou à la protection des arrêtes de l'assise banchée avant la pose de la banchée supérieure⁵⁷. (Fig. 68).



Fig. 68: Présence de cordons de mortier de chaux entre lit+ Soubassement en pierre(France).

Source : MEDA corpus, A8 –Mur en terre banchée (Pisé) France, Architecture traditionnelle méditerranéenne, p01 disponible sur : <http://www.meda-corpus.net>.

- En France, une autre variante, correspond à la mise en place de dalles de pierres plates ou de tuiles sur chaque lit de terre du côté extérieur du mur, afin d'améliorer l'accrochage des enduits⁵⁸.
- En Espagne, c'est l'introduction de la pierre, de la brique de terre cuite, ou le Tapial Real⁵⁹ ou pisé royal qui comporte une forte teneur en chaux, ce qui donne plus de résistance aux structures.

⁵⁶ PIGNAL Bruno, Terre crue, techniques de construction et de restauration, Ed Eyrolles, 2005, p34.

⁵⁷ DE CHAZELLES Claire-Anne, GUYONNET François, «La construction en pisé du Languedoc-Roussillon et de la Provence, du Moyen- âge à l'époque moderne (XIII e- XIX e s)». *Op. cit.*, pp.109-139.

⁵⁸ Ibid.

La pierre est disposée en assises régulières ou en encadrement du pisé en chaînage d'angles⁶⁰, elle est disposée en assises régulières d'une ou plusieurs rangées entre les différents lits de terre, ou bien de façon alternée et non régulière, en encadrement ou chaînage, ou en colonnes verticales.

- Au Portugal, ce sont des lits de dalles de schistes ou de briques d'adobe, ou encore des assises de tuiles plates sur un mortier de chaux⁶¹ qui viennent renforcer les couches de terre lorsque celle-ci est de mauvaise qualité pour la construction. (Fig.69).



Fig. 69: Les lignes de banchages sont souvent marquées par les lits de chaux ou de pierre intercalés (Portugal).

Source : MEDA corpus, A8 –Mur en terre banchée (Pisé) Portugal. *Op.cit.*, p02

2.2. Le pisé en Algérie

La technique du pisé a été utilisée depuis plusieurs siècles en Algérie, aussi bien dans les centres urbains que dans les villages, sur le littoral, en plaine, en montagne ou dans le sud du pays⁶². La carte ci-dessous montre que la présence courante du pisé s'étend d'Est en Ouest, du littoral jusqu'aux hauts plateaux, avec une plus grande concentration dans les régions est du pays jusqu'à l'Atlas Saharien.

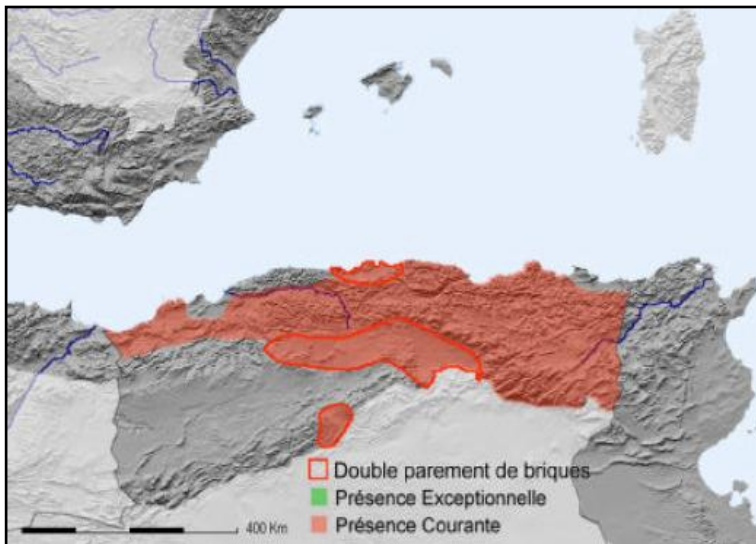


Fig. 70: Emprise Géographique du pisé en Algérie.

Source : MEDA corpus, A8– Mur en terre banchée (Pisé) Algérie. *Op.cit.*, p01.

⁵⁹ JAQUIN P.A, AUGARDE C.E et GERRARD C.M, «Historic rammed earth structures in Spain, construction techniques and a preliminary classification», in International Symposium on Earthen Structures, Bangalone, 2007.

⁶⁰ GRACIANI GARCIA Amparo, TABALES RODRIGUEZ Miguel Ángel, «El tapial en el àrea sevillana. Avance cronotipológico estructural», in Arqueologia de la arquitectura 5, Madrid, 2008, pp.135-158.

⁶¹ CORREIA M, Técnicas portuguesas de construção em terra:a taipa alentejana, in Seminario Ibero-Americano de Construção com terra, Madrid, 2003.

⁶² MEDAcorpus, Architecture Traditionnelle Méditerranéenne, A8-Mur en terre banchée (pisé) Algérie, www.meda-corpus.net.

2.2.1. Mise en œuvre

L'étude de MEDA Corpus sur la technique de la terre banchée en Algérie⁶³ nous renseigne sur les aspects techniques du pisé. Ainsi, nous apprenons que les fondations ont une épaisseur comprise entre 80 et 120 cm, que la terre est mélangée à des débris de tuiles, de briques, des galets, de la paille hachée et de la chaux en bloc, et que la hauteur de la banchée peut atteindre 1.50m. Les murs ont une épaisseur de 80 à 120cm. Nous pouvons apercevoir l'emploi de la brique cuite, ou des pierres disposées en assise entre les couches de la terre à intervalle égal.

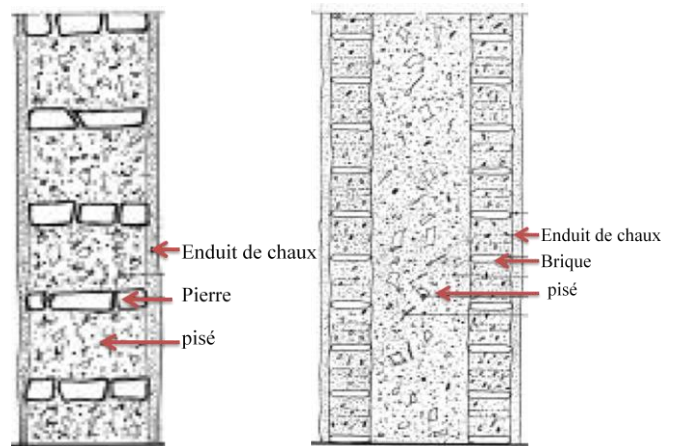


Fig. 71: Variantes du pisé en Algérie.

Source : MEDA corpus, A8– Mur en terre banchée (Pisé) Algérie. *Op.cit.*, pp 02-03.



Fig. 72: Mur en pisé alterné de pierre en Algérie.

Source : MEDA corpus, A8– Mur en terre banchée (Pisé) Algérie. *Op.cit.*, p03.

2.2.2. Ouvrages associés

Le traitement des angles peut être réalisé avec l'apport d'un matériau différent. Les angles sont alors le plus souvent maçonnés en briques ou en moellons de pierre montés en harpe au fur et à mesure de la mise en œuvre du pisé auquel la chaîne d'angle est intégrée au moment du banchage.

Les linteaux utilisés sont en bois de cèdre taillés en pièce unique ou fractionnés, ils sont soulagés par un arc de décharge en briques, l'autre type de linteau couramment utilisé en Algérie dans les murs en terre banchée est le linteau en briques, avec arc de décharge.



Fig. 73: Traitement d'angle.

Source : MEDA corpus, A8– Mur en terre banchée (Pisé) Algérie. *Op.cit.*, p07.

⁶³ Ibid.

2.2.3. Outils

Les outils traditionnels utilisés dans la confection des murs en pisé ont des dénominations précises, ainsi la banche est appelée dans certaines régions *matra*, elle est composée de planchettes mesurant 1m à 1.8m de longueur, et elles sont percées de huit ouvertures recevant des baguettes pour assurer la liaison entre les deux banches de part et d'autre du mur. Le damage de la terre s'effectue à l'aide de deux outils qui sont *rekka* (dame), et *sawàtta* (batte).

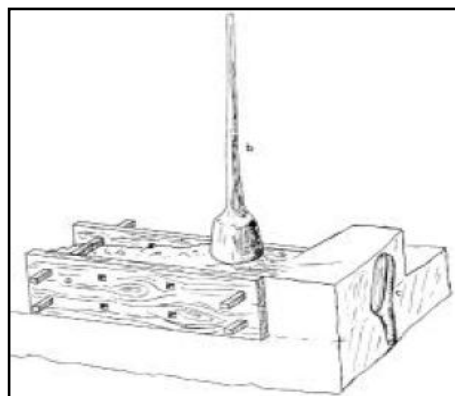


Fig. 74: Outils de coffrage du pisé en Algérie.

2.2.4. Performances Thermiques

La construction en terre banchée privilégie la masse des murs et confère de ce fait à ces parois une grande inertie thermique, avec son pouvoir de régulation de la température intérieure. Cette qualité est particulièrement recherchée dans des régions soumises à de grands écarts de température.

Les conditions climatiques algériennes de type sud-méditerranéen, sont caractérisées par une sécheresse estivale quasi absolue, des précipitations uniquement en période hivernale et peu d'écart de températures : de 12 à 30° C, l'humidité de l'air varie 40 à 60 %. Les dispositifs constructifs assurent le confort des habitations par leur ingéniosité et la simplicité des matériaux locaux employés⁶⁴.

L'épaisseur et la masse volumique de la terre banchée présentent une grande inertie thermique et de bonnes qualités d'isolation, avec l'intervention des enduits qui est également déterminante pour le bilan thermique du mur. Les enduits et peintures à la chaux, permettent la respiration du mur, absorbent les rayonnements de la chaleur et diminuent les effets des vagues de froid.

2.3. Pathologies du pisé

En Algérie, la vulnérabilité du matériau aux effets de l'eau est également mise en évidence.

Les sources d'infiltration sont diverses : défauts de l'étanchéité des terrasses, manque d'entretien régulier des canalisations d'eau, des puits et citernes, des égouts, des problèmes de fondation, le vent, les catastrophes naturelles, ...

2.3.1. L'érosion directe

L'érosion par la pluie est très lente, et advient lors des premières années suivant la construction. Le lavage des fines particules de surface expose alors les sables qui protègent le mur et réduisent la vitesse d'érosion⁶⁵, et provoque l'apparition de l'érosion basale qui réduit la section d'appui de la paroi. (Fig. 75).

⁶⁴ MEDA corpus, A8 –Mur en terre banchée (Pisé) Algérie, Architecture traditionnelle méditerranéenne, p 04, disponible sur : <http://www.meda-corpus.net>.

⁶⁵ MORISET Sébastien et MISSE Arnaud. Op. cit., p10.



Fig. 75: Erosion en bas de mur en pisé.

Source: COSTA Anibal, GUEDES João Miranda, VARUM Humberto, Structural Rehabilitation of Old Buildings, Building Pathology and Rehabilitation, Ed Springer Berlin,

2.3.2. Ravine

C'est la perte de matière sur un mur liée à un écoulement accidentel d'eau.

2.3.3. Le sillon destructeur

C'est la bande érodée au bas d'un mur, à l'endroit où les remontées capillaires s'évaporent. L'apparition de ces sillons peut être accélérée en hiver, quand le pisé humide gèle⁶⁶.

2.3.4. Salpêtre

L'efflorescence de nitrates en surface de mur, appelée salpêtre, détruit la cohésion du matériau et accélère la formation des sillons destructeurs. Elle peut également conduire à l'apparition de l'activité biologique. Le développement et la pénétration des racines des plantes provoquent la fissuration, du fait de la contrainte de traction provoquée par leur dilatation. Les vides résultants, de fissures de retrait ou de la décomposition de la paille, peuvent attirer les petits animaux à la recherche de nourriture ou d'abri.

2.3.5. Le décollement de l'enduit

Les enduits étanches se décolent par plaques, en commençant par le bas, là où le mur est le plus humide.

2.3.6. Le coup de sabre, le tassement

C'est une fissure verticale, courante dans le pisé. Les coups de sabre sont souvent dus à une mauvaise mise en œuvre ou à un tassement différentiel (Fig. 76). Les carences de fondation peuvent entraîner de terribles conséquences pour l'intégrité structurelle, ces problèmes sont liés à la capacité de la fondation sol à supporter les charges transmises par les massifs murs en terre battue. De plus, la faible résistance à la traction de murs en pisé ne leur permet pas d'absorber les tassements différentiels⁶⁷ causés par les variations saisonnières de la nappe phréatique ou par la présence de différents sols de fondation sur toute la longueur de la paroi.

⁶⁶ Ibid, p10.

⁶⁷ COSTA Anibal, GUEDES João Miranda, VARUM Humberto. *Op. cit.*, p 83.



Fig. 76: Tassement dans un mur en pisé.

Source: COSTA Anibal, GUEDES João Miranda, VARUM Humberto, Structural Rehabilitation of Old Buildings, Building Pathology and Rehabilitation. *Op.cit.*, p11.

2.3.7. Le flambement et la fissuration

Le flambement du mur et l'apparition d'une fracture verticale sous l'effet d'une charge latérale est souvent dûe à la poussée de la toiture sur les murs⁶⁸ ainsi que les mouvements thermiques qui amènent à des fissures verticales, trouvées par la longueur des murs (espacées à intervalles réguliers et le long des murs) et qui affaiblissent le comportement monolithique et la rigidité des murs en pisé⁶⁹.

2.3.8. Les fissures de poinçonnement ou de cisaillement

C'est la fracture du mur en terre sous une charge excessive ponctuelle, par exemple sous une poutre dont la charge n'a pas été répartie.

La figure suivante résume toutes les pathologies citées ci-dessus.

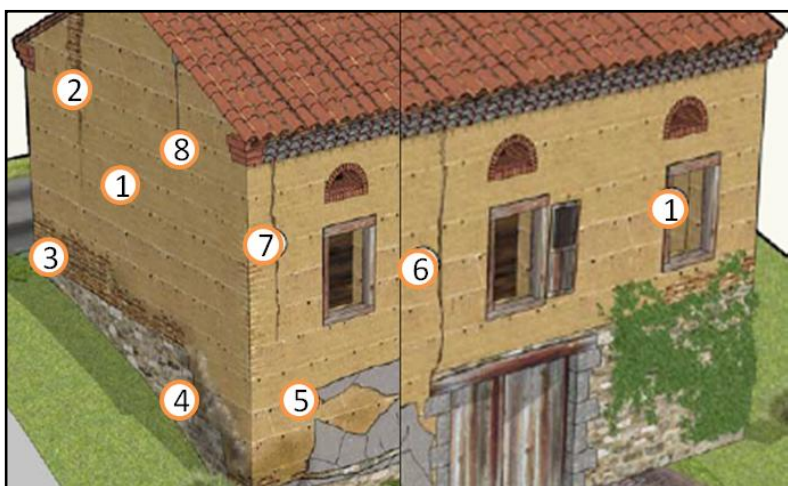


Fig. 77: Pathologies du pisé.

- 1) Érosion directe.
- 2) Ravine.
- 3) Sillon destructeur.
- 4) Salpêtre.
- 5) Décollement de l'enduit.
- 6) Coup de sabre, tassement.
- 7) Flambement et fissuration.
- 8) Fissures de poinçonnement ou de cisaillement.

Source: MORISET Sébastien, MISSE Arnaud. *Op.cit.*, p11.

⁶⁸ MORISET Sébastien, MISSE Arnaud. *Op.cit.*, p10.

⁶⁹ COSTA Anibal, GUEDES João Miranda, VARUM Humberto. *Op. cit.*, p 83.

2.4. Mesures à prendre pour entretenir les murs en pisé

Avant d'intervenir sur une structure en pisé, il est important d'établir un diagnostic précis de son état. Il faut pour cela commencer par comprendre comment le bâtiment a évolué dans son environnement car les causes de dégradation sont souvent éloignées du mur.

Deux règles simples sont à retenir si l'on veut garantir la stabilité des ouvrages :

- Les abords du bâtiment doivent rester dégagés et le sol perméable pour que l'humidité du sous-sol s'évapore rapidement : laisser respirer le sol environnant.
- Les pentes du terrain doivent permettre un ruissellement des eaux de pluie loin du bâtiment par des drains. Les bâtiments anciens n'étaient pas équipés de drains souterrains. Si un drain est mis en œuvre, il faudra l'installer à plusieurs mètres des murs, pour éviter toute accumulation d'eau sous le bâtiment en cas d'obstruction du tuyau de drainage.

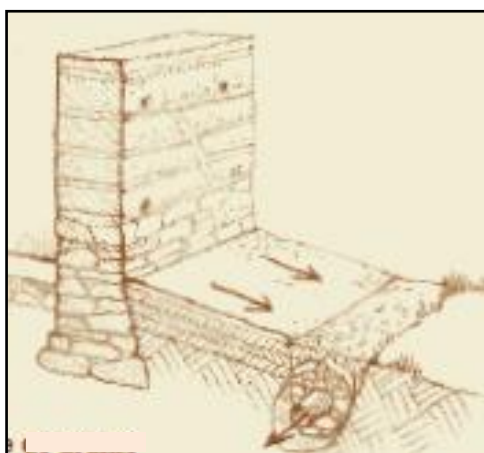


Fig. 78: Principe de drain pour mur ancien.

Source: MORISET Sébastien, MISSE Arnaud. *Op.cit.*, p11.

2.4.1. Réparer les murs

Les reprises doivent se faire à la terre, pour préserver à la fois l'intégrité physique de la structure et l'harmonie esthétique des murs. L'ajout de matériaux rigides tels que le parpaing de ciment ou le béton armé sur une structure en pisé est esthétiquement malheureux et structurellement risqué, car le mélange des matériaux engendre des comportements différentiels favorables aux déversements, poinçonnements, ruptures et écroulements.

A. Reprise des fissures

Avant toute reprise de fissure, il faut vérifier la stabilité de l'ouvrage en plaçant des témoins. Si la fissure est vivante, il faut établir la cause du mouvement et l'éliminer. Une reprise du drainage évitant les infiltrations d'eau à la base des murs suffit généralement à stabiliser un bâtiment en terre⁷⁰. Une fois que les fissures se présentent mortes, il est alors possible, si besoin, de renforcer les structures à l'aide de tirants, chainages ou contreforts « agrafage »⁷¹, et de combler les fissures à la

⁷⁰ MORISET Sébastien, MISSE Arnaud. *Op.cit.*, p12.

⁷¹ COSTA Anibal, GUEDES João Miranda, VARUM Humberto. *Op.cit.*, p 87.

terre. Les fissures les plus importantes peuvent être suturées à l'aide de clés en bois noyées dans la reprise du mur en terre.



Fig. 79: Témoin en plâtre sur une fissure.

Fig. 80: Exemple de reprise de fissure.

Source: MORISET Sébastien, MISSE Arnaud. *Op.cit.*, p12.

B. Préparer les cavités et les murs

Il est important de préparer un mur avant d'intervenir pour garantir la bonne tenue de la réparation. Pour cela, il faut nettoyer la partie à traiter en enlevant toutes les parties ayant perdu leur cohésion. La partie à réparer devra être sculptée pour d'une part assurer une bonne assise horizontale à la base⁷², et d'autre part permettre à la matière ajoutée de s'encaster efficacement sur les côtés et au sommet et devra être progressivement humidifiée sans ruissellement, avant d'être comblée à la terre.

C. Réparer une base érodée

Pour des érosions importantes, l'usage de blocs, adobes, BTC ou de morceaux solides de pisé, maçonnés à l'aide d'un mortier de terre est une solution. Pour homogénéiser la surface du mur, un enduit peut être appliqué ultérieurement sur la réparation. Mais si l'érosion n'est que de quelques centimètres, un damage latéral à la massette est possible.

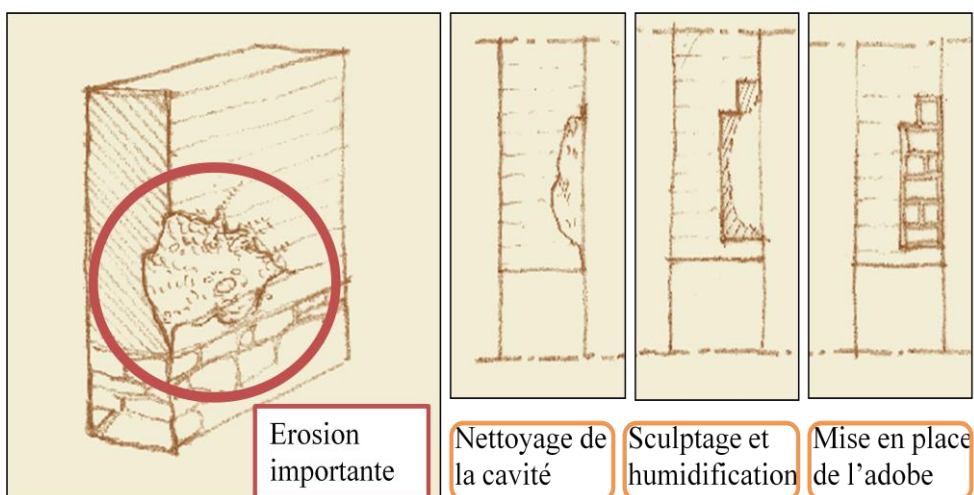


Fig. 81: Principe de réparation d'une cavité.

Source: MORISET Sébastien, MISSE Arnaud. *Op.cit.*, p14.

⁷² Ibid, p 14.

De la terre projetée, est une technique d'intervention récente utilisée pour réparer une base érodée, qui a été appliquée avec succès dans la conservation du château de Paderne (Algarve, Portugal) et de l'Alhambra de Grenade (Espagne). Cette technique consiste à projeter un mélange de terre humide à grande vitesse contre la zone endommagée, alors que l'énergie de projection est supposée similaire à celle du compactage du pisé original. (Fig. 82).



Fig. 82: Réparation de l'érosion basale du château de Paderne.

Source: COSTA Anibal, GUEDES João Miranda, VARUM Humberto. *Op.cit.*, p86.

D. Reprises importantes aux angles

Pour restaurer un angle d'un mur en pisé, il est possible de joindre l'angle par des briques de terre cuite en alternance avec des lits de mortier de chaux⁷³.

3. Techniques de construction associées et compatibles avec la terre banchée

3.1. Mur en pierre brute hourdée

En Algérie, les dimensions des pierres brutes varient en longueur de 10 à 55 cm, en hauteur de 3 à 25 cm, en profondeur de 10 à 35 cm, les liants utilisés sont la chaux, la terre provenant des sols les plus argileux et le timchent, sorte de plâtre traditionnel, les agrégats ajoutés sont le sable et la paille, des cendres de bois ou de la sève de certaines plantes sont ajoutées au mortier pour le stabiliser.

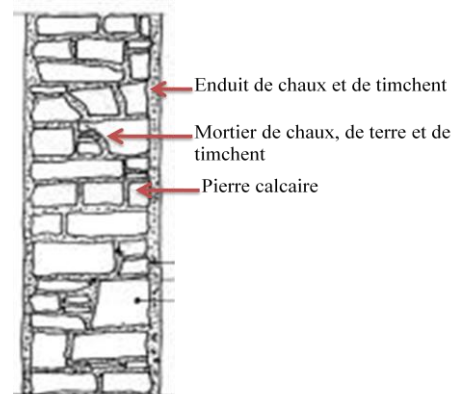


Fig. 83: Principe constructif d'un mur en pierre brute hourdée.

Source : MEDA corpus, A3 – Mur en pierre brute hourdée Algérie. *Op.cit.*, p 02.

⁷³ DE BRANDOIS Patrice, BABICS Florence, manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, Ed Ministère de la Culture et de la Communication, Direction de l'Architecture et du Patrimoine, France, 2006, p 49.

3.1.1. Ouvrages associés

En Algérie, on observe 3 types de traitement des angles :

- Un harpage régulier réalisé au moyen de blocs de pierre de dimensions plus importantes, taillés soigneusement et présentant une arête vive la plus rectiligne possible pour marquer l'angle. (Ce traitement est le seul utilisé pour la variante : mur en pierre brute hourdée + branches de bois).
- Un angle arrondi sur toute la hauteur du mur.
- Un angle recoupé à 45° sur une hauteur d'environ 2 m réalisé au moyen de pierres plates posées en diagonale.

Les linteaux sont simples, en bois ou en pierre, sans ou avec un arc de décharge.

3.1.2. Traitements de pathologies des murs en pierre brute hourdée

Les ennemis des murs en pierre brute hourdée sont l'eau et les mouvements sismiques entraînant, quand ils existent, l'altération et le décollement des couches de protection (badigeon, enduit). La dégradation plus ou moins grave des pierres suivant leur nature et la perte du mortier de jointoiement et de hourdage, des désordres structurels⁷⁴, (fissures, décohésions ponctuelles des maçonneries,...), en résultent alors.

- Si le mortier de chaux ancien s'écrase et se détériore, partiellement ou complètement, les infiltrations des eaux à l'intérieur de la maçonnerie accentuent sa perte en cohésion et en résistance. On doit faire recours à des confortations internes de maçonnerie par injection de coulis qui permettent de redonner une cohésion nouvelle aux maçonneries anciennes, et de leur restituer leurs propriétés mécaniques initiales, sans procéder à leur démontage⁷⁵. Elles peuvent ainsi conserver leur déformation et toute leur authenticité.

Toute confortation par injection doit faire l'objet d'une étude préalable d'injectabilité qui consiste à identifier les caractéristiques physico-chimiques des matériaux composant la maçonnerie dans toute son épaisseur⁷⁶. La connaissance de la nature des liants composant le mortier en place permet de déterminer la formulation du coulis de confortation, afin d'éviter une incompatibilité entre matériaux.

Ainsi, les maçonneries anciennes présentant des restes de plâtre interdisent l'injection de coulis à base de ciment ou de chaux aérienne qui causent des désordres, provoquée par la réaction chimique entre le plâtre existant dans les maçonneries et le ciment du coulis. L'injection doit se faire par coulis à base de chaux hydraulique naturelle.

Cette opération consiste à :

⁷⁴ MEDA corpus, A3 – Mur en pierre brute hourdée Algérie. Op.cit., p 05.

⁷⁵ DE BRANDOIS Patrice, BABICS Florence. Op.cit., p 21.

⁷⁶ Ibid, p23.

1- Débarrasser les joints des anciennes maçonneries en pierre de toute trace de pollution (peinture éventuelle, plâtre, salissure, végétaux, etc.) et être dégarnis sur une profondeur de 3 à 6 cm.

Toutes les parties descellées, fissurées et friables doivent être éliminées⁷⁷. Une fois dégarnis, les joints sont nettoyés soit à la brosse, soit à l'air comprimé, à une pression adaptée, puis humidifiés.

2- Après humidification, injecter la maçonnerie avec un coulis à grande fluidité, composé à base de chaux hydraulique naturelle dont le dosage est 1 volume de chaux pour 1 volume d'eau.

3- Mélanger le coulis à l'aide d'un embout de malaxage fixé sur une perceuse ou aujourd'hui avec une machine de malaxage. Il devra remplir les vides à l'intérieur de la maçonnerie. Pour créer la pression nécessaire, un simple système utilisant la gravité avec un entonnoir au bout sera efficace⁷⁸.

Nous verrons les étapes d'injection du coulis avec outillage traditionnel suivi par le moderne.

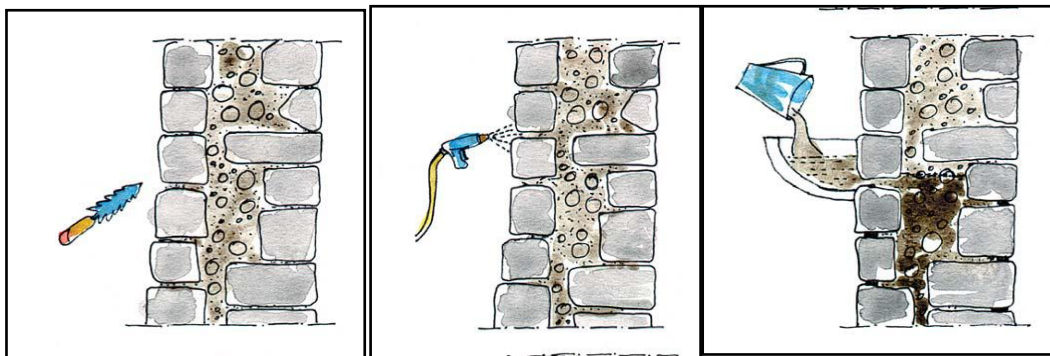


Fig. 84: A- Nettoyages des joints B- Humidification à l'eau C- Consolidation par coulis de chaux

Source : MEDA corpus, Renforcer un mur par injection du coulis, p 02, disponible sur : www.meda-corpus.net.



Fig. 85: A- Nettoyage des trous par soufflage d'air comprimé en suite par humidification. B- Machine de pompe d'injection. C- Injection du coulis de chaux.

Source: COSTA Anibal, GUEDES João Miranda, VARUM Humberto. *Op.cit.*, p 147.

⁷⁷ DE BRANDOIS Patrice, BABICS Florence. *Op.cit.*, p20.

⁷⁸ MEDA corpus. Renforcer un mur par injection du coulis. *Op.cit.*, p 02.

- Pour la substitution de pierres endommagées, on suit les étapes suivantes⁷⁹, ce remplacement de pierres anciennes doit être fait avec soin et parcimonie :
 - 1- Pratiquer le refouillement du bloc de pierre à la masse et au poinçon sur la totalité de sa surface en la découpant jusqu'aux joints latéraux.
 - 2- Laisser sécher le défoncement ainsi formé pendant plusieurs jours. Parallèlement préparer la pierre pour la poser suivant son lit.
 - 3- Monter la pierre. La faire glisser sur les plombs de chasse. La positionner et la maintenir à l'aide de cales en bois.
 - 4- Encastrer la dalle de pierre de substitution dans le défoncement. Effectuer le scellement et le collage à l'aide du mortier approprié.
 - 5- Couler les joints tout autour de la pierre de substitution à l'aide d'un mortier à base de chaux hydraulique après avoir enlevé les coins de bois.
 - 6- Bien nettoyer les bavures de chaux. Pour donner un aspect vieilli, patiner la pierre à l'aide d'un lait de chaux.

3.2. Mur en briques de terre cuite

3.2.1. Principe constructif

La technique du mur en briques de terre cuite remonte au 10^e siècle, période médiévale musulmane (Ziride). L'introduction des lits de rondins de thuya dans les murs date de l'époque ottomane, particulièrement après la séisme de 1716. Son usage a disparu.

Sur le bâti ancien, la brique pleine fabriquée à l'étireuse peut convenir pour reconstruire ou consolider les murs porteurs anciens.

Pour les constructions en briques de terre cuite, on utilise des modules de briques dont la longueur varie de 20 à 29 cm, en largeur de 11 à 13 cm, et en épaisseur de 3 à 5 cm. Les murs sont hourdés par mortier à base de terre et de chaux. Dans le cas où les murs dépassent 80 cm d'épaisseur, des lits de rondin de thuya sont disposés en chaînage horizontal à intervalles réguliers (1,50 m).

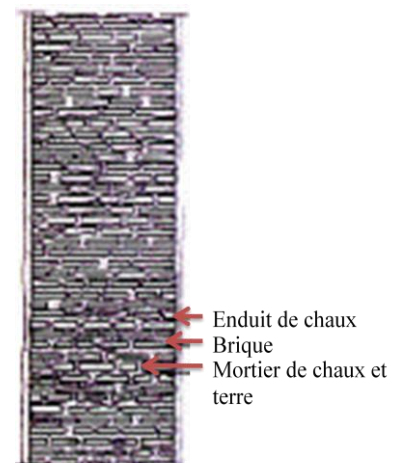


Fig. 86: Coupe de la technique simple en appareil assisé.
Source : MEDA corpus, A6 –Mur en briques de terre cuite Algérie. Op.cit., p 02.

⁷⁹ BET Arcade, rapport sur la restauration du fort de Santa Cruz, Oran, 2007, p2.

3.2.2. Ouvrages associés

Les angles droits sont constitués d'un simple harpage de briques de terre cuite sur la hauteur de la construction courante. Cette technique permet la construction de piliers qui sont maçonnés à base de brique en terre cuite : à base carrée ou rectangulaire et cruciforme.

Les linteaux sont réalisés à base de bois de cèdre. Ils sont taillés en pièce unique ou fractionnés (longitudinalement), puis encastrés dans le mur et soulagés par un arc de décharge.

3.2.3. Traitements de pathologies des murs en briques de terre cuite

On peut classer les pathologies en deux grandes catégories : celles liées à l'humidité et celles liées à la pollution atmosphérique.

Les pathologies destructives peuvent affecter soit la brique soit le mortier de pose, soit les deux.

Les pathologies de la brique résident dans l'altération de sa surface, de son aspect, dans l'augmentation de sa porosité et sa friabilité⁸⁰, jusqu'à la désagrégation. Alors, voici quelques moyens pour lutter contre ces pathologies :

- Si l'intégrité de la maçonnerie est menacée, on fait recours à la consolidation par injection de coulis de chaux procédé de la même manière que celle de la pierre.
- Le nettoyage des efflorescences peut s'effectuer en grande partie à l'aide d'une brosse ; si c'est insuffisant, il faut laver le mur à l'eau, frotter à la brosse, et rincer de nouveau.
- L'hydrofugation peut, pendant un certain temps, permettre à la brique d'éviter les altérations dues à la stagnation d'humidité, il combat les problèmes de pathologies dues au gel⁸¹.
- Le Peeling qui consiste à déposer sur le mur un enduit à base de caoutchouc⁸², il s'agit d'un nettoyage purement mécanique des salissures, sans aucun risque de réaction chimique. On procède comme suit :

-On applique l'enduit à la brosse ou à l'aide d'un pistolet.

-On laisse sécher l'enduit à l'abri des intempéries, jusqu'à ce que se forme un film uniforme dont la couleur est devenue brunâtre.

-Après séchage définitif, on pèle le film manuellement.

- Le nettoyage des encrassements, dépôts noirs et salissures de suie s'effectue soit par application de compresses, soit par micro-sablage ou hydro-gommage utilisés pour nettoyer les murs dénaturés, il s'appuie sur la projection à basse pression d'agrégats de très faibles granulométries.
- Si la brique est fortement endommagée, on fait le remplacement qui est techniquement assez simple à réaliser. Toutefois, il faut être en mesure de retrouver le même type de brique, avec les mêmes caractéristiques et un aspect identique.

⁸⁰ DE BRANDOIS Patrice, BABICS Florence. *Op.cit.*, p 34.

⁸¹ Ibid, p 36.

⁸² CHIALI .A. *Op.cit.*, p03.

3.3. Mur mixte en pierre et briques de terre cuite

Pour la construction de mur mixte (moellon et brique de terre cuite), les pierres utilisées sont les pierres calcaires et le tuf, elles sont destinées à être protégées par un enduit de protection à base de terre et chaux, recevant en surface un badigeon au lait de chaux, les mortiers de hourdage à base de chaux mélangé à l'aide de l'eau et de l'huile végétale⁸³.

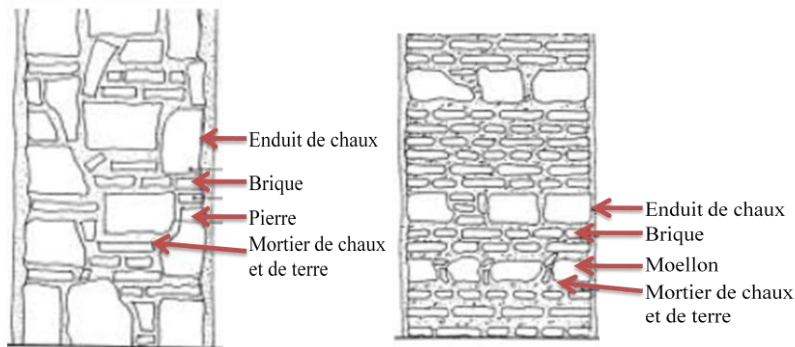


Fig. 87: Principe constructif d'un mur en pierre brute hourdée.

Source : MEDA corpus, A11 – Mur mixte en pierre et briques de terre cuite Algérie. Op.cit., p 02.

3.4. Badigeon à la chaux, à la terre, organique et au plâtre

En Algérie, le liant traditionnel est la chaux aérienne en roche. Le gros sel, l'alun et l'huile d'olive peuvent être utilisés comme adjuvants, ils aident à :

- fixer les pigments colorants ;
- favoriser le processus de prise de la chaux aérienne ou carbonatation ;
- ralentir l'évaporation de l'eau pour éviter une dessiccation trop rapide causée par le vent et le soleil ;
- rendre le badigeon plus souple, plus plastique, plus fluide pour faciliter sa mise en œuvre.

Le badigeon à la chaux étant appliqué sur une superposition de couches résultant de son entretien périodique⁸⁴, la surface de la dernière couche présente un aspect qualifié et légèrement grenu. Le badigeon à la chaux est traditionnellement blanc. Il peut parfois être calciné, bleu ou vert, par l'ajout de pigments minéraux naturels ou artificiels (oxydes).

Le dosage du badigeon à la chaux est de 1 volume de chaux pour 3 ou 4 volumes d'eau, 1 à 2 poignées de gros sel ou d'alun pour 10 litres de badigeon à la chaux.

3.4.1. Pathologies

Les pathologies liées à des causes chimiques sont :

- la disparition progressive de la couche picturale (pour les surfaces exposées à l'eau) dûe à la dissolution de la chaux aérienne par l'eau de pluie chargée de gaz carbonique ou de gaz sulfurique ;
- la calcification de surface (sur les surfaces non exposées) dûe à la dissolution de la chaux par l'eau qui en s'évaporant laisse, en surface, des dépôts de calcite.

Les pathologies de mise en œuvre sont :

⁸³ MEDA corpus, A11 – Mur mixte en pierre et briques de terre cuite Algérie. Op.cit., pp 03-04.

⁸⁴ MEDA corpus, B01 – Badigeon à la chaux, à la terre, organique et au plâtre Algérie. Op.cit., p 04.

- le farinage (mauvaise tenue du badigeon à la chaux qui laisse des traces au toucher) dû à une mauvaise préparation du mélange et/ou du support ou à une application du badigeon dans des conditions météorologiques défavorables (t° trop élevée, exposition au soleil, au vent) ;
- le décollement dû à une incompatibilité du badigeon avec le support, à un mauvais dosage d'adjuvant synthétique et parfois à la consistance trop épaisse du badigeon ;
- les efflorescences dûes au mauvais contrôle de l'humidité dans le support (gorgé d'eau ou pas assez sec).

3.4.2. Entretien

Chaque année, en Algérie, les femmes, procèdent au renouvellement du badigeon à la chaux sur les habitations. Une reprise partielle au niveau du soubassement des murs est effectuée 4 à 5 fois par an. Cette opération coïncide avec les fêtes religieuses : veille du Ramadhan, début de Moharam,...

3.5. Enduit à la chaux (lissé, taloché)

Le liant employé pour l'enduit à la chaux est la chaux aérienne en poudre et plus rarement la chaux vive en roche. Quelquefois, on peut observer la présence de terre mais en très faible quantité.

Pour l'enduit à la chaux, l'agrégat employé est le sable tamisé. Le tuileau et la cendre de bois entrent dans la composition des enduits étanches destinés aux terrasses.

3.6. Revêtement de céramique

Il est fabriqué dans un moule en bois où on pose une argile longuement pétrie, découpée puis séchée. Ensuite on ponce la partie destinée à être émaillée. Sa pose s'effectue avec un mortier composé de chaux, de terre et de sable, Le support doit être parfaitement dépoussiéré et humidifié. Les joints de la maçonnerie seront piquetés pour améliorer l'adhérence du mortier de pose.

3.6.1. Pathologies et entretien

Le décollement de leur support dû à la présence d'humidité (infiltrations d'eau pluviale ou ménagère, remontées capillaires dans les murs,...), ainsi que l'émail peut être altéré par l'utilisation de détergents trop agressifs⁸⁵. Il est conseillé d'entretenir les carreaux de céramique émaillés à l'eau claire.

3.7. Plancher en bois avec support de sol empilé, pierre ou terre cuite

Ce type de plancher forme un complexe multicouche triparti⁸⁶ :

- La couche structurelle est assurée par des poutres en bois de palmier.
- La couche de support, servant aussi de coffrage perdu, est constituée de dalles de pierres calcaires plates.
- La couche de remplissage peut être constituée de couches de terre sèche damée ou de mortier coulé à base de terre et de chaux.

⁸⁵ MEDA corpus, B08 – Revêtement de céramique, Algérie. *Op.cit.*, p 04.

⁸⁶ MEDA corpus, C02 – Plancher en bois avec support de sol empilé, pierre ou terre cuite Algérie. *Op.cit.*, p 02.

Le franchissement est réalisé au moyen de solives de stipes de palmiers, disposées à intervalles réguliers d'environ 40 à 60 cm. Viennent ensuite les dalles de pierres posées, supportant une couche de terre argileuse ou de sable damé de 30 cm d'épaisseur qui reçoit en surface un mortier de chaux fouetté.

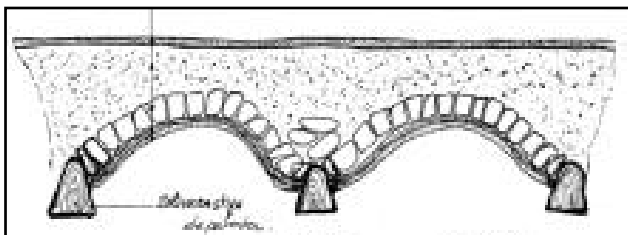


Fig. 88: Coupe sur le plancher.

Source : MEDA corpus, C02 – Plancher en bois avec support de sol empilé, pierre ou terre cuite Algérie. Op.cit., p 02,

3.7.1. Pathologie et entretien

Il existe deux facteurs essentiels de vieillissement liés aux matériaux et aux conditions climatiques :

- L'action de l'humidité due aux infiltrations des eaux pluviales se traduit par la flexion des solives de bois de palmier et le pourrissement des appuis.
- Les conditions techniques de l'abattage du palmier et la qualité du traitement de son bois conditionnent la longévité des solives.

Le recours à une chape étanche au mortier de chaux doublée d'une couche d'argile est nécessaire.

3.8. Plancher en bois avec support de sol végétal, roseaux, branchages :

- La couche structurelle est assurée par des poutres en bois du frêne, du cèdre, du genévrier⁸⁷.
- La couche de support et/ou de répartition est posée directement sur les poutres, formant ainsi un « tapis » continu constitué de branchage de laurier rose, de chaume, de graminées vivaces (diss) mais aussi de palmes ou de leurs nervures et pétioles⁸⁸, voire encore d'un lit de forte épaisseur, mélangeant graminées et thym.
- La couche de remplissage est constituée suivant les régions, de mortier de terre argileuse, de terre battue damée ou de sable.



Fig. 89: Principe constructif du plancher en bois avec support de sol végétal, roseaux, branchages.

Source : MEDA corpus, C04 – Plancher en bois avec support de sol végétal, roseaux, branchage, Algérie. Op.cit., p 04.

⁸⁷ MEDA corpus, C04 – Plancher en bois avec support de sol végétal, roseaux, branchage, Algérie. Op.cit., p 02.

⁸⁸ Ibid, p02.

3.8.1. Pathologie et entretien

Les principales causes de dégradations liées au vieillissement sont les insectes, les champignons et l'humidité due au manque d'entretien, opérant une désagrégation des sols et un pourrissement des poutres, notamment à l'endroit de l'encastrement dans le mur.

Afin d'éviter ces dégradations, on procède à un entretien annuel voir pluriannuel consistant suivant le cas, en l'application répétée de badigeon de lait de chaux, en l'entretien de mortier de chaux et de terre, au damage régulier des surfaces en terre battue, en l'entretien de la couche d'étanchéité argileuse.

3.9. Couverture en mortier de chaux

En Algérie, un mortier étanche de chaux et de sable est étalé en couche épaisse sur un remplissage de terre ou de sable damé. La chaux est parfois préparée artisanalement, à partir de calcaire calciné, la couverture de mortier de chaux sur couche de terre ou de sable repose sur des voûtains de pierre⁸⁹.

3.9.1. Pathologie et entretien

Le mortier de chaux est sensible aux variations hygrométriques, provoquant des craquelures, pouvant entraîner des infiltrations d'eau.

Le craquellement du mortier de chaux nécessite une reprise annuelle (après la saison des pluies), accompagnée d'un nouveau badigeon. La plus grande attention doit être portée au damage de la couche de terre ou de sable, et au fouettement du mortier de chaux, afin de garantir l'étanchéité de la couverture.

A l'appui de l'analyse des différentes techniques constructives précédemment citées, il en découle une récapitulation fournissant une base de données sur le pisé et ses ouvrages associés.

⁸⁹ MEDA corpus, D02 – Couverture en mortier de chaux, Algérie. *Op.cit.*, p 02.

Désignation	Matériau	Dimensions	Historique	Pathologies
Mur	Pisé alterné d'assises de pierre ou de brique cuite	Epaisseur du mur de 80cm à 120cm.	Depuis la période Almohade 12 ^e siècle	Érosion directe – Ravine -Sillon destructeur - - Décollement de l'enduit - Coup de sabre, ta Flambement et fissuration - Fissu poinçonnement ou de cisaillement.
	Pierre	Module varie en longueur de 10 à 55 cm, en hauteur de 3 à 25 cm, en profondeur de 10 à 35 cm. Epaisseur du mur 100 cm max.	Antérieure à la période romaine, perpétuée par les andalous.	Altération et décollement des couches de p (badigeon, enduit) - Dégradation plus ou mo des pierres - Perte du mortier de jointoie hourdage - Désordres structurels.
	Brique cuite	Module de 20 à 29 cm en longueur, en largeur de 11 à 13 cm et en épaisseur de 3 à 5 cm. Epaisseur du mur entre 35 et 45 cm.	Période médiévale musulmane (Ziride)	Altération de sa surface, de son aspect, efflore
	Mixte de pierre et de brique cuite	Epaisseur du mur entre 60cm à 120 cm.	Période Ziride et Almoravide des X ^o et XI ^o siècles, perpétuée durant la période ottomane du XVI ^o au XVIII ^o siècle.	Idem (pierre- brique cuite)
Plancher	Plancher en bois avec support de sol végétal, roseaux, branchages	Epaisseur du plancher de 25 à 40 cm	Depuis le 10 ^{ème} siècle.	Pourrissement des poutres
	Plancher en bois avec support de sol empilé, pierre ou terre cuite	Epaisseur du plancher 30 cm	Depuis le 10 ^{ème} siècle	Pourrissement des appuis
Revêtement	Badigeon à la chaux, à la terre, organique et au plâtre	/	Depuis l'Antiquité. Elle est perpétuée durant la période Musulmane.	Disparition progressive de la couche picturale calcification de surface - farinage - décollem efflorescences.
	Enduit à la chaux (lissé, taloché)	/	Ancestrale, perpétuée durant l'époque musulmane	Fissurations - l'apparition de taches- gonfle manque d'adhérence - effritement
	Revêtement de céramique	10 X 10 ou 15 X 15 (pour les murs) et 20 X	Depuis le 16ème siècle.	Décollement du support dû à la présence

4. L'importance du diagnostic

Les interventions doivent s'effectuer suivant un programme établi après plusieurs opérations de diagnostic général des désordres, afin de définir les travaux de réparation, de consolidation de structures existantes et d'amélioration de tous les éléments dégagés.

Une vision d'ensemble relative aux dommages existants, à la nature de la construction et aux matériaux utilisés, est néanmoins indispensable pour réaliser des travaux cohérents et conformes aux anciennes constructions.

Le diagnostic nécessite une démarche logique et ordonnée, allant de la simple observation visuelle des désordres jusqu'au diagnostic final et détaillé qui permet d'élaborer la technique de restauration avec un constant pendant l'exécution. Les démarches à suivre pour tout processus de diagnostic sont :

4.1. Le pré-diagnostic

Il consiste à faire une première évaluation de l'état de la construction, et de définir lors de la première visite, les aspects du travail pour des études pluridisciplinaires.

Il s'effectue lors de la première visite du bâtiment après des observations visuelles des désordres, de leur emplacement, de leur nature et de leur dimension: c'est une estimation de l'état de conservation de l'édifice.

Cette estimation est l'étape qui permet de classer le bâtiment selon son état de dégradation; en effet, un édifice qui a perdu sa stabilité structurelle nécessite une intervention maximale, cependant l'édifice qui souffre de quelques désordres fera seulement l'objet de quelques travaux d'entretien.

4.2. Les études pluridisciplinaires

C'est une récolte de toutes les informations des tests et analyses des désordres dans la construction; elles serviront de guide pour une future intervention.

Ces études consistent à fournir tous les résultats des différentes analyses, elles comprennent l'étude historique et documentaire, l'étude socio-économique, le relevé architectural, l'inspection détaillée du bâtiment, l'analyse constructive et structurelle, les essais in situ et en laboratoire.

Elles comportent l'étude historique et documentaire du bâtiment à travers les textes qui le décrivent, les photos anciennes et les dessins et croquis de l'époque, une étude socio-économique et cela pour voir l'impact de l'intervention sur la société. Les différents relevés qui sont une représentation graphique, nous permettent de mieux comprendre et analyser le bâtiment, de connaître les caractéristiques des façades, les propriétés des matériaux, l'état de couverture, puis une analyse constructive et structurelle.

4.3. Le diagnostic final

Il consiste à analyser les informations des études pluridisciplinaires et à déterminer les types d'interventions nécessaires. C'est une analyse de toutes les informations récoltées qui contribuent à élaborer un bon diagnostic qui permet de déterminer toutes les causes des désordres et définir les remèdes appropriés.

Selon la valeur de la dégradation détectée lors des études pluridisciplinaires, il sera décidé de la nature de l'intervention: réhabilitation, restauration ou rénovation.

Le diagnostic		
Le pré diagnostic	L'étude pluridisciplinaire	Le diagnostic final
<p>-C'est une observation visuelle des désordres, de leur emplacement, de leur nature et de leur dimension</p> <p>- Cette observation, est une estimation de l'état de conservation de l'édifice</p>	<p>Elles consistent à fournir des résultats, suivant les différentes analyses à savoir:</p> <p>1/L'étude historique et documentaire</p> <p>2/ L'étude socio économique</p> <p>3/ Les différents relevés qui sont:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le relevé architectural. • Le relevé des désordres. • Le relevé technique. 	<p>Il consiste à faire une analyse de toutes les informations récoltées, et de déterminer ensuite la nature de l'intervention sur l'édifice.</p>

Tableau 04 : Les principes d'intervention dans un ancien bâti.

Source : TALEB BENDIAB Nawal, Les techniques de restauration du patrimoine bâti, mémoire de magister, USTO, p42, 2007.

5. Conclusion

Le pisé « terre banchée », technique constructive employant la terre compactée mise en forme dans un coffrage amovible, a été largement utilisé pour la construction de tous types d'édifices quelque soit leur nature. Le bassin méditerranéen semble avoir opté pour ce procédé constructif au moins depuis le VI^e siècle av. J-C. En Algérie, les constructions rurales ainsi qu'urbaines de plusieurs régions du nord du pays témoignent de l'existence de cet art de bâtir ancestral. Les plus anciens témoignages évoqués de manière sporadique nous parviennent à partir du X^e siècle.

Les recherches scientifiques ont réussi à exhumer la technique ancestrale du pisé en redécouvrant son utilisation traditionnelle, mais aussi en l'actualisant à travers des moyens de mise en œuvre modernes plus simples d'utilisation. L'Algérie avait participé à cet élan scientifique en adoptant certains projets de construction en terre et en pisé. Même si certaines de ces expériences n'ont pas été

fructueuses, elles ont néanmoins permis d'asseoir une réglementation légitimant la construction en terre.

Aujourd'hui, l'Algérie se doit de redécouvrir son patrimoine en terre et en pisé, probablement plus important que ne le laissent apparaître les rares mentions archéologiques et les textes. Ceci devrait être entrepris dans une étude globale, ou un champ de recherche spécialisé, dans le but de reconnaître la construction traditionnelle en terre en Algérie, en vue de sa préservation, et restauration d'une part et de sa réhabilitation dans la construction contemporaine d'autre part. A travers ce chapitre nous avons essayé de mettre en valeur le procédé constructif en terre dans un bâti traditionnel édifié dans une grande partie avec la technique du pisé avec ses ouvrages associés qui sont édifiés avec des matériaux compatibles à celui du pisé pour préserver à la fois l'intégrité physique de la structure et l'harmonie esthétique de l'édifice.

Face à ce que nous avons vu dans l'assise théorique qui comprend la prise en charge du patrimoine architectural des constructions en terre, le confort thermique attribué par ces constructions ainsi que toutes les techniques traditionnelles qui ont façonné ce patrimoine, nous allons appliquer les préceptes de la technicité et de la durabilité des matériaux qui constituent notre cas d'étude « la maison de l'Oukil » du sanctuaire de Sidi Boumédiène à Tlemcen et cela à travers l'identification des techniques constructives et l'évaluation du confort thermique qu'offre cet échantillon.

Chapitre IV :

Cas d'étude : Typologie constructive et simulation numérique sur la maison de L'Oukil.

Introduction

Au cours des chapitres précédents, nous avons traité le sujet du patrimoine architectural en terre, et comment préserver ce bâti à travers de simples opérations de protection. Ce patrimoine présente des exemples éloquentes de l'architecture vernaculaire où le confort thermique est l'une des principales caractéristiques, par sa typologie architecturale et constructive. Ensuite, nous avons traité la technicité des matériaux traditionnels, en matière de mise en œuvre et de restauration en cas de désordre afin de constituer un support théorique pour notre recherche.

Sur la base de cet instrument de travail, nous allons entreprendre notre cas d'étude appartenant au patrimoine architectural de Tlemcen qui a une histoire ou parfois, une légende qu'il conserve jalousement. Pour étayer notre étude, nous nous intéressons, dans le présent chapitre, à une maison située à l'extra muros de la médina. Notre choix s'est porté sur cette maison introvertie appartenant à un tissu dense et vernaculaire du quartier d'El Eubbâd. Il s'agit du site historique du sanctuaire de Sidi Boumédiène, monument classé patrimoine national. Il est principalement construit avec la technique du pisé « terre banchée ». La connaissance de cette maison et des différentes restaurations effectuées ainsi que de ses techniques constructives, ses caractéristiques spatiales et architectoniques est nécessaire pour la mettre à l'épreuve du confort thermique à travers une simulation.

1. Présentation de la ville de Tlemcen

1.1. Le site, localisation et orientation

Tlemcen, est la forme du pluriel berbère Tilmisân dont le singulier est Tilmas qui signifie «poche d'eau, source». Ce nom convenait admirablement à notre ville dont les innombrables sources donnaient une eau abondante, fraîche, agréable au goût¹.

La ville de Tlemcen, chef lieu de la Wilaya se situe dans l'extrême nord - ouest du pays, à plus de 800 mètres d'altitude, elle est distante de 63 kilomètres de la frontière marocaine, de 140 km de la ville d'Oran et de 40 km de la mer Méditerranée. Elle est à 3°38' de longitude Ouest et 34°53' de latitude nord. Son site naturel s'étale en forme d'escalier géant sur trois marches, dominant vers le nord la plaine de Hennaya où serpentent les rivières de la Tafna et du Safsaf, et dominé au sud par le plateau de Lalla Setti (1200 m d'altitude): un site favorisé par ses caractéristiques stratégiques et défensives, protégé par la présence de nombreux ravins et escarpements, et abrités des vents nord-ouest².

Grâce à sa situation géographique exceptionnelle, par la nature très douce de son climat dûe à l'altitude, et par son hydrographie généreuse, elle fut un lieu d'habitat idéal et d'échanges actifs, elle fut la capitale de Maghreb central et de la dynastie zianide à partir du 12^{ème} siècle jusqu'à l'arrivée des ottomans au 16^{ème} siècle, et capitale de la culture islamique en 2011.

¹ Tlemcen et sa région- livret-guide publié par le syndicat d'initiative de Tlemcen 1921.

² Tlemcen, Collection Arts et culture, Ed Ministère de l'Information, Espagne, 1974, p10.

Morphologiquement, la topographie fait ressortir trois plate-formes géantes, la plus haute représente le plateau de Lalla Setti, la médiane celle d'El Eubbâd, tandis que la plus basse représente la plaine de Sidi Ottman et Sidi El Haloui. Notre site, El-Eubbâd, se situe à l'extra-muros de la médina de Tlemcen, il est adossé au flanc nord de la montagne du Mefrouch, à deux kilomètres au sud-est du centre ville.

1.2. Le climat de Tlemcen

Le climat de Tlemcen³ est du type méditerranéen, classé par l'office National Météo et caractérisé par deux saisons :

Une saison humide : qui est la zone climatique d'hiver, caractérisée par des hivers froids et un écart de température diurne important, qui s'étend d'Octobre à Avril avec des précipitations irrégulières dans l'espace et dans le temps. La moyenne de la pluviométrie se situe autour de 500mm, la température moyenne pour cette saison oscille généralement entre 5°C et 14°C avec un taux d'humidité de 74%.

Une saison sèche : qui est la zone climatique d'été, caractérisée par des étés plus chauds et moins humides que pour le littoral, mais avec des écarts de température diurnes importants. Elle va du mois de Juin au mois de Septembre. La température moyenne de cette saison oscille autour de 26°C avec un maximum pouvant atteindre 40°C, pour un taux d'humidité de 61%.

La température moyenne annuelle est de 18°C.

La moyenne annuelle de l'hygrométrie varie entre 57% et 79%, elle atteint son minimum mensuel moyen de 49,8% en Juillet et son maximum mensuel moyen de 80% en Décembre, Janvier et Février.

Tlemcen subit un vent qui varie selon la saison, les vents d'hivers, dominants soufflent du côté sud-ouest; les vents d'été frais soufflent du côté nord-ouest; durant les mois de Septembre et d' Octobre, le vent souffle suivant la direction nord-est.

³ <http://www.vitamedz.com/>

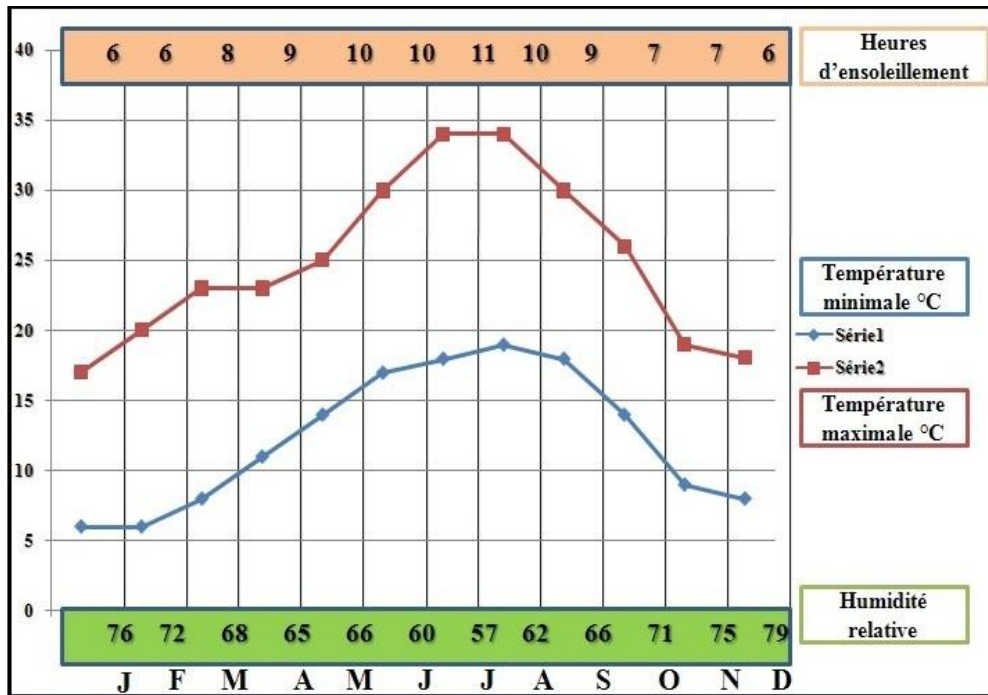


Fig. 90: Diagramme des températures mensuelles moyennes et d'humidité relative de Tlemcen.

Source : <http://www.wofrance.fr/weather/maps/city>, traité par l'auteur.

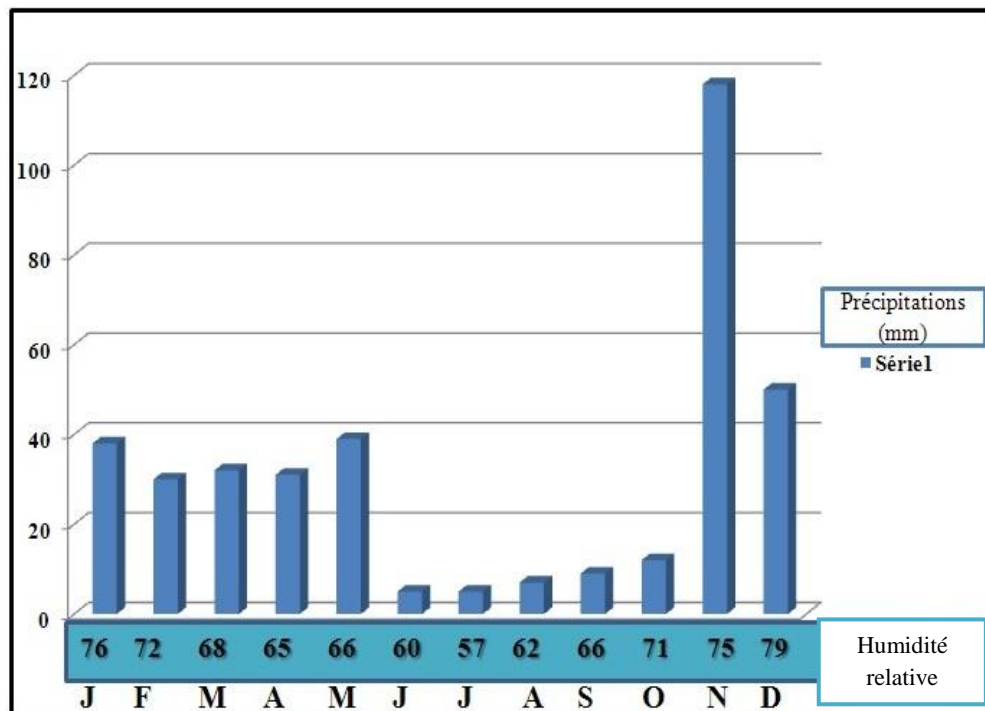


Fig. 91: Diagramme des précipitations de Tlemcen.

Source : <http://www.wofrance.fr/weather/maps/city>, traité par l'auteur.

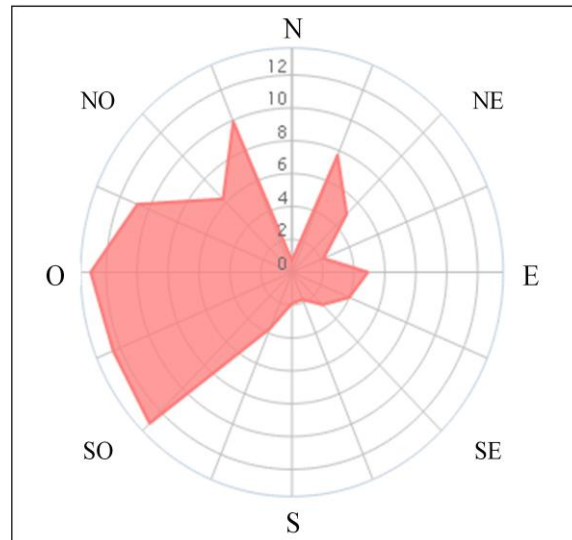


Fig. 92: Vents dominants annuels.

Source : <http://fr.windfinder.com/windstatistics/tlemcen-zenata>.

1.3. L'eau et le paysage comme critères d'implantation

L'eau et les qualités paysagères sont deux aspects importants et marquants à travers lesquels Tlemcen a construit sa réputation. D'ailleurs, il est intéressant de rappeler, comme le souligne l'ensemble des historiens, l'étymologie du nom Tlemcen, apparu au 12^e siècle sous les almohades signifiant en berbère «source ou poche d'eau ». Bien avant eux, les romains au 4^e siècle après J.C. lui attribuaient déjà le nom de Pomâria ou «les Vergers», ce qui est extrêmement significatif, et constitue pour nous un indicateur certain quant aux qualités paysagères et aux ressources hydrauliques que recelaient Tlemcen et sa région⁴.

- L'eau : est une source de vie, sacralité de l'islam, ce liquide précieux, comporte deux (02) aspects: l'un physique purificateur du corps à travers les ablutions, l'autre spirituel, philosophique et symbolique.

Notre site d'étude El-Eubbad est situé non loin et en aval du plateau du Mafrouch. Là, où l'oued Safsaf prend naissance, pour se jeter ensuite dans un gouffre de plus de trois cents (300) mètres de profondeur par sept cataractes successives, et qui constituent les fameuses cascades d'El-Ourit, lieu naturel de rencontre et de convivialité de la population tlemcénienne.

Il faut relever que l'ensemble des édifices que constitue le sanctuaire de Sidi Boumédiène sont la mosquée et sa fontaine, la médersa et sa fontaine, le mausolée et le puits sacré, la salle d'ablutions et les latrines, le hammam, et enfin la maison de l'Oukil avec sa fontaine.

⁴ Tlemcen, Collection Arts et culture. *Op. cit.*, p7.

- Le paysage : ce lieu offre une charge d'émotion et de signification, résultat de la combinaison des qualités paysagères naturelles du site et des manipulations de l'homme faites d'implantations qu'on qualifie d'intelligentes fondues dans ce paysage poétique⁵, créant ainsi un « espace existentiel »⁶, concept qui concerne les relations fondamentales qui existent entre l'homme et le milieu.

Cette position offre la possibilité de dominer la base verdoyante de celui-ci ainsi que la plaine de Hennaya que traverse et arrose l'oued Safsaf. Il est même dit que par temps clair on peut apercevoir la mer à l'horizon.

1.4. Bref historique sur l'occupation de Tlemcen

Le premier établissement humain sur ce site remonte probablement à l'âge paléolithique. Néanmoins, c'est au IV^e siècle, sous la présence romaine que la ville était devenue un réel camp militaire, connu alors sous le nom de Pomaria (les vergers). A partir du VII^e siècle, sous la domination des arabes, la ville commença à s'agrandir, elle recevra le nom d'Agadir (rempart de la citadelle)⁷.

En 1079 Tlemcen fut conquise par les Almoravides, c'est à cette époque que s'érigea Tagrart (la station) ; noyau de la ville nouvelle, elle ne fût au début qu'un simple camp militaire. C'est ainsi lors de ce développement qu'on assiste à la naissance de Tlemcen (les poches d'eau) ; composée de l'union d'Agadir et de Tagrart⁸.

Au moment du règne de la dynastie des almohades, une nouvelle puissance grandissait avec l'embellissement de la grande mosquée de Tlemcen⁹.

Au début du XIII^e siècle, le déclin des Almohades fournit aux Abd el-Wâdides, sous la conduite de Yaghmorasan, du clan Zaiyanide, l'occasion d'installer une dynastie indépendante¹⁰. Il donna à Tlemcen la prospérité économique et un rayonnement intellectuel et religieux. Ce règne sera interrompu par une brève domination des Mérinides qui ne dura que deux décennies¹¹.

L'incapacité de la dynastie régnante à faire face à l'expansion espagnole a forcé quelques villes du royaume à faire appel à l'empire ottoman, seulement la pression militaire turque s'est fait sentir

⁵ KESSAB Nasreddine, préservation des sites et monuments historiques le sanctuaire de Sidi Boumediene: une architecture, une politique à relever, thèse de magister, EPAU, 1997, p44.

⁶ NOBERG-SCHULZ Christian, Genius Loci- Paysage- Ambiance- Architecture, Ed. Pierre Mardaga, Paris, 1981, p8.

⁷ ABBADIE Louis, Tlemcen au passé retrouvé, Ed Jaques Candini, Nice, 1994, p 09.

⁸ MARÇAIS Georges, Tlemcen : Les villes d'art célèbres, Ed H.Laurens, Paris, 1950, pp. 20-53.

⁹ Ibid, p 31.

¹⁰ LAWLESS Richard, « Tlemcen capitale du Maghreb central, analyse des fonctions d'une ville islamique médiévale », in revue de l'occident musulman et de la méditerranée, n° 1, 1975, p 49.

¹¹ LAWLESS Richard, GERALD Blake, Tlemcen, continuity and change in an Algerian Islamic town, London, 1976, p298.

d'une manière continue du côté de la dynastie des Zianides jusqu'à son effondrement définitif en 1556, cette date a marqué une longue période de décadence jusqu'à sa prise par l'occupant français.

En juillet 1833, craignant une éventuelle offensive, le Maréchal Clauzel, envisagea l'installation d'une garnison française¹². Mais l'Emir Abdelkader n'avait pas été désarmé et constituait toujours une menace très sérieuse pour la domination française. C'est pour cette raison même que Tlemcen resta jusqu'en 1952 sous l'administration militaire¹³.

1.5. Stratégie urbaine adoptée par les Mérinides à Tlemcen

Tlemcen, a depuis toujours constitué un enjeu dans la conquête du Maghreb. Les mérinides ont adopté pour cette ville une stratégie urbaine originale et une attitude constante à chacune de leur intervention, sous des souverains différents et à des époques différentes. Cela démontre que cette dynastie était profondément imprégnée d'une idéologie ou plutôt portée par un idéal concrétisé à travers les réalisations d'El-Mançura, la mosquée de Sidi-El-halwi et le sanctuaire de Sidi Boumédiène.

Ce qui est surprenant, et à la fois intéressant de relever c'est la localisation de ces implantations mérinides situées aux points cardinaux de la ville de Tlemcen. En effet, ces interventions semblent répondre à un ordre qui va au-delà de la dimension humaine, une manière peut-être de bénir la cité, la placer sous la protection divine, afin de la préserver, El-Mançura dite la victorieuse à l'est, Sidi Boumédiène à l'ouest et Sidi-El-halwi au nord, Lala-Setti au sud, qui domine la ville.

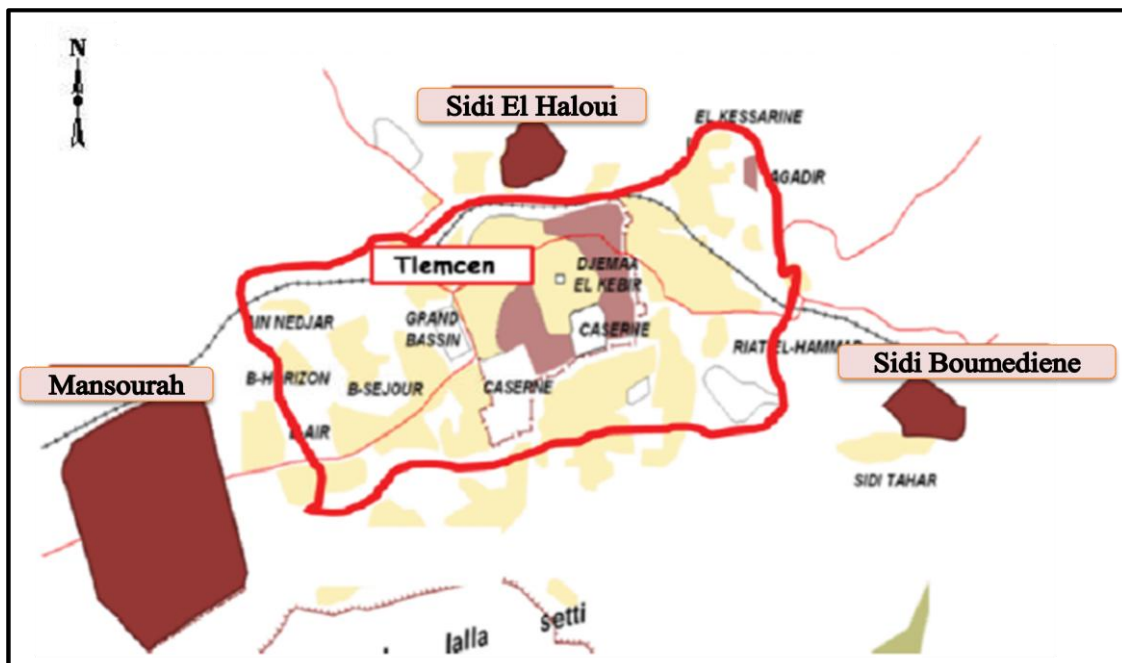


Fig. 93: Localisation des édifices mérinides. **Source :** ANAT. POS de la médina de Tlemcen, 2001.

¹² LECOCQ André, histoire de Tlemcen, ville française, tome I : l'administration militaire, 1842-1852, Ed internationales S.S, Tanger, 1940, p 06.

¹³ LECOCQ André. *Op.cit.*, p 03.

2. Présentation du sanctuaire de Sidi Boumédiène

2.1. Présentation du quartier d'El-Eubbâd

Le site d'El Eubbâd (pluriel de Abid= adorateur) est bâti sur un escarpement montagneux. Le petit village d'El-Eubbâd est un lieu de pèlerinage d'une grande renommée, situé sur le versant nord de la montagne du Mefrouch, à deux kilomètres du sud-ouest de Tlemcen.

Au départ, il portait le nom de « Ribat El Eubbâd », les textes du XIII^e siècle distinguent deux quartiers d'El-Eubbâd. El-Eubbâd. es-sefli qui abritait un cimetière, et qui est le premier noyau habité. Ce quartier fut un lieu de piété qui comptait cinq à six mosquées et certains nombres d'oratoires¹⁴, le quartier comptait de même des habitations, bains publics, marchés et jardin. De ce grand ensemble, il ne subsiste actuellement que quelques vestiges éparses.

Quant à El-Eubbâd el-fouqui, il ne connut un développement significatif qu'après l'édification du mausolée par le souverain almohade Nasser El Mansour¹⁵.

Ce quartier s'élargira encore au 14^e siècle, période à laquelle le mérinide Abou L'Hassan édifia autour du mausolée tous les édifices du sanctuaire : « *L'ensemble allait attirer ainsi les pèlerins de tout le Maghreb* »¹⁶.

Des monuments majestueux, symboles d'une civilisation grandiose, dominent les maisons blanches et surpeuplées du petit bourg, qui sont élevés à la mémoire du grand saint musulman Boumédiène qui y est enterré¹⁷. C'est essentiellement l'œuvre du sultan mérinide Abou L'Hassan, soucieux de s'imposer aux tlemceniens en magnifiant leurs saints.

Cet ensemble fût doté de biens habous d'une valeur considérable, permettant ainsi l'entretien des biens immobiliers, le paiement des honoraires du personnel, les charges afférentes aux pèlerins ainsi que les bourses des étudiants¹⁸.

¹⁴BROSSELDARD Charles, « les inscriptions Arabes de Tlemcen », Revue africaine : n°18, pp 401-402.

¹⁵MARÇAIS William et Georges, Les monuments arabes de Tlemcen, Ed Albert Fontemoing, Paris, 1903, p223.

¹⁶HINA A, les états de l'occident musulmane au XIII^e, XIV et XV siècles, p 315.

¹⁷Tlemcen, Collection Art et culture. Op. cit., p 38.

¹⁸B.E.T :A.T.A.R, Phase I : Relevé, rapport écrit : Décembre 1997, p6.



Fig. 94: Vue du complexe de Sidi Boumédiène vers 1875 (dessin de J. Moynet, d'après une photographie de M. Perda).

Source : CHARTON Edouard, le tour du monde, Tlemcen, Nouveau journal des voyages, Textes et dessins inédits, 1875, p321.

Ce village constituait un passage obligé pour chaque visiteur de la ville de Tlemcen, mais après l'incendie du mois de Décembre 1994, qui a touché le mausolée, la vie a semblé s'arrêter à cet endroit. L'insécurité qui y régnait pendant la période noire a contraint les habitants à fuir les lieux, et le village fut ainsi complètement déserté.

Cependant, avec le retour de la paix, le village a repris sa vie normale, et le sanctuaire rénové, encore plus beau que jamais, connaît un afflux important de touristes.

Sur le plan architectural et urbanistique, il s'agit d'un établissement organique, composé de résidences individuelles desservies par des parcours étroits inaccessibles aux véhicules. Pendant la période coloniale des travaux de modernisation y ont été effectués (réseaux d'adduction d'eau, d'égouts et de voirie)¹⁹, Mais depuis l'indépendance, le processus d'urbanisation s'est accéléré, plusieurs maisons traditionnelles ont été substituées par de nouvelles constructions. A partir de 1997 des opérations de restauration touchent le complexe historique de Sidi Boumédiène pour conserver son authenticité.

¹⁹ BLANC R, la commune de Tlemcen extra-muros, in B.S.A.U.T, 1956, p73.



Fig. 95: Situation du complexe de Sidi Boumediene. **Source :** Google earth.

2.2. Le personnage de Sidi Boumédiène

Abou Mediane Chouaib Ibn El-Hassein Elançari est né à Cantillana, près de Séville, dans l'Andalousie musulmane vers 1126 après J.C. Il dit *«Dans mon enfance, devait-il écrire lui même, chaque fois que je passais devant une mosquée ou une école, mon cœur palpitait d'émotion, je ne savais pas encore ce que c'était que lire et prier, mais je brûlais de l'apprendre Je m'échappais donc, chaque jour, de la maison paternelle pour aller écouter les professeurs les plus réputés.»*²⁰

Assoiffé de savoir et de connaissance, il entama ses études à Séville, sa ville natale, puis il prit son sac pour entreprendre un long périple. Il étudia à Fès, il fit la rencontre de grands maîtres dont Abou'l-Hassan-Ibn-Harizim qui réussit à atteindre l'oreille, mais aussi, et surtout l'esprit et le cœur du jeune Abou Mediane. C'est le début du grand voyage, pour ce jeune homme.

Après Fès, ce fut Tlemcen. Il fit le pèlerinage à la Mecque. Il enseigna à Bagdad, Séville et Cordoue. De Béjaïa, il retourna à Tlemcen où il mourut en 1197. Il fut enterré à El-Eubbad.

Abou Mediane devenu à sa mort, Sidi-Abou-Mediane, image et figure emblématique du Soufisme au Maghreb et en Algérie, n'est pas uniquement le saint protecteur de la ville de Tlemcen, mais il appartient pleinement au patrimoine historique national. Un personnage qui incarne, sagesse et humilité.

²⁰ KESSAB Nasreddine. *Op. cit.*, p65.

2.3. Contexte historique du sanctuaire

Le complexe de Sidi Boumédiène constitue un patrimoine historique, architectural, cultuo-culturel et urbain inestimable, sanctuaire qui demeure et constitue un échantillon pratiquement unique et important de la période mérinide. Cette importance se révèle par le caractère permanent des édifices, expression d'une totalité, ainsi que par leur bon état de conservation.

Abou-El Hassan avec lequel le royaume mérinide connu son apogée construisit ce sanctuaire à la mémoire de Sidi Boumédiène saint soufi, protecteur de la ville de Tlemcen en (1331 - 1351). Le mausolée qui abrite le sépulcre existait déjà, érigé pour ces mêmes raisons par le sultan almohade Mohamed Ennacer à la fin du 12e siècle après J.C²¹.

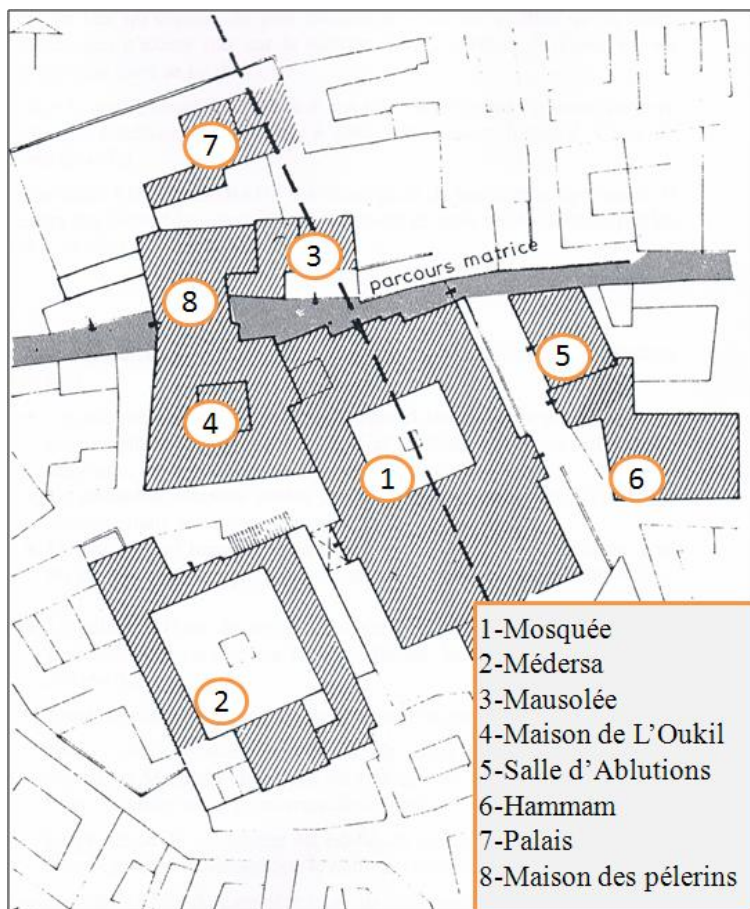


Fig. 96: Plan d'ensemble du sanctuaire de Sidi Abou- Mediane.

Source : KESSAB Nasreddine. *Op. cit.*, p24. Traité par l'auteur.

Cet édifice a été l'élément genèse qui a non seulement donné naissance au sanctuaire, mais a également structuré l'ensemble des bâtiments qui le composent, créant une entité formelle extrêmement articulée, il fallait greffer au tissu existant des édifices de grandes dimensions. Pour intégrer ces greffes au tissu d'El-Eubbad, les concepteurs ont usé de subtilité créant redents et décrochements dans les édifices afin d'atténuer l'effet de masse des bâtiments. (Fig. 96).

Avant de parler de l'ensemble architectural, il est nécessaire de cerner les grandes lignes du contexte historico - religieux de l'époque, dont les conditions ont permis l'édification de l'un des fleurons

²¹ BOURUIBA Rachid, L'art religieux musulman en Algérie, Ed société nationale d'édition et de diffusion, Alger, 1981, p173.

architecturaux de l'Occident musulman. En effet, le Maghreb va connaître à la fin du moyen âge un fait religieux nouveau, que représente son ouverture au mysticisme à travers le soufisme. « Ce fut là une importation orientale », dont le mouvement va prendre son essor au Maghreb dès le 12^{ème} siècle.

Ceci grâce à l'enseignement prodigué par le célèbre soufi Abou Mediène Choaiib. Sachant que les mérinides accordaient une grande importance aux hommes pieux, et assuraient une protection officielle aux soufis, dont « les sépultures étaient le but de visites pieuses et de retraites », il est fort aisé de comprendre la décision du souverain Abou El Hassan Ali de fonder, après avoir occupé Tlemcen, cet ensemble religieux autour du mausolée de Sidi Boumediène.

Ce dernier faisait l'objet à l'époque, d'une vénération spéciale de la part des mérinides. Un gigantesque chantier vit ainsi le jour au 14^{ème} siècle à cet endroit, et donna naissance en premier lieu à la mosquée, fondée en 1339, à ses dépendances, puis à la medersa en 1347 et enfin au petit palais ou Ksar Es Soltane et ses dépendances.

2.4. Etude spatiale et formelle

Les qualités du site naturel, et la manière avec laquelle les mérinides se le sont appropriés, constitue une véritable leçon en matière d'intégration. La forte déclinaison du terrain, la dense végétation, ainsi que la présence de bâtis ont constitué des contraintes suffisamment fortes, pour inciter les concepteurs à rechercher les solutions optimales pour s'intégrer d'une manière aimable à un environnement naturel et artificiel existant²².

Cette approche a permis aux mérinides, de produire un ensemble dont la composition formelle, particulièrement articulée, est extrêmement élégante. Ceci se vérifie non seulement en plan mais également par rapport à la troisième dimension. La lecture du sky-line nous permet de relever une appropriation de l'espace en gradins.

Ces édifices de la période mérinide s'organisent sur la base d'une trame spatiale carrée qui a produit un plan d'une très grande régularité. Ce sont des édifices ordonnés et de forme géométrique régulière : le mausolée, qui a été l'élément genèse, a donné naissance au sanctuaire, mais a également structuré l'ensemble des bâtiments qui le composent, créant une entité formelle extrêmement articulée: la mosquée, la médersa, le palais, la maison de L'Oukil, le hammam et la salle d'ablutions.

La relation fonctionnelle entre ces édifices est assurée par le parcours qui mène aux différentes entrées, espace interstitiel qui en articule spatialement et formellement les édifices du sanctuaire, et

²² Tlemcen, Collection Arts et culture. *Op. cit.*, p46.

permet une souplesse et une flexibilité dans la greffe et l'intégration d'objets exogènes à un tissu urbain existant.

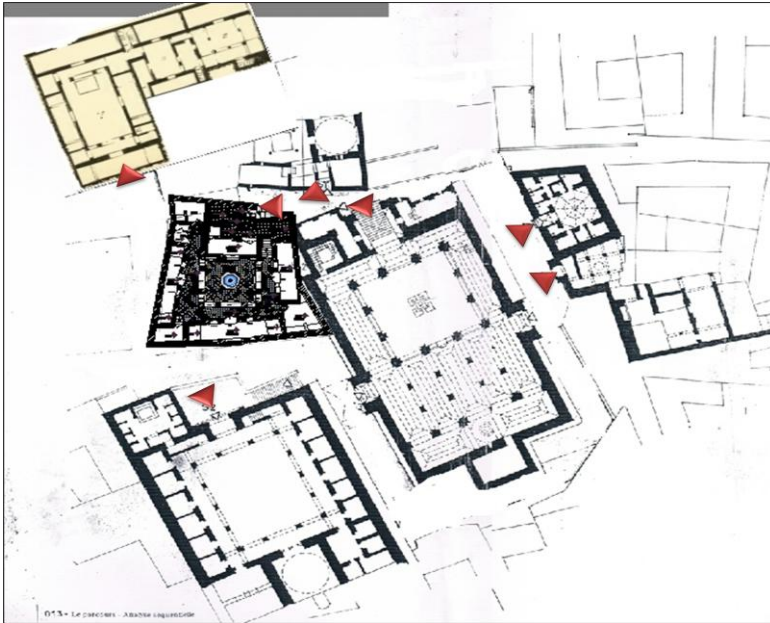


Fig. 97: Implantation des édifices du sanctuaire de Sidi Boumediene.

Source : KESSAB Nasreddine. Op.cit., p 31, traité par l'auteur.

2.5. Espaces bâtis du sanctuaire

2.5.1. La mosquée

Cet édifice fut construit par le souverain mérinide Abou-El-Hassan en 1339 après J.C²³. Son entrée, matérialisée par une grande arcade en fer à cheval, forme le cadre somptueux du porche monumental qui est richement décoré avec une porte monumentale qui lui est attenante constituée de deux battants et toute de cuivre (Fig.107). Onze marches permettent l'accès du niveau de ce porche et font à cette arcade une base majestueuse²⁴, elles conduisent à la cour intérieure de forme à peu près carrée dont le centre géométrique est matérialisé par une élégante fontaine de marbre.



Fig. 98: La mosquée de sidi Boumédiène.

Source : Auteur.

²³ MARÇAIS Georges, l'architecture musulmane de l'occident, Ed arts et métiers graphiques, Paris, 1954, p 276.

²⁴ MARÇAIS William et Georges, Les monuments arabes de Tlemcen. *Op. cit.*, p 240.



Fig. 99: Porche d'entrée de la mosquée de sidi Boumediène.

Source : Auteur.

Cet espace central est enveloppé sur ses quatre côtés par des galeries que rythment des piliers surmontés par des arcs en fer à cheval plein cintre²⁵. Les quatre parois qui définissent cet espace central sont couronnées d'une marquise périphérique recouverte de tuiles vertes vernissées.

La salle de prière se développe sur cinq nefs portées par des piliers à base rectangulaire, déterminant dans cet espace trois travées. Dans le sens de ces travées, une nef se déroule matérialisant la paroi et la direction de la Qibla. Cette nef est de même largeur que la nef centrale qui aboutit au mihrab, qui se présente sous la forme d'une niche à pans coupés surmontée d'une coupole à stalactites sur plan octogonal²⁶. Deux grandes portes latérales font communiquer la salle de prière avec l'extérieur. (Fig. 100).

Les travées sont couvertes de plafonds portant des revêtis de plâtre, formant des caissons d'une grande variété de formes. Les combles et les toits de tuiles qui les couvrent ont été relevés, par l'administration française, pour isoler les plafonds, qui étaient gravement endommagés par l'humidité. L'auvent de tuile sur maçonnerie qui fait le tour du çahn marque la place du toit primitif.

Dans le prolongement de la nef ouest et sur la paroi nord une ouverture donne accès au minaret. Le sommet de cette tour de base carrée, ne peut être atteint qu'après avoir escaladé quatre vingt douze marches. , sa hauteur est de 27,50 m²⁷.

²⁵ Ibid, p 240.

²⁶ BOURUIBA Rachid. Op. cit., p 171.

²⁷ Ibid, p 182.

En termes de matériaux, les parois sont constituées d'une maçonnerie parfaitement appareillée, et les jointures entre les briques de terre cuite sont complètement régulières. Des rondins probablement de thuya font usage de chaînage et raidissent la maçonnerie.

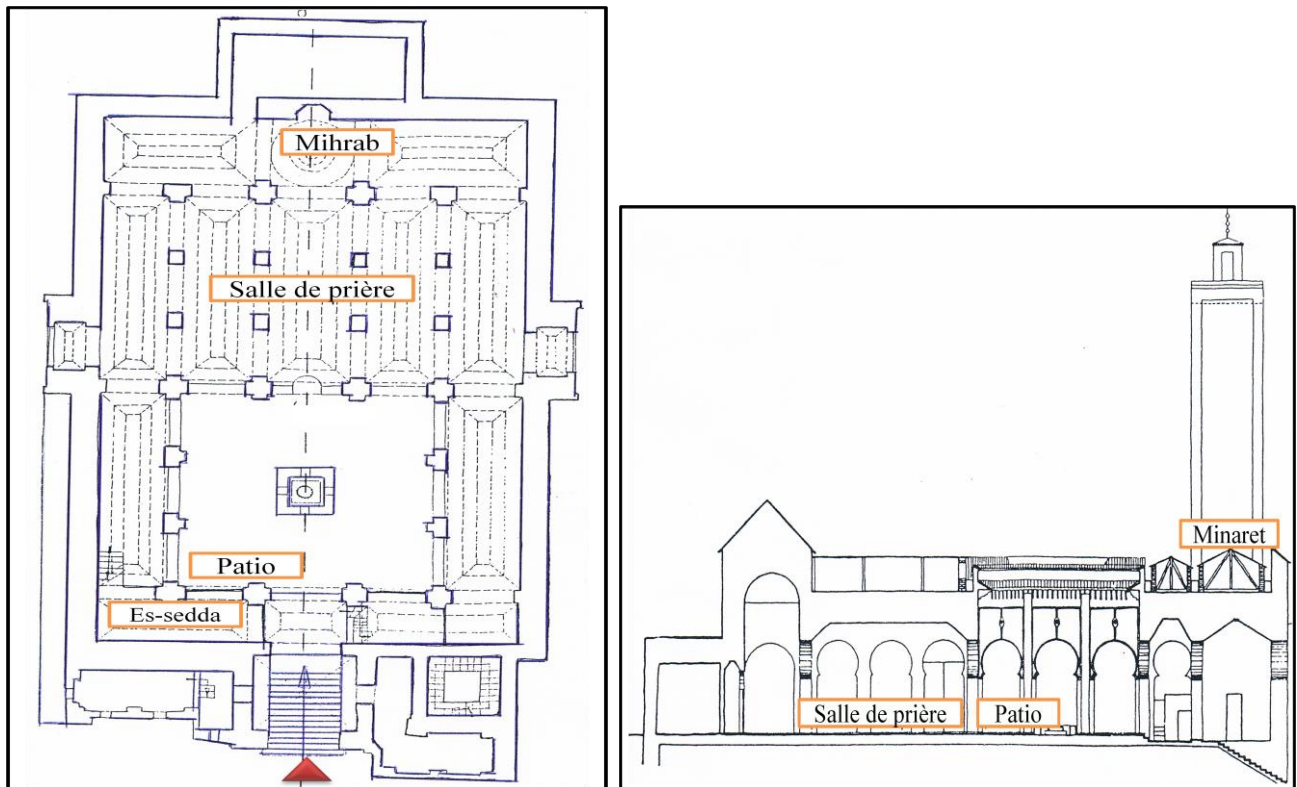


Fig. 100: Vue en plan et coupe de la mosquée

Source : KESSAB Nasreddine. *Op.cit.*, p 75.

2.5.2. La médersa

Erigé par le grand bâtisseur mérinide Abou-El-Hassan en 1347 après J.C. Ce n'était pas la première du genre à Tlemcen, elle s'ajoute à celle d'El Medersa El Kadima et la médersa Tachfiniya. Elle est réalisée près de la mosquée, séparée d'elle par le passage étroit du cloître extérieur, elle est le dernier étage de cette superposition de monuments qui, s'échelonne sur le flanc de la colline²⁸. Elle a eu le privilège de compter parmi ses enseignants le célèbre historien maghrébin Abderahman Ibn Khaldoun, qui qualifie cet établissement de « sanctuaire paisible des sciences »²⁹.

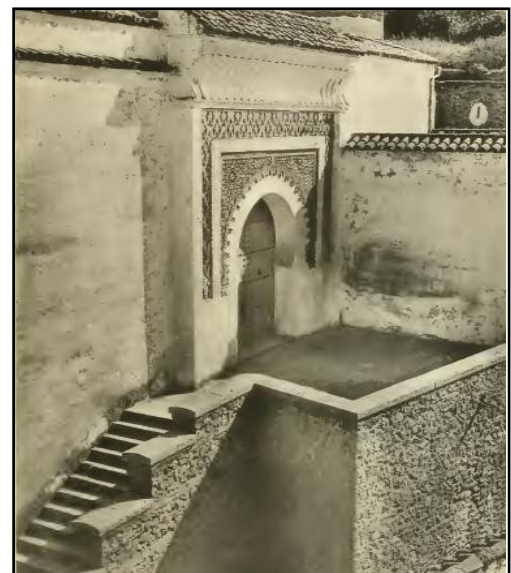


Fig. 101: Accès de la médersa de Sidi Boumediène.

Source : MARÇAIS William et Georges. *Op.cit.*, p 275.

²⁸ MARÇAIS William et Georges. *Op. cit.*, p 274.

²⁹ IBN KHALDOUN, introduction à l'histoire des berbères, le Baron de Slane, p 48.

La medersa est accessible par une porte monumentale, à partir d'un escalier qui dessert une terrasse surélevée d'une forme trapézoïdale (Fig.109). Le seuil franchi, on trouve une cour de forme rectangulaire qui comporte quatre galeries et dessert une grande salle au fond, à la fois pour les cours et la prière, sur les côtés des cellules pour les pèlerins et les étudiants³⁰. Cette cour est bordée sur ses quatre faces par une galerie couverte établissant une circulation au premier étage où s'ouvrent des cellules sur la galerie du premier étage, auquel on accède par un escalier placé à gauche de la porte d'entrée. (Fig.102).

Le plan de la médersa comporte un axe de symétrie dans le sens de la longueur du rectangle, direction nord-sud. Cet axe de symétrie traverse et enfile trois éléments marquants : La porte, les deux vasques dans lesquelles l'eau s'écoule et l'oratoire et le mihrab par qui passe l'axe de symétrie « sublime » de la médersa, et matérialisant la direction de la Kaâba³¹, comme l'affirmaient les auteurs G. Marçais et R. Bourouiba qui ont tous deux travaillé sur cet édifice. L'ornementation est intervenue uniquement sur les éléments qui ont la valeur de symbole en Islam, à savoir la porte, la fontaine et le mihrab.

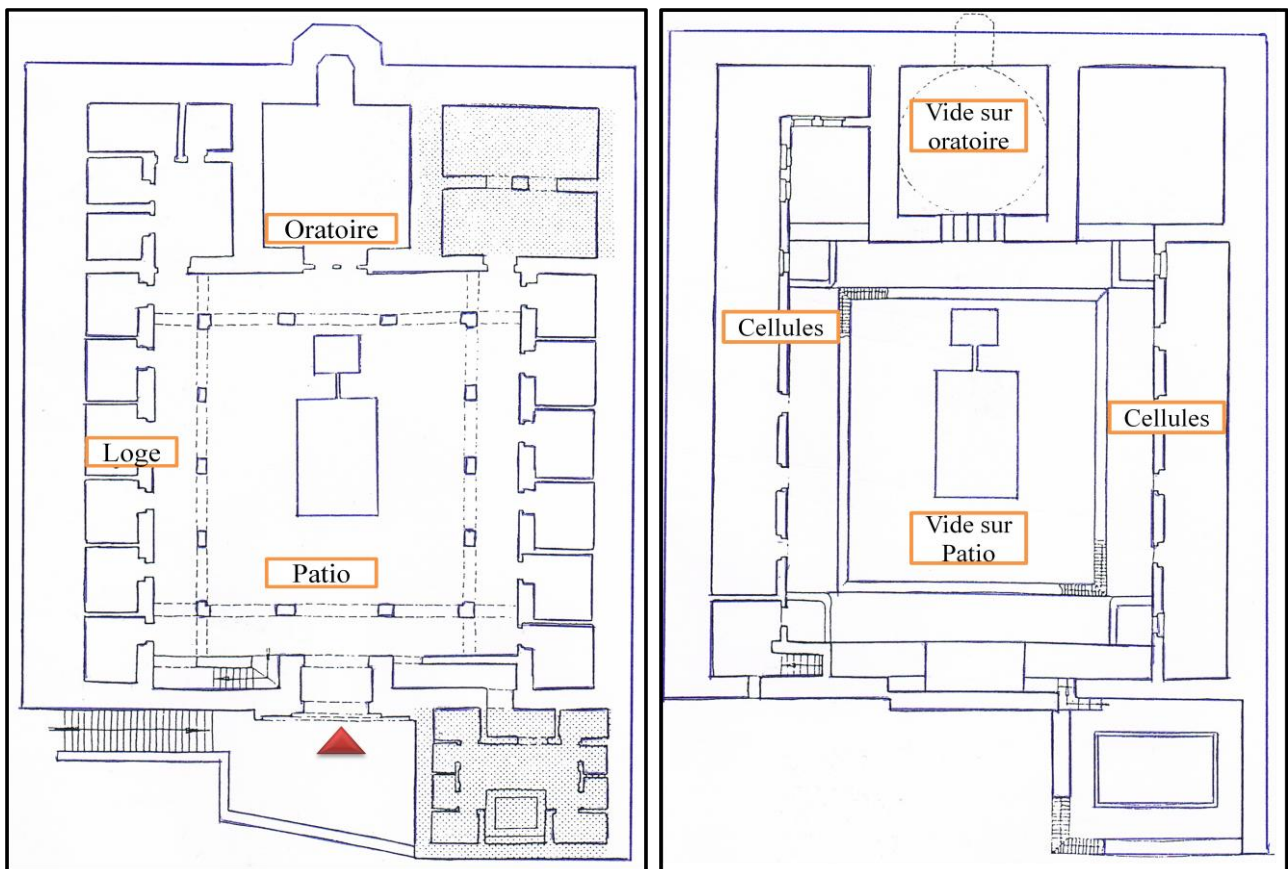


Fig. 102: Vue en plan et l'étage de la medersa.

Source : KESSAB Nasreddine. *Op.cit.*, p84

³⁰ MARÇAIS William et Georges, Les monuments arabes de Tlemcen. *Op.cit.*, p 272.

³¹ BOURUIBA Rachid. *Op.cit.*, p175.

2.5.3. Le mausolée

Cet édifice a été, il faut le dire, un élément dynamisant qui a généré l'ensemble des autres éléments du sanctuaire, construit pendant la période almohade dans les dernières années du XII^e siècle, il a subi une extension pendant la période mérinide, situé en face de la mosquée, avec son entrée décalée par rapport à celle de l'édifice majeur.

Dans le cas du mausolée, le patio devient un espace distribué et non plus distribuant. Seule la salle aux catafalques s'ouvre sur celui-ci. Même le puits sacré n'est pas adossé au patio, il lui est contenu. Ce patio a été recouvert en 1975 par une toiture à quatre pans recouverte de tuiles vertes vernissées³², supporté par quatre colonnes surmontées de chapiteaux récupérés du site d'El-Mançura, et ainsi réutilisés.

Pour ce qui est de l'ornementation, elle appartient à des âges très différents. Yaghmorassen Ben-Zeiyan y travailla, Abou El-Hassan Ali le mérinide, en fondant la mosquée, y apporta de très importants remaniements. Enfin la domination turque y marqua beaucoup plus récemment son empreinte. Un incendie l'ayant assez gravement endommagé, il subit, à la fin du XVIII^e siècle, d'importantes restaurations³³.

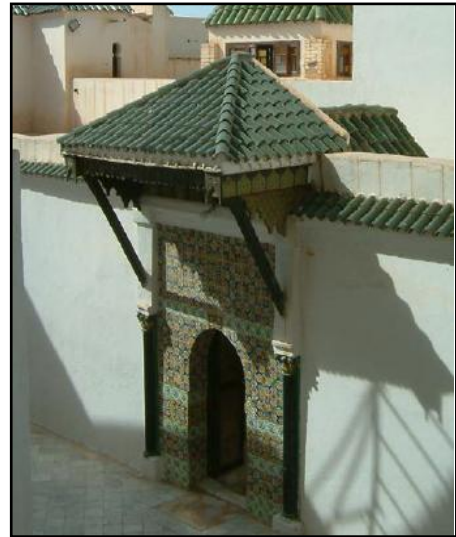


Fig. 103: Accès du mausolée de Sidi Boumediène.

Source : Auteur.

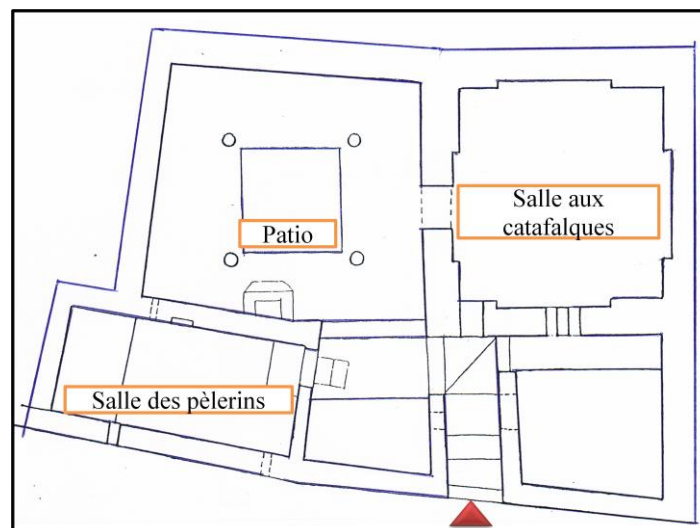


Fig. 104: Vue en plan du mausolée.

Source : KESSAB Nasreddine. *Op.cit.*, p 99.

³² KESSAB Nasreddine. *Op.cit.*, p95.

³³ MARÇAIS William et Georges. *Op.cit.*, p 231.

2.5.4. Le hammam

L'utilisation rituelle de cet édifice en vue des grandes ablutions explique sa localisation stratégique à proximité de la mosquée, mitoyen à la salle d'ablutions au sud.

Le plan est composé de deux parties articulées. La première, comporte une entrée coude en forme de chicane ou skifa surmontée d'une voûte en berceau, elle mène à l'*apodytenum* de forme trapézoïdale, organisé autour d'un espace central couvert d'une coupole à huit pans posée sur quatre arcs en plein cintre, soutenus par quatre colonnes massives. Dans la deuxième partie, on pénètre dans trois salles : *frigidarium*, *tepidarium* et *caldarium*³⁴ qui comportent la fontaine et le bassin d'eau chaude « el-borma », voûté en berceau.

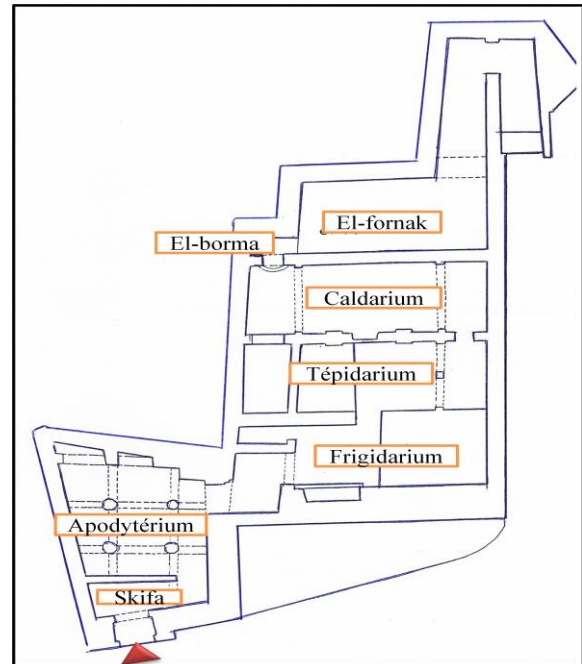


Fig. 105: Vue en plan du hammam.

Source : KESSAB Nasreddine. *Op.cit.*, p 107.

2.5.5. La salle d'ablutions et les latrines

Elle est située à l'est de la mosquée et en contrebas du hammam et cela pour répondre à des critères d'ordre fonctionnel par la purification du corps, technique par l'alimentation et l'évacuation des eaux et spirituelle par la préparation à la prière.

On pénètre dans un vestibule qui s'ouvre sur un espace central carré recouvert d'une coupole, de plan octogonal, cet espace reçoit deux bassins d'ablutions rectangulaires construits en briques pleines. Sur cet espace, s'ouvre des logettes couvertes en voûte en berceau percées de gaines d'aération horizontales.

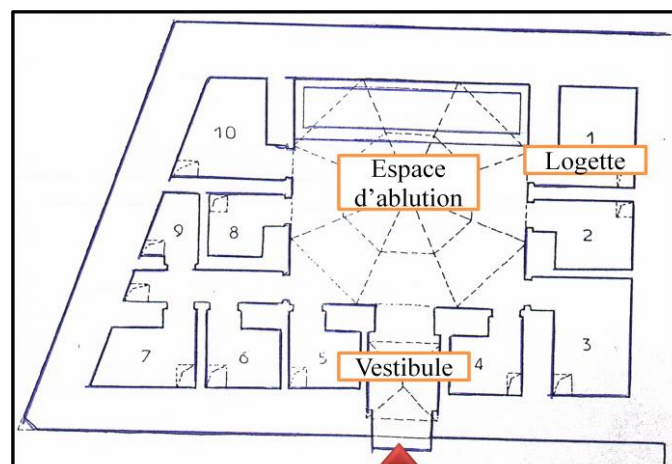


Fig. 106: Vue en plan de la salle d'ablution et latrines.

Source : KESSAB Nasreddine. *Op.cit.*, p 114.

³⁴ KESSAB Nasreddine. *Op.cit.*, p110.

3. Présentation du cas d'étude : La maison de L'Oukil du sanctuaire de Sidi Boumediène

3.1. Aperçu historique

En arabe «OUKIL», veut dire le représentant de quelqu'un dans une affaire administrative, commerciale, ou autre, son utilisation à Sidi Boumediène, signifiant le gardien du lieu, personne notable désignée autre fois par les soins du gouverneur de la ville (Tlemcen).

Cette tâche fût confiée auparavant à la famille Ibn Marzouk, depuis la création du complexe architectural, de la part du sultan mérinide Abou El Hacem, au 14^{ème} siècle, jusqu'à l'effondrement de la dynastie Ziyyanide en (1554).

A la fin du 18^{ème} siècle, la maison était une zawia pour les pèlerins.

Sous l'ordre de l'Emir Abdelkader, elle devient la résidence du Moquadem de Sidi Boumediene (famille Abou Bekr), de nouveaux travaux de réaménagement s'y effectuèrent en 1948, sous le contrôle de l'administration française. En 1996, d'importants travaux de restauration touchent le sanctuaire³⁵.

3.2. Situation

La maison se situe au cœur du site historique du sanctuaire de Sidi Boumediène, elle porte le nom de « Dar l'Oukil », avec une configuration d'un tissu très dense dans un terrain en forte pente, délimité comme suit :

- Côté nord, par la maison des pèlerins.
- Côté sud, par la medersa.
- Côté est, par la mosquée de Sidi Boumediène
- Côté ouest, par le quartier d'El Eubbâd.

Se présentant sur une parcelle trapézoïdale allongée nord-sud, d'une largeur qui varie entre 11,50 m et 17,00 m sur près de 16,00 m de profondeur, la maison se présente avec deux mitoyennetés, sans aucune ouverture vers l'extérieur, sauf une petite fenêtre située au niveau de l'étage superposée avec la porte d'entrée. Cette entrée se situe dans la ruelle qui donne accès à la mosquée et au mausolée.

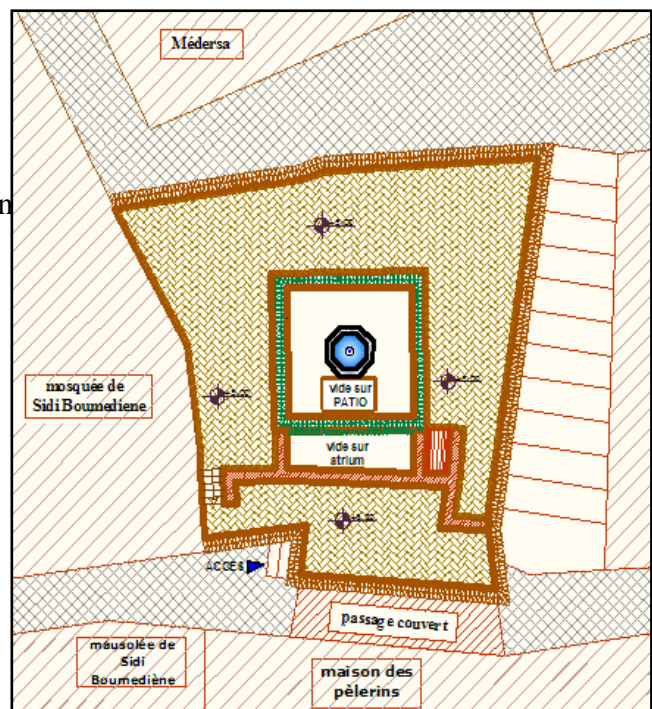


Fig. 107: Plan de masse de la maison de L'oukil.

Source : Auteur.

³⁵ B.E.T: A.T.A.R, Phase I : Relevé. *Op. cit.*, p51.

3.3. Présentation architecturale

3.3.1. Organisation et typologie de la maison

Dar en arabe signifie ce qui tourne ou ce qui entoure et le centre en est le patio « wast-eddar », elle signifie aussi la maison de la famille élargie. Elle est constituée d'une succession de chambres « biout », « avec des hiérarchies entre statuts d'âge et statuts de sexe, entre maîtres et serviteurs, entre hôtes et invités »³⁶.

Obéissant au cas des maisons de la médina de Tlemcen, où la typologie la plus répandue, se présente sous forme d'habitations introverties, la maison s'échelonne spatialement sur un niveau et demi, organisée autour d'un patio entouré de galeries. Tous les espaces s'ouvrent sur ce dernier : les ouvertures sont à l'intérieur.

L'architecture de la maison se développe depuis l'intérieur : autour du patio se trouvent quatre galeries. Chaque galerie comporte trois arcades qui donnent sur un vaste espace central découvert. Au centre de celui-ci, se situe un bassin d'eau de forme hexagonale. Le patio se présente sous forme carrée de près de 4,70 m de côté. Au niveau de l'étage, on trouve seulement une galerie et cela est dû à l'organisation qui s'est faite sur un seul côté par rapport au patio.

A. Le Rez-de-chaussée

L'entrée de la maison représente la typologie d'une entrée en chicane, constituée d'une double "Squifa", elle est orientée nord. Cet espace comprend quelques zones de service telles qu'une buanderie et un local. Le toit de ce bloc d'entrée s'arrête à une hauteur inférieure par rapport au reste, il est de 2,40 m de hauteur, pour cela, une chambre lui est superposée à demi niveau. Les côtés sud, est et ouest sont bordés par des galeries à arcatures brisées outrepassées, reposant sur des piliers carrés et surmontées d'une corniche en tuiles canais, le centre du patio est muni d'un petit bassin octogonal. (Fig. 108).

Chaque galerie donne vers une chambre de type traditionnel, appelée "Kobba Sghira", pour la chambre de l'est, de dimensions 1,70 m sur 6,30 m, "Kobba Djidida" pour celle de l'ouest de 1,40 m sur 8,40m, et "Kobba de Sidi Boumédiène" pour la troisième au sud, face à l'entrée, de 1,70 m sur 8,55 m. Ces trois chambres s'ouvrent sur le patio sous les galeries (Fig. 109), par une baie arquée que ferment deux battants rectangulaires en bois, elles sont garnies symétriquement de part et d'autre d'une petite fenêtre de 65 cm sur 85 cm. Les extrémités des chambres reçoivent les caisses, les couvertures, les coussins qui constituent la partie la plus importante du mobilier arabe³⁷. C'est dans la partie médiane, la plus voisine de la porte, que se trouvent les défoncements ménageant dans l'épaisseur du mur des banquettes, des retraits, des niches pour les bougies, les livres, les objets d'un usage journalier.

³⁶ GRANDET Denis, architecture et urbanisme islamique, Ed OPU, Alger, 1988, p 64.

³⁷ MARÇAIS William et Georges. *Op. cit.*, p 279.



Fig. 108: Ouverture des chambres sur le patio.

Source: Auteur.

L'angle nord-ouest est occupé par les salles d'eau, et l'angle sud-ouest par la cuisine. Il comprend aussi un escalier disposé au nord-est qui mène vers la galerie intermédiaire.

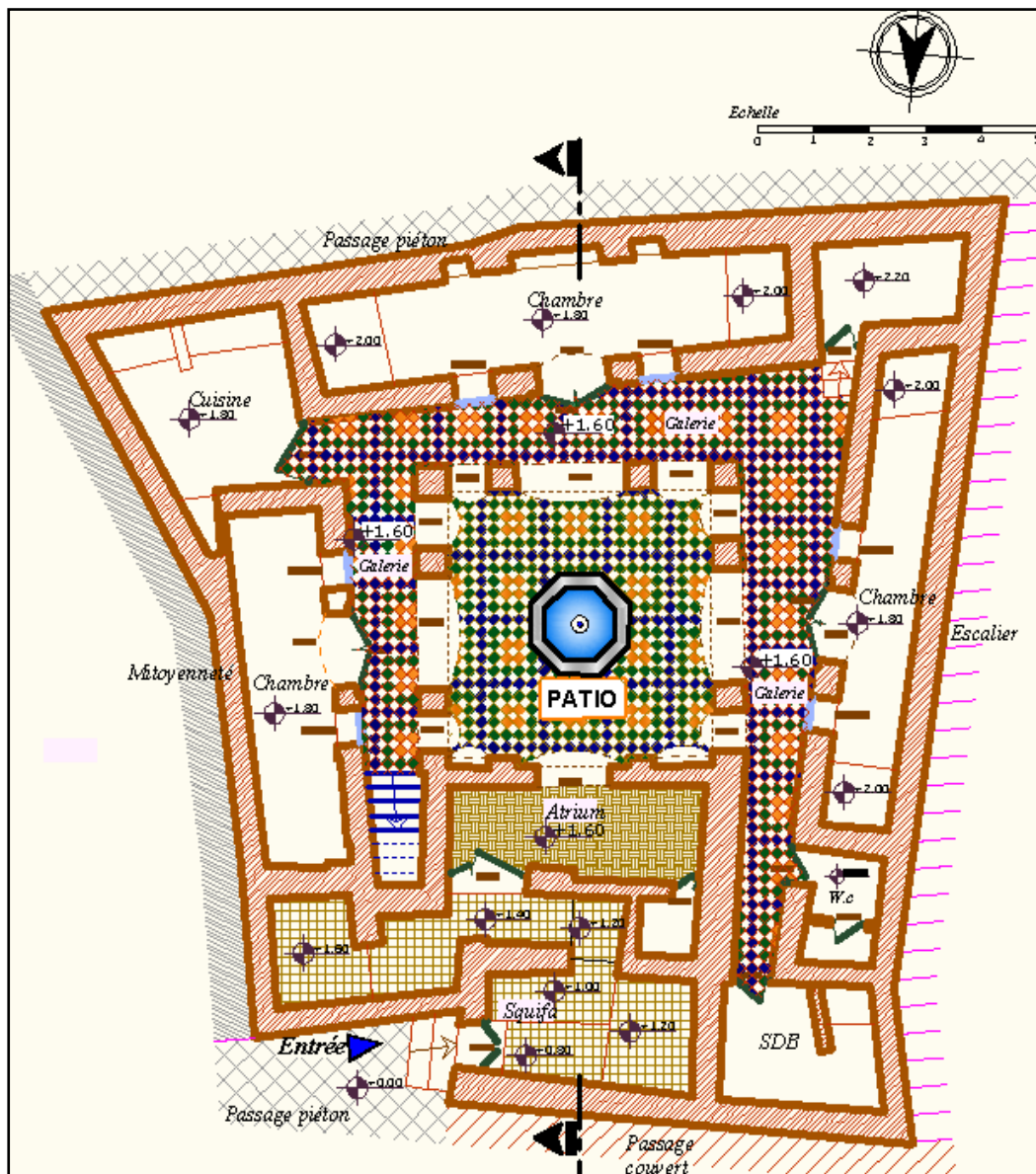


Fig. 109: Plan du rez-de-chaussée.

Source: Auteur.

B. L'étage :

C'est un niveau intermédiaire par rapport au RDC. On y arrive par l'escalier occupant l'angle nord-est du patio, pour arriver vers une galerie bordée de deux arcades et munies d'un garde-corps en rondins de bois, donnant accès à une chambre de 2,10 m sur 6,85 m.



Fig. 110: Ouverture de la chambre sur la galerie de l'étage.

Source: Auteur.

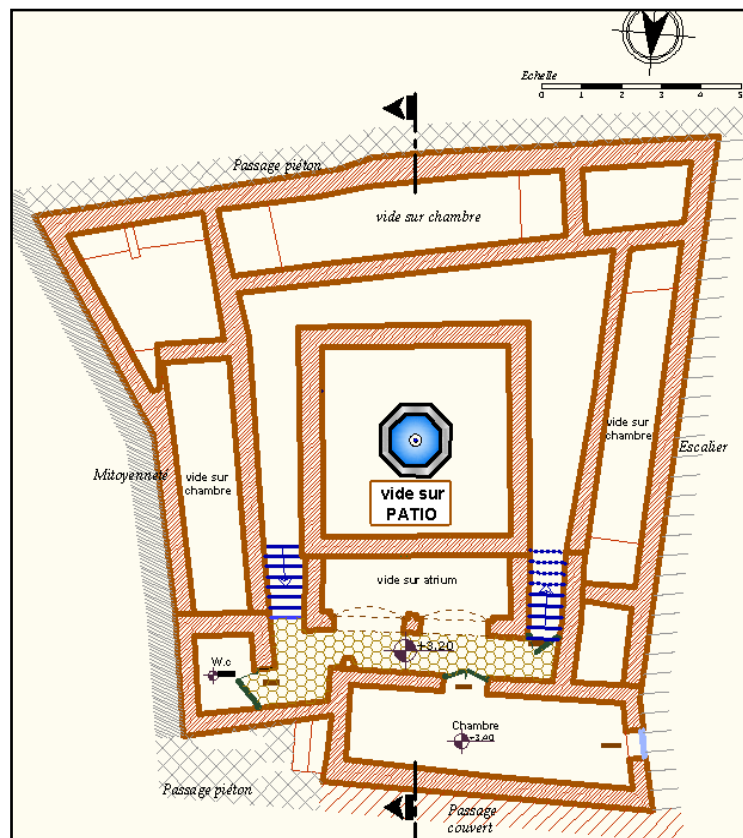


Fig. 111: Plan de l'étage. **Source:** Auteur.

C. La terrasse

A partir du niveau intermédiaire on accède à autre escalier couvert par une voûte en berceau, disposé sur le côté opposé, qui mène vers la terrasse qui occupe l'espace au-dessus des chambres et des galeries. À partir de celle-ci, on accède à un autre niveau de terrasse disposé au dessus de la chambre du niveau intermédiaire. La terrasse est dotée de garde-corps sur les trois côtés d'une hauteur de 3m, bordé de tuile. Une corniche surélevée d'à peine 20cm surplombe le patio et est munie de tuiles.



Fig. 112: Terrasses de la maison. **Source:** Auteur.

Le plan de la terrasse est représenté dans la figure 113.

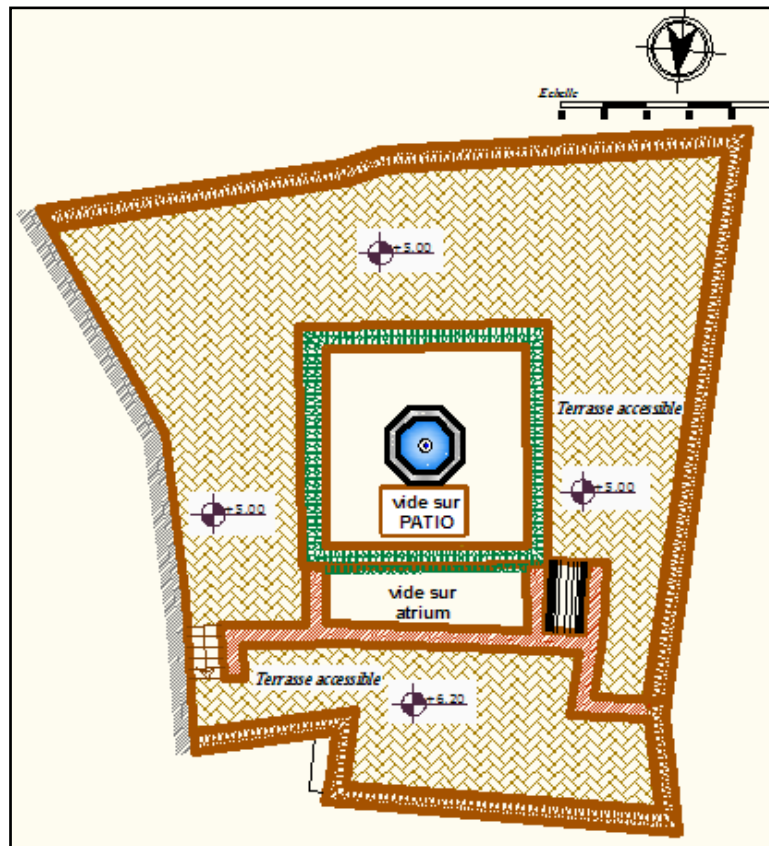


Fig. 113: Plan de terrasse. **Source:** Auteur.

3.3.2. Composantes spatiales de la maison

A. L'entrée (Squifa)

Elle se compose d'une entrée en chicane, espace filtre permettant la transition de l'espace de la rue, à celui de la maison. Elle est considérée comme la limite à ne pas franchir sans autorisation pour les étrangers. Sa configuration coudée joue d'ailleurs, le rôle d'espace seuil qui garde toutes les qualités

de l'espace réfléchi comme espace d'accueil et de séparation en même temps. Aboutissant généralement dans un coin du patio. Cet espace comporte généralement des bancs maçonnés dans l'épaisseur des murs.

Dans notre cas, la squifa dispose de deux portes, la première, bab-ed-dar, « porte de la maison » séparant entre l'intérieur et l'extérieur de la demeure, aboutissant à l'espace en chicane comportant quelques marches et une banquette, la seconde, bab-fasl, « porte de séparation », isole la squifa, du patio, et mène vers un petit patio ensuite vers le grand patio.



Fig. 114: Vue de l'extérieur et de l'intérieur de l'entrée.

Source: Auteur.

B. Le patio (Wast ed-dar)

Signifie « centre de la maison ». C'est un espace de forme quadrangulaire et entouré de galeries, découvert. Au centre, on y trouve un bassin d'eau de forme octogonale. Il permet la régulation thermique, la ventilation, l'éclairage naturel, la composition et l'agencement de la demeure par son orientation, est ouest y détermine la composition et l'agencement de la vie quotidienne. Les espaces de vie profitent de la lumière du soleil, où on retrouve ombre et fraîcheur selon les saisons. C'est aussi le seul endroit où l'on puisse voir la profusion décorative des façades avec trois arcades qui bordent les quatre côtés du patio et dont une est aveugle, celles-ci définissent le périmètre du patio, et qui donnent accès aux chambres, qui sont toutes ouvertes vers le patio. Il est partiellement couvert sur trois cotés par les portiques de la galerie.

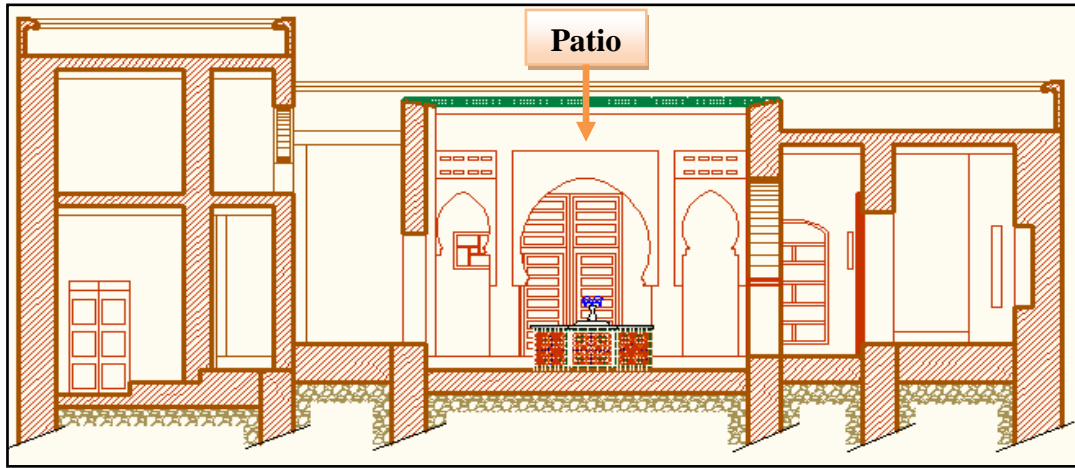


Fig. 115: Coupe sur la maison. **Source:** Auteur.

C. La galerie

Située au rez-de-chaussée, elle est limitée par le mur des chambres et de la paroi ajourée et est constituée d'arcs brisés outrepassés surmontés par un encadrement de niches trouées et soutenus par des piliers rectangulaires qui la sépare du patio sur trois côtés. Le quatrième côté est bordé d'une galerie à l'étage avec une balustrade en rondins de bois disposés horizontalement, surélevés par deux arcades, mais qui donne sur le petit patio. Elle permet le passage vers une chambre. Ces arcs sont maintenus par des tirants en rondins de bois ancrés dans le mur des chambres. (Fig. 116).



Fig. 116: Tirants en rondins de bois ancrés ans le mur.

Source: Auteur.

Au-delà de son rôle d'espace de transition, la galerie fait acte d'un vrai espace de vie selon les heures de la journée et les saisons, selon les dimensions et l'orientation : l'ombre et la fraîcheur qu'on reçoit l'été en font un lieu de prédilection pour le repos³⁸, et la profusion de la lumière naturelle la rend propice pour certaines tâches féminines, ménagères ou artisanales.

³⁸ Khalef N. Op.cit., p125.

D. Les chambres

Trois sont situées au rez-de-chaussée et une à l'étage, toutes de forme rectangulaire. Elles s'organisent autour du wast-ed-dar, s'ouvrant chacune sur les galeries par une baie arquée que ferment deux grands battants de bois et qui est flanquée symétriquement de part et d'autre d'une fenêtre sauf la chambre de l'étage qui comporte une fenêtre s'ouvrant à la ruelle. Ces chambres sont longues et plutôt étroites. La pièce principale "Kobba de Sidi Boumédiène" est flanquée par une banquette surmontée d'un arc brisé outrepassé à l'espace médian de la chambre où sont disposées symétriquement deux niches de part et d'autre. Les deux extrémités de la chambre sont dotées d'une surélévation pour servir d'espace de sommeil.



Fig. 117: Intérieur d'une chambre; banquettes et niches.

Source: Auteur.

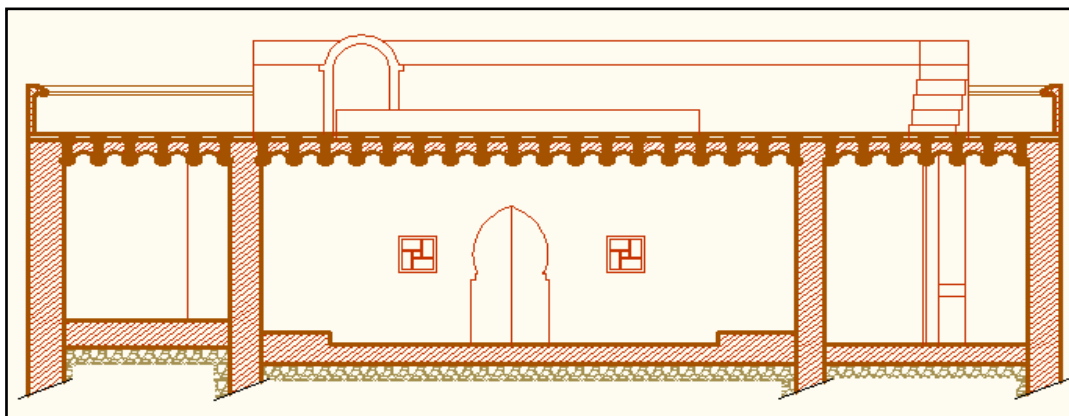


Fig. 118: Coupe de l'intérieur d'une chambre. Source : Auteur.

E. Les escaliers

Ce sont des espaces de transition vers l'étage ensuite vers la terrasse, ils se trouvent entre deux murs et occupent un angle de wast-ed-dar. Ils sont constitués de marches hautes, inégales et peu larges, sont aussi considérés comme espaces d'aération par lesquels ils puisent de l'air et de la fraîcheur.



Fig. 119: Escaliers. **Source:** Auteur.

F. Les espaces de service

Ces espaces occupent généralement les coins de la maison, pour la cuisine, elle est accessible directement par la galerie dotée d'une ventilation par une cheminée. Les latrines sont aménagées dans un coin caché par rapport à wast-ed-dar, près de l'entrée.



Fig. 120: Cuisine et latrines. **Source:** Auteur.

3.4. Dispositions constructives

3.4.1. Matériaux de construction

A. Le pisé

Il est constitué d'une terre mélangée à des débris de tuiles, de briques, des galets, de la paille hachée et de la chaux en bloc, pour cela la hauteur de la banchée peut atteindre 1.50m. Les murs ont une épaisseur de 60 cm. Utilisé dans les murs porteurs périphériques du rez-de-chaussée, cette technique utilise le pisé seul ou associe l'emploi de la brique cuite, ou des pierres disposées en assise entre les couches de la terre à intervalle égal. C'est donc une maçonnerie composite : du pisé avec des parements en brique pleine disposés en assises consécutives, d'inégales hauteurs où chaque assise est

formée de lit de briques soit en boutisse, soit en panneresse et aussi en épis³⁹. On trouve un autre appareillage similaire, à la différence de la présence de moellons isolés et éparpillés entre les assises de briques et de l'incorporation de rondins.

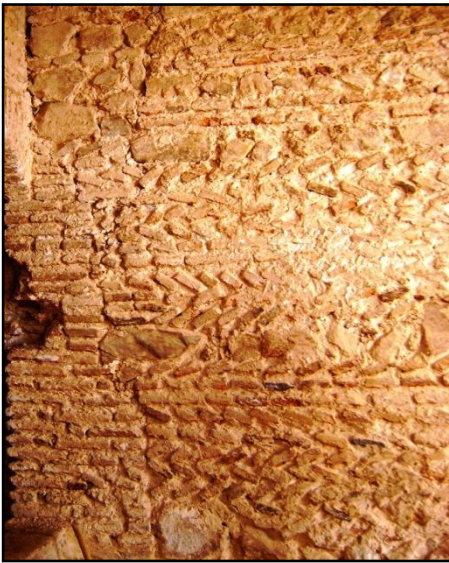


Fig. 121: Mur en terre banchée.

Source: BET ATTAR

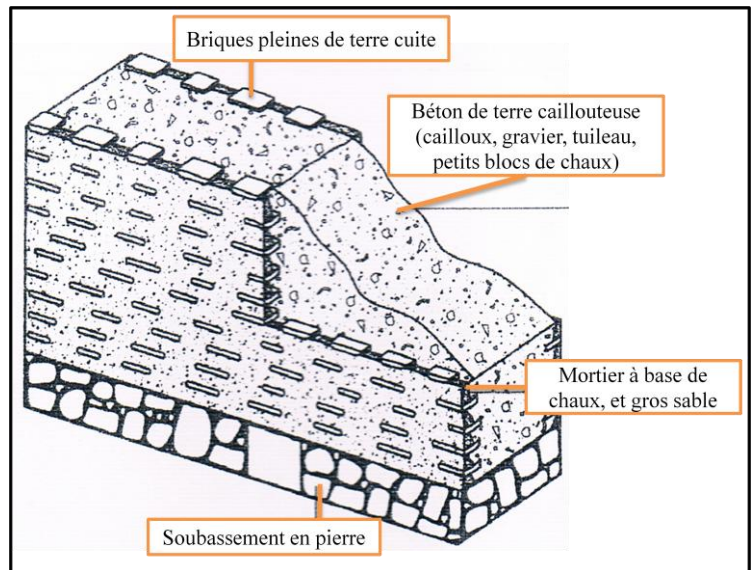


Fig. 122: Mur pisé à parements composés d'assises de briques.

Source: ALLICHE Samira, La formalisation comme outil d'un procédé constructif ; Le tabiya (pisé) de Cherchel, mémoire de magister en architecture, Epau, Alger, 2012, p96.

B. La pierre

Ce type d'appareillage se présente dans les murs porteurs, constitué d'une maçonnerie en pierre bleue brute non assisée ou sous forme d'une maçonnerie hétéroclite, de forme et de dimensions diverses éparpillées dans un mortier de couleur blanchâtre. La pierre est aussi utilisée aussi pour les fondations.



Fig. 123: Mur en pierre. **Source:** BET ATTAR.

³⁹ BET A.T.A.R, Restauration de la composante nord du sanctuaire de Sidi Boumediene, phase II : Analyse et diagnostic, rapport écrit, 1997, p37.

C. La brique pleine en terre cuite

Elle est utilisée le plus souvent dans les arcades et piliers qui encadrent le patio. Elle mesure 24 à 26 cm de longueur, 12 cm de largeur et 3 à 4 cm d'épaisseur. Les briques sont disposées en assises consécutives d'inégale hauteur, où chaque assise de briques est soit en boutisses, soit en paneresses, soit par alternance irrégulière entre boutisses et paneresses et aussi en épi. Ces briques sont hourdées au mortier de couleur blanchâtre à base de chaux, interrompu par des reprises en mortier de ciment⁴⁰.



Fig. 124: Arcade à la brique.

Source: BET ATTAR

La brique est aussi utilisée dans les planchers à voutains à profilés métalliques.

La brique de terre cuite est aussi utilisée comme revêtement posé à plat de 27 cm de longueur, 14 cm de largeur et 4,5 cm d'épaisseur dans les terrasses et les escaliers.

D. La chaux aérienne

Pour les murs, le mortier de construction est constitué de chaux aérienne, mélangée en faible proportion à la terre, il est disposé en couche de même épaisseur que la brique, comme joint entre celles-ci. Pour l'enduit à la chaux, l'agrégat employé est le sable tamisé. Le tuileau et la cendre de bois entrent dans la composition des enduits étanches destinés aux terrasses, ce crépi empêche l'évaporation trop rapide de l'humidité des murs, assurée par la teneur et par l'équilibre de l'humidité dans le mortier et dans le mur entier.

E. Le bois

Il couvre les portes des pièces ouvertes sur le patio ainsi que leurs linteaux. Les rondins de thuya sont utilisés comme tirant dans quelques fragments de mur. Il se trouve aussi au niveau de quelques planchers sous forme de rondin de diamètre de 8 à 10 cm, très rapprochés parfois accolés entre eux. Les balustrades de la galerie de l'étage sont confectionnées en rondin de bois. Le bois de cèdre est utilisé pour la menuiserie, et comme linteau au dessus des baies.

⁴⁰ Ibid, p36.

F. Le marbre blanc

Il est utilisé comme revêtement du pourtour de la partie surélevée du bassin d'eau et pour les marches de la première porte d'accès de la maison.

G. El Quiraté

Il représente des carreaux de céramique émaillée posée à 45°, utilisés comme revêtement du sol du patio et des galeries.

3.4.2. Composantes structurelles et typologies constructives :

Les murs décapés la maison de L'Oukil nous permettent de faire une lecture in situ des techniques et typologies constructives ainsi que les matériaux utilisés dans le sanctuaire de Sidi Boumédiène. On relève l'utilisation d'une maçonnerie massive, soit en pisé, soit en pierre et brique, ou brique dans l'encadrement des baies et ouvertures.



Fig. 125: Composition structurelle et appareillages de la maison de L'Oukil.

Source : BET ATTAR.

A. Les fondations

Elles sont en général, réalisées en maçonnerie de pierres liées au mortier de chaux, et de la terre.

B. Les murs porteurs

Notre cas est constitué d'une maçonnerie massive de plusieurs types d'appareillage. Les murs périphériques du rez-de-chaussée sont maçonnés en pisé avec alternance de moellons de lits de pierres ou de briques de terre cuites disposées à plat, en épis ou en arrête, à 45° dans la partie basse et dans le couronnement. En termes d'une autre typologie, la brique est associée à la pierre dans quelques fragments de murs de séparation entre les chambres et les galeries et dans les angles de murs appelée *opus mixtum*, la brique est aussi associée au bois du thuya, disposé en lits de rondins, insérés dans la largeur des murs qui constituent un chainage horizontal dans une maçonnerie rigide qui réduit les fissures.

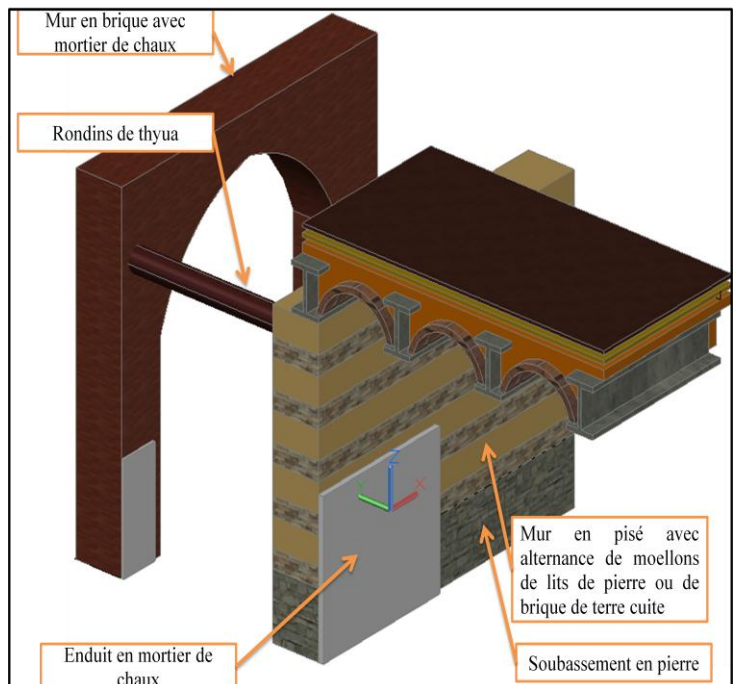


Fig. 126: Maçonnerie massive

Source: Auteur.

L'épaisseur des murs extérieurs est de 55 cm enduit de mortier de chaux sur les deux faces, de 3cm de l'extérieur et 2 cm vers l'intérieur, d'où une épaisseur totale de 60 cm. Quand aux murs intérieurs de séparation, ils sont de 50cm d'épaisseur avec enduit. Cette forte inertie due à l'utilisation de la maçonnerie massive est sensée procurer aux espaces de vie une bonne isolation thermique et donc contribuer au confort.

C. L'ossature

Elle constitue les arcatures avec une structure flexible, qui compose les façades du patio. Ce sont des arcs brisés outrepassés répétés selon un rythme avec différentes dimensions et sont soutenus par des piliers massifs quadrangulaires de 60 sur 60 cm dans les angles, et de 50 sur 50 cm dans l'espace médian. En termes de matériaux, l'ensemble est maçonné en brique de terre cuite.

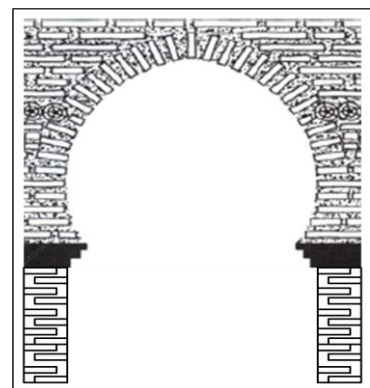


Fig. 127: Arc brisé outrepassé.

Source : Auteur.

D. Les planchers

Ils sont également à structure massive. Au niveau du rez-de-chaussée, la plate-forme est réalisée sur le sol avec une couche de terre et de pierrailles surélevée par rapport au niveau du patio.

Dans notre cas, nous distinguons deux variantes de planchers :

-Le premier est constitué d'une structure de rondins de diamètre variant de 8 et 10 centimètres, très rapprochés, parfois presque accolés entre eux, disposés à intervalles de 10 à 12 cm directement posés sur les murs, qui s'appuient sur toute l'épaisseur du mur en assurant un parfait encastrement. C'est la longueur de ces rondins qui est l'élément déterminant de la largeur des chambres, qui est de 2m à peine⁴¹.

Sur les rondins sont disposés des roseaux en bois supportant une grosse couche de terre, au dessus est posé un revêtement de sol fait de carreaux de terre cuite.

Ce type se trouve au niveau du plancher d'une partie de la squifa. (Fig. 128).

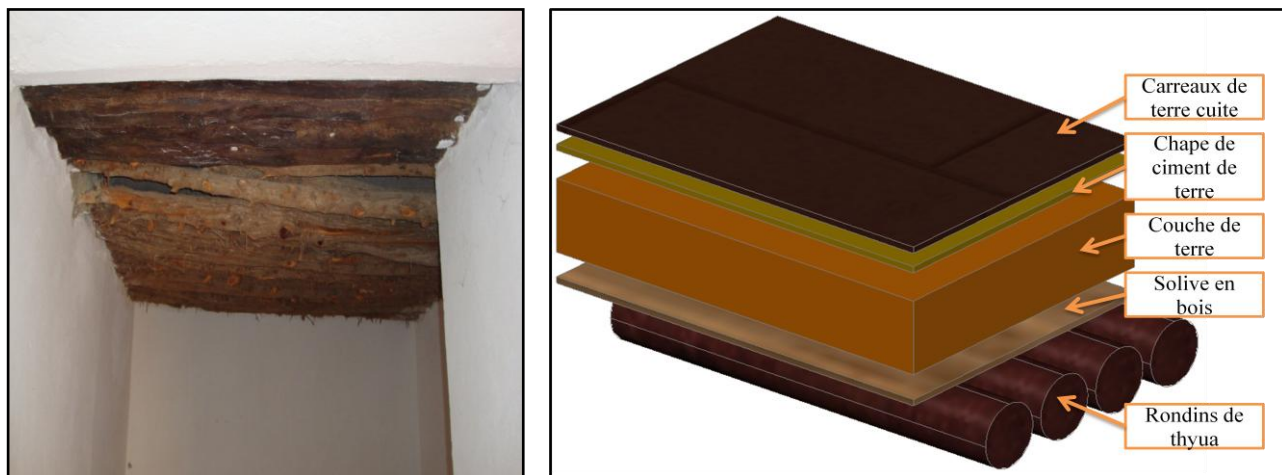


Fig. 128: A- Plancher avec rondins de bois. B- Différents constituants du plancher avec rondins de bois

Source : Auteur.

-Le deuxième type est un plancher à voûtains en brique pleine posés à plat et prenant position entre les profilés métalliques, IPE 140 et IPE 160 distants entre eux d'environ 82 cm, qui se prolongent jusqu'aux galeries. L'ensemble est surmonté par un remplissage en terre, puis par le revêtement de terre cuite⁴². Ce plancher a remplacé le plancher en bois avec support de sol empilé en terre cuite pendant la période coloniale. Cette variante est appliquée dans les chambres, galeries, cuisine et la chambre de l'étage. (Fig. 129).

⁴¹ BET A.T.A.R, Restauration de la composante nord du sanctuaire de Sidi Boumediene, phase II : Analyse et diagnostic. *Op. cit.*, p38.

⁴² Ibid.

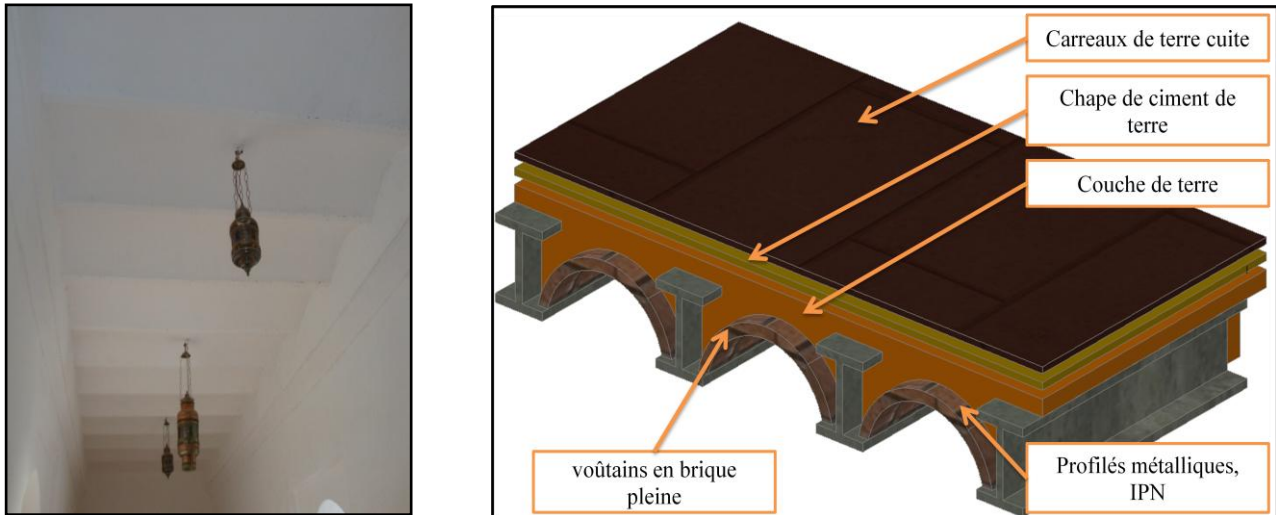


Fig. 129: A- Plancher à voûtes en brique pleine et IPE.

B- Différents constituants du plancher à voûtes en brique pleine et IPE.

Source : Auteur.

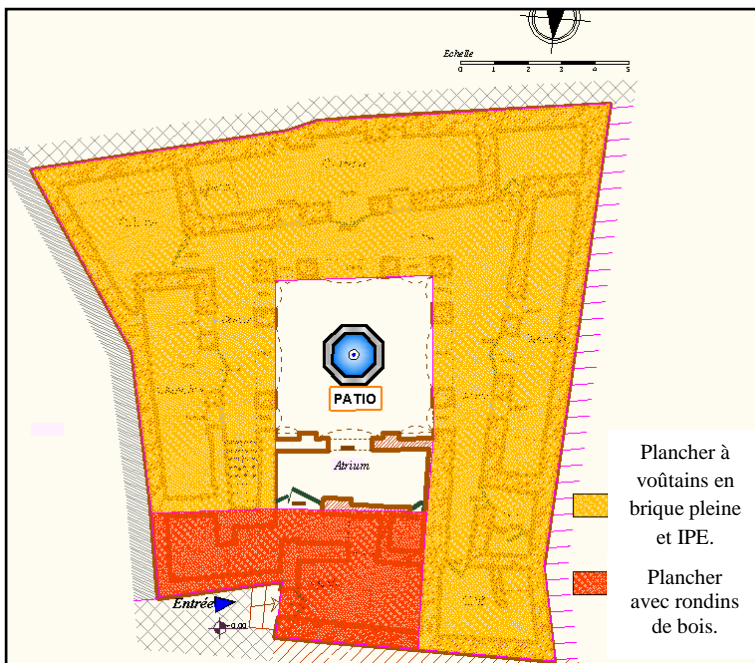


Fig. 130: Situation des planchers au niveau du plan. **Source :** Auteur.

E. La couverture et les revêtements

Nous distinguons le revêtement en terre cuite posé soit à plat de 27 cm de longueur, de 14 cm de largeur et de 4,5 cm d'épaisseur appartenant à l'espace de l'entrée en chicane, le même type mais posé sur champ est situé dans la parcelle du passage intérieur menant aux marches, ces dernières sont aussi couvertes du même type de revêtement.

Les chambres sont couvertes par un revêtement de terre cuite mais de forme octogonale de 7 cm de côté.

Nous rencontrons une mosaïque du type el quiraté, composée de petits carreaux de céramique de terre cuite émaillée disposés à 45° de dimensions 9 × 9 × 2,5 cm. La dénivelée est rattrapée par des

carreaux de dimensions de $20 \times 10 \times 2,5$ cm, de couleur noir, blanc, vert et orange qui sont utilisés aussi bien dans le patio que dans les galeries.

La terrasse quand à elle est aussi couverte de terre cuite mesurant 26 cm sur 5 cm, posée sur une grande épaisseur de terre pour bénéficier de l'inertie, afin d'assurer une bonne isolation thermique contre les radiations solaires. L'acrotère est couvert d'un enduit de chaux et de tuile canal de couleur rouge ocre sur la périphérie de la maison et de tuile verte sur le patio.



Fig. 131: A- Revêtement en terre cuite.



B- Revêtement avec el quiraté.

Source : Auteur.

Un autre type de couverture en maçonnerie prend place et couvre les escaliers qui mènent vers la terrasse sous forme de voûte en berceau en brique de terre cuite, enduite avec de la chaux.

Toutes les façades intérieures et extérieures de la maison sont couvertes d'un enduit de chaux et de sable d'une épaisseur de 5 à 7cm au total, cela leur permet de respirer. Dotées d'une couleur blanchâtre, c'est un moyen très efficace pour réduire la température intérieure et participer donc à la protection contre le soleil du bâti.

F. Les franchissements

Ils peuvent être en bois ou en maçonnerie ; dans le cas des ouvertures avec arcades, les franchissements sont en maçonnerie de brique de terre cuite qui entourent l'arc brisé outrepassé. Ils se situent au niveau des chambres surélevés par rapport au niveau de la galerie. Quand les ouvertures sont rectangulaires, les franchissements sont surmontés par un linteau de bois entouré par un arc de décharge.



Fig. 132: La voûte en berceau et enduit de chaux. **Source :** Auteur.



Fig. 133: Linteau en bois.

Source : Auteur.

G. L'escalier

Dans notre cas, l'escalier se compose d'un seul volet, le premier mène à l'étage intermédiaire et l'autre mène vers la terrasse. L'élément porteur de l'escalier obéit au même principe que les autres espaces, des murs massifs de 60 cm sont disposés aux extrémités réservant l'emmarchement rempli de terre et de moellons.

3.5. Dispositifs architecturaux

3.5.1. Boiserie

Toutes les portes sont en bois et s'ouvrent vers l'extérieur. Celles du rez-de-chaussée sont différentes par rapport à l'étage intermédiaire. Elles comportent des gonds encastrés dans le mur, en dessous du plancher, ces paumelles permettent une fixation des ouvrants contre le mur de sorte à permettre leur rabattement contre ce dernier. Pour profiter au maximum de l'éclairage et de la ventilation, elles sont peintes en vert. Quand aux portes de l'étage, elles comportent des charnières du type classique moderne.



Fig. 134: Porte de la chambre en bois. **Source :** Auteur.

3.5.2. Cheminée

Au rez-de-chaussée, elle est située dans la cuisine et son évacuation au niveau de la terrasse.



Fig. 135: Cheminée au niveau de la terrasse. **Source:** Auteur.

3.5.3. Evacuation des eaux pluviales

Les eaux de pluie de la première terrasse sont évacuées dans deux conduites disposées dans le coin du patio, pour la deuxième terrasse les eaux sont acheminées par une conduite de descente superposée sur le coin des latrines.



Fig. 136: Evacuation des eaux pluviales. **Source:** Auteur

3.6. Interventions effectuées sur la maison de L'Oukil

3.6.1. Période coloniale

En 1948, d'importants travaux de réaménagement par l'administration française se sont effectués. On compte par ailleurs, l'extension d'une chambre à l'étage, ainsi que le remplacement d'une partie des planchers en rondins de bois par la terre par un plancher à voûtains métalliques⁴³.

⁴³Ibid, p44.

3.6.2. Période de post indépendance (1996-1999)

A. Le diagnostic technique sur la maison de l'Oukil

- Le relevé technique

Il représente l'ensemble du relevé architectural présenté dans ce chapitre.

- L'étude pathologique

L'exode des occupants de la maison de l'Oukil, a amplement contribué à l'accélération du processus de dégradation tant par les facteurs naturels que par les facteurs humains.

Les infiltrations des eaux pluviales, à travers respectivement les tuiles cassées ou enduits et joints de carreau de terre cuite, sont à l'origine de nombreuses dégradations, en plus des traces de l'humidité.

L'action combinée de ces facteurs peut engendrer de graves préjudices, notamment la corrosion des profilés métalliques, phénomène qui se produit par une réaction chimique qui transforme le fer pur en oxyde ferreux, en particulier la surface de la section et celle des appuis qui se trouve ainsi réduite. Cette réduction de la section et l'augmentation de la contrainte qui en résulte diminuent la résistance de l'élément, produisant ainsi des fissures inclinées dans les maçonneries des murs⁴⁴. Cette action est également à l'origine des gonflements et effritements des enduits intérieurs et extérieurs.

La prolifération des racines de la vigne implantée au niveau du patio de la maison est à l'origine de diverses déformations des revêtements de sol.

On peut constater l'état de dégradation de la maison sur la photographie suivante :



Fig. 137: Vue de la maison avant les travaux de restauration. **Source :** BET ATTAR.

⁴⁴ Ibid, p43.

- L'analyse structurelle

La maison de l'Oukil est constituée par des diaphragmes conçus principalement par des planchers métalliques et des voûtains en brique et quelques cas isolés en plancher en rondins de bois.

Ces diaphragmes sont généralement constitués par des solives qui exercent des charges verticales réparties en prenant appui sur les saillies dans les murs porteurs qui se chargeront d'acheminer ces charges soit directement, soit à travers des linteaux ou des arcs de décharge⁴⁵.

Un ensemble d'actions d'analyse et de mesures effectuées in situ et au laboratoire sont nécessaires, du fait de l'état des matériaux de construction qui peuvent présenter des défauts internes.

B. La restauration de la maison de l'Oukil

Les travaux de restauration effectués sur la maison de L'Oukil comprennent :

- **L'enlèvement des constructions supplémentaires**

Elles sont les causes principales des dégradations structurelles de la maison, du fait qu'elles sont rajoutées au niveau de la terrasse avec une structure en béton armé non compatible avec le reste. De ce fait, ces éléments nuisibles et étrangers à la conception d'origine ont été démolis.

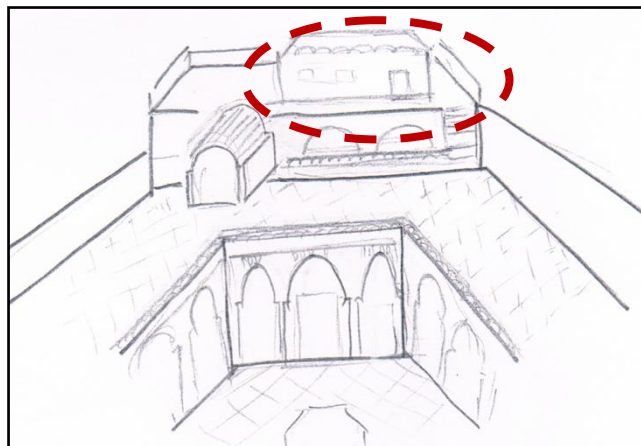


Fig. 138: Démolition d'une extension au niveau de la terrasse. **Source:** Auteur

- **L'étaieement du plancher**

Les principales opérations de restauration se sont effectuées au niveau des planchers d'où il a été nécessaire de les conforter avec un étaieement avant de procéder à la consolidation. Cette dernière comprend le rajout d'un plancher collaborant en béton armé au dessus du plancher à voûtains, ancré aux murs porteurs par l'intermédiaire de connecteurs.

- **Le décapage total des enduits anciens**

Le décapage des enduits a été fait, dans le but de découvrir les matériaux originels et de prospector d'éventuelles dégradations notamment les fissures sur les parois de murs. (Fig. 139).

⁴⁵ Ibid, p42.



Fig. 139: Décapage des enduits. **Source:** BET ATTAR.

- **La reprise des enduits**

La reprise des enduits à base de chaux a été faite suivant trois couches: une couche d'accrochage, une couche de dressage et une couche de finition. (Fig. 140).



Fig. 140: Reprise des enduits. **Source:** BET ATTAR.

- **La reprise et le renforcement des planchers**

Les travaux de consolidation se sont effectués de la manière suivante⁴⁶:

- Etalement des planchers à voutains.
- Enlèvement du revêtement en brique de terre cuite au niveau des terrasses.
- Enlèvement de la chape de terre contenue dans le plancher.
- Remplacement des IPN usés et traitement des IPN se trouvant en bon état par le brossage et l'application de l'anti- rouille.

⁴⁶ Ibid, p47.

- Remplacement de briques pleines endommagées au niveau des voutains.
- Remplissage de la chape de terre.
- Pose de connecteurs au niveau des murs porteurs.
- Coulage d'une chape en béton qui joue le rôle d'un plancher collaborant.
- Pose du revêtement en brique de terre cuite.

Cependant; comme nous l'avons vu auparavant, la restauration est une remise à l'état initial qui a pour but de préserver les caractéristiques originelles d'un patrimoine bâti, autrement cette opération ne peut pas être une restauration mais plutôt une consolidation.



Fig. 141: Coulage de la chape de terre et de la chape de béton. **Source:** Auteur

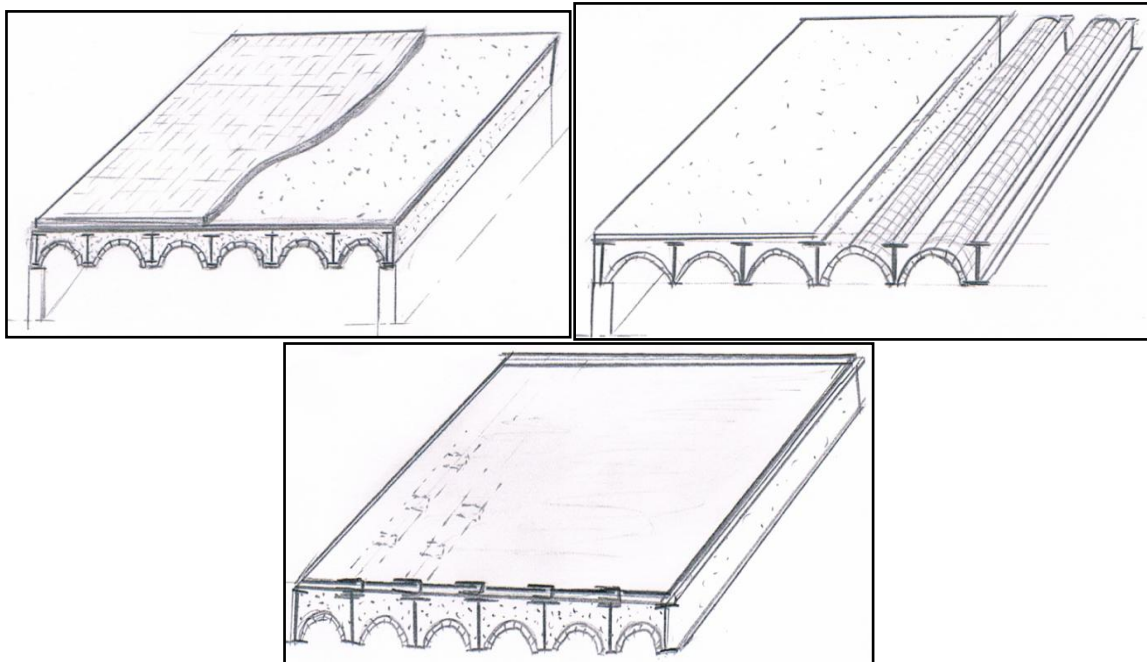


Fig. 142: Consolidation des planchers. **Source:** Auteur.

- **Le traitement de fissures**

Les fissures ont été traitées par la technique de pose de témoin pour voir l'évolution de la fissure; la plupart des fissures étaient mortes donc non évolutives.

La première étape consiste à décaper le mur; par la suite injecter le coulis à base de chaux dans l'ouverture pour combler la fissure avec une prise lente, et enfin l'application de l'enduit.



Fig. 143: Injection de coulis de chaux. **Source:** Auteur

- **La reprise des marches et contre marches**

Après l'enlèvement des carreaux initiaux en brique de terre cuite; la reprise des marches et contremarches s'est faite avec le même revêtement c'est à dire des carreaux de terre cuite.

- **Les revêtements intérieurs et les terrasses**

Pour les espaces intérieurs; de nouveaux revêtements similaires à celui d'origine "brique de terre cuite" ont été mis en place; en ce qui concerne le patio le revêtement utilisé est celui des carreaux de céramique, et pour la terrasse, après l'enlèvement du revêtement d'origine, la reprise de la forme de pente s'est effectuée pour déposer le nouveau revêtement similaire à celui d'origine.

- **Ouvrages divers**

Cette opération a aussi englobé des travaux d'entretien tel que le renouvellement des canalisations des eaux pluviales; le remplacement de la tuile dégradée; l'entretien des portes et fenêtres, etc....

Nous pouvons résumer dans le tableau suivant à travers une étude comparative entre les techniques de restauration normatives et les techniques de restauration de la maison de L'Oukil :

Désordres	Techniques de restauration normative	Techniques utilisées dans la restauration de la maison de L'Oukil	Observation
Dégradation du plancher	<ul style="list-style-type: none"> -Remplacement des IPE dégradés, brossage et mise en place de l'anti- rouille. -Remplacement de la chape de terre et des briques endommagés des voutains. -Renforcement le l'assemblage des extrémités des IPE sur les murs porteurs. -Pour le plancher à rondins de bois, l'application répétée de badigeon de lait de chaux contre le pourrissement du bois, et protection de l'étanchéité par une terre battue, et une couche de mortier de chaux. 	<ul style="list-style-type: none"> -Remplacement ou nettoyage des IPE, renouveau de la chape de terre et des briques. -Mise en place d'un plancher collaborant en béton armé au dessus du plancher en voûtains. 	<ul style="list-style-type: none"> -Les planchers à voûtains ont été consolidés par un plancher collaborant construit en béton, donc cette opération n'est pas une restauration mais plutôt une rénovation car le matériau n'est pas compatible avec les autres qui composent la maison.
Dégradation de l'enduit	<ul style="list-style-type: none"> -Réalisation d'un en duit à base de chaux, la première d'accrochage puis de dressage et enfin une couche de finition. 	<ul style="list-style-type: none"> -Application de l'enduit maçonné à base de chaux suivant trois couches. 	<ul style="list-style-type: none"> -La reprise des enduits a été faite à base d'un mortier de chaux ce qui nécessite un temps de prise donc ça a été refait avec les mêmes matériaux d'origine.
Fissuration des murs	<ul style="list-style-type: none"> -Pose de témoins dans les fissures. -Injection de coulis de chaux dans les murs porteurs en pierre et en brique. -Reprise de parties dégradées dans les murs en pisé. 	<ul style="list-style-type: none"> -Injection de coulis de chaux avec un simple outillage. 	<ul style="list-style-type: none"> -La pose de témoins dans les fissures.

Tableau. 5: Tableau comparatif entre les normes de techniques de restauration et les techniques utilisées dans la restauration de la maison de L'Oukil.

Source : Auteur.

3.6.3. Période de la préparation de la manifestation de Tlemcen Capitale islamique, 2011 :

A cet évènement, l'état de conservation de la maison était qualifié d'acceptable, il y avait donc juste quelques travaux d'étanchéité, de réfection de canalisation, de ponçage de revêtement et de renouveau des enduits à chaux.

4. Simulation informatique du confort thermique par le logiciel Fluent

4.1. Introduction

Grâce à l'évolution de l'informatique et sa démocratisation, plusieurs simulations (ou évaluation de performances dynamiques) peuvent être effectuées sur un modèle numérique d'un bâtiment donné, et pour n'en citer que quelques types : citons par exemple la simulation thermique dynamique, la simulation des mouvements d'air et de transfert de chaleur.

Pour l'architecte, l'analyse thermique par simulation se fait dans une perspective d'intégration des paramètres physique des matériaux et climatique au processus d'amélioration des performances thermiques des bâtiments, en vue d'explorer et de commencer à optimiser certains choix pour un meilleur confort¹, elle permet aussi l'évaluation et le contrôle thermique des bâtiments.

L'évaluation par simulation est plus flexible dans la mesure où elle permet d'évaluer les performances thermiques d'une construction tout en agissant à volonté sur les éléments de la construction.

Dans cet objectif, nous nous sommes intéressés à l'évaluation des performances thermiques de la maison de l'Oukil en nous basant sur les techniques de construction et les matériaux utilisés tout en respectant les transformations effectuées citées précédemment dans ce chapitre.

Le but de cette simulation est de vérifier si ces interventions ont touché le paramètre du confort thermique.

4.2. Choix de l'outil logiciel

Nous avons utilisé le logiciel Ansys Fluent qui permet de tester selon le mode conventionnel, le comportement thermique global du bâti et de son environnement. C'est un outil d'analyse environnemental combinant un large éventail d'outils d'analyse et de simulation, il permet une analyse directe dans le contexte du modèle du bâtiment. Ceci lui confère la possibilité de communiquer des concepts techniques souvent complexes pour l'architecte, ainsi qu'un ensemble de données étendu, de manière intuitive et efficace.

¹ LAVIGNE Pierre. *Op. cit.*, p133.

4.3. Description du logiciel

Le logiciel Fluent est un outil informatique de simulation en régime dynamique, il importe des données à partir du logiciel Gambit qui un préprocesseur, qui permet de mailler des domaines de géométrie 2D/3D², Gambit regroupe trois fonctions : définition de la géométrie, le maillage, la définition des frontières et la définition des domaines de calcul. Il génère des fichiers pour Fluent. Ce dernier est un logiciel qui résoud par la méthode des éléments finis les phénomènes de transferts thermiques dans des géométries simples et complexes aussi, les effets de radiation solaire, de ventilation naturelle et les effets d'humidité à savoir le confort thermique, donc il traite les données pour faire sortir les résultats du traitement.

Ainsi, FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes:

Ecoulements 2D ou 3D ; transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection libre, (conjugue) ou radiatif; écoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ; écoulements en milieu poreux³, etc.....

Pour notre travail, nous aurons recours au code CFD **Fluent**, commercialisé par Fluent Incorporated. Nous disposons de la version 6.3.

4.3.1. Les différentes étapes à suivre pour la modélisation numérique par Fluent

La résolution numérique par Fluent d'une manière générale, suit les étapes suivantes⁴ :

- Création de la géométrie sous le Logiciel GAMBIT ;
- Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles ;
- Définition des conditions aux limites dans GAMBIT ;
- Définition du problème sous le logiciel FLUENT, étude des différentes grilles de maillage et sélection du maillage retenue ;
- Calcul avec FLUENT pour les différents cas retenus ;
- Analyse des résultats obtenus.

Donc la résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT qui est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. En raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

² FEDALA Djafer, Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent- applications, Laboratoire d'énergétique et de mécanique des fluides interne, Ed Arts et métiers Paris Tech, Paris, p 01.

³ ANSYS inc. ANSYS FLUENT Tutorial Guide, Published in U.S.A, 2011, p 01, disponible sur: http://cdlab2.fluid.tuwien.ac.at/LEHRE/TURB/Fluent.Inc/v140/flu_tg.pdf.

⁴ Ibid.

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, Parmi ces paramètres, on peut citer :

- Le nombre de mailles ;
- La distance entre les mailles (concentration des mailles) ;
- La forme de la maille.

Les différentes formes de maillage des faces sont montrées dans le tableau suivant :


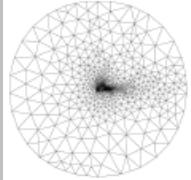
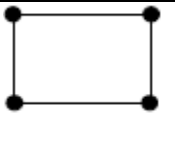
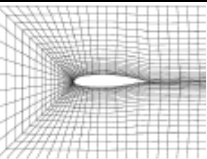
Type des cellules en 2D	La forme de maillage	Exemple
Triangulaire		
Quadrilatérale		

Tableau 6: Les différentes formes de maillage des faces.

Source : GUESTAL Mabrouk, Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi chauffée partiellement, thèse de magister, Université de Mentouri Constantine, 2010, p 53.

4.4. Diagramme psychrométrique

A travers ce diagramme, on peut représenter le climat, chaque mois est représenté par un segment qui représente une journée type du mois, le point gauche du segment (T° min, HR max) représente la moyenne des températures nuit et le point de droite (T° max, HR min) représente le jour⁵.

L'utilisation de ce diagramme permet de savoir si l'espace à l'intérieur de notre cas d'étude se trouve dans la zone de confort par la typologie qu'il représente ou hors de cette zone pour chercher quels dispositifs à apporter pour retrouver le confort, dans notre cas il s'agira de la ventilation naturelle. (Fig. 144).

⁵ OULD-HENNNIA Amina, « choix climatiques et construction, zones arides et semi-arides, la maison à cour à Boussaâda », thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 2003, p180.

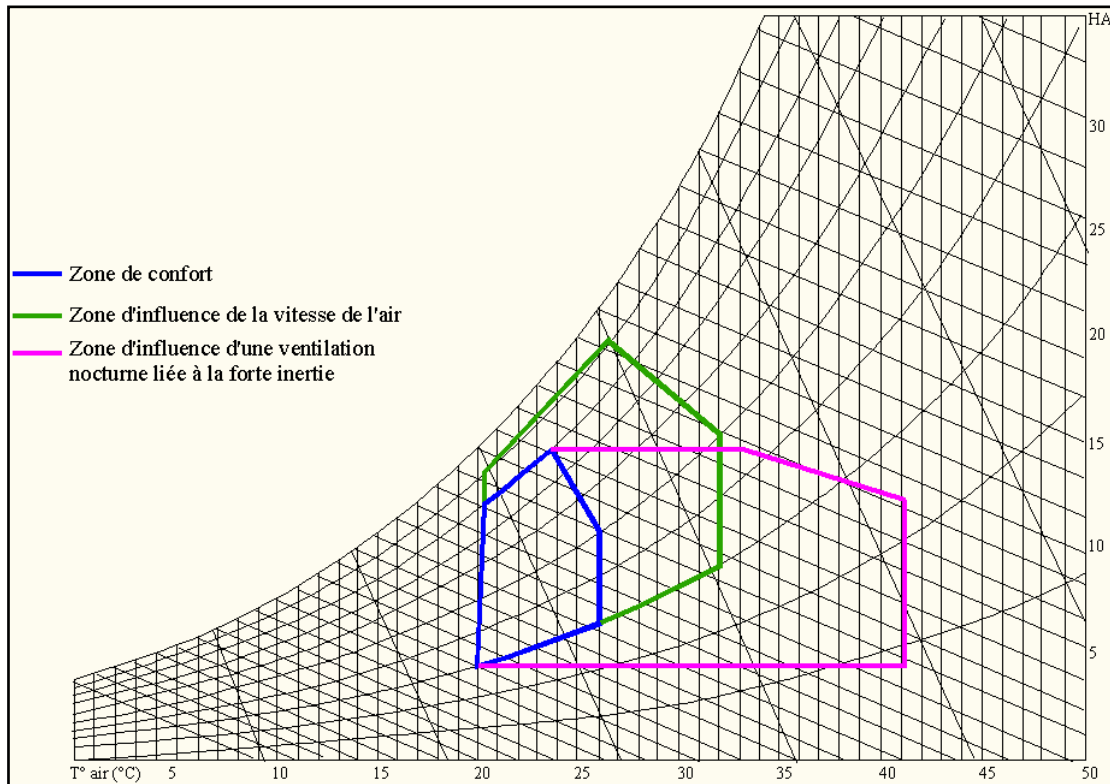


Fig. 144: Diagramme psychrométrique. **Source :** Auteur.

Le but est d'empêcher une surchauffe en été et favoriser la ventilation en soirée quand les températures externes deviennent plus confortables. La lecture du diagramme psychrométrique permet d'établir les recommandations suivantes :

- Utilisation de l'énergie solaire, la chaleur est captée, stockée et restituée, à travers ses ouvertures et ses murs, elle est nécessaire pendant l'hiver.
- Pendant la période d'été, on a recours à la ventilation nocturne qui est une stratégie recommandée pour la zone de surchauffe afin de réintégrer le confort d'été.
- Possibilité de fermer durant le jour.
- Possibilité d'ouvrir la nuit pour bénéficier de la ventilation nocturne.
- Ventilation des toits et isolation des planchers pour réduire les apports d'été.
- Utilisation des balcons et des encorbellements pour l'ombrage des murs.
- Des fenêtres de petites tailles rendent l'isolation simple plus appropriée.
- Une orientation optimale (sud/sud-est/sud-ouest)

Pour Tlemcen, le captage solaire pendant l'hiver est recommandé, ceci sera atteint par une bonne pénétration du rayonnement solaire à travers le patio, le choix rigoureux des matériaux, des toitures bien isolées pour limiter les déperditions. Pendant la saison chaude, les besoins de refroidissement sont importants à travers un rafraîchissement de l'air par l'inertie thermique des murs dans le but de

retarder la transmission de la température des surfaces extérieures vers les surfaces intérieures, recourir à une ventilation naturelle efficace.

4.5. La ventilation naturelle

La ventilation consiste à assurer un mouvement de l'air dans le but de son renouvellement (soit dans le but de refroidissement, soit dans le but d'hygiène). Quand elle est naturelle, elle se produit grâce au phénomène de convection qui aspire l'air froid par les ouvertures basses et pousse l'air chaud à monter et s'évacuer par les ouvertures hautes. Dans notre cas d'étude, la ventilation est unilatérale : par l'ouverture de fenêtres sur une seule façade, l'air extérieur plus froid rentre par le bas de l'ouverture et l'air intérieur plus chaud sort par le haut; au niveau du patio, l'air est évacué par tirage thermique, c'est l'effet de cheminée.

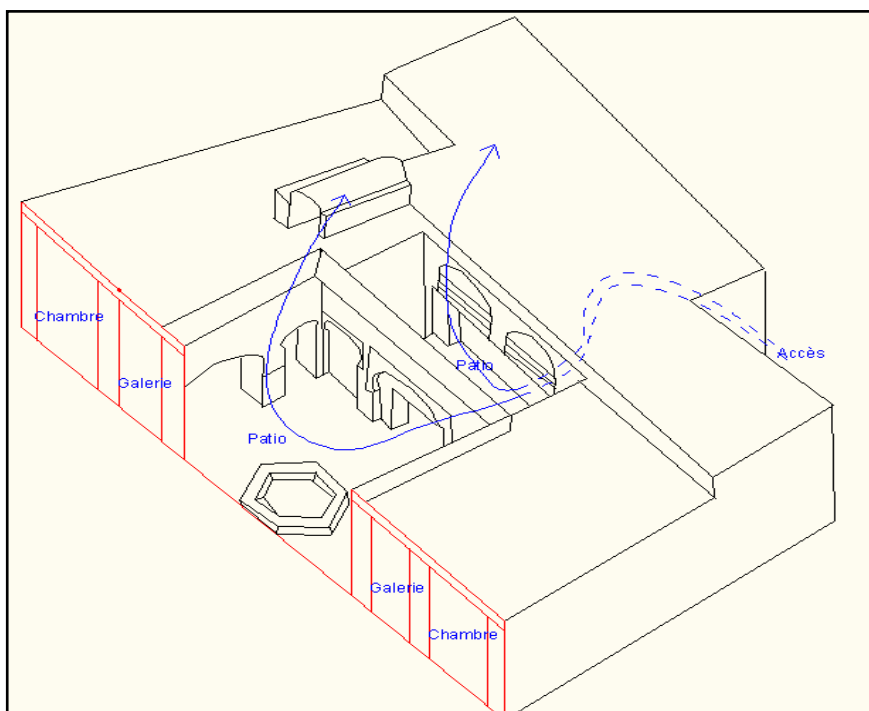


Fig. 145: Ventilation à travers le patio. **Source :** Auteur.

4.6. Simulation numérique du confort thermique

4.6.1. Création de la géométrie sous le Logiciel GAMBIT

La première étape consiste à créer le plan de la maison, (Fig.146), ensuite la modélisation 3D, (Fig. 147).

Commande de création de la géométrie 2D, par point et ligne.

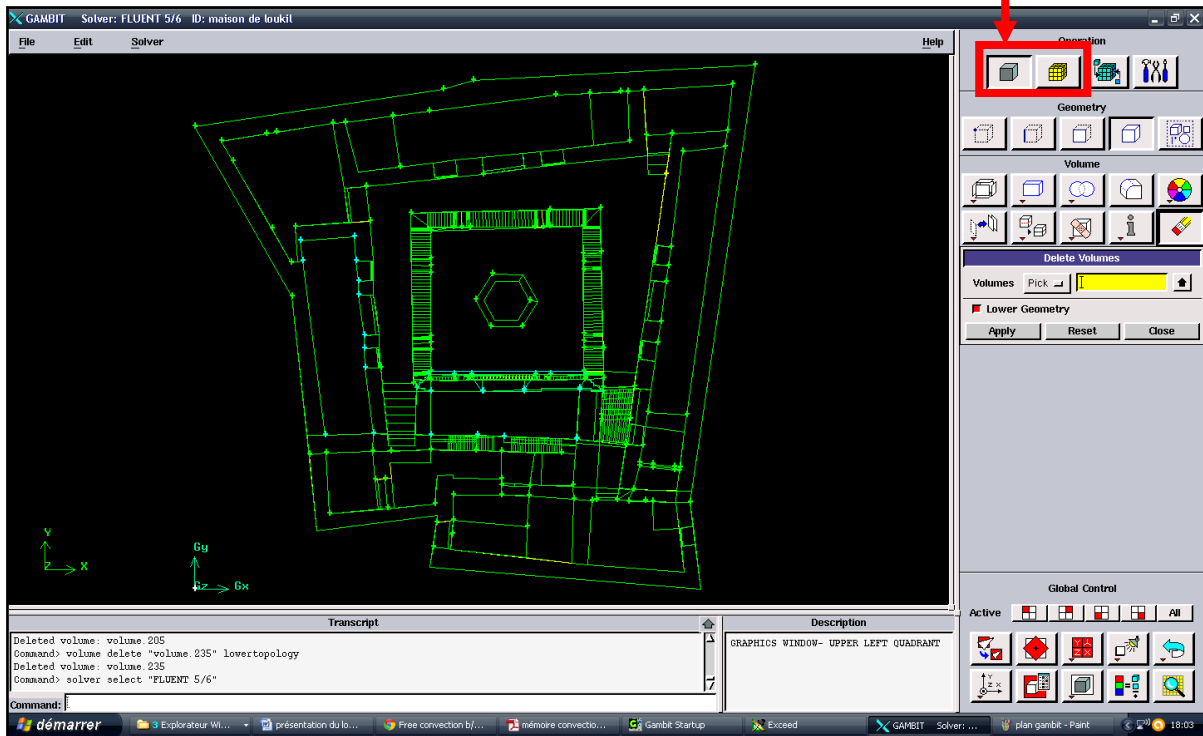


Fig. 146: Modélisation de la géométrie, vue en plan. **Source :** Gambit 2.3.16.

Commande de création de la géométrie 3D, par arrête, face et volume.

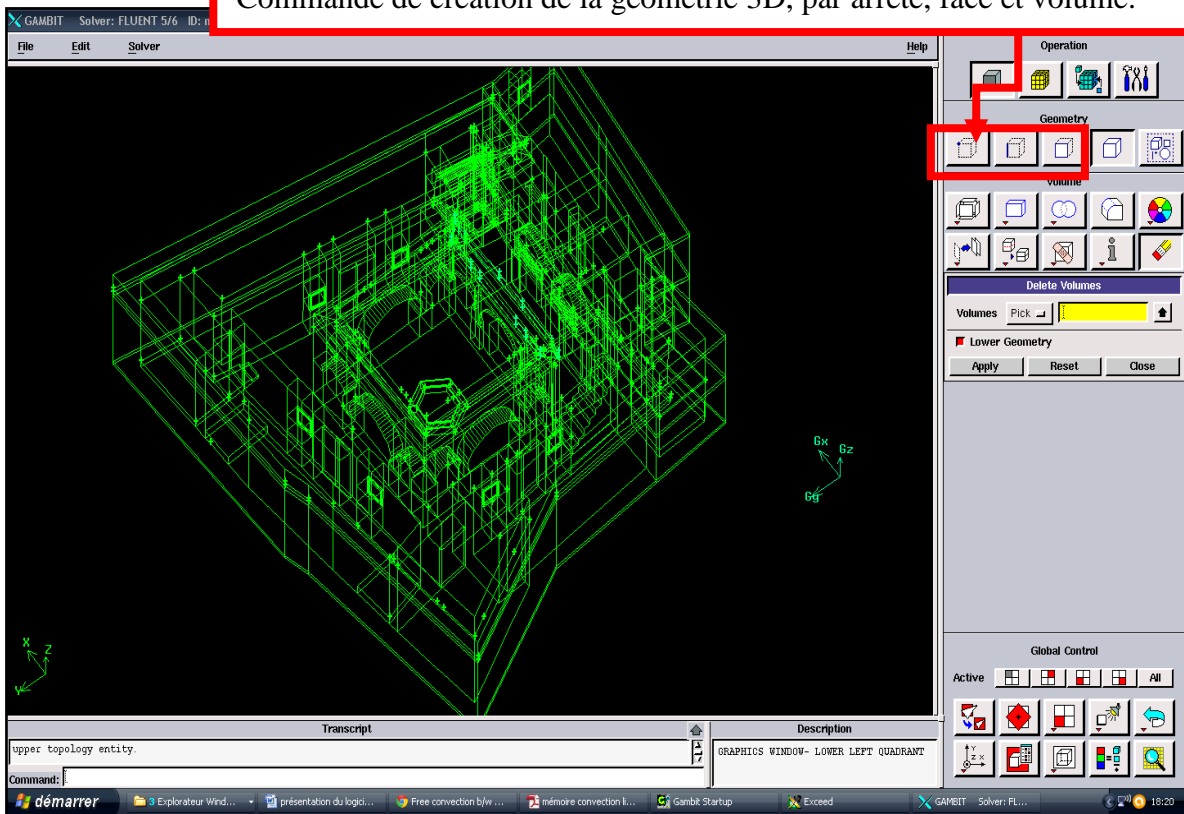


Fig. 147: Modélisation de la géométrie, vue en perspective. **Source :** Gambit 2.3.16.

4.6.2. Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles

Le maillage de la maison s'est fait ensuite.

Les types de mailles supportées et utilisées sont :

- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales : pour mailler une forme prismatique, on fait recours à ce type de maille dans le but de réduire le nombre de cellules, dans notre cas, ce maillage est utilisé pour les murs et dalles.
- Des mailles (hybrides) mixtes : on l'utilise pour les formes complexes et dans les zones intermédiaires, ce type comporte un grand nombre de cellules, dans notre cas elles sont utilisées dans le maillage de l'ossature des arcades, dans la voûte en berceau et dans la fontaine.

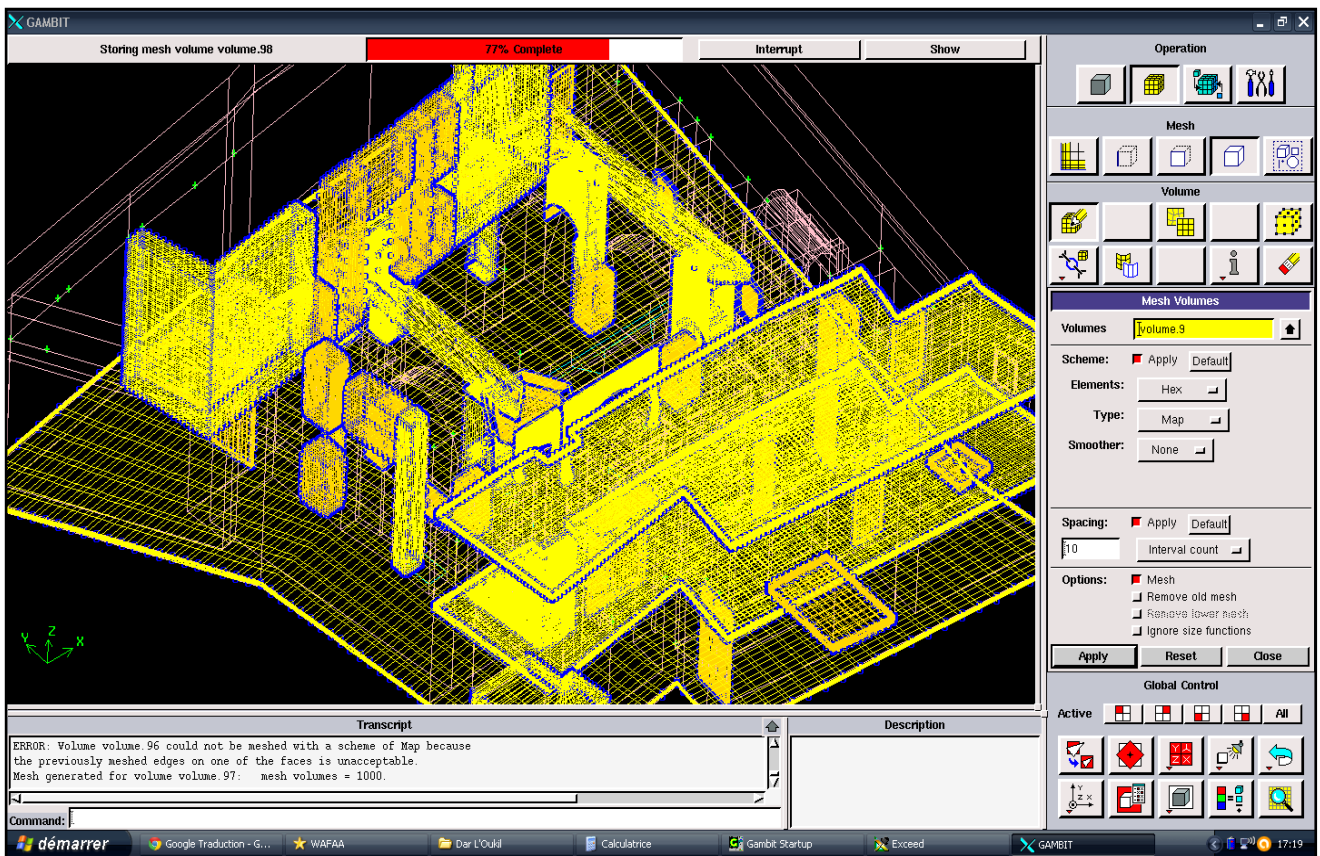


Fig. 148: Etapes de maillage. **Source :** Gambit 2.3.16.

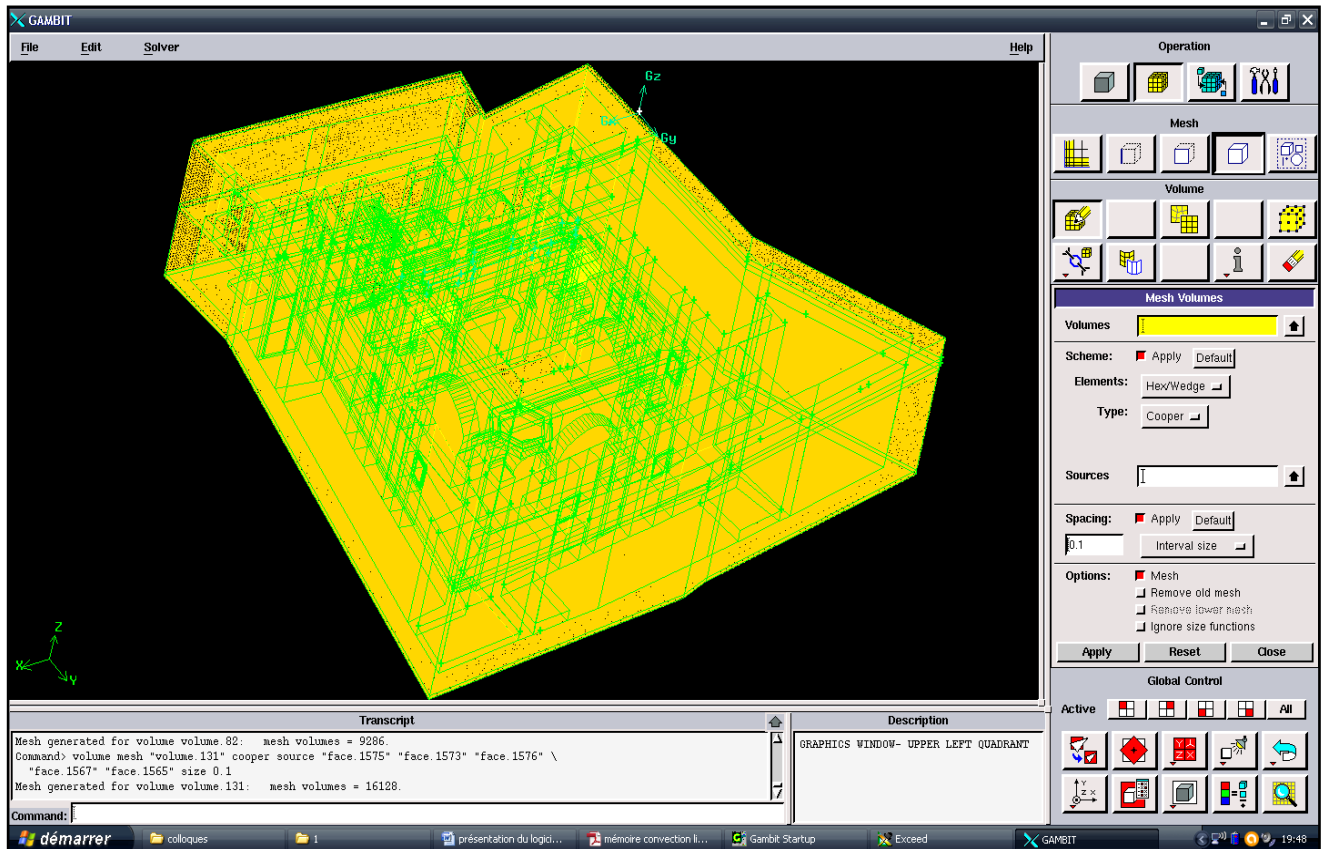


Fig. 149: Finalisation du maillage. **Source :** Gambit 2.3.16.

4.6.3. Définition des conditions aux limites dans GAMBIT

Cette étape permet de préparer la nature du cas étudié avant de l'exporter vers Fluent, dans notre cas il s'agit d'une convection libre avec un rayonnement solaire, donc il faut identifier l'entrée et le sortie de l'air pour la ventilation naturelle dans les différents espaces et on identifie le reste par wall parce qu'il s'agit des murs. La deuxième étape dans la définition des conditions aux limites est celle de la séparation des volumes solides, tels que les murs, portes, fenêtres, dalles, escalier, etc.....et des volumes liquides, l'air et l'eau de la fontaine.

4.6.4. Définition du problème sous le logiciel FLUENT

Une fois le chargement du fichier de maillage (réalisé avec le logiciel GAMBIT) effectué sous "Fluent", nous devons mettre à l'échelle la géométrie (pour notre cas, on utilise le mètre).

Le logiciel "Fluent" permet aussi de réordonner les nœuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire et cela pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité d'accès à la mémoire⁶.

Les équations régissant l'état d'équilibre ont été résolus l'aide **du solveur Fluent**. Diverses situations de typologies constructives dans le bâtiment pendant la journée ont été examinées.

⁶ ANSYS inc. ANSYS FLUENT Tutorial Guide. *Op, cit.*, p40.

Après avoir balayé d'autres travaux de recherche scientifiques similaires, on a pu fixer les paramètres dans le solveur pour résoudre les équations dans Fluent.

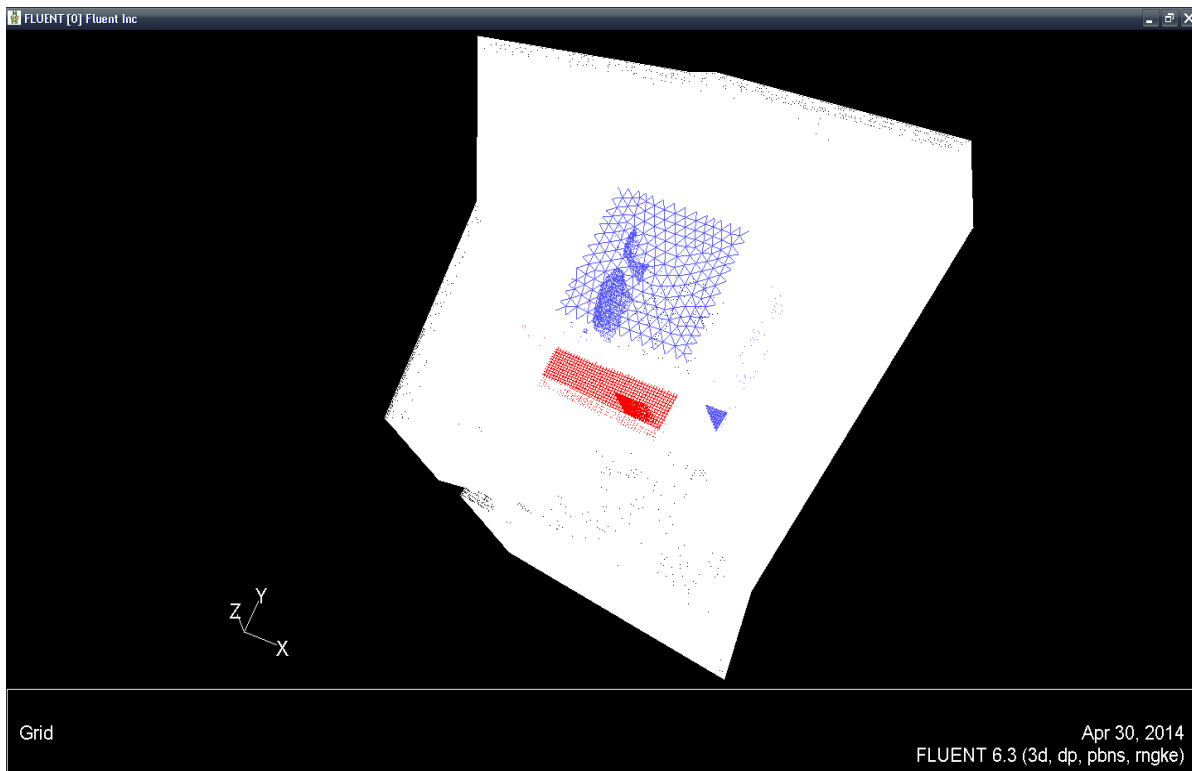


Fig. 150: Export de la géométrie vers Fluent. **Source :** Fluent 6.3.26.

Sous "Fluent", on peut choisir les formulations du solveur, afin de construire les équations pour les variables discrètes dépendantes, les inconnues telles que : vitesses, pressions et températures :

- La formulation implicite résout les équations de quantité de mouvement dans notre cas il s'agit du mouvement de l'air de la ventilation naturelle.
- La définition du modèle de l'énergie parce qu'il s'agit de transfert de chaleur.
- Pour calculer le gain de chaleur solaire local dans la maison, la position du soleil dans le ciel doit être connue, puis l'intensité du rayonnement solaire incident totale et l'échange de rayonnement thermique.
 - ☀ les coordonnées du soleil de la journée la plus chaude de l'été.
 - ☀ le rayonnement solaire direct normal (à la surface de la terre) exprimé en W/m^2 .
 - ☀ la radiation solaire diffusée à la surface en W/m^2 .
- Le logiciel de calcul offre la possibilité de choisir un des modèles de turbulence, le choix du modèle se base principalement sur les résultats que donne chacun des modèles suivant les conditions aux limites prédéfinies et à la nature du cas étudié, pour cela nous avons choisi le modèle $k-\epsilon$; qui correspond à la convection libre couplée à une radiation solaire.

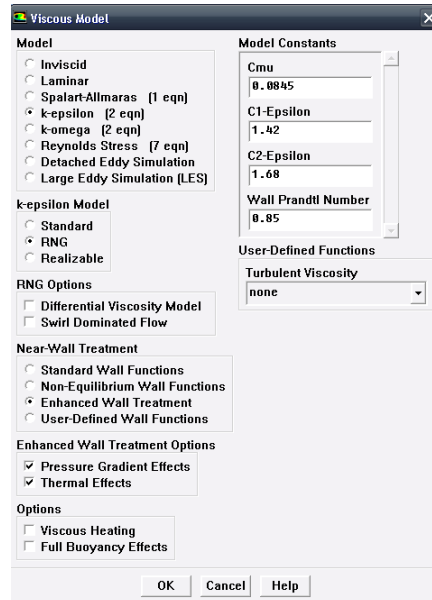


Fig. 151: Définition du modèle de turbulence. **Source :** Fluent 6.3.26.

- Pour le choix des matériaux, le logiciel offre une gamme prédéfinie avec la possibilité de programmer des matériaux en spécifiant leur densité, chaleur spécifique et conductivité thermique.

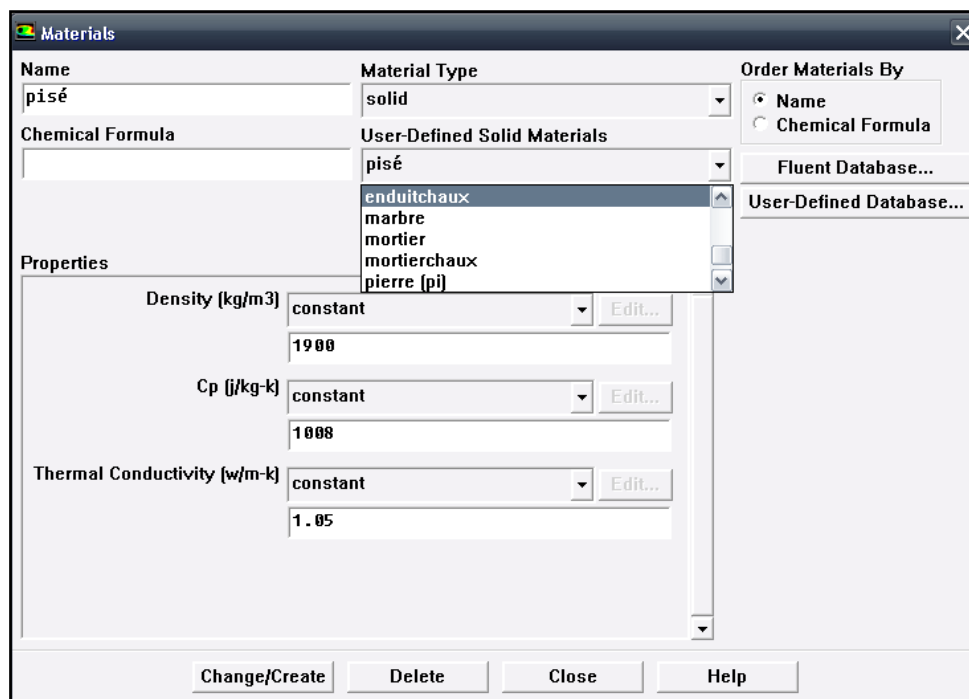


Fig. 152: Définition des matériaux. **Source :** Fluent 6.3.26.

Le tableau suivant présente une bibliothèque des propriétés thermiques des matériaux utilisés dans la construction de la maison de L'Oukil, extraite de la base de données du logiciel COCON d'analyse de la qualité environnementale des bâtiments⁷.

⁷ <http://www.maison.com/architecture/maison-basse-consommation/bibliotheque-materiaux-construction/>.

Matériau	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.k)	Chaleur spécifique (J/kg.k)
matériaux en contact direct avec l'ambiance intérieure			
sol			
Carreaux de terre cuite	2000	1.300	840
Carreaux de céramique	1900	0.309	656.9
Marbre	2750	2.900	840
murs			
Enduit de chaux	1550	0.700	864
Enduit terre et Pisé	2000	1.200	1008
Enduit plâtre intérieur	1150	0.570	1008
matériaux structurels (souvent derrière/en dessous d'un matériau de surface)			
sol			
Chape de terre	1460	1.280	800
Bois	710	0.14	2301
Briques pleines (cuites)	1850	1.000	1000
Brique standard 20 cm	650	0.390	1008
Acier	8.000	45	381
Mortier	2000	1.150	840
Béton	2150	1.650	1008
murs			
Pierre	1895	1.400	1000
Pisé (1900kg/m ³)	1900	1.050	1008
Brique cuite avec mortier de chaux	1900	1.150	1004
Mortier de chaux	1600	0.700	850

Tableau 7 : Caractéristiques des matériaux utilisés.

Source : Guide pour la construction de logements individuels durables, <http://www.maison.com/architecture/maison-basse-consommation/bibliotheque-materiaux-construction/>.

- Notre simulation s'effectue pour la journée la plus chaude où la température maximale s'affiche à 35°C, soit 308.15k.
- Pour le code Fluent et pour notre cas les types disponibles des conditions aux limites sont classés comme suite:
 - ✚ **Conditions d'entrée et de sortie de l'écoulement :** la valeur de la variable est connue, la vitesse de l'entrée de l'air (velocity inlet) est limitée à 0.2m/s.
 - ✚ **Mur et conditions du pôle :** mur (wall), pour le périmètre du bâti, on fixe la valeur de la variable posée (la température), et en ce qui concerne l'air on lui détermine le coefficient de transfert thermique (5-25 W/m²K parce qu'il s'agit d'une convection libre).
 - ✚ **Cellules des zones internes :** fluide ou solide, en attachant chaque élément avec le matériau qui lui convient.

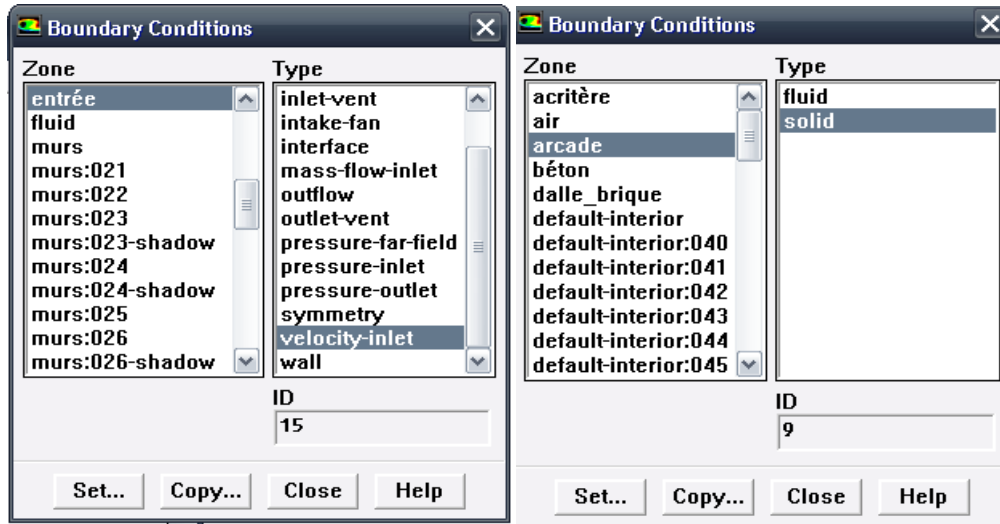


Fig. 153: Conditions aux limites. **Source :** Fluent 6.3.26.

4.6.5. Calcul avec FLUENT

- Le Schémas de discrétisation Le schéma "third-order MUSCL" : Ce schéma est utilisé dans notre étude, car il procure une meilleure précision dans une structure complexe avec un maillage régulier et hybride.
- Le choix du schéma d'interpolation de la pression, "Body-Force-Weighted" est recommandé pour les écoulements impliquant d'importantes forces de volume d'où la convection naturelle qui est notre cas d'étude.
- Le choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse, Nous avons entrepris nos simulations avec la méthode "SIMPLE".

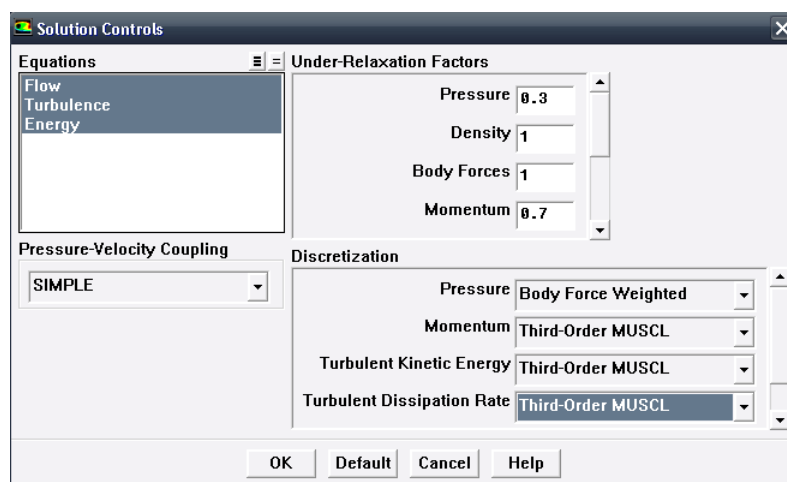


Fig. 154: Contrôle de solutions. **Source :** Fluent 6.3.26.

4.7. Résultats de la simulation

4.7.1. Modélisation du cas d'étude

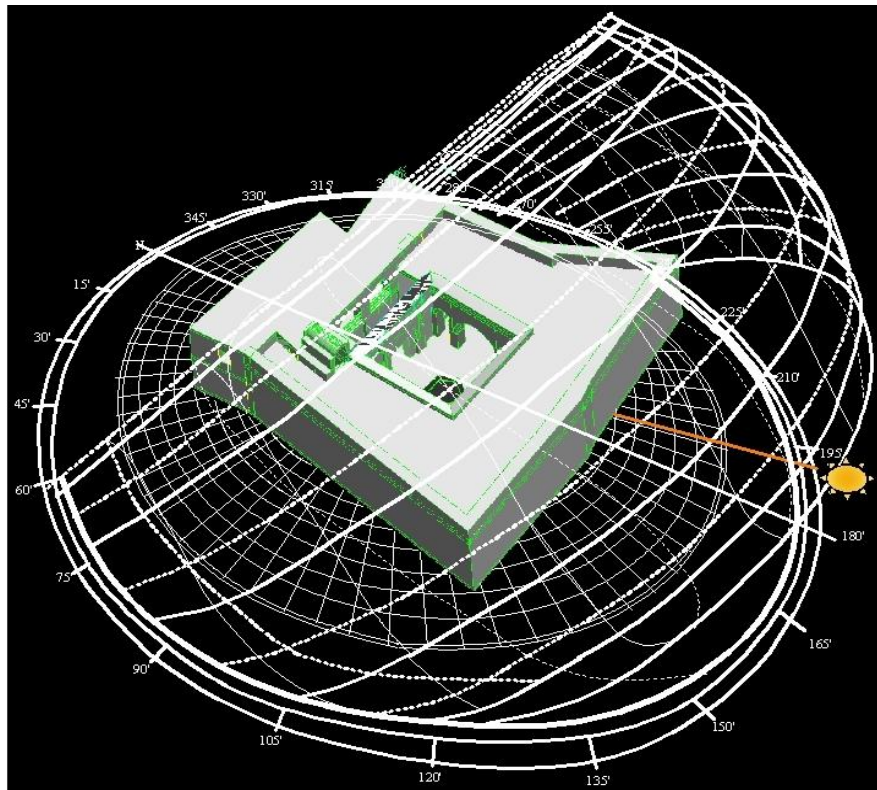


Fig. 155: Modélisation du cas d'étude. **Source :** Auteur.

4.7.2. Confort thermique, graphe des températures :

Le confort thermique est étudié sur la base d'un graphe indiquant les fluctuations de température suivant un plan choisi. Dans notre cas, on va faire l'évaluation du confort thermique selon trois cas, du fait que le plancher a fait l'objet d'une importante restauration, le premier avec un plancher en rondins de bois, le deuxième un plancher en voûtains métalliques et le troisième un plancher collaborant en béton armé rajouté à celui à voûtains.

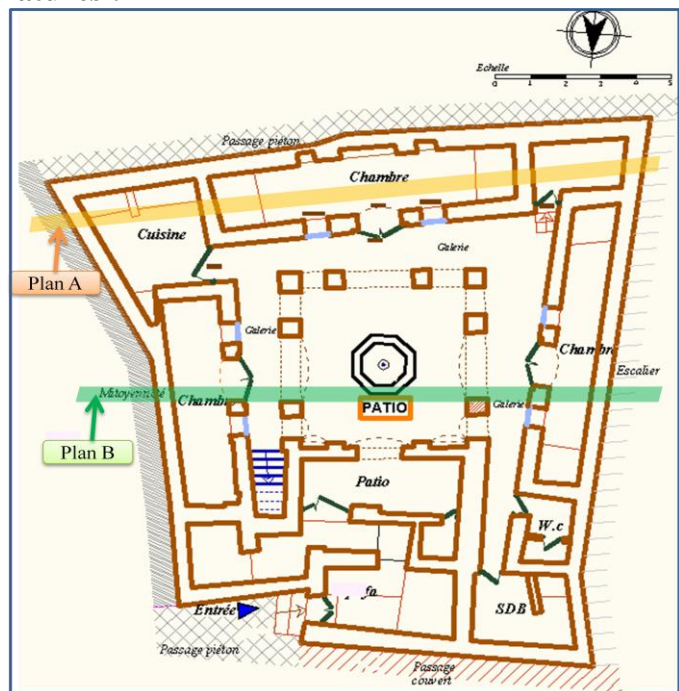


Fig. 156: Choix des surfaces étudiées. **Source :** Auteur.

Nous allons l'appliquer à la journée la plus chaude enregistrée pour le confort d'été. Les contours des températures et de la ventilation passent par le plan A et B (Fig. 156), le graphe des températures affiche la courbe de températures internes de toutes les zones thermiques visibles dans l'espace simulé. L'axe de la zone évaluée est donné en abscisse, en bas du graphe alors que les températures sont indiquées dans l'axe des ordonnées à gauche.

4.7.3. Simulation du confort thermique

En été, il est important que la structure du bâti et ses espaces puissent maintenir l'air chaud à l'extérieur. Un climat chaud peut rapidement devenir inconfortable pour les habitants, essentiellement vers midi. C'est pour cette raison qu'une bonne ventilation doit être assurée, de sorte à maintenir une température intérieure en dessous de la température extérieure. La ventilation maintient le mouvement de l'air dans l'environnement et permet des températures plus fraîches pour les habitants.

Dans notre cas, pour la journée la plus chaude, la courbe de température fluctue entre la température minimale de 19°C à et la température maximale de 35°C à l'ombre. Pour une telle amplitude journalière de 16°C, le profil des températures à l'intérieur des espaces affiche des courbes avec une fluctuation de température variant de 3°C à 6°C, selon le cas étudié.

Une ventilation intensive des espaces de vie requiert des débits importants mais occasionnels. La technique utilisée est la plus simple indiquée : l'utilisation des fenêtres et des portes, permettant de pratiquer ainsi de grandes ouvertures d'amenée et d'évacuation d'air. En général, le fonctionnement de la ventilation est adapté en fonction des besoins. Pour réduire, il suffit de fermer, ou d'obstruer les petites ouvertures.

La lecture des températures à l'intérieur des espaces, suivant les trois cas de disposition des matériaux, nous donne les résultats suivants :

4.7.4. Résultats de la simulation

✓ Simulation du confort d'été pour la journée la plus chaude relevée: En illustration, nous nous sommes limités aux allures du profil de la température et de la ventilation.

Pour la journée la plus chaude, on enregistre une courbe de température qui accuse une variation de température de 16°C, la ventilation nocturne permet d'atténuer ces températures, et les faire parvenir, pour les chambres présentant des fenêtres pour l'aération.

A. Contours de vitesse de l'air

✓ Profil de vitesse A

Au plan A (voir Fig. 157), les contours de la ventilation de l'air sont représentés par la figure suivante.

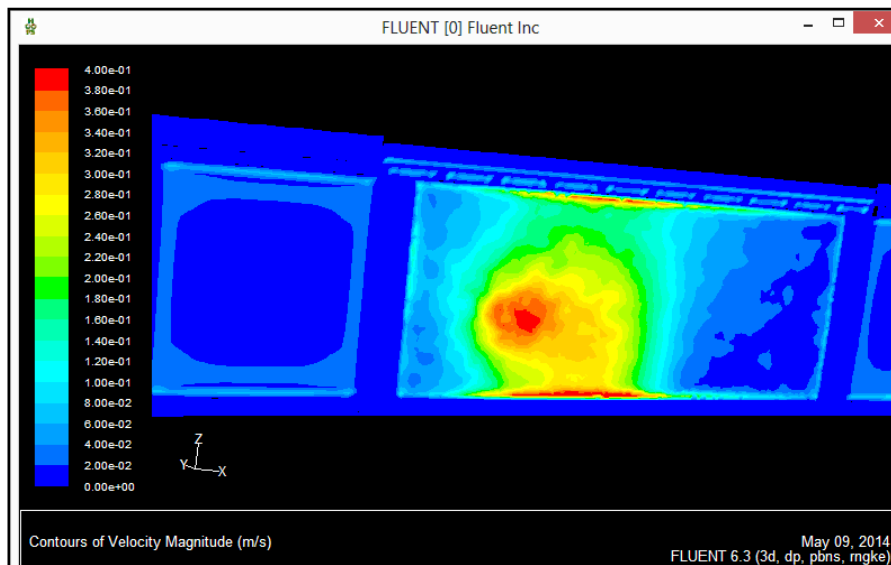


Fig. 157: Contours de vitesse de l'air au plan A. **Source:** Fluent 6.3.26.

Nous pouvons remarquer d'après les contours de vitesse de l'air que la ventilation naturelle se procure dans la chambre centrale, elle est intense face à la fenêtre prise ouverte et se dégrade de part et d'autre. Dans les espaces est et ouest la vitesse de l'air est négligeable, cela est dû à l'espace qui est pris fermé.

✓ Profil de vitesse B

Pour le plan B (voir Fig. 158), les contours de la ventilation de l'air sont illustrés par la figure suivante.

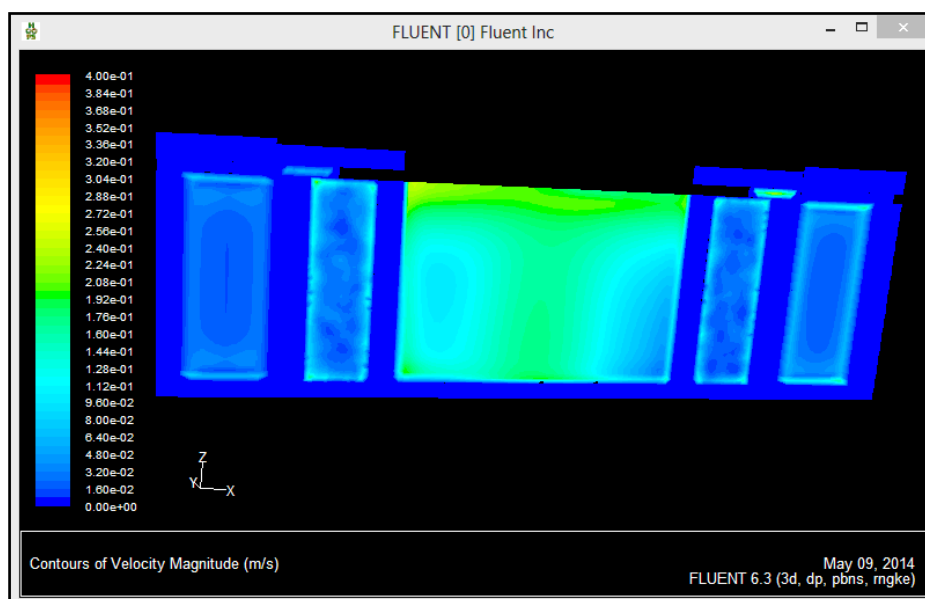


Fig. 158: Contours de vitesse de l'air au plan B. **Source:** Fluent 6.3.26.

Le contour de la vitesse de l'air passant par le plan B, nous a permis de voir l'évolution du débit d'air à travers la patio, la ventilation se présente intense dans cette zone ensuite l'air frais est amené vers les galeries qui sont à l'abri pour être distribué dans les différentes chambres.

Dans les différents cas simulés par la suite, la ventilation naturelle a été prise en charge vu son influence sur le confort d'été couplée à l'inertie thermique des matériaux.

B. Contours des températures intérieures

- 1^{er} cas: Typologie d'une structure avec plancher en rondins de bois

Ce cas représente la typologie initiale de la maison, construite pendant l'époque méridienne.

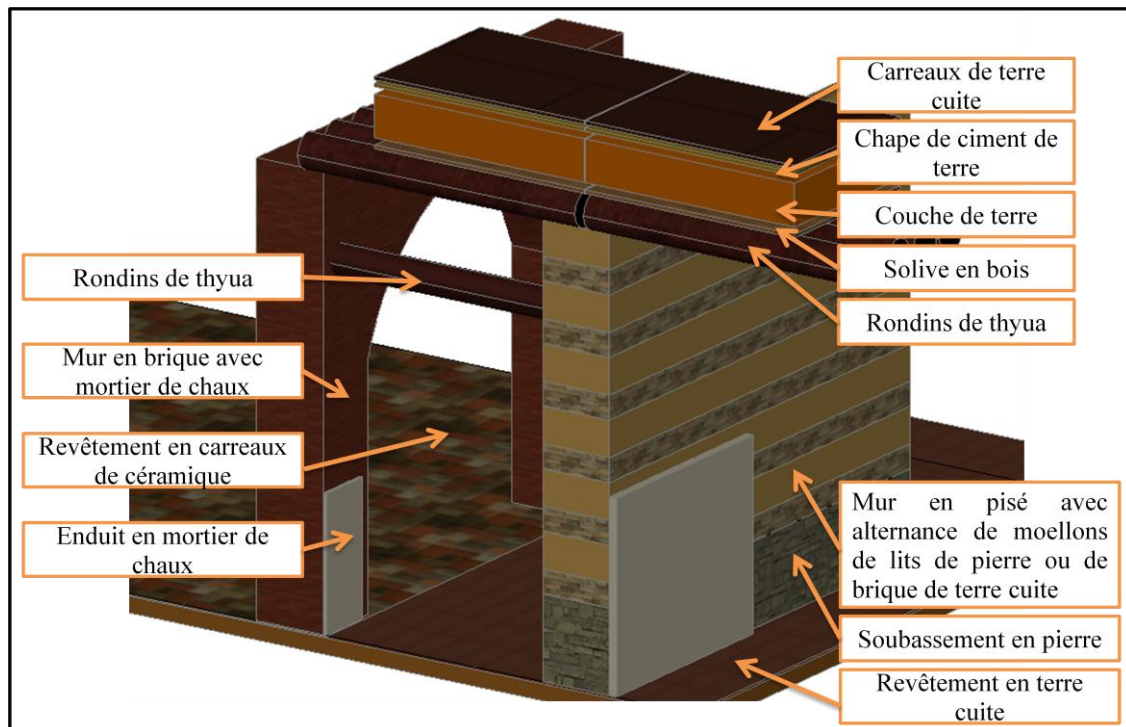


Fig. 159: Typologie constructive avec plancher en rondin de bois. **Source:** auteur.

✓ Profil de température A

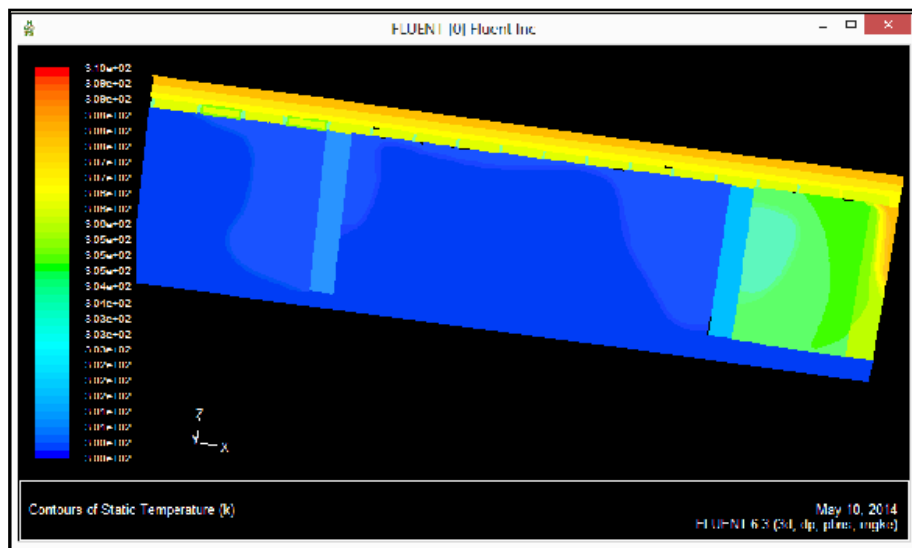


Fig. 160: Contours des températures intérieures, au plan A. **Source:** Fluent 6.3.26.

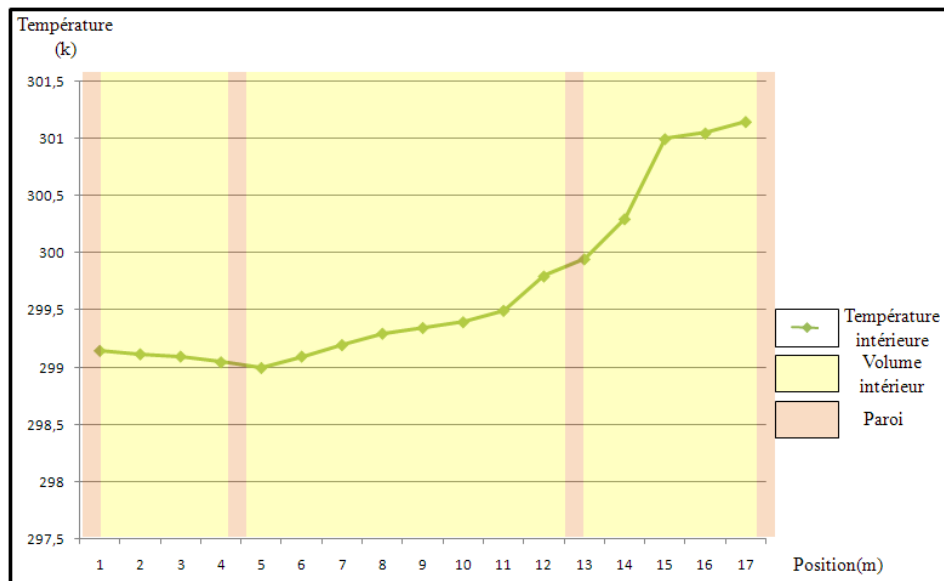


Fig. 161: Variation de la température intérieure, au plan A. **Source:** Fluent 6.3.26.

La lecture du graphe fait ressortir que les températures des espaces étudiés sont inférieures à la température extérieure, la température interne atteint sa valeur minimale de 299.15k et sa valeur maximale est de 301.15k, alors que la température extérieure est prise à 308k. Ceci explique que la paroi exposée au soleil prend la valeur maximale contrairement à l'autre espace mitoyen à la mosquée et la chambre centrale présentant une fenêtre ouverte pour l'aération qui prennent la valeur minimale de température.

Les fluctuations de température sont de l'ordre de 3°C, cela est dû d'une part à l'orientation des parois de la chambre vers l'ouest qui reçoit des rayons solaires et d'autre part, à l'espace d'étude qui est maintenu fermé.

✓ **Profil de température B**

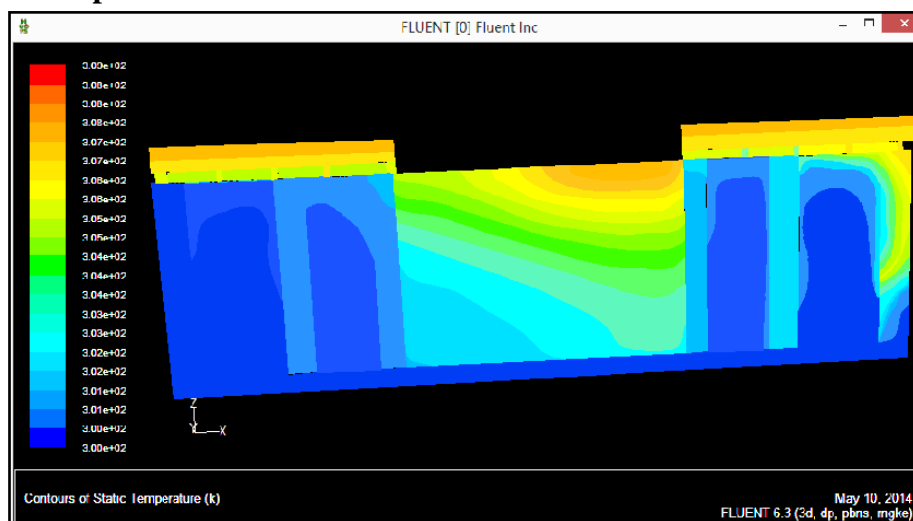


Fig. 162: Contours des températures intérieures, au plan B. **Source:** Fluent 6.3.26.

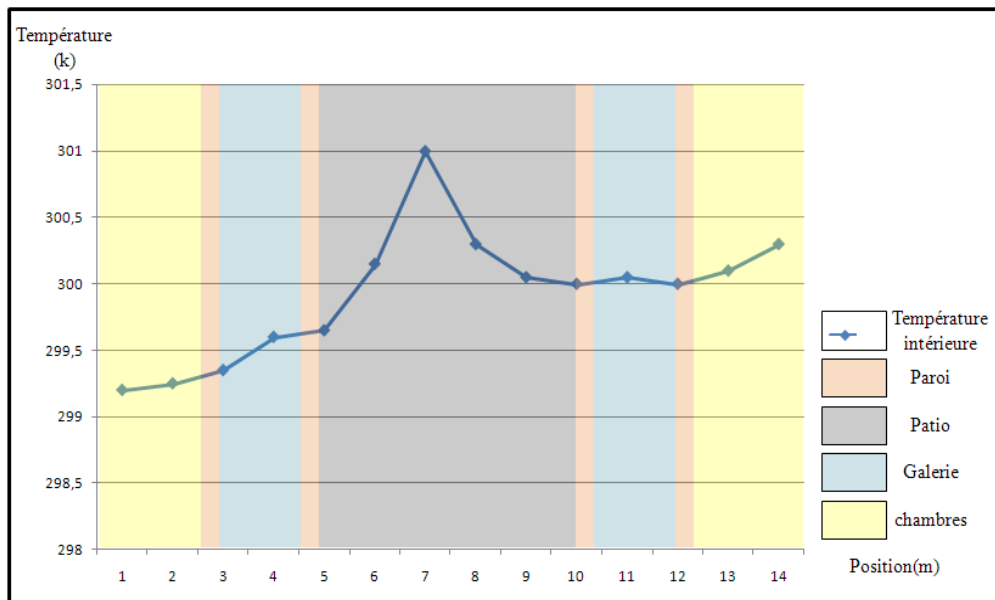


Fig. 163: Variation de la température intérieure, au plan B. **Source:** Fluent 6.3.26.

Pour les espaces qui passent par le plan B, le profil de température s'affiche dans la zone de confort avec une température maximale de 301k vers la zone exposée et une température minimale de 299.3k dans la zone qui présente une mitoyenneté avec la mosquée. La ventilation nocturne permet d'atténuer ces températures de 9°C.

- **2^{ème} cas: Typologie d'une structure avec plancher en vouitains en brique+IPE**

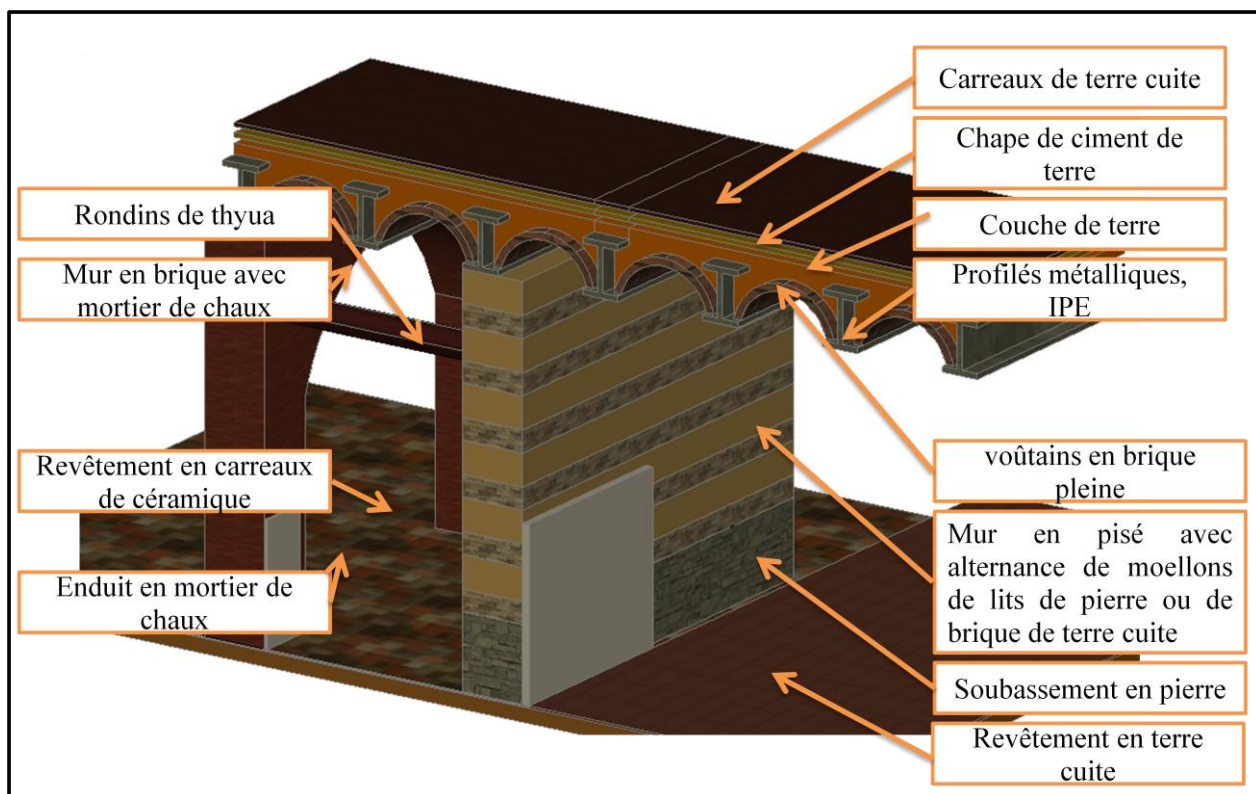


Fig. 164: Typologie constructive avec plancher en vouitains en brique+IPE. **Source:** auteur.

✓ Profil de température A

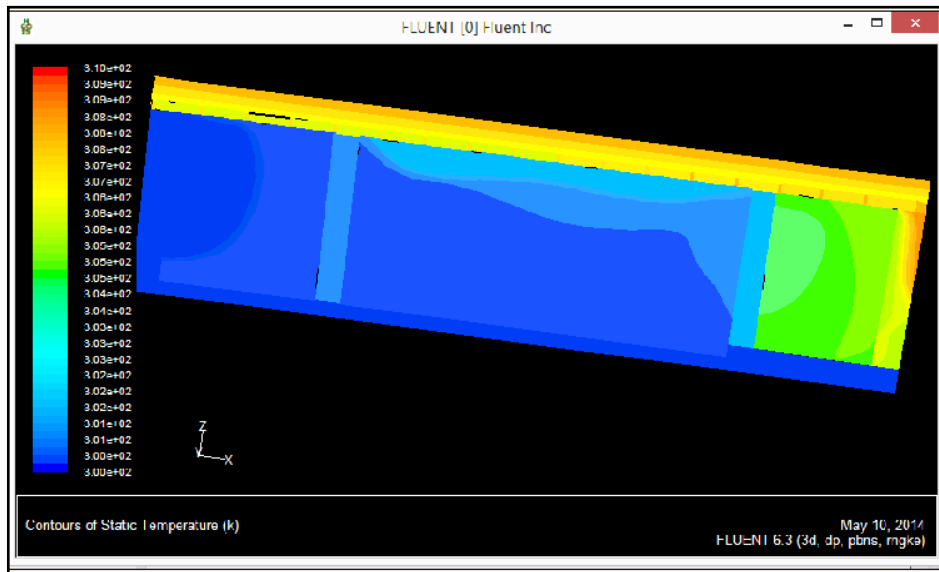


Fig. 165: Contours des températures intérieures au plan A. **Source:** Fluent 6.3.26.

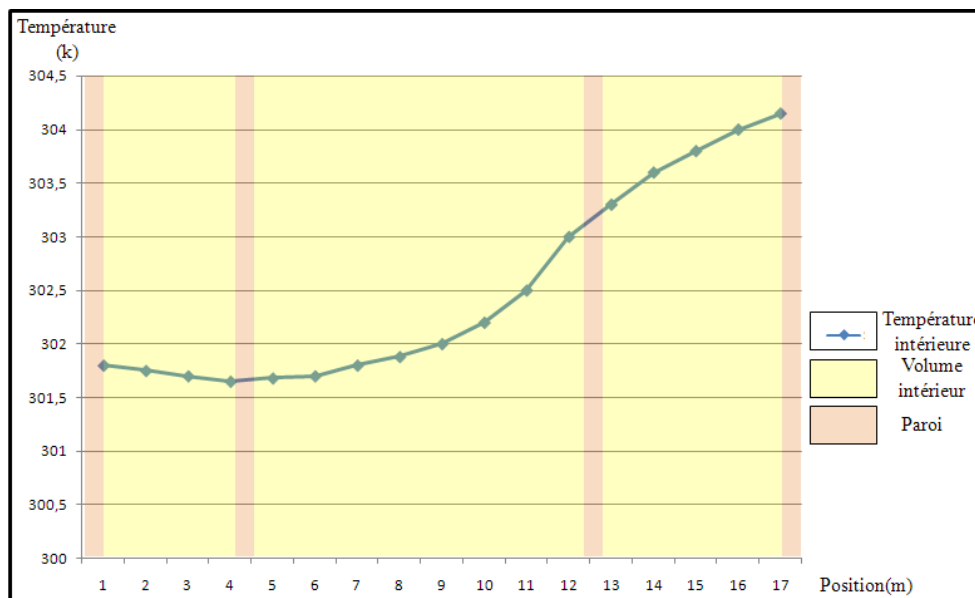


Fig. 166: Variation de la température intérieure, au plan A. **Source:** Fluent 6.3.26.

L'analyse des contours de température montre que la température intérieure est toujours inférieure à la température externe. La température atteint la valeur minimale de 301.65k dans l'espace qui présente une mitoyenneté avec une porte ouverte et une cheminée, d'autre part le maximum de température intérieure enregistre 304.15k, cette augmentation s'explique par la restitution de la chaleur emmagasinée dans la paroi exposée aux rayons du soleil.

La température intérieure diminue de 6.5°C par rapport à l'extérieur dans la cuisine, mitoyenne de la mosquée, elle présente une diminution de 6°C dans la chambre centrale qui est couverte par le nouveau plancher « en voûtains » et enfin une baisse de 4°C dans la chambre orientée ouest.

✓ Profil de température B

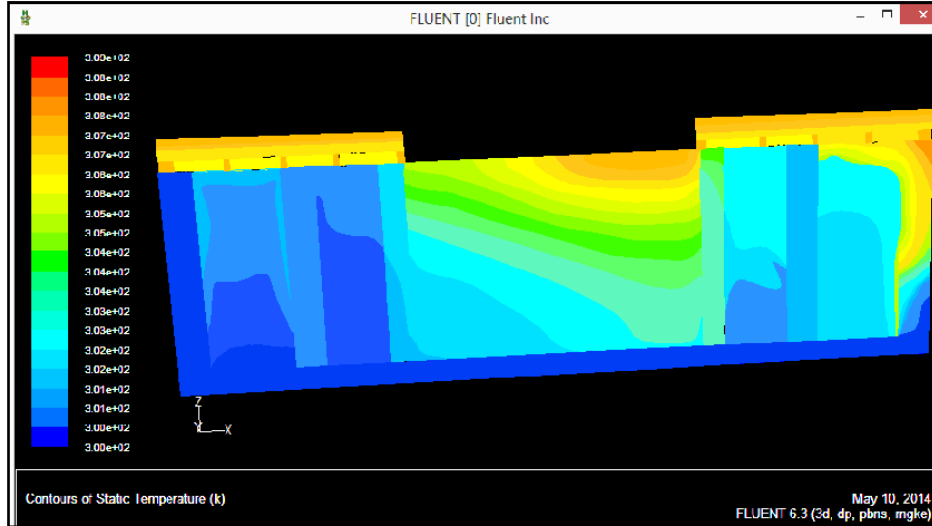


Fig. 167: Contours des températures intérieures au plan B. **Source:** Fluent 6.3.26.

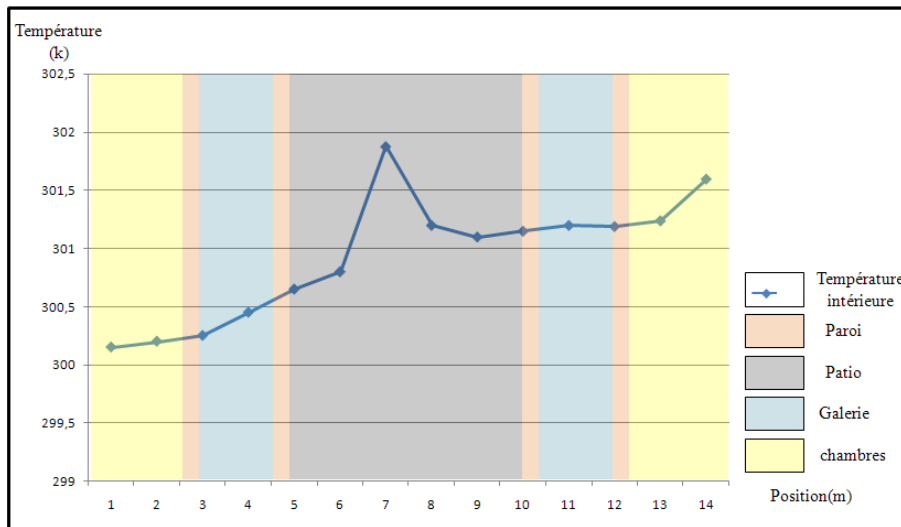


Fig. 168: Variation de la température intérieure, au plan B. **Source:** Fluent 6.3.26.

Pour les chambres, galeries et patio qui passe par le plan B, la courbe de température est toujours inférieure à celle de l'extérieure d'une moyenne de 6°C. C'est le patio qui joue le rôle de tirant thermique pour atténuer la température.

- 3ème cas: Typologie d'une structure avec plancher collaborant en voutains de brique+IPE et une chape en béton armé

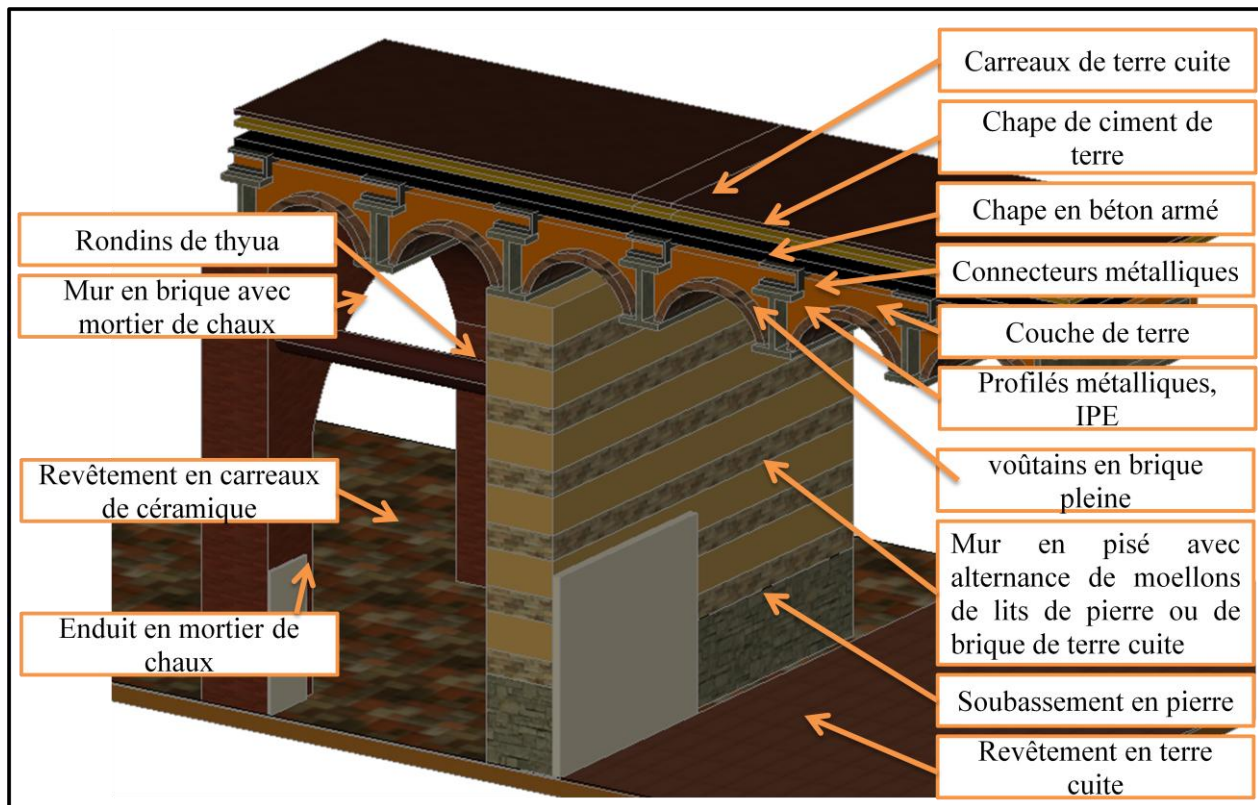


Fig. 169: Typologie constructive avec plancher collaborant en voutains de brique+IPN et une chape en béton. **Source:** auteur.

✓ Profil de température A

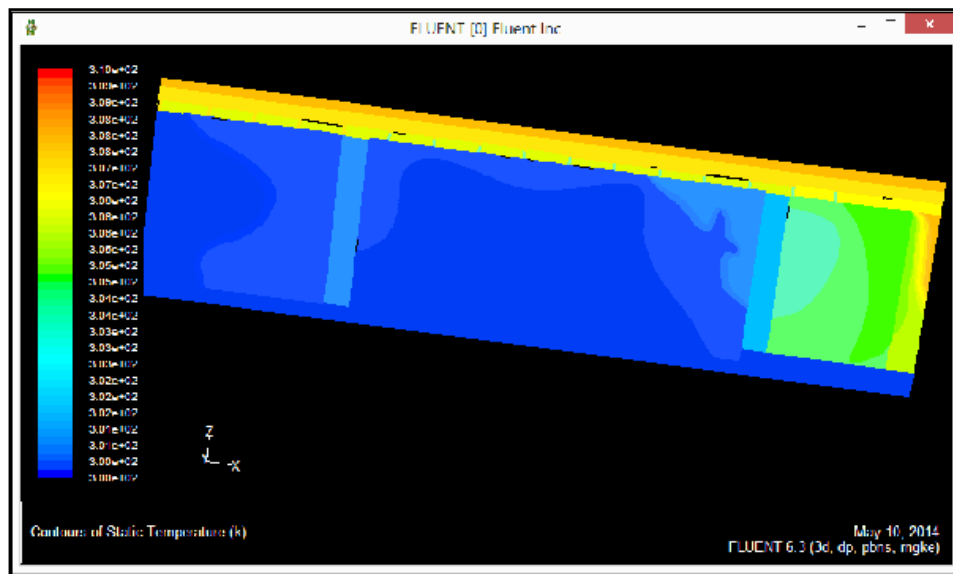


Fig. 170: Contours des températures intérieures au plan A. **Source:** Fluent 6.3.26.

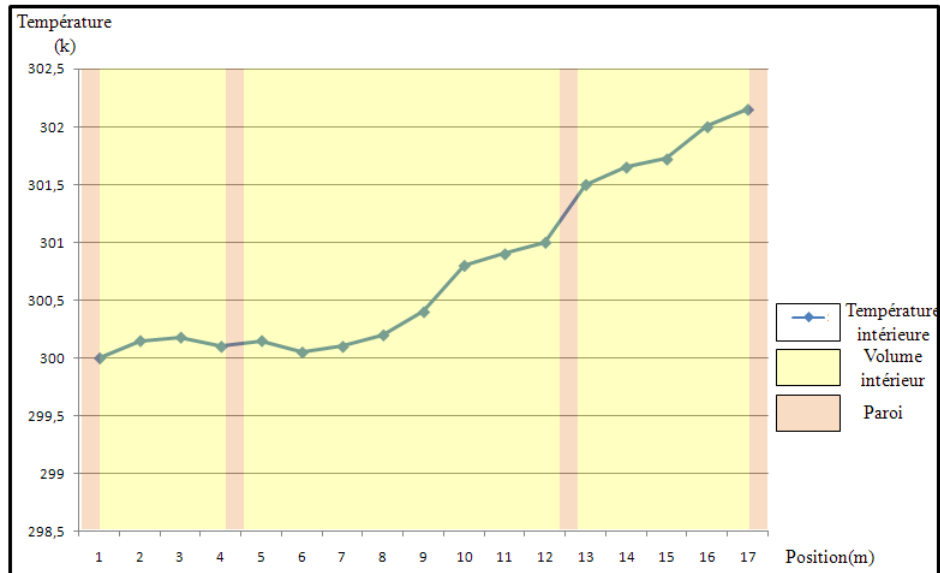


Fig. 171: Variation de la température intérieure au plan A. **Source:** Fluent 6.3.26.

La lecture du graphe fait ressortir que l'évolution de la courbe de températures intérieures suit celle du 1^{er} cas étudié avec des valeurs limites de 300.15k et 302.15k. Cette zone est maintenue, néanmoins à une température inférieure de 7.5°C à celle de l'extérieur.

La possibilité de maintenir les fenêtres ouvertes la nuit avec une ventilation fait baisser la température.

Sous l'effet de la radiation solaire directe et de l'inertie de la paroi exposée, la chambre ouest prend la valeur maximale de température.

✓ **Profil de température B**

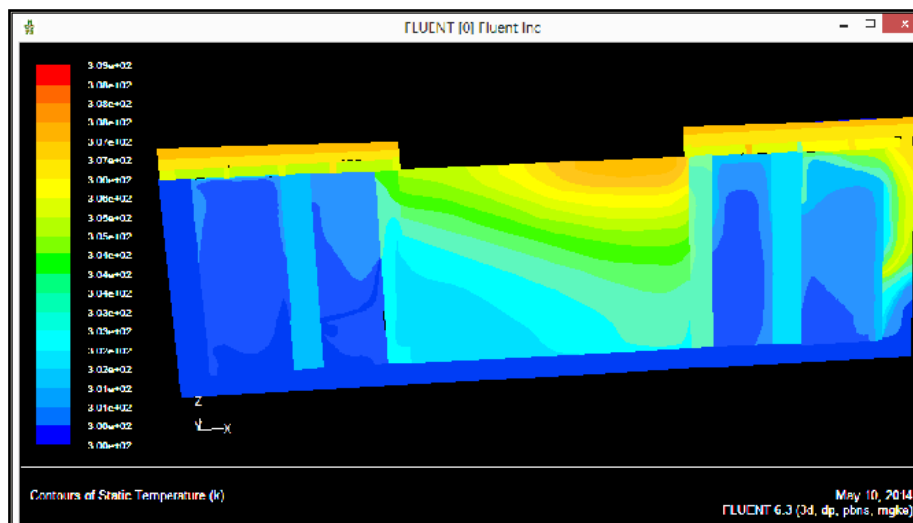


Fig. 172: Contours des températures intérieures, au plan B. **Source:** Fluent 6.3.26.

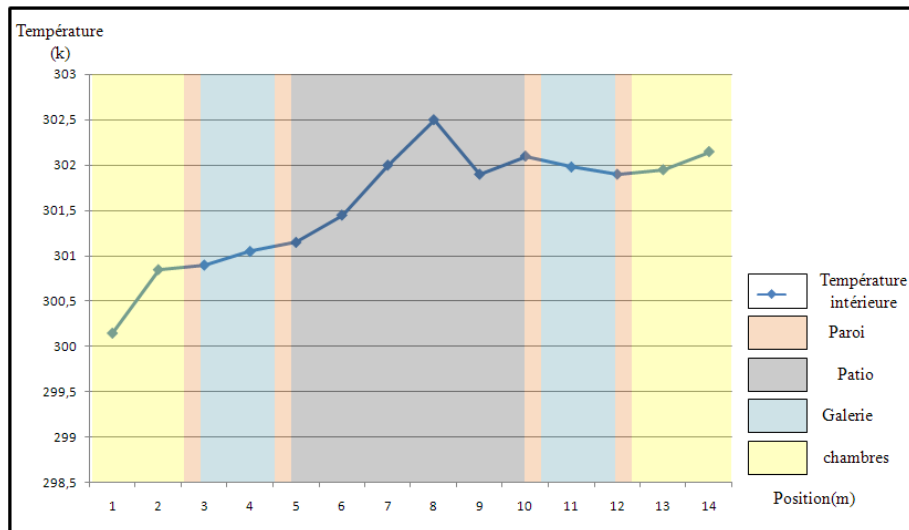


Fig. 173: Variation de la température intérieure, au plan B. **Source:** Fluent 6.3.26.

La courbe de température est dans la zone de confort, elle affiche une diminution de température de 7,5°C, présentant des espaces ouverts vers les galeries, ces derniers sont des espaces de transition qui gardent les chambres à l'ombre.

4.7.5. Validation des résultats à travers deux prises de mesure.

Jour/ Heure	T°C extérieure	T°C intérieure	Observation
22/06/2014 12h00	30°C	23°C	Atténuation de 7°C
25/06/2014 14h30	28°C	21,5°C	Atténuation de 7,5°C

Dans la simulation la température s'atténue de 8°C.

Dans l'expérimentation la température s'atténue de 7°C à 7,5°C pendant les heures les plus chaudes de la journée.

Donc il existe un écart près de 0,75°C.

4.7.6. Comparaison et interprétation des résultats

On peut déduire que les températures intérieures sont toujours inférieures à celles de l'extérieur. Elles varient selon le type et l'inertie des matériaux qui constituent l'enveloppe de la maison, selon l'orientation aussi et selon le type d'espace qu'il soit ouvert ou fermé.

Dans le cas d'une typologie de plancher en rondin de bois, la température baisse de 9°C avec une faible fluctuation de températures intérieures et cela est dû à la résistance thermique du bois qui est plus grande que plusieurs autres matériaux. Il résiste à la déperdition de la chaleur, ajoutée à l'inertie

thermique engendrée par la masse dense des matériaux, tels que la pierre et le pisé et à la forte effusivité des enduits de chaux de couleur blanche utilisés dans la structure de la maison.

De plus, l'inertie thermique du bois, permet une certaine régulation de la température intérieure malgré les écarts de la température extérieure. A tous ces paramètres, s'ajoute l'impact de la ventilation nocturne pour contribuer à réguler la température interne. Elle atteint une température de 26°C. En comparant nos résultats à la zone de confort (20°C à 27°C) arrêté par Givoni, nous pouvons confirmer l'existence d'un confort pendant les jours les plus chauds de la période estivale dans la typologie constructive d'origine. On constate aussi que l'orientation ouest est la plus défavorable pour la simple raison que cette façade ne présente pas de mitoyenneté et est de plus exposée à des radiations solaires directes.

Dans le plancher à vouîtains en brique et profilés métalliques IPE, la différence de température est de 6.5°C avec des fluctuations de températures intérieures. Ceci s'explique par le fait que l'espace qui est mitoyen à la mosquée, possède une porte ouverte et une ventilation par la cheminée. Alors que l'espace opposé restitue la chaleur des rayons solaires dû à son exposition, Cet espace est plus chaud. Cela est dû à la conductivité thermique des profilés métalliques qui est très importante. Cependant, nous avons noté, que le dépôt d'autres matériaux sur les IPE, tels que la chape de terre, la brique crue et la présence des murs massifs en pisé et pierre combinée à la ventilation naturelle, ont quand même contribué à abaisser la température.

Dans le cas de la typologie constructive avec plancher collaborant en vouîtains de brique+IPE avec une chape en béton armé, on remarque que la température baisse de 8°C. C'est donc la résistance et l'inertie thermique du béton qui ont permis d'améliorer le confort thermique de ces espaces.

La consolidation du plancher à voutains avec un plancher collaborant en béton a permis d'améliorer le confort. C'est l'inertie ainsi que la résistance thermique du béton qui a pu réduire les fluctuations de température au niveau des espaces. Il joue le rôle de stabilisateur de température, en amortissant cette la chaleur qu'il emmagasine pour la restituer avec un déphasage qui augmente avec la masse du matériau. La température baisse à 27°C, ce qui avoisine la zone de confort établie par Givoni.

On peut conclure que pour la journée la plus chaude de l'été, le profil de températures intérieures dans le cas du « plancher en rondins de bois », s'inscrit dans la zone de confort thermique, affichant un écart de température près de 9°C de moins que la température extérieure.

Pour le deuxième type, le plancher à voutains IPE, la différence entre l'extérieur et l'intérieur est de 6.5°C. Dans le troisième type, le plancher à voutains IPE collaborant avec la chape en béton armé, la différence de température devient 8°C. Il apparaît donc que le choix judicieux de matériau pour l'enveloppe de la construction a un très grand rôle pour avoir un intérieur où le confort thermique serait réalisé. Ajoutés à cela, d'autres facteurs sont à prendre en considération tels que la ventilation, l'orientation, les matériaux de constructions pour les murs, les planchers et les revêtements.

Le déphasage assuré avec les murs et les toitures permet de réduire les fluctuations de température pour un plancher en rondins de bois. C'est le couple inertie-ventilation nocturne des espaces qui permet d'évacuer la chaleur emmagasinée durant la journée, permettant d'avoir des espaces plus confortables la nuit.

Nos résultats ont montré que la ventilation de nuit est efficace dans l'amélioration des conditions de confort thermique intérieur pendant le jour, en purgeant la construction de l'air chaud.

On a révélé que les différentes températures extérieures et l'irradiation solaire ont une influence significative sur la température intérieure et sur la distribution des débits d'air. En outre, les résultats indiquent que, lorsque la température extérieure dépasse 30°C, la technique de ventilation naturelle peut être utilisée pour les espaces occupés pour atteindre le niveau thermique général de confort.

L'inertie facilite la limitation des surchauffes. Elle permet d'emmagasiner une partie de la chaleur excédentaire et de la restituer plus tard, elle est fortement dépendante de la ventilation nocturne pour limiter les surchauffes.

Le mode constructif traditionnel remplira les exigences de confort avec cette stratégie de grande inertie thermique des matériaux, combinée à une stratégie de ventilation.

Le tableau suivant résume les résultats de la simulation du confort thermique suivant la typologie constructive pour les différentes interventions effectuées dans la maison de L'Oukil à travers le temps.

Simulation	Température extérieure maximale	Température intérieure maximale	Température intérieure minimale	Différence de température intérieure et extérieure	Observation
1^{er} cas: Typologie d'une structure avec plancher en rondins de bois	Prise pour la journée la plus chaude de l'été, environ 35°C=308.15k	301.15k=28°C	299.15k=26°C	9°C	T°C Int < T°C Ext, cela est dû à la résistance thermique du bois, il résiste aux déperditions de chaleur 500 fois plus que l'acier et 7 fois plus que le béton. Son inertie thermique (3 fois plus grande que celle du béton), qui est importante couplée avec l'inertie thermique des autres matériaux a permis de réguler la température intérieure.
2^{ème} cas: Typologie d'une structure avec plancher en voûtains en brique+IPN	Prise pour la journée la plus chaude de l'été, environ 35°C=308.15k	304.15k=31°C	301.65k=28.5°C	6.5°C	T°C Int < T°C Ext, une faible diminution de température parce que la conductivité thermique des profilés métalliques est très élevée, et c'est le rôle des autres matériaux qui ont permis de diminuer la température.
3^{ème} cas: Typologie d'une structure avec plancher collaborant en voûtains de brique+IPN et une chape en béton armé	Prise pour la journée la plus chaude de l'été, environ 35°C=308.15k	302.15k=29°C	300.15k=27°C	8°C	T°C Int < T°C Ext, le nouveau plancher généralisé en béton collaborant avec celui à voûtains a contribué à abaisser plus la température encore plus par son inertie et sa résistance thermique plus élevée que celle des profilés.

Tableau 8: Tableau récapitulatif de comparaison et d'interprétation des résultats de la simulation.

Source :

5. Conclusion

Notre travail s'est principalement axé sur l'étude du confort thermique par une application sur la maison de l'Oukil. Terre, pisé, pierre, planchers en rondins et autres, typologie constructive ancestrale, ventilation,... ont pris part dans cette étude.

Tous ces facteurs ont donné des résultats très intéressants par la simulation.

Les résultats de la simulation numérique rejoignent ceux des travaux scientifiques précédant notre recherche. En effet, pour le confort thermique, nous constatons pour les périodes estivales, non seulement une forte stabilisation des températures ambiantes intérieures, mais également, une différence très significative de ces dernières avec une baisse de température qui avoisine les 9°C pour le premier cas, 6.5°C pour le deuxième cas et 8°C pour le troisième cas. Etant donné que les murs porteurs ont gardé leur authenticité lors des différentes restaurations, c'est la constitution des planchers qui a changé, la zone de confort thermique s'inscrit aussi bien dans le cas de planchers en rondins de bois, que dans celui à voutains en IPE et brique ou encore dans le plancher collaborant.

Nous soulignons cependant la stabilité du profil de températures intérieures dans nos graphiques dans le cas de la technique traditionnelle avec murs hétérogènes et plancher à rondins de bois. Ceci démontre bien le rôle que joue le facteur inertie thermique des matériaux originaux utilisés.

De ce fait, en réponse à notre question de départ, nous confirmons notre hypothèse et nous pouvons conclure que le respect de la nature des matériaux et techniques constructives d'origine lors des travaux de restauration, permet de garantir l'authenticité de la construction, sa durabilité, ainsi que le confort qu'elle attribue.

Conclusion générale

1. Synthèse globale

Raffiner notre recherche concernant la technicité, le confort et la durabilité de notre patrimoine architectural revient à poser une série de questionnements relatifs aux concepts des techniques et matériaux constructifs locaux, de confort, à savoir les paramètres du confort thermique pour parvenir à la durabilité et à la pérennité de ce patrimoine.

Afin de répondre à l'hypothèse de départ, trois registres de réflexion et d'analyse ont été retenus :

Le premier registre concerne le support théorique des différents concepts qui s'attachent à notre étude dans les deux premiers chapitres, cela nous a guidé à mieux conceptualiser les notions relatives au confort et durabilité du patrimoine architectural en terre.

L'architecture de terre est très ancienne, Aujourd'hui 17% des sites partiellement ou totalement bâtis en terre crue composent la liste de l'héritage mondial de l'UNESCO.

Ce patrimoine architectural témoigne d'un savoir-faire technique et artistique d'une structure vernaculaire traditionnelle encore vivace et debout relatant le passé glorieux. L'intérêt que recèle cette architecture se présente à travers les faibles coûts de réalisation, son insertion dans le concept de développement durable en pensant aux solutions moins nuisibles à l'environnement, elle s'associe bien avec d'autres matériaux eux aussi naturels et peu gourmands en énergie. Un autre avantage sur le bien être se trouve dans les murs en terre qui régulent l'hygrométrie de l'air intérieur à la condition bien sûr de proscrire tout épiderme étanche.

A travers notre recherche, il nous est parvenu que ces constructions sont vulnérables à l'eau, et présentent certaines pathologies structurelles, Un bon diagnostic sur l'environnement du bâtiment, sur l'évolution de ses matériaux, structures et systèmes construits, peut offrir des réalisations et interventions à l'abri de ces pathologies qui garantissent la durabilité des œuvres.

La qualité fondamentale que recèle ce patrimoine architectural est le confort, lié à la sensation de bien-être à l'intérieur des structures vernaculaires, en s'adaptant au milieu et au mode de vie d'une société conservatrice. Tout cela s'inscrit dans une démarche bioclimatique.

Quand au confort thermique, il est influencé par les composantes environnementales, telles que la température, le degré d'humidité et la ventilation de l'air. Il dépend aussi des transferts thermiques à travers les parois de l'enveloppe, issus de l'extérieur vers l'intérieur. La résistance thermique des matériaux de constructions traditionnels, vu leurs capacité d'accumuler la chaleur et de la restituer, avec un déphasage dépendant de la paroi de stockage, et leur grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit.

L'analyse des bâtiments vernaculaires à grande inertie thermique démontre que cette typologie s'adapte à son environnement, détient sa durabilité ainsi que la sensation de confort, ceci par la technicité des matériaux qu'ils ont façonnés, par les dispositifs architecturaux qui apportent une ventilation naturelle.

Le deuxième registre s'intéresse à la technicité des matériaux locaux d'une typologie constructive à patio, en présentant leur mise en œuvre, leurs propriétés, leurs pathologies et les mesures à prendre pour les conserver et les restaurer.

La reconnaissance, du bâti traditionnel édifié partiellement en pisé, contribue à l'identification des autres matériaux associés composant les murs, planchers, revêtements et couvertures, qui doivent être compatibles pour préserver à la fois l'intégrité physique de la structure et son harmonie esthétique.

Le troisième registre a trait à l'analyse de notre cas d'étude à savoir la maison de L'Oukil du sanctuaire de Sidi Boumédiène.

Notre recherche a commencé par une présentation climatique du site qui a fait place ensuite à une analyse spatiale et formelle du sanctuaire pour cerner la maison de L'Oukil en mettant la lumière sur l'organisation et la typologie de la maison, ses composantes spatiales, les matériaux utilisés et les interventions effectuées sur la maison.

Le patrimoine architectural de la maison de L'Oukil, bâti avec des matériaux traditionnels, ne se résume pas seulement à une typologie de maison à patio, mais une étude profonde montre que ce lieu est un lieu de confort et d'une qualité de vie appréciable. L'enjeu était donc d'assurer un confort thermique par l'utilisation des matériaux locaux, en garantissant la qualité de l'air intérieur par une ventilation efficace. C'est par ce biais, que l'approche bioclimatique rentre dans ce contexte en cherchant à fournir des espaces plus appropriés aux besoins des occupants et plus respectueux de l'environnement.

Le confort thermique, pour ce patrimoine, se résume à travers les techniques et propriétés des matériaux de construction, à savoir l'inertie thermique, la résistance thermique, la conductivité thermique..., à travers une typologie centrée autour du patio, jouant le rôle de puits d'air et de lumière, en une ventilation continue à travers les petites ouvertures assurant des températures douces et une bonne qualité de l'air.

Pour confirmer nos hypothèses de départ, une simulation du confort, sous le logiciel Fluent est appliquée au cas d'étude. Concernant le confort thermique, nous avons constaté qu'il dépendait de plusieurs paramètres: le plus important est celui du choix des matériaux de construction, viennent ensuite l'orientation des espaces et leur position dans la maison.

Le confort thermique constitue actuellement un enjeu majeur dans le secteur du bâtiment tant pour la qualité des espaces intérieurs que pour les impacts énergétiques et environnementaux dont il est responsable.

Les résultats montrent que le choix de l'enveloppe du bâtiment, à savoir le type de plancher et de murs a une incidence notable sur le confort thermique. Elle est considérée comme étant l'élément principal de la régulation thermique des échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur.

Le comportement thermique de ces surfaces, vis à vis de la radiation solaire et de la température joue un rôle très important dans la détermination des conditions de confort dans les espaces intérieurs.

La prise en compte des parois de l'enveloppe et le choix des matériaux a conditionné la qualité du confort thermique à l'intérieur de la maison.

Par ailleurs, dans notre cas, les paramètres sur lesquels, nous pouvons améliorer les conditions de confort sont l'inertie du bâtiment et la ventilation naturelle.

Donc, afin d'éviter la surchauffe à l'intérieur de la construction, il est très important d'avoir suffisamment d'inertie pour stocker le surplus de chaleur accumulée en journée. Tandis que la nuit, lorsque les températures extérieures sont plus faibles, il est nécessaire de ventiler les espaces pour évacuer la chaleur restituée par les murs et planchers tout au long de la nuit.

Finalement, la technicité des matériaux locaux et traditionnels présentant une forte inertie, et de haute performance thermique ont été pris en charge dans la conception initiale de la maison et ont contribué au confort.

2. Limites du travail

Tout travail de recherche présente des limites et des insuffisances, ces dernières sont dues aux contraintes rencontrées, citons parmi eux :

- Le manque de documentation scientifique sur les techniques constructives traditionnelles en terre de la ville de Tlemcen : un domaine qui demeure vierge dans un site riche de son patrimoine architectural en terre.
- La complexité du logiciel Gambit et Fluent pour une durée courte dans un travail de recherche. La diversité des paramètres influençant le confort thermique.
- Une analyse plus approfondie sur la stratification des différents matériaux qui constituent la maison de l'Oukil avec le relevé du détail depuis sa construction à ce jour, est complémentaire pour approfondir la recherche.

3. Perspectives de recherche

Notre recherche sur la maison de l'Oukil abordé dans ce mémoire n'est qu'un début d'une démarche plus vaste. L'approfondissement de cette recherche se consacrera vers d'autres paramètres à explorer, parmi eux :

- La revalorisation de l'architecture de terre: comme l'une des voies les plus prometteuses d'un avenir meilleur, vu les avantages qu'elle offre, et des sites et monuments qu'elle englobe.
- Le retracement de l'origine et du parcours des techniques constructives traditionnelles, tournées vers la reconnaissance des différents procédés et des arts de bâtir.

L'établissement, d'un inventaire de tous les matériaux constituant notre patrimoine architectural en terre de notre pays passant par les différentes configurations existantes jusqu'à l'analyse au laboratoire des différents constituants, si nécessaire. La détection de toutes les pathologies dont souffre ce patrimoine sera suivie par une intervention ciblée à chaque cas de figure. Il serait aujourd'hui indispensable de s'intéresser à cette thématique, dans la perspective de préserver ce patrimoine comme le rappelle un architecte restaurateur *« nous sommes condamnés à réhabiliter la pierre et le pisé qui offrent plus de confort, qui sont à nos repères identitaires en matière d'architecture »*¹.

- La prise en charge de tous les paramètres de confort dans la simulation et introduire le facteur du métabolisme humain qui dépend du type d'activité entreprise par l'individu.
- Une évaluation du confort de notre patrimoine architectural dans toutes ses dimensions, à savoir le confort acoustique et visuel.

¹ OUAGUENNI Y, « on se doit réhabiliter la pierre e le pisé », El Wtatan, 26 Avril 2009.

Bibliographie

Ouvrages généraux :

1. ABBADIE Louis, Tlemcen au passé retrouvé, Ed Jaques Candini, Nice, 1994.
2. BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan, Archi de soleil, Ed Parenthèses, 1978.
3. BARDOU Patrick, ARZOUMANIAN Varoujan, Archi terre, Ed Parenthèses, 1978.
4. BARRUCAND Marianne, BEDNORZ Achim, Architecture maure en Andalousie, Ed Taschen, 2002.
5. BOURUIBA Rachid, L'art religieux musulman en Algérie, Ed société nationale d'édition et de diffusion, Alger, 1981.
6. CABIROL Thierry, FAURE Daniel, ROUX Daniel, chauffage de l'habitat et énergie solaire, tome1: Confort thermique et techniques de chauffage, Ed Edisud, 1982.
7. Chaire Unesco-consortium Terra, Enseigner l'architecture de terre dans le monde bilan et perspectives, Ed. CRATerre-EAG, Grenoble, 2001.
8. CHARTON Edouard, le tour du monde, Tlemcen, Nouveau journal des voyages, Textes et dessins inédits, 1875.
9. CHOAY Françoise, L'allégorie du patrimoine, Éd du Seuil, Paris, 1992.
10. CNERIB, Conception de logements économiques à base de produits localement disponibles, Ed CNERIB, 2000.
11. COIGNET Jean, Réhabilitation : arts de bâtir traditionnel connaissances e techniques, Aix-en-Provence, Ed Edisud, 1987.
12. COINTREAUX François, L'école d'architecture rurale, ou Leçons; second cahier, Paris, 1791.
13. COSTA Anibal, GUEDES João Miranda, VARUM Humberto, Structural Rehabilitation of Old Buildings, Building Pathology and Rehabilitation, Ed Springer Berlin, 2014.
14. CRATerre, DOAT Patrice, Construire en terre, Ed Alternative et parallèles, Paris, 1985.
15. CRATerre-EAG, Enseigner l'architecture de terre dans le monde, Ed CRATerre-EAG, Grenoble, 2001.
16. CRATerre, Marrakech 87 Habitat en terre, Ed. CRATerre, Grenoble, 1987.
17. DE BRANDOIS Patrice, BABICS Florence, manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, Ed Ministère de la Culture et de la Communication, Direction de l'Architecture et du Patrimoine, France, 2006.
18. DETHIER Jean, Des architectures de terre, l'avenir d'une tradition millénaire, Ed Centre Georges Pompidou, Lyon, 1982.
19. DETHIER Jean, Architectures de terre, Atouts et enjeux d'une tradition millénaire de construction méconnu : Europe, tiers monde, états unis, Ed centre Georges Pompidou, Paris, 1986.

20. DOAT Patrice, HAYS Alain, HOUBEN Hugo, MATUK Silvia, VITOUX François, Construire en terre, CRATerre, Grenoble, 1979.
21. DUBOST Olga, Environnement et ville durable, les matériaux, Éd Weka, Octobre 2011.
22. EASTON David, WRIGHT Cynthia, The rammed earth house, Ed Chelsea Green Publishing, USA, 2007.
23. FATHY Hassan, Construire avec le peuple, Ed. Sindbad, Paris, 1970, p 229.
24. FEDALA Djafer, Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent- applications, Laboratoire d'énergétique et de mécanique des fluides interne, Ed Arts et métiers Paris Tech, Paris.
25. FERNANDEZ Pierre, LAVIGNE Pierre, Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements et méthodes, Ed Le moniteur, Paris, 2009.
26. FONTAINE Laetitia, ANGER Romain, Bâtir en terre, Ed Belin, 2009.
27. GANDEMER Jaques, GUYOT Alain, intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Ed Ministère de l'équipement, Direction de l'aménagement foncier et de l'urbanisme, 1976.
28. GIVONI Baruch, l'homme, l'architecture et le climat, Ed Parenthèses, 1986.
29. GRANDET Denis, architecture et urbanisme islamique, Ed OPU, Alger, 1988.
30. HOUBEN Hugo, GUILLAUD Hubert, Traité de construction en terre, Ed Parenthèses, Marseille, 1989.
31. IBN KHALDOUN, Les prolégomènes, T2, traduit en français par Mac Guckin De Slane, édition numérique.
32. IBN KHALDOUN, introduction à l'histoire des berbères, le Baron de Slane.
33. IZARD Jean Louis, GUYOT Alain, Archi bio, Ed Parenthèses, 1979.
34. LAVIGNE Pierre, Architecture climatique : une contribution au développement durable, Ed Edisud, Aix-en-Provence, France, 1994.
35. LAWLESS Richard, GERALD Blake, Tlemcen, continuity and change in an Algerian Islamic town, London, 1976.
36. LECOCQ André, histoire de Tlemcen, ville française, tome I : l'administration militaire, 1842-1852, Ed internationales S.S, Tanger.
37. LIEBARD Alain, DE HERDE André, Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatique : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Ed Obser'er, Paris, 2005.
38. LITTLE Becky, MORTON Tom, Building with earth in Scotland, Ed. CRU, Edinburgh, 2001.
39. MARÇAIS William et Georges, Les monuments arabes de Tlemcen, Ed Albert Fontemoing, 1903.
40. MARÇAIS Georges, l'architecture musulmane de l'occident, Ed arts et métiers graphiques, Paris, 1954.

41. MARÇAIS Georges, Tlemcen : Les villes d'art célèbres, Ed H.Laurens, Paris, 1950.
42. MAUNIER René, La construction collective de la maison Kabyle, Ed Institut d'ethnologie. Paris, 1926.
43. MEDA Corpus, Architecture traditionnelle méditerranéenne, Ed Col.legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, Espagne.
44. MINKE Gernot, Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture, Ed Birkhauser, Berlin, 2006.
45. MORISET Sébastien, Conservation et réduction des risques à Ardakan, éd CRAterre, 2010.
46. NOBERG-SCHULZ Christian: Genius Loci- Paysage- Ambiance- Architecture, Ed. Pierre Mardaga, Paris, 1981.
47. ODUL Pascal, Des architectures de terre en Algérie, projet earth construction technologies appropriate to developing countries, Belgique, 1983.
48. OULEBSIR Nadir, Les usages du patrimoine, monuments, musées et politique coloniale en Algérie (1830-1930), Ed. Maison des sciences de l'homme, 2004.
49. OLIVIER M, Évolution des recherches effectuées au CNERIB sur la construction en terre (rapport de mission), CNERIB, Alger, 1988.
50. PIGNAL Bruno, Terre crue : Techniques de construction et de restauration, Ed. Eyrolles, 2005.
51. RAPOPORT Amos, Pour une anthropologie de la maison, Ed Dunod, Paris, 1972.
52. RAVEREAU André, La casbah d'Alger, et le site créa la ville, Ed Sindbad, 1989.
53. REAL Ronald, Earth architecture, Ed Princeton Architectural Press, 2008.
54. ROUILLARD Pierre, GAILLEDROT Eric, SALA SELLES Féliciana, L'établissement protohistorique de La Fonteta (fin VIIIe-fin VIe siècle av J.-C), Vol2, Ed Casa de Velazquez, Madrid, 2007.
55. Tlemcen, Collection Arts et culture, Ed Ministère de l'Information, Espagne, 1974.
56. ZERHOUNI Selma, GUILLAUD Hubert, MOUYAL Elie, L'architecture de terre au Maroc, Ed ACR Edition, Paris, 2001.

Articles et Revues :

1. ANSYS inc. «ANSYS FLUENT Tutorial Guide», Published in U.S.A, 2011.
2. BAUDREU Dominique, DE CHAZELLES Claire-Anne, GUYONNET François, « Maisons médiévales du sud de la France bâties en terre massive: état de la question », in M.S.A.M.F, 2008.
3. BAZZANA André, HUBERT Etienne, « Matériaux et techniques de construction, quelques réflexions à propos de l'habitat villageois dans Al andalus, in Castrum », Volume 6, Ed Casa De Velazquez, 2000.

4. BEGHAIN Patrice, « Le patrimoine : culture et lien social », Collection Presses de Science Politique, Bibliothèque de la Conservation du Patrimoine de la Savoie, Chambéry.
5. BLANC R, « la commune de Tlemcen extra-muros », in B.S.A.U.T, 1956.
6. BROSSELDARD Charles, « les inscriptions Arabes de Tlemcen », Revue africaine : n°18.
7. COCH Helena, « Bioclimatism in Vernacular architecture, Architecture: comfort, energy», Renewable and Sustainable Energy Reviews 2, Pergamon, UK, 1998.
8. Construire avec des matériaux naturels, « les recommandations de conception architecturale en terre », Ed. Techniques de l'Ingénieur, 2013.
9. DE CHAZELLES Claire-Anne, GUYONNET François, «La construction en pisé du Languedoc-Roussillon et de la Provence, du Moyen- âge à l'époque moderne (XIII e- XIX e s)», in Echanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue 2, La construction en terre massive : pisé et bauge, Ed L'Esprou, Monpeulier, 2005.
10. Energie +, version 7, « Architecture et climat », Université catholique de Louvain(Belgique) 2012, réalisé avec le soutien de la Wallonie –DGO4- Département de l'énergie et du bâtiment durable.
11. GRACIANI GARCIA Amparo, TABALES RODRIGUEZ Miguel Ángel, « El tapial en el àrea sevillana. Avance cronotipològico estructural », in Arqueologia de la arquitectura 5, Madrid, 2008.
12. GUILLAUD Hubert, ALVA Alejandro A, «Historical earth architecture and construction in the Mediterranean region what future for such an exceptional cultural legacy? », in Proceedings of the First International Congress on Construction History, 2003.
13. HAUGLUSTAINE Jean-Marie, SIMON Francy, « La conception globale de l'enveloppe et l'énergie, guide pratique pour les architectes », février 2006.
14. JAQUIN P.A, AUGARDE C.E, GERRARD C.M. , «Historic rammed earth structures in Spain, construction techniques and a preliminary classification», in International Symposium on Earthen Structures, Bangalone, 2007.
15. LAWLESS Richard, « Tlemcen capitale du Maghreb central, analyse des fonctions d'une ville islamique médiévale », in revue de l'occident musulman et de la méditerranée, n° 1, 1975.
16. LELEVRE Pierre, « Retour d'expérience Le Domaine de la terre », in Ecologik n°12, 2010.
17. MILETO Camilla, « L'analyse stratigraphique de l'architecture et son application à l'architecture traditionnelle, in Méthode REHABIMED, » II. Réhabilitation bâtiments, ed Collegi d'Apaièfladors i Arquitectes Tècnis de Barcelona, 2007
18. MOLENAT Jean Pierre, PASSINI Jean, « L'emploi de la terre dans la construction en nouvelle castille à la fin du moyen âge », in L'architecture de terre en méditerranée, Rabat, 1999.
19. OLGAY Victor, “Design with Climate- A Bioclimatic, Approach to Architectural Regionalism”, Princeton University Press, USA, 1963.

20. OUAGUENNI Y, « on se doit réhabiliter la pierre e le pisé », El Wtatan, 26 Avril 2009.
21. PETONNET Colette, « Espace, distance et dimension dans une société musulmane ». In: L'Homme, 1972, tome 12n°2.
22. SAFARZADEH H et BAHADORI M.N, «Passive cooling effects of courtyards», Elsevier, 2004.
23. SAUVAGE Martin, « Les débuts de l'architecture de terre au Proche Orient », in MEDITERRA 2009, Proceedings, Edicom Edizione, Monfalcone, Italie.
24. SCUDO Gianni, « Climatic design in the Arab courtyard houses Environmental Design», Journal of the Islamic Environmental Centre, 1988.
25. TERKI Yasmine, « terres d'Afrique et d'ailleurs », Dans l'exposition dédiée aux architectures de terre dans le monde auteur et commissaire de l'exposition, Ministère de la culture, 2eme festival culturel panafricain d'Alger, 2009.
26. ZEROUALA Mohammed Salah, « L'enseignement de l'architecture en Algérie », in Construire n°37, Alger, 1990.

Publications et séminaires:

1. CARTIN R, MOUJALLED B, GUARRACINO G, complexité du confort thermique dans les bâtiments, 6ème congrès Européen de Science des Systèmes Paris, 19-20 septembre 2005.
2. CORREIA M, Técnicas portuguesas de construção em terra:a taipa alentejana, in Seminario Ibero-Americano de Construção com terra, Madrid, 2003.
3. EALIWA M.A, TAKI A.H, HOWARTH A.T, SEDEN M.R, An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames, Libya, publication Building and Environment, Elsevier Science, 1999.
4. EL-WAKIL Leila, Hassan Fathy dans son temps, publication dans Hassan Fathy, une ambition égyptienne, 2012.
5. JEANNET Jacky, PIGNAL Bruno, SCARATO Pascal, bâtir en pisé technique conception réalisation, publication de « pisé, terre d'avenir », 2002.
6. MANSOURI Yasmine, ALLARD Francis, MUSY Marjorie, Conceptual implementation of ventilation strategy, 18th International IBPSA Conférence, Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003.
7. Ministère de l'habitat (Maroc), Actes du séminaire sur la construction en matériaux locaux, avril 1986.
8. MORISET Sébastien, MISSE Arnaud, rénover et construire en pisé, Parc naturel régional L Forez, 2010.

9. NOHA Said, la notion de confort thermique : entre modernisme et contemporain, cours en ligne, Grenoble : ENSA, publication ENSAG, Cours, 2010.
10. Tlemcen et sa région- livret-guide publié par le syndicat d'initiative de Tlemcen 1921.

Thèses :

1. ALLICHE Samira, La formalisation comme outil d'un procédé constructif ; Le tabiya (pisé) de Cherchel, mémoire de magister en architecture, Epau, Alger, 2012.
2. BOUTABA Samir, confort thermique entre mesure et perception, mémoire de magister en Architecture, Biskra, département d'architecture, université de Biskra, 2007.
3. DOUMIT LM, la valorisation du patrimoine endokarstique libanais, Thèse de Doctorat de Géographie Option Aménagement Touristique et Culturel, 2007.
4. GUESTAL Mabrouk, Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi chauffée partiellement, thèse de magister, Université de Mentouri Constantine, 2010.
5. JLOK Mustapha, Habitat et patrimoine au Maroc Présaharien, mémoire de fin d'étude Professionnelles approfondies, 1999-2001, Egypte.
6. KEBAILI Nourreddine, l'architecture de terre contemporaine en Algérie ; évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la region centre des hauts plateaux, mémoire de magister en architecture, Epau, Alger, 2006.
7. KESSAB Nasreddine, préservation des sites et monuments historiques le sanctuaire de Sidi Boumediene: une architecture, une politique à relever, thèse de magister, EPAU, 1997, p44.
8. KHALEF Naima, Etude de patrimoine architectural de la période ottomane : entre valeurs et confort, thèse de magister, université de Tiziouzou, 2012.
9. MAZARI Mohammed, thèse de magister : étude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public , université de Tizi Ouzou, 2012.
10. OULD-HENNNIA Amina, choix climatiques et construction, zones arides et semi-arides, la maison à cour à Boussaâda, thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 2003.
11. TALEB BENDIAB Nawal, Les techniques de restauration du patrimoine bâti, mémoire de magister, USTO, p42, 2007.

Rapports et documents officiels :

1. ANAT. POS de la médina de Tlemcen, 2001.
2. BET Arcade, rapport sur la restauration du fort de Santa Cruz, Oran, 2007.
3. B.E.T :A.T.A.R, Phase I : Relevé, rapport écrit : Décembre 1997.

4. B.E.T :A.T.A.R, Phase II : Analyse et diagnostic, rapport écrit : Décembre 1997.
5. Décret exécutif n° 03-324 du 9 Chaâbane 1424 correspondant au 5 octobre 2003 portant modalités d'établissement du plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur des secteurs sauvegardés.
6. Sabri M, Lalle M Guide de gestion des marchés publics, Ed Sahel, Alger, 2000.

Cours universitaires :

1. BELAKHEL Azeddine, Confort et maîtrise des ambiances, Département d'architecture de Biskra 2 année, cours, 2012.
2. HAMEL Khalissa, confort thermique, Département d'architecture de Biskra, Master I : Architecture et environnement, Sciences pour l'architecture, cours2, 2013.
3. MAZOUZ Said, confort thermique, département d'architecture de l'université de Biskra, 1 année post-graduation.
4. NOHA Said, la notion de confort thermique : entre modernisme et contemporain, cours en ligne, Grenoble : ENSA, publication ENSAG, Cours, 2010.

Dictionnaires:

1. Dictionnaire historique de la langue française, *Le Robert* .Paris : Alain Rey, 1993.
2. Petit Larousse illustré, Dictionnaire de français, Larousse-Bordas, 1997.

Sites Internet:

1. <http://www.meda-corpus.net>
2. [http:// www.sndl.cerist.dz](http://www.sndl.cerist.dz)
3. <http://www.cnerib.edu.dz>
4. <http://www.craterre.org>.
5. <http://www.pise-livradois-forez.org>
6. Site officiel de la météo Algérie : <http://www.wofrance.fr/weather/maps/city>
7. <http://www.maison.com/architecture/maison-basse-consommation/bibliotheque-materiaux-construction/>.