

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MENTOURI :CONSTANTINE

FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE DE GEOGRAPHIE
ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MAGISTERE

OPTION ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

PROPOSEE PAR : M^{ER} ZEROUAL DAOUD

SOUS LA DIRECTION DE : M^{ME} BOURBIA.F.MAITRE DE CONFERENCE

IMPACT DES GAINS DE CHALEUR SUR LA
MORPHOLOGIE DES BATIMENTS
CAS DES CLIMATS CHAUDS ET ARIDES

Jury d'examen:

President :M^{em} ABDOU .S . Maître de conférence université de Constantine.

Encadreur: M^{em} BOURBIA .F. Maître de conférence université de Constantine.

Examinateur :M^{er} FOURA . M^{ed}. Maître de conférence université de Constantine.

Examinateur :M^{em} BOUCHAHM .Y.Maître de conférence université de Constantine.

juin 2006

REMERCIEMENTS

Je tien a exprimer ici mes vives remerciements et toute ma gratitude envers ma directrice de mémoire le docteur BOURBIA.F pour ses orientations, son aide, et ses encouragements.

Comme je tien a remercier vivement aussi le docteur M^{EM} ABDOU. S et le docteur M^{ER} BOUCHAHM de m'apporter conseils, aide et encouragements.

J'exprime toute ma reconnaissance envers M^{ER}BELGAID de l'institut d'architecture de BATNA M^{er} GHOMRI, M^{em} KORICHI, M^{em} HAMOU, M^{em} SIFEDDINE, M^{elle} MERDACI.F.

Je tien aussi a exprimer mes plus vifs remerciements envers ceux qui ont participer a l'élaboration de ce travail sons oublier les documentalistes et bibliothécaires de l'université de Constantine, Biskra, et de L'EPAU D'Alger.

ZEROUAL DAOUD

DEDICACE

« AND MAY BE GOD DANY YOU PEASE BUT YOU WIL
GIVE GLORY»

A la mémoire de mon père dans sa tombe

A ma mère le femme qui a illuminée mon parcours

A ma sœur Farida

A mes chers amis, mes collègues et tous les membres de ma
famille.

A mes enseignant de la post graduation et a l'équipe de la
bioclimatique de l'institut d'architecture de Constantine.

A mes enseignant de l'inter graduation de l'institut de Biskra

A toutes et a tous je Didier ce modeste travail

ZEROUAL DAOUD

RESUME

L'intégration de la composante énergétique dans le processus de la conception architecturale est un objectif qui tend à l'amélioration du confort thermique, la minimisation de l'impact sur l'environnement par l'utilisation des procédés passifs et aussi le développement d'une architecture qui peut se situer géographiquement.

Dans notre champ d'investigation, on constate que dans les régions à climat chaud et aride, le problème du confort thermique s'impose comme un facteur principal à prendre en considération l'ors de la conception des bâtiments.

La présente recherche a pour objectif l'étude de l'influence des gains de chaleur (température de l'air extérieur et la radiation solaire) sur la forme des bâtiments dans ces climats, dont le but est la détermination des caractéristiques physiques et géométriques des formes performantes vis avis des besoins climatiques de ces régions.

A travers un support théorique, l'analyse typo-morphologique et l'expérimentation effectuée par l'étude de variations du facteur de forme on a pu déterminer l'influence de la géométrie, du volume et des dimensions sur la performance thermique des bâtiments et le confort thermique en conséquent.

Mots clés :

Chaud et aride, confort thermique, procédés passifs, forme des bâtiments, performance thermique, géométrie, facteur de forme.

Summary

The integration of the energy component in the process of the architectural design is an objective which tends to the improvement of thermal comfort, the minimization of the environmental impact by the use of the passive processes and also the development of an architecture which can be geographically.

In our field of investigation, we notes that in the areas which has hot and arid climate, the problem of thermal comfort asserts oneself like a principal factor to take into account during the design of the buildings.

Present research with for objective the study of the influence of the profits of heat (temperature of the surrounding air and solar radiation) on the shape of the buildings in these climates, of which the goal is the determination of the characteristics physical and geometrical of the performant forms adapted to the climatic needs for these areas.

Through a theoretical support, the typo-morphological analysis and the experimentation carried out by the study of variations of the factor of form we could determine the influence of the geometry, volume and dimensions on the thermal performance of the buildings and thermal comfort into consequent.

key words:

Hot and arid, thermal comfort, passive processes, shape of building, thermal performance, geometry, factor of form.

ملخص

إن إدماج عامل الطاقة في منهج التصميم المعماري هدف يسمو إلى تحسين الرفاهية الحرارية، التقليل من التأثير على المحيط باستعمال الوسائل الطبيعية وكذلك تطوير عمارة يمكن توقيتها جغرافيا.

إن المناطق ذات المناخ الحار والجاف تطرح إشكالية الرفاهية الحرارية كعامل رئيسي يجب أخذه بعين الاعتبار في التصميم المعماري.

ترمي هذه الدراسة إلى البحث عن تأثير انتقال الحرارة (الحرارة الخارجية وأشعة الشمس) على شكل العمارات في هذه المناخات، بهدف تحديد الخصائص الفيزيائية والهندسية للأشكال الفعالة بالنظر للحاجيات المناخية لهذه المناطق.

مكنت الدراسة بالاعتماد على الجانب النظري، التحليل التيومورفلوجي والتطبيقي المنجز عن طريق دراسة تغيرات معامل الشكل من تحديد تأثير الهندسة، الحجم والأبعاد على الفاعلية الحرارية.

الكلمات المفتاح:

الحار والجاف، الرفاهية الحرارية، الوسائل الطبيعية، شكل العمارات، الفاعلية الحرارية، الهندسة، معامل الشكل.

"La conception architecturale bioclimatique s'inscrit dans la problématique contemporaine liée à l'aménagement harmonieux du territoire et à la préservation du milieu naturel. Cette démarche, partie prenante du développement durable, optimise le confort des habitants, réduit les risques pour leur santé et minimise l'impact du bâti sur l'environnement."

[Alain Liébard et André De Herde ; 2003]

INTRODUCTION :

Des son apparition sur terre, l'homme a essayé de s'adapter au climat (ce protéger ou en profiter) pour améliorer son confort et économiser l'énergie dans son habitation. Aujourd'hui, nous sommes à l'aube d'une révolution architecturale. **Comment construire en harmonie avec la nature ?** De même que les architectes du début du 20ème siècle ont révolutionné l'architecture en fonction des possibilités qu'offrait l'époque industrielle, nous devons ouvrir les voies d'une architecture environnementale par une approche à la fois conceptuelle, écologique et esthétique. » [James Wines, Marc Vaye & Michèle turbin ; 1979].

L'architecture bioclimatique se base sur les architectures traditionnelles, mais aussi sur de nouvelles technologies. Elle prend en compte les facteurs climatiques pour la construction du bâtiment et également la notion d'économie d'énergie. C'est une architecture consciente. Elle est tout d'abord consciente des besoins des êtres vivants qui l'habitent, au niveau de la santé (soigner l'air intérieur des locaux), de la psychologie de l'espace (les formes et les couleurs), du confort thermique (conception bioclimatique) et du confort acoustique. Elle est aussi consciente des problèmes d'environnement en général, par le choix des formes et des matériaux, L'architecture bioclimatique est enfin consciente des sociétés humaines et des cultures auxquelles elle est liée. **Elle préconise de savoir lire et respecter les formes et typologies architecturales anciennes.** Avec l'architecture écologique, il s'agit de retrouver la sagesse naturelle qui permet de réaliser des constructions en harmonie avec le climat.

Redécouverte au début des années 70, l'architecture bioclimatique recherche une synthèse harmonieuse entre la destination du bâtiment, le confort de l'occupant et le respect de l'environnement, en faisant largement appel aux procédés passifs qui permet de réduire les besoins énergétiques et de créer un climat de bien être dans les locaux avec des températures agréables, une humidité contrôlée et un éclairage naturel abondant.

Aujourd'hui, le terme " bioclimatique " est de plus en plus utilisé. Mais ; le climat nous affecte toujours. Tour à tour complice ou ennemi, il reste présent dans notre quotidien et parfois bien plus que nous le pensons.

Dans les régions chaudes et arides, le climat est un des facteurs déterminants pour la survie des populations : sa prise en compte est nécessaire à toute activité humaine, indispensable à la satisfaction des besoins quotidiens et également pour assurer un minimum de développement économique et social.

Face aux particularités de chaque habitat, des exigences et des priorités personnelles, il existe une multiplicité de réponses. Chaque construction prend en compte les possibilités et les contraintes en jeu. Le principal souci des bâtisseurs est d'obtenir les meilleures performances énergétiques au moindre coût; il s'agit pour eux-mêmes d'allier l'architecture aux potentialités du climat extérieur.

« Dans la conception on cherche les conditions de la transcription de l'œuvre dans son contexte » [robert Prost ; 1956]

Le tout premier objectif est de mettre en évidence le rôle du facteur climatique, et le soleil en particulier, dans la détermination de la forme des bâtiments, la nécessité d'intégrer celui-ci en amont de la conception du projet. La prise en compte du climat en amont peut nous assurer l'amélioration des conditions du confort à l'intérieur de l'espace habitable, la minimisation de l'impact sur l'environnement avec la possibilité d'économiser dans la consommation des énergies fossiles. Dans le cadre de ses actions en faveur de l'architecture et de la maîtrise de l'énergie, notre recherche pourra servir de jalon à la détermination des caractéristiques morphologique propres aux régions d'étude.

Le principe de l'enveloppe compacte, qui fournit un confort intérieur indépendamment des conditions climatiques, est en quelque sorte un mur ou une toiture qui neutralise les perturbations extérieures, tout en favorisant les économies d'énergie. Pour aboutir à ces fins, il faut vérifier avant tout que la forme est bien choisie, selon les besoins thermiques recherchés dans le cadre de l'analyse climatique et bioclimatique. Les procédés de la façade double peau, le toit parasol, le refroidissement passif, les capteurs avant, la protection solaire...etc., le bioclimatique, sont autant de moyens de parvenir à optimiser l' "habitation", afin qu'elle réponde aux besoins des usagers, sans consommer plus d'énergie.

Notre étude s'intéresse à l'enrichissement des travaux ayant trait à la performance thermique relative à la consommation de l'énergie dans le secteur du bâtiment, et La promotion de la recherche dans le domaine de l'efficacité énergétique. La réflexion a porté jusqu'à présent sur la forme des bâtiments dans les régions à climat chaud et aride.

PROBLEMATIQUE

« L'architecture avant d'être un phénomène expliqué, c'est un phénomène explicatif » Francastel

INTRODUCTION AU PROBLEME

La crise énergétique et l'optimisation des ressources naturelles ont mené les architectes à la recherche de nouvelles formes qui seront largement définies par l'interaction des facteurs présents dans la nature, le plus important entre eux, c'est le climat [1].

Pour cela, une bonne conception prendrait en considération la sélection d'une enveloppe (forme) adaptée aux conditions climatiques de la région et servir de précaution qui mettrait en évidence le rapport entre la forme des constructions et le climat qui est défini par un ensemble de paramètres (soleil, vent, pluie, l'humidité...etc.), ces derniers devant être manipulés pour l'équilibre thermique et la création d'un environnement qui répond aux besoins physiologiques de l'homme

Il a été remarqué que l'intensité de la radiation solaire est l'un des éléments les plus importants qui participent à la détermination des formes des bâtiments dans les climats chauds et arides.

Une simple visite à l'une de ces régions peut nous démontrer l'effet gênant qu'exercent les rayons solaires sur le bien-être des habitants. Cependant, de l'igloo à la maison saharienne à patio, l'homme traditionnel a toujours essayé de se protéger contre cette gêne de surchauffe estivale, en développant son habitation, en relation avec les facteurs environnementaux, et le soleil en particulier, par la recherche de l'ombre, ainsi que la minimisation des surfaces exposées [2].

.....
[1] CUPTA.V: "building clusters and solar exposers" – solar passive building science and design

[2] ANIS.DR – SIDDIOI.A: "building , energy and urban morphology" – university of engineering and technology – lahor – pakistan .

DESCRIPTION DU PROBLEME

« *Quand on ne sait pas ce qu'on cherche, on ne sait pas ce qu'on trouve* » Georges Ganguilhem

L'Algérie est dotée d'une vaste surface et d'un climat diversifié allant d'un méditerranéen tempéré à un saharien sec. Les régions chaudes et arides occupant les deux tiers de cette surface, sont caractérisées par une intensité de radiation solaire très importante qui peut atteindre 900w/m^2 sur une surface horizontale et d'une température extérieure dépassant 42c° à l'ombre (station météorologique de Ouargla ;2001).

Face à cette situation d'inconfort qui dure au moins trois mois pendant l'année, les habitants sont habitués à s'adapter au problème par :

- le nomadisme saisonnier de la majorité des habitants vers le littoral et les hauts plateaux.
- le recours aux climatiseurs fournis par l'industrie, et la consommation excessive de l'énergie fossile.

Mais il n'est pas évident que tous les habitants – les pauvres surtout – peuvent accéder à ces deux alternatives.

Devant cette conjoncture du développement des savoirs traditionnels, vis à vis du climat par le recours aux solutions technologiques reconnues à nos jours non durables, il s'avère nécessaire de trouver des solutions en matière d'architecture pour cette tranche de société [3].

HYPOTHESE

Pour palier à cette situation critique nous envisageons comme solution à ce problème l'étude de l'impact des radiations solaires sur la forme, ceci par la recherche d'une relation entre la quantité des radiations incidentes sur les surfaces de la forme et les caractéristiques morphologiques de ces derniers, tout en sachant qu'elle est dépendante du degré d'exposition du bâtiment au soleil. Ce dernier est exprimé par le facteur de forme, défini par la quantité et la nature des surfaces exposées telles que :

- Surfaces de l'enveloppe/volume habitable.
- Nature morphologique (surfaces horizontales, verticales, inclinées ou courbées...etc.)

Il est donc indispensable de bien évaluer la radiation solaire en relation avec la construction pour définir son influence sur la performance thermique et son importance dans la détermination de la morphologie des bâtiments.

.....
[3] CARLO ratti-RAYDAN dana – KOEN steens : “building form and environmtal performance archetypes ,analysis and arid climate” – Energy and building 35 (2000) 49-59.

OBJECTIF

Notre recherche tend à comprendre la réaction des différentes formes vis à vis des radiations solaires afin de déterminer les formes de base (**enveloppe**) les plus performantes dans les climats chauds et arides, ce qui permet d'avantage de définir leurs caractéristiques morphologiques qui influent directement sur la performance thermique et qui peuvent éventuellement servir de jalons pour l'équilibre thermique du microclimat urbain. Rappelons que la conception passive dans ces régions est plus que conseillée, ce qui pourrait servir de base en amont du projet architectural et urbain.

METHODOLOGIE

*« Je ne cherche pas je trouve »
Picasso*

Sur le plan méthodologique, nous insisterons sur une étude comparative typo-morphologique de quelques exemples vernaculaires – livresque ou existant – montrant les différentes solutions adaptées au niveau de la forme pour lutter contre l'intensité des radiations solaires.

Cette évaluation tentera d'apprécier les caractéristiques typologiques ayant un apport à contre carrer les contraintes de validation.

Les invariants performantes pourraient faire l'objet d'une «forme» ou d'un concept générateur de forme. Celui la pourrait être utilisé comme base de données pour la conception dans les régions similaires à l'aire de notre étude.

Alors, notre travail ce conduit essentiellement en deux parties :

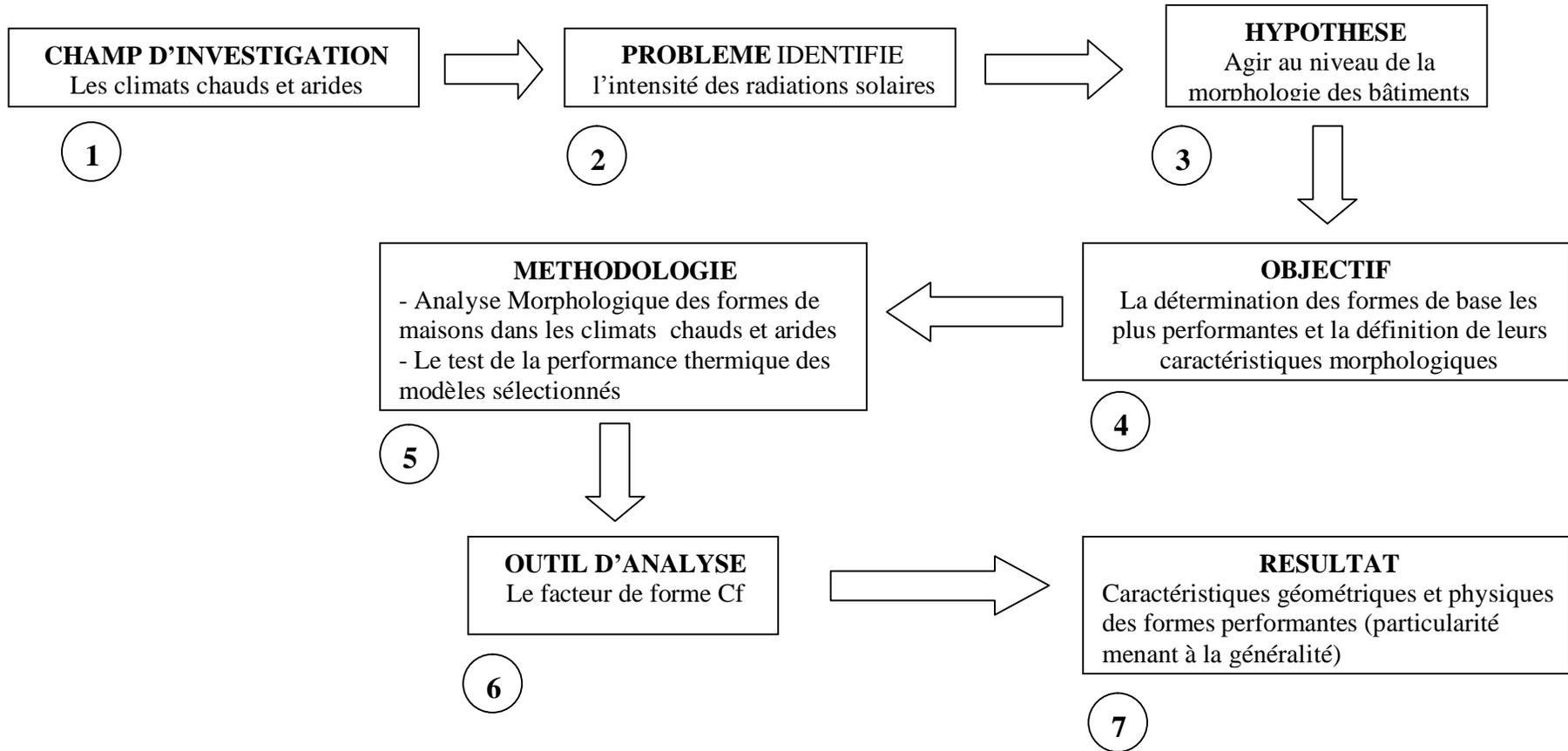
- Une première partie, qui consiste en une recherche bibliographique et documentaire, dont l'objectif est de mettre en évidence l'importance du climat dans la détermination des formes de maisons, l'impact des facteurs climatiques sur le confort thermique et les mesures de la minimisation des besoins énergétiques dans le bâtiment.

- Une deuxième partie d'investigation, qui elle-même subdivisée en deux partie :

La partie analytique : Une analyse typo-morphologique des échantillons de formes choisies et analysées selon des critères préalablement définis

La partie expérimentale : Une étude des variations de la quantité des gains de chaleur entrent dans le bâtiment en conditions d'été, selon les variations du facteur de forme. Ce qui pourra nous démontré l'influence de la géométrie et des dimensions de la forme sur sa qualité thermique.

STRUCTURE DE LA RECHERCHE



1. Le climat :

" Le climat est une principale données de la morphologie des systèmes architecturaux et urbains " [Clair et Michel duplay ; 1982].

Certes; il existe des travaux qui traitent la relation entre l'architecture et le climat dans un objectif général d'obtenir **le confort thermique** par des moyens spécifiquement naturels.

Cela par une intégration de cette donnée dans le processus de conception architecturale afin qu'elle devienne une composante normal de l'architecture et qu'elle se familiarise dans les milieux pédagogiques et professionnels des architectes, Pour qu'on finisse de parler de l'architecture bioclimatique; c'est-à-dire : « *En considérant l'architecture dans une recherche d'intelligence, celle-ci doit créer elle même, par son enveloppe (forme, matériaux, répartition des ouvertures...) et ses structures intérieures (de façon passive), un microclimat confortable chaque fois que cela est possible* » [Alain Chatelet et Al; 1998].

Mais, la plupart des travaux entamés dans ce sens parlent de procédés, des systèmes passifs ou des composants de la construction à l'inverse de ceux traitant l'interaction entre le climat et la forme globale des constructions.

Sachant que la découverte de certaines informations sur l'architecture traditionnelle et son harmonie avec le climat et l'environnement nous a appris que construire avec le climat n'est pas nouveau. Nous pensons que les caractéristiques climatiques participant en grande partie à la détermination des emplacements les plus favorables, des formes, des matériaux,... Etc, des composantes de la construction, en général dans les régions à climat rude (chaud ou froid).dans ce cas, la réussite du projet dépend de la manière dont la solution est dégagée, autrement dit l'aptitude du concepteur à interpréter les facteurs du climat et à créer une architecture adaptée au lieu géographique en conséquence.

De ce fait; il est nécessaire pour l'optimisation et la mobilisation de ces objectifs de comprendre le climat et les paramètres qui le définissent pour **le contrôler – se protéger ou en profiter** – et l'utiliser de façon judicieuse au profit de **l'homme** et de son **équilibre thermique**. Tout en minimisant le recours aux installations de chauffage ou de climatisation qui peuvent augmenter les factures de consommation de l'énergie et par conséquence le gaspillage et la mauvaise gestion des ressources fossiles de cette façon peut engendrer d'autres effets sur l'environnement tels que :

- L'effet de serre atmosphérique : produit par les gazes carboniques des installations de chauffage.
- Les rejets de CFC : qui participent à la rupture de la couche d'ozone, à cause de l'utilisation de la climatisation thermodynamique, et autres.

Le Climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques terrestres caractérisant une région sur plusieurs décennies. Sa détermination repose sur l'analyse quantitative à plus long terme de la moyenne des paramètres requis pour caractériser les états de l'atmosphère principalement la température de l'air, la lame d'eau précipitée, la durée d'insolation, la direction et la vitesse du vent. Le climat représente donc le « Temps moyen » en un lieu donné.

Branche de la géographie physique, la climatologie étudie les composantes et les variations des climats sur la surface de la terre. Le climat quantifie divers aspects du temps et se différencie donc de ce dernier en terme de durée.

En effet, le climat est une succession de types de temps avec des caractères relativement constants mesurés sur trente ans (les normales). La climatologie se préoccupe alors davantage des facteurs géographiques (répartition des terres et des mers, volumes de relief...) pour expliquer les irrégularités et définir différents types de climat. [Gérard Guyot ; 2004]

L 'idée de pouvoir identifier les différents types de climat a souvent été une préoccupation majeure des géographes et des climatologues. Ce problème est en réalité très complexe, chaque auteur y propose une classification originale.

Dans cette étude on va essayer de citer les deux classifications les plus récentes dans les ouvrages climatiques et géographiques.

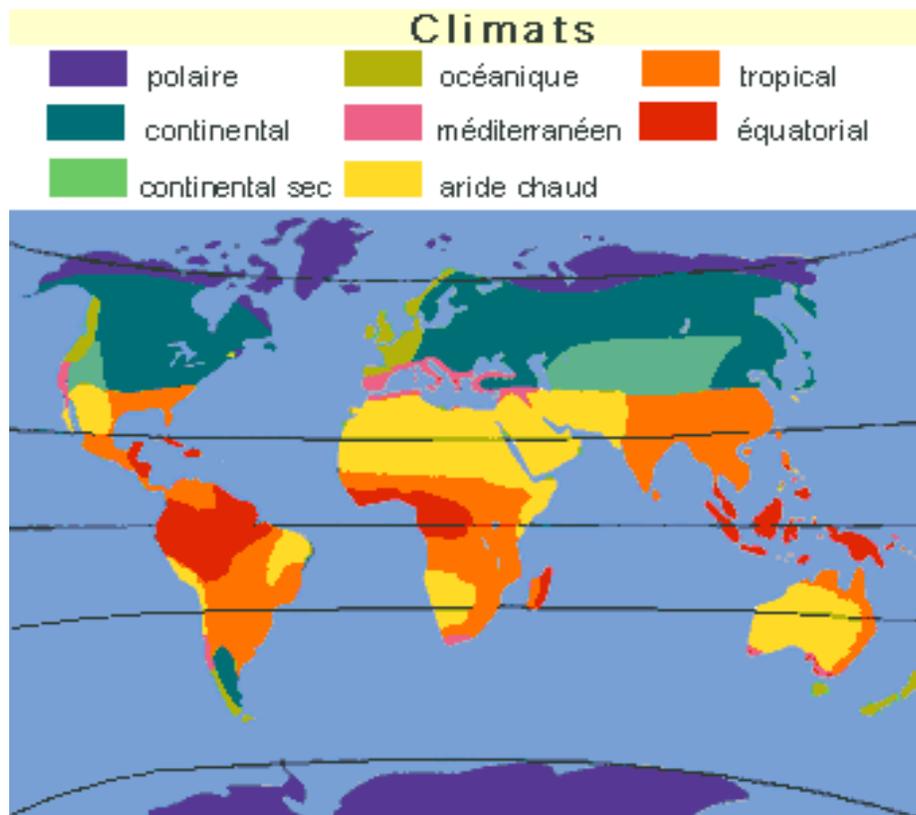
Classification de Rosali Mignon : elle distingue les climats généraux de son traité comme géographe général en huit climats fondamentaux.

1. Climat polaire
2. Climat continental
3. Climat continental sec
4. Climat océanique
5. Climat méditerranéen.
6. Climat aride chaud.
7. Climat tropical.
8. Climat équatorial

Classification de Koppen : Celui la réduit les climats fondamentaux en cinq :

1. Climats tropicaux humides.
2. Climats secs.
3. Climats tempérés humides chauds.
4. Climats tempérés humides froids.
5. Climats polaires.

[Habib.Wh ; 1991]

**Fig 1.1:** Carte du monde LES CLIMATS**Source :** Rosali Mignon ; 1998

Malheureusement l'aspect climatique a été particulièrement négligé au cours des années soixante à cause de l'influence de la modernité, la belle architecture et la technicité abstraite. Mais depuis la crise énergétique en 1972, les conférences de Stockholm, Rio en (1992), avec les efforts de l'ONU, Le climat est devenu l'un des principaux thèmes d'actualité dans la recherche architecturale.

Dans cette perspective, une attention particulière sera apportée à l'étude de l'influence des paramètres climatiques – le Soleil en particulier – sur la forme des constructions dans les climats chauds et arides, pour limiter les gains de chaleur en période d'été et minimiser au maximum les consommations énergétiques liées à la climatisation des bâtiments.

2. Les climats chauds et arides :

Le climat a toujours joué un rôle déterminant dans la définition de la forme du bâti, il intervient aux côtés d'autres facteurs aussi importants tels que le social, le culturel et l'économique. Le rôle de l'architecte et du thermicien est de pouvoir concilier les exigences de l'homme et son environnement. Ceci doit passer par une étude climatique globale de la région d'implantation du projet

Les régions chaudes et arides sont situées généralement entre les latitudes 20°-25° au Nord et au Sud de l'équateur et largement entre 15°-30° Nord et Sud [Allan Konya ; 1980].

Ces régions sont rencontrées au Sud de l'Afrique, en Asie partiellement, en Amérique du Nord (le Mexique et la Californie) et du Sud (Pérou, Brésil) comme en Australie. [M.Evans & all ; 1980].

En effet elles sont caractérisées par des conditions climatiques où règne la rareté des précipitations. Elles sont très nettement inférieures (moins de 200 mm/an) et très irrégulières, parfois nulles (cas des années de sécheresse), elles se trouvent aux latitudes tropicales et s'étendent à l'intérieur des continents. L'ensoleillement est très accentué (plus de 4000 heures par an alors que les régions méditerranéennes les plus ensoleillées atteignent à peine 2000 heures). Il y règne une chaleur torride durant la journée alors que les nuits sont fraîches, voire froides ; ces passages quotidiens du chaud au froid font éclater les roches qui se transforment en sable. Les périodes de sécheresse s'étalent sur au moins huit ou neuf mois. Certaines régions connaissent la sécheresse tout au long de l'année. C'est le cas de Tamanrasset (sud de l'Algérie). Les caractéristiques de ces régions sont :

- Des températures très élevées le jour et très basses la nuit.
- Un ciel clair.
- Une intensité de radiation très importante.
- Un taux d'humidité très faible.
- Des vents de sables accentuent l'aridité.

[Anissa Touati ; 2000]

Les géographes et les climatologues ont essayé d'exprimer la notion d'aridité qui est générée par une complexité de phénomènes atmosphériques et géographiques, en termes numériques représentée sous forme d'un indice appelé :

2.1. L'indice d'aridité :

C'est un indice mathématique de résultat numérique exprimant le type de climat

La formule de De Martonne :

L'indice d'aridité (De Martonne, 1923) est défini comme le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles et la moyenne des températures annuelles :

$$I_M : \text{Indice d'aridité} = P / T + 10$$

P : Pluviométrie annuelle ou mensuelle.

T : Température moyenne annuelle ou mensuelle.

Les régions à climat hyperarides ont un indice d'aridité inférieur à 5. Ces régions correspondent à des déserts absolus (Atacama, Tanezrouft). Les précipitations annuelles sur ces régions sont inférieures à **50 mm** par an. Dans les régions hyperarides, les précipitations sont exceptionnelles (**10 à 50 mm en moyenne annuelle**), très inégalement réparties avec des interruptions de plus de douze mois consécutifs. L'écoulement y est rare, épisodique et inorganisé.

Les régions à climat aride sont celles où les valeurs de l'indice d'aridité sont comprises entre **5 et 10**. Ces régions comprennent la grande partie du Sahara, les déserts d'Arizona et de Sonora, les déserts d'Iran (Désespoir) ou d'Inde (Thar). Sur ces régions, l'ensemble des précipitations est inférieur à **250 mm** d'eau par an. En Europe, la seule région désertique, c'est-à-dire le petit désert d'Almeria, reçoit moins de **130 mm** d'eau par an. Les régions arides reçoivent de faibles pluies (en moyenne annuelle, de **50 à 150 mm** dans la zone tropicale) groupées sur une saison, très irrégulières d'une année sur l'autre. L'écoulement dans les talwegs est intermittent, fragmenté en crues isolées consécutives à des averses rares, de courte durée et de forte intensité.

Les régions à climat semi-aride sont celles où les valeurs de l'indice sont comprises entre **10 et 20**. Ce sont essentiellement les régions sahéliennes, le Kalahari, le Chaco argentin, le Nordeste brésilien. Ces régions, au mieux, reçoivent **500 mm** d'eau par an. Dans les régions semi-arides, les pluies réparties sur quelques mois de l'année sont assez abondantes pour assurer à la végétation et à l'écoulement des eaux un rythme saisonnier; mis à part le cas exceptionnel des cours d'eau allogènes, l'écoulement se fait par crues isolées parfois soudaines et violentes. Au delà de ces données le climat devient tempéré.

La formule de Koppen :

Celui-là a fait un rapport entre la température en C° et la pluviométrie en Cm/ans ou mois pour définir les types de climat selon le tableau suivant :

Type de climat / Les pluies	Non aride	Semi-aride	Aride
Pluies en toutes saisons	$P > 2 (T + 7)$	$P < 2 (T + 7)$ $P > (T + 7)$	$P < (T + 7)$
Pluies d'été	$P > 2 (T + 14)$	$P < 2 (T + 14)$ $P > (T + 14)$	$P < (T + 14)$
Pluies d'hiver	$P > 2 T$	$P < 2 T$ $P > T$	$P < T$

Tab 1.1 : Indice d'aridité selon Koppen. P

Source : Encyclopédie universelles ; 1989.

3. Les caractéristiques des paramètres climatiques : **(Dans les climats chauds et arides)**

Grâce au développement accéléré des techniques et des instruments **d'observation météorologique** il est devenu simple pour les architectes, les urbanistes et les géographes d'accéder aux **résultats des observations** des stations météorologiques- de **les quantifier correctement** afin de **calculer** et **manipuler les divers paramètres climatiques** et de comprendre les composantes atmosphériques qui régissent l'énergie produite par les forces de la nature.

Les principaux paramètres climatiques à prendre en considération lors d'une conception architecturale ou urbanistique, sont : La température de l'air, L'humidité, Les vents, Les pluies et le rayonnement solaire. On va essayer de les définir et d'indiquer de façon générale leurs caractéristiques.

3.1. Le Rayonnement Solaire :

Le rayonnement solaire est une radiation électromagnétique libérée par les fusions thermonucléaires qui se produisent dans la masse du soleil, émise en permanence dans toutes les directions par **le soleil** sous différentes longueurs d'ondes qui s'étalent de **0.28** , **3** micron, l'intensité de cette énergie diminue et sa distribution spectrale se modifie par **l'absorption, la réflexion et la diffusion** lors de son passage par l'atmosphère terrestre. Au moins **25%** de la radiation solaire atteignant les couches de l'atmosphère est diffusée ou absorbée par les molécules d'air, les particules de poussière et la couche d'ozone. Tandis que les rayonnements solaires qui atteignent la terre proviennent de toutes les directions de la voûte céleste. **(Voir Fig. 1.2)**

En effet **25%** de la radiation solaire totale est réfléchi vers la voûte céleste, dont **20%** est due à la poussière, aux nuages, à la vapeur d'eau et autre. Le reste est réfléchi par les surfaces de la terre vers le ciel. La capacité de réflexion des surfaces de la terre dépend du facteur de réflexion des sols (**l'albédo**). La réflexion du sable dans le désert est de **35-45%**, par contre dans une forêt dense l'albédo est de **5-10%**.

En général l'atmosphère diminue la radiation solaire à **50%** de la radiation totale arrivant en dehors de l'atmosphère. Le reste du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère en atteignant la terre est le rayonnement solaire direct.

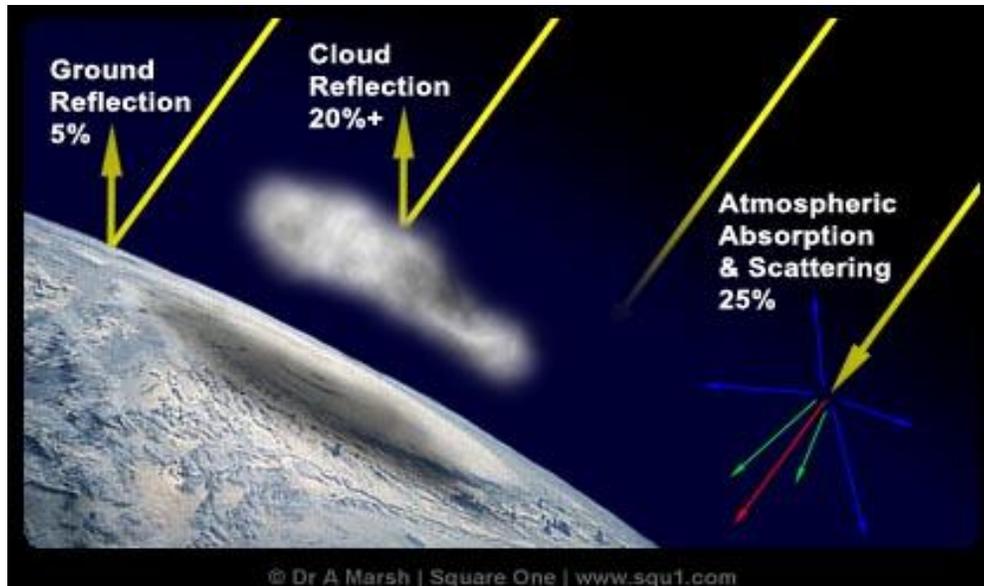


Fig. 1.2 : l'absorption, la réflexion et la diffusion de la radiation solaire par l'atmosphère terrestre

Source : Michael Pidwirny ; 1999

Le rayonnement solaire qui chauffe la construction est un paramètre particulièrement important. Des **données numériques** (météorologiques) sont nécessaires pour la prévision de la performance des bâtiments et le **calcul des gains** solaires passif intervenant dans le **bilan thermique des bâtiments** afin de déterminer les besoins adéquats.

Or la quantité réellement intéressante pour les calculs est **l'intensité "I"** du rayonnement solaire qui est le flux de rayonnement traversant une surface unité d'une orientation donnée dans une **altitude** et **moment** bien définie.

L'intensité de la radiation solaire ou la quantité du rayonnement qui atteint les surfaces de la terre est inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'atmosphère. Ce dernier dépend de :

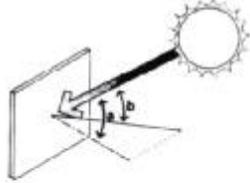
- * la course de la terre autour du soleil
- * la rotation journalière de la terre
- * le changement saisonnier

De ce fait l'intensité de la radiation solaire est plus importante à midi que le matin ou l'après midi, et en été qu'en hiver. L'intensité de la radiation solaire dépend donc de l'heure, du jour, de l'année et de l'altitude. Généralement elle dépend de l'angle d'incidence des rayons solaires [Michael Pidwirny ; 1999].

Ce dernier est l'angle que font les rayons solaires avec la normale à la surface interceptée. Il détermine l'intensité et le pourcentage de la radiation solaire reçue par la surface en question.

**Pourcentage du rayonnement intercepté par une paroi
en fonction de l'angle d'incidence**

Angle d'incidence (degré)	Rayonnement intercepté (pourcentage)
0	100,0
5	99,6
10	98,5
15	96,5
20	94,0
25	90,6
30	86,6
35	81,9
40	76,6
45	70,7
50	64,3
55	57,4
60	50,0
65	42,3
70	34,2
75	25,8
80	17,4
85	8,7
90	0,0



a = ANGLE D'INCIDENCE
b = HAUTEUR ANGULAIRE

Tab 1.2 : Pourcentage du rayonnement intercepté par une paroi en fonction de l'angle d'incidence

Source : Edward Mazria ; 1979

Toutefois, la quantité totale de la radiation solaire reçue par une surface est la somme du rayonnement directe, réfléchi et diffusé.

Un autre phénomène observé la nuit qui est le rayonnement nocturne, lorsque le ciel est dégagé la terre émet une quantité de rayonnement qui permet de fournir un rafraîchissement notable. En effet, la température radiante moyenne du ciel est toujours inférieure de nuit à la température (météorologique) extérieure, ce qui provoque un échange de chaleur de grande longueur d'ondes orienté de la terre vers la voûte céleste.

Dans les régions chaudes et arides, la radiation solaire est le facteur le plus important, ce dernier influe sur le confort thermique et par conséquent sur la conception architecturale et urbaine dans ces régions. [J. L. IZARD ; 1985].

- La radiation solaire directe est très intense, supérieure à 1000 W/m^2 sur les surfaces horizontales.
- La radiation solaire réfléchi par les couleurs claires du milieu aride, augmente la sévérité de ce paramètre.
- La clarté du ciel qui favorise l'influence de la radiation solaire directe d'avantage -dans les conditions d'un ciel nuageux **20%** de la radiation totale est diffusée.
- La longue durée d'insolation dans ces régions qui peut durer de 10 à 14 heures.

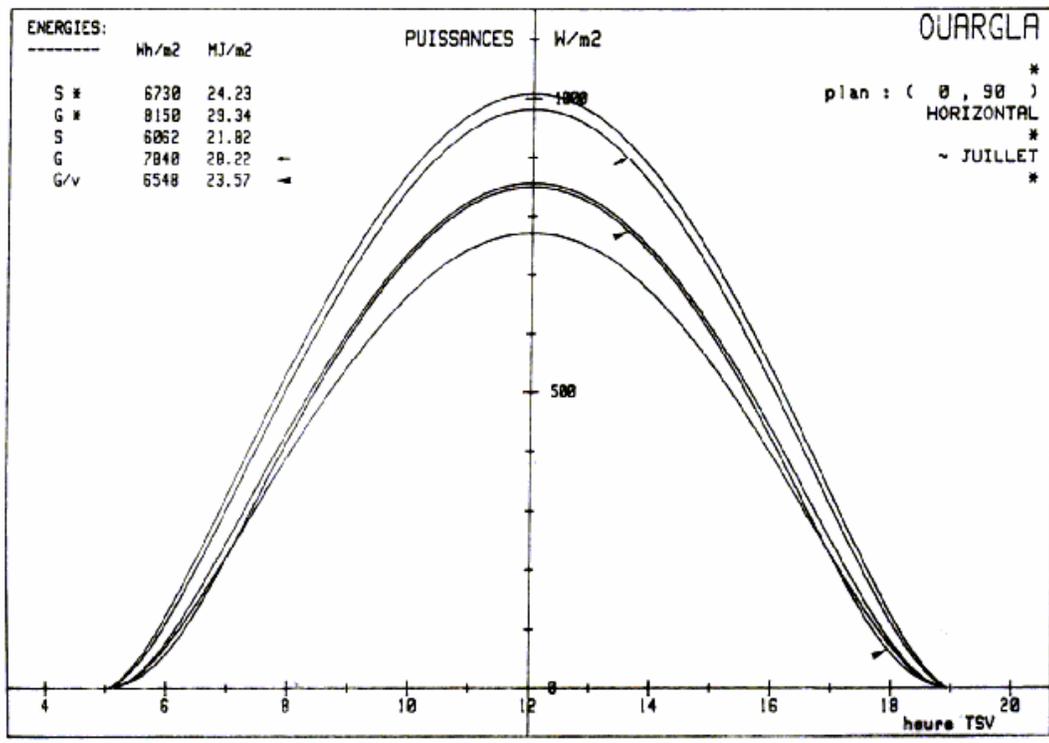


Fig 1.3 : Intensité de la radiation solaire incidente sur un plan horizontal / mois de juillet – Ouargla-

Source : Michel Capderou ; 1980

3.2. La température de l'air :

C'est un paramètre qui a une influence prépondérante sur la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir par **chauffage** ou **refroidissement** une **température** d'air intérieure plus **confortable** que celle de l'extérieur.

Techniquement, la température est un caractère thermodynamique de l'air déterminé par le taux d'échauffement et du refroidissement de la surface de la terre, donc elle dépend du rayonnement du soleil qui chauffe la terre le jour et du rayonnement nocturne qui la refroidit la nuit, Comme elle dépend du déplacement des grosses masse d'air au contact avec la surface terrestre, de **l'altitude** et des grandes masses d'eau.

La différence de température de l'air peut provoquer une différence de pression et un déplacement de l'air.

Dans les régions chaudes et arides la température de l'air extérieur est très élevée ; pendant les jours de l'été elle peut atteindre **40 , 50 C°** à l'ombre.

- La température de surface peut atteindre **70 C°** à cause du rayonnement solaire qui intercepte le sol et qui réchauffe le milieu.

- L'amplitude journalière pendant la période chaude est de l'ordre de **15 , 25 C°**

- une baisse rapide de chaleur la nuit est expliquée par le rayonnement nocturne de la terre vers la voûte céleste. [Lorraine Dufour ; 2004]

3.3. Les vents :

Le vent est un facteur climatique que l'on ne peut négliger, il est déterminé par plusieurs facteurs globaux et locaux tels que : La pression de l'air, la rotation de la terre, les variations journalières des températures, la topographie. Comme il est caractériser par :

- **Une direction** (principale ou secondaire).
- **Une vitesse** exprimée en m/s ou Km/h.
- **Une fréquence** par jour, mois ou année [Jean.Luis Izard ; 1985]

L'effet thermique du vent se fait par l'échange de température entre le corps humain et l'environnement extérieur. La différence de pression peut provoquer une ventilation à l'intérieur des bâtiments, comme elle peut modifier le taux de cette dernière, il est donc nécessaire pour les concepteurs de décider s'il faut se protéger des vents ou s'il faut en profiter.

Les zones arides sont principalement caractérisées par un déplacement d'air continental sec, chaud et protégées contre les perturbations pluvieuses [Encyclopédie universelle ; 1989].

Avec des vents locaux qui soufflent généralement du sud-ouest au nord-ouest en direction de l'équateur, leur vitesse est faible le matin, elle commence à augmenter vers midi pour qu'elle atteigne son maximum l'après midi, ils sont accompagnés fréquemment de tourbillons de sable et de poussière. Ces dernier soufflent surtout pendant les mois qui marquent les changements de saisons "Mars, Juin, Octobre" [A. Konya ; 1981].

Il est nécessaire de se protéger contre ces vents ou de bien réfléchir avant de penser à une utilisation du vent à l'intérieur du bâtiment.

3.4. L'humidité :

L'humidité atmosphérique représente la quantité de vapeur d'eau continue dans l'atmosphère ; cette quantité est le résultat de l'évaporation des surfaces des océans, des surfaces humides, de la végétation et des petites masses d'eau.

Deux types sont à citer :

- **L'humidité absolue de l'air** : c'est le nombre de grammes de vapeur d'eau contenue dans l'air exprimé en g/m³, elle a une influence importante sur l'humidité de l'air à l'intérieur du bâtiment. Si l'air est trop sec, des poussières et des décharges électrostatiques peuvent causer l'inconfort, s'il est trop humide, des dégâts (moisissures, pourritures) peuvent être causés par la condensation.

- **L'humidité relative de l'air** : c'est le rapport entre l'humidité absolue et la quantité maximale que peut contenir l'air exprimé en pourcentage (%). on peut la calculer ou la lire sur un diagramme psychométrique .Toutefois l'humidité relative est un indicateur très pratique pour les concepteurs, avec la température ambiante elle peut définir les conditions du confort thermique. Sur le diagramme suivant, on constate que si l'on

sature de l'air à 15°C il suffit alors de la réchauffer jusqu'à 27°C pour atteindre les conditions désirées.

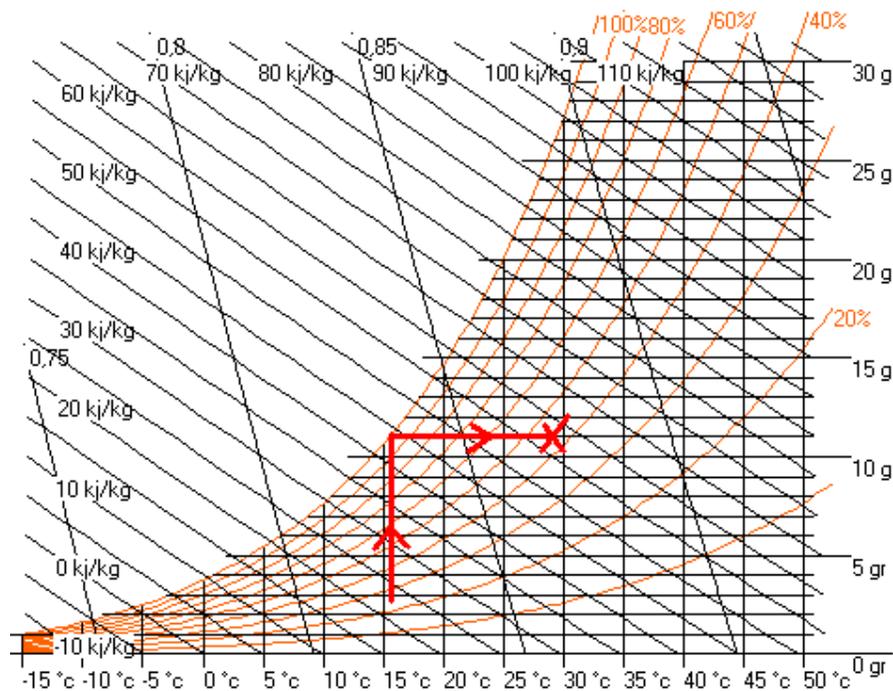


Fig 1.4 : Diagramme psychrométrique montrant l'importance de l'humidité dans la détermination des limites et zones de Confort thermique

Source : Rebzani. B ,1999

Dans le cas de notre étude L'évolution de l'humidité est contraire à celle de la température, elle atteint **20%** l'après midi pour qu'elle augmente la nuit vers **40%**. [A. Konya ; 1981].

Cette caractéristique est renforcée par le manque de couches végétales et les surfaces d'eau, Le têt d'humidité influe aussi sur la qualité de l'air qui peut porter des poussières et des grains de sables, cela augmente l'effet de l'aridité.

3.5. Les précipitations :

Les précipitations sont produites par la condensation de l'air dans la couche supérieure de l'atmosphère sous forme de nuages composés de petites gouttelettes d'eau ou parfois de cristaux de glace. Lorsque l'air continue à s'élever le poids des gouttelettes augmente ceci provoque la chute des pluies ou de la neige. Ces derniers sont très influencés par la différence de température et les mouvements des vents. Dans les climats chauds et arides ce paramètre est nettement inférieur (moins de **250 mm/an**), très irrégulier et parfois nul.

4. Conclusion :

D'après l'étude effectuée à travers cette partie de chapitre, il s'avère essentiel de prendre le climat en considération lors du processus de conception.

Cela veut dire que la variété des climats sur le globe terrestre implique sûrement une diversité architecturale et urbaine, cette dernière doit répondre en premier lieu à des besoins thermiques spécifiques à chaque zone climatique, elle peut aussi servir de jalon à déterminer des caractéristiques spécifiques architecturales ou urbaines.

Les concepts et définitions présentant l'importance de l'interaction entre le climat (ensemble des paramètres climatiques et leur variation) et le bâtiment peuvent être décrits au moyen de modèles simples ou complexes à savoir l'importance de l'étude pour utiliser ces modèles, Des données météorologiques doivent être transcrites et exploitées dans le modèle.

L'analyse climatique est un modèle fiable pour l'identification précise des paramètres climatiques et de leur importance afin de déterminer leur influence sur le micro climat, l'homme et la conception urbaine et architecturale. Dans l'annexe « A » nous présentons un modèle simplifié de l'analyse climatique.

Les zones arides et chaudes -cas de notre étude- présentent des inconvénients en période estivale qui affectent le bien-être des individus et qui peuvent devenir des sources d'inconfort s'ils ne sont pas traités lors de la conception d'où vient la nécessité de les prendre en considération et de veiller sur la régulation du micro climat et de l'ambiance intérieure au profit de l'homme et de son équilibre thermique.

Dans la partie suivante on va essayer d'étudier la notion de confort thermique, le comportement de l'être humain vis-à-vis des paramètres climatiques pour évaluer et déterminer les besoins thermiques des régions de notre étude.

5. Le confort thermique :

Depuis l'aube de l'humanité, l'homme a toujours essayé de s'abriter des rudes conditions extérieures à l'intérieur d'un espace construit, enterré ou déjà existant dans lequel des conditions de vie sont appréciées et adaptées au besoins climatiques du lieu.

La qualité de vie à l'intérieur de l'espace -demeure- a été souvent rapprochée à une appréciation thermique en premier lieu, Dans les climats chauds on cherche les abris les plus frais, à l'inverse des climats froids où le chaud est recherché.

La compréhension de l'environnement thermique et les paramètres inclus dans la détermination de l'équilibre thermique entre l'homme et son environnement est une exigence principale pour :

- la santé et la longévité de l'homme.
- Le confort thermique et le bien-être. [Marcha ; 1997&B Givoni ; 1967].

Le confort thermique est une sensation de bien être liée à de nombreux facteurs : le confort thermique est relié à une sensation de froid ou de chaleur. Cette sensation est subjective, et donc propre à chaque individu, notamment à son activité physique et son habillement. De plus, elle dépend de divers facteurs extérieurs.

Conditions personnelles	Activité physique Habillement État de santé
Conditions thermiques	Température de l'air Sources de rayonnement (radiateurs, soleil) Température des surfaces environnantes Vitesse relative de l'air par rapport au sujet Humidité relative de l'air Perméabilité thermique dynamique du sol
Autres influences	Degré d'occupation des locaux Ambiance, etc.

Tab 1.3: Paramètres ayant de l'influence sur la sensation de confort thermique
source : Roulet et Al ; 1996

Suivant sa sensation globale, l'habitant se déclarera satisfait ou insatisfait. Le critère fondamental de confort est donc la satisfaction des usagers. Ce n'est en tous cas pas la seule température de l'air. Il est possible de déterminer à l'avance les conditions à réunir pour obtenir une satisfaction maximum pour le confort thermique.

C'est pourquoi, il est difficile de répondre à la fois aux conditions optimales (des paramètres objectifs du confort) et aux paramètres subjectifs pour satisfaire tout le monde.

Les courbes de D.P WYON donnent une bonne idée de la complexité de la notion de confort, à travers les différents états de réaction du corps humain vis avis de l'environnement :

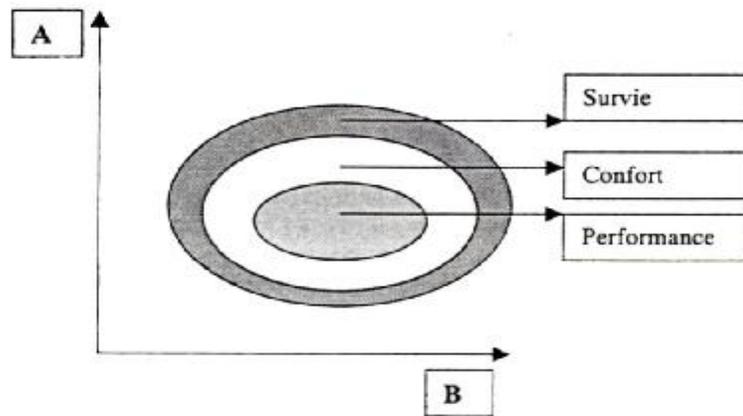


Fig. 3.A

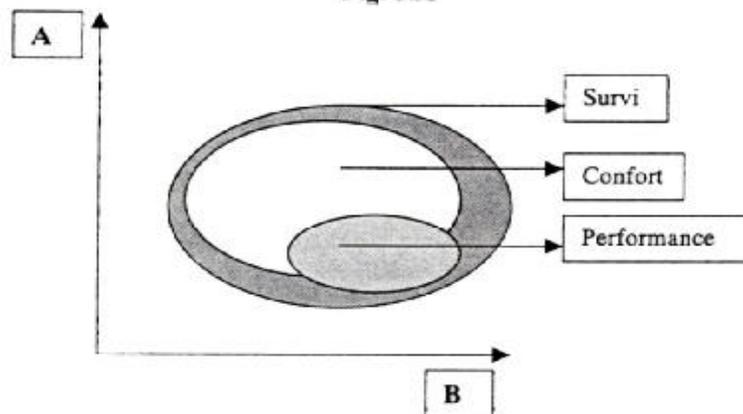


Fig. 3.B

Fig 1.5 : Les courbes de D.P. WYON

Source : Dreyfus ; 1960

A : les conditions thermiques

B : les conditions personnelles

Les chercheurs ont essayé d'intégrer dans leurs études les deux notions subjectives et objectives pour arriver à des résultats plus valables, pour cela ils ont pris comme outils : des indices de confort, des tableaux, des zones de confort et des diagrammes psychométriques.

Avant d'examiner ces outils essayons d'abord de définir les paramètres optimaux influant sur le confort.

6. Les paramètres optimaux du confort thermique :

6.1. La température de l'air intérieur et des parois (radiante) :

Ces deux grandeurs sont les premières à contrôler généralement l'intervalle de confort ; elles vont de 18°C à 25°C ; cette température est appelée température de l'air ambiant.

La température radiante participe aussi au contrôle du confort par le fait qu'une paroi mal isolée présente souvent une température radiante inférieure à la température sèche.

Cette différence peut générer une sensation d'inconfort, l'inertie thermique, l'isolation et surtout la capacité thermique des matériaux sont des outils de contrôle de la température pour l'amélioration du confort thermique,

L'analyse des températures de surface d'un bâtiment (situé en Afrique du Nord) toutes les 30 minutes montre que les températures de surface atteignent leur maximum avec un retard de l'ordre de 1h à 1h30. Sur la radiation solaire maximale (qui coïncide avec 12 h TV), ce retard est encore plus marqué avec l'utilisation des matériaux à forte inertie thermique. Le schéma ci-contre montre bien le **retard pris par l'évolution des températures intérieures** (en rouge) **par rapport aux températures extérieures** (en jaune) [Méga bois; 1998].

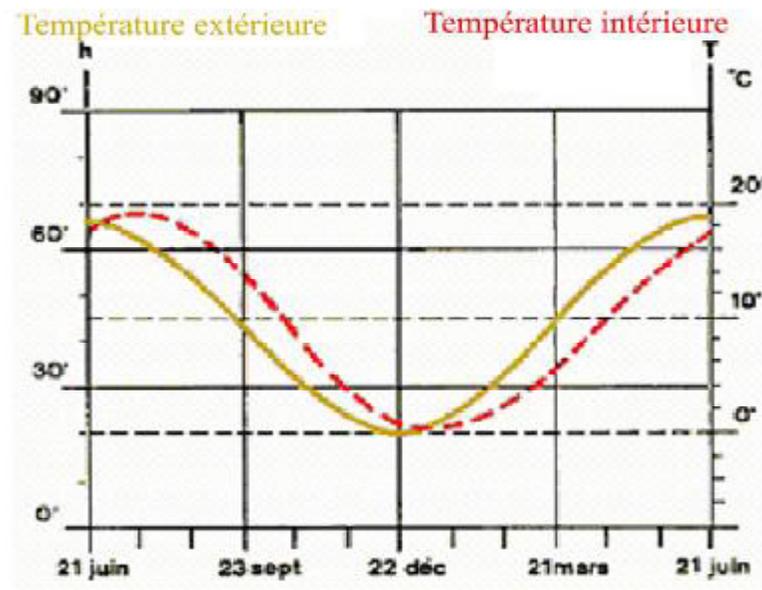


Fig 1.6 : L'évolution de la température extérieure et des températures intérieures étant périodique, avec un retard qui s'appelle le **déphasage**.

Source : Groupe Méga bois; 1998

6.2. La radiation solaire :

La radiation solaire influe sur le confort thermique par l'augmentation de la température des surfaces ensoleillées

En hiver, cette quantité de radiation solaire qui est le résultat de la radiation directe, diffuse et réfléchi est appréciée, à l'inverse d'été, les surfaces ensoleillées présentant une source d'inconfort par le fait de l'augmentation des températures radiantes des parois et de la toiture .ceci augmente par conséquent la température de l'ambiance intérieure et la rend insupportable.

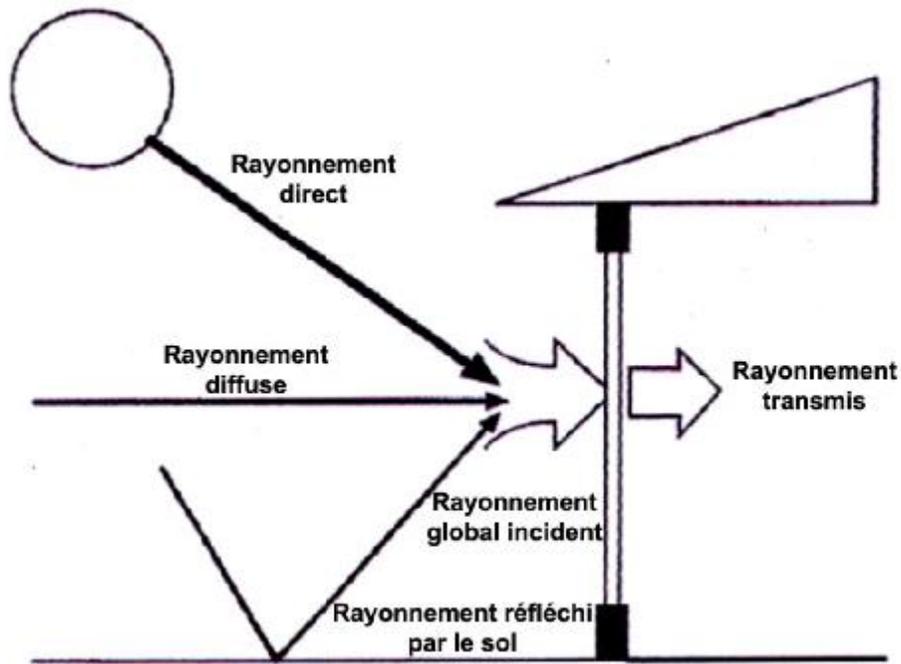


Fig 1.7 : Les trois composants du rayonnement solaire global

Source: Bureau Army Navy (WBAN); 2001

L'importance du rayonnement solaire dépend des conditions de la clarté du ciel (dégagé, nuageux...etc.) et de l'albédo -coefficient de réflexion- de l'environnement extérieur.

Pour un albédo de **0.20** le rayonnement global incident sur les plans verticaux Est, Ouest, Sud est de **50%** du rayonnement incident sur la toiture.

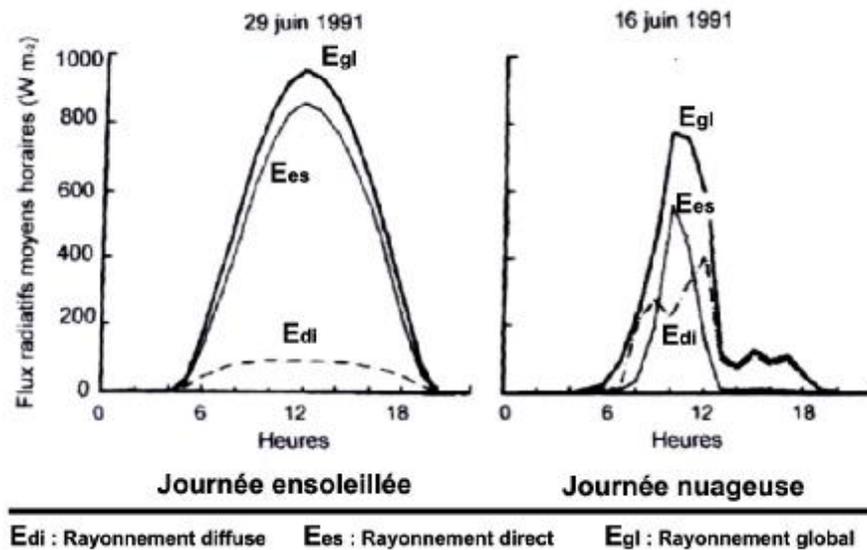


Fig 1.8: Le rayonnement direct et diffusé au cours d'une journée claire et d'une journée nuageuse

Source: Gérard Guyot ; 1999

6.3. L'humidité :

L'humidité joue un rôle important dans la perception du confort thermique ; elle détermine la capacité d'évaporation de l'air et par conséquent l'efficacité du refroidissement évaporatif ; avec la température elle donne déjà une idée du confort de l'ambiance interne.

Lorsque la température est au-delà des limites du confort, l'humidité provoque une sensation de sécheresse, si elle est inférieure à **20%**.

L'évaporation diminue la température ; le refroidissement par évaporation peut être réalisé dans certaines limites par la végétation, les bassins d'eau ou les fontaines créant ainsi un micro climat favorable, dans les régions chaudes et arides ou le vent a peut d'effet sur la température. [Rebzani. B ; 1999].

6.4. La vitesse de l'air :

La vitesse de l'air influe sur la qualité du confort thermique, car elle détermine l'échange thermique entre l'ambiance interne et l'environnement et par conséquent sur les limites de la température et l'humidité de l'air.

Si elle ne baisse pas la température, elle produit une sensation de fraîcheur provoquée par la perte de chaleur par convection et évaporation, lorsque la vitesse de l'air augmente la limite supérieure du confort croit aussi. [ASHRHE].

Au dessus de 0.1 m/s	On sent le renferme dans un local.
1 m/s	Confortable si le mouvement de l'air est requis.
> 1 m/s	L'inconfort s'aggrave.
2.0 m/s	Tolérable à l'extérieur bon si l'humidité est élevée.
5.0 m/s	Maximum a l'extérieure.

Tab 1.4 : Donnant l'effet du vent sur le confort thermique de l'individu.

Source : Givoni.B ; 1969

7. L'équilibre thermique :

L'objectif de l'étude du confort thermique et les éléments d'influence optimale et subjective est bien de maintenir un équilibre thermique entre le corps humain et l'environnement extérieur, afin que l'individu puisse vivre et pratiquer ses activités quotidiennes dans les meilleures conditions de santé et de bien-être. Cela implique la conservation de la température interne de l'être humain à (36.8 ÷ 37.2 °C). Mais ce n'est pas toujours évident, car le corps humain subit des variations de la température ambiante qu'il peut compenser de 15 °C à 25 °C. Au delà de ces limites (> 25 °C et < 15 °C), le corps humain consacre une quantité importante d'énergie pour la compensation, en produisant de l'énergie ou en échangeant la chaleur avec le milieu extérieur.

7.1. Métabolisme énergétique :

C'est un système de production de chaleur dans le corps humain par lequel la nourriture absorbée se combine avec l'oxygène pour générer l'énergie requise pour le fonctionnement des organes du corps, la circulation du sang, la respiration et autres tel que le travail nécessaire à la vie quotidienne. La quantité de l'énergie métabolique dépend de la situation de l'individu (voir tableau : 1.5).

Position du corps humain	Métabolisme de base en (Kcal/h)	
Repos assis	60	70
Activité sédentaire	90	100
Marche à 4 Km/h	100	120
Marche à 7 Km/h	210	270
Marche à 4 Km/h sur pente 10%	300	400
Travail industriel léger	340	480
Travail industriel modéré	150	300
Travail industriel lourd	300	480
Travail très lourd	450	600
	600	750

Tab 1.5 : Niveau de métabolisme pour diverses activités en (Kcal/h).

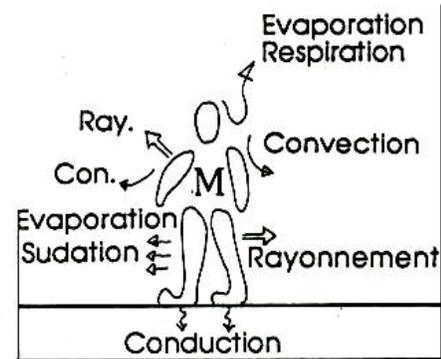
Source : Givoni. B ; 1969

De toute l'énergie produite par le corps humain, **20%** seulement est utilisée, le reste est réservé aux échanges thermiques avec l'environnement.

8. Les échanges thermiques avec l'environnement :

Fig 1.9: L'échange de chaleur entre le corps et l'environnement

Source : N. OULD HENIA 1993



8.1. L'échange thermique par conduction :

Ce type d'échange thermique se fait entre le corps humain et les surfaces de contact (murs, sols) sous forme de gain ou de perte de **01%** du taux d'échange total.

8.2. L'échange thermique par rayonnement :

Les gains ou les déperditions par rayonnement du corps humain sont relatifs aux variations de température ambiante, des murs, des objets environnants. [Konigs Berger 1980].

* Si la température est inférieure, la déperdition par rayonnement augmente provoquant une sensation de froid.

* Si la température est supérieure, les gains de chaleur par rayonnement augmentent et le corps commence à dégager le surplus de chaleur par évaporation ou par convection, si l'air est frais.

Ce type d'échange représente **45%** du taux global.

8.3. L'échange thermique par convection :

Le mouvement d'air à l'intérieur des locaux comme à l'extérieur détermine l'échange de chaleur par convection du corps avec un taux de **35%**.

Les mouvements trop rapides ont pour effet d'abaisser la température de la peau ; dans les climats froids cela provoque des modifications de la température avec des frissons. Si l'air est immobile, cela peut provoquer des sensations de fatigue, troubles respiratoires et inconfort thermique.

Dans les climats chauds, les mouvements d'air abaissent la température élevée, ce qui provoque une sensation de fraîcheur ou favorise la déperdition par évaporation.

8.4. L'échange thermique par évaporation :

Lorsque la température de la peau dépasse **35 °C**, le corps se couvre de sueur dans le but d'augmenter la déperdition de chaleur par évaporation rapide de l'humidité.

Ce phénomène représente **20%** de l'échange du corps humain. Il peut aider à maintenir un certain degré de confort satisfaisant dans les climats chauds et arides. [S. Zockolay ; 1992].

8.5. Conclusion :

Le confort physiologique devra donc s'établir par un équilibre thermique réalisé par une quantité minimale de régulation thermique. Le contrôle et la maîtrise du climat doivent se faire en tenant compte du rayonnement, de la température ambiante, de la vitesse de l'air et de l'humidité relative.

GAINS (au dessus du confort)	Pertes (au dessus du confort)
+A = chaleur produite par l'activité métabolique.	-----
+B = énergie du rayonnement reçue.	-B = énergie rayonnement émise par le corps.
+C = la conduction ou la convection vers le corps.	-C = convection et conduction a partir du corps humain.
+D = condensation d'humidité atmosphérique.	-D = perte par évaporation.

Tab 1.6 : Synthétique ; Bilan thermique du corps humain.

Source : Givoni.B ; 1969

Le bilan est : $Q = A + B + C - E$ (positif au cas des gains et négatif pour des pertes).

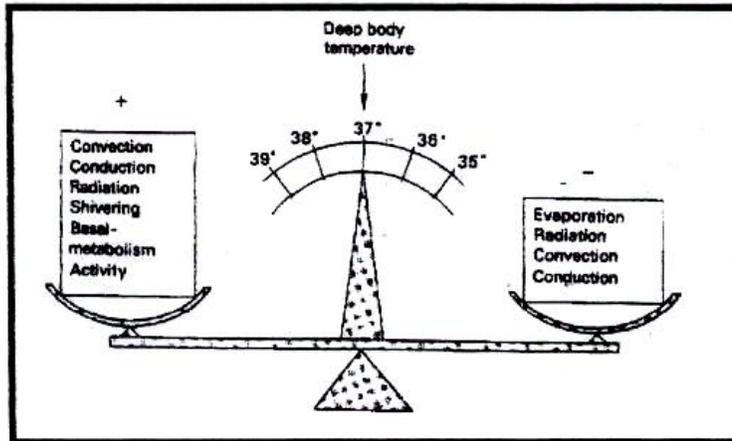


Fig 1.10 : Balance thermique du corps humain

Source : Koenigsberger ; 1980

9. Evaluation du confort thermique :

Plusieurs études ont été faites pour déterminer les limites du confort thermique en tenant compte des paramètres climatiques et de leurs évaluations combinées,

L'évaluations des chercheurs diffère de quelques degrés, mais ces variations se compliquent selon l'individu, l'acclimatation, les vêtements, la nourriture.....etc. Parmi les méthodes qui ont été développées par les chercheurs pour répondre aux besoins de l'utilisateur vis-à-vis du climat :

- * méthode de la température effective.
- * méthode de la température résultante.
- * méthode de l'indice de contrainte thermique.
- * méthodes des diagrammes bioclimatiques de B.Givoni, V. Olgyay, S.Zokolay...Etc.
- * méthode des indices PMV et PPD.

9.1. Les méthodes Evaluation du confort et la détermination des besoins :

Nous essayons de présenter, ci après, quelques méthodes d'évaluation du confort et de la détermination des besoins et même les nécessités d'intervention pour l'équilibre thermique.

9.1.1. La température résultante :

L'indice de la température résultante développé par Missenard en **1948** est basé sur la supposition qu'une base solide pour un indice thermique serait formée par des expériences dans lesquelles l'équilibre thermique est effectué entre le corps et l'ambiance afin de trouver les effets du vent et d'humidité.

Des résultats expérimentaux sont issus d'un monogramme pour le corps vêtu. Pour l'exemple de la température efficace, la température résultante lue du monogramme s'avère être **23.50 °C** ; la rangée des facteurs climatiques couverte par la température résultante est une température de l'air comprise entre **20 , 45 °C**, une température humide comprise entre **18 , 40 °C** et une vitesse de l'air entre **0 et 3 m/s**.

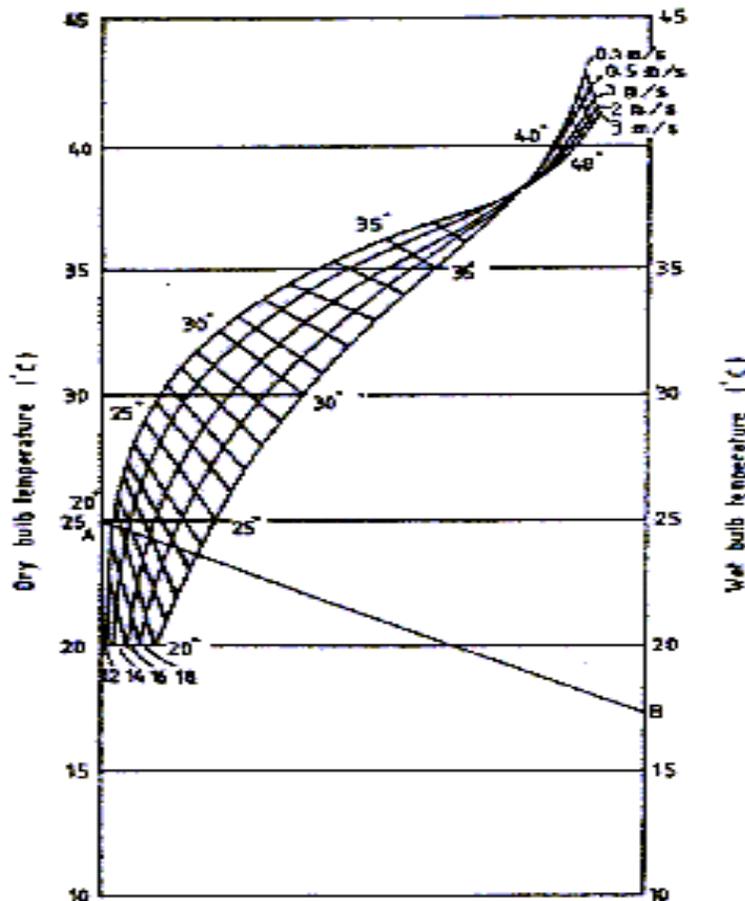


Fig 1.11: Diagramme de la température résultante

Source : Missenard ; 1948

9.1.2. Méthode des diagrammes psychométriques :

Plusieurs chercheurs ont développé, par le biais des diagrammes psychométriques, des outils de synthèse permettant de définir les exigences de confort thermique.

- **La zone de confort :** Selon la température et l'humidité des conditions extérieures et leur influence sur le confort hygrométrique.
- **Les zones de performance :** Déterminant les besoins thermiques du corps humain pour rattraper les conditions de confort et remédier aux sollicitations du climat.

Ces zones de performance proposent des techniques ou dispositifs (ventilation, humidification, chauffage...etc.) dans le cas où les segments qui représentent le mois en question par le couple (température / humidité) sortent de la zone de confort.

Pour se servir de ces diagrammes on a besoin de procéder par étapes :

- 1/ Récolte des données climatiques –de 10 à 50 ans- (Températures minimales, Températures maximales) (Humidité minimale et maximale) pour chaque mois.

- 2/ Si on travaille sur le diagramme de GIVONI, on doit représenter les mois (12) par des segments dont les deux points ont les coordonnées (T.min, Hr.max) (T.max, Hr.min).

3/ La lecture selon la position du segment dans les différents zones de confort ou de préformance.

4/ Détermination des besoins, techniques, dispositifs nécessaires pour chaque mois.

9.1.3. Méthode des tables de Mahoney :

Cette méthode est basée sur un diagnostic successif :

1/ Remplir les données climatiques dans le tableau 1 et le calcul de la moyenne annuelle, la maximale, la minimale et l'amplitude annuelle de la température extérieure (High, Low, AMR, AMT).

2/ Selon l'amplitude annuelle calculée on choisit les limites de confort puis on détermine la sensation (froid, chaud, confort) (tableau 2).

3/ Sélection des indicateurs et confirmation selon les situation des indicateurs (H1, 2,3, A1, 2,3) (tableau 2).

4/ Dans les tableaux 3 et 4 cochons sur les lignes dont les indicateurs répondent au critères nécessaires.

5/ Lecture des recommandations spécifiques et détaillées. (**Voir annexe**)

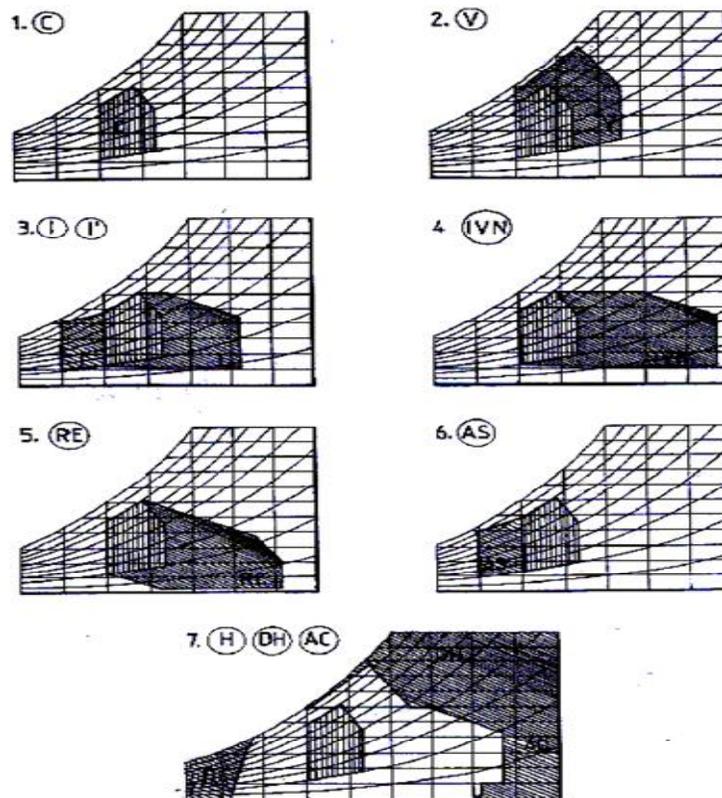


Fig. 1

1-C : Zone de confort

2-V : Zone de ventilation

3-I : Zone d'inertie thermique

4-IVN : Zone d'inertie thermique et de ventilation naturelle

5- RE : Zone de refroidissement évaporatif

6- AS : Zone du captage solaire

7- H, DH, AC : Zone de ventilation mécanique

Fig 1.12: Diagramme bioclimatique et les zones d'influence des paramètres climatiques

Source : Alain Chatelet et Al ; 1998

9.1.4. La méthode des indices PMV et PPD :

Comme l'on a déjà expliqué, la sensation de confort thermique dans une ambiance ne dépend pas seulement des conditions physiques de l'équilibre thermique, mais elle dépend aussi d'autres conditions purement personnelles et relatives à l'état de santé, l'âge, le sexe, l'habillement et l'acclimations.....Ets.

La méthode "PMV" et "PPD" propose l'évaluation et la mesure des ambiances à l'intérieur des bâtiments, selon les deux indices, PMV (Predicted Mean Vote) qui donnent l'avis moyen des appréciations du confort. Le PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) indique le nombre prévisible des non-satisfaits. [André Bonhomme ; 1986]

Le vote moyen prévisible "PMV" :

L'indice PMV exprime la réponse physiologique moyenne de la sensation pour un nombre de personnes placées après l'équilibre thermique d'une ambiance.

+ 3	+ 2	+ 1	0	- 1	- 2	- 3
Chaud	Tiède	Léger ment tiède	Neutre	Léger ment frais	Frais	Froid

Tab 1.7 : L'échelle des réponses demandées aux sujets.

Source : André Bonhomme ; 1986.

Les valeurs numériques du PMV sont calculées par des équations ou des systèmes informatisés en tenant compte des paramètres suivants :

- le métabolisme énergétique.
- Résistance thermique des vêtements.
- Température de l'air.
- Température moyenne de rayonnement.
- Vitesse de l'air.

Pourcentage prévisible d'insatisfaits :

Le PPD est le pourcentage des personnes votants au delà de **-2** et **+2** ; ces derniers se déclarant insatisfaits thermiquement ; donc, l'indice PPD est en fonction des valeurs de PMV ; notons qu'il est recommandé que les valeurs de PPD ne doivent pas dépasser les **10%** pour assurer un bon confort.

Pour les cas normaux l'indice PMV est de **80%** à **95%**, selon les exigences de confort et les raisons d'économie de l'énergie.

La norme internationale **ISO 7730** propose des graphiques précisant les zones de confort pour diverses températures opératives optimales associées à des conditions variables.

10. Conclusion :

Le confort thermique est une notion subjective qui permet l'obtention de conditions optimales pour tous les systèmes fonctionnels de l'organisme.

N'importe quel architecte soucieux de l'importance de concevoir des bâtiments adaptés aux besoins physiologiques de l'utilisateur (le confort thermique) doit passer avant tout par, l'analyse des éléments du confort, la détermination des besoins thermiques et l'évaluation des conditions de l'équilibre thermique selon les différentes méthodes.

Concernant la méthode de la température résultante et effective, ces notions permettent de tenir compte des différents facteurs physiques influençant la sensation de confort thermique ; cependant, cette notion est soumise à des références subjectives qui peuvent être très changeables. Ces indicateurs ne peuvent à eux seuls constituer l'évaluation du confort.

La zone de confort -utilisée dans les diagrammes bioclimatiques- est formée par un ensemble de points d'un diagramme psychrométrique correspondant à des températures et humidité qui procurent la même sensation de confort, mais le diagramme de S.Zokolay est le plus adéquat parce qu'il prend en considération la zone de confort y compris les zones de performance spécifiques à chaque région, définie par les données climatiques et l'altitude, ce qui donne des résultats plus proches aux besoins climatiques -thermiques- du lieu.[Alain Châtelet et al 1998].

La méthode de Mahoney présente l'avantage d'intégrer certaines autres variables sociales et fonctionnelles en dépit des conseils et orientations de conception qui sont données à la fin du diagnostic qui nous semble beaucoup plus orientées vers des solutions limitées et parfois non précises. Dans la suite de « **l'annexe A** » on a essayé, à travers l'exemple de la ville de Ouargla, de présenter et comparer les trois méthodes de l'analyse bioclimatique les plus utilisées par les concepteurs.

Il est donc souhaitable de laisser le choix aux habitants pour qu'ils décident et réalisent en relation avec leurs références climatiques, sociales, économiques...etc. des conditions de confort favorable à leurs besoins ; ceci sous-entend :

- L'identification du climat.
- La détermination des besoins thermiques du climat.
- La prise en compte de l'individu (étude de l'impact).

La forme du bâtiment a été toujours considérée comme étant l'élément régulateur des transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. Le choix de la forme, des couleurs et des matériaux joue un rôle déterminant dans l'optimisation des conditions du confort à l'intérieur de l'ambiance. Nous pensons à une proposition des formes de maisons performantes et faciles à construire, comme nous spéculons que la méthode de l'indice PMV et PPD est une méthode qui superpose la mutation subjective et objective à la fois, pour concilier équilibre thermique et satisfaction de l'individu.

1. Introduction :

Le processus conceptuel d'un bâtiment équilibré du point de vue climatique doit comporter principalement une première partie concernant l'étude des éléments climatiques de la zone d'étude -climats chauds et arides- et l'impact de chaque élément.

Comme le bâtiment est conçu pour assurer les besoins biologiques de l'homme, la seconde partie vise à évaluer l'impact de chaque élément climatique en termes physiologiques. Cela implique la détermination des besoins thermiques des zones arides et la problématique maîtresse du climat.

L'étude de la conception d'édifices dans ces climats ne pose que des problèmes de confort au rayonnement solaire intense, aux températures élevées en liaison avec l'hygrométrie (l'aridité).

Elle doit donc s'organiser principalement en fonction des besoins thermiques suivants:

- 1- Limiter les captages solaires à travers les parois opaques de l'enveloppe (les parois verticales et horizontales).
- 2- Limiter les gains solaires par les parois vitrées (ouvertures).
- 3- Refroidissement évaporatif.
- 3- La ventilation nocturne.
- 4- L'utilisation de l'inertie thermique.

La façon la plus simple d'avoir une maison fraîche en été, c'est d'empêcher la chaleur d'y entrer. Mais beaucoup de bâtiments récents n'offrent pas une bonne protection contre la chaleur, car de vastes baies vitrées laissent librement entrer les rayons du soleil : De plus, les murs n'amortissent souvent pas les variations de température. Autant de caractéristiques qui provoquent un réchauffement rapide et important quand il fait chaud.

Plus on prend le problème en amont, meilleures sont les chances de le régler de façon efficace. Certains choix dans la **localisation**, l'**orientation** et la **conception** d'un bâtiment lui permettent d'être confortable hiver comme été, sans dépense énergétique excessive

Dans les climats chauds et arides, il est peut être nécessaire, et en tout cas confortable, d'abaisser la température intérieure des bâtiments. Ce refroidissement peut aussi être un grand consommateur d'énergie. Mais une fois les bâtiments construits selon les normes déjà définies, ils n'atteignent que la moitié des gains de chaleur, en offrant un confort thermique souvent acceptable. En apportant un soin particulier aux mesures de réduction des gains, on arrive encore à abaisser ce besoin de moitié, et cela toujours en garantissant un confort thermique optimal. Il est donc possible d'effectuer, à long terme, des économies d'énergie importantes dans le bâtiment. Ceci devrait se faire en coordonnant avec d'autres procédés qui peuvent améliorer la performance thermique. Ces derniers se divisent en deux types :

2. les mesures de la protection solaire :

Tant que la température de l'air extérieur est plus élevée que celle de l'air intérieur, les gains de chaleur doivent être limités de manière à éviter la surchauffe et à ne pas dépasser la quantité de chaleur qu'il sera possible d'évacuer pendant la période de refroidissement. Ceci signifie la présence et l'utilisation adéquate de protections solaires efficaces ; on doit donc chercher les meilleures solutions qui peuvent nous assurer une bonne protection des parois verticales de l'enveloppe, ainsi que la toiture des bâtiments.

Les systèmes de rafraîchissement permettent de refroidir des bâtiments pratiquement sans impact environnemental. Néanmoins, malgré des coûts de fonctionnement faibles, de tels systèmes représentent un investissement bien supérieur à une climatisation classique.

Si l'on décide d'installer un système de rafraîchissement, il est donc important d'analyser soigneusement les caractéristiques du bâtiment à refroidir et d'adopter toutes les mesures permettant de limiter les besoins en froid.

Cette partie présente les principes, stratégies et techniques permettant de limiter ces besoins.

2.1. Limiter le captage solaire à travers les parois opaques de l'enveloppe:

Les parois de l'enveloppe exposées au soleil reçoivent des radiations électromagnétiques par rayonnement. Ces dernières sont transformées sous forme de chaleur qui se déplace dans les composantes des parois pour s'introduire à l'intérieur de l'espace et participer à la surchauffe de l'espace habitable. L'importance de ce phénomène physique et la sévérité du problème dépend de:

- 1- L'altitude.
- 2- L'heure, le jour et le mois.
- 3- L'orientation, les dimensions et la géométrie des parois de l'enveloppe (Est, Ouest, Sud, Nord, horizontal, incliné, courbé...etc.).

Les surfaces verticales **Est** et **Ouest** reçoivent plus d'énergie solaire par rapport aux surfaces **Nord** et **Sud** mais les surfaces horizontales reçoivent le maximum par rapport à toutes les surface du fait que les rayons solaires, surtout à midi, sont presque perpendiculaires aux plans horizontaux.

Les parois sous l'ombre reçoivent moins de chaleur que les parois exposées au soleil, mais cela n'empêche que le transfert de chaleur par conduction de l'extérieur vers l'intérieur augmente aussi la température interne.

De nombreuses études ont permis d'établir que la température intérieure idéale en été se situait entre **22 C°** et **26 C°**. [A. Konya & B. Givoni ; 1980]

Dans cette plage de températures, la très grande majorité des occupants d'une pièce se disent confortables.

S'il n'y a aucun système de climatisation, les seuls moyens d'empêcher la température de monter rapidement dans une pièce, par une chaude journée d'été, consistent à *réduire l'entrée de chaleur en provenance du dehors*. Il faut, pour parvenir à cette dernière situation, *diminuer les échanges d'air entre l'extérieur et l'intérieur de la résidence, couper l'apport de chaleur par le rayonnement à travers les fenêtres et empêcher les parois et les plafonds exposés au soleil de se réchauffer durant la journée.*

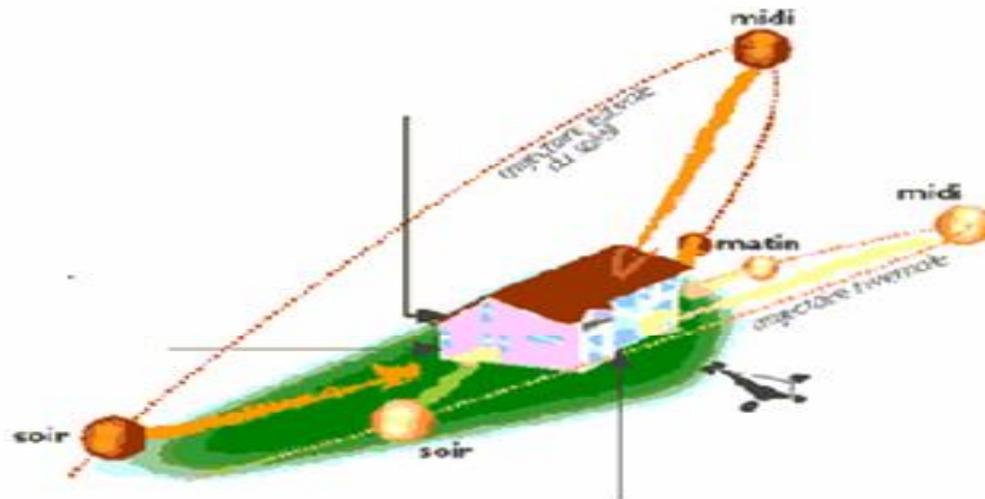


Fig 2.1 : Effet du soleil sur l'enveloppe du bâtiment

Source : Camille Gagnon ; 1995

Au cours d'une chaude journée d'été ensoleillée, la surface la plus exposée au réchauffement est le toit. C'est logique si l'on étudie le mouvement du soleil durant ces journées, on constate qu'il se lève au nord-est pour s'élever dans le ciel, en se déplaçant vers le sud pour atteindre son zénith à midi. Il redescend ensuite en se déplaçant vers l'ouest pour finalement se coucher au nord-ouest. C'est à midi qu'il tape le plus fort (voir **figure 2.2**). Ce moment, c'est surtout sur les toitures qu'il agit. Ces dernières, deviennent très chaudes et communiquent cette chaleur à l'air dans l'espace habitable. Cet espace atteindra très facilement des températures de **50 C°**. « *Home Ventilating Institute* », un organisme américain spécialisé, nous parle même de températures aussi élevées que **65 C°**, à certains moments.

La ventilation naturelle de cet espace ne permet pas toujours un refroidissement efficace. Même quand le soleil aura perdu de son mordant, cette enveloppe surchauffée continuera à fournir de la chaleur à la résidence et contribuera ainsi à la réchauffer. Par exemple, la température de l'air dans les pièces adjacentes au plafond augmentera de près de **6 C°** en une **heure** seulement. Il est évident que la résidence sera beaucoup moins confortable en fin de journée.[Camille Gagnon ; 1995]

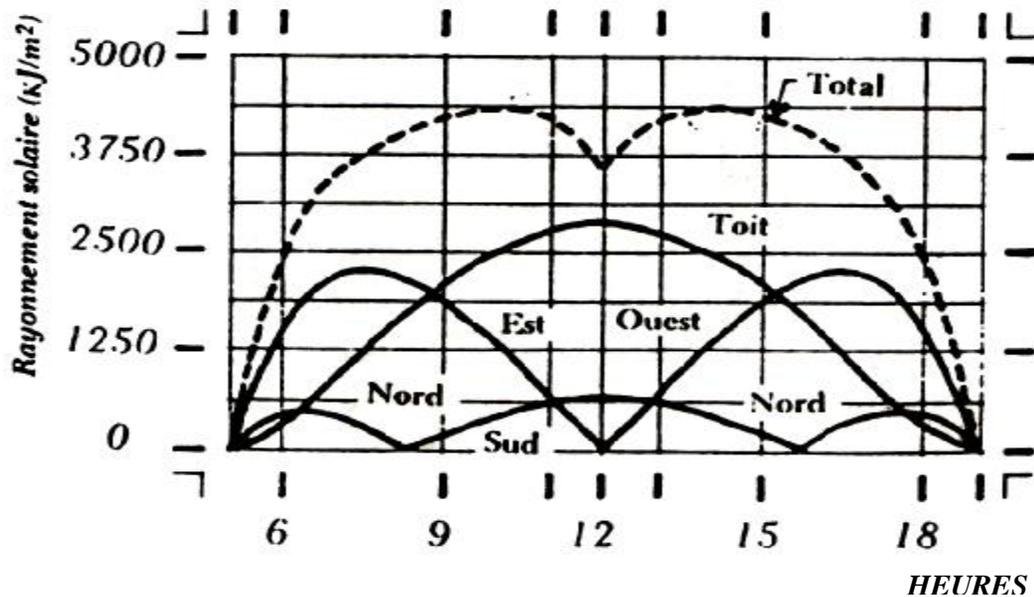


Fig 2.2 : Intensité de la radiation solaire reçue par les surfaces de l'enveloppe du bâtiment (toit +04 orientations) en fonction de l'heure sous un climat chaud.

Source : Roger Camous ; 1979

2.1.1. Protection de la toiture :

De toute l'enveloppe du bâtiment, le toit est le plus difficile à construire, et c'est lui qui a le plus d'effet sur le confort thermique d'un bâtiment. Les matériaux de toiture traditionnels des habitations sont coûteux et ne présentent qu'une faible performance thermique. Ils ont été conçus pour d'autres raisons techniques que climatiques. Le toit idéal absorbe aussi peu de chaleur que possible et offre une résistance presque complète au flux calorifique. Des études ont montré que plus on prend ce problème en amont, meilleures sont les chances de le régler de façon efficace.

2.1.1.1. Les toitures jardins :

Les toitures jardins, également appelées toitures vertes ou terrasses jardins, sont des systèmes de toitures spécialisés aménagés en jardins. Grâce à l'amélioration technique des matériaux et des éléments de toiture, les toitures jardins peuvent aujourd'hui être installées sous la plupart des climats chauds. Les concepteurs y trouvent une option de conception nouvelle et attrayante, notamment dans les zones urbaines, où les espaces verts sont relativement limités. Ils y voient par ailleurs une réponse possible aux problèmes de la protection de la toiture contre les gains de chaleur et la durabilité des enveloppes des bâtiments

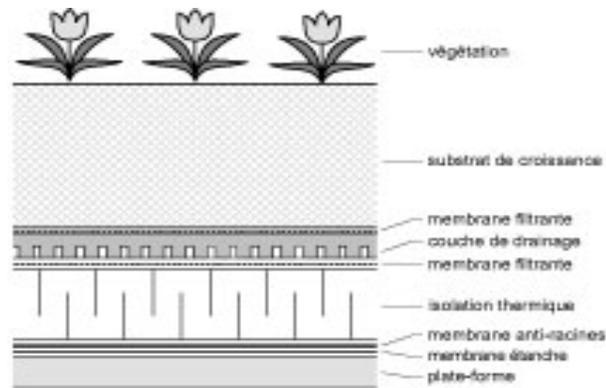


Fig 2.3 : Système de toiture à revêtement protégé imperméable avec toiture jardin
Source : K.Y. Liu et A. Baskaran ; 2005

Les toitures jardins, que l'on peut installer sur un revêtement conventionnel ou un revêtement protégé imperméable (**figures 2.3**), nécessitent des éléments additionnels indispensables à la croissance de la végétation : une couche anti-racines, une couche de drainage, une membrane filtrante et un substrat de culture. Ces éléments typiques des toitures jardins et leurs fonctions sont résumés dans le tableau 1.

Éléments	Fonctions
Membrane anti-racines	Minimiser les dommages des racines à la membrane. Cet élément pourrait être un agent chimique incorporé à la membrane ou un écran physique, type couche de PVC, de polyester ou de polyéthylène.
Couche de drainage	Enlever les eaux excédentaires du substrat de croissance. Cet élément pourrait être une couche de gravier, des panneaux de mousse polymère ou un matelas polymère très poreux.
Membrane filtrante	Empêcher les fines particules du substrat de croissance de boucher la couche de drainage. Cet élément est généralement un filtre géotextile.
Substrat de croissance	Supporter la croissance des plantes. Sa composition et sa profondeur dépendent de la végétation choisie. Le sol normal est habituellement remplacé par un substrat de croissance artificiel léger pour réduire la charge structurale.
Végétation	Les plantes doivent être choisies pour leur adaptabilité aux conditions climatiques locales. Certaines plantes et certains climats exigent parfois l'installation d'un système d'irrigation.

Tab 2.1 : Éléments additionnels typiques (avec leurs fonctions) des toitures jardins.
Source : K.Y. Liu et A. Baskaran ; 2005

D'après une étude comparative de performance entre la toiture conventionnelle et la toiture jardin dans un climat chaud, les chercheurs de l'IRC/CNRC ont conclu qu'en été, le flux de chaleur qui passe par la toiture de référence crée un besoin énergétique moyen quotidien en climatisation de **6,5 à 7,0 kWh/jour**. Ce besoin en climatisation est inférieur à **1,0 kWh/jour** pour la toiture jardin, soit une réduction de plus de **75 %**. Ces valeurs de flux de chaleur sont celles de la toiture seulement, et elles ne concernent aucun élément de l'enveloppe du bâtiment. La toiture jardin a permis de mieux contrôler les gains de chaleur en été. Elle réduit les gains de chaleur de **95 %**, avec une réduction totale du flux de chaleur de **47 %** par rapport à la toiture conventionnelle. [K.Y. Liu et A. Baskaran ; 2005].

2.1.1.2. Les toits parasol :

Le toit parasol est l'une des techniques utilisées par l'architecture moderne pour l'amélioration du confort thermique à l'intérieur de l'espace. L'utilisation de ce système constructif permet une construction de qualité thermique, en effet, l'adaptation d'une double couverture au dessus de la toiture, permet la création d'un espace tampon entre la zone de température contrôlé – l'espace intérieur- et la partie de l'enveloppe qui subit les plus fortes contraintes thermiques en été -toiture – (**figure 2.4**). Ceci réduit très sensiblement une grande partie des gains de chaleurs reçues par la toiture terrasse. [J L Izard ; 1998]. Parmi les architectes qui ont adaptés cette technique on cite : le Corbusier. J Luis Sert, Pierre Bourrier (Arcelor House), Olivier Paré Didier Levasseur (Collège Guy Dolmaire).



Fig 2.4 : Système de toiture parasol – projet **Arcelor House Bruxelles**
Source : Pierre Bourrier ; 2003



Fig 2.5: Système de toiture parasol. Projet Collège Guy Dolmaire, Mirecourt
Source : K.Y. Liu et A. Baskaran ; 2005

2.1.2. Protection des parois verticales :

Les composants architecturaux qui permettent la protection des murs de façades contre les gains de chaleur sont nombreux; ils apportent d'incontestables avantages en termes de durabilité de l'enveloppe et d'économie en énergie, surtout pour les bâtiments qui se développent en hauteur, isolés ou fortement exposés aux conditions climatiques. L'efficacité des systèmes de protection des murs dépend de plusieurs paramètres tels que l'orientation, les dimensions et leur fonctionnement thermique, vis à vis du climat. A titre d'exemple, les revêtements de façade de type ventilée servent à assurer, grâce à des caractéristiques de haute qualité thermique, la protection efficace d'un bâtiment contre les actions combinées de la température et la radiation, gardant ainsi l'espace habitable au frais (**figure 2.6**).

En ce qui concerne l'aspect thermo-énergétique, grâce au bardage qui réfléchit partiellement les rayons du soleil, à la ventilation engendrée par la lame d'air, obtenant ainsi une réduction importante des coûts de climatisation ; les façades ventilées « *Granitech* » peuvent réduire durant les mois les plus chauds, la charge de chaleur sur l'édifice.

Enfin, ce système de construction, par "effet cheminée", active une ventilation naturelle efficace, d'où le terme de façade ventilée, assurant les avantages considérables d'élimination de la chaleur, pour un grand confort des logements. C'est justement en vertu de ses nombreux avantages et des profondes innovations technologiques qui le caractérisent, que le mur ventilé « *Granitech* » a de plus en plus de succès dans le monde de l'architecture contemporaine, laissant libre cours à l'interprétation des façades dans une optique moderne et innovante qui va de pair avec les exigences des projets et des performances les plus difficiles à satisfaire.

L'effet de la ventilation est au maximum lorsque celle-ci parvient à agir efficacement sur toute la façade, ce qui exige obligatoirement un dimensionnement très scrupuleux de la lame d'air, de manière à améliorer les prises et les évacuations d'air [Reggio Emila ; 2004].

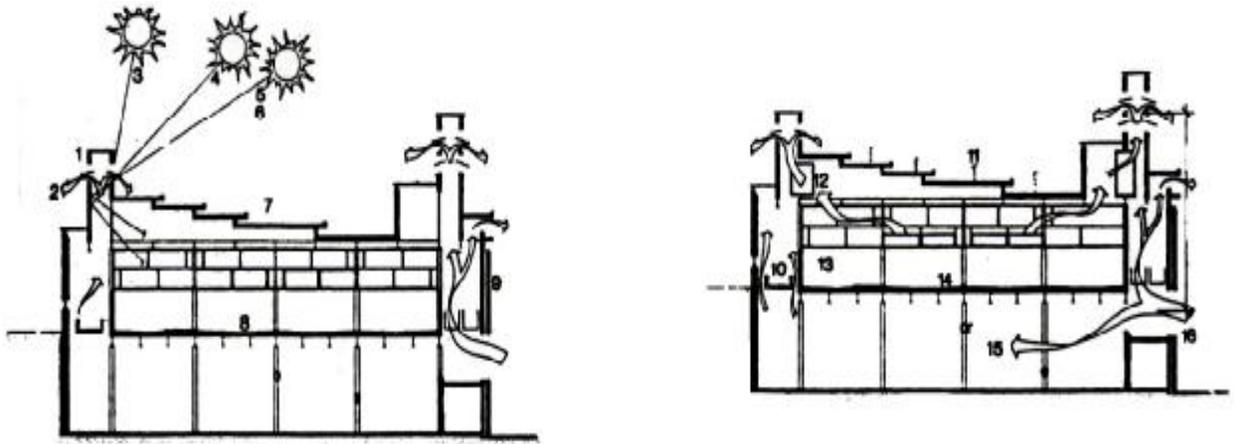


Fig 2.6 : Système mur ventilé *Granitech* de l'espace brasserie a Malte, a droite la nuit et a gauche le jour

Source : Pierre le Fever ; 2003

2.2. Limiter la pénétration des rayons solaires par les ouvertures

Il est clair maintenant que les ouvertures dans les régions chaudes doivent être prises en considération du point de vue climat pour éviter l'inconfort d'été provoqué par la pénétration des rayons solaires qui participent à la surchauffe de l'ambiance intérieure et l'augmentation de la chaleur dans le corps humain; il est donc nécessaire de penser à:

- 1- L'orientation des fenêtres (**voir figure 2.7**).
- 2- Leurs dimensionnements.
- 3- Leurs dispositions.
- 4- Le contrôle de l'ensoleillement
- 5- Le type de vitrage (**voir tableau 2.2**).

Les fenêtres doivent répondre seulement aux besoins de l'éclairage et la ventilation. C'est pourquoi, il est nécessaire de réduire leurs surfaces et de bien choisir leurs orientations et les moyens de protection contre les radiations solaires de l'été approximativement entre **10^h** et **18^h**. [Alain Chatelet & Al ; 1998]

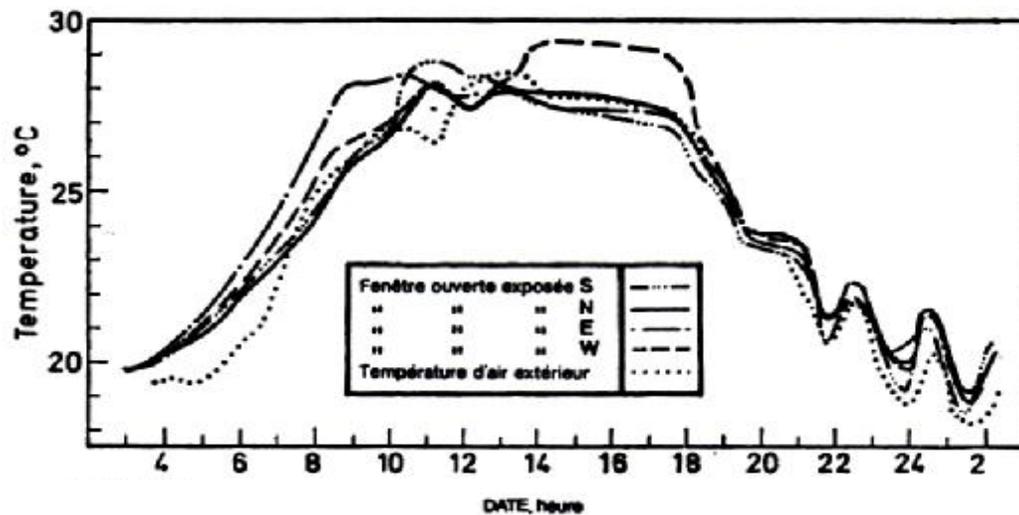


Fig 2.7 : Effet de l'orientation de l'ouverture sur la température de l'air intérieur

Source : Givoni B ; 1978

Types de verres	Transmission directe	Gain dû au rayonnement absorbé	Total
verre clair	74	9	836
verre à fenêtre	85	3	88
verre absorbant (lumière chaleur)	20	25	45
verre gris	30	30	60
verre laqué	38	17	55

Tab 2.2 : Gains de chaleur par divers types de verres

Source : Givoni B ; 1978

C'est par les baies que se font *les 2/3 des apports de chaleur en été il est donc très important de bien soigner leur conception*: quelle taille doivent-elles avoir, où doivent-elles se situer, comment doivent-elles être protégées pour :

- éviter les **surchauffes estivales**,
- assurer une **bonne ventilation**,
- procurer une **lumière suffisante** pour limiter l'éclairage artificiel.

Dans les climats chauds et arides les constructions sont adossées l'une à l'autre de façon à augmenter l'effet de compacité. Les fenêtres sont presque négligeables (**figure 2.8**) et leur fonction se limite à l'aération, l'éclairage et la ventilation. Même leur emplacement sur une hauteur de **1.80m** jusqu'à **2.20m** est justifié par l'augmentation de la vitesse du flux d'air entrant dans la maison.



Fig 2.8 : Vue sur ksar au Sud du Maroc, montrant la compacité des groupements, les dimensions et l'emplacement des ouvertures

Source : Dominique & Paul Mariottini ; 1998

La réduction des ouvertures permettra de diminuer les transferts thermiques par conduction, rayonnement et infiltration d'air, quelles que soient leur positions. Cependant, L'ouverture présente une résistance thermique inférieure à celle des murs pleins, ce qui a donc d'effet d'augmenter le coefficient de gains de chaleur. Il est donc nécessaire de minimiser ces surfaces surtout dans les régions chaudes par ce qu'elles présentent une source de chaleur difficile à contrôler.

2.3. Utilisation de l'inertie thermique :

Pour diminuer l'augmentation de la température intérieure dans une période chaude, on a besoin de minimiser les gains de chaleur par conduction qui sont dus au gradient thermique ($\Delta t = t_{ext} - t_{int}$). Cette quantité de chaleur est transmise par conduction, à l'intérieur du bâtiment, avec un taux très important qui participe à la surchauffe de l'espace. Ceci crée des sensations d'inconfort et des difficultés de survie à ces conditions [Daniel Halacy & George R. Clark ; 1999] ; il est nécessaire de minimiser ou de retarder le transfert de cette chaleur par l'utilisation des matériaux de bonne capacité thermique. [Grosгурin. C & Shmid; 1984]

Le choix des matériaux de construction, joue un rôle important dans le confort des locaux. En effet, l'inertie d'un bâtiment réduit et retarde l'effet des conditions extérieures (déphasage et décalage). Par conséquent, cette stratégie de conception est particulièrement adaptée au climat où la différence de température entre le jour et la nuit est importante

L'inertie thermique peut modérer la température et minimiser les besoins, en refroidissant par le stockage de la chaleur dans les matériaux qui composent les parois. Le temps de déphasage et l'amortissement de la chaleur sont les deux facteurs déterminants de la masse thermique (**voir figure 2.9**). Dans l'annexe « **B** », on trouvera les caractéristiques thermiques des principaux matériaux de construction. [Ralph M. Ibbotson ; 1985]

Ajoutons que « l'inertie thermique » évoque bien un comportement des immeubles soumis à des régimes thermiques variables dus principalement à la différence de température, les apports internes et les variations de l'ensoleillement au cours des journées chaudes de l'été. **Plus l'inertie thermique est forte, plus l'intérieur restera dans des états de confort tolérables**, Plus l'inertie thermique est faible, plus l'intérieur variera avec les variations des flux.

Masse M (en Kg/m ²)	Inertie
Jusqu'à 100	Très faible
De 101 à 149	Faible
De 150 à 400	Moyenne
Plus de 400	Forte

Tab 2.3: Inertie thermique selon le rapport (masse totale / surface habitable)

Source : CSTB, 1991

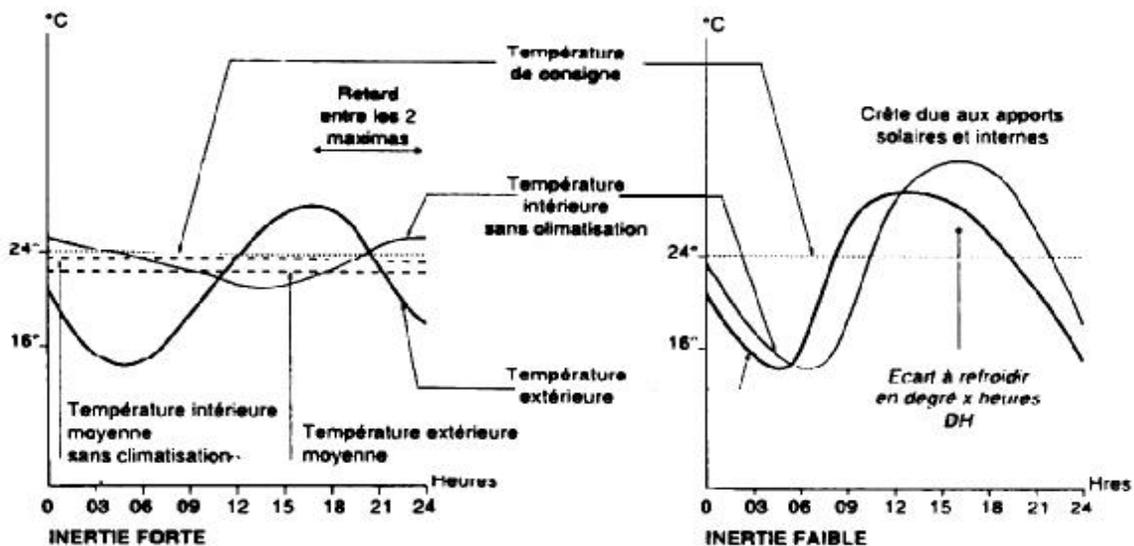


Fig 2.9 : Effet de l'inertie thermique en été.

Source : Daniel B ; 2001

Les conditions à respecter pour le bon fonctionnement de l'inertie thermique des bâtiments sont :

* Pour des locaux occupés de jour, l'inertie thermique du local doit être grande. Elle est maximale si un matériau dense (béton, maçonnerie) d'au moins **10 cm** d'épaisseur est apparent sur toutes les parois (plafond, plancher, murs). Des épaisseurs trop grandes (plus de **20 cm** depuis la surface) sont par contre inutiles.

* Il faut limiter autant que possible les surfaces recouvertes de matériaux isolant (faux plafonds, moquettes, lambrissages, tapisseries épaisses). Il convient toutefois de tenir compte des exigences acoustiques et esthétiques. Une solution de compromis consiste à laisser apparaître une partie importante (au moins **50 %**) de la structure massive.

* Pour des locaux qui ne sont occupés que la nuit, une faible inertie thermique peut être avantageuse, car elle permet un abaissement rapide de la température ambiante.

* Il est avantageux de répartir la capacité de stockage sur toutes les surfaces de la structure, il est erroné de concentrer cette masse sur un seul élément épais. Ce n'est donc pas la masse par mètre carré de plancher qui est déterminante, mais la masse par mètre carré de surface en contact avec l'air intérieur. [Roulet et al ; 1995]

L'efficacité de l'inertie thermique, comme un procédé de stockage et un moyen de retarder le transfert des flux de chaleur, dépend de la quantité des flux reçus par l'enveloppe. ***Pour que le système fonctionne dans de bonnes conditions et atteigne les objectifs voulus, il faut minimiser au maximum les apports de chaleur par l'enveloppe.***

Dans les climats chauds et arides, caractérisés par de fortes variations de la température diurne, la capacité thermique peut être mise à profit en choisissant des matériaux produisant un décalage calculé pour régler l'arrivée de la chaleur à l'intérieur du bâtiment, pendant les heures trop fraîches du petit matin. Les matériaux denses conviennent très bien pour cela.

3. les mesures du refroidissement passif :

Le refroidissement passif consiste à mettre à profit tout phénomène abaissant la température intérieure et ne consommant pas d'énergie. Il permet d'assurer, sous nos climats, un excellent confort estival, tout en évitant l'installation de coûteux systèmes de conditionnement d'air. En premier lieu, on cherche à réduire les gains de chaleur solaire (mesures de réduction des gains solaires). Dans la mesure où le climat le permet, on évacue l'excédent de chaleur en ventilant fortement. Cette technique d'usage général ne fonctionne que lorsque la température extérieure est plus basse que la température de confort. Si ce n'est pas le cas (climats chauds et arides), on peut appliquer le refroidissement passif par ventilation nocturne. Celui-ci consiste à refroidir la structure du bâtiment à l'aide de la ventilation naturelle.

Le système de refroidissement installé est évalué sur la base de la charge thermique d'été, qui est la somme de toutes les charges, internes et externes, qui affectent l'équilibre entre l'environnement intérieur à

rafraîchir et l'environnement immédiat. Cette dernière dépend fortement des caractéristiques architecturales de l'enveloppe du bâtiment.

Le système de rafraîchissement prévu pour les mois d'été doit être capable d'évacuer cette quantité de chaleur en tenant compte des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment.

3.1. La ventilation nocturne :

Dans la mesure où le climat le permet, on évacue l'excédent de chaleur en ventilant fortement. Cette technique d'usage général est applicable dans tout type de bâtiment (lourd ou léger), mais ne fonctionne que lorsque la température extérieure est plus basse que la température de confort. Si ce n'est pas le cas, on peut appliquer le refroidissement passif par ventilation nocturne. Celui-ci consiste à refroidir la structure du bâtiment à l'aide de la ventilation naturelle, de manière à permettre à cette structure d'accumuler la chaleur générée dans le bâtiment pendant la journée. Il est essentiel de penser au cours de la conception à l'organisation d'une ventilation naturelle à l'intérieur du bâtiment provoquée par l'écoulement des vents pendant la nuit (**figure 2.10**).



Fig 2.10 : Système traditionnel de ventilation transversale utilisé fréquemment dans les régions chaudes

Source : Alain Chatelet & Al ; 1998

Pour que la ventilation puisse servir à l'amélioration du confort, il est nécessaire de bien disposer les ouvertures, en tenant compte de la direction des vents dominants, la vitesse des vents et le besoin recherché à l'intérieur (est ce qu'il s'agit d'augmenter la vitesse ou de la diminuer ?), pour dimensionner et prévoir les emplacements des ouvertures. A ce titre, il faut bien souligner que cet objectif a été l'objet de plusieurs conférences telle la conférence de Milan 1995 « Proc. Of Healthy Buildings » dont on va essayer de tirer les principales recommandations.[Claude Alain Roulet & al; 2002].

Lors d'une étude de ventilation naturelle, le régime des vents doit être étudié. La rose des vents (**figure 2.11**) permet de visualiser les directions des vents dominants et, ainsi, de pouvoir disposer de façon adéquate les ouvrants.

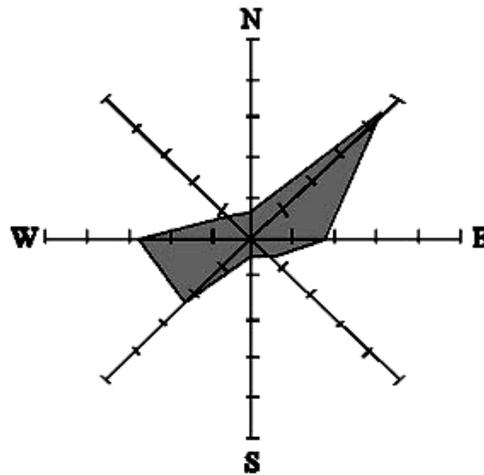


Fig 2.11 : La rose des vents adaptée aux régions chaudes

Source : Zitouni, A., 1996

Les gains de chaleur doivent être limités de manière à éviter la surchauffe et à ne pas dépasser la quantité de chaleur qu'il sera possible d'évacuer pendant la période de refroidissement.

Pour le refroidissement par ventilation nocturne, l'amplitude des variations de la température de l'air extérieur doit être importante (**minimum 5°**).

[Claude Alain Roulet ; 2002]

Tant que dans les climats chauds et arides la température extérieure est inférieure à la température intérieure (en général pendant la nuit), des ouvertures ou même des cours sont pratiquées dans la maison de manière à permettre à l'air chauffé par la structure du bâtiment de s'échapper, et à l'air frais extérieur de s'infiltrer. Le bâtiment est ainsi aéré et refroidi pendant cette période.

L'utilisation de la ventilation pour abaisser la température intérieure et diminuer les besoins en réfrigération ne peut fonctionner que si certaines conditions sont réunies. Notons qu'il n'est pas toujours possible de les satisfaire dans des bâtiments existants qui n'ont pas été conçus pour cela. Ces conditions sont données ci-dessous.

* Plusieurs configurations sont possibles pour la ventilation nocturne (**figure 2.12**), les ouvertures de ventilation doivent être correctement dimensionnées et leur position doit être adaptée à la configuration prévue.

* Le haut des ouvertures assurant la ventilation dans chaque local doit se situer le plus haut possible. En effet, pour un transfert de chaleur maximal avec les parois, la surface d'échange convective doit être la plus grande possible

* Les ouvertures doivent être orientées autant que possible de façon que les entrées d'air soient exposées au vent dominant, en période de refroidissement, et que les sorties d'air se trouvent sous le vent.

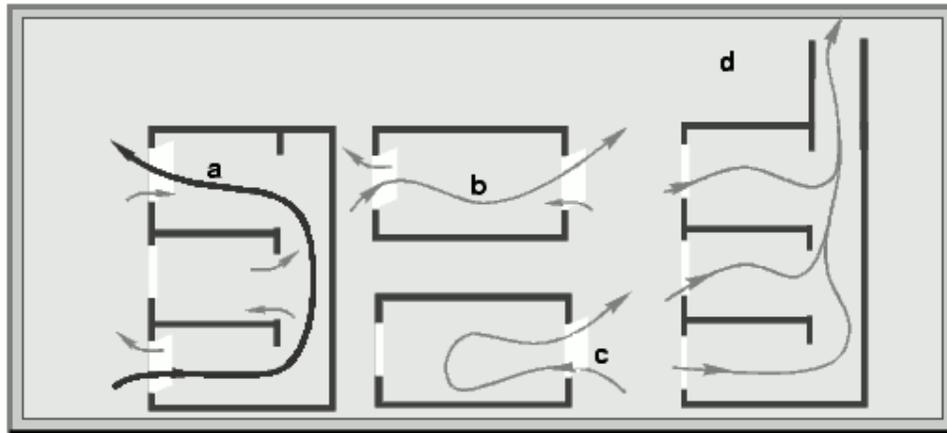


Fig 2.12: Configurations de ventilation naturelle a) ventilation à deux ouvertures ; b) ventilation traversante ; c) ventilation à ouverture unique ; d) ventilation avec cheminée.

Source : Claude Alain Roulet ; 2002

* Si le volume à ventiler est d'une faible hauteur, il faut favoriser la ventilation naturelle traversante. Si ceci n'est pas possible, les ouvertures doivent comprendre deux éléments semblables séparés par une distance verticale maximale.

* Pour un bâtiment à plusieurs niveaux, les sorties d'air doivent être beaucoup plus grandes que les entrées et se situer le plus haut possible dans le bâtiment. Il faut en effet éviter que l'air préchauffé par le bas du bâtiment ne sorte par les locaux habités supérieurs. Le rapport entre la surface des ouvertures d'entrée et de sortie doit être calculé pour avoir un niveau neutre au-dessus du dernier niveau ventilé.

* Une surélévation du bâtiment facilite la construction des grandes sortie d'air. S'il n'est pas possible de satisfaire cette condition, on peut ventiler le niveau supérieur indépendamment, ou l'équiper d'un ventilateur d'extraction (**figure2.13**).

* Un refroidissement efficace n'est atteint que si les ouvertures de ventilation sont fermées pendant la journée et ouvertes la nuit.

* Il n'est pas possible d'utiliser une installation de ventilation mécanique à double flux à haute pression pour le refroidissement passif. [Claude Alain Roulet ; 2002]

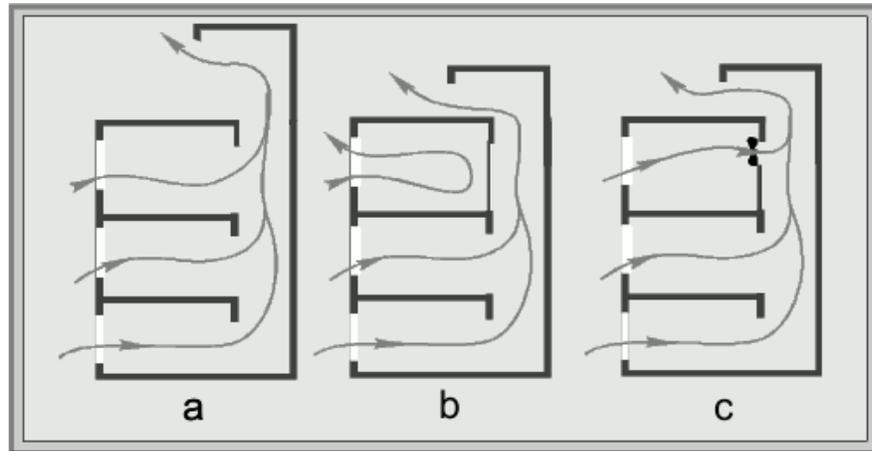


Fig 2.13 : Moyens disponibles pour refroidir les derniers étages. Voir aussi Figure 10, d.

a) Grande ouverture haute. b) Ventilation autonome du dernier étage. c) Ventilateur d'appoint.

Source : Claude Alain Roulet ; 2002

Le refroidissement passif par ventilation nocturne permet généralement d'atteindre des températures plus basses ou d'éliminer plus de chaleur que la ventilation diurne. Il n'est cependant applicable qu'aux bâtiments ayant une inertie thermique suffisante [Roulet et al ; 2003]

3.2. Le refroidissement par évaporation :

Dans les régions chaudes et arides, la notion de confort est très attachée à l'hygrométrie, cette dernière est très faible (le degré hygrométrique), ce qui donne un mouvement d'air sec.

Ce dernier peut provoquer des sensations d'inconfort remarquées par des difficultés de respiration et d'un risque d'étouffement.

L'augmentation du taux de l'humidité dans l'air par l'évaporation de l'eau, la couche végétale, les bassins et les fontaines artificielles peuvent améliorer la sensation thermique en minimisant la chaleur sèche par une sensation de fraîcheur agréable pour l'ambiance intérieure.

L'obtention de la fraîcheur est le résultat de l'échange couplé entre l'air en circulation et l'eau en contact direct avec ce dernier. L'eau en circulation constante à l'intérieur d'un dispositif (**figures 2.14**) atteint une température d'équilibre égale à la température humide de l'air introduit.

Le transfert de chaleur et de masse entre l'eau et l'air abaisse la température sèche de l'air et augmente le taux d'humidité -température humide constante. [Zitouni, A ; 1996]

En effet, dans les régions chaudes le refroidissement évaporatif est un système désirable pour le confort physiologique. [John Peck ; 1982]

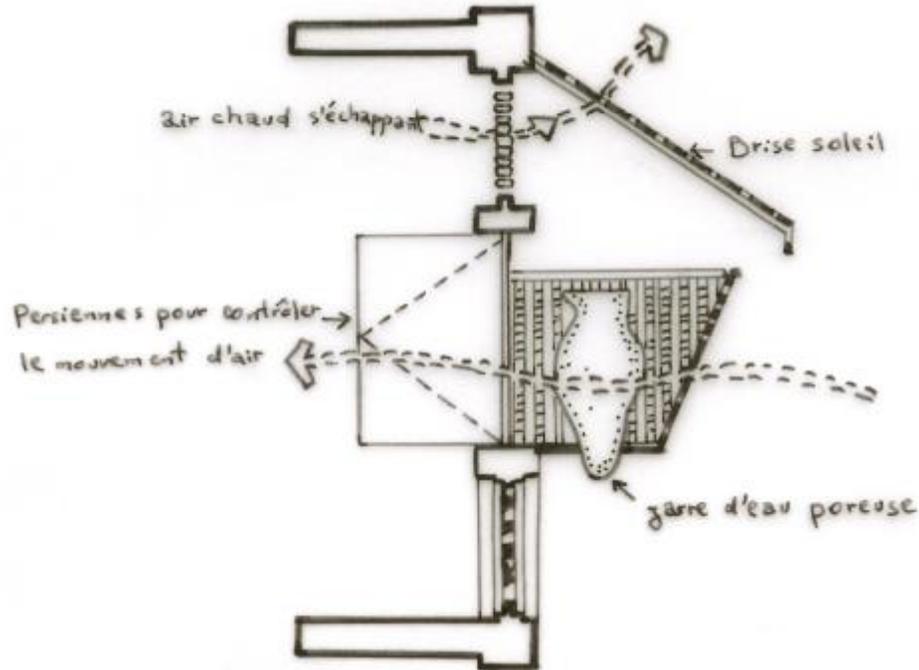


Fig 2.14 : Système traditionnel de refroidissement évaporatif utilisé en Proche Orient

Source : Bouchahm. Y ; 2003

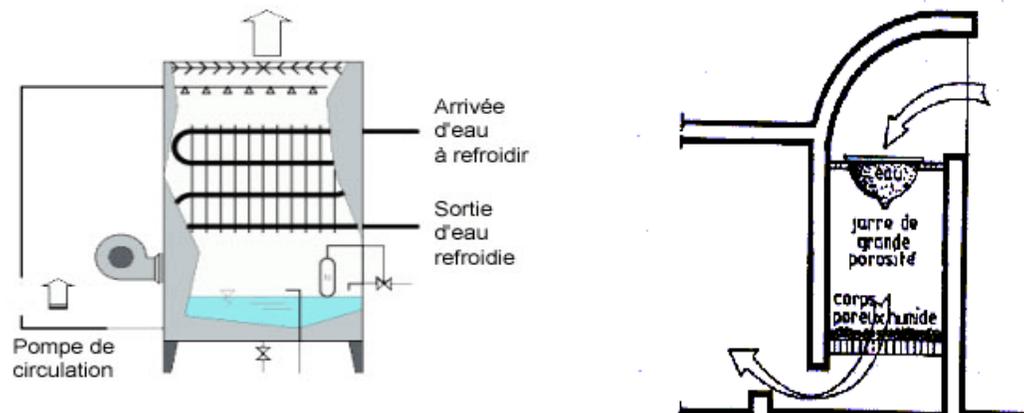


Fig 2.15 : Dispositifs de refroidissement évaporatif a droite système traditionnel, a gauche système de rafraîchissement moderne en passant l'air chaud sur des conduites d'air refroidie

Source : Alain Chatelet & Al ; 1998

Les techniques passives ne suffisent pas à elles seules à maintenir une température de confort acceptable, d'où l'intégration d'un système de refroidissement évaporatif (voir figures 2.15, 2.16 & 2.17), permettant une nette amélioration de la situation avec une baisse de température de l'ordre de 5K [NEZZAR, Salah ; 1999].

Ces dernières années, vu l'intérêt croissant apporté aux économies d'énergie dans le bâtiment, les techniques traditionnelles de la ventilation naturelle se sont rapprochées les unes des autres, au point de converger vers ce qui a été nommé **Les tours aéroréfrigérantes à voie humide** : c'est un échangeur de chaleur "air/eau", dans lequel l'eau à refroidir est en contact direct avec l'air ambiant. L'eau chaude est pulvérisée en partie haute de la tour aéroréfrigérante et ruisselle sur le corps d'échange. L'air qui traverse le système de ruissellement est rejeté dans l'atmosphère. Le refroidissement s'effectue principalement par évaporation de l'eau ; l'efficacité du système est liée à la conception de la tour aéroréfrigérante ainsi qu'aux conditions atmosphériques (température et humidité) et de la distribution de l'air [Nicolas Heijmans ; 2002].

Fig 2.16 : Tours aéroréfrigérantes à voie humide
Source : B. Pironin / Aquatech ; 2003

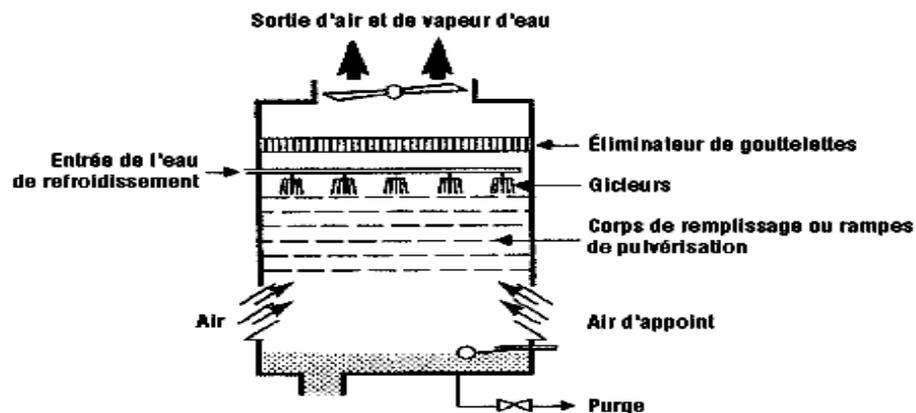
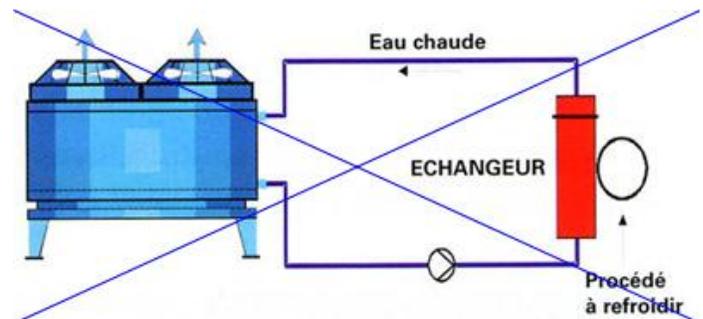


Fig 2.17 : Système de refroidissement d'air chaud après récupération
Source : Zitouni, A ; 1996

3.3. Les capteurs à vent :

C'est un élément de l'habitat traditionnel qu'on rencontre en Egypte, au Moyen-orient et en Afrique du Nord. Ses formes varient d'une région à une autre, mais le principe est toujours le même.

C'est un système de refroidissement passif utilisé dans les climats chauds et arides, avec des cheminées pour capter le vent ou pour faire remonter l'air chaud. On utilise ce phénomène thermique naturel pour évacuer la surchauffe de l'intérieur d'une construction en facilitant la sortie de l'air chaud à travers des ouvrants en partie haute. Ce tirage thermique peut induire une dépression intérieure susceptible d'aspirer l'air plus frais du dehors à travers des ouvrants en partie basse. Les tours à vent iraniennes, le *malqaf* égyptien: voilà toute une série d'exemples empruntés à l'architecture traditionnelle des pays chauds, pour lesquels nous conseillons de lire la bibliographie spécifique : Fathy. H et Pinon. P, "Maisons en pays islamiques: « modèles d'architecture climatique », L'Architecture d'aujourd'hui, n. 167, REZA Daraie. N, "Et le fond de l'air sera frais", "Confort thermique", en Architecture, n. 397. D'autres systèmes ont été inventés par les chercheurs tels que : **Le système de refroidissement Aera** : un système constructif de fabrication des cheminées de ventilation, qui assure un taux optimal de renouvellement d'air et réduit les besoins énergétiques ; il convient donc tout particulièrement aux besoins de la ventilation et de l'humidification de l'air (<http://www.schiedel.com>) dans les régions à climat chaud et aride [PHP-Nuke ; 2003].

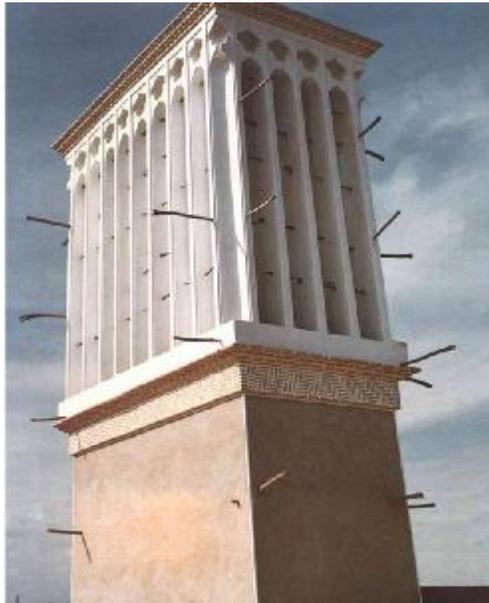


Fig 2.18: Cheminée de ventilation multidirectionnelle utilisée dans les pays du Golfe
Source : Bouchahm. Y ; 2003

3.4. La cheminée solaire:

Les cheminées thermiques ou solaires, sont une forme très efficace pour la création d'un courant d'air – augmentation du débit de refroidissement d'air - à l'intérieur du bâtiment ; en effet, la portion supérieure de la cheminée est chauffée par le soleil, l'air chaud monte et sort par l'ouverture au sommet et l'air plus frais s'infiltré à l'intérieur du bâtiment par des ouvertures ombragées en bas.

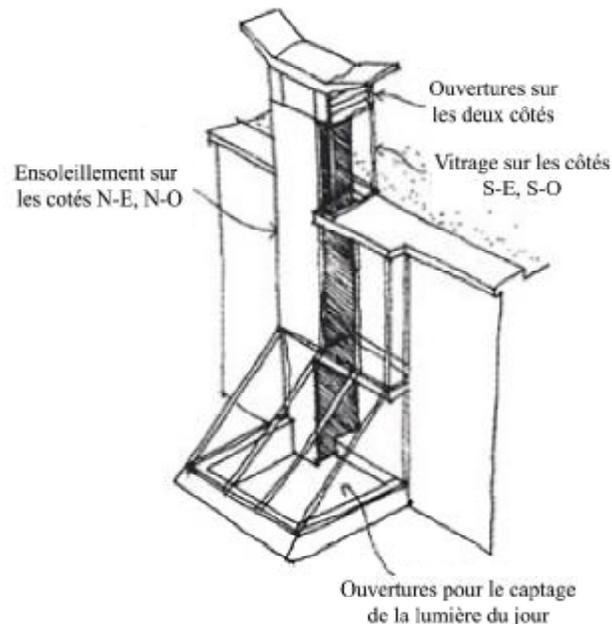


Fig 2.19 : Cheminée solaire pour le projet « Bâtiment durable » Montréal, Québec

Source : L'oeuf Pearl Poddubiuk & AL ; 2005

Enfin, les bénéfices résultant de l'intégration de la composante énergétique dans le Processus de la conception architecturale ne se limitent pas à **la minimisation des gains de chaleur entrant dans le bâtiment**. En effet, il est prouvé qu'une approche interdisciplinaire engendre une synergie qui favorise des améliorations quant au programme fonctionnel, aux choix des systèmes de refroidissement et à l'expression architecturale.

Le choix de la méthode du refroidissement approprié dépend de certaines considérations fonctionnelles (résidence, école, dortoir, l'immeuble de bureaux, atelier; laiterie ou autre structure de l'animal; nourriture, le liquide, ou stockage de la médecine), le coût du refroidissement exigé et surtout les différentes conditions climatiques (terrain, sol, température, humidité, vent, plafond de nuages).

La considération première dans tout projet « refroidissant passif » devrait être la minimisation du transfert de chaleur à l'intérieur de l'espace habitable, donc, réduire les besoins du refroidissement et du confort thermique.

3.5. Puits provençal :

Le puits provençal est un système de rafraîchissement méconnu hérité des romains qui peut réduire la température de 5 à 10°C dans la maison, les jours de chaleur. Le principe du puits canadien « provençal » est d'une grande simplicité ; il repose sur le fait que dans le sol, vers deux mètres de profondeur, la température ne varie que de quelques degrés au cours de l'année et généralement proche de 14°C. En été, elle est donc très inférieure à celle de l'air extérieur ; il suffit donc, de faire cheminer l'air extérieur (30 à 100 mètres) dans un tuyau d'au moins 20 cm enterré à environ deux mètres de profondeur pour qu'il se refroidisse avant d'être envoyé dans la maison. Il est inspiré dans ce tuyau par un ventilateur avant de pénétrer dans les locaux à rafraîchir. Ce parcours souterrain suffit à lui faire perdre environ 5 à 10°C.

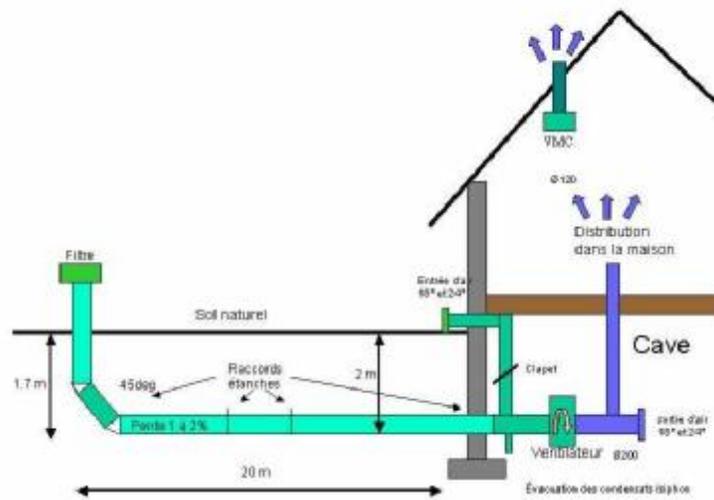


Fig 2.20 : Puits provençal ou canadien

Source : M. Z. Rousseau ; 1998

4. Conclusion :

En été, la quantité de chaleur à évacuer dépend de nombreux facteurs dont certains, comme l'ensoleillement, varient au cours de la journée. Les facteurs qui ont l'impact le plus important sur les charges de refroidissement sont les suivants :

- Transfert de chaleur par conduction au travers des surfaces opaques
- Rayonnement solaire à travers les surfaces transparentes

Lorsqu'un bâtiment est conçu en intégrant l'ensemble des dispositifs Présentés précédemment, le besoin de rafraîchissement est réduit dans des proportions considérables. Bien que ces techniques s'appliquent plus facilement au stade de la conception d'un bâtiment neuf, de nombreuses possibilités existent aussi pour des bâtiments existants, avec un coût raisonnable.

Alors, après avoir identifié les besoins thermiques des régions chaudes et arides résumés dans le tableau ci-dessous, il est essentiel de penser à l'application des solutions qui intervient en amont du projet pour résoudre les problèmes du confort thermique, par ce que finalement, tous les facteurs introduits au cours de l'esquisse seront exprimés en objet architectural.

L'enveloppe ainsi réalisée doit protéger l'homme et lui procurer une ambiance qui lui facilite une activité rentable, ceci exige notamment:

- Une température de l'air convenable.
- Une humidité satisfaisante.
- Un éclairage correct.
- Une ventilation adéquate.

Les climats de notre étude sont caractérisés par des écarts importants de température journalière, l'air est très sec, si l'on maintient la température de l'ambiance intérieure égale à la température moyenne ($T_{\text{moy}} = t_{\text{int}}$). Cela peut aider l'homme à rester dans les limites admissibles.

Cette condition peut se réaliser en utilisant en premier lieu des formes architecturales appropriées et des matériaux bien choisis, en second lieu des procédés de refroidissement passifs peuvent être introduits pour la régulation du confort et l'optimisation des conditions de vie dans de tels climats.

Tab 2.4 :
Les moyens de la réduction des gains, la minimisation des besoins

	Besoins	Conduction	Convection	Rayonnet	Evaporation
E'TE	Limiter les gains de chaleur	Limiter les transferts de chaleur par conduction	-	Limiter les gains solaires	
	favoriser les pertes de chaleur	déphaser les variations périodiques de température	Favoriser la ventilation	Favoriser le refroidissement par rayonnement nocturne	Favoriser le refroidissement par évaporation

1. Introduction :

Nous passons à travers ce chapitre à l'étude du comportement thermique du bâtiment en été, à la définition exacte de l'influence de chaque phénomène thermique – climatique – sur le bâtiment, dont l'objectif est de définir le bilan général et d'évaluer l'importance de chaque mode de transmission de chaleur sur la quantité d'énergie reçue.

Au début, Un diagnostic d'évaluation des besoins énergétiques et des recommandations sera rendu obligatoire lors de l'étude ; Une détermination des besoins thermiques du bâtiment sera le résultat. Pour répondre aux exigences thermiques identifiées lors du diagnostic, l'influence des paramètres climatiques sur le bâtiment sera interprétée comme des flux de chaleur traversant le bâtiment en entrant ou en sortant, Ces derniers seront quantifiés par des équations mathématiques et physiques pour faciliter la manipulation des éléments du projet afin de minimiser l'impact de ces phénomènes sur l'ambiance intérieure.

Un ambitieux programme de recherche sera mis en place, portant notamment sur la modernisation durable des formes de bâtiments adaptés aux besoins thermiques du confort d'été dans les régions à climat chaud et aride et sur l'objectif de la réduction des gains énergétiques de chaleur et par là même à la maîtrise du confort intérieur par le choix d'une enveloppe de bâtiment à haute performance énergétique

En effet, Le discours sur l'enveloppe des bâtiments est relativement récent ; les traités anciens parlent de murs de façade, de toitures, ou de percements, mais ils ne les abordent pas comme un ensemble d'ouvrage formant une enveloppe. Le concept d'enveloppe est introduit et développé dans la théorie architecturale au 18^{ème} siècle ; il est défini comme une sorte de peau séparant l'extérieur de l'intérieur du bâtiment, cet épiderme doit contribuer à rendre l'intérieur confortable [Daniel. B ; 1997].

L'enveloppe doit filtrer et organiser, la lumière, les couleurs, l'ensoleillement, les vues, le **chaud** et le **froid**, tandis que les procédés de chauffage ou de refroidissement introduits au niveau des composants de la construction doivent corriger et stabiliser les ambiances dans l'effort de création d'une ambiance de confort intérieur indépendante de celle du site à l'extérieur [Wright .D; 1979]. Cette démarche qui vise la régulation du problème du confort en amont du projet doit être intégrée dans toute action ou souci dans l'avenir pour mieux cerner et impliquer la conception de l'enveloppe des bâtiments vers une nouvelle culture du confort basé sur une démarche de développement durable dont le but recherché est premièrement le confort et la santé des individus. De manière certaine, l'enveloppe a un impact direct et important sur le bien-être et la santé à travers les consommations qu'elle détermine fortement, ceci est dû à sa fonction de régulation des échanges entre extérieur et intérieur.

L'intensité des échanges à travers une enveloppe dépend du rapport de la superficie de l'enveloppe au volume intérieur, ce rapport dépendra de **la taille** et de **la forme** des bâtiments.

- Pour un même volume intérieur c'est la forme la plus compacte qui à le minimum de surfaces exposées, cela veut dire le minimum d'échanges avec l'extérieur.
- Pour une même forme ce sera le volume le plus grand qui aura proportionnellement le moins d'échanges à travers l'enveloppe.

D'une façon générale notre démarche est basée sur la modulation de l'enveloppe (forme, taille) afin d'aboutir à des modèles de formes passives par le biais de la science du bâtiment qui nous permet de fonder les critères d'évaluation des enveloppes et de leurs performances thermiques. On doit, en conséquence, mettre en place une stratégie qui va limiter le recours aux procédés de refroidissement

- 1- En limitant les apports solaires (choix de la forme, l'orientation, les masques environnementaux et architecturaux...).
- 2- En limitant les apports dus à la différence de température (graduants thermique).
- 3- En limitant les gains internes (les appareils, équipements).
- 4- En renforçant l'inertie thermique de l'enveloppe.
- 5- En favorisant le refroidissement par ventilation nocturne, évaporation et rayonnement nocturne. [Bernstein. D ; 1997].

La protection contre la radiation solaire semble être un objectif prépondérant à atteindre, afin obtenir un bilan énergétique optimal. En fait, le principe est simple ; la configuration du bâtiment (l'enveloppe) permet la pénétration de l'énergie solaire à l'intérieur, cette dernière se convertit en chaleur de façon à augmenter la température intérieure et les besoins en refroidissement par conséquence. Pour le maintien d'un équilibre thermique dans la période de surchauffe où la radiation solaire doit être évitée- cas de notre étude- nous pensons à la limitation des gains de chaleur qui entrent à l'intérieur du bâtiment par des moyens non mécaniques. Cela devrait se faire en comptant sur les procédés normaux de transfert thermique de la conduction de rayonnement et de la convection, en les quantifiant en relation avec la configuration du bâtiment (forme globale) pour pouvoir les manipuler et les minimiser par le biais de cette dernière.

Notre souci, à travers ce chapitre, sera donc de comprendre les phénomènes de transfert de chaleur et les lois physiques (appliquées à la thermique de bâtiment) qui les régissent afin de quantifier l'énergie entrant dans le bâtiment (le bilan global), et de définir l'influence des paramètres architecturaux sur le confort thermique.

2. Les Phénomènes thermiques dans le bâtiment :

Dans les climats chauds et arides, la plus grande part de l'énergie sera utilisée pour la climatisation ; le bâtiment subit des transmissions des flux de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur par différentes voies plus ou moins directes. [Sacadura1993] La figure- -illustre les échanges thermiques de chaleur dans le bâtiment en situation d'été.

Suite à cela, la température intérieure est augmentée pendant le jour grâce aux gains de chaleur qui provoquent des sensations de surchauffe insupportables. Pour l'amélioration du confort et la création des conditions optimales pour l'activité humaine, on a souvent recours à des consommations excessifs de l'énergie pour le refroidissement des bâtiments (voir tableau 3.1). La qualité du confort atteint par les procédés mécaniques est remise en cause au niveau économique, écologique et vital. Même les usagers ne l'apprécient pas, c'est pour cela que nous pensons en premier lieu à *diminuer la consommation d'énergies fossiles en minimisant les flux de chaleur entrant dans le bâtiment* en les laissant passer aux bons endroits et moments. [Banham. A ; 1986]

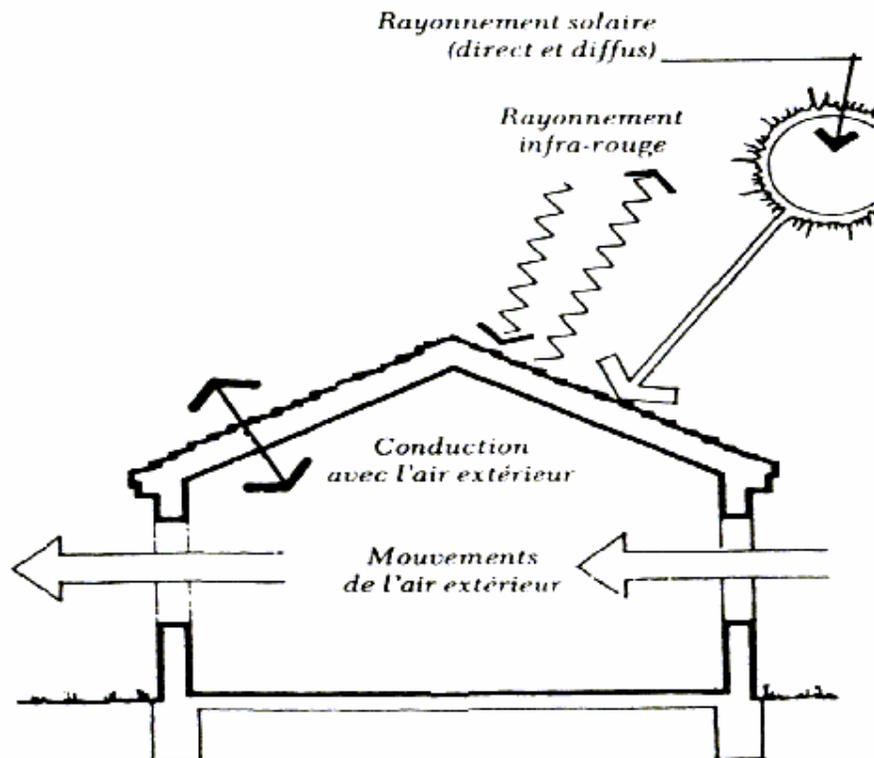


Fig 3.1 : Les échanges thermiques de chaleur dans le bâtiment en situation d'été.
Source : Donald Watson ; 1989

Consommations en kWh _{électrique} /m ² /an		
type de bâtiment	besoins	Valeurs typiques kWh _{électrique} /m ² /an
Bâtiment climatisé	refroidissement	14
Bâtiment climatisé de prestige	refroidissement	21

Tab 3.1 : La Consommation d'énergie électrique pour la climatisation des édifices

Source : Programme NATVEN ; 2001

Cette solution pourra nous entraîner à des implications ou la physique a déjà apporté des solutions et qui continue à être étudiée. En tout cas, Ce qui nous intéresse c'est leur influence sur les caractéristiques du bâtiment ; de ce fait, nous voyons qu'il ne faut pas se restreindre à examiner des solutions scientifiques (mathématiques) pour résoudre des problèmes dans le bâtiment, mais nous insisterons sur la prise en compte de ces solutions en amont du projet pour estimer au préalable toutes les modifications possibles lors de l'esquisse.

Avant d'examiner les transferts de chaleur dans le bâtiment nous attirons l'attention du lecteur que les théories liées à ces phénomènes seront simplifiées au maximum afin qu'ils soient intelligibles à la majorité des lecteurs. Les phénomènes de transfert impliqués sont la conduction thermique à travers les matériaux, La convection transfert de chaleur par renouvellement d'air, le rayonnement qui transporte de l'énergie par des ondes électromagnétiques.

3. Le transfert de chaleur :

C'est un processus par lequel de l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux aux températures différentes. La chaleur peut être transmise par conduction, convection ou rayonnement. Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant. Par exemple, la chaleur est principalement transmise par conduction à travers les murs en brique d'une maison ; [**W.C. Bond 1789-1859** ; Encarta 2005],

3.1. Transfert de chaleur par conduction :

La conduction thermique est un moyen de transmission de chaleur à travers les parois opaques ; ce phénomène est ressenti lorsque l'on chauffe une des extrémités d'une barre métallique, la chaleur se transmet par conduction vers l'autre extrémité. Le mécanisme de transmission de chaleur par conduction est déclenché par l'énergie de vibration des molécules les plus chaudes (agitées) vers les molécules les plus froides.

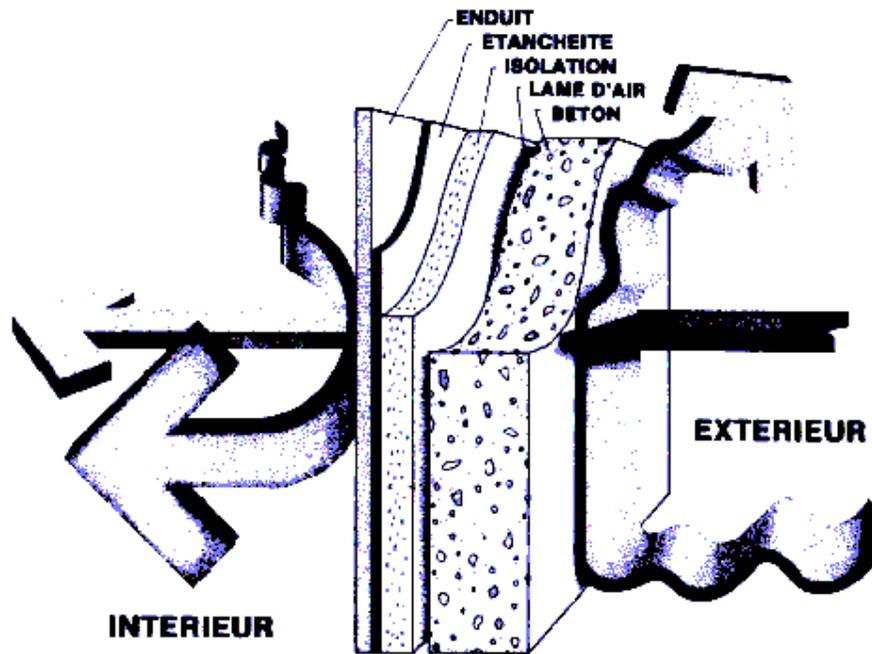


Fig 3.2: La conduction thermique à travers les composants du mur (gains de chaleur).

Source : Gérard Guyot ; 1999

En 1822; le français J. Fourier donna une définition mathématique précise de la conduction, cette dernière étant proportionnelle au gradient thermique ($Dt = t_e - t_i$) et au coefficient de conductibilité thermique.

3.1.1. La conductivité thermique (I) : détermine le flux de chaleur qui par une unité de temps traverse une unité d'épaisseur d'une unité de matériau soumis à une différence de température - gradient thermique- ($Dt = Ic$ °).

3.1.2. La conduction (c) : Est le rapport entre le pouvoir de transmission d'un matériau (I) et son épaisseur tel que :

$$C = \frac{I}{e} \dots\dots\dots (1)$$

I : (W/m.°C) ou (K cal/m.h.°C)

e : épaisseur : mètre linéaire (m)

3.1.3. La résistance d'un matériau :

C'est l'inverse de la conductance (**R**) et qui est définie comme le pouvoir d'un matériau de freiner le flux de chaleur :

$$R = \frac{1}{C} = \frac{e}{l} \dots\dots\dots (2)$$

R : Résistance thermique en (m2.°C/W) ou (m2.h.°C/K cal)

3.1.4. La résistance d'une surface :

Dans un local chauffé, climatisé ou non, on observe généralement une différence entre la température de l'air interne et celle de la surface des parois. Cette différence est due à la présence d'un film d'air mince immobilisé à la surface du mur, le flux de chaleur traversant ce film est caractérisé par un coefficient d'échange superficiel qui correspond à la résistance de ce film d'air.

$$R = \frac{1}{h_i} \text{ ou } R = \frac{1}{h_e} \text{ (selon la face considérée – interne ou externe)}$$

3.1.5. Le coefficient de transmission thermique K :

Est une caractéristique qui exprime la capacité de transmission d'un matériau entre deux milieux dont la température est différente. Dans le calcul des flux de chaleur, il est préférable d'utiliser le coefficient de transmission thermique que la résistance.

Le coefficient **K** de transmission est l'inverse de la résistance thermique :

$$K = \frac{1}{R} \dots\dots\dots (3)$$

Dans le cas d'une paroi composée :

$$K = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots\dots\dots + \frac{1}{R_n} + h_e + h_i$$

K : est exprimé en (W/m². °C) ou (K cal/m².h.°C)

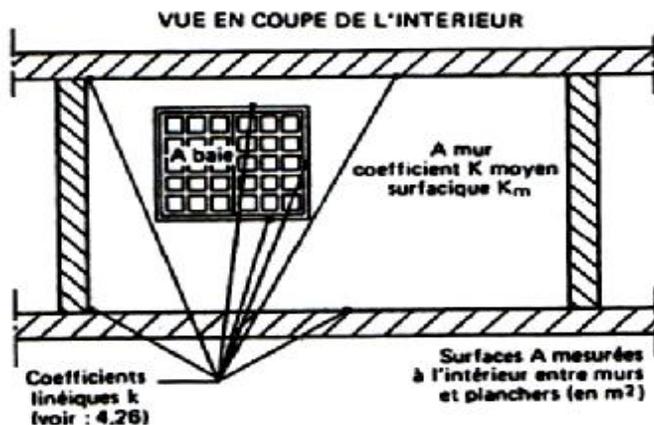


Fig3.3 : Coefficient de transmission de chaleur à travers les éléments architectonique

L'équation donnant la valeur du flux de chaleur transmis par conduction à travers les parois de la construction est :

$$Q_c = K S DT \dots\dots\dots (1)$$

K : est le coefficient de transmission.

S : la surface de la paroi.

DT : est la différence de température, deux cas sont possibles :

3.2. Conduction thermique à travers une paroi sous l'ombre:

$$Dt = t_e - t_i$$

$$Q_{c1} = K S Dt$$

$$Q_{c1} = S K_n S_n Dt \dots\dots\dots (2)$$

K_n, S_n : surface et coefficient de transmission des parois sous l'ombre.

t_e : température de l'air extérieur .

t_i : température de l'air intérieur.

3.3. Conduction thermique à travers une paroi ensoleillée:

(température air - soleil)

L'effet produit sur le bâtiment dans ce cas est combiné entre la transmission de chaleur par conduction et rayonnement ; dans ce cas la paroi est exposée à une température qu'on appelle "*La température équivalente*" ou "*Sol - air température*"

[Mackey et Wright ; 1981].

3.3.1. La température équivalente : (température air - soleil)

La température air – soleil comprend trois températures :

1- Température de l'air extérieur.

2- La fraction de rayonnement solaire absorbé par la surface.

L'échange de chaleur radiante de grande longueur d'onde avec l'environnement. [Givoni V, 1968].

La formule générale de la température équivalente est de :

$$t_{sa} = t_e + \frac{aI}{f_e} + (t_r - t_e) \frac{f_r}{f_e} \dots\dots\dots (3)$$

t_{sa} : température air - soleil.

t_e : température extérieur.

a : facteur d'absorption de la surface externe.

I : intensité du rayonnement solaire global reçue par la surface.

f_e : coefficient total d'échange de surface externe.

t_r : température radiante moyenne de l'environnement.

f_r : coefficient de rayonnement de surface externe.

Pour faciliter le calcul l'équation (3) est simplifiée tel que :

$$t_{sa} = t_e + \frac{al}{fe}$$

$$Q_{c2} = K S (t_{sa} - t_i) = K S (t_e + \frac{al}{fe} - t_i)$$

$$Q_{c2} = K S (\frac{al}{fe} + Dt)$$

$$Q_{c2} = S K_n S_n (\frac{al}{fe} + Dt) \dots\dots\dots (4)$$

I : intensité du rayonnement solaire directe, diffus et réfléchi incident sur l'unité de surface.

3.4. Le transfert de chaleur par rayonnement :

La température intérieure du bâtiment est généralement augmentée par les rayons solaires qui tombent sur l'enveloppe, selon deux manières :

3.4.1. Rayons solaires incidents sur les parois opaques (Murs, toits) :

Les rayons solaires en tombant sur les surfaces externes augmentent la température de ces dernières et créent par la suite un flux de chaleur transmis à l'intérieur de l'enveloppe par l'intermédiaire des composants des murs et de la toiture.

Ce phénomène de transfert de chaleur est déjà expliqué dans la partie "Conduction", et l'intensité du flux résultant est exprimée par l'équation (3) et (4). Notons que la quantité d'énergie reçue par une paroi est relative à son orientation et encore à son inclinaison [Capderou. M ; 1978]

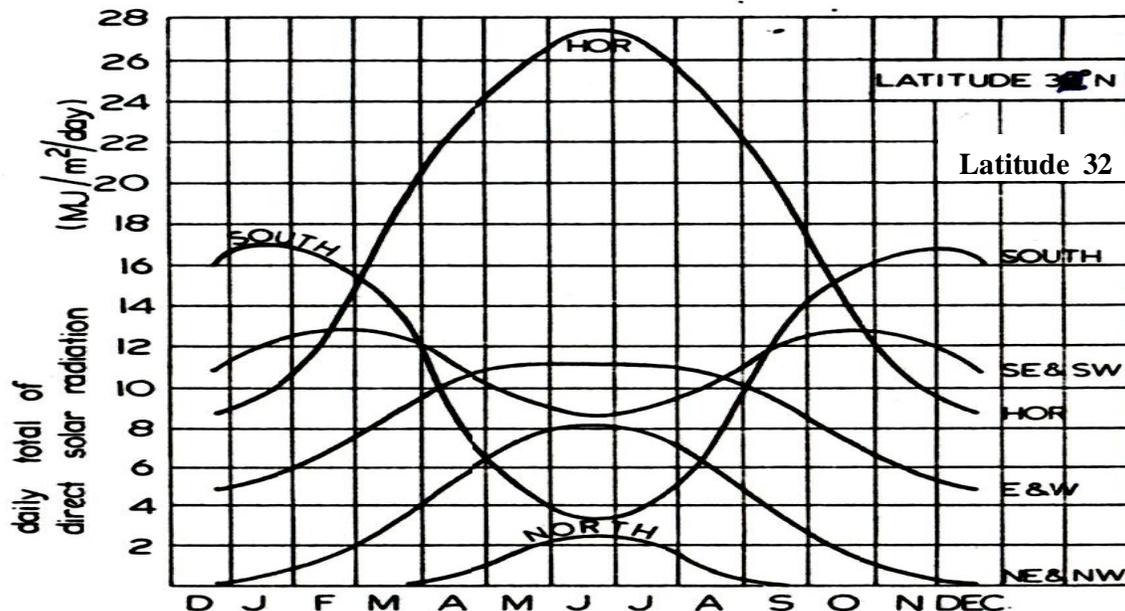


Fig 3.4 : Energie reçue par des surfaces de différentes orientations

Source : E. L. Harkness et Mehta ; 1987

3.4.2. Rayons solaires incidents sur les parois vitrées (Fenêtres) :

A- Baie vitrée exposée au soleil :

Les rayons solaires incident sur les fenêtres (parois vitrées) passant directement vers l'intérieur, ce qui apporte au bâtiment des quantités d'énergie disproportionnelles qui modifient l'équilibre thermique. Cette énergie apportée ne fait qu'aggraver l'inconfort des occupants par l'augmentation de la température intérieure au dessus de la zone de confort, ce qui nous amène à dépenser de l'énergie (énergie = l'argent) pour refroidir l'ambiance intérieure et chasser la quantité de chaleur cumulée par l'effet de serre crée par le captage des baies [Chauliguet.Ch ; 1981]. La quantité du flux transmis par rayonnement (émission d'ondes électromagnétiques) est un phénomène expliqué par différentes théories :

- * En 1900; le physicien Allemand Max Planck – La théorie quantique.
- * Loi de Stefan – La loi fondamentale du rayonnement.
- * La théorie du physicien Allemand Wilhelm.

L'équation déduite directement des documents de la thermique de bâtiment est :

$$Q_s = S I O \text{ [W]} \dots\dots\dots (5)$$

Q_s : quantité de flux transmis par rayonnement.

I : intensité de la radiation solaire.

O : facteur de gain solaire.

S : surface de la baie (fenêtre).

* Le facteur de gain solaire diminue le rayonnement reçu, il dépend de la qualité du vitrage utilisé et de l'angle d'incidence.

* L'intensité de la radiation solaire dépend de l'altitude et de l'orientation des baies.

* Généralement l'effet du rayonnement est proportionnel à l'augmentation de la température. [Ludwig. Bolizmann ; 1884].

* Le verre transmet de grandes quantités du rayonnement ultraviolet. [Wilhelm ; 1879].

B- Baie vitrée sous l'ombre :

Lorsqu'une baie vitrée est protégée des radiations directes du soleil soit par un brise-soleil, soit par un masque, soit du fait de l'heure combinée à l'orientation de la façade, deux cas se présentent :

B.1. La baie est ouverte :

Il y a généralement mouvement d'air, des variations continues de la température d'air entre t_e et t_i . Par ailleurs, tous les rayonnements diffus ou réfléchis par les façades voisines exposées au soleil rentrent librement.

B.2. La baie est fermée :

Le rayonnement solaire a moins d'importance dans la limite où les températures de l'air intérieur et extérieur sont différentes. À cette différence $t_i - t_e$ il est possible d'associer un coefficient de transmission thermique des ensembles vitrage, menuiserie et protection; ses ordres de grandeur sont les suivants :

- volets extérieurs ou stores et rideaux entre deux vitres **2,3 à 4 (W/m². °C)**
- persiennes **3,5 à 4,7 (W/m². °C)**
- protections intérieures **3,5 à 5,8 (W/m². °C)**
- verres teintés **7 (W/m². °C)**

3.4.3. Puissance du rayonnement solaire en été

Nous examinons ici l'aspect gênant de l'ensoleillement d'été, L'énergie solaire reçue par un élément de construction qui dépend de très nombreux facteurs mais pour le principal :

- des facteurs météorologiques, c'est-à-dire du temps qu'il fait et de la nébulosité : très beau temps ou simplement beau temps pour le problème d'été étudié ici.
- de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, hauteur qui dépend de l' latitude, de la date et de l'heure (voir figure 3.5)
- enfin, de l'inclinaison des rayons solaires sur la surface frappée.

De plus, bien que le rayonnement principal ou direct provienne de la direction du soleil, il est toujours accompagné d'un rayonnement diffus provenant de l'ensemble du ciel et que l'on mesure en conséquence, par le nombre de watts reçus par mètre carré de plan horizontal.

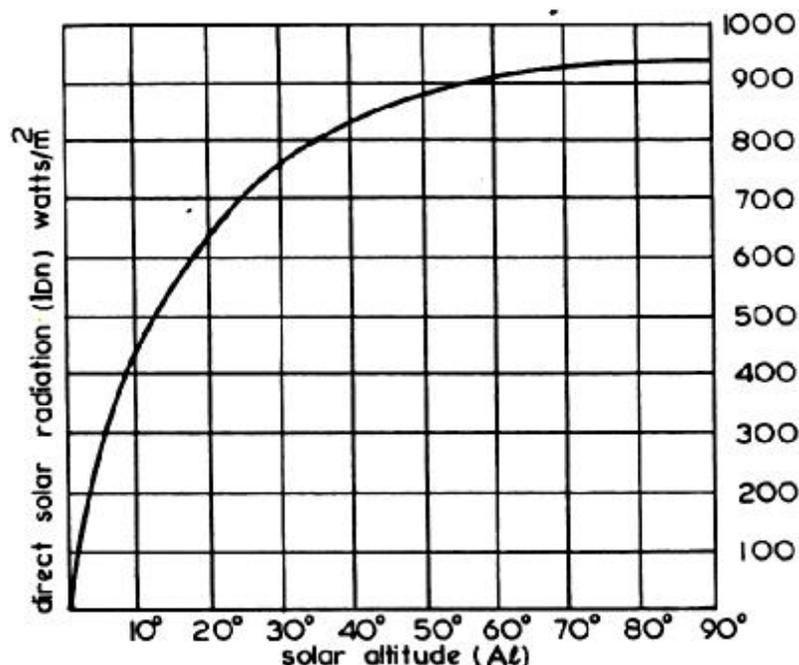


Fig 3.5 : Relation entre l'intensité de la radiation solaire et l'altitude du soleil

Source : E. L. Harkness et Mehta ; 1987

3.4.4. Coefficient d'absorption

Lorsque le flux d'énergie solaire, selon les valeurs de base en fonction de l'orientation des façades, frappe une paroi opaque pleine, une partie seulement est absorbée par l'épiderme puis transmise dans l'intérieur de la paroi. L'autre partie est rendue au milieu extérieur sous forme de flux thermique.

La composition intérieure de la paroi est sans importance sur le partage du flux d'énergie solaire incident, seul compte la nature de l'épiderme qui est définie par un coefficient caractéristique appelé *le coefficient d'absorption*. *a*. Par contre, la composition interne de la paroi, traduite par son coefficient *K*, et la succession de ses résistances thermiques partielles, influe sur la manière dont se partage le flux, partie vers l'intérieur et partie vers l'extérieur.

Le *coefficient d'absorption* de l'épiderme de la face ensoleillée de la paroi est égal au rapport de l'énergie immédiatement absorbée à l'énergie totale arrivant sur la paroi. Cette quantité d'énergie reçue par l'épiderme de l'enveloppe ne doit pas être négligée dans l'estimation de la quantité du flux transmis par rayonnement. *Exemple* : Pour une température extérieure $t_e = 38^\circ$ qui n'a absolument rien d'anormal, la face externe d'une paroi en plein soleil aux mois de Juin, Juillet et Août peut, avec un coefficient *K* de l'ordre de l'unité, atteindre des températures de **60 à 70° F J LOTZ ; 1964** ce fait ne doit pas être oublié.

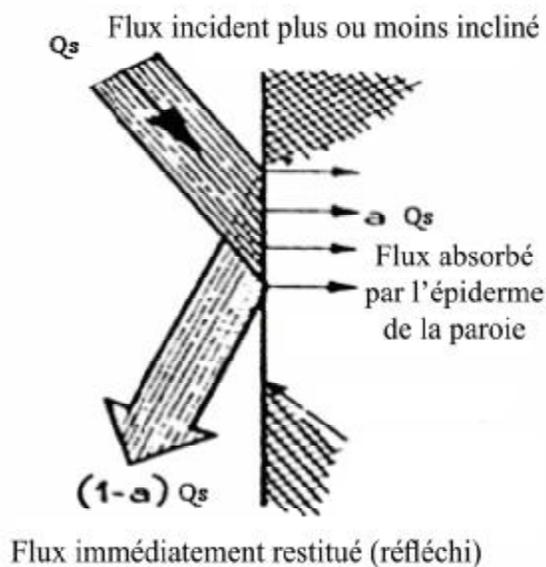


Fig 3.6 : influence de l'épiderme sur l'absorption du rayonnement solaire.

Source : Donald Watson ; 1987.

En conséquence, une paroi sans inertie exposée au soleil transmettra la somme des deux flux indiqués ci-dessus en régime permanent et se comportera donc comme s'il n'y avait pas de soleil et que la température extérieure était augmentée. L'influence de l'ensoleillement direct sur les parois doit être considérable et en tout cas bien supérieure aux effets des seules différences de température $t_i - t_e$.

3.4.5. Influence de la saison

La nébulosité, tant en ce qui concerne les nuages hauts que des phénomènes locaux de brouillard ou de fumées, à des influences considérables sur la part du rayonnement solaire qui parvient aux parois du bâtiment, comme de plus ces radiations sont cause d'inconfort selon l'époque. l'influence de la saison est déterminante sur les aspects pratiques de la question. [Banhame. A; 1986].

Pendant toute la durée de la saison de climatisation, les apports solaires sont partiellement retardés suivant la valeur des températures extérieures et les possibilités de stockage de l'inertie thermique. Cependant l'intérêt que l'on porte à ces apports est beaucoup plus lié au nombre d'heures par jour, qu'à leur valeur maximale instantanée. Pendant une période de durée assez longue, le soleil plus haut en moyenne sur l'horizon apporte des radiations beaucoup plus importantes.

Enfin, pendant les séquences estivales de journées chaudes ou très chaudes, qui se conjuguent avec des puissances maximales de rayonnements dues à la hauteur du soleil et à la faible nébulosité, des situations d'inconfort et de gêne peuvent être générés, mais cela peut couvrir deux aspects différents, suivant qu'une protection contre les variations journalières reste ou non possible; ceci dépend de la durée des séquences chaudes (de jour et de nuit) et il y a lieu alors de parler de la protection séquentielle.

3.5. Le transfert de chaleur par convection :

La convection est un phénomène expliqué par la poussée d'Archimède, comme un mouvement de brassage dans le quel les parties les plus chaudes de l'air ont tendance à s'élever et les parties froides et denses à descendre, la convection explique également les mouvements d'air autour de la terre et l'action des vents. [Roger Camous, 1979]. Le renouvellement d'air d'une habitation ou pièce considérée est la somme du "*Débits spécifique de ventilation*" et du "*débit supplémentaire*".

3.5.1/ Le débit spécifique de ventilation :

Il doit être assuré en tout cas pour satisfaire des besoins d'hygiène même si l'air extérieur est chaud en été ou froid en hiver. Ce débit doit être introduit par des entrées d'air qui permet de le contrôler (fenêtres ou conduites). De préférence les entrées d'air devraient être auto réglables afin de limiter les entrées d'air parasites.

3.5.2. Le débit supplémentaire :

Le débit supplémentaire est dû principalement aux vents et à la différence de température, son effet est différent incontrôlable et parfois parasite. En tout cas ces débits (global) doivent être quantifiés afin de contrôler leurs influences sur le confort intérieur et de limiter leur pénétration pendant le jour et les favoriser pendant les nuits de l'été, afin qu'ils servent à chasser la chaleur de l'intérieur du bâtiment et refroidir même les composants constructifs de la bâtisse.

Le flux de chaleur transmis par convection (changement d'air) dans le bâtiment peut être décrit par l'équation suivante :

$$Q_v = 1300 V Dt \text{ [W]} \dots\dots\dots (6)$$

Q_v : flux de chaleur par ventilation.

1300 : la chaleur spécifique volumique de l'air ($J/m^3 \cdot ^\circ C$).

V : taux de changement d'air (m^3/s).

Dt : écart de température ($t_e - t_i$)

Le taux de renouvellement d'air est calculé par l'équation :

$$v = \frac{N.V}{3600} \dots\dots\dots (7)$$

N : nombre de changement d'air.

V : volume du local (bâtiment, pièce) considéré (m^3).

4. Comportement thermique d'une enveloppe de bâtiment en été :

Il est bien évident que pour les bâtiments situés dans les régions à climat chauds et arides, le problème de confort ne se limite pas à une simple protection des baies vitrées afin de limiter ces apports solaires, mais l'obtention du confort indispensable pourra nécessiter des études et des dispositifs autre que la ventilation, l'inertie ou la protection des baies.

L'évaluation des effets de l'ensoleillement sur le bâtiment et la quantité d'énergie transmise vers l'intérieur à travers les parois opaques, vitrées et par le renouvellement d'air paraît une première nécessité pour l'estimation des gains, l'identification de la source de chaleur la plus importante dans le bâtiment et même la détermination d'une approche globale qui vise la résolution du problème d'été dans ces régions en commençant au moment de la conception du bâtiment afin de réaliser les économies d'énergie espérées.

On peut affirmer que dans les régions à climats chauds et arides, il est possible de concevoir des bâtiments selon des principes bioclimatiques et de réduire ainsi les besoins de climatisation à long terme, les économies d'énergie et les conceptions intégrées au lieu qui en résultent font que les principes bioclimatiques représentant un atout nécessaire pour le développement durable de l'établissement humain.

4.1. Les gains de chaleur à travers les parois opaques :

Lorsque la température intérieure d'un édifice est inférieure à celle de l'air extérieur, ce dernier reçoit la chaleur à travers son enveloppe, la quantité du flux de chaleur transmise à l'intérieur du bâtiment à travers ces parois dépend de certains facteurs comme exposés ci-après :

4.1.1. L'effet des caractéristiques thermo physiques des matériaux de construction de l'enveloppe. (La quantité de chaleur transmise) :

N'importe quel bâtiment transmet une grande quantité de chaleur en condition d'été par voie de conduction, dont la quantité est proportionnelle au graduant thermique, au coefficient de transmission de chaleur relative aux matériaux de constructions et de leur caractéristiques thermo-physiques, à la surface considérée de l'enveloppe et à sa position (horiz, vert, incliné, courbé) qui interviennent dans la détermination des résistances des surfaces externes et internes des parois.

Si l'on admet que l'évaluation se fait pour le jour, l'heure et le mois les plus chauds de l'année, Les murs nord, sud, est, ouest et la toiture sont exposés à l'effet du graduant thermique ($t_e - t_i$), dont la température extérieure de l'air est généralement celle du mois de Juillet, le plus chaud considéré par la climatisation ; la température intérieure du bâtiment est supposée celle du confort (température de base) et comme on a déjà expliqué dans le chapitre précédent si l'on arrive à maintenir une température intérieure égale à la température moyenne annuelle ($\frac{t_{\min} + t_{\max}}{2}$), on peut admettre un degré de confort acceptable (avoir chapitre 01).

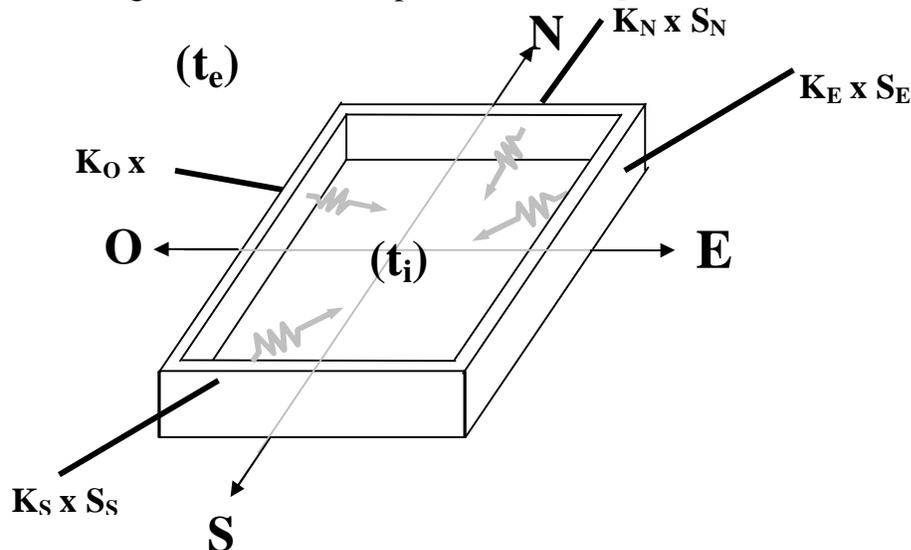


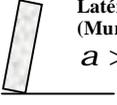
Fig 3.7 : Schémas représentant la transmission des flux de chaleur par conduction à travers les parois opaques (murs)

De ce fait, la quantité d'énergie entrant dans le bâtiment par les murs et la toiture est proportionnelle au graduant thermique, au coefficient de transmission de chaleur et à la surface des murs tel que :

$$Q_c = \Sigma K.S (\Delta t)$$

$$Q_c = [K_n S_n + K_s S_s + K_e S_e + K_o S_o + K_t S_t] (t_e - t_i)$$

Le tableau - - indique les valeurs des coefficients d'échange superficiel ($h_e + h_i$) et montre leur influence sur la valeur du coefficient de transmission de chaleur (K), qui paraît légèrement importante, cela veut dire que l'influence de la morphologie des surfaces est peu importante par rapport à leurs quantités (valeurs numériques) dans la détermination de la quantité de l'énergie transmise.

$K = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \dots + \frac{1}{Rn} + h_e + h_i$	Paroi en contact avec l'extérieur		
	$\frac{1}{h_i}$	$\frac{1}{h_2}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_2}$
 <p>Latérale (Mur) $a > 60$</p>	0.10	0.04	0.14
 <p>Latérale (Mur) $a < 60$</p>	0.16	0.04	0.2
 <p>(plancher)</p>	0.08	0.04	0.12

Tab 3.2 : Valeurs du coefficient d'échange superficiel.

Source : M Rebzani et Al ; 1998

4.1.2. L'effet de La couleur de l'enveloppe (La quantité d'énergie solaire absorbée) :

La quantité de l'énergie solaire absorbée pendant le jour par une enveloppe de bâtiment dépend de la couleur de ses surfaces externes, pour la détermination exacte de cette quantité ; les différentes couleurs utilisées fréquemment dans le bâtiment sont exprimées en terme numérique par un coefficient appelé Le **coefficient d'absorption**. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de ce coefficient pour certaines couleurs des matériaux de construction

Surfaces badigeonnées neuves	10	—	15
Peinture à l'huile blanche	20	—	30
Marbre blanc	40	—	50
Gris moyen	60	—	70
Brique, béton	70	—	75
Noir brillant	80	—	85
Noir mat	90	—	95

Tab 3.3 : Facteur d'absorption de différentes couleurs (en %)

Source : B Givoni ; 1978

Dans les climats chauds et arides, la couleur de l'enveloppe est un facteur principal déterminant le régime de variation des températures intérieures et la qualité du confort en conséquence. On constate, selon la figure suivante, une différence de la valeur de la température intérieure mesurée à 1.20 m au dessous du plafond, Cette dernière varie de 29°C pour un toit blanchi à 33 °C pour un toit gris.

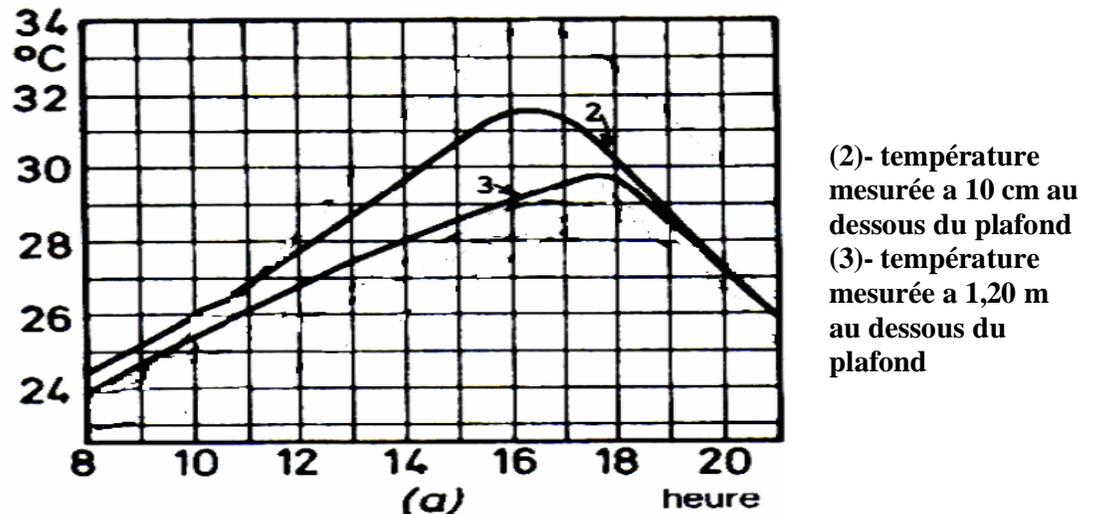


Fig 3.8 : Effet de la couleur du toit plat sur les températures intérieures

Source : B Givoni ; 1978

4.1.3. L'effet de la température équivalent (La quantité d'énergie solaire reçue) :

A l'inverse des murs, la toiture au moment choisie – l'heure la plus chaude du jour concerné par l'évaluation - est exposé à un supplément de température du à son exposition au rayonnement solaire. L'intensité de la radiation solaire incidente sur la toiture (plan horizontal) est généralement donnée selon l'altitude du lieu et l'heure considérée. La quantité de chaleur reçue par la toiture est donc relative au coefficient K, au graduant (Δt), à la surface de la toiture et à sa morphologie ; en plus elle est dépendante du supplément de température ($\frac{aI}{f_e}$).

$$Q_{CR} = K.S \left[(t_e + \frac{aI}{f_e} - t_i) \right]$$

$$Q_{CR} = Kt.St \left(\Delta t + \frac{aI}{f_e} \right)$$

a : facteur d'absorption de la surface externe.

I : intensité du rayonnement solaire global reçue par la surface.

f_e : coefficient total d'échange de surface externe.

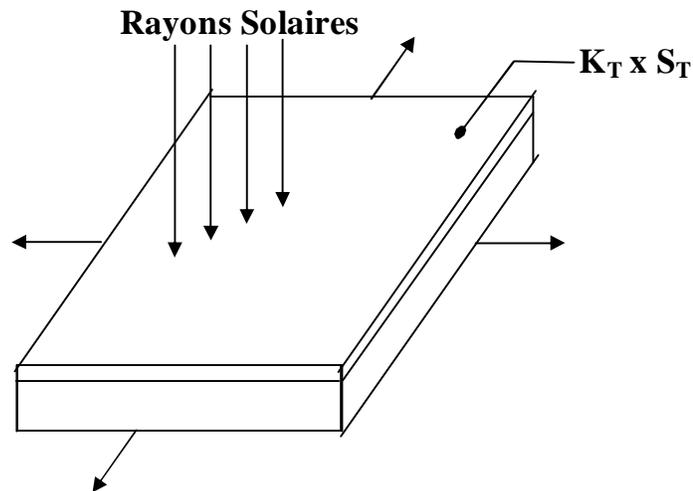


Fig 3.9 : Schémas représentant la transmission des flux de chaleur par conduction et rayonnement à travers les parois opaques (toiture)

Mais, ce n'est pas la toiture uniquement qui est exposée à l'effet de la radiation solaire, les murs aussi sont exposés au supplément de la température équivalente, dont l'intensité de la radiation solaire reçue dépend de l'orientation et de l'inclinaison des surfaces de l'enveloppe, Les chiffres indiqués dans le Tableau suivant donnent l'augmentation maximale de la température des surfaces verticales du fait de la radiation solaire reçue pour des différentes orientations (voir tableau 3.4 & figures 3.10).

Heure (Cadran solaire)	Orientation du Mur et la température de surfaces verticales								
	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	N
6	13	46	51	26	4	4	4	4	13
7	10	55	71	46	7	7	7	7	10
8	10	48	74	58	12	9	9	9	10
9	11	31	66	62	23	10	10	10	11
10	12	16	50	59	35	12	12	12	12
11	12	13	27	49	43	16	12	12	12
12	12	13	14	33	43	33	14	13	12
1	12	12	12	16	43	49	27	13	12
2	12	12	12	12	35	59	50	16	12
3	11	10	10	10	23	62	66	31	11
4	10	9	9	9	12	58	74	48	10
5	10	7	7	7	7	46	71	55	10
6	13	4	4	4	4	26	51	46	13

Tab3.4 : Elévation maximale de température de surfaces verticales de mur due à la radiation solaire. Le 21 juillet atmosphère claire

Source : Bernard Lorton ; 2003

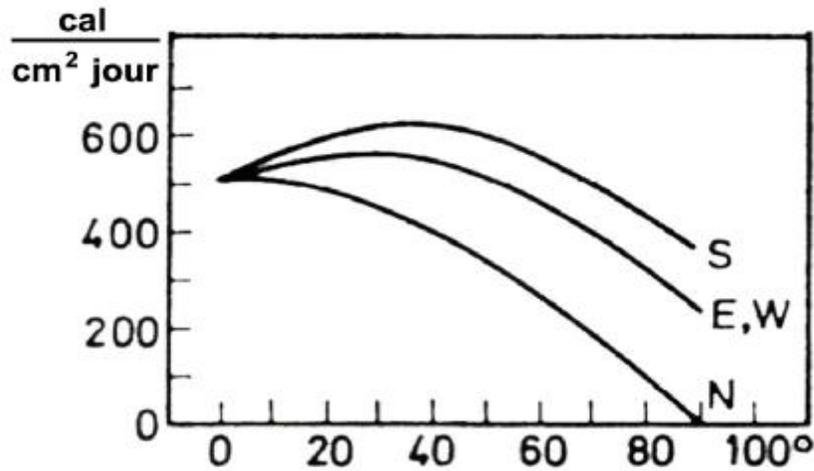


Fig 3.10 : Variation de l'intensité de la radiation solaire reçue par des surfaces inclinées de différentes orientations

Source : B Givoni ; 1978

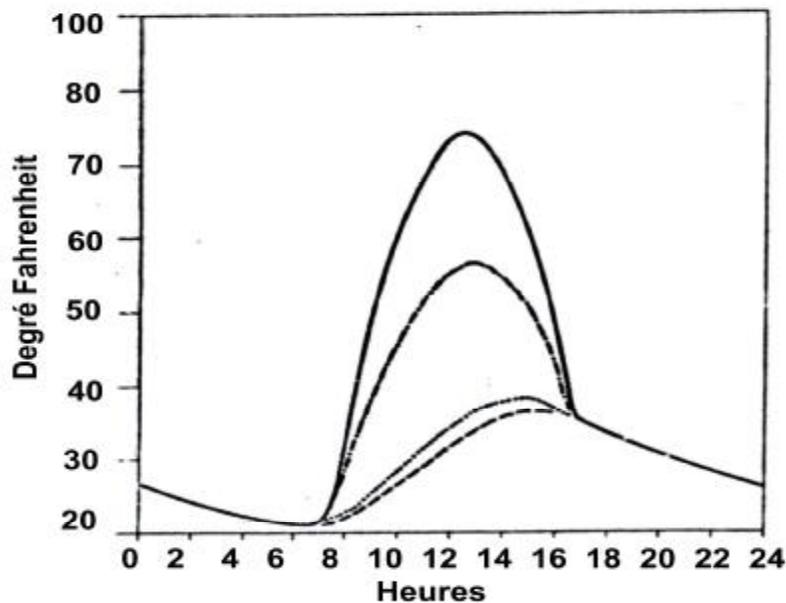


Fig 3.11: L'impact de la température équivalente sur la température surfacique -New York le 21 juillet

Source : E. L. Harkness et Mehta ; 1987

4.2. Les gains de chaleur à travers les parois vitrées :

Le rayonnement solaire pénétrant à l'intérieur de l'espace habité constitue une source de chaleur très importante (selon l'orientation de la fenêtre et la position du soleil). Lorsque la radiation solaire tombe sur du verre ou des matériaux translucides, une partie de l'énergie incidente est réfléchiée, une partie est absorbée par les matériaux et le reste est transmis à l'intérieur du bâtiment. Pour les fenêtres ordinaires l'absorption est très petite mais la transmission très

grande. On ne se rend pas toujours compte, cependant, que la réflexion provenant d'une surface de verre varie beaucoup selon l'angle d'incidence, c'est-à-dire l'angle formé entre les rayons de la lumière et une ligne perpendiculaire à la surface. La figure -1- montre la variation de la réflexion, de l'absorption et de la transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire. Les valeurs, à midi, des angles d'incidence pour un mur sud à Ottawa montrent que la transmission aura une valeur maximum quotidienne de 70% de la radiation incidente au milieu de l'été et que cette radiation augmentera jusqu'à 85% à l'équinoxe et atteindra un maximum de 87% à midi [Alain Roulet, 1987].

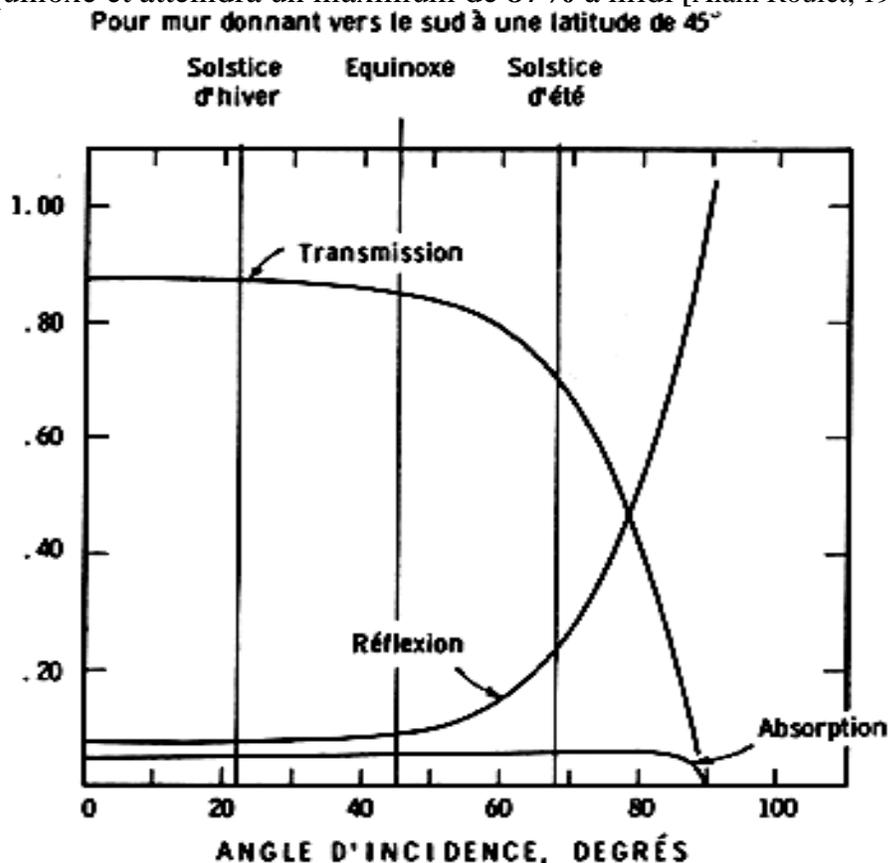


Fig 3.12 : L'absorption, la réflexion et la transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire.

Source : Alain Roulet; 1999

Un supplément de température intérieure est dû à l'énergie solaire transmise aux locaux intérieurs par les baies sous forme d'apports directe. La quantité de ces apports est donné par l'équation : $Q_s = S I O$; cette équation montre que la quantité de l'énergie transmise est liée à la surface de la fenêtre, l'orientation et le facteur de gain solaire des matériaux. Il est facile de comprendre pourquoi les architectes devraient veiller à réduire le plus possible les gains de chaleur solaire quand on songe au coût des systèmes de climatisation nécessaires pour parer cette chaleur.

4.3. Les gains de chaleur par renouvellement d'air (ventilation) :

Les apports de chaleur dus à l'introduction d'air extérieur sont une source de chaleur latente et sensible non négligeable, la méthode utilisée pour quantifier ces apports est *la méthode du nombre de changement d'air* ; on admet un nombre de changement d'air minimal pendant le jour pour le respect des règles sanitaires relatives au maintien d'une teneur acceptable en oxygène et en gaz carbonique de l'air ambiant ; le nombre de changement d'air adapté ne doit pas dépasser trois (03) fois par heure. (3 a.ch/h)

La formule donnant la valeur du flux de chaleur introduit au bâtiment par le renouvellement d'air (ventilation) est :

$$Q_v = 1300 v \Delta t \quad \text{dont : } v = N.V/3600 \quad \text{donc : } Q_v = 0.28 N.V \Delta t \dots\dots\dots (4)$$

N : nombre de changement d'air.

V : volume du local (bâtiment, pièce) considéré (m³).

4.4. Les gains internes :

On désigne par apports internes de chaleur ou gains internes, les quantités de chaleurs dégagées sous forme latente ou sensible à l'intérieur des édifices par les occupants, les machines ou les appareils électriques, l'éclairage, les appareils à gaz...etc. Généralement ces apports sont calculés en les considérant constants et en les multipliant, pour chaque apport, les gains maximums par un coefficient de simultanéité (CS) spécifique à chaque apport ; ce dernier est utilisé pour déterminer les apports réels et une estimation valable des apports internes.

[Rebzani.B ; 1998]

Les apports de chaleur interne sont donnés par la formule :

$$Q_I = N_1 I_1 C_{s1} + N_2 I_2 C_{s2} + \dots\dots\dots + N_n I_n C_{sn} \dots\dots\dots (5)$$

I₁, I₂....., I_n : les apports internes des occupants ou machines.

N₁, N₂....., N_n : nombre des apports estimés (personnes, machines).

C_{s1}, C_{s2}....., C_{sn} : coefficient des simultanés données dans les apports calorifiques dus aux différents appareils ainsi le coefficient des simultanés sont données dans le DTR C3-4, 1998.

5. Estimation des besoins thermiques et les mesures de la réduction des gains :

Les gains de chaleur	Quantité	Mesures de réduction
Gains de chaleur à travers les parois opaques	<p><u>Parois ombragée :</u> $Q_c = \Delta t \cdot \Sigma Kn \cdot S_n \dots \dots (1)$</p> <p><u>Parois ensoleillées :</u> $Q_{cR} = \left(\frac{aI}{f_e} \Delta t \right) \cdot \Sigma Kn \cdot S \dots \dots (2)$</p> <p>L'équation (1) et (2) montrant que pour avoir le minimum de gains de chaleur, il faut, pour un volume à confort thermique exigé :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Concevoir des formes telles que les surfaces de l'enveloppe S soient les plus réduites possibles. 2- Obtenir des coefficients de transmission K faibles. 	<p>* La quantité de ces gains est plus importante dans les bâtiments situés dans les zones chaudes. Leur valeur est donnée en fonction du graduant thermique, du coefficient K et de la quantité et la nature des surfaces de l'enveloppe. * Le supplément de température du à l'exposition de ces surfaces au rayonnement solaire, augmente la quantité de ces apports selon l'intensité du rayonnement, le facteur de gains solaires et le facteur d'absorption des surfaces. Il est essentiel de limiter ces apports en amont du projet par le choix d'une forme susceptible d'être performante dans ces régions.</p>
Gains de chaleur à travers les parois vitrées (les fenêtres)	<p>$Q_s = S_v I O \dots \dots \dots (3)$</p> <p>D'après l'équation ci-dessus, pour minimiser les apports du rayonnement introduit par les baies on doit :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Réduire au maximum les surfaces vitrées (S_v). 2- Le choix de l'orientation des ouvertures de façon que (I) soit le minimum possible. 3- Choisir un verre qui présente un coefficient de gain (O) minimal. 	<p>La quantité de ces apports est une source de chaleur qu'on ne peut pas négliger, généralement le problème est traité dans ces régions par la minimisation des surfaces vitrées et le bon choix de l'orientation. Dans le cas extrême dans lequel les surfaces vitrées sont importantes, on a recours aux procédés de la protection solaire des baies, par les brises soleil, le double vitrage...etc.</p>

Gains de chaleur par renouvellement d'air.	$Q_v = 1300 v \Delta t$ $v = N.V/3600$ $Q_v = 0.28 N.V \Delta t \dots \dots \dots (4)$ <p>Selon l'équation (4), dans un volume (v) pour minimiser ces gains on doit réduire au maximum le nombre de changement d'air.</p>	<p>On ne peut pas minimiser ces gains par la réduction du nombre de changement d'air car, il est nécessaire d'assurer le minimum de ventilation pour les besoins d'hygiène et le renouvellement de l'oxygène et autres.</p> <p>Mais on peut réduire ces gains par l'humidification de l'air entrant dans le bâtiment ce qui rafraîchit l'ambiance intérieure et abaisse sa température.</p>
Les gains internes	$Q_I = N_1 I_1 C_{s1} + \dots + N_n I_n C_{sn} \dots (5)$ <p>D'après l'équation (5) pour minimiser les gains internes, il faut :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Réduire le nombre des occupants par le volume. 2- Réduire le nombre des appareils. 3- Utiliser des appareils qui produisent le minimum d'énergie calorifique. 	<p>Pour la minimisation de ces gains, nous devons assurer une bonne gestion des occupants de bâtiment et la maîtrise de la consommation d'énergie – électricité et hydro carbone-, cela devrait se faire par :</p> <p>La sensibilisation des usagers par les différentes manières. et L'optimisation des investissements publics et privés qui tend à réduire la consommation de l'énergie dans le bâtiment.</p>

6. Conclusion :

On peut déduire que dans les climats chauds et arides, le problème d'inconfort doit être sérieusement posé. En réalité, même si les degrés du chaud ou de l'aridité sont légèrement différents d'une région à l'autre, ils ont un point défavorable en commun, celui d'être exposés à des fortes gains de chaleur dus principalement au rayonnement solaire intense et aux températures d'air extérieur très élevés. Ces apports de chaleur augmentent la température intérieure des bâtiments, en traversant leurs enveloppes sous forme de flux de chaleur selon les trois modes déjà définis (rayonnement, conduction, convection).

Le rayonnement reçu par les baies vitrées augmente la température de ces dernières, ainsi que celle de l'air extérieur, et provoquant par la suite un rayonnement de grandes longueurs d'ondes à l'intérieur ; ceci participe à la surchauffe de l'espace habitable [Ralfh.M.L, 1997]. Il est donc essentiel de protéger les baies contre la radiation solaire de l'été et de prévoir toutes les exigences nécessaires à la limitation de ces gains, Mais ; les balcons, loggias, brises soleil et autres accessoires des constructions n'interviennent qu'ultérieurement. Par contre, les grandes portions de bâtiment exposées aux radiations solaires sont les façades, les murs et les toitures. Il arrive que presque **50%** des surfaces opaques des bâtiments soient exposées à des températures supérieures à celle de l'air extérieur, on se trouve par conséquent hors des limites tolérables dans des conditions inadmissibles. Donc, il est indispensable de minimiser la quantité de ces apports transmis par les parois opaques de l'enveloppe.

Du point de vue pratique, les moyens disponibles pour limiter la transmission d'une aussi grande part de chaleur solaire sont généralement l'inertie thermique, l'augmentation de la réflexion des faces extérieures des parois par le revêtement, les murs ventilés, les toits parasol...etc. Face à ces solutions, nous envisagerons comme autre alternative la minimisation des gains de chaleur par les parois opaques du bâtiment, une étude de l'influence de l'enveloppe sur la quantité de l'énergie reçue, absorbée et transmise à l'intérieur. Afin de déterminer des formes qui peuvent - ***par le biais de leur nature morphologique et de leur taille*** - minimiser les gains de chaleur dus à la radiation solaire. Notre démarche sera basée sur la modulation de l'enveloppe (forme ; taille) afin d'aboutir à des modèles de formes passives. On doit par conséquent fonder les critères d'évaluation des enveloppes et de leurs performances thermiques vis-à-vis des besoins définis selon le tableau récapitulatif suivant.

Les gains de chaleur a travers les parois opaques (type d'énergie)	Les facteurs d'influence	Les critères d'évaluation
Energie reçue	La surface	La valeur de la surface S_n , sa forme partielle et les proportions de la surface par rapport au volume global.
	Son orientation (L'intensité de la radiation solaire incidente sur la surface I)	
	Sa morphologie	
Energie absorbée	La couleur de l'enveloppe	Le Facteur d'absorption a
Energie transmise	Les surfaces de l'enveloppe	La somme des surfaces de l'enveloppe St
	La capacité de transmission de chaleur	Coefficient global de transmission de chaleur de l'enveloppe Kg

Ces critères d'évaluation doivent être résumés plus tard en éléments génériques pour servir dans l'étude de la qualité thermique des formes choisies pour l'analyse expérimentale. A ce niveau, il faut souligner que le choix des échantillons représentatifs doit se faire selon une approche vernaculaire qui vise la revalorisation des potentialités bioclimatiques de l'architecture des maisons situées dans les régions à climat chaud et arides. * *Je ne cherche pas je trouve* *

1. Introduction :

Il est admis maintenant que le soleil dans les régions à climat chaud et aride est une source d'inconfort qui provoque un surchauffe gênant pendant la période estivale ; on pense à la résolution de ce problème par une production architecturale d'édifices ayant une meilleure performance énergétique vis-à-vis des conditions climatiques d'été. Cela ne peut se faire que par une approche bioclimatique qui vise l'intégration très tôt de la composante énergétique dans le processus de la conception architecturale afin de prendre en considération le choix d'une enveloppe (forme) adaptée aux besoins thermiques parce qu'il est difficile de contrôler la thermique si cette précaution n'est pas prévue. [Anis A.Siddiqi ; 1994].

Notre recherche tend à la détermination des formes de base les plus performantes dans les régions à climat chaud et aride, elle peut servir de jalon pour la détermination d'un outil de contrôle énergétique dans la phase esquisse par le biais des recommandations ou des concepts générateurs de formes dégagées à la fin de la recherche, la définition des caractéristiques morphologiques d'une architecture qui peut se situer géographiquement. Notons que la performance thermique recherchée dans les bâtiments situés dans ces régions dépend en grande partie de l'intensité des radiations solaires et des hauts degrés des températures de l'air extérieur qui impliquent par conséquent leur influence *sur le confort à l'intérieur de l'espace habitable à travers la forme globale et les composants de la construction* [Knowles R ; 1981]. L'enveloppe ainsi réalisée doit protéger l'homme contre l'excès de chaleur et l'intensité des radiations solaires et lui procurer une ambiance dont dépendent non seulement sa santé, mais encore pour une large part, le rendement de son activité.

Notons que L'histoire naturelle nous a montré à travers plusieurs exemples que les forces thermiques ont un effet direct sur la formation des objets. [Knowles R; 1981], Les plantes des climats chauds et arides ont des sections massives avec de petites surfaces pour se protéger de l'excès de chaleur. Par analogie la variation des formes des bâtiments à travers les différents climats témoigne que la construction de ces formes est largement influencée par les forces de la nature et le climat en particulier. L'étude de l'impact des facteurs climatiques sur la forme des bâtiments à un objectif similaire à celui des plantes par *la recherche d'une dépendance physique entre forme et climat (Du point de vue thermique La meilleure forme est celle présentant le minimum de gains de chaleur en été et le minimum de pertes en hiver)*. Les recherches entamées dont l'objectif est de répondre aux besoins thermiques des constructions par le choix d'une forme passive, ont démontré selon différentes méthodes que *la solution consiste à obtenir une forme dont les surfaces exposées sont minimales*.

Dans les climats chauds et arides, il est évident que les conditions d'été ont un rôle déterminant dans le choix de la forme, par contre ceux de l'hiver sont presque négligeables.

L'étude faite par « Victor Olgyay » en 1962 sur la forme du point de vue de la consommation d'énergie montre que *la forme optimale pour une construction est celle qui permet un minimum de gains solaires en été*; à ce titre il faut souligner la performance que représente la forme compacte (elle présente un minimum de surfaces d'échanges pour un volume donné) et donc le minimum d'échanges thermiques avec le milieu extérieur. En termes techniques ce sont des formes qui ont un facteur de forme très faible. Ce dernier dépend de deux variables essentielles pour sa détermination : **La géométrie et les dimensions de la forme**; dans les climats chauds et arides, il est recommandé de construire :

- Des enveloppes massives dans le but d'augmenter la compacité du volume et minimiser les surfaces d'échange thermique. (Fig 4.1)
- Des Parallélépipèdes allongées dans l'axe Est- Ouest, dont les façades les plus réduites Est et Ouest sont orientées face aux apports solaires maxima d'été.
- Comme le rayonnement solaire d'été est beaucoup plus important sur une surface horizontale que sur une surface verticale. il est avantageux de diminuer les surfaces de la toiture et d'augmenter la hauteur de la construction (Plusieurs étages sont préférables).

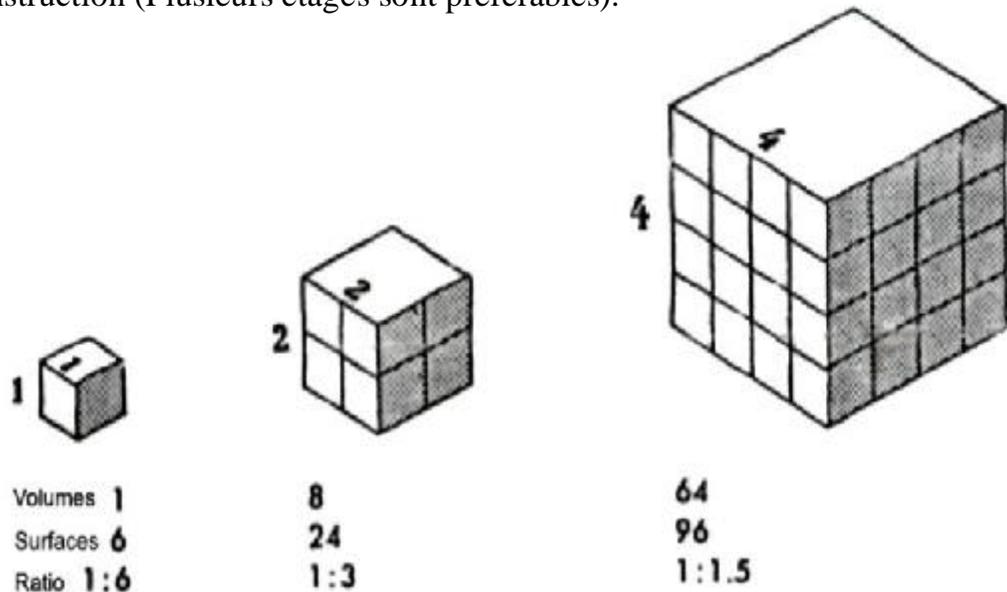


Fig 4.1 : La densification des unités pour créer un volume d'habitation bien protégé.

Source : V. Olgyay, 1962

Enfin peu importe que la solution proposée soit une forme cubique, une tour ou autres, mais, qu'elle soit confortable, économiquement soutenable et qu'elle réponde à ces exigences primaires (minimisation des gains de chaleur). Une fois que la construction aura évolué et qu'elle fonctionnera correctement, il sera alors temps de se poser des questions moins urgentes, mais néanmoins essentielles, où un engagement personnel sera possible, voir nécessaire.

Lorsqu'un niveau de confort minimum sera atteint, d'autres options seront à déterminer par les habitants eux-mêmes. Et c'est aux architectes de prouver leur utilité et leurs compétences en partant de la situation primaire, en utilisant des interventions mineures ne demandant peu ou pas d'efforts de la part des habitants. Cependant, quelle que soit la voie d'évolution choisie, il faudra toujours garder à l'esprit le fondement et la raison d'être de l'architecture : le bien-être et le développement de l'homme.

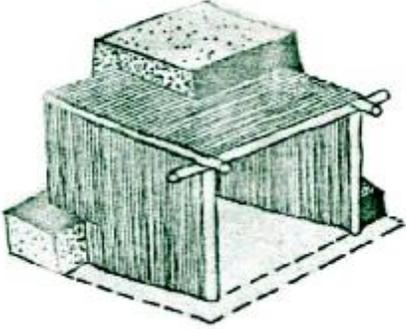
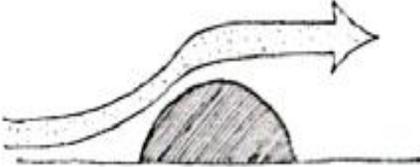
2. L'impact du climat sur la forme des maisons :

L'observation des forces créant la forme de la maison d'une manière théorique nous a montré que le climat est l'un des aspects physiques qui participe à l'élaboration de la forme des constructions (voir tableau en bas) *“l'abri est d'une importance suprême pour l'homme, il tient la première place dans son combat incessant pour la vie. Dans ses efforts pour se protéger des variations du temps et des saisons, il a élaboré au cours des temps de nombreux types de logements”* [N. Schoenaver et S. Sceman ; 1962] ; Mais, dans certains cas on a découvert des solutions non rationnelles du point de vue climatique, ce qui nous suggère qu'il doit y avoir d'autres forces à l'œuvre, par exemple les croyances religieuses, les exigences virtuelles et les questions de prestiges...etc, alors notre étude se porte sur l'évaluation du rapport entre la forme des maisons et le climat.

L'adaptation de la forme des constructions aux conditions climatiques est devenue un problème continue, elle est considérée comme étant un intermédiaire entre l'univers naturel et l'homme ; cette définition relève principalement du concept d'abri climatique, l'habitation, l'enceinte thermique, le lieu d'échange entre les flux internes et externes est donc un échangeur thermique entre l'homme et les conditions climatiques extérieures. Son rôle est de minimiser les effets non désirables et de favoriser les effets convenables pour le confort des occupants. En effet, la relation envisagée entre le climat et la forme dépend de la nature des enveloppes, de l'implantation et des groupements [Daniel Berwstein & AL ; 1997]. La complexité de cette relation peut avoir une incidence sur la quantité des pertes ou des gains d'énergie calorifique - chaleur – dans le cas où elle est opérée au préalable. L'amélioration du confort devient possible en utilisant les dispositifs de régulation thermique ; il est donc nécessaire de contrôler cette forme dont l'objectif est de créer un environnement physique confortable. Sachant que La forme du bâtiment peut être déterminée par Le climat et les besoins physiologiques recherchés à travers la construction, La maison est donc construite selon des conditions spécifiques, meilleures ou préférables pour un environnement physique dont les besoins thermiques sont connus ou définis au préalable.

Alors, Le climat est un des facteurs très importants des forces génératrices des formes son action dépend de sa sévérité et de sa puissance. Plus les contraintes climatiques seront sévères, plus la forme sera limitée. Les bâtisseurs primitifs (anciens) nous ont montré avec des matériaux et des techniques très limités, des constructions adaptées au climat et aux besoins thermiques. De nos jours, les maisons sont rendues confortables grâce à des moyens mécaniques coûteux et connus avec un gaspillage excessif des énergies fossiles ; le confort créé par ces moyens est discutable. Or, on s'attend à trouver les solutions les plus énergétiques dans les climats rudes (chauds) à travers des exemples traditionnels. Notre intention est donc d'examiner les solutions données aux nombreux besoins dans différentes régions tout en considérant la forme du bâtiment (enveloppe) comme un moyen de contrôle thermique.

Climat	Chaud et humide	Chaud et aride
<p>Besoins</p>	<p>Ces régions sont connues avec de fortes pluies, grande humidité, des faibles écarts journaliers de température et un rayonnement intense, on a besoin du maximum d'ombre, de ventilation et du minimum de capacité thermique. [A.Konya, 1981].</p>	<p>Les caractéristiques spécifiques à ces régions sont déjà définies dans le Chapitre I, les besoins essentiels sont la protection contre les hautes températures journalières et l'intensité de la radiation solaire.</p>
<p>Exemples</p>	<div data-bbox="466 558 1052 914" data-label="Image"> </div> <p>Fig 4.2 : Maison seminole Floride, 9*16 pieds Source : Amos Rapopor ; 1972</p>	<div data-bbox="1213 558 1934 883" data-label="Image"> </div> <p>Fig 4.3 : Compacité des habitations faites d'un seul matériau au Sud Ouest des Etat-unis Source : Amos Rapopor ; 1972</p>
<p>Caractéristiques de la maison.</p>	<p>Des groupement dispersés, des bâtiments ouverts (pas de murs) avec une enveloppe longue et étroite, des matériaux minces à faibles capacité thermique, le sol est généralement élevé par rapport à la terre.</p>	<p>Des enveloppes géométriques aussi compactes que possible. Un maximum de volume avec des surfaces minimum exposées. Des matériaux lourds à forte capacité thermique. De petites ouvertures pour l'aération et l'éclairage. Des cours intérieures protégées.</p>

Climat	Froid		Tempéré
Besoins	Ces régions sont caractérisées par un froid externe, donc une bonne conservation de la chaleur est essentielle.		Des pluies très importantes avec des vents qui soufflent souvent d'une vitesse gênante, une bonne protection est donc recommandée.
Exemples	 <p>Fig 4.4 : Maison sibérienne faite de bois et de terre Source : Amos Rapoport ; 1972</p>	 <p>Fig 4.5 : Effet du vent sur l'Igloo Source : Amos Rapoport ; 1972</p>	 <p>Fig 4.6 : Tepee des Indiens avec des languettes pour le contrôle du vent Source : V. Ulgyay ; 1962</p>
Caractéristiques de la maison.	Des enveloppes compactes, sont créés dans le sol et construites avec des matériaux lourds, avec un minimum de surfaces exposées.	Les eskimos utilisent de petits formes demi sphérique pour déflécter les vents froids.	L'organisation des groupements est libre diversifiée et dispersée, la forme de la maison est conique et construite généralement avec des matériaux légers qui ne préservent pas la chaleur pour les protéger du vent, ces tentes sont munies de languettes pour le contrôle du vent.

CHAPITRE 04 : la forme dans les climats chauds et arides

D'après cette comparaison, On remarque que le respect du climat par les bâtisseurs primitifs a donné aux constructions traditionnelles des caractéristiques régionales. L'aspect morphologique de ces maisons est une bonne réponse au problème du confort thermique et de l'économie de l'énergie ; il peut même définir les grandes traces d'une architecture régionale. [Jean Dollus ; 1979].

Notons aussi, qu'à travers cette illustration résumé, on remarque que l'architecture traditionnelle a pris en considération le choix d'une enveloppe selon le climat et les besoins thermiques relatifs au bien-être que ce soit au niveau des murs, toitures, ouverture ou même de la forme globale. On peut toujours conclure qu'il y'avait un système global appliqué au niveau de la forme pour que les maisons traditionnelles répondent aux besoins des usagers et leur procure par conséquent des abris convenables. Ce qui a fait la conjoncture dans ce système traditionnel, c'est l'apparence des nouvelles technologies de chauffage et de climatisation reconnue à nos jours non durable [A .Arbaoui ; 1992]. Nous essayerons à travers cette partie d'étudier la forme des habitations vernaculaires dans les climats de notre étude.

3. La forme des bâtiments dans les climats chauds et arides :

L'étude de la forme des habitations dans les climats chauds et arides peut nous apporter des connaissances énormes sur l'adaptation des maisons aux conditions climatiques [Hassan Fathy ; 1978 & Arrouf Abdel Malek; 2002] comme elle peut nous apprendre de traduire en terme de perception thermique nos volumes de construction, ceci peut nous aider à évaluer l'impact réel de nos projets une fois réalisés sur terrain, dans la mesure où les exemples choisis seront illustrés, étudiés et simulés pour les développer et les améliorer ; le concepteur est ainsi amené à concevoir et développer des volumes capables d'optimiser l'ombrage, de minimiser le captage solaire et le transfert de chaleur ; à ce titre il faut souligner qu'il n'y a pas de listes précises des formes performantes. On essaye d'analyser la performance thermique de quelques formes afin de définir des concepts générateurs de formes adaptées aux conditions climatiques significatifs – forts – voir excessifs – (chaud et sec).

On a remarqué à travers les constructions traditionnelles que le climat et les conditions qu'il implique étaient pris en considération en les évitant ou en les exploitant tant au niveau des composants de la construction qu'au niveau de la morphologie globale des bâtiments.[Géorge Alexandroff ; 1982, Arthur Brown;1988et Al].

En réaction contre cette tendance nous essayons d'examiner concrètement des types de maisons propres aux régions d'étude pour confirmer ou infirmer l'adaptation de ces formes traditionnelles aux conditions climatiques d'été. Nous tenteront par la suite le développement, l'optimisation et l'amélioration des types de formes identifiées afin de créer plusieurs possibilités d'innovation et d'intégration des volumes à l'architecture des régions à climat chaud et aride, tout en ayant des formes géométriques, des rapports de proportions définis selon le fonctionnement passif de nos futures maisons.

La solution envisagée est donc une remise en question des enveloppes architecturales liée à la reprise de conscience de l'influence du climat sur le confort thermique et la modernisation de la production des formes par la recherche des volumes à forte réflexion de la radiation solaire. De façon générale, il existe à travers la morphologie des constructions vernaculaires des configurations géométriques tels que le cube, le tour, le massif, les calottes sphériques à parois courbes...Etc. Ces dernières sont susceptibles d'être préformante et peuvent être intégrés comme parois ou toitures dans l'enveloppe des maisons. Enfin, ce système de rentabilité d'énergie et d'amélioration des performances par la recherche volumique serait certainement mieux adapté au concept d'architecture solaire, le volume architectural est en effet conçu en tenant compte des conditions climatiques des régions concernées.

4. L'analyse morphologique :

L'analyse morphologique est un processus qui vise la détermination de la structure d'un bâtiment, d'un ensemble de bâtiment ou d'un tissu urbain. [M. Duplay ; 1983].

Elle procède par décomposition d'éléments de leurs mise en évidence et de leur comparaison ; en effet, son domaine d'application qui est l'architecture vernaculaire est devenu ces dernier temps le sujet de recherche le plus actuel des architectes et des urbanistes ; notre objectif n'est pas de répéter des solutions stéréo typées, mais de tirer avantage des leçons du passé, voire ce qu'un architecte peut prendre de cet héritage pour pouvoir concevoir la forme de ses maisons et de répondre aux besoins d'aujourd'hui ***Les normes traditionnelles de construction sont le résultat direct de l'expérience génératrice des habitants avec les facteurs de l'environnement⁽¹⁾***, aller jusqu'à confirmer la supériorité thermique des modèles vernaculaires ; Mais, de nos jours on assiste à une déviation de ces normes et recommandations issues de l'expérience humaine dans les climats chauds. C'est pourquoi, on insiste sur la recherche des solutions dans le passé, par le biais de l'analyse typo-morphologique qui nous permet de tirer des lois valables à nos besoins de recherches concernant la protection contre l'intensité des radiations solaires. Pour que notre analyse soit objective, il faut préciser son domaine qui tend à L'acquisition quantitative des informations concernant les constructions traditionnelles, leurs formes et leur dimensionnement.

Notre méthodologie se base donc sur une observation des formes des maisons dans leurs groupements, l'abstraction de ces formes en éléments géométriques simples, l'identification des caractéristiques morphologiques par une analyse d'échantillons représentatifs, tout en considérant les critères d'analyse suivant :

- le degré de compacité des groupements
- L'aspect morphologique de la forme (la géométrie).
- Le prospect (rapport des dimensions - proportions).
- Le rapport surfaces extérieures au volume.

⁽¹⁾ Mote.T , Salih.M, Gurdil.F : "Passive cooling in MARDIN. A vernaculair Solution in hot regions". p13.1988

- Le rapport plein - vide (cour, puit, ouverture...Ets).
Enfin en tentera d'améliorer les formes résultantes par une étude de la performance thermique on étudiant et développant ces derniers

4.1. Hypothèses de travail :

Pour les besoins de ce chapitre, certaines hypothèses seront mises en considération :

- Les autres variables déterminant la forme (la culture, l'histoire, les croyances et autres) seront tenues à l'écart.
- La forme du bâtiment est considérée comme un moyen de contrôle thermique.
- Notre recherche sera focalisée sur deux paramètres climatiques qui sont la radiation solaire et la température extérieure afin d'examiner avec précision les solutions traditionnelles.

4.2. Etapes de l'analyse :

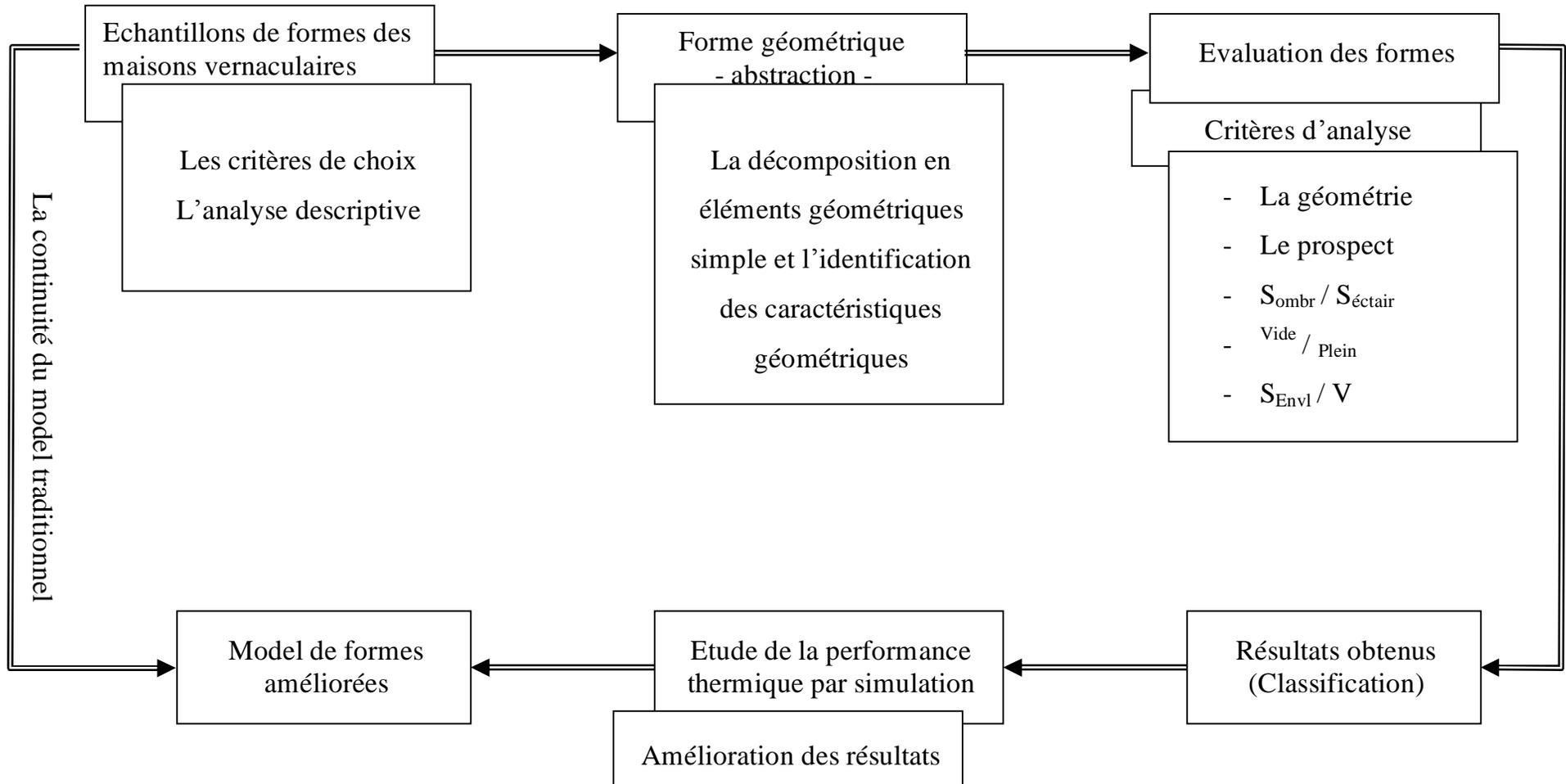
*** L'acquisition des données:**

- 1- délimitation de l'aire d'étude (climats chauds et arides).
- 2- définitions explicites et opératoires du genre (forme) architectural étudié (formes vernaculaires supposées être climatiquement fiables).
- 3- la sélection de spécimens d'édifices – échantillon - susceptibles de constituer le corpus (choix et classification des formes ayant un intérêt manifeste en termes de protection solaire)

*** La gestion des données :**

- 1- description des échantillons
- 2- l'abstraction de la forme et le test de la qualité thermique en utilisant les facteurs de l'analyse
- 3- construction du modèle intelligible (passage du perceptible à l'inéligibilité des formes et la détermination de la morphologie).
- 4- validation du résultat (particularité menant à la généralité).

5. Méthode de l'analyse morphologique (l'investigation) :



6. Choix d'échantillons représentatifs :

L'étude morphologique des maisons traditionnelles propose la définition d'une relation entre la configuration du bâtiment et le fonctionnement thermique de l'espace intérieur ; en ce sens notre travail vise le test de cette proposition sur trois échantillons représentatifs, tout en considérant les facteurs de comparaison déjà cités. Notre choix des maisons à analyser est basé en premier lieu sur les constats d'observation empirique et sur l'émergence du type de maisons reconnues dans les régions à climat chaud et aride ; le premier critère du choix sera donc la situation de la maison ou du groupement ; en second lieu, la variété et la diversité de ces maisons sur le plan volumique. Notons que l'appréciation de la perception thermique des usagers est un élément très important pour le choix des échantillons surtout que les exemples à employer seront existants (types plus répandues - majoritaires).

Echantillon 01 : La maison à cour du Mzab.

Echantillon 02 : La tour (El Yémen).

Echantillon 03 : La maison avec coupole (El oued).

7. L'échantillon 01 : La maison à cour du M'Zab

7.1. Motivation du choix de l'échantillon 01 :

Les constructions vernaculaires des groupements du Mzab présentent un meilleur exemple de l'adaptation de la maison aux conditions climatiques du Sud Algérien. En effet, Cette dernière est protégée des radiations solaires intense et de la chaleur torride par la compacité obtenue grâce à la jonction des unités morphologiques qui constituent un bloc massif composé de plusieurs parcelles associées. La forme de ces entités est facile à composer ; elle répond ainsi au principe de la maison « **introverti** » dont l'organisation se fait autour d'un espace central à ciel ouvert bio climatiquement agréable, ombragé donc frais. (Fig 4.7), [Bandini M ; 1984].

L'espace vide est appelé (*Emesent eddar*), est couvert généralement le jour par « *chebek* » pour protéger la cour des rayons solaires de midi. Ces maisons sont également dotées de terrasses accessibles ou il fait bon de dormir lors des nuits chaudes de l'été.

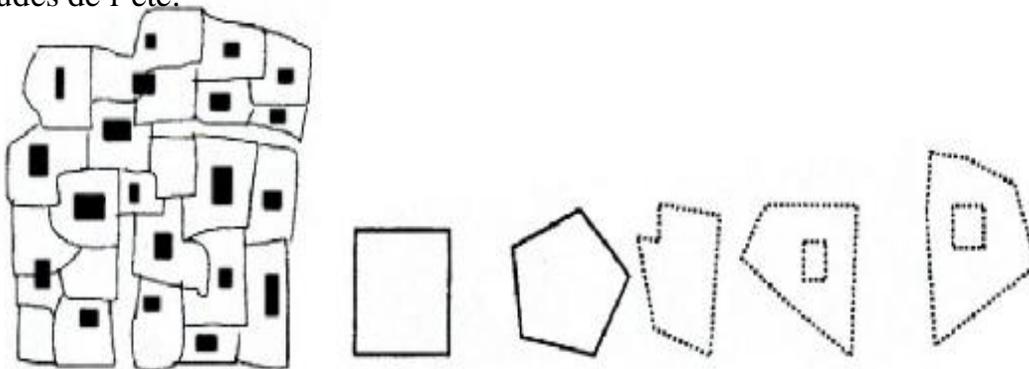


Fig 4.7 : La densification de la compacité par l'association des formes et la minimisation des espaces exposés

Source : Bandini M ; 1984

L'utilisation d'une ouverture au plafond est donc un meilleur moyen pour accentuer la compacité et minimiser l'exposition de l'enveloppe extérieure aux radiations solaires [André Ravero ; 1982], ce type de maison - *introvertie* - a été l'objet de beaucoup de recherches en vue de comprendre la relation entre la société mozabite, sa culture, son climat et la forme de ses maisons [A Tachrifet & T Bellal; 2003]. Dans cette analyse, nous estimons bénéfique d'étudier ce type de construction qui mérite d'être examiné d'une façon opérationnelle pour juger de sa qualité thermique (le maintien du confort par l'utilisation d'une cour couverte), et confirmé le choix ingénu des habitants du M'Zab.

7.2. Situation de l'échantillon :

Le groupement du M'Zab se situe au Sud Algérien à 500 Km de la capitale Alger, sur une latitude de 32° 30' Nord et 3° 45' Est, sa surface est de 4000 Ha d'environ [DPAT, Ghardaïa ; 1998] ; cette région à climat chaud et aride est caractérisée par une température moyenne estivale très chaude (45°C à l'ombre), une humidité relative très faible 24 %, un phénomène d'aridité très accentué par des vents chauds soufflant à une vitesse de 3-5m/s, venant de l'Est ,du Nord ou du Nord Est, en été [Station météorologique, Ghardaïa ; 2000].



Fig 4.8 : Vue générale sur la vallée du M'Zab

Source : André Ravero ; 1982

7.3. Description de l'échantillon :

L'exemple choisi illustre parfaitement un type représentatif de la maison mozabite à cour [OPPVM^(*); 2001], cette dernière est articulée à l'espace public (la rue) par une entrée en chicane « *skif fa* » destinée à préserver l'intimité familiale. Elle s'organise généralement autour d'un espace central avec une circulation périphérique (galerie à arcades entourant la cour), son volume est fermé sur l'extérieur mais ouvert sur le ciel grâce à une ouverture au plafond permettant l'éclairage naturel ; elle sert aussi de « *cheminée de ventilation* » drainant l'air frais entrant par les petites ouvertures de la façade. (Voir fig4.9)

La construction mozabite est régie par une réglementation traditionnelle (*El Orf*) transmise et sauvegardée par (*El Jamaa*), elle stipule les mesures suivantes :

- La construction en deux étages R+1.
- L'extension maximale ne doit pas dépasser 7.5 m.
- Des ouvertures donnant sur la cour, dimensions permises (0.60 × 1.00).
- Des plans compacts pour protéger l'enveloppe des radiations solaires.
- Utilisation des couleurs claires pour minimiser l'absorption des parois

extérieures [T Bellal, 2002]

En dehors de cette réglementation, la société mozabite a élaboré une architecture spécifique qui traduisait matériellement les structures relativement complexes de son organisation, de son mode de vie et de sa pensée. Comme elle a trouvé d'autres pratiques sociales pour vivre en harmonie avec les conditions d'un climat chaud et aride tel que :

- **Le nomadisme journalier :**

Celui-ci réside dans la division de la terrasse par des murailles, cela permet deux opportunités - dormir à la belle étoile la nuit et s'ombrager le jour.

- **Le nomadisme saisonnier :**

Déplacement des habitants des « *Ksour* » vers les cités des jardins (*palmeraies*) à la recherche de la fraîcheur, de l'ombre et de l'eau.

Les matériaux utilisés ne déterminent pas la forme de la maison. Ils permettent seulement l'utilisation de certaines techniques de construction et la combinaison des éléments architectoniques originaux. La construction faisait autrefois exclusivement appel aux matériaux locaux tel que : La pierre, le sable, Timchent (plâtre traditionnel), la chaux et le palmier. Ces derniers possèdent une capacité thermique importante et une bonne réflexion de la radiation solaire [OPPVM^(*); 2001].

En fin, après avoir confirmé la mise en valeur du potentiel vernaculaire des maisons Mozabites, On va essayer par l'analyse morphologique d'étudier l'adaptation de l'enveloppe de ces maisons au climat et aux besoins du confort thermique.

^(*)[OPPVM : Office de Protection et de Promotion de le Vallée du Mزاب ; Ghardaïa].

7.4. Analyse morphologique de l'échantillon 01 :

7.4.1. Le plan de masse :

La maison mozabite est construite essentiellement sur un principe de compacité ; ce dernier a beaucoup d'avantages sur le plan climatique car **60%** environ des parois extérieures de l'enveloppe sont protégées de l'excès de chaleur et des radiations solaires. Même l'unique façade exposée, donne généralement sur une ruelle étroite ce qui implique qu'elle sera ombragée la plupart de l'après-midi.

Surface totale de l'enveloppe = 388 m²

Surface des parois exposées = 155 m² ----- 40%

Parois verticales (Façade Ouest) = 59 m²

Plancher horizontal (toiture) = 96 m²

Surface des parois non exposées = 232 m² ----- 60%

Murs Nord, Sud et Est

S exp / S env = 0.4

S n exp / S env = 0.6

Alors, de toute l'enveloppe de la maison, seulement la toiture et la façade Ouest sont exposées aux flux de chaleur et aux radiations solaires, ce qui fait que le confort intérieur de l'espace est conditionné par la minimisation des gains de chaleur due à ces deux parties de l'enveloppe.

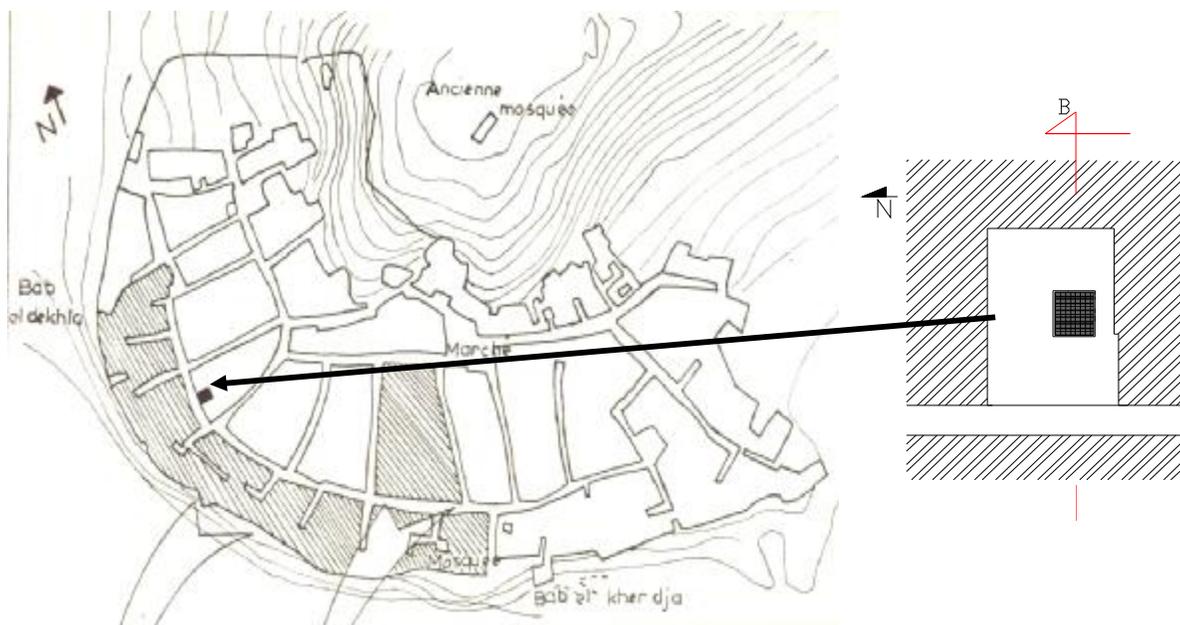


Fig 4.10 : Plan de masse « BOUNOURA »

7.4.2. L'enveloppe :

L'emboîtement fermé de l'enveloppe lui offre davantage une protection contre les gains de chaleur par rayonnement, L'utilisation d'une structure géométrique aussi compacte et massive que possible qui Fournit un maximum de volume avec des surfaces minimums exposées aux différences de températures et a l'intensité des radiations solaires [Donnadiou ; 1986].

Surfaces totales de l'enveloppe : 388 m²

Surfaces des parois verticales :

Façade ouest : 59 m²

Façade est : 59 m²

Façade sud : 86 m²

Façade nord : 86 m²

Surfaces des planchers horizontaux :

Toiture : 96 m²

Le volume de la maison : 703 m³

Le facteur de forme : $388 / 703 = 0.55$



Fig 4.11 : Axonométrie de la maison

7.4.3. Orientation :

L'allongement de la forme parallélépipède de la maison mozabite selon l'axe Est-ouest et l'exposition de sa façade principale vers l'Ouest est théoriquement défavorable ; mais, ces conditions n'ont pas d'effet important sur le confort thermique car la maison est bien protégée des gains de chaleur par le fait de **la compacité** qui protège la maison des cotés Nord, Sud, Est et permet l'ombrage de la façade Ouest des rayons solaires horizontaux, pendant l'après midi. En effet la façade Ouest qui représente les deux tiers de la façade Sud ($59.13/86.84 = 0.68 = 2/3$) est déjà protégée de l'intensité des radiations solaires de l'après midi par la proximité de la maison en face (voir figure : étude de l'ensoleillement de la façade Ouest) et a l'étroitesse de la ruelle ($W / H = 2 / 7.74 = 0.25$).

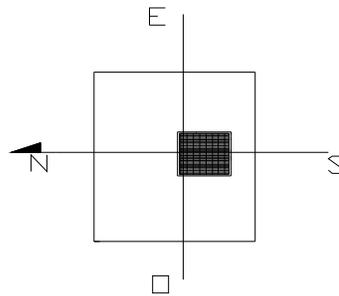


Fig 4.12 : Schéma montrant L'orientation de la maison

Orientation de la paroi	Surface de la paroi	Surface totale de l'enveloppe	Rapport S paroi / S tot	Remarque
Nord	86	388	0.22	La toiture est la surface la plus exposée aux radiations solaires. Elle nécessite par conséquent une protection contre la radiation solaire
Sud	86		0.22	
Est	59		0.15	
Ouest	59		0.15	
Toiture	96		0.24	

Tab 4.2: Rapport des surfaces des parois a la surface totale de l'enveloppe

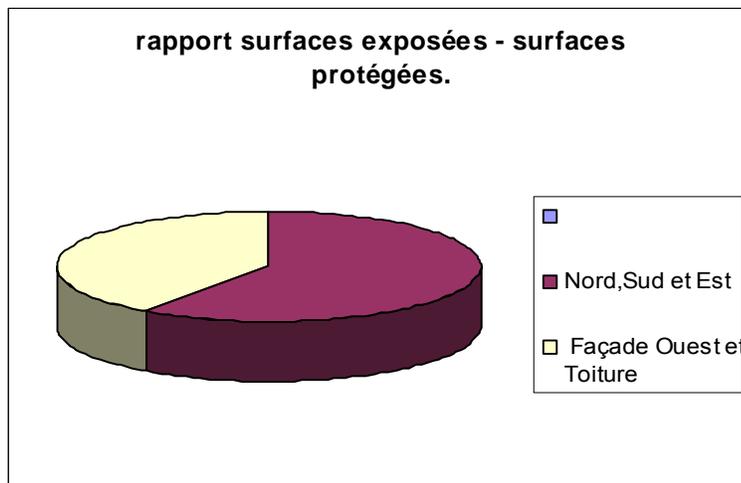
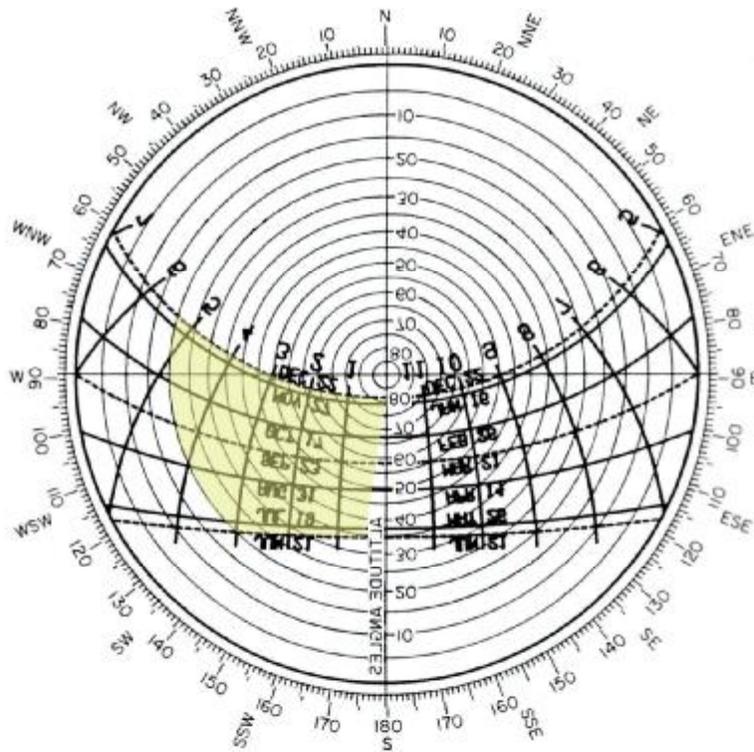


Fig 4.13: Rapport des surfaces exposées aux surfaces protégées de l'enveloppe

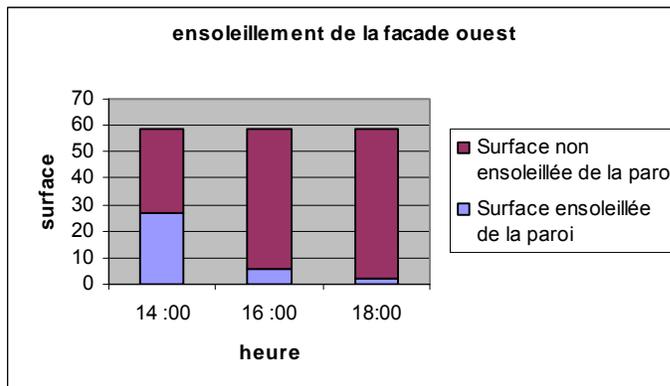


LATITUDE : 32° 30" NORD

Fig 4.14 : La zone d’enseillement de la façade Ouest latitude 32° ,30 " Nord

Orientation de la paroi	Surface totale de la paroi	heure	Altitude	Azimut	Surface ensoleillée de la paroi	Surface non ensoleillée de la paroi	Rapport S ensol / S paroi
Ouest	59	14 :00	62	77	27	32	0.46
		16 :00	38	97	6	53	0.1
		18:00	13	112	2	57	0.03

Tab 4.3: Rapport des surfaces ensoleillées a la surface des parois (cas de la façade Ouest)



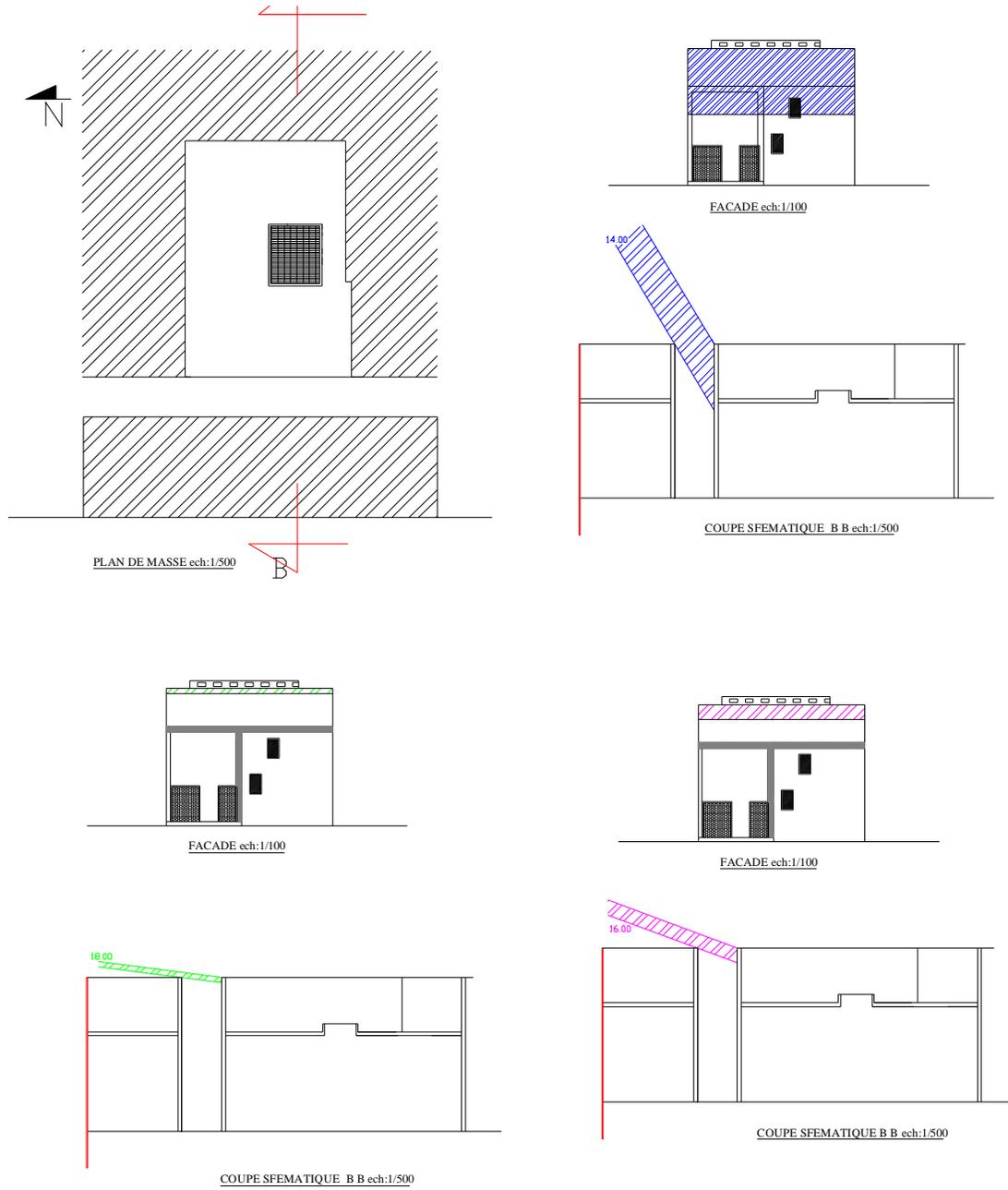


Fig 4.15 : Etude de l'ensoleillement de la façade Ouest a 14 :00, 16 :00 et 18 :00 selon le tableau ci dessus

La deuxième partie exposée de l'enveloppe - la toiture horizontale - est partiellement protégée pendant le jour des radiations solaires par l'ombre des murs de clôture et de séparation qui font **1,80m à 2,20m** de hauteur. Ils peuvent être assimilés à des masques d'occultation et constituent un moyen possible à développer pour ombrager la terrasse d'une façon efficace (voir figure étude de l'ensoleillement de la terrasse).

La présence de cette dernière autorise la pratique du nomadisme journalier et l'adaptation de l'usage de la maison aux amplitudes journalières de la température. En effet l'inertie thermique de l'enveloppe fréquemment remarquée dans cette région est très appréciée le jour, mais la nuit ce phénomène physique devient source de chaleur dégagée par les parois ce qui rend l'espace habitable (intérieur) inconfortable par rapport à l'espace extérieur. Dans ce cas, la présence d'une toiture pour dormir la nuit paraît comme une alternative intéressante

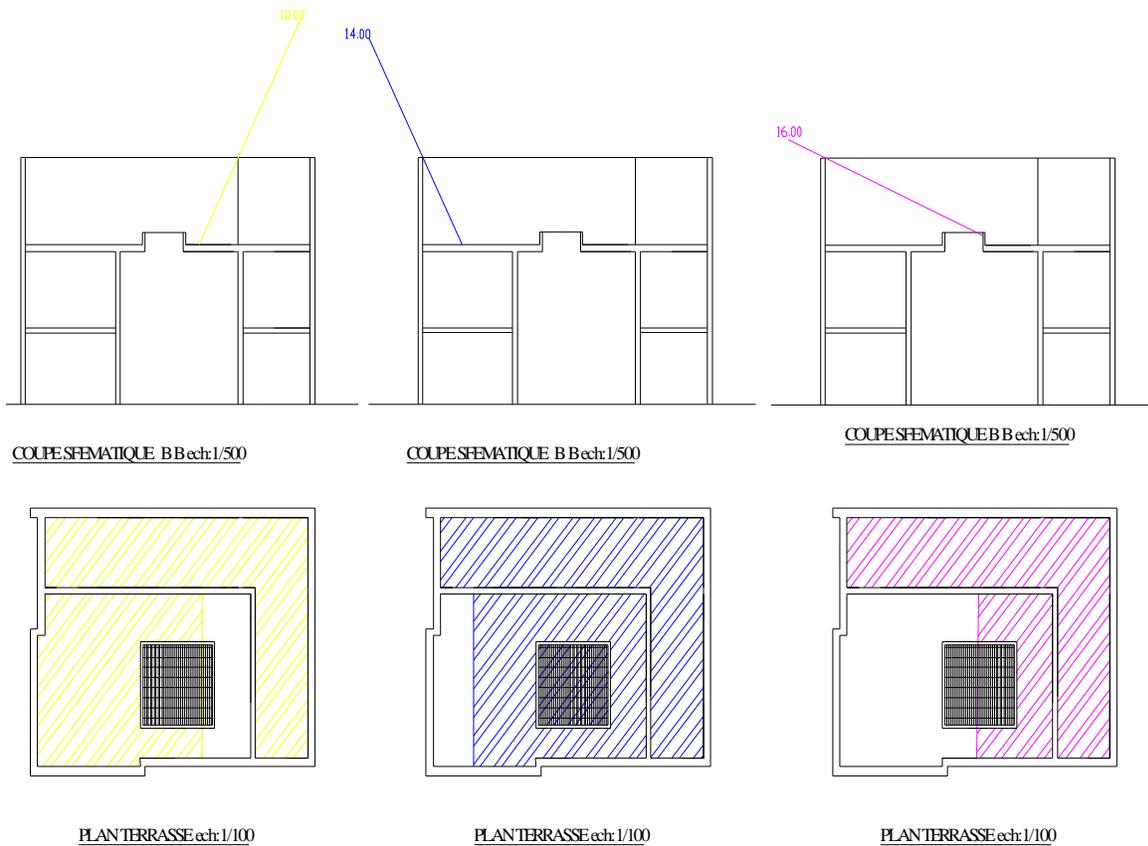
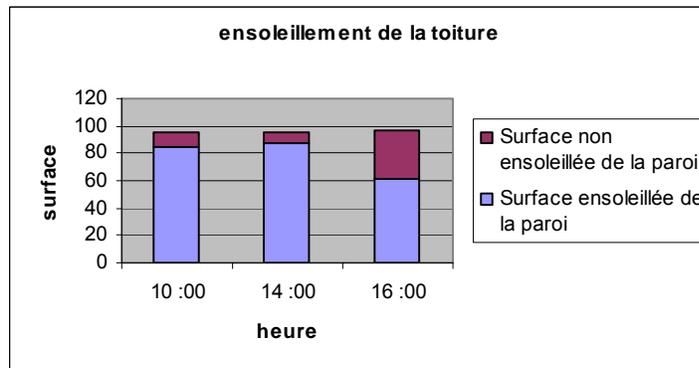


Fig 4.16 : Etude de l'ensoleillement de la terrasse

Orientation de la paroi	Surface totale de la paroi	heure	Surface ensoleillée de la paroi	Surface non ensoleillée de la paroi	Rapport S ensol / S paroi
Toiture	97	10 :00	85	11	0.88
		14 :00	87	9	0.90
		16 :00	62	35	0.35

Tab 4.4: Rapport des surfaces ensoleillées a la surface des parois (cas de la toiture)



7.4.4. Les ouvertures :

Le principe d'**introversion** permet la protection de la maison contre les radiations solaires par la création d'un espace frais et ombragé à l'intérieur de l'habitation d'où les ouvertures qui s'ouvrent et se protègent du soleil. Même les fenêtres sur la façade sont protégées des rayons solaires par les masques d'occultation créés par les ruelles étroites.

A l'exception des maisons à cour utilisées dans les régions à climat chaud et aride, la cour des maisons mozabites est appelée « *emessent eddar* » cette appellation est relative aux dimensionnement de la cour qui s'agrandit de haut en bas comme une cheminée (voir Fig 4.17). Pour que la cour ne reçoive pas beaucoup de radiations solaires la fenêtre au plafond « *chebek* » se ferme pendant les périodes chaudes de la journée (de 10 : 30 jusqu'à 16 : 30 en été). [Bouchair Ammar ; 2003].cet élément principal de l'intégration climatique, se comporte thermiquement comme un puits de fraîcheur et de lumière. La nuit, Le sol émet rapidement l'énergie emmagasinée pendant le jour vers le ciel et devient par conséquent un lieu privilégié pour dormir à la belle étoile. Le jour, Le soleil n'est pas imposant à cause de l'effet d'ombre projetée par les parois de séparation et la fermeture du vide cour. Les enquêtes menées sur terrain ont permis de constater que cet espace qui constitue le noyau de la maison est le plus apprécié et le plus utilisé le jour [André Ravérau ; 1985]

Le rapport **l / h** de la cour est donc : **1.7 / 6.3 = 0.26**

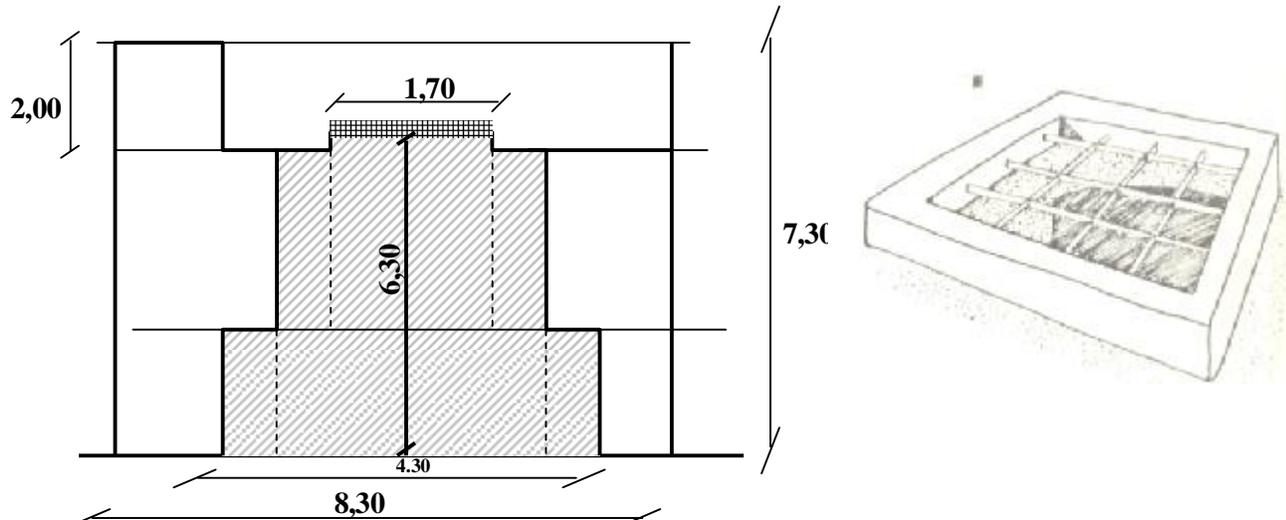


Fig 4.17 : Coupe schématique sur le vide - cour et vue sur l'ouverture au plafond « CHEBEK »

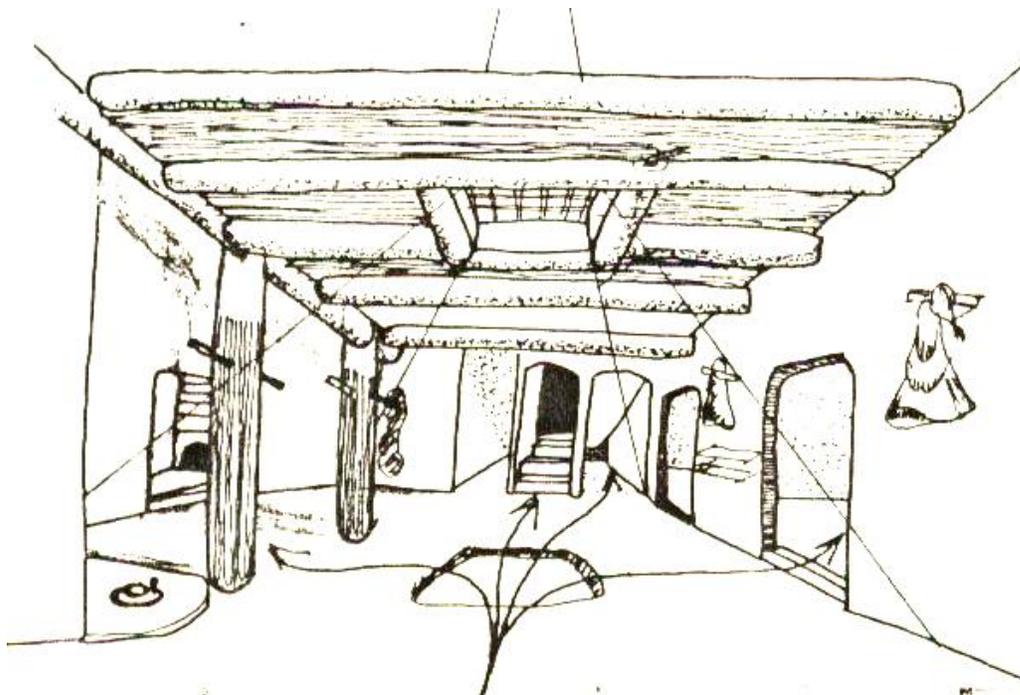


Fig 4.18 : Vue intérieure sur le vide « COUR », l'espace le plus éclairé.

8. L'échantillon 02: la tour Sanaa (Le Yémen)

8.1. Motivation du choix de l'échantillon 02:

Le Yémen, est l'une des rares régions semi arides à avoir conservé jusqu'à aujourd'hui une pratique architecturale traditionnelle en fonction des conditions climatiques, ces derniers ont contribué au maintien de l'originalité des formes d'habitations [Denis Grandet ; 1988].

Le choix de cette catégorie d'architecture régionale qui a su tirer le meilleur profit des conditions locales. A un intérêt qui s'explique par la richesse architecturale originaire de ce pays et les particularités formelles de ce type lié aux particularités régionales climatiques. L'analyse de ce type, nous apporte la conviction sur les potentialités climatiques d'une architecture traditionnelle dominée par la verticalité, On peut néanmoins observer une typologie architecturale différente basée sur l'utilisation optimale des ressources et des caractéristiques physiques du milieu dans lequel elle s'inscrit [J M Alexandroff, 1983]. Des maisons massives d'au moins quatre étages, ouvertes sur un minimum de trois façades, avec caves et entrepôts aux étages inférieurs, de formes rectangulaires. Leurs morphologies fonctionnent selon un système clos à l'intérieur, ouvert à l'extérieur - **La maison extravertie** - à l'opposé du premier exemple.

L'absence du patio comme "régulateur thermique" et La tendance à la verticalité dans une région chaude, nous conduit à poser une question importante sur la qualité thermique de l'enveloppe de ces habitations et de leur adaptation aux conditions climatiques. Dans ce qui suit on va tenter de trouver une réponse a cette question.

8.2. Situation de l'échantillon : Sanaa (Le Yémen)

Notre deuxième exemple se trouve dans la région des hauts plateaux, où se situe la capitale Sanaa avec sa vieille ville. Cette dernière s'implante sur un Plateau à 2000 mètres d'altitude est d'une Superficie de : 527 970 Km².



Fig 4.19 : Situation de la ville de Sanaa

Source : Encarta ; 2005

dotée d'un climat aride avec des écarts de température allant jusqu'à 30°C entre le jour et la nuit, les journées sont très chaudes, tandis que les nuit sont très fraîches. Les saisons sont moins différenciées et la pluviométrie est relativement faible (100mm/an) [H Hamou ; 1993].

8.3. Description de la maison :

Les Yéménites ont inventé les gratte-ciel il y a plusieurs siècles. Leur architecture traditionnelle figure aussi bien dans les villes que dans les campagnes. Leurs habitations se présentent comme suit :

- Le rez-de-chaussée, sert d'abri pour les animaux domestiques
- Les étages en dessus, servent de magasins.
- Plus haut, l'étage des réceptions publiques ou *diwan*,
- Plus haut encore, deux ou plusieurs étages comprenant les chambres d'habitation et la cuisine destinées aux membres de la famille.
- En fin, le dernier étage et la terrasse servent de lieu de relaxation intime.

La maison type du Yémen (Sanaa) se présente ainsi :

- De forme rectangulaire, haute de cinq étages
- Dotée de quatre façades.
- Des ouvertures sur l'extérieur (très petites au R D C et plus grandes aux étages)
- Une seule cage d'escalier dessert les différents étages, et donne accès à des paliers sortes d'antichambres à chaque étage.

En outre, elle se compose de :

- Deux cuisines, au 3eme et 4eme étage
- Quatre salles de bains du 1er au 4eme étage
- Le dernier étage comporte la chambre la plus grande et la plus décorée aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur agrémenté d'une terrasse. Ce dernier s'appelle "*le Muffreddge*" réservé uniquement aux hommes

La structure spatiale et morphologique de la maison Yéménite présente de nombreuses différences quant à la maison introvertie. Sa morphologie rappelle beaucoup la morphologie moderne que l'on trouve dans (**les tours**) d'aujourd'hui. A savoir :

- Un système spatial extravertie
- Une fonction climatique est assurée par l'enveloppe extérieure (le rapport de la surface d'enveloppe au volume construit)
- D'un point de vue spatial, on retrouve les mêmes caractéristiques formelles en plan et en élévation

- Seul la cage d'escalier possède une structure spatiale verticale.
- La configuration formelle de l'espace intérieur est identique pour tous les niveaux.
- Les espaces principaux occupent les côtés latéraux du plan rectangulaire
- La partie centrale comprend les espaces de transitions (hall, cage d'escalier et la salle d'eau)
- Les groupes d'espaces se superposent parfaitement, du premier au dernier niveau en conservant la même structure formelle et dimensionnelle.
- Les différentes liaisons de l'espace intérieur sont commandées par deux modes relationnels vertical et horizontal ; deux espaces clés, sont respectivement le lieu fort de ces relations la cage d'escalier et le hall.

Notons que l'uniformité relationnelle des habitations yéménites est due au fait que l'espace intérieur de chaque niveau possède la même structure spatiale [J M Alexandroff ; 1983].

8.4. Analyse morphologique de l'échantillon 02 :

8.4.1. Plan de masse :

Dans ce climat chaud et sec, les rues très étroites de la Vieille Sanaa ont l'avantage appréciable de protéger le niveau du sol contre le soleil brûlant. Même les façades sont protégées par le fait de la proximité des bâtiments l'un de l'autre.

Les surfaces de l'enveloppe sont totalement exposées aux conditions extérieures ($S_{exp} / S_{env} = 1$); mais, Le rapport W/H qui est de l'ordre de $(3.5/17.5 = 0.2)$ permet comme on l'a remarqué sur la Fig un bon ombrage des façades

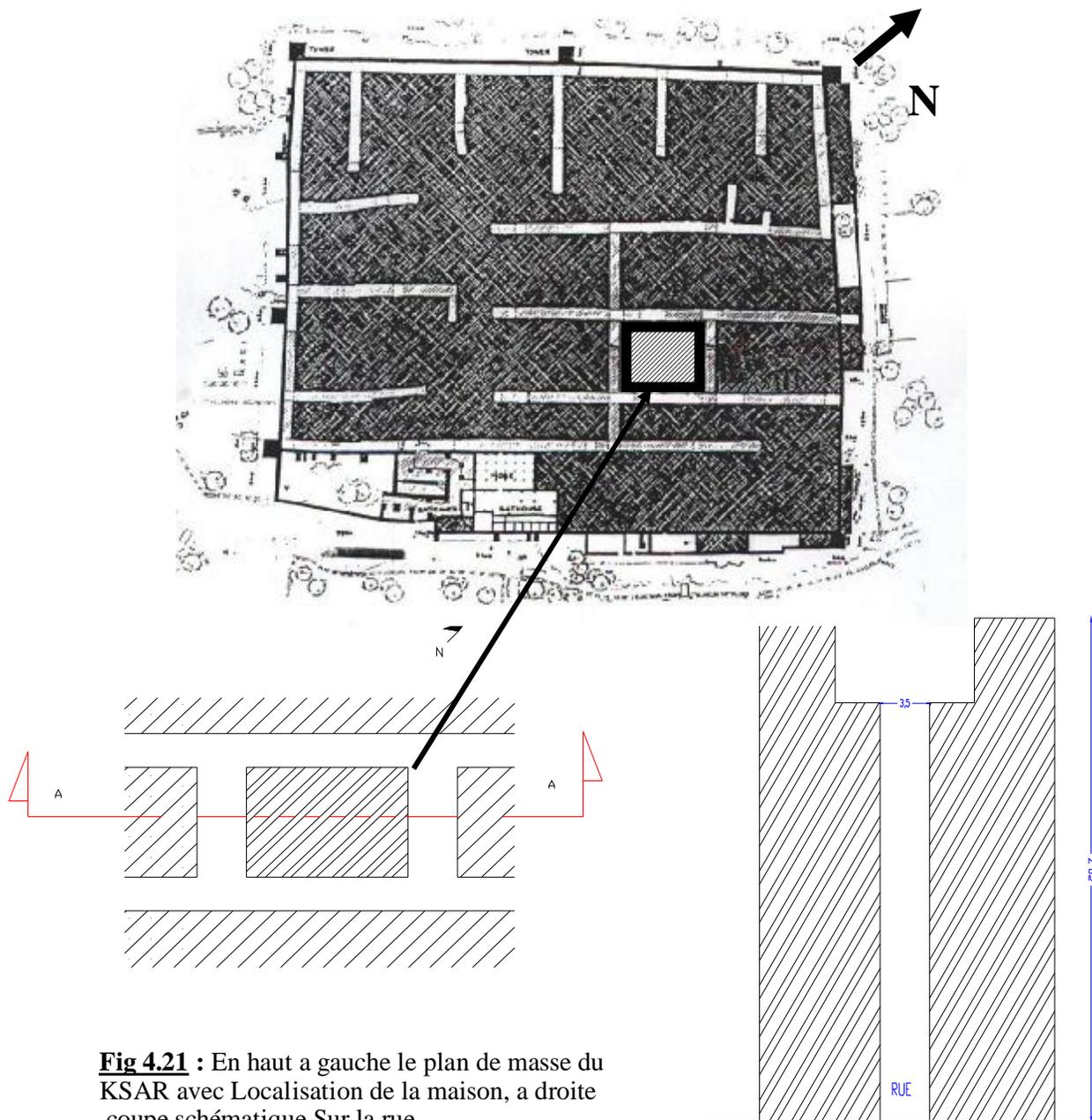


Fig 4.21 : En haut a gauche le plan de masse du KSAR avec Localisation de la maison, a droite coupe schématique Sur la rue.

8.4.2. Enveloppe :

Le caractère d'extraversion de notre exemple, définit une relation intérieur/extérieur basée sur l'enveloppe extérieure ; ceci induit un mode d'échange thermique particulier entre l'ambiance intérieure et extérieure. Le confort thermique de l'espace habitable dépend donc de la configuration physique et morphologique de l'enveloppe extérieure, de son d'orientation et des dimensions du bâtiment.

Le comportement thermique de la maison extravertie, se définit par rapport à deux aspects distincts de sa morphologie et sa composition spatiale verticale, qui en fait un volume ouvert vertical d'une hauteur considérable. Le fonctionnement thermique de cette enveloppe est renforcé par l'utilisation des matériaux locaux de forte inertie thermique telle que la pierre naturelle, ce qui lui permet d'avantage de retarder le transfert de chaleur jusqu'à la nuit d'où une ventilation nocturne peut rafraîchir l'espace habitable. La texture et les couleurs claires des parois lui permettent aussi d'avoir un facteur d'absorption « a » très faible [Alexandroff J M ; 1983].

Surfaces totale de l'enveloppe : 874 m²

Surface des parois verticales :

Façade nord ouest : 220 m²

Façade sud est : 220 m²

Façade sud ouest : 169 m²

Façade nord est : 169 m²

Surfaces des planchers horizontaux :

Toiture : 94 m²

Volume de la maison : 1952 m³

Le facteur de forme : $874 / 1952 = 0.44$

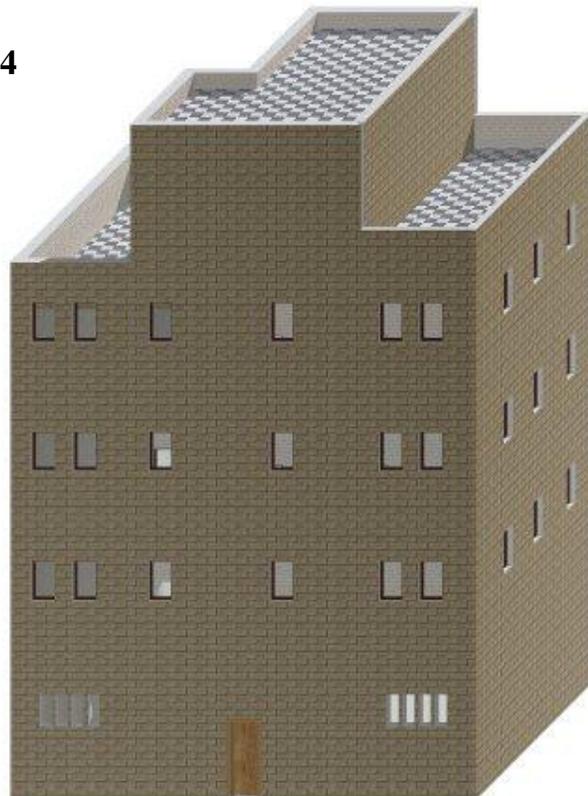


Fig 4.22 : Axonométrie de la tour

8.4.3. Orientation :

D’après la figure ci-dessous notre maison est ouverte sur quatre façades, orientée suivant un axe incliné à la direction **Nord – Sud**. La surfaces des façades Nord - Est et Sud - Ouest présentent trois quart de la surface des façades Nord –Ouest et Sud - Est ($169.74 / 220.35 = 0.77$) ou la **largeur / longueur = 3/4**. Ceci implique que ces façades occupent les cotés longitudinaux de la forme et reçoivent les mêmes contraintes climatiques (les gains de chaleur maximum de l’été). On remarque aussi que ces façades possèdent des ouvertures aux mêmes caractéristiques formelles et dimensionnelles, pour les mêmes types d’espaces et [M Hirshi ; 1983].

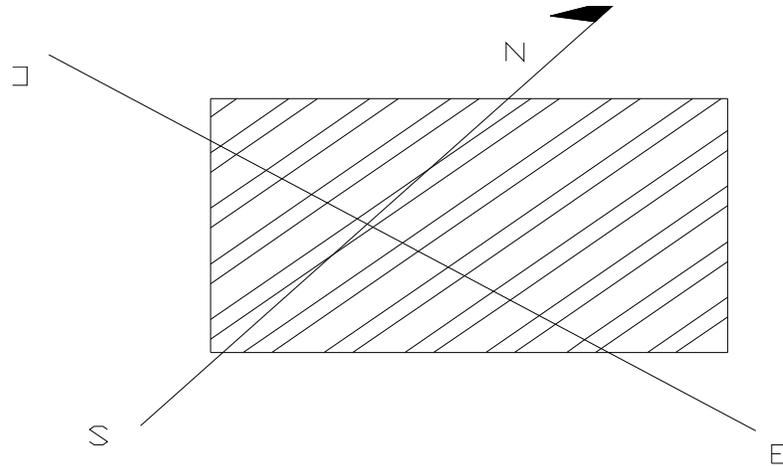


Fig 4.23 : Schémas d’orientation de la tour

Orientation de la paroi	Surface de la paroi	Surface totale de l’enveloppe	Rapport S paroi / S tot	Remarque
Nord -ouest	220	874	0.25	la toiture présente une surface minimale exposée aux radiations solaires à l’inverse des surfaces des façades Nord –ouest et Sud-est qui présentent 50% des surfaces exposées de l’enveloppe
Sud- est	220		0.25	
Nord - est	169		0.19	
Sud - ouest	169		0.19	
Toiture	94		0.1	

Tab 4.6 : Rapport des surfaces des parois a la surface totale de l’enveloppe

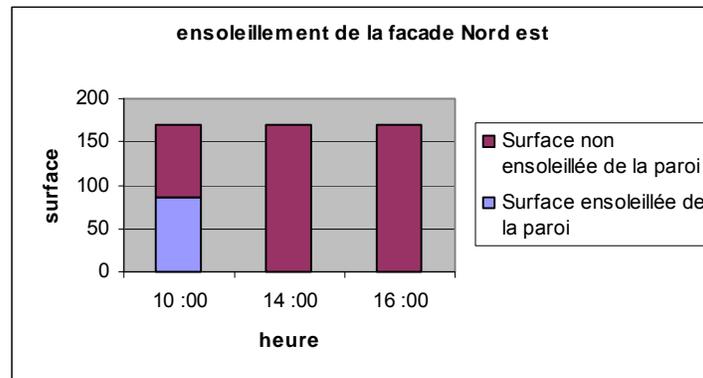


Fig 4.24: Rapport des surfaces exposées aux surfaces protégées de l’enveloppe

La façade transversale **Sud- Est**, est très ensoleillée en été (près de huit heures par jour) ; cet ensoleillement, même s'il est vertical la plupart du temps, il chauffe considérablement la façade et transmet la chaleur par convection ou rayonnement vers l'intérieur. La deuxième façade transversale **Nord- Ouest** est une orientation très recherchée en été, On remarque que cette façade comporte un nombre minime d'ouvertures. En outre, l'espace le plus chaud, la cuisine, est orienté au nord afin de faciliter l'évacuation de l'air chaud vers l'extérieur et l'apport de l'air frais à l'intérieur.

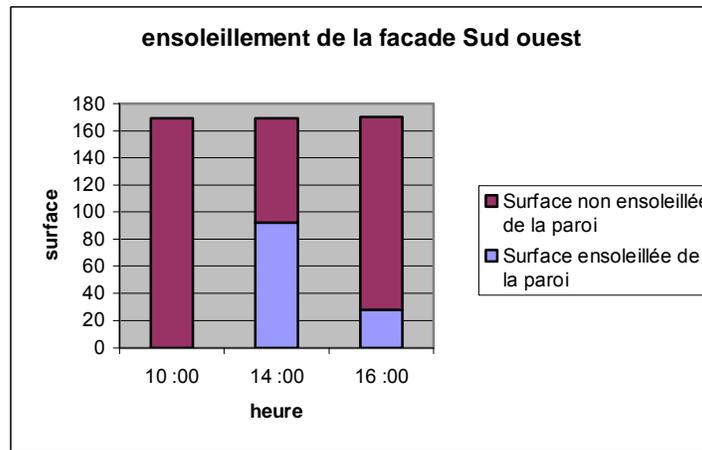
Orientation de la paroi	Surface totale de la paroi	heur	Altitude	Azimute	Surface ensoleillée de la paroi	Surface non ensoleillée de la paroi	Rapport S ensol / S paroi
Nord - est	169	10 :00	58	55	87	83	0.51
		14 :00	62	-55	0	169	1
		16 :00	37	-83	0	169	1

Tab 4.7: Rapport des surfaces ensoleillées à la surface des parois (cas de la façade Nord- est)



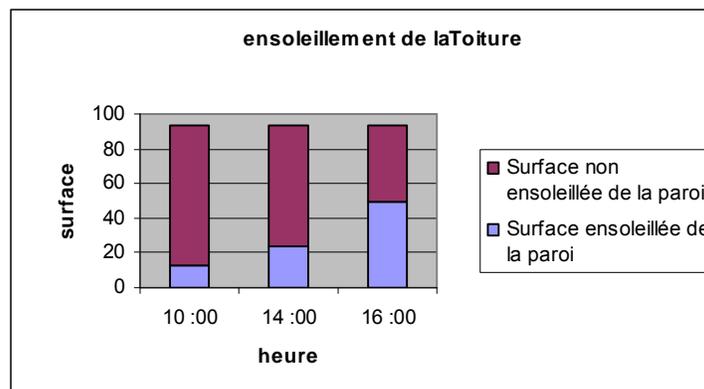
Orientation de la paroi	Surface totale de la paroi	heur	Altitude	Azimute	Surface ensoleillée de la paroi	Surface non ensoleillée de la paroi	Rapport S ensol / S paroi
Sud - ouest	169	10 :00	58	55	0	0	1
		14 :00	62	-55	92.66	77.08	0.45
		16 :00	37	-83	27.7	142.06	0.16

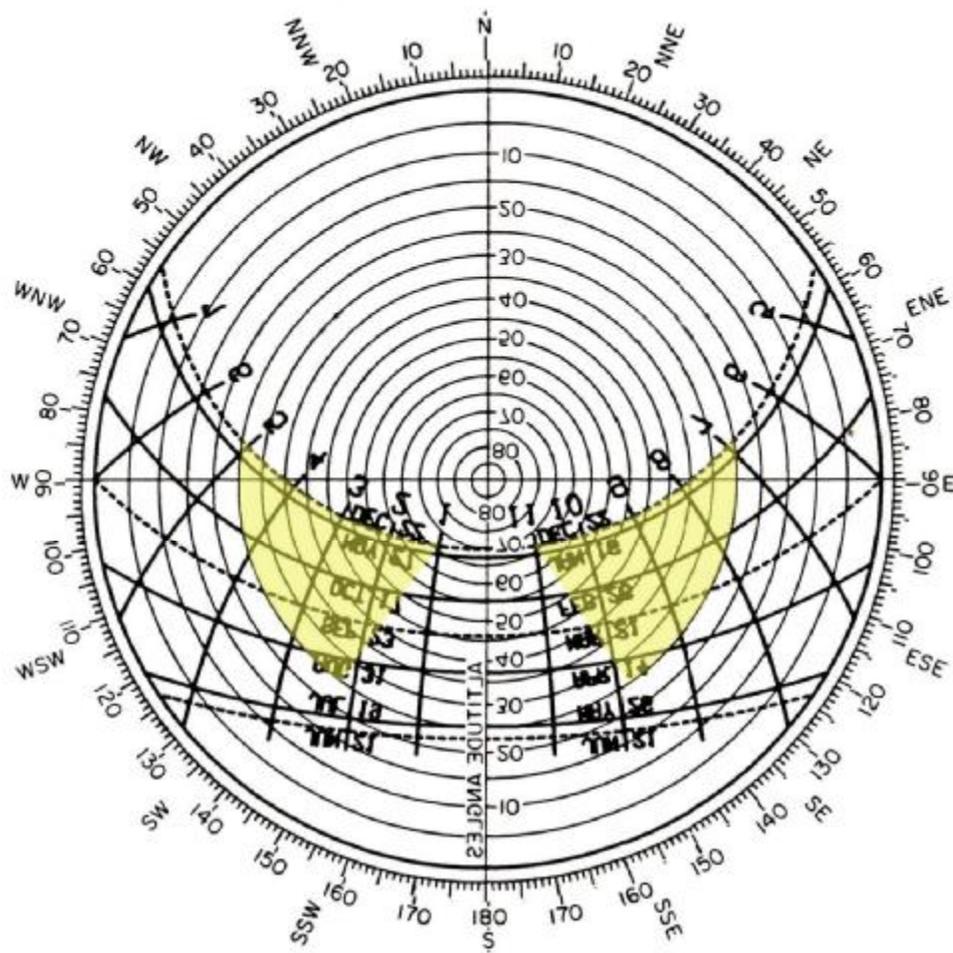
Tab 4.8 : Rapport des surfaces ensoleillées a la surface des parois (cas de la façade Sud- ouest)



Orientation de la paroi	Surface totale de la paroi	heur	Altitude	Azimute	Surface ensoleillée de la paroi	Surface non ensoleillée de la paroi	Rapport S ensol / S paroi
Toiture	94	10 :00	58	55	13	80.75	0.85
		14 :00	62	-55	24	69.4	0.73
		16 :00	37	-83	49	45	0.52

Tab 4.9: Rapport des surfaces ensoleillées a la surface des parois (cas de la toiture)





LATITUDE : 44° 60" NORD

Fig 4.25: La zone d'ensoleillement des façades Sud ouest et Nord est latitude 44° ,60 " Nord

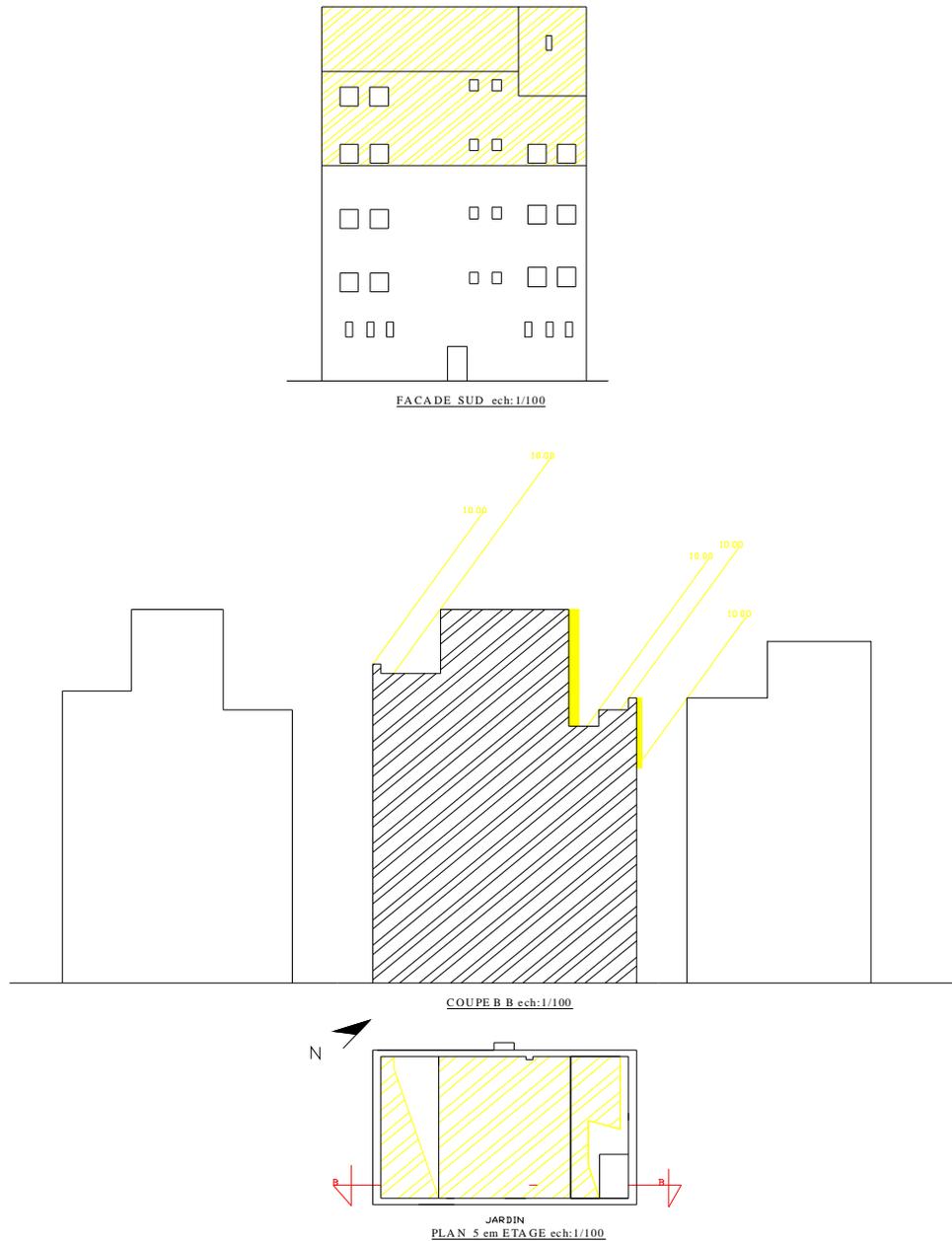


Fig 4.26 : Etude de l'ensoleillement des façades Nord est, et la Toiture a 10 :00 h

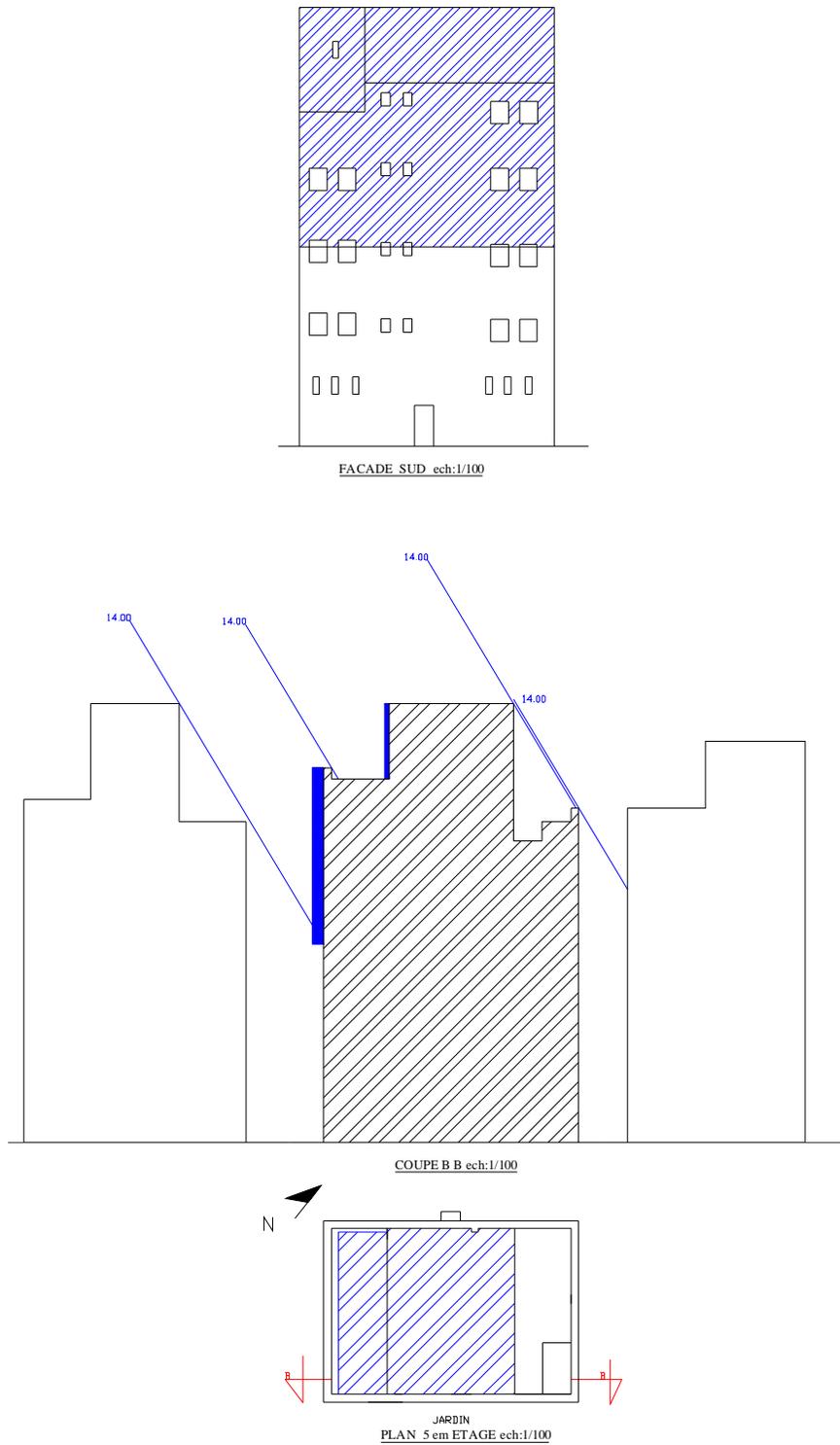


Fig 4.27 : Etude de l'ensoleillement des façades
Sud ouest et la Toiture a 14 :00 h

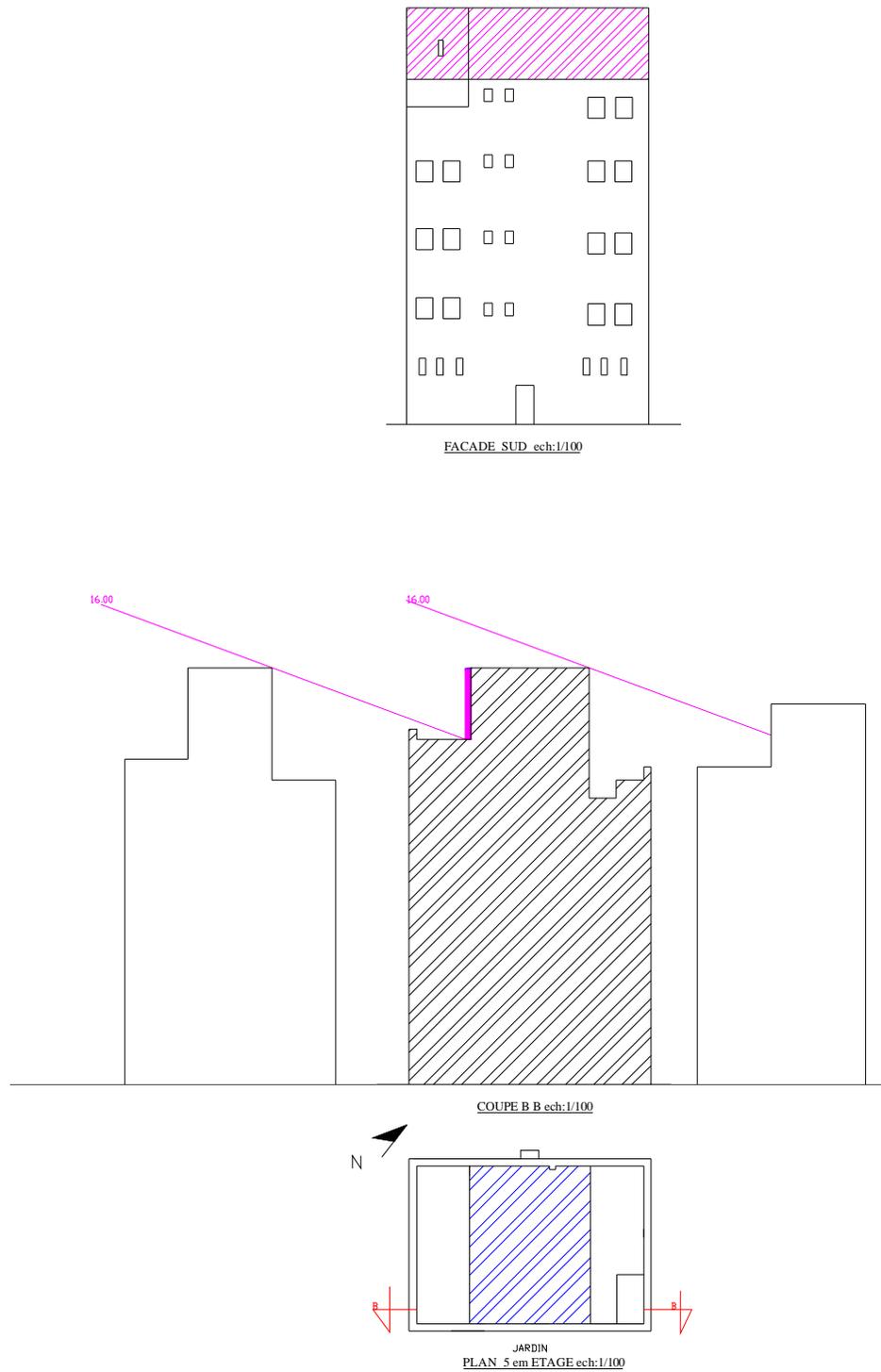


Fig 4.28 : Etude de l'ensoleillement des façades
Sud ouest et la Toiture a 16 :00 h

8.4.4. Les ouvertures :

Dans un climat aride, les températures sont modérées et même si les journées sont très chaudes, la nuit les températures sont toujours fraîches. Ainsi, le refroidissement nocturne de la construction peut s'effectuer même en absence du patio [Allain Gyt ; 1988] ; ceci confirme qu'avec une architecture à la morphologie extravertie, fermée à l'intérieur, la température intérieure nocturne des maisons de Sanaa peut être confortable grâce à la ventilation assurée par le système d'ouverture de l'enveloppe extérieure [J C David ; 1987].

On remarque pour l'ensemble des façades, que le confort thermique intérieur peut être apprécié grâce à un système de percement très perfectionné composé d'un ensemble d'ouvertures qui se différencient suivant l'orientation des espaces, leurs fonctions et leur positionnement. Au R D C les ouvertures sont très petites, type de meurtrières à **1,80m** du sol ; ces petites ouvertures lui assurent une bonne aération, tout en le protégeant de la chaleur extérieure. Par contre, les autres étages possèdent des ouvertures composées de deux parties :

- Une partie supérieure à **1.20 m** du sol, en retrait d'une vingtaine de centimètres du mur extérieur sous forme de claustras de plâtre avec des vitres intérieures ; elle assure l'éclairage ainsi que la vue vers l'extérieur, et permet l'apport de l'air frais. Cette ouverture est munie d'une protection contre les rayons du soleil sous forme d'un petit auvent.

- une partie se trouvant à **80cm** sous le plafond ; elle permet l'évacuation de l'air chaud durant le jour et la nuit. Cette forme d'ouverture procure une lumière ajourée et une protection contre la lumière éblouissante.

- Le hall central comprend le même type d'ouverture, et un système de refroidissement, sous forme de claustra de briques qui ressort en façade où l'on place une jarre d'eau

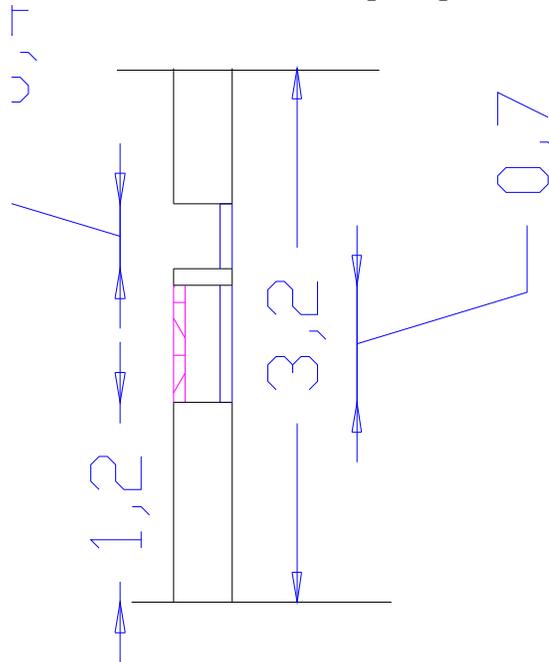


Fig 4.29 : Coupe sur la fenêtre de la tour « le Yémen »

9. L'échantillon 03: la maison en coupole de Oued Souf :

9.1. Motivation du choix de l'échantillon 03 :

El-Oued est un excellent exemple de l'architecture saharienne très distincte, un des exemples les plus fascinants de l'architecture au Sahara. Ce type d'architecture est une solution humaine apparente dans la façon de construire des maisons de sorte que les températures à l'intérieur soient moindres autant que possibles des températures extérieures. En ce qui concerne la vallée de l'Oued Righ, Oued Souf, on observe des structures compactes et des rues étroites, des maisons fermées avec peu d'ouvertures, des murs épais construits avec la brique de bout ; mais l'architecture de Oued Souf est une bonne exception, d'où le nom "**la ville des 1000 dômes**". [A Kjeilen ; 1996].

La coupole (ou dôme) est omniprésente dans l'architecture des maisons traditionnelles d'El-Oued car la coupole réfléchit une bonne partie des rayons solaires en été [S Djebali ; 2005].

A l'origine, ce type de maison est construit essentiellement pour minimiser les effets des conditions climatiques extérieurs et protéger l'ambiance intérieure des gains de chaleur dus à l'intensité de la radiation solaire et la hausse température extérieure. "Toutes les maisons anciennes sont recouvertes de coupoles hémisphériques (KOUBA). C'est assez remarquable car, au Sahara, la coupole est généralement réservée aux édifices religieux, il n'y a qu'au Souf qu'elles sont employées pour recouvrir les maisons d'habitation...." [André Voisin ; 1985]

Il ressort de ce fait que l'utilisation des coupoles au niveau de la toiture dans les régions à climat chaud et arides – Oued Souf - est une solution très efficace pour lutter contre l'impact des gains de chaleur dus principalement à la radiation solaire, en effet ces éléments architectoniques composés de plans courbés ou arrondis fonctionnent de façon passive:

- Durant le jour : les rayons solaires sont diffusés et réfléchis vers la voûte céleste, l'air chaud est accumulé à l'intérieur au dessous du vide crée par la coupole ou la voûte puis il est dégagé vers l'extérieur à travers une ouverture située en haut ou sur les cotés de la toiture concave.

- Pendant la nuit : ces surfaces se refroidissent par rayonnement nocturne de façon plus rapide que les surfaces horizontales.

En conséquence, on a estimé bénéfique de prendre comme troisième échantillon la maison de Oued Souf pour analyser la qualité thermique des maisons à toitures arrondies.



Fig 4.30: Vue générale sur la ville de Oued Souf

Source : Direction de la culture de Oued Souf ; 2003

9.2. Situation de l'échantillon :

La ville d'el Oued est située à environ 650 Km au Sud-est de la capitale Alger; surnommée «la ville aux mille coupoles». Caractérisée par un climat saharien et un milieu aride, la ville d'El Oued enregistre en moyenne une température allant de 1°C en hivers jusqu'à 45°C en été avec une pluviométrie faible ne dépassant pas une moyenne de **80 a 100** mm par année (Octobre à Février). [DPAT de Oued Souf, 2000], sa superficie est de 44558.80 Km². Sa situation géographique est de : 31°57 de Latitude, 2°59 E de longitude et de 163 mètres d'altitude, d'après les mesures de Colonel Flatters, 2000 [S Djebali ; 2005].

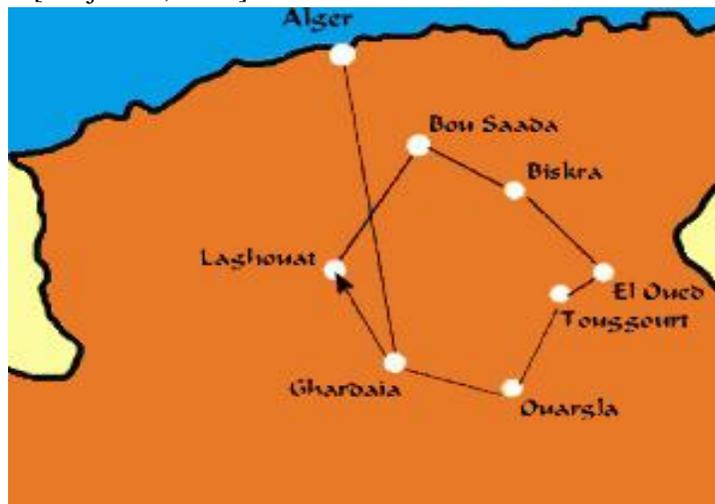


Fig 4.31 : Situation de oued Souf et de Ghardaïa dans le sud Algérien

Source : Direction de la culture de Oued Souf ; 2003

9.3. Description de la maison :

La maison du oued Souf est une unité spatiale à la fois unie et multiple, l'unité se reconstitue dans l'espace central commun, qui est la cour « EL HAOUCH », où les habitants se rencontrent obligatoirement, car la maison est dépourvue de couloirs.

La cour présente partout dans la maison du Souf est différente de celle des maisons Mozabites dans sa surface qui fait 15% à 30% de la surface de la maison. La hauteur des murs ne dépasse pas le niveau RDC, et dont l'utilisation est polyvalente, surtout pour dormir les nuits chaudes de l'été.

Au cœur même de son unité, la maison du Souf est toujours groupée avec d'autres maisons qui lui sont mitoyennes [Denis Grandet ; 1988] et la présence des coupoles démontre son caractère multiple.

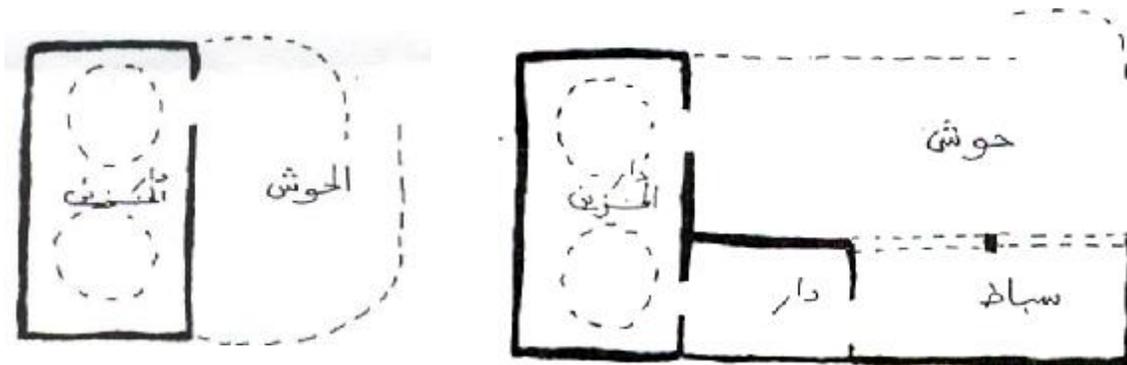
En réalité et jusqu'à aujourd'hui, il n'y a aucune théorie exacte démontrant les origines de l'utilisation des coupoles dans l'architecture des maisons du Souf ; mais, ces éléments de couverture adaptés aux besoins thermiques des régions chaudes permettent :

- la réflexion des rayons solaires vers la voûte céleste
- l'aération des espaces intérieurs
- le glissement du sable au dessus de la toiture

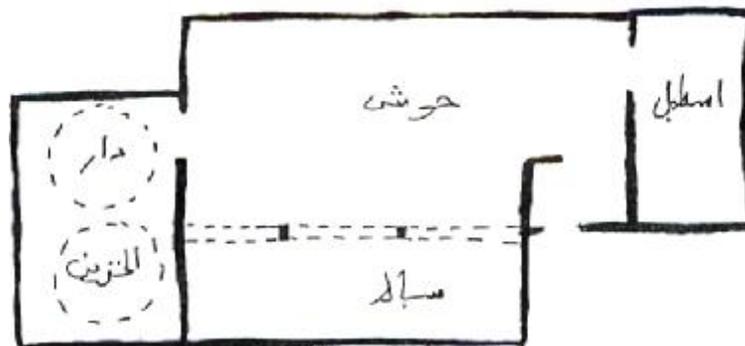
L'organisation de la maison du Souf est passée par quatre étapes essentielles et complémentaires :

Étape 01 : construction d'une pièce « dépôt » et d'un espace clôturé avec les fûts de palmiers

Étape 02 : rajout d'un espace ombragé « SABAT » pour le repos et le travail



Étape 03 : création des chambres et d'un espace pour les animaux domestiques



Étape 04 : le modèle complet d'une maison traditionnelle avec les principaux espaces

- Skifa : espace de communication entre l'extérieur et l'intérieur sa surfaces est 9 m² (4% a 8% de la surface totale)
- Dar skifa : ou le salon, espace polyvalent d'accueil d'une surface de 13.5m²
- El haouch : ou la cour, espace polyvalent qui fait 15% a 30% de la surface totale.
- Sabat : la partie couverte de la cour sur 15 m² avec un pourcentage de 8% a 12%
- Chambres : des espaces utilisés la nuit avec un taux de 50% a 70%
- Cuisine, Dépôt,Ets .

9.4. Analyse morphologique de l'échantillon 03 :

9.4.1. Le plan de masse :

L'analyse du tissu urbain de la ville de Oued Souf a montré que Les maisons étaient généralement associées par mitoyenneté, ce mode de regroupement est assez avantageux du point de vue thermique car il permet la minimisation des surfaces de l'enveloppe en contact avec l'extérieur. En conséquence, les maisons du Souf sont moins exposées aux gains de chaleur dus à l'air chaud et à la radiation solaire.

Surface totale de l'enveloppe = 392 m²

Surface des parois exposées = 253----- 64%

Parois verticales : façade Ouest (ext +Int))= 39

Plancher horizontal (Toiture)= 214

Surface des parois non exposées = 139 m²----- 36%

Murs Nord, Sud et Est

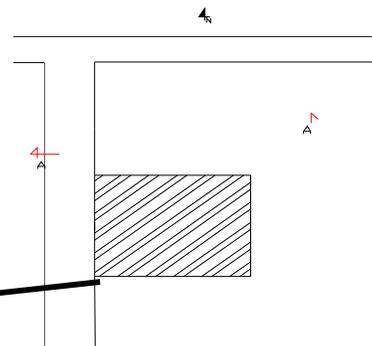
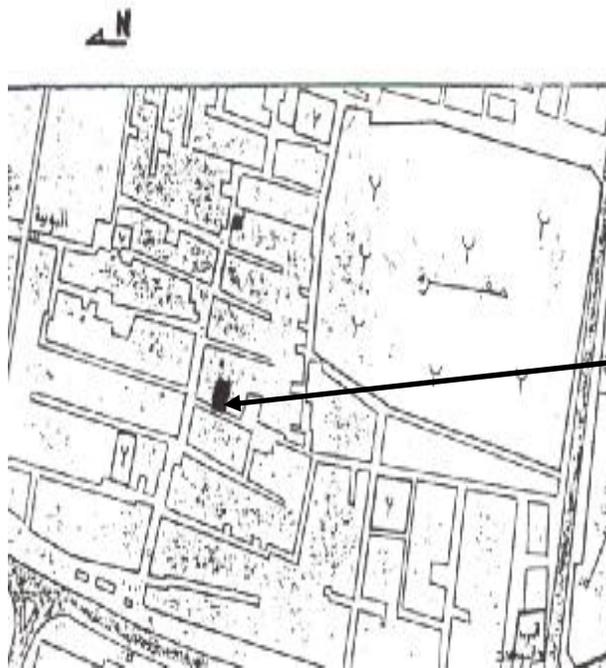
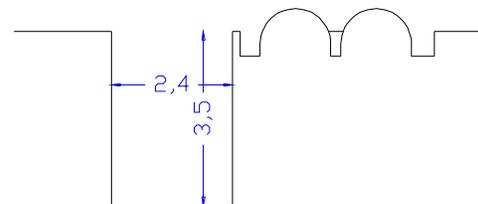


Fig 4.33 : plan de masse TAGHZOUT

Fig 4.34 : Coupe montrant les dimensions de la rue en relation avec la hauteur des bâtiments



COUPE AA ech:1/100

Alors, de toute l'enveloppe de la maison seulement la toiture et la façade Ouest sont exposées aux gains de chaleur ; mais, la surface de ces derniers est la plus importante par rapport aux surfaces de l'enveloppe ce qui fait que le confort intérieur de l'espace est conditionné par la minimisation des gains de chaleur du à ces deux

parties de l'enveloppe. Le rapport $W/H = 2.4/3.5 = 0.68$. Ne permet pas un bon ombrage de la façade Ouest surtout pendant la période de surchauffe.

9.4.2. L'enveloppe :

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

Surfaces totales de l'enveloppe : 393 m²

Surface des Parois verticales :

Façade ouest (ext +Int): 39 m²

Façade est (ext. +Int): 39m²

Façade sud (ext. +Int): 50 m²

Façade nord (ext. +int): 50m²

Surfaces des planchers horizontaux :

Toiture : 214m²

Volume de la maison : 547.54 m³

Le facteur de forme : $393/ 547.54 = 0.71$

Les dimensions de la coupole influent directement sur la valeur du coefficient de forme en l'augmentent, comme elle influe par conséquence sur la quantité des flux de chaleur transmis de l'extérieur vers l'intérieur. **Le facteur de forme sans coupoles est de : $349.7/513 = 0.66$.**

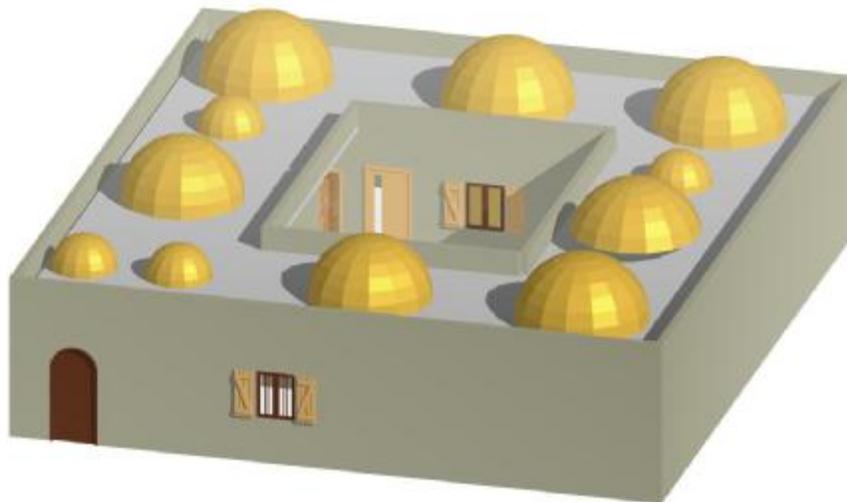


Fig 4.35 : Axonométrie de la maison du Souf

9.4.3. Orientation :

La forme parallélépipédique de la maison du Souf est allongé légèrement sur l’axe Est-ouest, l’exposition de sa façade principale vers l’Ouest est défavorable car elle reçoit les radiations solaires de l’après midi - de **12 :00 a 15 :00 h**, le mur intérieur qui donne su la cour – el Haouche - est aussi exposé a ces effets.

A ce titre il faut souligner que les dimensions de la cour dans cette exemple augmentent les surfaces exposées aux flux de chaleur ; mais, Les façades Nord, Sud, Est sont bien protégées des gains de chaleur par le fait de **la compacité** qui protège la maison de l’intensité des radiations solaires

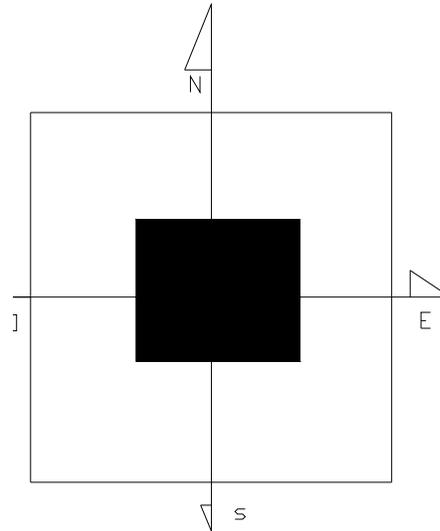


Fig 4.36 : Schémas de l’orientation de la maison

Orientation de la paroi	Surface de la paroi	Surface totale de l’enveloppe	Rapport S paroi / S tot	Remarque
Nord –ext-	30	359	0.1	La toiture, la façade Ouest et les façades intérieures sont très exposées aux radiations solaires. Ils nécessitent par conséquence une protection contre la radiation solaire
Sud –ext-	30		0.1	
Est –ext-	27		0.09	
Ouest –ext-	27		0.09	
Toiture	180		0.62	

Tab 4.11: Rapport des surfaces des parois a la surface totale de l’enveloppe

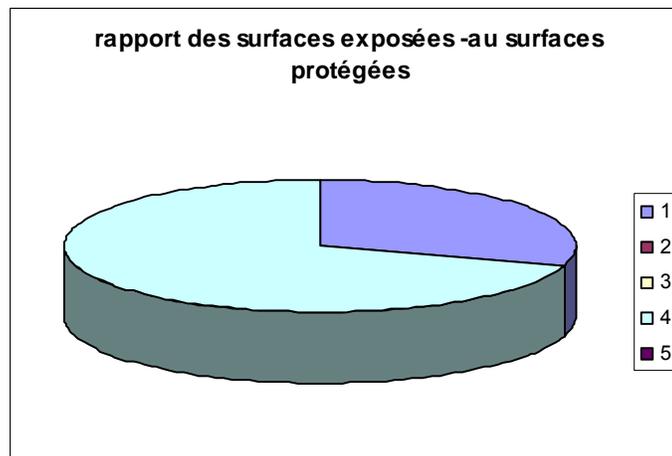
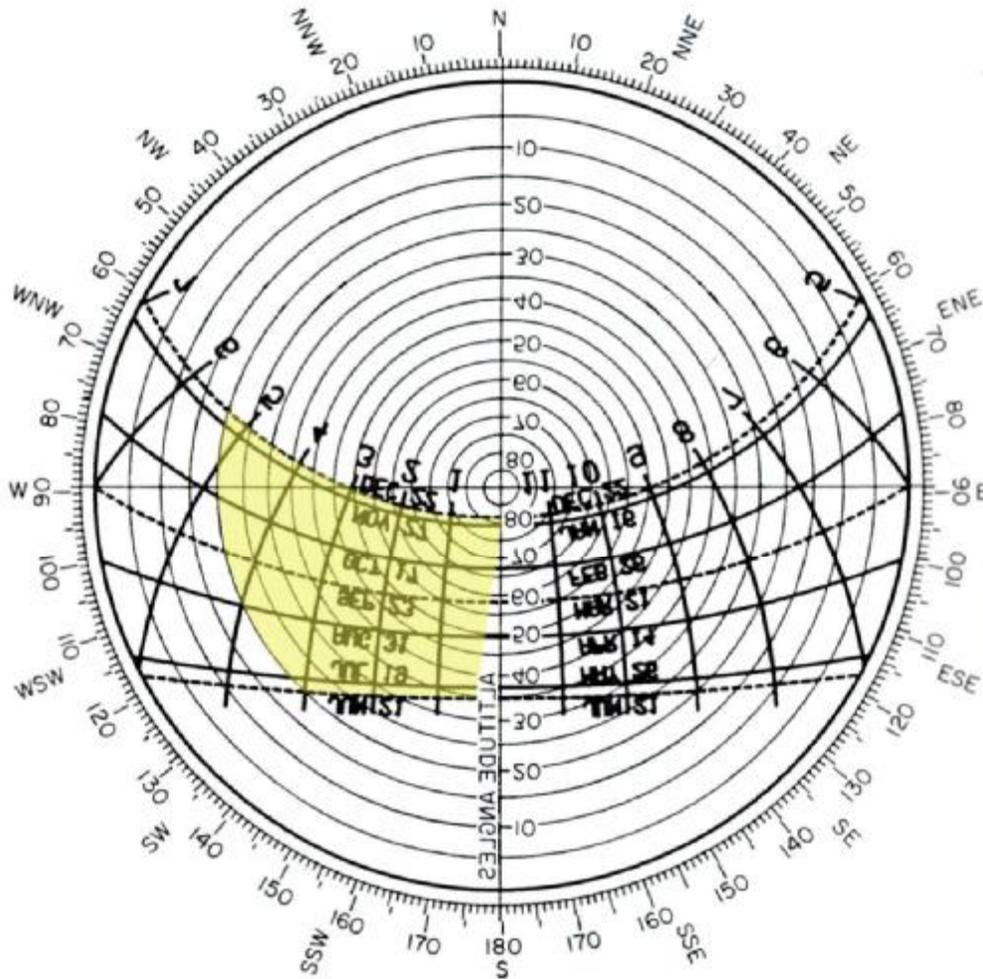


Fig 4.37: Rapport des surfaces exposées aux surfaces protégées de l’enveloppe



LATITUDE : 31° 57" NORD

Fig 4.38 : La zone d'enseillement de la façade Ouest latitude 31° ,55 " Nord

Orientation de la paroi	Surface totale de la paroi	heure	Altitude	Azimute	Surface ensoleillée de la paroi	Surface non ensoleillée de la paroi	Rapport S ensoil / S paroi
Ouest- ext-	27	14 :00	63	78	27	0	1
		16 :00	38	98	7	20	0.25
		18:00	14	112	3	24	0.1

Tab 4.12: Rapport des surfaces ensoleillées a la surface des parois (cas de la façade Ouest- Ext.)

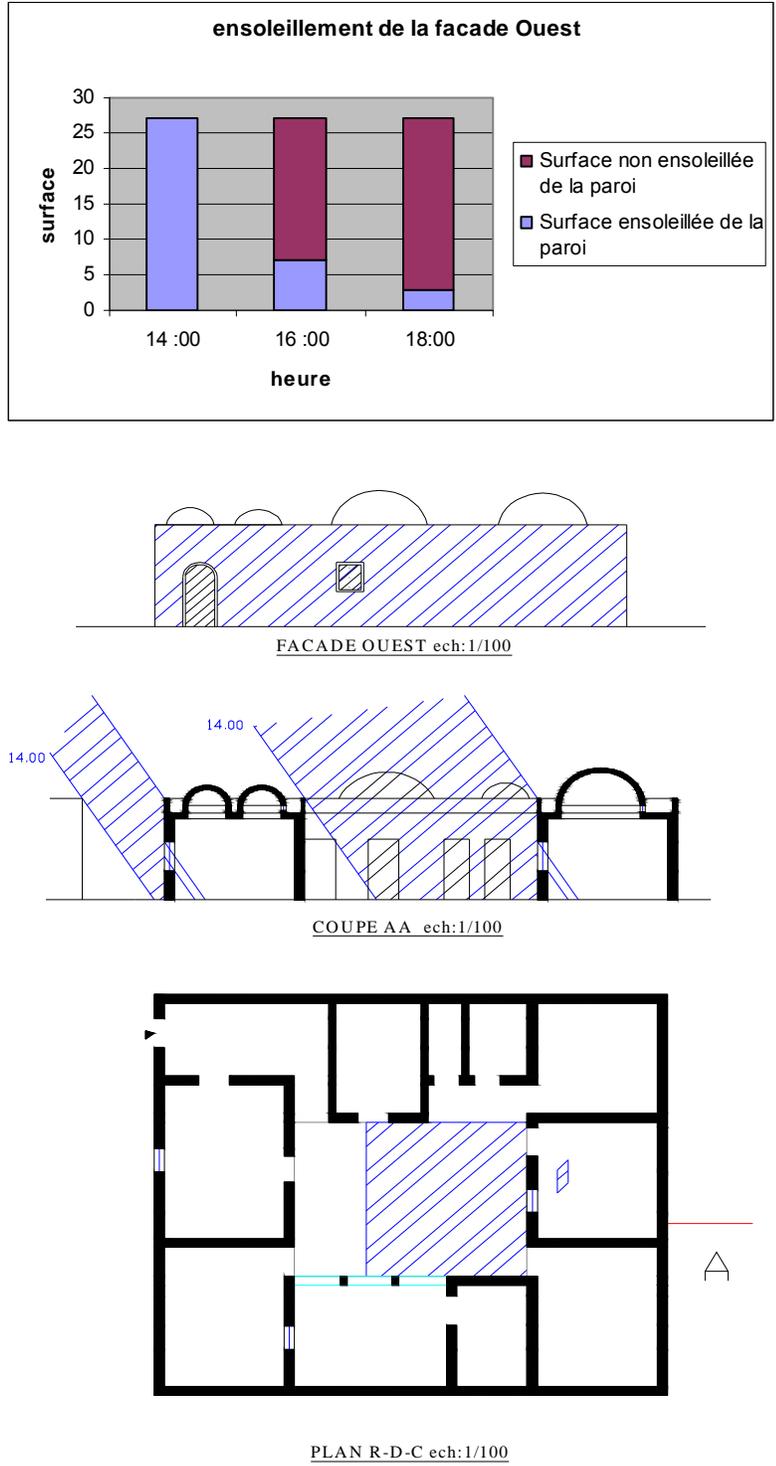


Fig 4.39 : Etude de l'enseiement de la façade ouest et de la cour a14 :00 h

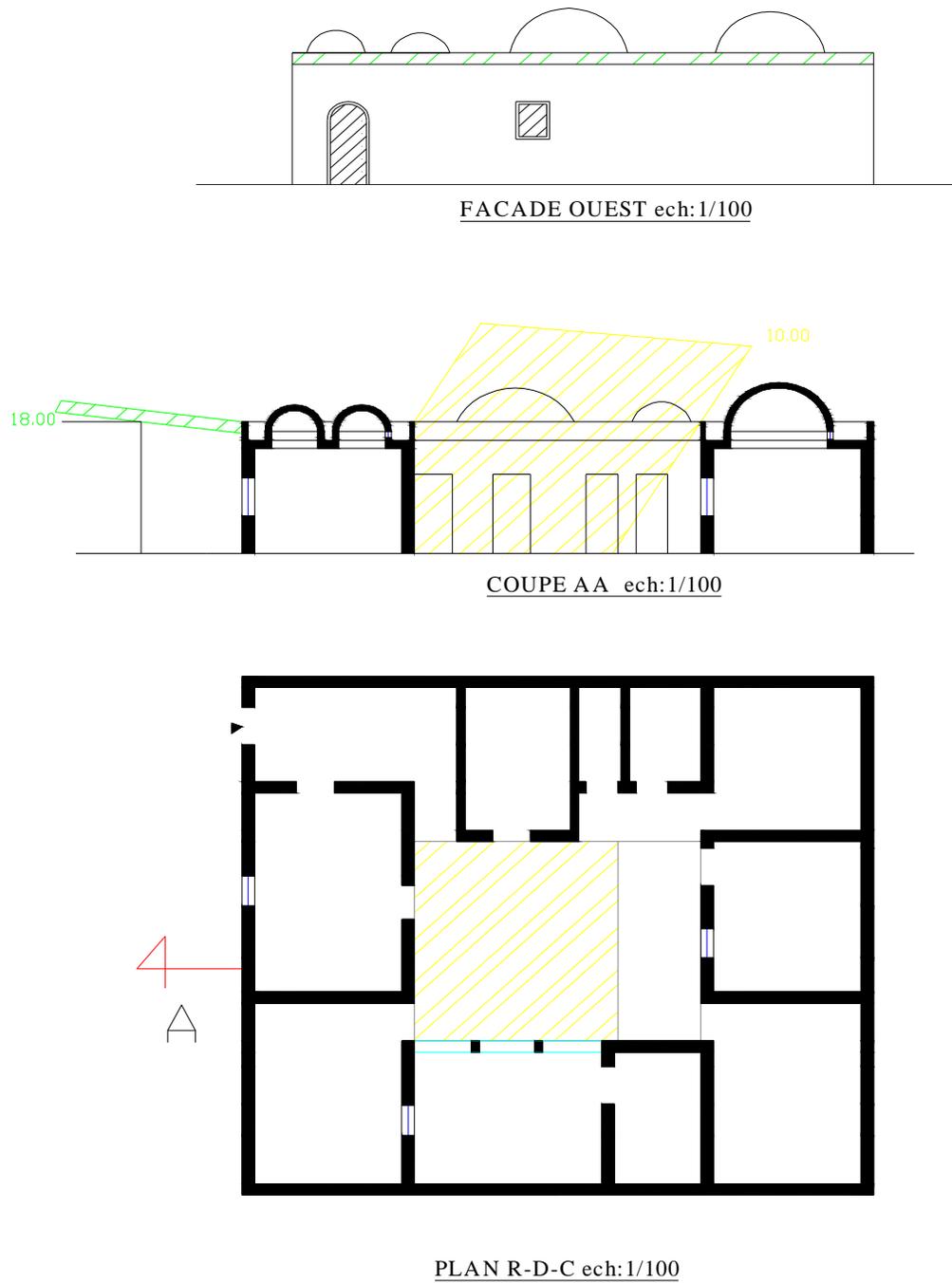


Fig 4.40 : Etude de l'ensoleillement de la façade ouest et de la cour a10 :00 h

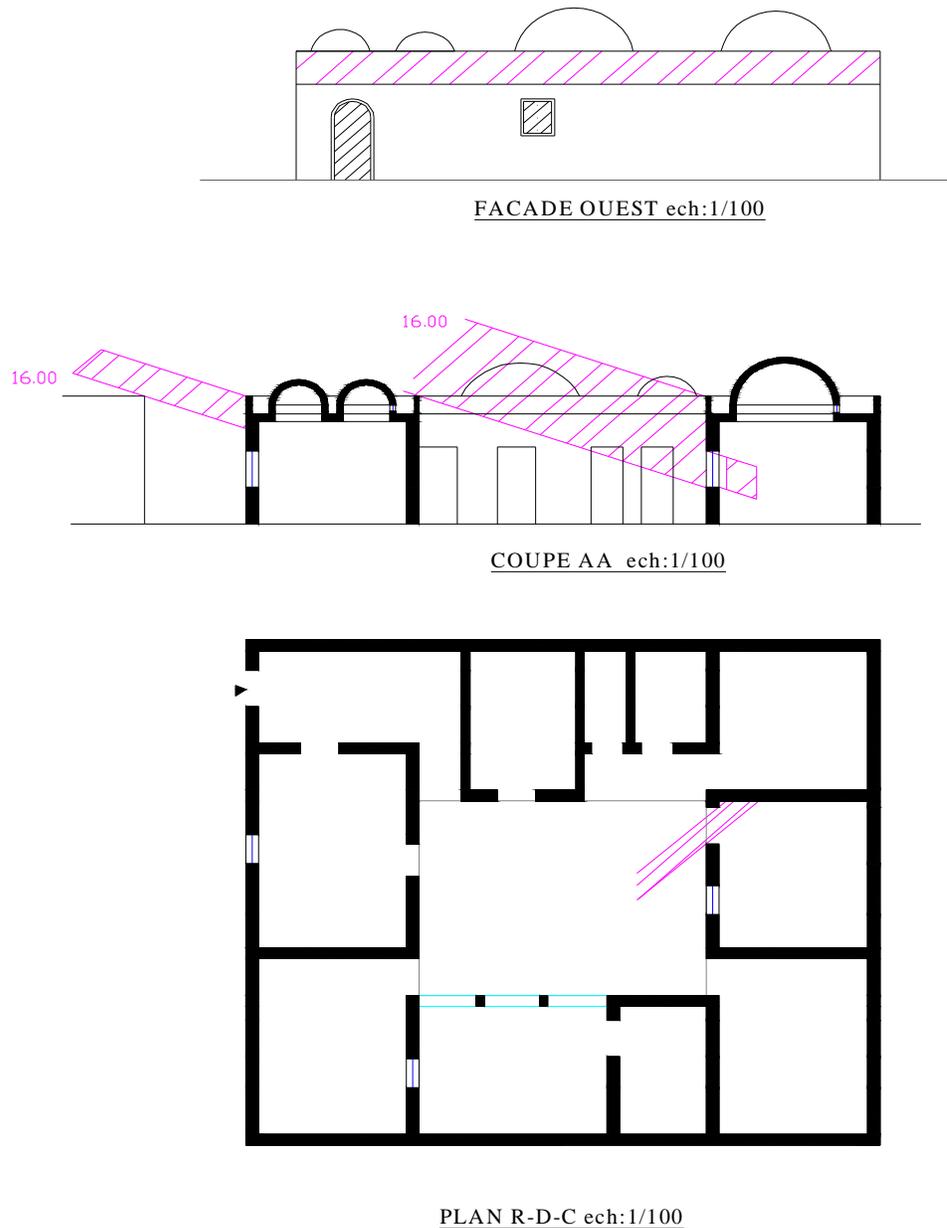


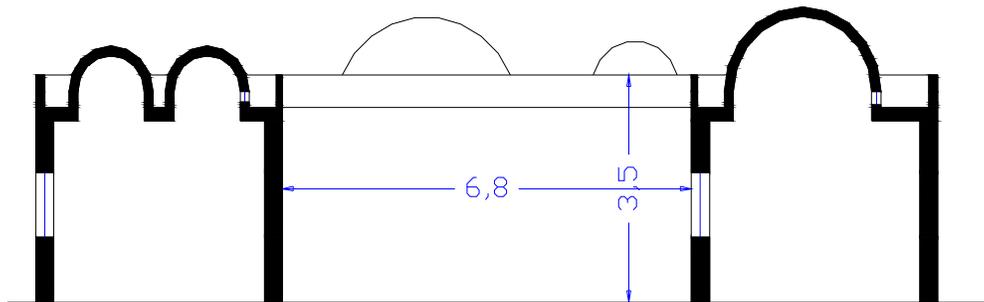
Fig 4.41 : Etude de l'ensoleillement de la façade ouest et de la cour a 16 :00 h

La deuxième partie exposée de l'enveloppe - la toiture en coupoles - est partiellement protégée des radiations solaires par l'ombre projeté des coupoles, des murs de clôture qui font **0.50 m** de hauteur et par la forte réflexion des surfaces concaves des coupoles. Ce système - efficace - de protection des toitures contre la radiation solaire mérite d'être étudié de façon plus approfondie pour le rendre opérationnel et plus pratique.

9.4.4. Les ouvertures :

Le principe d'introvertie permet dans cette exemple l'usage de la cour comme un espace agréable pour dormir les nuits chaudes de l'été comme il peut servir pour a la réserve des fruits. Pendant le jour la surface importante de la cour en relation avec la hauteur des parois **3.5m** (L/H est donc : $3.5/7 = 0.5$) influe négativement sur la quantité des rayons solaires transmis vers l'intérieur. En effet pour luter contre ces effets négatif - La protection de la maison contre les radiations solaires – les habitants ont crée un espace semi couvert ombragé et orienté vers le Nord à l'intérieur de l'habitation, ce qui leur permet le repos et la protection contre le soleil pendant l'après midi. Cet espace est appelé « **Sabat** » ou « **Abartal** »

Les fenêtres sur la façade sont protégées des rayons solaires par les masques d'occultation créés par les ruelles étroites – maisons d'en face –, leur surface est presque négligeable par rapport à la surface de la façade **1%**. Le rapport L/H est donc : $3.5/7 = 0.5$.



COUPE AA ech:1/100

Fig 4.42 : Coupe montrant l'importance des dimensions de la cour

10. Classification typo morphologique :

L'étude typo morphologique est un processus de comparaison entre les objets étudiés pour déterminer les facteurs de différence et de dégrouper l'ensemble en sous groupes « TYPE » [P Panerai ; 1980]. Voir même l'abstraction des éléments fondamentaux en éléments morphologiques simples afin d'évaluer les critères d'analyse et d'aboutir à un classement typologique. Cela peut nous conduire a des résultats préliminaires sur la qualité thermique des maisons étudiées [T Tachrifet & Bellal ; 2003].

Cette partie d'analyse qualitative sera donc à la fois l'aboutissement de ce chapitre –Analyse Morphologique - et le début du chapitre suivant qui sera consacré à L'analyse Quantitative. En effet les maisons repérées seront représentées par des types (formes les plus répandues) (**Tab 4.14**), l'objectif de cette dernière est l'étude et le développement des types déterminés l'hors de l'étude morphologique.

11. Conclusion :

Voici, pour conclure, l'évolution de notre position par rapport aux potentialités bioclimatiques des formes des maisons dans l'architecture traditionnelle des régions à climat chaud et aride, et les principales conclusions tirées de la démarche effectuée – analyse morphologique.

À la base de ce travail, l'architecture traditionnelle apporte évidemment une réponse possible à la protection de l'habitation contre les gains de chaleur, à travers la richesse de la production des formes et de leurs adaptations aux milieux difficiles - environnement physique en particulier. En conséquence, Le modèle traditionnel, exprime un savoir- faire et une ingéniosité séculaire des populations.

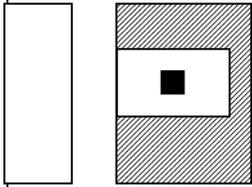
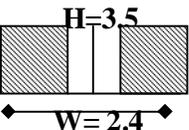
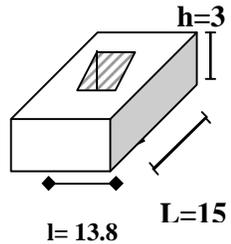
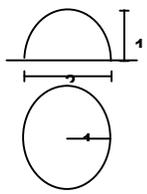
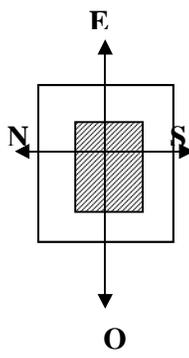
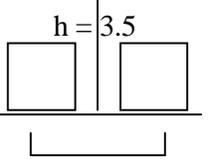
La recherche débutait donc dans l'optique de découvrir les solutions permettant la minimisation des gains de chaleur dans le bâtiment par le choix des formes à bas profit énergétique, capable d'offrir une meilleure qualité de vie. Car il ne faut jamais oublier que l'architecte ne construit pas pour lui, mais pour l'être humain qui utilisera la construction [Chris Kutschera ; 2002]. Ce n'est donc pas la construction traditionnelle et sa conservation qui doivent être le sujet principal de ce problème, mais l'homme qui y vit.

Les maisons traditionnelles lui sont-elles toujours adaptées ? Quelles évolutions doit-on y apporter et dans quel but ?

La solution proposée se décompose alors en deux points :

* D'après l'analyse typo morphologique (approche qualitative), qui vise l'identification des caractéristiques morphologiques des maisons traditionnelles et la détermination des formes en types courants et variantes, selon les réponses apportées au besoin de la protection solaire on a conclu que :

- La forme des maisons dans les climats chauds et arides est largement influée par le climat
- Le confort thermique dans ces régions dépend du contrôle des apports solaires
- La forme joue un rôle décisif dans la performance thermique des bâtiments
- La performance thermique s'accomplit avec une valeur minimale du facteur de forme « **Cf** ». ce dernier dépend donc de la nature et de la quantité des surfaces de l'enveloppe.

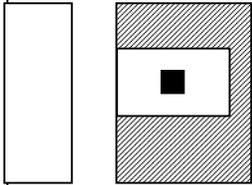
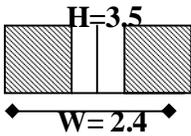
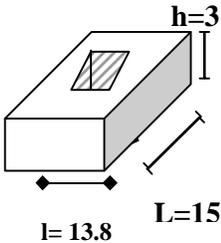
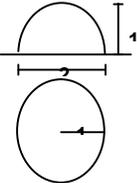
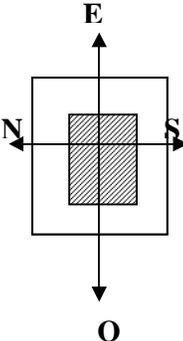
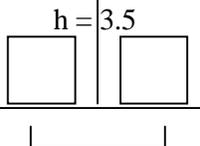
échantillon	Degré compacité	Prospect	Forme de Proportion	Facteur de forme	Orientation	Les ouvertures Svide/splien	Remarque
Oued souf	 <p> $S_{exp} / S_{env} = 0.75$ $S_{n\ exp} / S_{env} = 0.25$ </p>	 <p> $W/H = 2.4/3.5$ $W/H = 0.68$ </p>	 <p> $R = 0.7$ ou $R = 1.3$ </p> 	 <p> $Cf. = 0.71$ $V = 550$ $S = 393$ </p>		 <p> $l' / h = 3.5 / 6.8 = 0.51$ $H = l' / 2$ </p>	<p>Compacité 25%</p> <p>Surfaces exposées Aux rayons solaires : Façade ouest Toiture</p> <p>La valeur minimale du rayon de La coupole augmente la valeur de Cf</p> <p>La cour augmente la valeur de Cf</p>

Conclusion: la morphologie de la maison du souf présente trois inconvénient

- les dimensions de la cour
- les proportions de la forme
- les dimensions de la coupole

Mais ; on constate que la coupole possède une bonne capacité de réflexion des rayons solaires. Alors en doit conserver cet élément et lui donner ces dimensions optimales pour améliorer sa performance thermique.

Tab 4.13 : Analyse Morphologique - Maison introvertie L'oued

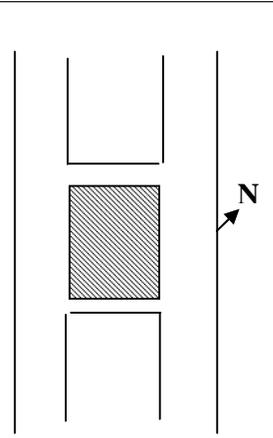
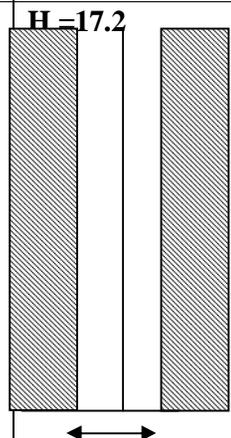
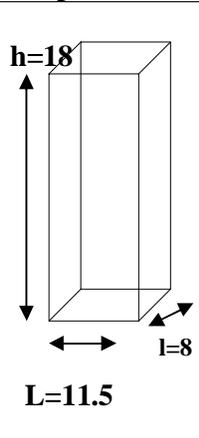
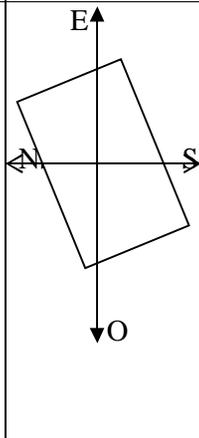
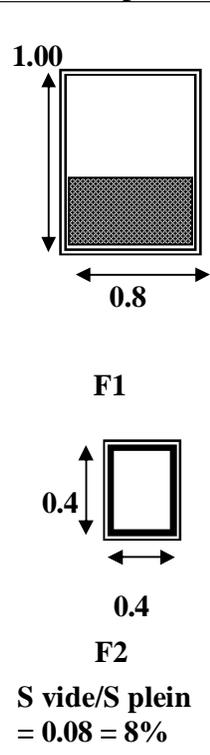
échantillon	Degré compacité	Prospect	Forme de Proportion	Facteur de forme	Orientation	Les ouvertures Svide/splien	Remarque
Oued souf	 <p>$S_{exp} / S_{env} = 0.75$ $S_{n\ exp} / S_{env} = 0.25$</p>	 <p>$W/H = 2.4/3.5$ $W/H = 0.68$</p>	  <p>$R = 0.7$ ou $R = 1.3$</p>	 <p>$Cf. = 0.71$ $V = 550$ $S = 393$</p>		 <p>$l'/h = 3.5/6.8 = 0.51$</p> <p>$H = l' / 2$</p>	<p>Compacité 25%</p> <p>Surfaces exposées Aux rayons solaires : Façade ouest Toiture</p> <p>La valeur minimale du rayon de La coupole augmente la valeur de Cf</p> <p>La cour augmente la valeur de Cf</p>

Conclusion: la morphologie de la maison du souf présente trois inconvénient

- les dimensions de la cour
- les proportions de la forme
- les dimensions de la coupole

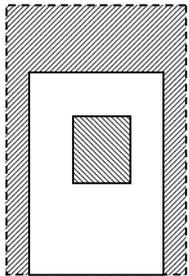
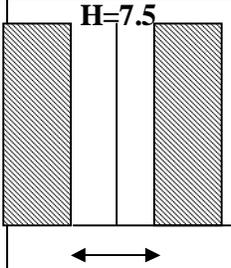
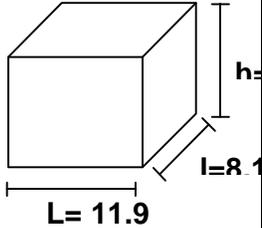
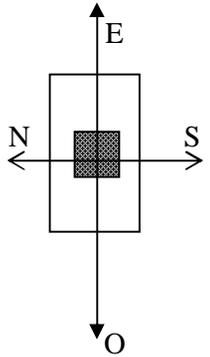
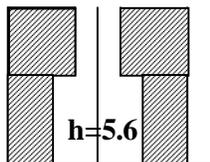
Mais ; on constate que la coupole possède une bonne capacité de réflexion des rayons solaires. Alors en doit conserver cet élément et lui donner ces dimensions optimales pour améliorer sa performance thermique.

Tab 4.10 : Analyse Morphologique - Maison extravertie le Yémen

échantillon	Degré de compacité	Prospect	Forme et Proportions	Facteur de forme	Orientation	Les ouvertures S vide/S plein	Remarque
Le Yémen		 H=17.2 W=2.00 W/H = 3.5/17.2 W/H=0.2	 h=18 L=11.5 L=3/2 l L=2/3H	$Cf = 0.44$ $S=874M^2$ $V=1952 M^3$		 1.00 0.8 F1 0.4 0.4 F2 S vide/S plein = 0.08 = 8%	La hauteur du bâtiment est un moyen d'occultation Surfaces exposées Aux rayons solaires : Façade N-O Façade S-E Toiture le refroidissement nocturne

Conclusion: la configuration physique et morphologique de la tour influe positivement sur la quantité des échanges thermiques entre L'ambiance intérieur et le milieu extérieur, en effet les dimensions de la forme influent sur la valeur du facteur de forme Cf , mais ; la toiture et les deux surfaces Nord ouest & Sud est doivent être protégées pour l'équilibre du confort thermique au niveau de tout les espaces intérieurs.

Tab 4.5 : Analyse Morphologique - Maison introvertie le M'Zab

Echantillon	Degré compacité	Prospect	Forme de Proportions	Facteur de forme	Orientation	Les ouvertures Suide/splien	Remarque
Le m'Zab	 $S_{exp}/s_{env}=0.4$ $S_{nexp}/S_{env}=0.6$	 $W/H= 0.26$	 $L=3/2 l$ $L=2H$	 $C_f = 0.55$ $V=703 M^3$ $S=388 M^2$		 $L'/h=1.7/5.6$ $= 0.03$ $S_{vide}/S_{plein}=0.03$ $=3\%$	Compacité 60%
						<p>Surfaces exposées Aux rayons solaires : Toiture</p> <p>Protection solaire par « chebek »</p>	

Conclusion: a partir des données requises de l'analyse on estime la maison introvertie du m'Zab performante vue les caractéristiques suivantes :

- le degré de compacité **60%**
- le facteur de forme **0.55**
- les proportions de la forme et du rapport de proximité

Tab 4.14 : Tableau récapitulatif [classification morphologique]

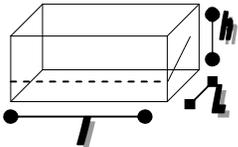
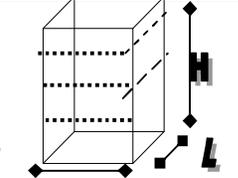
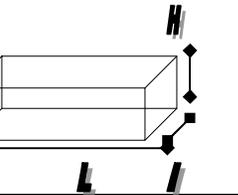
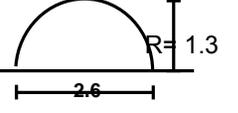
Type	Forme	Facteur de forme	Facteur De compacité	Rapporte H/l	Proportions L.l.H	La cour H/l'
Type : 1 Le parallélépipède (introvertie)		$Cf = 2/l + 2/L + 1/H$ $Cf=0.55$	60%	$H/L=4$	$L=3/2l=2H$	$h/l' @3$
Type 2 La tour (extérieur)		$Cf = 2/l + 2/L + 1/H$ $Cf=0.44$	0%	$H/L=5$	$L=3/2l=2/3H$	-
Type 3 : 'a' Parallélépipède (extravertie)		$Cf = 2/l + 2/L + 1/H$ $Cf=0.65$	25%	$H/L=1.5$	$L=l=5h$	$h/l =0.5$
Type 3 : 'B' La coupole		$Cf = 3/R$ $R1=0.7=Cf1=4.2$ 5 $R2= 1.3 Cf2=2.3$	-	-	-	-



Fig 4.9 : plans RDC, l'étage et de la terrasse. En haut la coupe AA et façade Ouest

Source : OPPVM ; 2001

Méthode de l'analyse morphologique (l'investigation) :

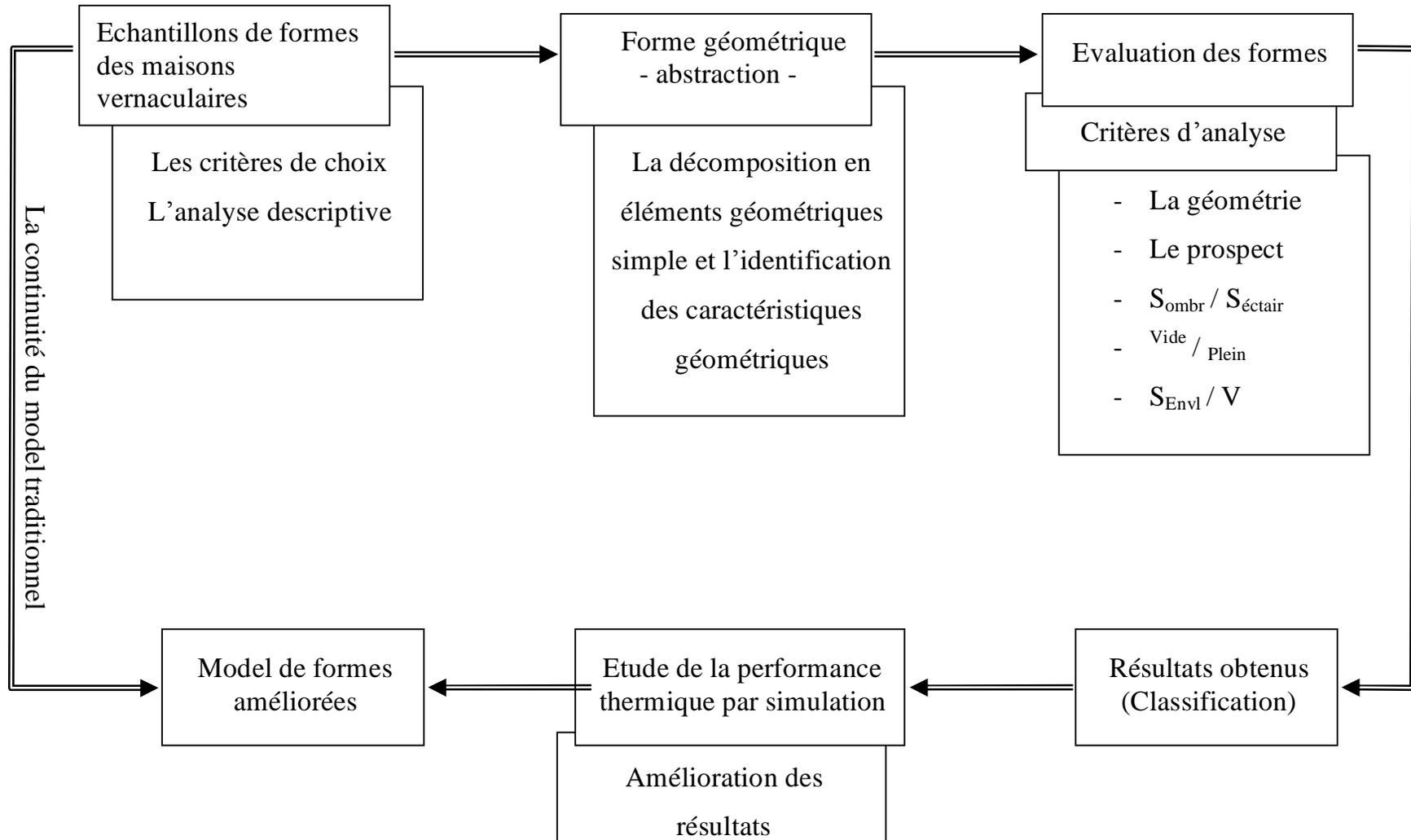




Fig 4.20 : plans RDC, étage et de la terrasse
Source : A Hamou; 1979

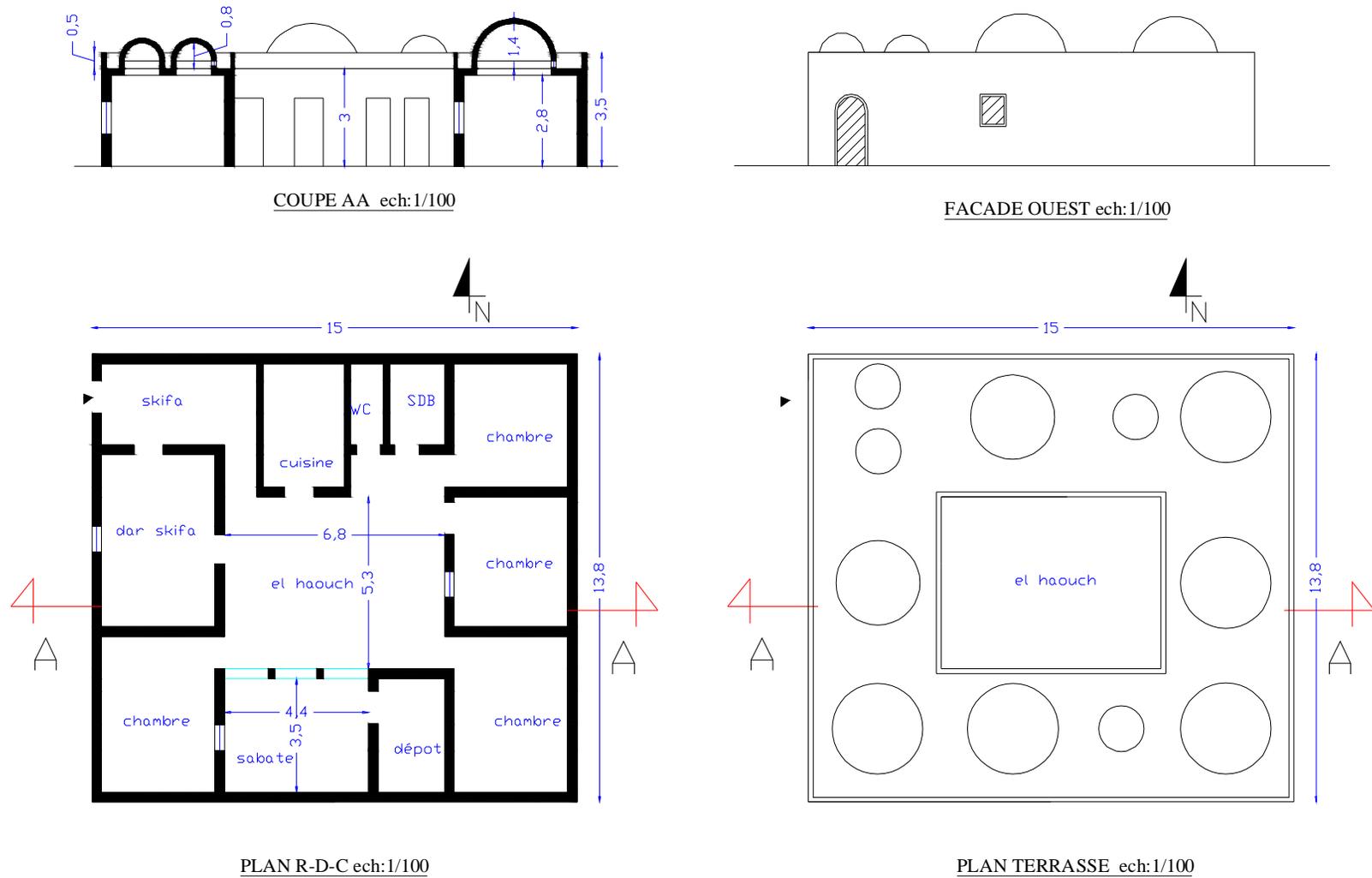
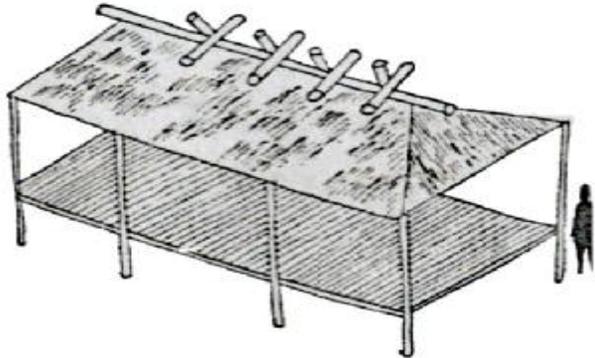
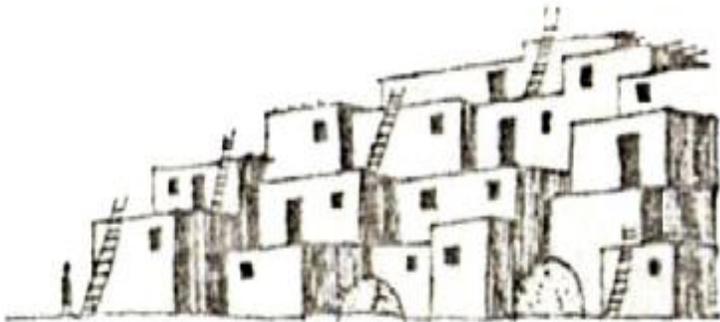
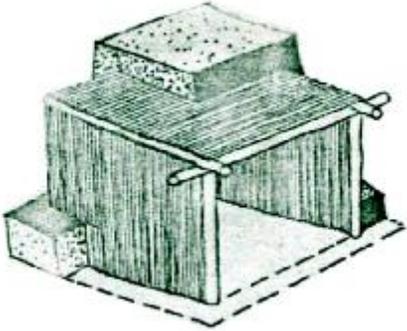
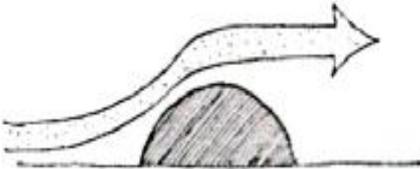


Fig 4.32: plans RDC, terrasse en haut, coupe et façade en bas
Source : M Djebnoun ; 2003

	Chaud et humide	Chaud et aride
Besoins	Ces régions sont connues avec de fortes pluies, grande humidité, des faibles écarts journaliers de température et un rayonnement intense, on a besoin du maximum d'ombre, de ventilation et du minimum de capacité thermique. [A.Konya, 1981].	Les caractéristiques spécifiques à ces régions sont déjà définies dans le Chapitre I, les besoins essentiels sont la protection contre les hautes températures journalières et l'intensité de la radiation solaire.
Exemples	 <p>Figure : maison séminole Floride, 9*16 pieds Source : Amos Rapopor, 1972</p>	 <p>Figure : compacité des habitations faites d'un seul matériau au Sud Ouest des Etat-unis Source : Amos Rapopor, 1972</p>
Caractéristiques de la maison.	Des groupement dispersés, des bâtiments ouverts (pas de murs) avec une enveloppe longue et étroite, des matériaux minces à faibles capacité thermique, le sol est généralement élevé par rapport à la terre.	Des enveloppes géométriques aussi compactes que possible. Un maximum de volume avec des surfaces minimum exposées. Des matériaux lourds à forte capacité thermique. De petites ouvertures pour l'aération et l'éclairage. Des cours intérieures protégées.

Tab 4.1: Etude de l'influence du climat sur la forme des habitations

Climat	Froid		Tempéré
Besoins	Ces régions sont caractérisées par un froid externe, donc une bonne conservation de la chaleur est essentielle.		Des pluies très importantes avec des vents qui soufflent souvent d'une vitesse gênante, une bonne protection est donc recommandée.
Exemples	 <p data-bbox="380 919 806 1019">Figure : maison sibérienne faite de bois et de terre Source : Amos Rapopor, 1972</p>	 <p data-bbox="1024 708 1100 734">IGLOO</p> <p data-bbox="848 776 1247 847">Figure : effet du vent sur l'Igloo Source : Amos Rapopor, 1972</p>	 <p data-bbox="1436 834 1507 860">Tepee</p> <p data-bbox="1283 928 1843 1032">Figure : tepee des Indiens avec des languettes pour le contrôle du vent Source : V. Ulgyay, 1962</p>
Caractéristiques de la maison.	Des enveloppes compactes, sont créés dans le sol et construites avec des matériaux lourds, avec un minimum de surfaces exposées.	Les eskimos utilisent de petits formes demi sphérique pour déflécter les vents froids.	L'organisation des groupements est libre diversifiée et dispersée, la forme de la maison est conique et construite généralement avec des matériaux légers qui ne préservent pas la chaleur pour les protéger du vent, ces tentes sont munies de languettes pour le contrôle du vent.

1. Introduction

A travers l'étude typo morphologique, on peut retenir que le choix d'une forme qui répond aux conditions climatiques ainsi qu'aux besoins thermiques du lieu doit être une préoccupation majeure. Cette dernière doit absolument, par le biais de sa morphologie, sa taille et son volume obéir à un système dont l'objectif est de répondre aux besoins thermiques des régions à climat chaud et aride.

La réduction des formes sélectionnées en éléments géométriques fondamentaux et la définition de la qualité thermique (performance), selon les besoins déjà définis dans **le chapitre 02 (voir Tab 5.1)**, sont une principale donnée qui témoigne de l'existence d'une relation entre les effets thermiques et la forme des bâtiments.

En effet les gains de chaleur par radiation solaire sont très reliés à la forme et l'orientation des bâtiments, ceci est très imposant au niveau des surfaces opaques car presque **50%** de ces dernières sont exposées à des températures supérieures à celle de l'air extérieur [G Z Brown ; 1983].

La performance thermique de la forme dans ces climats doit se réaliser en répondant à un besoin primaire qui est la minimisation des différents gains énergétiques par l'enveloppe tout en cherchant à réduire les surfaces exposées de la forme.

Type de forme	Besoins recherchés			Moyens primaires de réduction des besoins
	La minimisation des gains du a :			
	L'énergie reçue	L'énergie absorbée	L'énergie transmise	
La tour	L'orientation de la surface, ses dimensions & son inclinaison	Le facteur d'absorption de l'épiderme de l'enveloppe	Le facteur de transmission global de l'enveloppe	La recherche des formes compactes, qui ont un facteur de forme minimal.
Le parallélépipède				
La coupole	Facteurs d'influence			

Tab 5.1 : les besoins recherchés pour la minimisation des gains de chaleur dans le bâtiment

Dans un premier temps, nous nous bornerons à établir une évaluation des gains énergétiques entrant dans le bâtiment en situation d'été, puis nous définissons leur relation avec la forme en portant notre réflexion directe sur les facteurs d'influence et le facteur de forme en particulier.

Dans un second temps, nous nous intéresserons à la mise en place d'un modèle de calcul des gains en fonction du facteur de forme. Il s'agit principalement d'une modélisation de la forme, de l'orientation par rapport au soleil et des dimensions afin d'obtenir un meilleur facteur de forme et une forme

performante en conséquent. Ceci nous amènera à Un contrôle de la radiation solaire qui est un déterminant et un objectif majeur d'adaptation de la forme aux climats chauds et arides. Ce contrôle peut s'exprimer en termes de forme ou de rapport de proportions [Sodha & Al ; 1986].

2. La Performance thermique de la forme des bâtiments :

La Forme performante est un bâtiment considéré efficace du point de vue énergétique selon les normes les plus sévères. Elle sert également à désigner un bâtiment présentant un volume important avec des petites surfaces exposées aux conditions extérieures, une **enveloppe thermique** préservant du froid. En termes plus techniques, ce sont des bâtiments qui ont un **coefficient de forme** très faible, ce qui implique le minimum de gains de chaleur.

Ce principe peut être validé en tenant compte de **l'hypothèse que les ouvertures sont trop petites au point de les négliger**; de même, on doit quantifier la chaleur entrant à l'intérieur des constructions par la combinaison de l'effet de la température avec la radiation solaire (**sol - air - température**).

2.1. Effet de la forme géométrique et des dimensions:

On va essayer d'examiner avec plus d'exactitude l'influence du caractère géométrique ainsi que les dimensions de la forme sur la valeur du facteur **CF** pour définir les caractéristiques géométriques et les dimensions des formes performantes dans ces régions. De ce fait, la construction doit être représentée par un rapport appelé **coefficient de forme** bien déterminé (**surfaces/volume**), ce dernier est défini en relation avec le coefficient **G** de gains par le volume habitable (**m³**). Le facteur (**S/V**) est d'autant plus petit que les surfaces de l'enveloppe, en contact avec l'extérieur sont réduits par rapport au volume. Il dépend donc de la taille des constructions et de leur forme. Par exemple la sphère est une forme reconnue avec un rapport (**S/V**) le plus faible ; Mais, bien entendu, ces formes sont difficiles à réaliser, c'est pour cette raison que la procédure la plus favorable est de rendre minimum les surfaces exposées, tout en gardant les exigences esthétiques, fonctionnelles et structurales de l'architecture pour une même forme; **l'augmentation de la taille est une façon d'abaisser le facteur G** [David Wright, 1979].

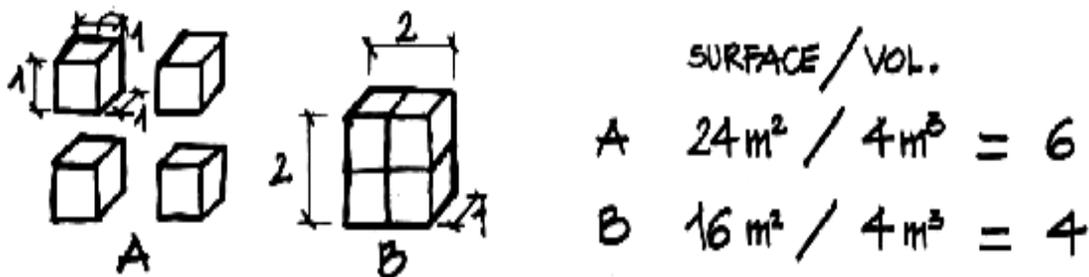


Figure : densification de la compacité du volume et minimisation des surfaces exposées

Source : David Wright, 1979

2.2. Effet de l'orientation :

Les constructions conçues sans la prise en compte de la position du soleil et de l'énergie émis par ce dernier, consomment de grandes quantités d'énergie pour leur réfrigération. Le meilleur profil d'une construction est généralement l'allongement selon l'axe **Est-ouest** de là sa plus grande façade orientée au sud face aux apports solaires minimums et ses façades les plus réduites Est-ouest face aux apports solaires maximums. Ce qui est convenable en période d'été [Sodha & Al : 1986].

Du fait que la source solaire est elle-même mobile, on est amené à compenser ce mouvement solaire et à contrôler l'exposition des parois de l'enveloppe aux rayonnements solaires **durant la journée la plus chaude** de l'été dans ces régions, tout en sachant que les façades **Est, Ouest et la toiture** sont les surfaces les plus exposées aux gains de chaleur par radiations solaires.

L'influence de l'orientation sur la performance thermique des bâtiments s'exprime donc par **le rapport de proportion entre les dimensions de la forme** Ceci doit être décidé en quantifiant les gains de chaleur à travers les parois de l'enveloppe selon :

- la quantité des surfaces ($L \cdot H$, $l \cdot h$ ou $L \cdot l$)
- l'intensité de la radiation solaire qui dépend de l'orientation et de la nature morphologique des surfaces de l'enveloppe (verticales- E, O, S, N, horizontale, incliné ou courbé)

Victor Olgyay en 1962 a fait le calcul des forces thermiques qui influent sur les deux cotés opposés du parallélépipède (Σc_1 , Σc_2) puis il a mis une condition pour laquelle on peut juger la performance thermique du volume tel que :

$$L \Sigma c_1 + l \Sigma c_2 = 0 \dots \dots \dots (1).$$

D'où : Σc_1 , Σc_2 est la somme des forces thermiques (gains), influant sur les deux cotés opposés du volume.

$$L \text{ 'équation peut s'écrire comme suit : } \frac{\sum C_1}{\sum C_2} = L / l \dots \dots (2),$$

L'interprétation de l'équation (2) montre que la performance thermique d'un parallélépipède est **conditionnée** par un rapport entre longueur et profondeur (**L, l**) qui doit être calculé en tenant compte du rapport entre les gains de chaleur entrant par les deux cotés opposés. Dans les climats chauds et arides, cas de la station de phoenix, V.Olgyay à examiné sa méthode par une expérimentation basée sur le calcul des gains et leur comparaison avec le rapport (L / l) ; à la fin il, a proposé une forme de base pour les conditions d'été, cas du climat chaud et aride, qui est un cube légèrement allongé dans l'axe Est Ouest dont le rapport est $L / l = 1/1.3 \div 1/1.6$. Ceci est très clair dans **la Figure 5.2**.

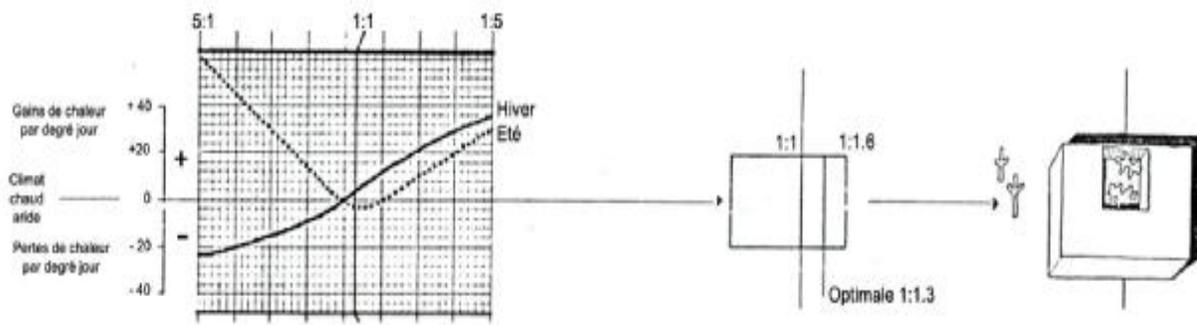


Figure 5.2 : maison séminole Floride, 30*53 m

Source : V. Olgyay, 1962

Il est donc nécessaire, en premier lieu, de définir la forme globale la plus favorable qui confirme une bonne qualité thermique de l'enveloppe, par rapport aux besoins des régions à climat chaud et aride. En second lieu, il sera essentiel de procéder à la détermination des caractéristiques morphologiques et des dimensions de l'ensemble de ces surfaces afin d'aboutir à un bâtiment procurant une excellente qualité de l'ambiance intérieure et dont les systèmes sont durables d'un point de vue technique.

3. Objectif de la simulation:

Nous envisagerons comme objectif, à travers cette partie, l'étude de l'influence de la forme sur la performance thermique des bâtiments dans les régions à climat chaud et aride, par la recherche d'une interaction entre la performance thermique de la forme et :

- la quantité des surfaces exposées de l'enveloppe (les dimensions)
- leur nature géométrique

Ce qui implique que la grandeur utilisée pour l'évaluation de ce rapport, qui est la quantité des gains de chaleur transmis par conduction, à savoir l'effet combiné du gradient thermique et la température équivalente doit être modélisé en fonction de ces deux variables.

En fait ces derniers participent à la détermination de la valeur du coefficient de forme – défini comme une expression numérique traduisant une forme globale, ce qui influe, par conséquent, sur la quantité des gains de chaleur entrant dans le bâtiment.

Alors, il s'avère indispensable de simuler les effets de la forme sur la quantité des gains énergétiques par une modélisation de la valeur du coefficient de forme selon les deux variables (la taille et la géométrie), qui seront comparées et combinées pour aboutir à des formes qui répondent mieux aux besoins thermiques de ces régions.

Cette recherche s'inscrit dans un objectif majeur : inviter les concepteurs à la prise en compte de ces soucis, en amont du projet, par l'intégration de cette réponse au besoin thermique de ces régions, au niveau de la forme globale des constructions.

4. Méthodes de simulation et choix du modèle :

Nous essayerons à travers cette partie, d'enrichir et d'élargir le champ de notre investigation en examinant les différentes solutions apportées par les chercheurs pour expérimenté la performance thermique de la forme, dans le but de formuler une bonne théorie, avant de choisir la méthode et de bien préparer notre model de simulation.

4.1. Jean Michel Bloch Laine 1979 :

La forme est une donnée fondamentale pour réussir l'équilibre thermique d'un bâtiment : plus le bâtiment est compact, plus les surfaces d'échanges avec l'extérieur sont réduites, moins il y aura des gains de chaleur en été. Pour un même volume habitable, les écarts de consommation d'énergie dus au choix de la forme peuvent être de **-25% à +100%**. L'exemple suivant montre cela :

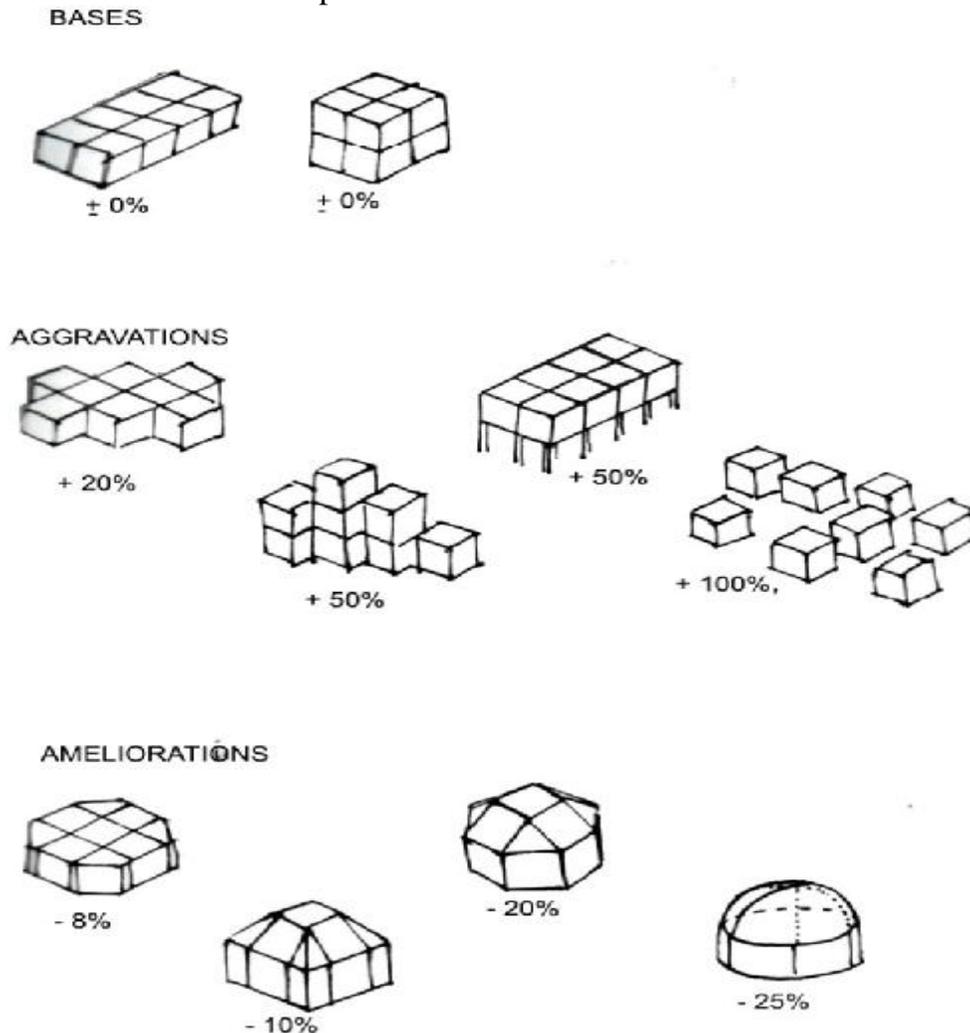


Figure : Variation des besoins en chauffage pour un même volume selon la forme du bâtiment.

Source : Jean.P.Cordier, 1976.

Une autre méthode a été développée par J.L.Vincent, 1987 pour l'évaluation de la qualité thermique de la forme en essayant de confirmer ou d'infirmer l'expression de la forme - le facteur de forme - par la **génération de modules cubiques de 5.4m** .assemblés différemment en un seul volume qui fait **150 m³** sur une surface plancher de **58 m²** (voir Figure 5.4), l'objectif de cette étude est encore de montrer l'influence de la forme sur les besoins a volume constant. Les résultats de cette recherche confirment la théorie de **J M B Laine**.

Notons que dans cette étude les caractéristiques thermo-physiques sont constantes.

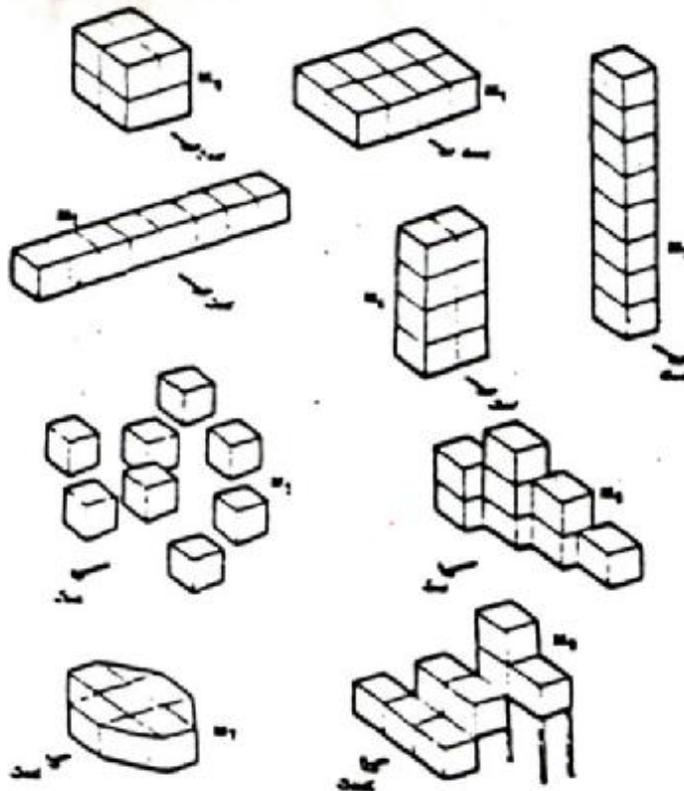


Figure : typologie des modèles générés par les 8 modules cubiques de 5.4m de côté utilisés par l'INSA de Lyon.

Source : J.L.Vincent, 1987

4-2/ Martin Evans 1979 :

La forme de la construction peut prendre davantage les aspects bénéfiques du climat et minimiser l'impact des aspects défavorables ; elle doit être choisie selon le besoin du climat régional et les facteurs climatiques.

Dans les climats chauds et arides la performance thermique de la forme dépend des conditions de confort créées à l'intérieur de l'espace habitable, vis-à-vis des conditions liées à la radiation solaire très intense.

Profondeur et proportion :

L'objectif de l'étude faite par Martin Evans est de réduire les déperditions de chaleur, par le choix d'une configuration géométrique de formes compactes; Sa recherche est basée sur deux hypothèses :

- 1- **Le volume** de bâtiment est très **relié** à sa **capacité thermique** (stockage, isolation, gains ou pertes).
- 2- **Les surfaces de l'enveloppe** doivent être reliées par **un ratio**.

A travers une analyse de différentes formes de bâtiments à base d'un même volume (voir Figure 5.5), des résultats ont été formulés:

- 1- Pour réduire les déperditions, il est nécessaire de choisir des formes compactes.
- 2- Une hauteur moyenne avec des terrasses ou des cours sont préférables pour se protéger contre les vents froids.

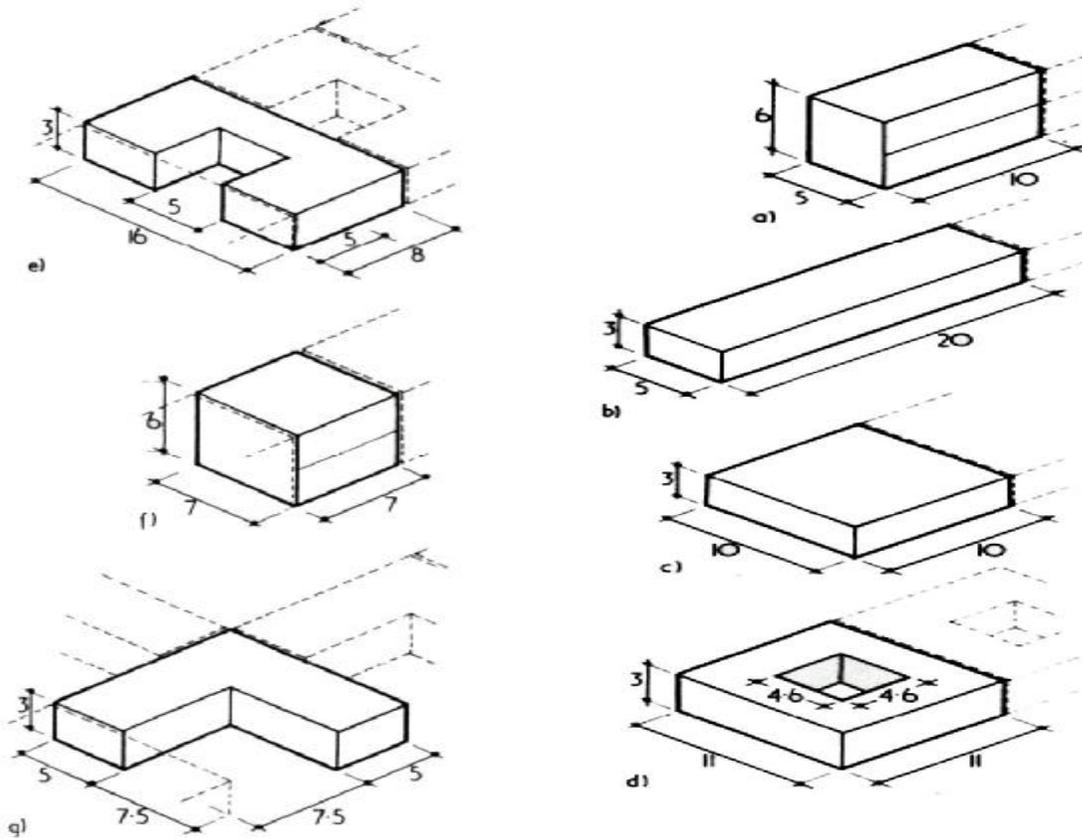


Figure : formes proposées selon les résultats de l'étude de la performance

Source : Martin Evans, 1979

Pour plus de détail sur la méthode ainsi que les résultats le lecteur peut consulter le document de « Martin Evans » *housing climate and comfort* Parmi ces résultats émis on à mentionner les besoins thermiques des formes des constructions en relation avec les climats chauds et arides selon le tableau suivant.

Climat	Besoins recherchés	objectif
Chaud et aride	Minimiser la surface des murs Ouest	Réduire les gains de chaleur
	Minimiser la surface de l'enveloppe	Réduire les gains de chaleur
	Augmenter la hauteur de la construction	introduire la capacité thermique
	Réduire les surfaces des ouvertures	le contrôle de la ventilation, les gains et l'éclairage

Tableau : résumé des besoins pour les formes de maisons, en relation avec le climat chaud et aride

Source : Martin Evans, 1979

4-3/ V.Cupta 1986 :

Une étude concernant la performance thermique de trois types de construction, est établie pour déterminer la meilleure façon d’occuper le sol. Les trois types (le pavillon, le parallélépipède, la cour) on été étudiés séparément, en groupe et entourés d’espace extérieur (voir Figure 5.6).

Notons qu’il est difficile d’étudier des formes groupées à cause de la complexité du comportement thermique dû à l’effet d’ombre projetée sur les bâtiments ; c’est pour cela que les chercheurs tels que : Cupta, Knowles & Al ont développés des techniques photographiques ou par ordinateur, en vue d’assurer une représentation générique propre à cet effet.

- H_w** : Le rapport de la Hauteur du bâtiment par la profondeur de la rue.
- N** : nombre de pavillons, de cours ou de blocs.
- L** : la longueur du bâtiment
- W** : la largeur du bâtiment
- H** : la hauteur du bâtiment

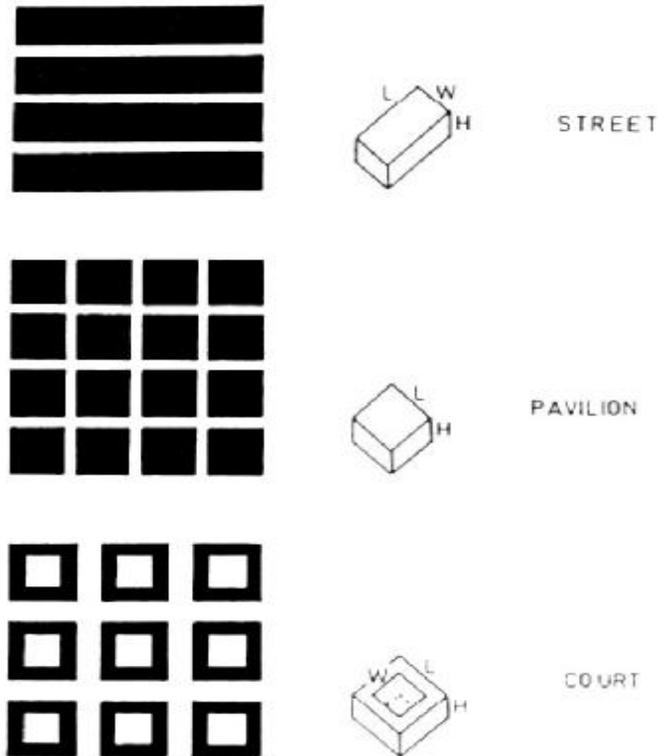


Figure : Les trois types (le pavillon, Le parallélépipède, la cour)
 Concernés par l’étude
Source : V.Cupta 1986 :

Type	Variables	Volume	Surface de l’enveloppe	Surface de la toiture
Pavillon	L, H, N, H _w	$L^2.H.N^2$	$N^2 L (L+4H)$	$L^2.N^2$
Parallélépipède	L, W, H, N, H _w	$L. W. H. N$	$N. W. L+2H (L+W)$	$N. L. W.$
A Cour	L, W, H, N, H _w	$4. H.W.N^2 (L+W)$	$4. N^2.W (L+W) +2H (L- W)$	$4. W.N^2 (L+W)$

Tableau: les caractéristiques géométriques des trois types (le pavillon, le parallélépipède, la cour) concernés par l’étude
Source : V.Cupta 1986

Les propositions établies pour l’efficacité de la forme des constructions vis-à-vis à l’exposition au soleil sont :

1- Le facteur de performance d'un bâtiment isolé : $E_w = \frac{\text{Exposition hiver}}{\text{Exposition été}} \times 100\%$.

2- Le facteur de performance d'un bâtiment dans un groupement :

$$E_s = \frac{\text{Exposition été}}{\text{surfacesolexposéété}} \times 100\%$$

Cette étude a été développée par **Anis A.Sidiqi 1986, Carlo Ratti et Al en 2003**, en vue de chercher la meilleure forme qui assure une bonne utilisation du sol et une bonne performance énergétique dans les climats chauds et arides ; par la méthode du coefficient de forme ($C_f = S/V$) ils ont prouvé que :

- La maison à cour est le meilleur choix.
- Le pavillon isolé est très influé par son orientation

4-4-J. Louis Izard et Pierre André Bernard, 1987 :

L'étude des modèles réels est une méthode de simulation de la performance thermique par la mesure des consommations énergétiques des maisons ou des grands édifices en tenant compte de toutes leurs caractéristiques de forme, dimensions, capacité thermique et occupation. Les résultats obtenus des mesures seront interprétés pour déterminer l'influence des paramètres pris en compte ; mais, cette méthode sert beaucoup plus pour confirmer des résultats que pour la manipulation des variables et leur modélisation afin de déterminer des formes optimales (par exemple, J L Izard a étudié les besoins thermique de plusieurs modèles de maisons individuelles dans trois stations climatiques françaises, dont les paramètres d'analyse thermique se varient tour à tour).

4-5/ Knowles Ralph. L, 1994 :

Au cours d'une étude appliquée sur « New Mexico » 35° Nord, en vue de contrôler l'énergie solaire par la forme (*solar envelope*), il a été conclu que la forme peut être générée par la géométrie du mouvement soleil-terre, son enveloppe est reliée directement aux besoins de l'activité humaine et au mode de construction.

La qualité thermique du bâtiment est définie selon des facteurs (coefficient) qui permettent la comparaison entre les différents types de formes et l'étude de la performance.

*** Coefficient d'efficacité de la forme :**

Où le pourcentage d'efficacité $\frac{E_i}{E_m}$ d'où :

E_i : est l'énergie reçue par les surfaces de forme durant l'heure concerné.

E_m : est l'énergie reçue dans la même heure, si les surfaces de la forme totale sont exposées perpendiculairement au soleil.

* **Coefficient d'efficacité énergétique :**

$$\frac{E_{vt} + E_{ht}}{E_{mt}} \text{ D'où :}$$

E_{vt} : énergie transmise par les murs.

E_{ht} : énergie transmise par la toiture.

E_{mt} : l'énergie transmise par toutes

Les surfaces de la forme exposée

Perpendiculairement aux rayons solaires.

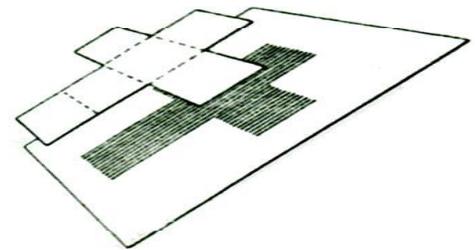
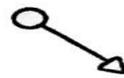
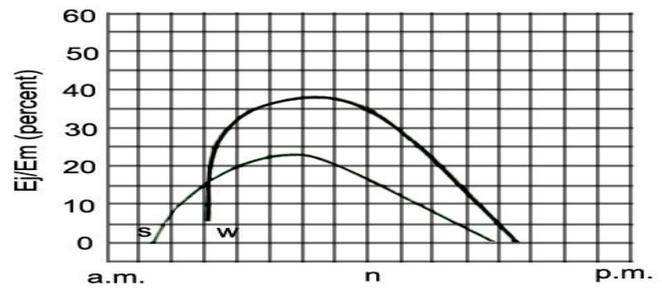


Figure : méthode du coefficient d'efficacité avec le graphe de variation au cours d'une journée

Source : Knowles Ralph. L, 1994

* **Coefficient de bonne orientation de la forme:**

C'est le rapport entre l'énergie reçue par la façade Ouest et la façade Sud $\frac{E_w}{E_s}$.

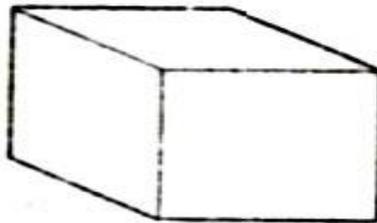


Figure : montrent la valeur approximative du Coefficient de bonne orientation pour les gains d'énergie d'une forme proche d'un cube dont $\frac{E_w}{E_s}$ doit être 0.33.

Source : Knowles Ralph. L, 1994

Ces facteurs peuvent être interconnectés, avec le facteur de forme pour aboutir à une performance énergétique plus validée.

* **Les limites de la forme** : à cause de la difficulté d'appliquer ces facteurs (expression numérique de la forme) sur les formes circulaires organiques ou irrégulières ; la discrétisation en éléments cubiques très fins est un moyen de rapprocher la forme à son enveloppe pure en vue de l'expérimenter.

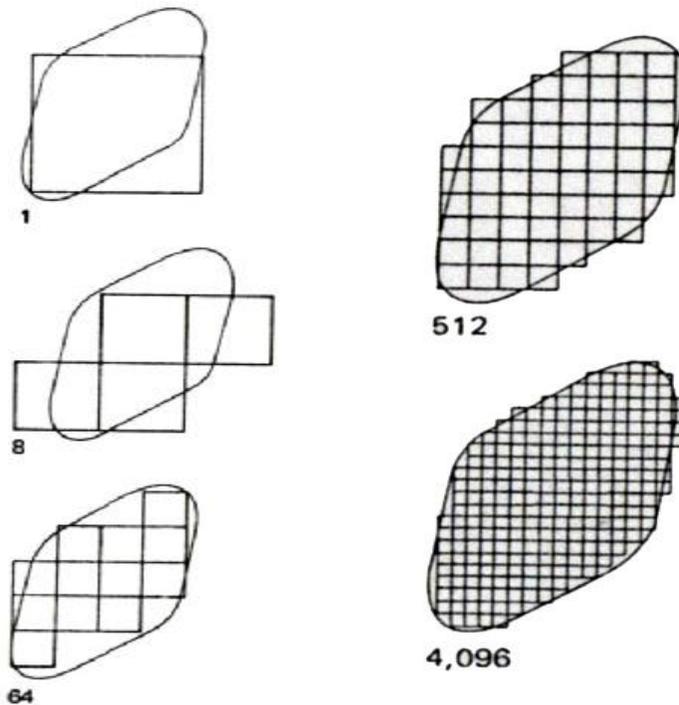


Figure : approximation de l'enveloppe pure d'un même volume

Source : Knowles Ralph. L, 1994

En fait, la question sur la performance thermique de la forme a fait l'objet d'un certain nombre d'études dont on a essayé de faire le point. Que ce soit les méthodes employées pour la simulation graphique ou numérique, ils ont en commun les mêmes caractéristiques, dont ils simplifient la modélisation de la forme en utilisant des facteurs ou des coefficients, qui interprètent la forme et ces caractéristiques morphologiques en expressions numériques représentatives. Cela permet la comparaison entre les diverses morphologies et la corrélation avec les besoins thermiques [J P Traisnel ; 1987]. De même ces méthodes simplifient les conditions réelles en fixant certaines hypothèses de départ, en utilisant des paramètres à valeurs fixes et d'autres suppositions qui permettent d'améliorer le modèle de simulation [Sriti L ; 1996]

Nous voyons qu'il ne faut pas se restreindre à trouver la solution à notre question en examinant la performance énergétique par des solutions scientifiques (mathématiques ou physiques), qui se basent sur l'évaluation des besoins déjà identifiés (**voir chapitre 02**). Selon des équations mathématiques et physiques qui facilitent la modélisation numérique du facteur de forme, Mais ; en s'attend même à la vérification des résultats ainsi qu'à la confirmation de la faisabilité de la méthode choisie, par un test des formes vérifiées (efficacité de la forme et sa bonne orientation) en utilisant l'une des méthodes citées ci-dessus.

Concrètement, les modélisations numériques sont basées sur les lois de la physique, de la thermodynamique et de la mécanique. La résolution conjointe de ces équations permet de suivre l'évolution des principales variables caractéristiques de la forme. La rapidité de la résolution numérique dépend de la méthode de résolution des multiples équations mathématiques, mais aussi de la puissance de calcul des ordinateurs. Chacune de ces variables est ainsi quantifiée et suivie.

Au final, l'exactitude des solutions trouvées dépend du choix des facteurs physiques modélisés (**facteur de forme**), de leur description physique, du choix des représentations, ainsi que des conditions initiales (climatiques et thermiques).

5. Esquisse du modèle de la simulation :

Pour l'étude de l'influence de la forme sur les gains de chaleur et les besoins thermiques des climats chauds arides, qui se résume en premier lieu dans la minimisation de la quantité des flux de chaleur transmis par rayonnement ou conduction à l'intérieur de l'enveloppe selon l'équation ci-après :

$$Q = Q_c + Q_s = \sum K_n S_n \Delta t + \sum S_v I O \dots\dots\dots (1)$$

On doit minimiser au maximum la valeur de « Q » qui est décomposé en deux gains :

5.1. Les gains de chaleur par rayonnement (surfaces vitrées) :

$$Q_s = \sum S_v I O \dots\dots\dots (1)'$$

Généralement ces apports présentent une source importante d'inconfort qui dépend de la surface de ces éléments, de l'orientation et la nature du vitrage. Mais, dans les climats chauds et arides les surfaces vitrées sont très réduites au point qu'en peut les négliger.

Hypothèse 01 :

Les surfaces vitrées doivent être utilisées pour l'éclairage et l'aération, les apports dus à ces surfaces seront négligés pour limiter les variables du contrôle des gains dans le bâtiment ; en outre ces surfaces vont être considérées comme des surfaces opaques. On peut donc écrire dans une forme générale condensée pour un édifice quelconque :

$$Q = Q_c = \sum K_n S_n \Delta t \dots\dots\dots (1)'' \quad \text{d'où :}$$

$K_n S_n$: surfaces et conductance des parois opaques de l'enveloppe.

Pour obtenir la quantité des apports transmis par le volume habitable « **coefficient de gain G** » on divise les deux parties de l'équation par « V » le volume considéré.

$$\frac{Q}{V} = \frac{\sum K_n S_n \Delta t}{V} = \frac{\sum K_n S_n}{V} \Delta t$$

$$G = \frac{(S_1 K_1 + S_2 K_2 + \dots + S_n K_n)}{V} \Delta t \dots \dots \dots (2)$$

5.2. Les gains de chaleur par conduction :

5.2.1. Le coefficient de transmission thermique K :

Les édifices dans les climats chauds et arides doivent être construits avec des matériaux de forte résistance thermique **R**; cela augmentera l'inertie thermique de l'enveloppe comme il peut retarder le transfert de la chaleur jusqu'à la nuit ; d'où les usagers peuvent avoir le recours à la ventilation nocturne ou le nomadisme vers les terrasses ou les cours.

Hypothèse 02 :

Dans le même objectif qui veut l'examen du problème thermique - gains de chaleur - dans le bâtiment et sa relation avec la forme globale « **Enveloppe** », on suppose que les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction sont proches de façon qu'on peut considérer que toutes les surfaces possèdent le même coefficient « **K** » :

$$K_1 = K_2 = \dots = K_n = K_E$$

K_E : est une expression numérique qui représente un coefficient de transmission thermique moyenne de l'enveloppe avec une bonne inertie thermique.

Le coefficient de gains « **G** » peut alors s'écrire :

$$G = \frac{\sum S_n}{V} K_E \Delta t = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{V} K_E \Delta t \dots \dots \dots (2)$$

D'où : $S_1 + S_2 + \dots + S_n = S_E$: est la somme des surfaces de l'enveloppe.

L'expression $G = \frac{\sum S_n}{V} K_E \Delta t$, fait apparaître que pour minimiser les gains de chaleur, il faut :

1/- construire avec des matériaux de forte résistance thermique, présentant un coefficient moyen de transmission très faible, ceci dont l'objectif est d'éliminer l'influence du paramètre « **inertie thermique** » et de fixer les caractéristiques thermo physiques des composants de la construction.

2/- concevoir des formes telles que le rapport $\frac{S_e}{V}$ qui désigne le facteur de forme est d'autant plus réduit que possible.

En première analyse on peut penser que le problème consiste à obtenir le plus faible rapport ($\frac{Se}{V}$), cette idée maîtresse est bonne et il est raisonnable de chercher à réaliser des volumes compactes proches du cube ou de volumes plus complexes (coupoles, tours.....Ets). Mais, il faut souligner que la troisième partie de l'équation qui est « Δt » n'est pas encore déterminée car elle dépend des deux situations suivantes :

5.2.2. L'effet du gradient thermiques (ti-te) :

$G = K_E \frac{Se}{V} (t_i - t_e)$ d'où $\frac{Se}{V} = C_f$ celui-ci étant l'élément variable de l'équation, ce qui veut dire que pour répondre à notre besoin thermique qui est la minimisation des gains (la valeur de G) on doit réduire la valeur de C_f au maximum en faisant un choix de la géométrie et en fixant plus tard ses dimensions.

5.2.3. L'effet du supplément de température $\frac{al}{fe}$:

$G = \frac{\sum KS}{V} \Delta t$ pour la détermination de l'impact des radiations solaires sur la forme, une température équivalente sera introduite qui est : **sol - air température**. Cette dernière influe sur la forme en augmentant la quantité de flux de chaleur transmis à travers les surfaces de l'enveloppe exposées aux radiations solaires selon l'équation ci après :

$$Q = K S (t_i - t_{sa})$$

$$Q = K S (t_i - t_e - \frac{al}{fe})$$

$$Q = K S (t_i - t_e) - K S \frac{al}{fe} \dots\dots\dots (3)$$

La valeur de « $K S \frac{al}{fe}$ » est la quantité du supplément de chaleur transmise par la surface de l'enveloppe qui doit être défini selon l'heure de la simulation et l'orientation de la surface.

A ce moment, on doit préciser les niveaux de la simulation pour pouvoir déterminer et quantifier le supplément de chaleur dû à l'exposition d'une ou de plusieurs surfaces de l'enveloppe au soleil, afin de définir les dimensions des surfaces et le rapport des proportions, selon la quantité de supplément de chaleur transmise à l'intérieur du bâtiment.

5.3. Les niveaux de simulation :

Pour la validation des résultats, on doit effectuer le calcul des gains durant les conditions externes des régions à climat chaud et aride, ce qui devrait correspondre avec la journée la plus chaude de l'année qui est le **21 juillet**, de même comme on vient de le mentionner dans *l'effet de l'orientation sur la performance thermique*, les surfaces les plus exposées aux radiation intense ce sont les façades **Est, Ouest et la toiture**, ce qui nous donne déjà une idée sur les trois niveaux de simulation

(le matin, à midi et l'après midi), à ce titre, il faut souligner que la simulation peut se faire toutes les heures de la journée, mais, on va se limiter à la simulation pendant ces trois niveaux pour limiter les variations, simplifier le modèle et éviter les difficultés de calcul.

Hypothèse 03 :

On admet pendant les trois niveaux de simulation ce qui suit :

Le matin : 10:00 h (la façade Est) est la seule surface exposée de toute l'enveloppe.

A midi : 12:00 h (la toiture) est la seule surface exposée de toute l'enveloppe.

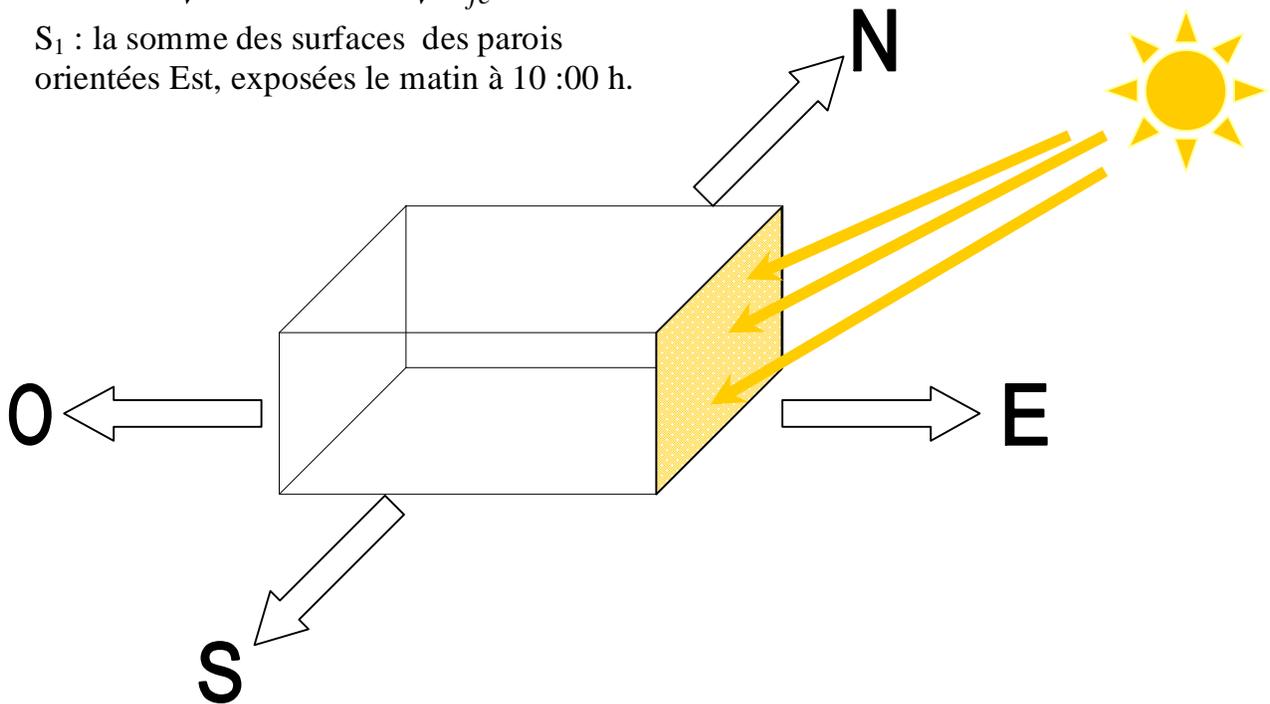
L'après midi : 16:00 h (la façade Ouest) est la seule surface exposée de toute l'enveloppe.

Dans ce cas le coefficient de gains de chaleur « **G** » devrait s'écrire selon les niveaux de simulation tel que :

Niveau (1) : Le matin à (10:00 h) :

$$G_1 = K_E \frac{S_e}{V} (t_i - t_e) - K_E \frac{S_1}{V} \frac{aI}{fe} \dots\dots (4) \text{ d'où :}$$

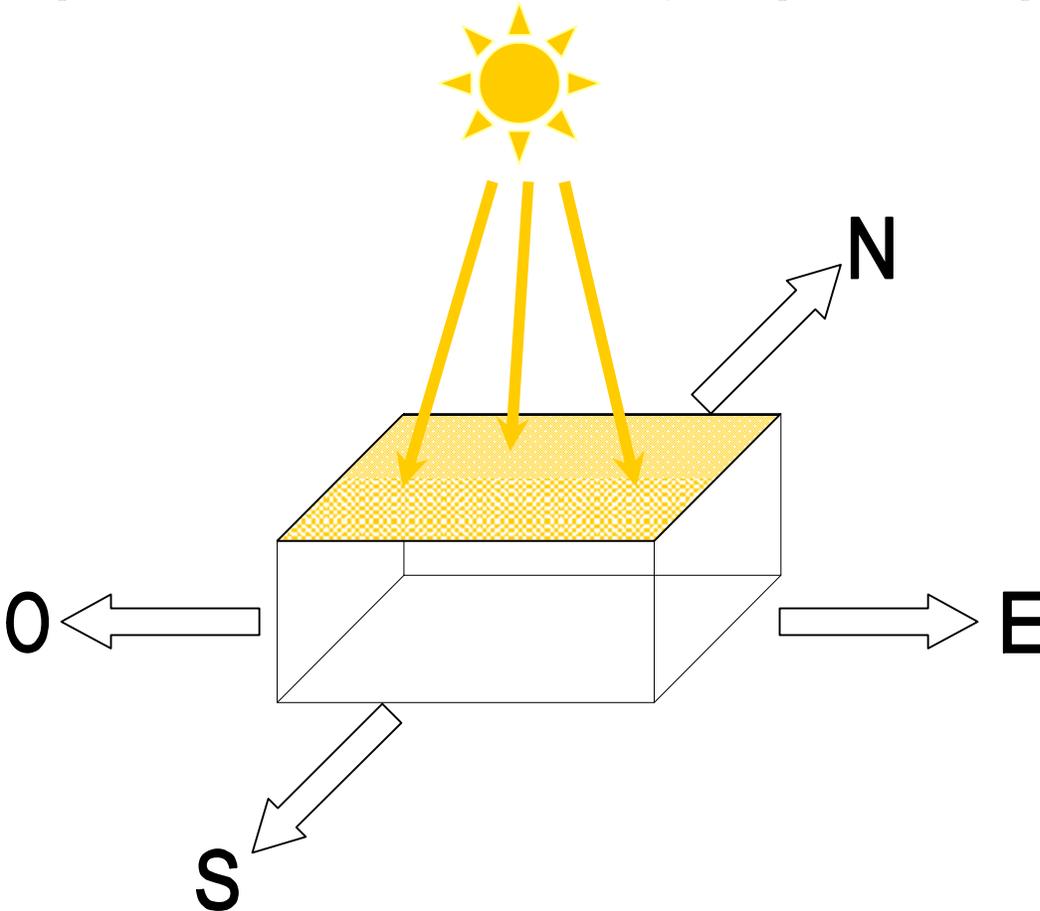
S_1 : la somme des surfaces des parois orientées Est, exposées le matin à 10 :00 h.



Niveau (2) : A midi (12:00 h) :

$$G_2 = K_E \frac{S_e}{V} (t_i - t_e) - K_E \frac{S_2}{V} \frac{aI}{fe} \dots\dots (5) \text{ d'où :}$$

S_2 : la somme des surfaces horizontales (toitures), exposées à midi.



Niveau (3) : L'après midi à (16:00 h) :

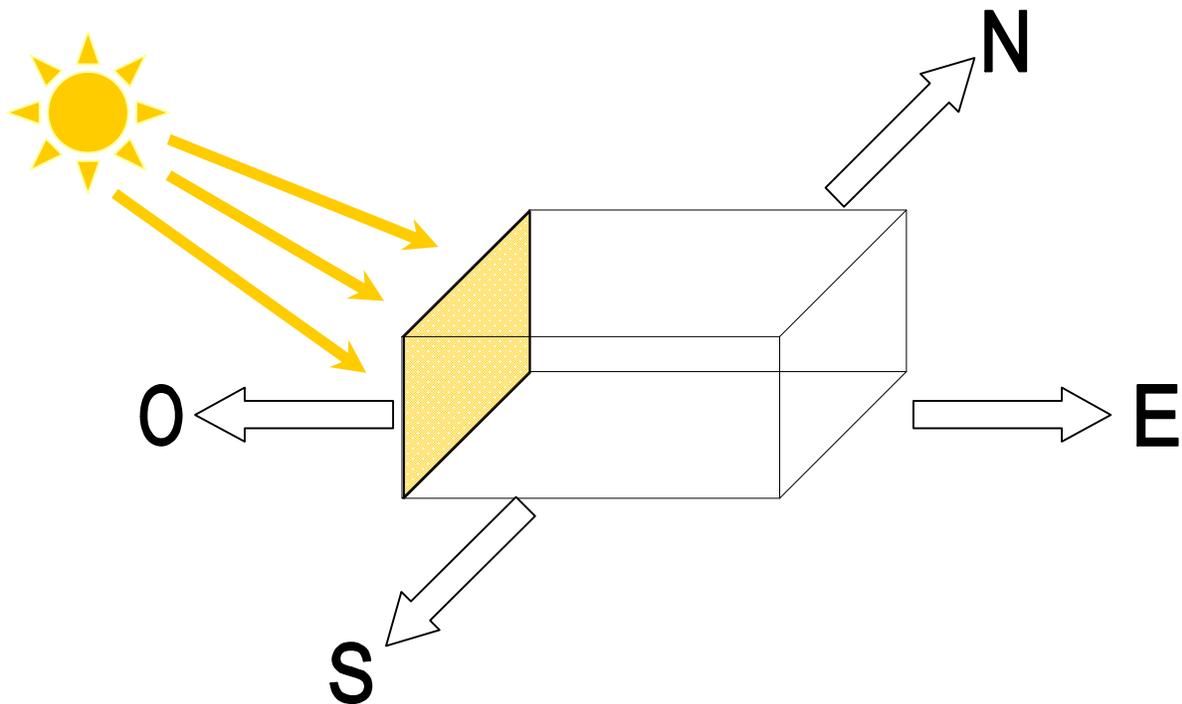
$$G_3 = K_E \frac{Se}{V} (t_i - t_e) - K_E \frac{S_3}{V} \frac{aI}{fe} \dots\dots\dots (4) \text{ d'où}$$

S_3 : la somme des surfaces des parois orientées Ouest.

$$\frac{Se}{V} = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n}{V} = \frac{S_1}{V} + \frac{S_2}{V} + \frac{S_3}{V} + \dots + \frac{S_n}{V}$$

La somme des variables $\frac{S_1}{V} + \frac{S_2}{V} + \frac{S_3}{V} + \dots + \frac{S_n}{V}$ est le facteur de forme.

C'est pour cela qu'on appelle $\frac{S_1}{V}, \frac{S_2}{V}, \frac{S_3}{V}, \dots, \frac{S_n}{V}$ **les facteurs de forme partiels.**



6. Application de la simulation :

6.1. Conditions de simulation (les invariants):

La simulation se fait théoriquement pour l'altitude **30°** durant le **21 juillet** et Le calcul de gains se fait sous un régime permanent. [Capderou. M. 1985].

6.1.1. Caractéristiques thermo physiques et données climatiques:

K_E = Conductance des parois externe « moyenne » ($1.3 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$).

a = Coefficient d'absorption de l'enveloppe (0.7).

f_e = Coefficient d'échange des surfaces externes ($3 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°C}$).

t_i = Température intérieure (25 °C).

t_e = Température extérieure de base (40 °C).

I_1 = Intensité de la radiation incidente sur S_1 (Est) = 516 w/m^2 .

I_2 = Intensité de la radiation incidente sur S_2 (Toiture) = 776 w/m^2 .

I_3 = Intensité de la radiation incidente sur S_3 (Ouest) = 516 w/m^2 .

I_4 = Intensité de la radiation incidente sur S_4 (Sud) = 94 w/m^2 .

I_5 = Intensité de la radiation incidente sur S_5 (Nord) = 50 w/m^2 .

6.2. Les variables de la simulation :**6.2.1. La géométrie et le volume :**

En fixant la valeur du volume « V » en doit chercher la forme géométrique qui présente un facteur de forme minimal $C_f = \frac{Se}{V}$ pour obtenir le minimum de gains par le volume comme on doit fixer la forme géométrique pour étudier l'influence de la valeur du volume « V » sur la performance thermique de la forme.

$$G = C_f K_E \Delta t$$

6.2.2. Les dimensions :

En fixant la géométrie, on va essayer pour chaque forme de définir les dimensions des surfaces des parois Est, Ouest et la toiture selon les trois niveaux de la simulation en étudiant les variations du facteur de forme partiel : C_{f1} , C_{f2} , C_{f3} C_{fn} se qui devrait nous offrir une bonne maîtrise de l'orientation de la forme.

$$G = C_f K_E \Delta t + C_{fn} \frac{aI}{fe} \dots\dots\dots (3)$$

6.2.3. Les caractéristiques morphologiques :

Modèle	SE	V	C_f	Les proportions	C_f' (expression réduite)
Modèle « 0 » de référence Le cube	$S_{E0}=5 a^2$	$V_0 = a^3$	$C_{f0} = \frac{5}{a}$	/	$C_{f0}' = \frac{5}{a}$
Modèle « 1 » Le parallélépipède	$S_{E1}=2LH+2IH+LH$	$V_1 = L I H$	$C_{f1} = \frac{2}{L} + \frac{2}{I} + \frac{1}{H}$	$L = \frac{3}{2} I$ $H = \frac{3}{4} I$	$C_{f1}' = \frac{14}{3I}$
Modèle « 2 » La tour	$S_{E2}=2LH+20IH+LH$	$V_2 = L I H$	$C_{f2} = \frac{2}{L} + \frac{2}{I} + \frac{1}{H}$	$L = \frac{3}{2} I$ $H = \frac{9}{4} I$	$C_{f2}' = \frac{34}{9I}$
Modèle « 3 » La coupole	$S_{E3}=2\pi R^2$	$V_3 = \frac{2}{3} \pi R^3$	$C_{f3} = \frac{3}{R}$	/	$C_{f3}' = \frac{3}{R}$

6.3. Etude de l'influence de la géométrie et du volume:

$$G = C_f K_E \Delta t$$

$$F(x) = x K_E \Delta t$$

$$F(x) = - 19.5 x$$

La quantité des gains de chaleur exprimée en valeur par Le coefficient des gains « **G** » est proportionnelle aux variations de (**x**) qui expriment le facteur de forme « **C_f** ». Ce dernier, dépend de la quantité des surfaces **S_E**, de leur morphologie et de la valeur du volume habitable « **V** ». Alors, pour étudier les variations de « **C_f** » et « **G** » on doit :

1- Fixer le volume « **V** » et chercher la forme géométrique qui nous offre un coefficient de forme minimale « **C_f_{min}** », tout en sachant que la valeur de la constante « **V** » devrait être choisie selon la dimension « **a** », du cube (cas de référence modèle « 0 ») selon le tableau ci-dessous :

a (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
V (m³)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000

Le choix de ces valeurs à été fait selon les critères suivants :

- Un minimum d'espace habitable, qui est de **5*5*5 = 125 m³**.
- Une augmentation des valeurs de l'ordre de **(05 m)**, qui représente une dimension moyenne – entre deux poteaux- d'une portée.
- Huit valeurs présentatifs qui donneront des grands volumes, des petits volumes et des volumes moyens.

Remarque :

Pour le calcul des surfaces de l'enveloppe de chaque type, on prend en considération les proportions définies par les caractéristiques morphologiques déduites de l'analyse typo morphologique.

2- Fixer la géométrie et définir les variations de « **C_f** » par rapport aux variations du volume « **V** » selon les mêmes conditions déjà citées.

3- Enfin notre réflexion doit se porter sur les variations du coefficient de gains énergétiques « **G** », par rapport aux variations de « **C_f** », selon les deux cas (volume et géométrie).

4- Calcul du coefficient « **C_f** » selon les variations du volume et de la géométrie.

Exemple de calcul :

Pour $V_1 = 1000 \text{ m}^3$

$$S_{E1} = 2 L H + 2 l H + L H \text{ d'où } L = \frac{3}{2} l \text{ et } H = \frac{3}{4} l$$

$$S_{E1} = \frac{39}{8} l^2$$

$$V_1 = L l H = \frac{9}{8} l^3 \quad l = 961$$

$$S_{E1} = 449.28 \text{ m}^2 \Rightarrow CF = \frac{449.28}{1000} = 0.44$$

En effectuant le calcul pour tout les volumes et géométries en obtient le tableau ci après :

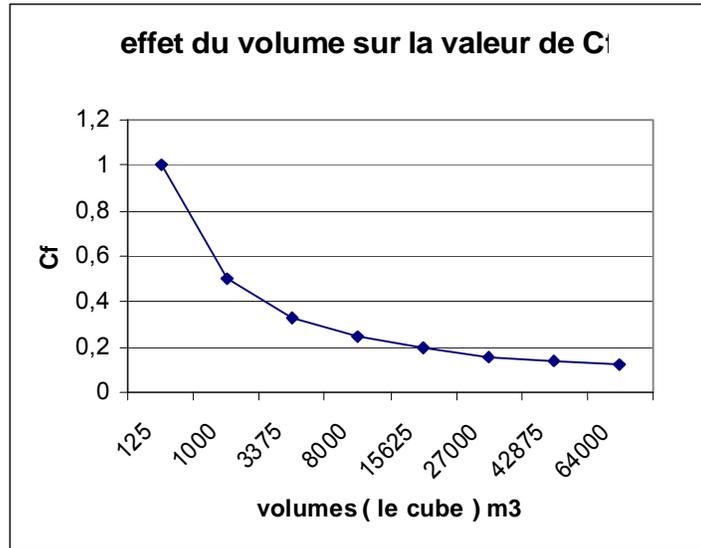
Dimension du modèle « 0 » de référence (m)	Volume (m ³)	Modèle « 0 » Le cube			Modèle « 1 » Le parallélépipède			Modèle « 2 »	
		a (m)	S _{E0} (m ²)	Cf ₀	l ₁ (m)	S _{E1} (m ²)	Cf ₁	l ₂ (m)	S _{E2} (m ²)
5	125	5	125	1	4.8	112.32	0.89	3.30	159
10	1000	10	800	0.5	9.6	449.28	0.44	6.60	638
15	3375	15	1125	0.33	14.42	1013.68	0.30	9.92	143
20	8000	20	2000	0.25	19.22	1800.86	0.22	13.23	255
25	15625	25	3125	0.20	24.03	2815.02	0.18	16.54	399
30	27000	30	4500	0.16	28.84	4054.75	0.15	19.85	576
35	42875	35	6125	0.14	33.65	5520.07	0.12	23.16	784
40	64000	40	8000	0.12	38.45	7207.21	0.11	26.47	1024

Tableau : donnent les valeurs du coefficient de forme pour les quatre géométries avec une variation de huit volumes

6.3.1. Etude de l'influence du volume sur le facteur de forme pour les quatre géométries :

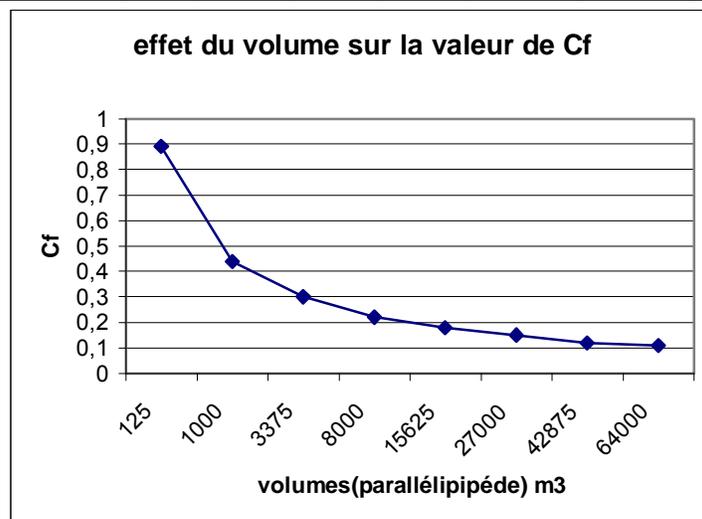
6.3.1.1. Le cube « Modèle 0 » :

volumes (cube)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000
Cf	1	0,5	0,33	0,25	0,2	0,16	0,14	0,12



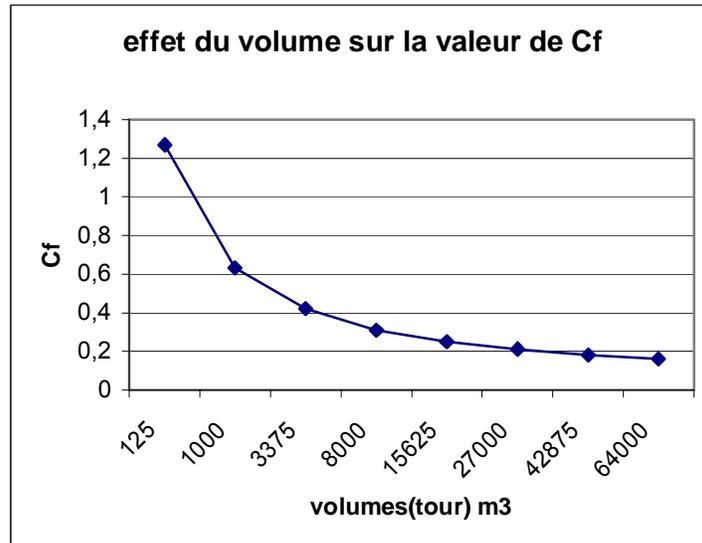
6.3.1.2. Le parallélépipède « Modèle 1 » :

volume (parallélépipède)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000
Cf	0,89	0,44	0,3	0,22	0,18	0,15	0,12	0,11



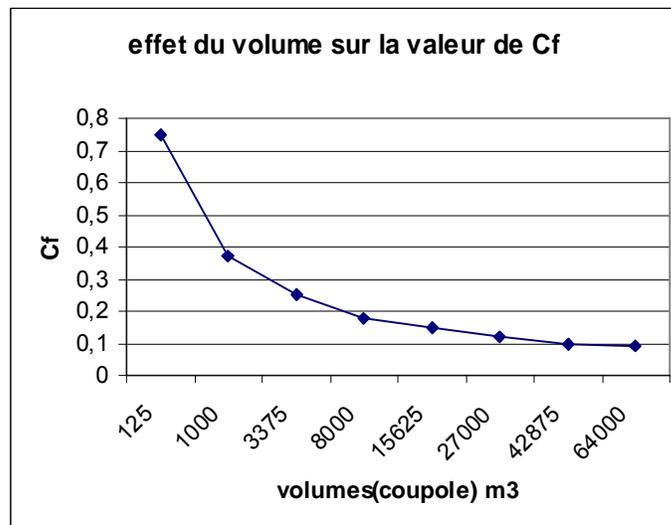
6.3.1.3. La tour « Modèle 2 » :

volume (tour)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000
Cf	1,27	0,63	0,42	0,31	0,25	0,21	0,18	0,16



6.3.1.4. La coupole « Modèle 3 » :

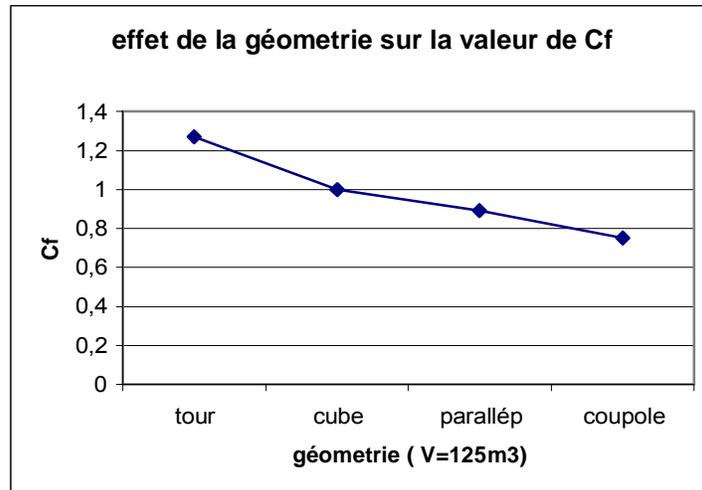
volumes (coupole)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000
Cf	0,75	0,37	0,25	0,18	0,15	0,12	0,1	0,09



6.3.2. Etude de l'influence de la géométrie sur le facteur de forme pour divers volumes a valeur constante:

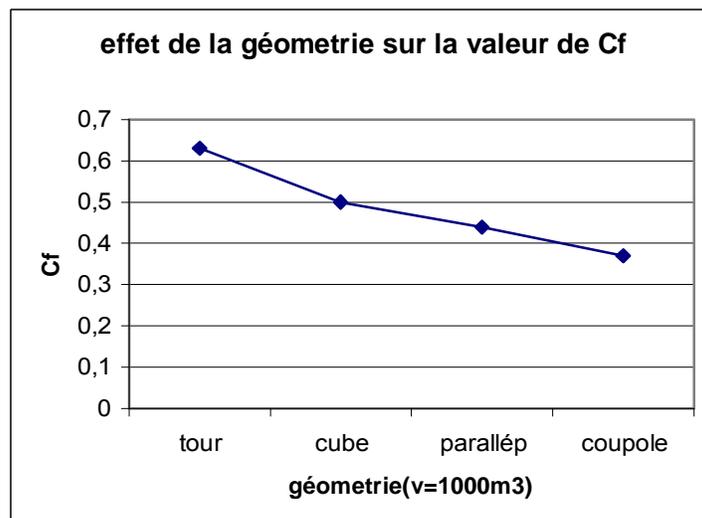
Volume $v=125m^3$:

géométrie ($v=125m^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	1,27	1	0,89	0,75



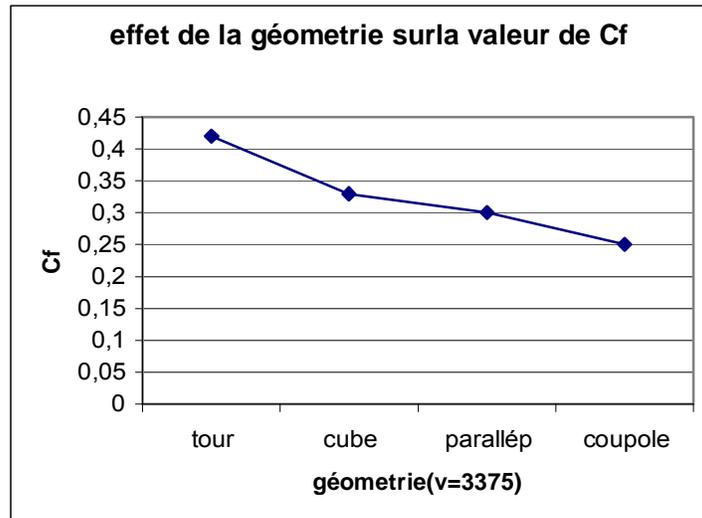
Volume $v=1000m^3$:

géométrie ($v=1000m^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,63	0,5	0,44	0,37

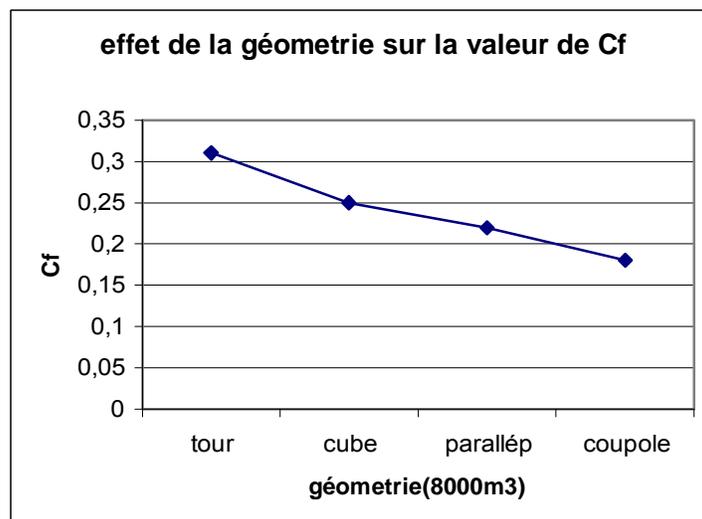


Volume $v=3375m^3$:

géométrie ($v=3375m^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,42	0,33	0,3	0,25

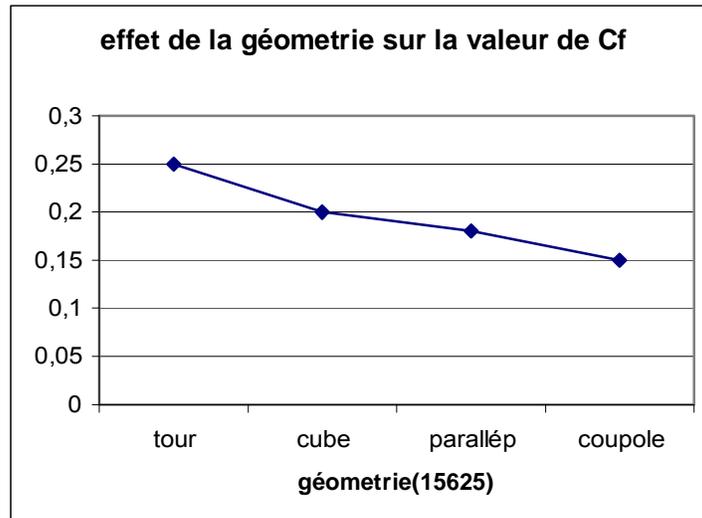
**Volume $v=8000m^3$:**

géométrie ($v=8000m^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,31	0,25	0,22	0,18



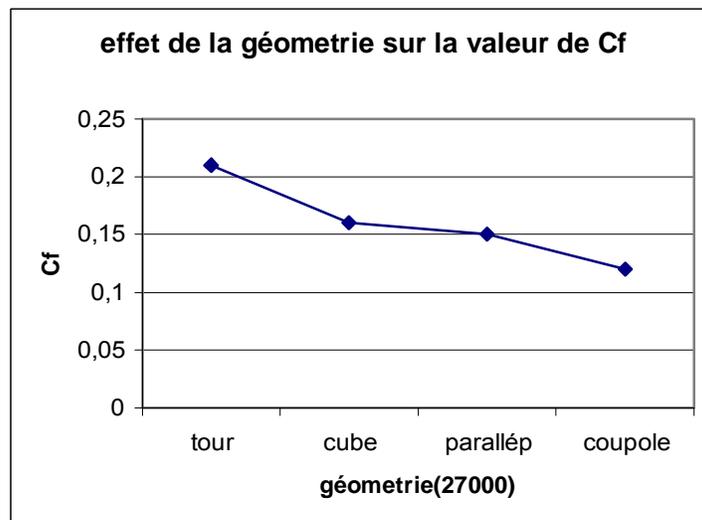
Volume v=15625m3 :

géométrie (v=15625m3)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,25	0,2	0,18	0,15



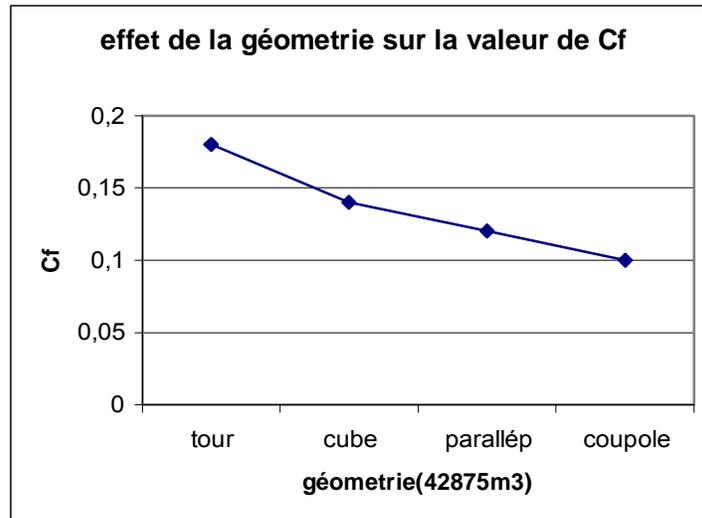
Volume v=27000m3 :

géométrie (v=27000m3)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,21	0,16	0,15	0,12



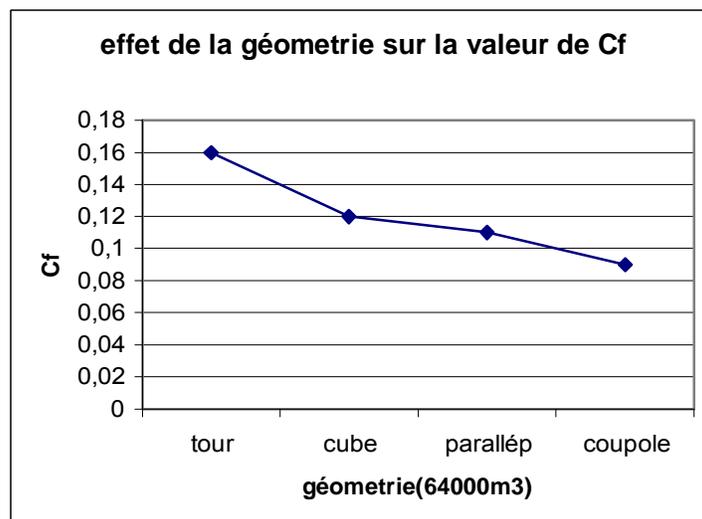
Volume $v=42875m^3$:

géométrie ($v=42875m^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,18	0,14	0,12	0,1



Volume $v=64000m^3$:

géométrie ($v=64000m^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,16	0,12	0,11	0,09



6.3.3. Interprétation des résultats :

D'après les graphes qui interprètent l'effet du volume sur le facteur de forme, sous la condition d'une même géométrie, on remarque pour les quatre géométries que les variations de « C_f » sont inversement proportionnelles aux variations du volume « V ». Alors l'augmentation du volume habitable permet la minimisation de la valeur de « C_f ».

Pour l'effet de la géométrie sur le facteur de forme sous la condition d'un même volume et selon les graphes ci avant ; la minimisation du facteur de forme s'optimise par le bon choix de la géométrie, l'étude des quatre géométries nous a permis de les classés selon la valeur minimale du « C_f » tels que :

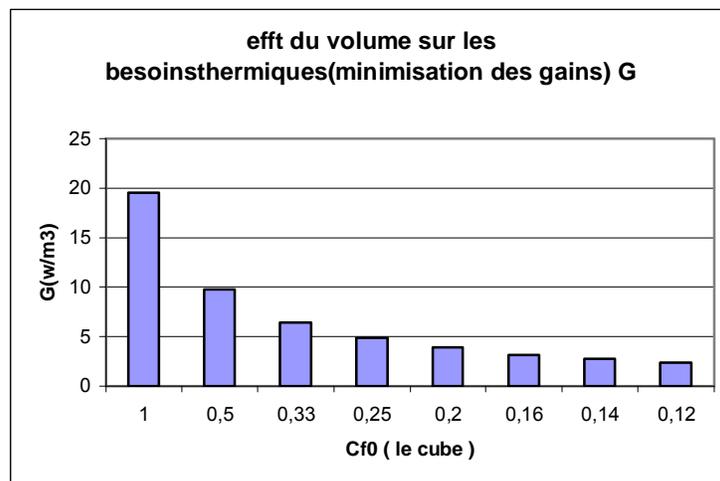
- 1- La coupole.
- 2- Le parallélépipède.
- 3- Le cube.
- 4- La tour.

Ce classement attire notre attention sur une remarque essentielle concernant la tour du Yémen qui est plus performante que la maison parallélépipédique du M'Zab à cause de l'importance du volume de la tour par rapport à celui du parallélépipède. Mais, dans le cas où le volume est constant, c'est l'inverse car la surface d'emprise au sol du parallélépipède est plus importante que celle de la tour.

6.4.1. Etude de l'influence du volume sur le facteur de gains « G » des quatre morphologies :

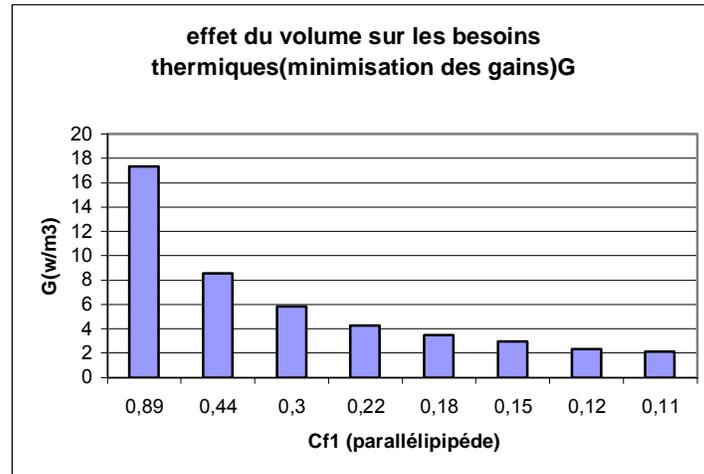
6.4.1.1. Le cube « Modèle o » :

volumes (cube)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000
C_f	1	0,5	0,33	0,25	0,2	0,16	0,14	0,12
G (w/m ³)	19,5	9,75	6,43	4,87	3,9	3,12	2,73	2,34

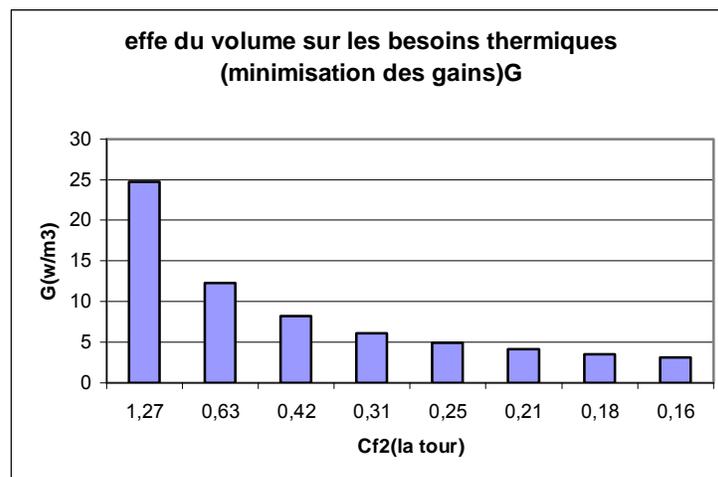


6.4.1.2. Le parallélépipède « Modèle 1 » :

volumes (parallélépipède)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000
Cf	0,89	0,44	0,3	0,22	0,18	0,15	0,12	0,11
G(w/m3)	17,35	8,58	5,85	4,29	3,51	2,92	2,34	2,14

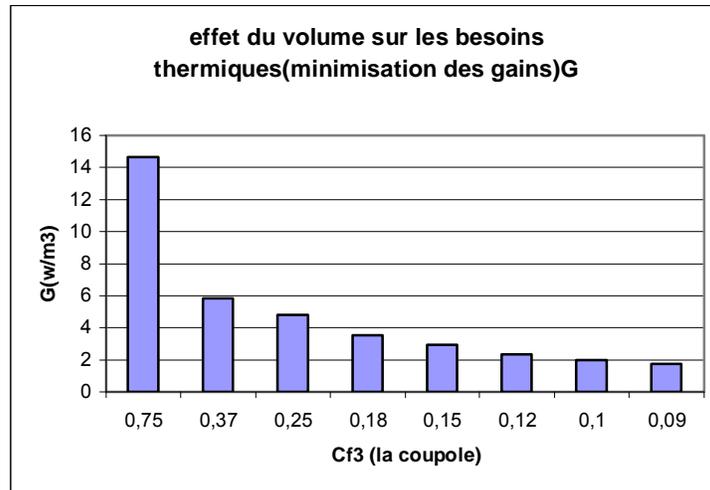
**6.4.1.3. La tour « Modèle 2 » :**

Volumes (tour)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000
Cf	1,27	0,63	0,42	0,31	0,25	0,21	0,18	0,16
G(w/m3)	24,76	12,28	8,19	6,04	4,87	4,09	3,51	3,12



6.4.1.4. La coupole « Modèle 3 » :

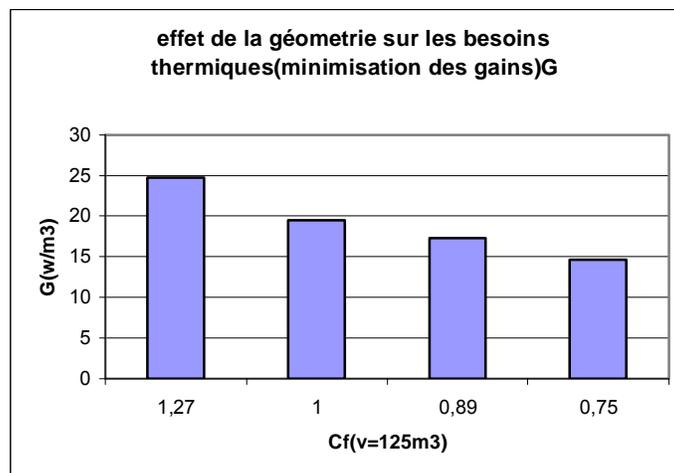
Volumes (coupole)	125	1000	3375	8000	15625	27000	42875	64000
Cf	0,75	0,37	0,25	0,18	0,15	0,12	0,1	0,09
G(w/m3)	14,62	5,85	4,8	3,51	2,92	2,34	1,95	1,75



6.4.2. Etude de l'influence de la géométrie sur le facteur de gains « G » pour divers volumes a valeur constante:

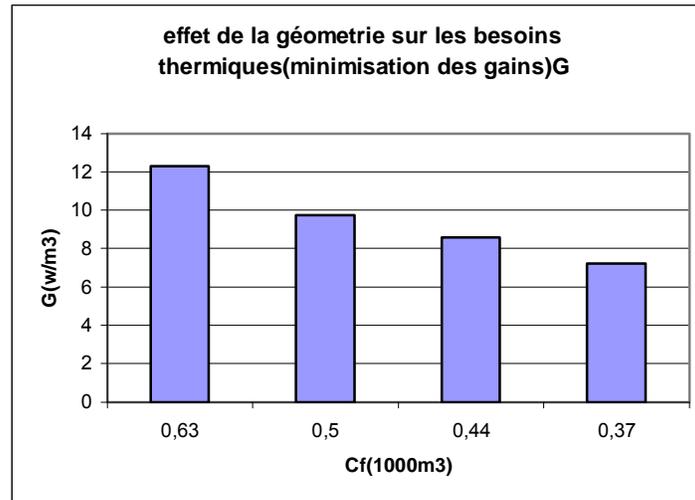
Volume v=125m3 :

Géométrie (v=125m3)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	1,27	1	0,89	0,75
G(w/m3)	24,76	19,5	17,35	14,62



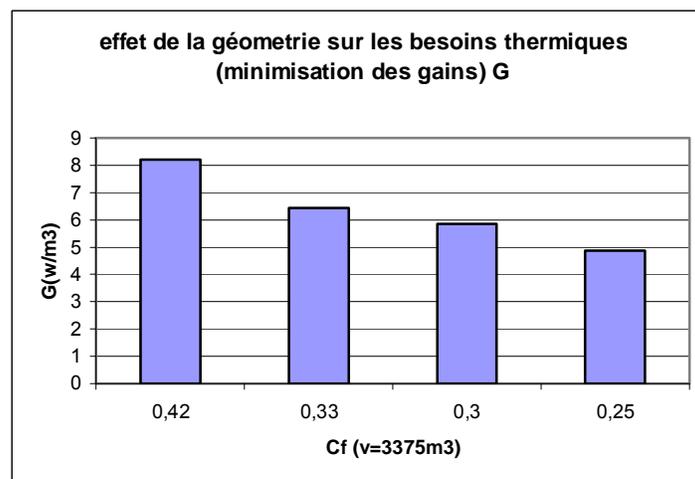
Volume v=1000m3 :

Géométrie (v=1000m3)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,63	0,5	0,44	0,37
G(w/m3)	12,28	9,75	8,58	7,21



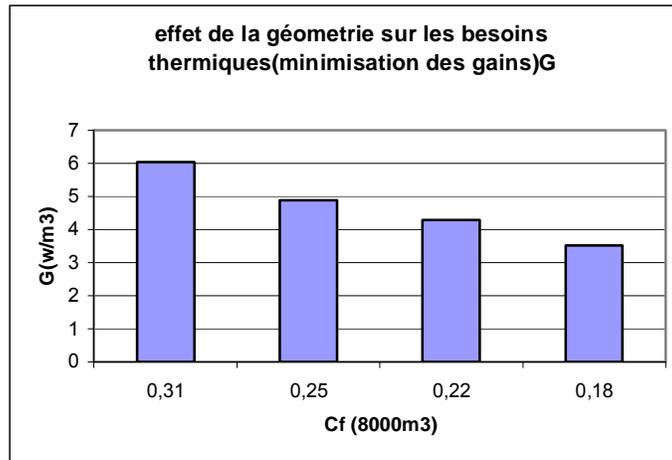
Volume v=3375m3 :

Géométrie (v=3375m3)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,42	0,33	0,3	0,25
G(w/m3)	8,19	6,43	5,85	4,87



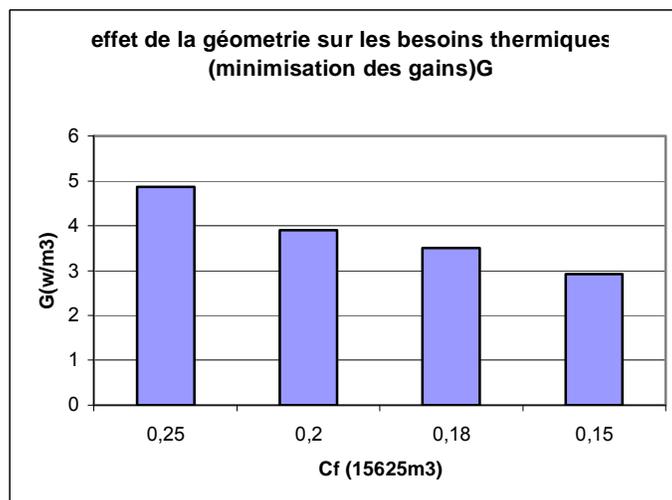
Volume v=8000m³ :

Géométrie (v=8000m³)	tour	cube	parallélépipède	coupoles
Cf	0,31	0,25	0,22	0,18
G(w/m³)	6,04	4,87	4,29	3,51



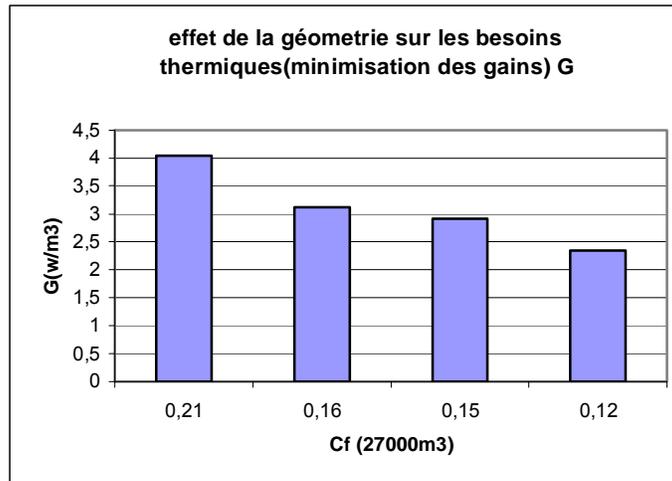
Volume v=15625m³ :

Géométrie (v=15625m³)	tour	cube	parallélépipède	coupoles
Cf	0,25	0,2	0,18	0,15
G(w/m³)	4,87	3,9	3,51	2,92

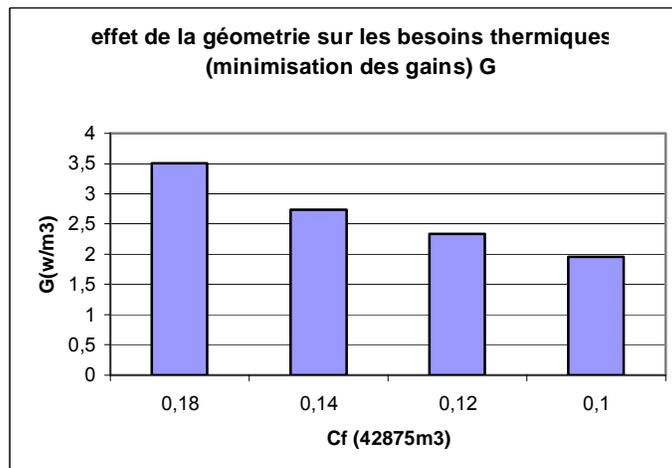


Volume $v=27000\text{m}^3$:

Géométrie ($v=27000\text{m}^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,21	0,16	0,15	0,12
G(w/m³)	4,05	3,12	2,92	2,34

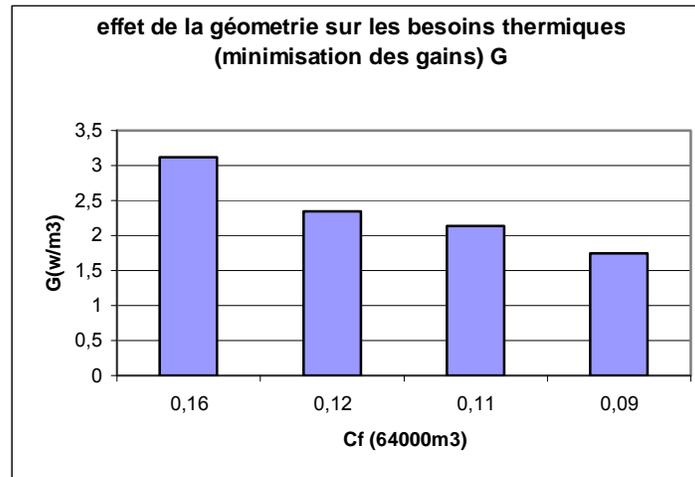
**Volume $v=42875\text{m}^3$:**

Géométrie ($v=42875\text{m}^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,18	0,14	0,12	0,1
G(w/m³)	3,51	2,73	2,34	1,95



Volume $v=64000\text{m}^3$:

Géométrie ($v=64000\text{m}^3$)	tour	cube	parallélépipède	coupole
Cf	0,16	0,12	0,11	0,09
G(w/m³)	3,12	2,34	2,14	1,75

**6.4.3. Interprétation des résultats :**

La quantité des gains de chaleur « **G** » est relativement proportionnelle aux variations du facteur de forme « **C_f** ». Cette relation peut s'exprimer selon deux situations suivantes :

- 1/- Si on fixe le volume « **V** », le facteur « **G** » devient proportionnel à la géométrie selon le classement successif effectué par le calcul de « **C_f_{min}** » (coupole, parallélépipède, cube, tour).
- 2/- Si on fixe la géométrie, le facteur « **G** » devient inversement proportionnel aux variations du volume « **V** », ce qui veut dire que pour un « **G_{min}** » on doit avoir un « **C_f_{min}** » en augmentant le volume « **V** ».

Exemple :

Pour $V = 125 \text{ m}^3$ les gains « G » peuvent être augmentés ou diminuer par l'effet de la géométrie à savoir :

- Coupole = minimisation de $- 26 \%$
- Parallélépipède = minimisation de $- 10 \%$
- Cube = $\pm 0 \%$
- Tour = augmentation $+ 26 \%$

Pour $V = 64000 \text{ m}^3$ on aura une minimisation des gains « G » par l'effet de la géométrie et du volume qui peut atteindre :

- **91 %** pour une coupole.
- **88 %** pour un parallélépipède.
- **86 %** pour un cube.
- **84 %** pour une tour.

6.5. Conclusion:

Les besoins thermiques des régions à climat chaud et aride (la minimisation des gains de chaleur) peuvent être diminués par l'augmentation du volume et le bon choix de la géométrie. Mais, l'influence du volume est plus importante que celle de la géométrie. On peut aussi étaler un édifice au sol pour minimiser les gains de chaleur à travers sa forme.

Pour atteindre notre objectif qui veut la détermination des dimensions et des proportions des formes ayant un facteur de forme minimal « Cf_{\min} » on doit compléter notre recherche par l'étude de l'influence du supplément de température (**tsa**) sur la performance thermique des quatre morphologies, afin de confirmer les résultats de la première étape et de définir avec plus d'exactitude les caractéristiques morphologiques (**géométrie, volume, dimension**) des formes performantes.

6.6. Etude de l'influence du supplément de température (t_{sa}) :

L'orientation de la construction est un facteur très important dans la détermination des caractéristiques morphologiques des formes. La prise en compte de l'ensoleillement et de ces effets sur la construction a conduit souvent à des solutions ingénieuses, dont le meilleur profil d'une construction est généralement selon l'axe Est-ouest ; d'où ces façades les plus réduites Est et Ouest sont orientées face aux apports solaires maximum en été (J Louis Izard ; 1985).

En effet, après avoir étudié l'influence de la géométrie et du volume sur la performance thermique des formes des constructions on s'attend, à travers cette partie à l'étude de l'influence du supplément de température sur la quantité des gains de chaleur. En outre, l'influence des radiations solaires sur la forme afin de **définir les proportions entre les dimensions de la forme qui permet pour une géométrie à volume constant le minimum de gains de chaleur.**

Alors, le facteur de gains de chaleur « G » doit s'écrire tel que :

$$G = C_f \Delta t K_E + \frac{aI_n}{fe} C_{fn} \dots\dots\dots (1)$$

Ou :

I_n = est l'intensité de la radiation solaire défini selon l'orientation.

C_{fn} = est un facteur de forme partiel ($\frac{S_n}{V}$), ou le rapport de la surface exposée au volume du bâtiment.

La fonction donnant la valeur de « G » est donc décomposée en deux parties :

Partie 1 : $G = C_f \Delta t K_E \dots\dots\dots (2)$

Donnant l'effet du gradient thermique sur la quantité des gains de chaleur et à travers laquelle on a déterminé l'influence de la géométrie et du volume sur la performance thermique selon la forme du bâtiment.

Partie 2 : $G = \frac{aI_n}{fe} C_{fn} \dots\dots\dots (3)$

Donnant l'effet du supplément de température « t_{sa} » sur la quantité des gains de chaleur dus aux radiations solaires et à travers laquelle on tentera de minimiser les gains, en minimisent le facteur de forme partiel C_{fn} .

Sachant que « a » et « fe » sont constants pour toute l'enveloppe, « I » est une constante relative à l'orientation de la surface (heure de simulation), il ressort que la minimisation de « G » est proportionnelle aux variations de « C_{fn} ».

Alors, pour une géométrie quelconque on aura :

Niveau 01 et 03 : Le matin a (10:00 h)

$$G = \frac{aI_1}{fe} C_{f1} \quad \text{dont :}$$

I_1 = est l'intensité de la radiation solaire pour les surfaces orientées Est.

$$C_{f1} = \frac{S_1}{V} \quad \text{d'où } S_1 \text{ est la somme des surfaces orientées vers l'Est.}$$

Niveau 2 : A midi (12:00 h)

$$G = \frac{aI_2}{fe} C_{f2} \quad \text{dont :}$$

I_2 = est l'intensité de la radiation solaire incidente sur les surfaces horizontales.

$$C_{f2} = \frac{S_2}{V} \quad \text{d'où } S_2 \text{ est la somme des surfaces horizontales.}$$

Niveau 3 : le soir (16:00 h)

Le même cas que le matin

6.6.1. Application de la simulation :

6.6.1.1. Étude de l'influence du supplément de température sur la performance thermique du Cube :

$$C_{f1} = C_{f2} = C_{f3} = C_{f4} = C_{f5} = \frac{1}{a}$$

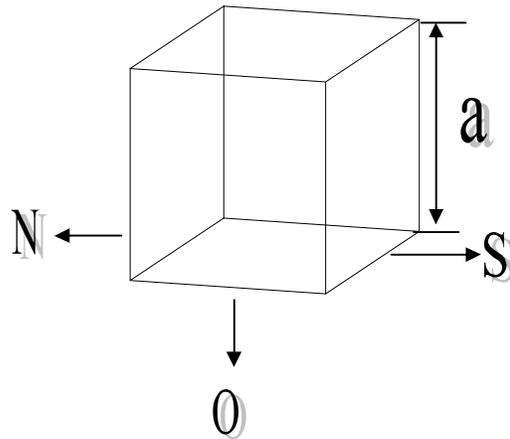
$$C_{fn} = \frac{1}{a}$$

Les variations de « C_{fn} » pour toutes

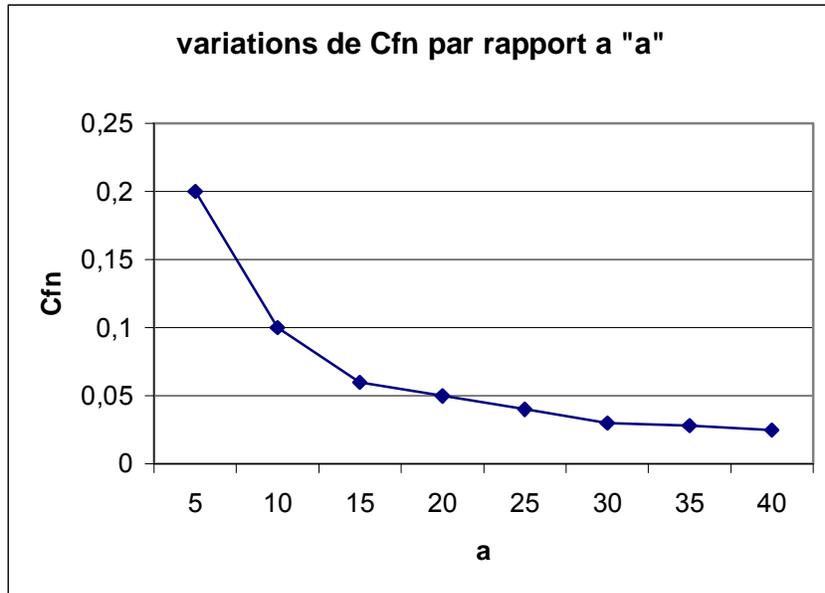
Les orientation sont inversement

Proportionnelles a la dimension

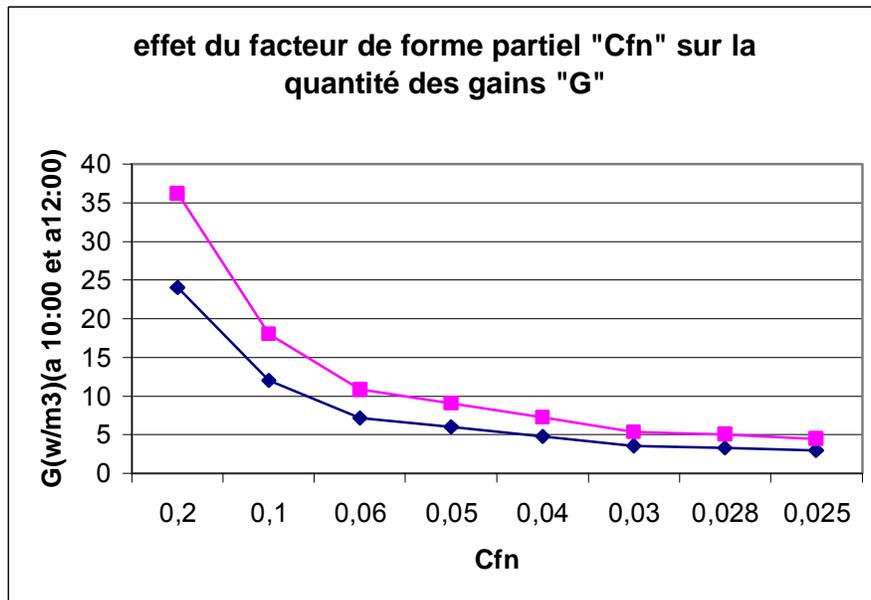
« a » du Cube tel que :



a (m)	5	10	15	20	25	30	35	40
C_{fn}	0.2	0.1	0.06	0.05	0.04	0.03	0.028	0.025



C_{fn}	0.2	0.1	0.06	0.05	0.04	0.03	0.028	0.025
G (w/m³) (à 10:00)	24.08	12.04	7.22	6.02	4.81	3.61	3.37	3.01
G (w/m³) (à 12:00)	36.2	18.1	10.86	9.05	7.24	5.43	5.06	4.52

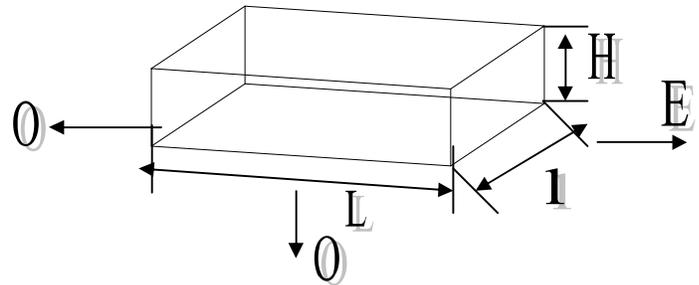
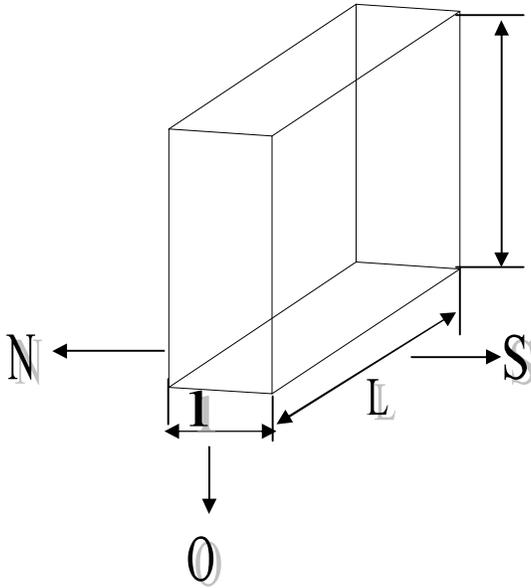


L'interprétation des graphes donnant les variations de « C_{fn} » et de « G » montre que La minimisation des gains de chaleur dus a la radiation solaire s'obtient avec des valeurs minimales du facteur de forme partiel « C_{fn} », Cela devrait se réaliser en augmentant la valeur de « a » ce qui augmentera le volume

« V ». En conséquence, l'effet de la radiation solaire sur le Cube est identique à l'effet du graduant thermique.

Cependant, la minimisation des effets de la radiation solaire nécessite le changement de la géométrie du Cube à un Parallélépipède ou une Tour pour réduire l'exposition des surfaces Est, Ouest et la Toiture aux radiations solaires intenses.

6.6.1.2. Étude de l'influence du supplément de température sur la performance thermique du parallélépipède et de la tour :



$$G = \frac{aI_n}{fe} C_{fn}$$

Niveau 01 : Le matin à 10:00h ou le Soir à 16:00h

$$G_1 = \frac{aI_1}{fe} \left(\frac{1}{L} \right) \text{ ou } G_1 = \frac{aI_1}{fe} \left(\frac{l.H}{V} \right)$$

$$C_{f1} = \frac{1}{L} = \frac{l.H}{V} \quad / \quad V = l.H.L$$

On remarque que les variations de « G_1 » sont proportionnelles à ceux de « C_{f1} ». Ce dernier décroît avec la croissance de longueur « L » ce qui implique une minimisation de la surface des façades Est Ouest ($l.H$) « Ceci nous amènera son doute à **une forme parallélépipédique** ».

Niveau 02 : A midi 12:00h

$$G_2 = \frac{aI_2}{fe} \left(\frac{1}{H} \right) \text{ ou } G_2 = \frac{aI_2}{fe} \left(\frac{l.L}{V} \right)$$

$$C_{f2} = \frac{1}{H} = \frac{l.L}{V} \quad / \quad V = l.H.L$$

On remarque a ce moment que les variations de « G_2 » sont aussi proportionnelles a ceux de « C_{f2} ». Mais dans ce cas « C_{f2} » décrois avec la croissance de la hauteur « H » et la réduction automatique de la surface horizontale de la toiture (L. l) « Ce qui nous conduit à l'inverse du niveau 01 a **une tour** ».

Alors, on doit déterminer pour les deux niveaux de simulation les variables **l**, **L** et **H** qui permettant de minimiser la valeur de « G », avec une application numérique sur des formes a volume constant, dont on va comparer les résultats des conditions de la simulation pour les deux niveaux. Ceci dans l'objectif de corrélér entre les résultats et d'identifier les proportions favorables pour une forme géométrique plus performante.

Notre problème peut s'écrire donc comme suit :

$$G = C_f \Delta t K_E + \frac{aI_n}{fe} C_{f1}$$

Pour le niveau 01 :

$$G_1 = C_f \Delta t K_E + \frac{aI_1}{fe} C_{f1}$$

$$G_1 = \frac{159.4}{L} + \frac{39}{l} + \frac{19.5}{H} \dots\dots\dots(A)$$

Pour le niveau 02 :

$$G_2 = C_f \Delta t K_E + \frac{aI_2}{fe} C_{f2}$$

$$G_2 = \frac{39}{L} + \frac{39}{l} + \frac{200.5}{H} \dots\dots\dots(B)$$

La détermination des variables (**L**, **l**, **h**) pour que les deux fonctions (A, B) tendent vers le minimum est un problème purement mathématique qui consiste dans l'optimisation d'une fonction non linéaire à trois variables sous les contraintes suivants :

- $V = l \cdot L \cdot H \dots\dots\dots$ Volume constant.
- $H \leq L$ où $H \geq L \dots\dots\dots$ Contrainte de géométrie (parallélépipède ou tour).
- $0 \leq l \leq L \dots\dots\dots$ Contrainte de bonne orientation. d'ou O est une constante supérieure à un.

6.6.1.2.1. Résolution des problèmes d'optimisation non linaires avec contraint :

f une fonction réelle de plusieurs variables.

$$f: \mathfrak{R}^n \longrightarrow \mathfrak{R}$$

On s'intéresse ici au problème suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) \\ \text{sous les contraintes} \\ g_i(x) \leq 0 \quad i \in I = \{1, 2, \dots, m\} / g: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R} \\ x \in \mathfrak{R}^n \end{array} \right.$$

Toutes les fonctions f et g_i sont supposées continues et différentiables.

***Conditions nécessaires d'optimalité :**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } f(x) \\ g_i(x) \leq 0 \quad \forall i \in I = \{1, \dots, m\} \end{array} \right.$$

***Théorème :**

On suppose que les fonctions f et g_i ($i \in I$) sont continues et différentiables

Si $x_0 \in X = \{x \in \mathfrak{R}^n / g_i(x) \leq 0\}$

Une condition nécessaire pour x_0 soit un minimum local de f qu'il existe des nombres.

$\lambda_i \geq 0$ ($i \in I$) appelés multiplicateurs de Kuhn-Tucker tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla f(x_0) + \sum \lambda_i \nabla g_i(x_0) = 0 \\ \text{et} \\ \lambda_i \nabla g_i(x_0) = 0 \quad \forall i \in I \end{array} \right.$$

***Remarque :**

$\nabla f(x_0)$ désigne la valeur de facteur gradient de f au point x_0

$$\left[\begin{array}{l} X(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \nabla f = \left(\begin{array}{c} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{array} \right) \end{array} \right.$$

***Condition suffisante d'optimalité (points cols) :**

Soit le problème (P)

$$(P) \begin{cases} \text{Min } f(x) \\ g_i(x) \leq 0 \quad \forall i \in I = \{1, \dots, m\} \\ X \in \mathfrak{X}^n \end{cases}$$

Associons à chaque contrainte ($i \in I$) un nombre réel $\lambda_i \geq 0$ appelé multiplication de Lagrange.

La fonction de Lagrange associée au problème est par définition la fonction suivante:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x)$$

***Définition :** on dit que (x, λ) est un point col de $L(x, \lambda)$ si :

$$\begin{aligned} L(x', \lambda') &\leq L(x, \lambda') \quad \forall x \\ L(x', \lambda) &\leq L(x', \lambda') \quad \forall \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

***Théorème :** (x', λ') est un point col pour $L(x, \lambda)$ si :

$$\begin{aligned} 1) \quad &L(x', \lambda') = \min L(x, \lambda') \\ 2) \quad &g_i(x') \leq 0 \quad \forall i \in I \\ &\lambda_i g_i(x') = 0 \quad \forall i \in I \end{aligned}$$

***Exemple :**

Soit le problème :

$$\begin{cases} \text{Min } (x^2 + y^2) \\ 2x + y \leq -4 \end{cases}$$

Pour déterminer l'optimum de ce problème convexe, en utilisant les conditions de (Kuhn-Tucker).

On définit la fonction de Lagrange :

$$L(x, y, \lambda) = x^2 + y^2 + \lambda (2x + y + 4)$$

Un point col s'il existe il est solution de :

$$\begin{cases} \frac{\partial L(x, y, \lambda)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial L(x, y, \lambda)}{\partial y} = 0 \\ \lambda (2x + y + 4) = 0 \\ 2x + y + 4 \leq 0 \end{cases} \quad \Longrightarrow \quad \begin{cases} 2x + 2y = 0 \\ 2y + \lambda = 0 \\ \lambda (2x + y + 4) = 0 \\ 2x + y + 4 \leq 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow x = -\frac{8}{5}, y = \frac{4}{5} \Rightarrow \min f(x, y) = \left(-\frac{8}{5}\right)^2 + \left(\frac{4}{5}\right)^2 = \frac{80}{25} = \frac{18}{5}$$

La minimisation des gains de chaleur dans le bâtiment par la détermination des proportions des formes performantes, se fait par une définition de la valeur optimale de la fonction **G**, suivant les valeurs de **L** (longueur), **l** (largeur), et **H** (hauteur).

$$\text{On a : } \mathbf{G} = \frac{a}{L} + \frac{b}{l} + \frac{d}{H}$$

Si on veut trouver la valeur minimale de **G** pour un volume constant **V = L.l.H** on est amené à résoudre le problème d'optimisation avec les contraintes suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \frac{a}{L} + \frac{b}{l} + \frac{d}{H} \\ \mathbf{L.l.H} = \mathbf{V} \\ \sigma \leq l \leq L \\ H \leq L \end{array} \right.$$

Si nous effectuons le changement de variables **V = L.l.H** pour éliminer la contrainte d'égalité **V = L.l.H**, le problème devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \frac{a}{L} + \frac{b}{l} + \frac{d}{H} \cdot L \cdot l \\ \mathbf{V} - \mathbf{l} \cdot \mathbf{L}^2 \leq 0 \\ \sigma - \mathbf{l} \leq 0 \\ \mathbf{l} - \mathbf{L} \leq 0 \end{array} \right.$$

On reformule le problème (P) comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } [f(x, y) = \frac{a}{x} + \frac{b}{y} + \frac{d}{V} \cdot x \cdot y] \\ \mathbf{V} - \mathbf{x}^2 \mathbf{y} \leq 0 \\ \mathbf{y} - \mathbf{x} \leq 0 \\ \sigma - \mathbf{y} \leq 0 \end{array} \right.$$

On définit la fonction de Lagrange :

$$\mathbf{L}(\mathbf{X}, \lambda) = \frac{a}{x} + \frac{b}{y} + \frac{d}{V} \cdot x \cdot y + \lambda_1 (\mathbf{V} - \mathbf{x}^2 \mathbf{y}) + \lambda_2 (\mathbf{y} - \mathbf{x}) + \lambda_3 (\sigma - \mathbf{y})$$

$$\mathbf{X} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad \lambda \begin{pmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \end{pmatrix}$$

Si (\mathbf{X}', λ') est un point col, alors il est solution de système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial y} = 0 \\ \lambda_1 (V - x^2 y) = 0 \\ \lambda_2 (y - x) = 0 \\ \lambda_3 (\sigma - y) = 0 \end{array} \right.$$

On trouve que :

$$x = \sqrt[3]{\frac{a^2 V}{b.d}}$$

$$y = \sqrt[3]{\frac{b^2 V}{a.d}}$$

Enfin : $\text{Min } G = \frac{a}{L} + \frac{b}{l} + \frac{d}{H}$ est un problème dont la solution est :

$$L = \sqrt[3]{\frac{a^2 V}{b.d}}, l = \sqrt[3]{\frac{b^2 V}{a.d}}, H = \sqrt[3]{\frac{d^2 V}{b.a}}$$

6.6.1.2.2. solution des conditions du niveau 01 :

$$L = \sqrt[3]{\frac{(159.4)^2 V}{39 * 19.5}} = \sqrt[3]{33.41V} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{L} = \sqrt[3]{33.41V}$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{(39)^2 V}{159.4 * 19.5}} = \sqrt[3]{0.5V} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{l} = \sqrt[3]{0.5V}$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{(19.5)^2 V}{159.4 * 39}} = \sqrt[3]{0.06V} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{H} = \sqrt[3]{0.06V}$$

6.6.1.2.3. solution des conditions du niveau 02 :

$$L = \sqrt[3]{\frac{(39)^2 V}{39 * 200.5}} = \sqrt[3]{0.19V} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{L} = \mathbf{l} = \sqrt[3]{0.19V}$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{(39)^2 V}{39 * 200.5}} = \sqrt[3]{0.19V}$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{(200.5)^2 V}{39 * 39}} = \sqrt[3]{26.43V} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{H} = \sqrt[3]{26.43V}$$

6.6.1.2.4. Applications numériques :

On va essayer de faire une application numérique sur les trois volumes (125m³, 5625m³, 64000m³) pour déterminer les proportions favorables :

Volume (m ³)	Dimensions (mL)	Conditions du niveau 01 Minimiser les gains par la réduction de la surface des façades Est et Ouest	Conditions du niveau 02 Minimiser les gains par la réduction de la surface de la toiture
125	L	16.10	2.89
	l	3.96	2.89
	H	1.95	14.89
15625	L	88.51	14.33
	l	19.95	14.33
	H	9.75	74.46
64000	L	128.83	22.99
	l	31.74	22.99
	H	15.65	119.14
<i>Remarques</i>		L = 8.24 H L = 4.05 l Ce cas représente le parallélépipède « H ≤ L »	L = l H = 5.18 L = 5.18 l Ce cas s'applique sur les conditions de la tour « L ≤ H »

On remarque, d'après le tableau ci-dessus, que les conditions du niveau 01 dont les surfaces Est et Ouest sont exposées, nous conduisent à la forme d'un parallélépipède (**L = 8.24 H et L = 4.05 l**) ; par contre ceux du niveau 02 dont la toiture est exposées, nous amènes à la forme d'une tour (**L = l et H = 5.18 L**). Ce ci nous affirme que chaque géométrie doit avoir des caractéristiques spécifiques pour s'adapter aux conditions du climat et aux besoins thermiques des usagers.

6.6.1.2.5. Vérification des résultats :

On doit vérifier nos résultats on estimant les gains de chaleur sous l'effet du cumul durant les trois heures de la simulation tel que :

$$\text{A 10:00h : } \mathbf{G_1} = \frac{159.4}{L} + \frac{39}{l} + \frac{19.5}{H}$$

$$\text{A 12:00h : } \mathbf{G_2} = \frac{39}{L} + \frac{39}{l} + \frac{200.5}{H}$$

$$\text{A 16:00h : } \mathbf{G_3 = G_1} = \frac{159.4}{L} + \frac{39}{l} + \frac{19.5}{H}$$

$$\text{Alors : } \mathbf{G_g = G_2 + 2G_1} = \frac{357.8}{L} + \frac{117}{l} + \frac{239.5}{H}$$

Volumes(m3)	G_g (w/m3)	
	Condition du niveau 01	Condition du niveau 02
125	174.58	181.50
15625	36.43	37.93
64000	21.75	22.65

6.6.1.2.6. Conclusion :

D'après l'étude effectuée, ainsi que la vérification même des résultats, on a conclu que la forme parallélépipède est toujours la plus performante que la tour, pour un volume constant.

Les proportions optimums pour assurer la performance thermique de la forme (minimisation des gains de chaleur) sont :

- **Le parallélépipède : L = 8.24 H et L = 4.05 l**
- **La tour : L = l et H = 5.18 L**

Ces derniers, répandent aux attentes de la recherche et peuvent être adaptées par les concepteurs selon les raisons d'occupation du sol, d'organisation fonctionnelle et de l'aspect formel afin d'adapter les conditions du niveau 01 (le parallélépipède) ou ceux du niveau 02 (la tour), à condition que ces proportions soient utilisés avec des mesures de protection :

*** les conditions du niveau 01 :**

Ce cas présente l'avantage d'être protégé de la radiation solaire de l'Est et de l'Ouest par ces surfaces réduites, mais il présente l'inconvénient d'avoir une surface horizontale (toiture) très importante exposée aux rayons solaires les plus intenses.

Alors, cette surface doit être protégée pour s'assurer de la bonne qualité thermique de l'enveloppe.

*** les conditions du niveau 02 :**

Ce cas présente aussi l'avantage d'avoir une surface horizontale (toiture) très réduite, mais ; les surfaces Est et Ouest doivent être protégées des gains de chaleur dus aux rayons solaires horizontaux du matin ou du soir.

6.6.1.3. Étude de l'influence du supplément de température sur la performance thermique de la coupole :

L'étude de l'influence de la radiation solaire sur la performance thermique de la coupole est difficile, car il n'existe pas des données sur la quantité de l'énergie solaire reçue par les surfaces concaves, ceci on se referant aux documents bibliographiques existants et surtout celui de Michael Capderou « L'Atlas solaire de l'Algérie » en 1985.

Pour effectuer un tel travail, on a besoin de rapprocher les formes concaves de formes géométriques simples, la discrétisation et l'utilisation de la méthode des éléments finis. Comme on peut l'entamer par des méthodes graphiques ou la simulation par maquette. A ce titre, il faut citer la recherche faite par le laboratoire des énergies renouvelables (**unité de recherche à Batna**), dont l'objectif était d'assurer la poursuite de la trajectoire solaire, en utilisant un modèle de coupole couverte par des cellules photovoltaïques.

Ces derniers permettant le captage de la radiation solaire et la mesure de l'intensité suivant les étapes suivantes :

1. Le suivi de chaque élément de surface (1 cm^2) indépendamment.
2. Identification des coordonnées de chaque élément par la détermination des deux angles α et δ (horizontale et verticale).
3. La mesure de l'intensité de la radiation solaire pour chaque point et durant la journée du 21 Avril 1993 pour la station de Patras.

En fin, le résultat de l'étude était une optimisation du captage solaire par l'utilisation d'un panneau automatiquement mobile, selon la trajectoire du soleil.

A cet effet, il ressort qu'une étude de l'influence de la radiation solaire sur la coupole nécessite une recherche compliquée avec certaines méthodes plus poussées, qui dépassent l'objectif de la présente recherche. Mais, on peut se limiter aux résultats des chercheurs tel que Patrick Depecker, Jean Brau et autres, qui ont démontré que les surfaces concaves, à l'inverse des surfaces convexes, possèdent une bonne capacité de réflexion des radiations solaires reçues, qui peut atteindre **50%** du total reçu [M Traisnel & Al ; 1993].

7. Conclusion :

Au cours de l'analyse thermique, on peut tirer certaines conclusions qui peuvent se résumer en trois points, dont on peut affirmer que la performance thermique du bâtiment dépend en grande partie du choix de la forme par rapport aux conditions climatiques et les besoins thermiques du lieu. Ceci devrait se faire par l'étude, la comparaison et la corrélation entre l'aspect géométrique, le volume et les proportions de la forme avec la quantité des gains de chaleur relatives à ces derniers.

En premier lieu, et d'après l'étude des variations du coefficient de gains de chaleur par rapport à la géométrie, on a constaté que la coupole est l'élément géométrique le plus performant, car elle présente le plus d'espace avec le moins de surface extérieure ; mais, l'existence de cet élément dans l'architecture au *Souf* avec des dimensions réduites ne lui donnant pas une bonne qualité thermique

($R = 1.4$, $Cf = \frac{3}{R} \gg 1$). Le parallélépipède est plus performant que la tour et le cube, car il possède une surface d'emprise au sol très importante. Cette dernière lui permet de protéger une grande surface de son enveloppe du transfert de chaleur et c'est pour la même raison que le cube est plus performant que la tour.

En second lieu, l'analyse de l'influence du volume sur les besoins de la minimisation des gains de chaleur montre que l'augmentation du volume peut minimiser les gains jusqu'à **90%** ; c'est ainsi que l'habitat collectif est plus avantageux thermiquement que l'habitat individuel, et que la tour du YEMEN s'est montrée plus performante que les autres exemples étudiés à travers l'analyse morphologique.

En troisième lieu, l'étude de l'influence du supplément des gains dû à l'exposition des surfaces de l'enveloppe à la radiation solaire nous a permis la détermination des proportions favorables pour le parallélépipède et la tour, selon une orientation Est-ouest comme suit :

1/- **Le parallélépipède : L = 8.24 H & L = 4.05 l**

2/- **La tour : L = 1 & H = 5.18 L.**

Pour une utilisation normale de ces résultats (proportion, volume, géométrie) qui présente la morphologie du bâtiment. Certaines recommandations et mesures seront essentielles pour s'assurer du bon fonctionnement thermique de nos futurs bâtiments, une fois réalisés.

Dimension du modèle « 0 » de référence (m)	Volume (m ³)	Modèle « 0 » Le cube			Modèle « 1 » Le parallélépipède			Modèle « 2 » La tour			Modèle « 3 » La coupole		
		a (m)	S _{E0} (m ²)	Cf ₀	l ₁ (m)	S _{E1} (m ²)	Cf ₁	l ₂ (m)	S _{E2} (m ²)	Cf ₂	R (m)	S _{E3} (m ²)	Cf ₃
5	125	5	125	1	4.8	112.32	0.89	3.30	159.21	1.27	3.88	94.54	0.75
10	1000	10	800	0.5	9.6	449.28	0.44	6.60	638.77	0.63	7.77	379.14	0.37
15	3375	15	1125	0.33	14.42	1013.68	0.30	9.92	1438.7	0.42	11.66	853.8	0.25
20	8000	20	2000	0.25	19.22	1800.86	0.22	13.23	2558.9	0.31	15.54	1516.56	0.18
25	15625	25	3125	0.20	24.03	2815.02	0.18	16.54	3999.6	0.25	19.43	2370.85	0.15
30	27000	30	4500	0.16	28.84	4054.75	0.15	19.85	5760.60	0.21	23.32	3415.20	0.12
35	42875	35	6125	0.14	33.65	5520.07	0.12	23.16	7841.95	0.18	27.21	4649.61	0.10
40	64000	40	8000	0.12	38.45	2207.21	0.11	26.47	1024.66	0.16	31.09	6070.17	0.09

Tab 5.4: Tableau des les valeurs du coefficient de forme pour les quatre géométries avec une variation de huit volumes

1. Introduction :

« *L'analyse des facteurs d'économie d'énergie et de climatisation devrait prendre évidemment en compte la forme du bâtiment* » [J L Izard ; 1996].

Dans ce sens, notre recherche a pour objectif d'étudier le comportement thermique des différentes formes de construction dans les climats chauds et arides. Dans les chapitres précédents, nous avons abordé le problème d'inconfort, les besoins thermiques et les exigences nécessaires pour la construction.

L'analyse morphologique des anciens modèles de construction a un intérêt ; attribuer à l'enveloppe des bâtiments et à la façon dont elle était façonnée pour répondre aux exigences des différents facteurs climatiques en général et le soleil en particulier.

L'évaluation du comportement thermique des formes, sous les conditions climatiques des régions à climat chaud et aride, a été engagée dans l'objectif d'analyser l'influence de l'aspect morphologique sur la performance thermique des constructions et de déterminer les caractéristiques morphologiques (**géométrie, volume et proportions**) des formes adaptées aux conditions de telles régions.

Aussi, nous allons présenter les conclusions des différentes étapes de l'étude, qui ont abouti à ces résultats, et dégager les principales recommandations qui en découlent afin de limiter les gains de chaleur dans le bâtiment, et minimiser les surfaces en contact avec l'extérieur, par le choix des enveloppes du bâtiments les plus compactes possibles.

Ces résultats peuvent être utilisés dans nos futures constructions, pour l'amélioration de la qualité de l'espace habitable (confort) et la minimisation de la consommation de l'énergie par unité de volume habitable, mais, l'application de ces résultats n'offre pas obligatoirement une bonne protection contre la chaleur. Ceci est du principalement aux limites de l'étude et à la complexité de la notion de confort thermique.

2. Limites de l'étude :

Notre étude s'inscrit dans l'ensemble des recherches académiques qui tendent à l'amélioration du confort intérieur des bâtiments situés dans les régions à climat chaud et aride.

Nous avons essayé, dans les limites du champ d'investigation, de mettre en évidence les éléments morphologiques qui participent au contrôle du climat et à l'amélioration du confort thermique dans ces milieux. Et ce, dans une approche qualitative plutôt que quantitative, et par la même occasion, contribuer à l'acquisition des données, l'enrichissement des connaissances, la diversité des pratiques de la recherche (approche qualitative, approche quantitative) et l'évaluation du fonctionnement thermique des différentes formes de maison des milieux chauds et arides.

Les principaux résultats de l'analyse morphologique, ont été obtenus et confirmés par référence aux hypothèses relatives aux données climatiques extrêmes, aux modalités du calcul et à d'autres suppositions. Ceci réaffirme la fiabilité de nos résultats, qui garantissent et améliorent les résultats des recherches antérieures établies par ; V.Cupta 1986, J P Traisnel, 1987, Knowles R L, 1994, pour des régions dont les données climatiques sont proches de ceux de notre étude (les climats chauds et arides). Mais, les rapports de proportions déterminés à la fin de l'étude ne seront certaines que pour les conditions de base retenues. Ces proportions peuvent être déterminées pour chaque région à savoir l'altitude, les données climatiques et les caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction.

Enfin notre recherche ne peut à elle seule résoudre le problème de confort dans ces régions. Pour cela, on a besoin d'un processus de conception qui prendra en charge la mise en place de toutes solutions, de la forme aux composants constructifs, capables d'améliorer le confort intérieur par les moyens spécifiquement naturels.

L'intégration de ces résultats dans le processus de conception est une solution destinée à la fabrication de bâtiments qui consomment beaucoup moins d'énergie, tout en offrant un confort intérieur amélioré. Tout en suivant un modèle détaillé, les responsables de la conception des bâtiments ainsi que le propriétaire ou son représentant peuvent participer à une série d'ateliers qui mènent à la conception finale du nouveau projet. Les équipes qui participent aux ateliers doivent être accompagnées, selon les étapes de la conception, de spécialistes en bioclimatique, et ce, pour faire en sorte que l'équipe possède toute l'information nécessaire pour prendre les meilleures décisions [Karen Liu, Ph. D ; 2002].

3. Conclusion générale :

De part la recherche effectuée en vue d'examiner la relation entre la forme des constructions et les facteurs climatiques des régions chaudes et arides particulièrement les radiations solaires, l'optique générale de tout projet d'architecture doit intégrer le plus possible les éléments permettant à l'édifice projeté de se comporter de la manière la plus satisfaisante ou d'accéder à la meilleure performance, sans recourir systématiquement aux moyens de la climatisation mécanique -correction - après conception. Cela englobe donc aussi bien la morphologie que les composants constructifs. On peut attendre de cette démarche à la fois une plus grande qualité de l'architecture et de moindres coûts constructifs.

L'application de ce principe nécessite des investigations en amont du projet : il faut en effet être en mesure de prévoir ce que telle ou telle forme architecturale aura pour effet sur le comportement thermique global d'un édifice. Cela peut se faire par l'observation, la mesure ou la simulation de la réponse thermique des formes de bâtiments, dans les conditions d'un tel climat.

L'étude a commencé par l'identification précise des caractéristiques climatiques de ces régions avec la définition des sources d'inconfort et les phénomènes thermiques qui les régissent. Ceci, pour déterminer exactement les besoins en priorité et prévoir dans un stage primaire les solutions les plus fiables. A ce titre, il faut souligner que la problématique du confort d'été, et celle de l'architecture des climats chauds d'une manière générale est la minimisation des gains de chaleur à travers les parois de l'enveloppe des bâtiments. L'enjeu est à la fois d'ordre énergétique et architectural : d'une part la minimisation des surfaces exposées de l'enveloppe par les dispositions architecturales (**choix des formes**) peut minimiser le besoin de climatisation, et réduire une grande part de la dépense énergétique. D'autre part, Il est passionnant de reconstituer un savoir architectural sur la conception des formes adaptées aux climats chauds et arides [J.L.Izard ; 1999].

L'architecture vernaculaire peut nous fournir des exemples de maisons adaptées aux besoins thermiques de leur contexte, l'expérience génératrice des habitants nous a montré que le climat d'été pouvait être maîtrisé au moyen de la conception architecturale. Ceci peut être démontré par la mise en évidence des solutions architecturales - les leçons du passé- adaptées aux problèmes thermiques du climat chaud et aride.

L'analyse morphologique des trois formes de maisons traditionnelles nous a permis, par l'étude et la comparaison entre les facteurs d'évaluation (facteur de compacité, facteur visibilité du ciel S V F, le facteur de forme et autres), de déterminer l'influence des paramètres morphologiques de la

forme (volume, taille, géométrie) sur la performance thermique des édifices, du point de vue qualitatif et architectural. Parmi les principales conclusions tirées de cette recherche, citons :

- 1- le volume des maisons Yéménites offre d'avantage un facteur de forme appréciable, ce qui réduit la quantité des gains de chaleur par mètre cube d'espace habitable.
- 2- la morphologie des maisons Mozabites (parallélépipède) propose une plus grande surface d'emprise au sol, et réduit, par conséquent, la quantité des surfaces en contact avec l'extérieur.
- 3- La réduction de la surface de l'espace - cour, et l'utilisation d'une ouverture au plafond qui se ferme pendant les périodes de surchauffe (saisonniers ou journalières). est un procédé de protection du noyau central de l'intensité des radiations solaires. Cela peut nous inviter à la revalorisation de ce système et à l'amélioration de son fonctionnement thermique, par la sensibilisation des usagers vers la pratique de ces solutions [Madoui. M ; 2004].
- 4- Les formes concaves (coupoles) offrent des surfaces minimales avec des volumes importants, comme elles présentent une grande capacité de réflexion de la radiation solaire. Ces éléments peuvent être utilisés et développés par les concepteurs, en vue de leur qualité thermique.

Pour l'étude de la performance thermique des formes fondamentales définies par l'analyse morphologique et la validation des résultats de cette dernière, on a mis en place un modèle de calcul des gains de chaleur, en fonction de la forme globale du bâtiment (le coefficient de forme : **Cf**). La manipulation des caractéristiques morphologiques de la forme (volume, géométrie, dimensions) a permis la détermination de leur influence sur la performance thermique des constructions. La règle générale pour la minimisation des gains de chaleur est de concevoir des bâtiments dont le facteur de forme est d'autant minimal que possible. Ceci devrait se faire selon notre étude par :

1- L'augmentation du volume des bâtiments:

L'étude a démontré que la consommation d'énergie des tours d'habitation est moindre que celle des maisons individuelles. Ce fait est surprenant puisque les tours d'habitation ont de meilleurs rapports surface d'enveloppe au volume, et devraient donc utiliser moins d'énergie par unité de volume habitable. Cette diminution peut atteindre **-90%** en augmentant le volume à **64000m³**. (Voir Chap 5 : 6.4.3/ Interprétation des résultats)

2- Le choix de la géométrie :

Notre étude a permis aussi de classer les géométries analysées, en fonction de la valeur du coefficient de forme tels que :

- 1 - La coupole
- 2 - Le parallélépipède
- 3 - Le cube
- 4 - La tour

Le choix de la géométrie peut minimiser la valeur du « Cf » de **10% à 60%**, Comme il peut contribuer à la minimisation des gains de chaleur dans le bâtiment et l'amélioration des conditions du confort thermique en conséquence.

Ex : Pour $v=15625m^3$

La tour Cf= 0.25, Le parallélépipède Cf=0.18, on remarque que l'utilisation d'un parallélépipède réduit la valeur de **Cf** jusqu'à **28%**, par rapport à celle de la tour. Ceci influe en conséquence sur la valeur du coefficient de gains de chaleur « **G** », qui décroît de **4.87 w/m³**, cas de la tour à **3.51 w/m³** ; dans le cas du parallélépipède ce qui veut dire une minimisation totale de **28%** d'environ.

3- Les proportions favorables :

La minimisation des gains de chaleur dans le bâtiment, par la détermination des proportions favorables pour la performance thermique de la forme, est le résultat d'une optimisation de l'équation donnant la valeur de « **G** », par rapport aux trois variables **L (longueur)**, **l (largeur)**, **H (hauteur)**, qui définissent les proportions optimales de la forme performante tels que :

Le parallélépipède : $L = 8 * H$ & $L = 4 * l$

La tour : $L = l$ & $H = 5 * L$

Mais ; il faut ajouter que la façon la plus efficace pour le contrôle thermique dans le bâtiment est d'utiliser les moyens architecturaux: qui vont de la "forme globale" à l'utilisation des "systèmes passifs de climatisation"[J.O. Bradley ; 1995].

Notre problématique générale repose donc sur l'interaction entre ces deux types de moyens, qu'il faut analyser en même temps sous l'angle de la performance thermique et celui du coût global, le tout lié aux conditions climatiques et aux conditions économiques locales.

Enfin, Des études antérieures [Bernard Lorton & Al; 2005] ont démontré que, la "conception architecturale globale " pour le confort d'été des climats chauds englobe : la forme, la structure et les matériaux, les percements (dimension, type d'ouvrants et protection solaire), la présence du végétal, la forme des espaces extérieurs adjacents. D'autres paramètres participent à la performance : la ventilation, le mode d'occupation des locaux, et les systèmes passifs de climatisation (refroidissement évaporatif et par rayonnement) [J L Izard, Miller, & AL ; 1993].

4. Recommandations :

L'enveloppe du bâtiment est toujours considérée et conçue 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 du confort dans l'espace intérieur.

Dans les régions chaudes et arides le bon choix de l'enveloppe peut contribuer à la minimisation des gains de chaleur, l'efficacité des systèmes de refroidissement passif et une meilleure qualité du confort climatique. Il est donc nécessaire de chercher pour nos futures constructions : la forme, le volume, les dimensions, l'orientation, les couleurs et les matériaux qui s'adaptent aux besoins thermiques de ces régions.

D'après les résultats et les conclusions de notre étude, on peut émettre plusieurs recommandations :

- La compacité des tissus offre une bonne protection de l'enveloppe du bâtiment et le maximum de surfaces horizontales, verticales et sols ombragés. Ce concept d'usage ancien doit être nécessairement revalorisé.
- L'intégration du patio dans ce type de tissus permet la minimisation des surfaces en contact avec l'extérieur et l'amélioration de l'ambiance intérieure. Il doit avoir un ratio égal à **H/L = 2.5 et 4**, dont l'ouverture au ciel devrait être couverte [Madoui. M ; 2004].
- Pour les maisons individuelles ou les logements semi collectifs, il est recommandé, d'après nos résultats, de construire des parallélépipèdes allongés selon l'axe **Est- Ouest**, dont la longueur **L** est égale à quatre fois la largeur et huit fois la hauteur (**L = 8 * H & L = 4 * I**).
- Comme il est préférable d'effectuer la mitoyenneté sur les deux façades Est & Ouest, Ce qui pourra protéger ces surfaces de l'ensoleillement intense, surtout la façade Ouest.
- La toiture doit être protégée contre les rayons solaires les plus intenses en utilisant des toitures- jardin, des toits- parasol ou autres.
- Pour le cas des logements collectifs ou d'un équipement, il sera plus sensé de construire des tours avec un plan carré, dont la hauteur fait cinq fois la longueur ou la largeur (**L = I & H = 5 * L**).
- Dans ce type de construction, les surfaces **Est & Ouest** doivent être protégées en utilisant des systèmes passifs tels que le mur ventilé dont on a déjà parlé dans les chapitres précédents.

- Le dernier étage doit être aussi traité en particulier pour dégager le supplément de chaleur du à son exposition directe aux rayonnements intenses de midi.
- Il est aussi essentiel d'équiper ces bâtiments d'un système de refroidissement évaporatif comme les capteurs à vent, les cheminées solairesetc.
- Minimisation de la quantité de l'énergie absorbée en utilisant des couleurs claires à faible coefficient d'absorption « a ».
- Minimisation de la quantité de l'énergie transmise par conduction en construisant avec des matériaux de construction caractérisés par une bonne capacité thermique, ceci peut retarder le transfert de chaleur jusqu'à la nuit, d'où la ventilation nocturne pourra rafraîchir l'ambiance intérieure.
- Minimisation de la quantité de l'énergie transmise par rayonnement en minimisant les surfaces vitrées, de **10%** à **15%** de la surface totale des parois [Analyse Bioclimatique P G ; 2003].
- Il est toujours recommandé d'utiliser les moyens naturels qui peuvent améliorer le confort à l'intérieur comme à l'extérieur (le micro climat) tels la végétation et l'eau.

Nous pensons finalement que le bon choix de la forme peut participer à l'amélioration du confort intérieur et à l'enrichissement du cadre bâti, en donnant à chaque région son caractère régional propre, et en respectant avant tout les exigences physiques de l'utilisateur. Les autres facteurs déterminants de la forme peuvent être jumelés dans un esprit de complémentarité, ceci dans l'objectif majeur de Promouvoir une architecture durable du point de vue énergétique et humain.

5. Suggestions pour des travaux futurs :

Notre recherche a pour objectif d'étudier le comportement thermique des formes de construction dans les régions à climat chaud et aride, afin de déterminer l'influence de la forme sur la performance thermique des bâtiments et de définir les caractéristiques morphologiques des formes adaptées aux exigences thermiques de ces régions.

Les conclusions dégagées à la fin de la recherche ont permis l'élaboration des recommandations correspondantes au bon fonctionnement de nos futurs bâtiments pour les conditions de référence adoptées au modèle de calcul.

Pour l'approfondissement et le développement de ce sujet, notre étude doit être traitée par des travaux futurs dont on citera :

- l'enrichissement du corpus de l'analyse morphologique par l'étude de plusieurs exemples de maison dans les climats chauds et arides et l'identification des caractéristiques typologiques des constructions en milieux arides.
- La comparaison entre les différentes formes a été faite sur la base d'une estimation de la quantité des gains de chaleur par le moyen de calcul. Pour la confirmation de ces résultats, des mesures sur terrain doivent être effectuées avec l'usage des modèles réels, afin de déterminer avec plus de précision l'influence du choix de la forme sur l'ambiance intérieure et les paramètres du confort thermique.
- Le modèle de simulation par calcul des gains de chaleur, doit être développé sous forme d'un programme informatique (logiciel) pour permettre l'usage général de ce programme comme outil de simulation de la forme sous différents climats.
- Les résultats du programme d'évaluation des gains et l'optimisation de la performance doivent contribuer à une nouvelle élaboration des normes et recommandations de constructions, en relation avec le climat et les besoins thermiques des différentes régions.

En fin, la présente étude doit se compléter par l'analyse de l'influence des autres facteurs climatiques sur la forme des constructions et l'évaluation de leur importance dans la détermination des caractéristiques morphologiques des constructions, ceci pourra nous informer sur la dominance du climat dans la détermination de la forme des constructions dans les climats rigoureux (chauds et arides).

SOMMAIRE

INTRODUCTION :

- **Introduction**
- **Problématique**
- **Structure de la recherche**

CHAPITRE 01 :

Le Climat et Le Confort Thermique

1. Le Climat
2. Les climats chauds et arides
 - 2.1. Indice d'aridité
3. Les caractéristiques des paramètres climatiques (Cas des climats chauds et arides)
 - 3.1. Le rayonnement solaire.
 - 3.2. La température de l'air.
 - 3.3. Les vents.
 - 3.4. L'humidité.
 - 3.5. Les précipitations.
4. Conclusion
5. Le confort thermique
6. Les paramètres optimaux du confort thermique.
 - 6.1. Température de l'air intérieure et des parois (radiante).
 - 6.2. La radiation solaire.
 - 6.3. L'humidité.
 - 6.4. La vitesse de l'air.
7. L'équilibre thermique.
 - 7.1. Métabolisme énergétique.
8. Les échanges thermiques avec l'environnement.
 - 8.1. Echange thermique par conduction.
 - 8.2. Echange thermique par rayonnement.
 - 8.3. Echange thermique par convection.
 - 8.4. Echange thermique par évaporation.
 - 8.5. Conclusion
9. Evaluation du confort thermique :
 - 9.1. Les méthodes Evaluation du confort et la détermination des besoins :
 - 9.1.1. La température résultante :
 - 9.1.2. Méthode des diagrammes psychométriques :
 - 9.1.3. Méthode des tables de Mahoney
 - 9.1.4. La méthode des indices PMV et PPD
 - Le vote moyen prévisible "PMV" :
 - Pourcentage prévisible d'insatisfaits
10. Conclusion.

CHAPITRE 02 :

Le Confort Dans Une Région Chaude (Confort D'été)

1. introduction
2. les mesures de la protection solaire
 - 2.1. Limiter les gains de chaleur à travers les parois opaques
 - 2.1.1. Protection de la toiture
 - 2.1.1.1. Les toitures jardins
 - 2.1.1.2. Les toits parasol
 - 2.1.2. Protection des parois verticales
 - 2.2. Limiter les gains de chaleur à travers les parois vitrées
 - 2.3. Utilisation raisonnée de l'inertie thermique.
3. les mesures du refroidissement passif
 - 3.1. La ventilation nocturne
 - 3.2. Le refroidissement évaporatif
 - 3.3. Les capteurs a vent
 - 3.4. La cheminée solaire
 - 3.5. Puits provençal
4. Conclusion.

CHAPITRE 03 :

Echanges De Chaleur Et Exigences Thermiques

1. Introduction
2. Les phénomènes thermiques dans le bâtiment
3. Transfert de chaleur
 - 3.1. Transfert de chaleur par conduction
 - 3.1.1. La conductivité thermique
 - 3.1.2. La conduction
 - 3.1.3. La résistance d'un matériau
 - 3.1.4. La résistance d'une surface
 - 3.1.5. Coefficient de transmission
 - 3.2. Conduction thermique à travers une paroi sous l'ombre
 - 3.3. Conduction thermique à travers une paroi ensoleillée
 - 3.3.1. La température équivalente
 - 3.4. Transfert de chaleur par rayonnement
 - 3.4.1. Rayonnement solaire incident sur une paroi opaque
 - 3.4.2. Rayonnement solaire incident sur une paroi vitrée
 - A- Baie vitrée exposée au soleil
 - B- Baie vitrée à l'ombre
 - * **cas d'une baie ouverte**
 - * **cas d'une baie fermée**
 - 3.4.3. Puissance du rayonnement solaire en été
 - 3.4.4. Coefficient d'absorption
 - 3.4.5. L'influence de la saison
 - 3.5. Transfert de chaleur par renouvellement d'air (ventilation)
 - 3.5.1. Le débit spécifique

- 3.5.2. Le débit supplémentaire
- 4. Le comportement d'une enveloppe de bâtiment en été
 - 4.1. Les gains de chaleur a travers les parois opaques
 - 4.1.1. L'effet des caractéristiques thermo physiques des matériaux de construction de l'enveloppe. (La quantité de chaleur transmise)
 - 4.1.2. L'effet de La couleur de l'enveloppe. (La quantité d'énergie solaire absorbée)
 - 4.1.3. L'effet de la température équivalent (La quantité d'énergie solaire reçue)
 - 4.2. Les gains de chaleur à travers les parois vitrées
 - 4.3. Les gains de chaleur par renouvellement d'air (ventilation)
 - 4.4. Les gains internes
- 5. Estimation des besoins thermiques et les mesures de la réduction des gains
- 6. Conclusion

CHAPITRE 04 :

La Forme Du Bâtiment Dans Les Climats Chauds Et Arides

- 1. Introduction.
- 2. L'impact du climat sur la forme des maisons.
- 3. La forme des bâtiments dans les climats chauds et arides
- 4. L'analyse morphologique
 - 4.1. Hypothèses de travail
 - 4.2. Etapes de l'analyse
- 5. Schéma de la méthode d'investigation
- 6. Choix d'échantillons (exemples)
- 7. Echantillon 01 : La maison a cour du M'Zab
 - 7.1. Motivation du choix de l'échantillon
 - 7.2. Description de l'échantillon
 - 7.3. Situation de l'échantillon
 - 7.4. Analyse morphologique
 - 7.4.1. Le plan de masse
 - 7.4.2. L'enveloppe
 - 7.4.3. L'orientation
 - 7.4.4. Les ouvertures
- 8. échantillon 02 : La tour de Sanaa
 - 8.1. Motivation du choix de l'échantillon
 - 8.2. Description de l'échantillon
 - 8.3. Situation de l'échantillon
 - 8.4. Analyse morphologique
 - 8.4.1. Le plan de masse
 - 8.4.2. L'enveloppe
 - 8.4.3. L'orientation
 - 8.4.4. Les ouvertures
- 9. Echantillon 03 : La maison en coupoles du Souf
 - 9.1. Motivation du choix de l'échantillon
 - 9.2. Description de l'échantillon

- 9.3. Situation de l'échantillon
- 9.4. Analyse morphologique
 - 9.4.1. Le plan de masse
 - 9.4.2. L'enveloppe
 - 9.4.3. L'orientation
 - 9.4.4. Les ouvertures
- 10. Classification typo morphologique
- 11. Conclusion

CHAPITRE 05 :

Analyse de La Performance Thermique de La Forme

- 1. Introduction
- 2. La Performance thermique de la forme des bâtiments
 - 2.1. Effet de la forme géométrique et des dimensions
 - 2.2. Effet de l'orientation
- 3. Objectif de la simulation
- 4. Méthodes de simulation et choix du modèle
 - 4.1. Jean Michel Bloch Laine 1979
 - 4.2. Martin Evans 1979
 - 4.3. V Gupta 1986
 - 4.4. J Luis Izard et Pierre André Bernard, 1987
 - 4.5. Knowles Ralph. L, 1994
- 5. Esquisse du modèle de la simulation
 - 5.1. Les gains de chaleur par rayonnement (surfaces vitrées)
 - Hypothèse 01
 - 5.2. Les gains de chaleur par conduction
 - 5.2.1. Le coefficient de transmission thermique K
 - Hypothèse 02
 - 5.2.2. L'effet du graduant thermique (ti -te)
 - 5.2.3. L'effet du supplément de température
 - 5.3. Les niveaux de simulation
 - Hypothèse 03
- 6. Application de la simulation
 - 6.1. Conditions de simulation (les invariants)
 - 6.1.1. Caractéristiques thermo physiques et données climatiques
 - 6.2. Les variables de la simulation
 - 6.2.1. La géométrie et le volume
 - 6.2.2. Les dimensions
 - 6.2.3. Les caractéristiques morphologiques
 - 6.3. Etude de l'influence de la géométrie et du volume
 - 6.3.1. Etude de l'influence du volume sur le facteur de forme pour les quatre géométries
 - 6.3.1.1. Le cube « Modèle 0 »
 - 6.3.1.2. Le parallélépipède « Modèle 1 »
 - 6.3.1.3. La tour « Modèle 2 »

6.3.1.4. La coupole « Modèle 3 »

6.3.2. Etude de l'influence de la géométrie sur le facteur de forme pour divers volumes à valeur constante (08 valeurs)

6.3.3. Interprétation des résultats

6.4.1. Etude de l'influence du volume sur le facteur de gains « G » des quatre morphologies

6.4.1.1. Le cube « Modèle 0 »

6.4.1.2. Le parallélépipède « Modèle 1 »

6.4.1.3. La tour « Modèle 2 »

6.4.1.4. La coupole « Modèle 3 »

6.4.2. Etude de l'influence de la géométrie sur le facteur de gains « G » pour divers volumes à valeur constante (08 valeurs)

6.4.3. Interprétation des résultats

6.5. Conclusion

6.6. Etude de l'influence du supplément de température (Tsa) :

6.6.1. Application de la simulation :

6.6.1.1. Étude de l'influence du supplément de température sur la performance thermique du Cube

6.6.1.2. Étude de l'influence du supplément de température sur la performance thermique du parallélépipède et de la tour :

6.6.1.2.1. Résolution des problèmes d'optimisation non linéaires avec contrainte

- Conditions nécessaires d'optimalité
- Théorème
- Remarque
- Condition suffisante d'optimalité (points cols)
- Définition
- Théorème
- Exemple

6.6.1.2.2. Solution des conditions du niveau 01

6.6.1.2.3. Solution des conditions du niveau 02

6.6.1.2.4. Applications numériques

6.6.1.2.5. Vérification des résultats

6.6.1.2.6. Conclusion

- Les conditions du niveau 01
- Les conditions du niveau 02

6.6.1.3. Étude de l'influence du supplément de température sur la performance thermique de la coupole

7. Conclusion

CHAPITRE 06 :

Conclusions et Recommandations

1. Introduction
2. Limites de l'étude
3. Conclusion générale
4. Recommandations et mesures essentielles d'amélioration de la performance
5. Suggestions pour des travaux futurs

- **Annexe**
- **Bibliographie**

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 01 :

Fig. 1.1: Carte du monde LES CLIMATS

Fig. 1.2 : Les différents types de radiations solaires affectant la terre

Fig. 1.3 : Intensité de la radiation solaire incidente sur un plan horizontal / mois de juillet – Ouargla-

Fig. 1.4 : Diagramme psychrométrique montrant l'importance de l'humidité dans la détermination des limites et zones de Confort thermique

Fig. 1.5 : Les courbes de D.P. WYON

Fig. 1.6 : L'évolution de la hauteur du soleil et des températures moyennes étant périodique, avec un retard qui s'appelle le déphasage.

Fig. 1.7 : Les trois composants du rayonnement solaire global

Fig. 1.8 : Le rayonnement direct et diffusé au cour d'une journée claire et d'une journée nuageuse

Fig. 1.9 : L'échange de chaleur entre le corps et l'environnement

Fig. 1.10 : Balance thermique du corps humain

Fig. 1.11 : Diagramme de la température résultante

Fig. 1.12 : Diagramme bioclimatique et les zones d'influence des paramètres climatiques

CHAPITRE 02 :

Fig. 2.1 : Effet du soleil sur l'enveloppe du bâtiment

Fig. 2.2 : Intensité de la radiation solaire reçue par les surfaces de l'enveloppe

Fig. 2.3 : Système de toiture à revêtement protégé avec toiture jardin

Fig. 2.4 : Système de toiture parasol – projet Arcelor House Bruxelles-

Fig. 2.5 : Système de toiture parasol. Projet Collège Guy Dolmaire, Mirecourt

Fig. 2.6 : Système mur ventilé de l'espace brasserie a Malte

Fig. 2.7 : Effet de l'orientation de l'ouverture sur la température intérieure

Fig. 2.8 : Vue sur ksar au Sud du Maroc

Fig. 2.9 : Effet de l'inertie thermique en été.

Fig. 2.10 : Système traditionnel de ventilation transversale

Fig. 2.11 : La rose des vents adaptée aux régions chaudes

Fig. 2.12 : Configurations de ventilation naturelle

Fig. 2.13 : Moyens disponibles pour refroidir les derniers étages.

Fig. 2.14 : Système traditionnel de refroidissement évaporatif

Fig. 2.15 : dispositifs de refroidissement évaporatif a droite système

Fig. 2.16 : Tours aéroréfrigérantes

Fig. 2.17: Système de refroidissement d'air chaud à voie humide

Fig. 2.18 : Cheminée de ventilation multidirectionnelle

Fig. 2.19 : Cheminée solaire pour le projet à Montréal, Québec

Fig. 2.20 : Puits provençal ou canadien

CHAPITRE 03 :

Fig. 3.1 : Les échanges thermiques de chaleur dans le bâtiment en situation d'été

Fig. 3.2 : La conduction thermique à travers les composant du mur

Fig. 3.3 : coefficient de transmission de chaleur à travers l'enveloppe

Fig. 3.4 : Energie reçue par des surfaces de différentes orientations

Fig. 3.5 : Relation entre l'intensité de la radiation solaire et l'altitude du soleil

Fig. 3.6 : Influence de l'épiderme sur l'absorption du rayonnement solaire.

Fig. 3.7 : Schémas représentant la transmission des flux de chaleur par conduction à travers les parois opaques (murs)

Fig. 3.8 : Effet de la couleur du toit plat sur les températures intérieures

Fig. 3.9 : Schémas représentant la transmission des flux de chaleur par conduction et rayonnement à travers les parois opaques (toiture)

Fig. 3.10 : Variation de l'intensité de la radiation solaire reçue par des surfaces inclinées de différentes orientations

Fig. 3.11 : L'impact de la température équivalente sur les températures de surfaces a New York le 21 juillet

Fig. 3.12 : L'absorption, la réflexion et la transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire.

CHAPITRE 04 :

Fig. 4.1 : La densification des unités pour crée un volume compacte

Fig. 4.2 : Maison séminole Floride, 9*16 pieds

Fig. 4.3 : Compacité des habitations au Sud Ouest des Etat unis

Fig. 4.4 : Maison sibérienne faite de bois et de terre

Fig. 4.5 : Effet du vent sur l'Igloo

Fig. 4.6 : Tepee des Indiens avec des languettes pour le contrôle du vent

Fig. 4.7 : La densification de la compacité par l'association des formes

Fig. 4.8 : Vue générale sur la vallée du M'Zab

Fig. 4.9 : Plans RDC, l'étage et de la terrasse, coupe AA et façade Ouest

Fig. 4.10 : Plan de masse « BOUNOURA »

Fig. 4.11 : Axonométrie de la maison

Fig. 4.12 : Schéma montrant L'orientation de la maison

Fig. 4.13 : Rapport des surfaces exposées aux surfaces protégées de l'enveloppe

Fig. 4.14 : La zone d'ensoleillement de la façade Ouest latitude 32° ,30 " Nord

Fig. 4.15 : Etude de l'ensoleillement de la façade Ouest

Fig. 4.16 : Etude de l'ensoleillement de la terrasse

Fig. 4.17 : Coupe schématique sur le vide – cour et vue sur « CHEBEK »

Fig. 4.18 : Vue intérieure sur le vide « COUR », l'espace le plus éclairé.

Fig. 4.19 : Situation de la ville de Sanaa

Fig. 4.20 : Plans RDC, étage et de la terrasse

Fig. 4.21 : Le plan de masse du KSAR, coupe schématique Sur la rue.
Fig. 4.22 : Axonométrie de la tour
Fig. 4.23 : Schémas d'orientation de la tour
Fig. 4.24: Rapport des surfaces exposées aux surfaces protégées de l'enveloppe
Fig. 4.25: La zone d'ensoleillement des façades Sud ouest et Nord
Fig. 4.26 : Etude de l'ensoleillement des façades Nord est, et la Toiture
Fig. 4.27 : Etude de l'ensoleillement des façades Sud ouest et la Toiture
Fig. 4.28 : Etude de l'ensoleillement des façades Sud ouest et la Toiture
Fig. 4.29 : Coupe sur la fenêtre de la tour « le Yémen »
Fig. 4.30: Vue générale sur la ville de Oued Souf
Fig. 4.31 : Situation de oued Souf et de Ghardaïa dans le sud Algérien
Fig. 4.32: Plans RDC, terrasse en haut, coupe et façade en bas
Fig. 4.33 : Plan de masse TAGHZOUT
Fig. 4.34 : Coupe sur la rue
Fig. 4.35 : Axonométrie de la maison du Souf
Fig. 4.36 : Schémas de l'orientation de la maison
Fig. 4.37: Rapport des surfaces exposées aux surfaces protégées de l'enveloppe
Fig. 4.38 : La zone d'ensoleillement de la façade Ouest
Fig. 4.39 : Etude de l'ensoleillement de la façade ouest et de la cour
Fig. 4.40 : Etude de l'ensoleillement de la façade ouest et de la cour
Fig. 4.41 : Etude de l'ensoleillement de la façade ouest et de la cour
Fig. 4.42 : Coupe montrant l'importance des dimensions de la cour

CHAPITRE 05 :

Fig. 5.1: Densification de la compacité et minimisation des surfaces exposées
Fig. 5.2 : Maison séminole Floride, 30*53 m
Fig. 5.3 : Variation des besoins en chauffage pour un même volume selon la forme du bâtiment
Fig. 5.4 : Typologie des modèles générés par les 8 modules cubiques de 5.4m de coté utilisés par l'INSA de Lyon.
Fig. 5.5 : Formes proposées selon les résultats de l'étude de la performance
Fig. 5.6 : Les trois types (le pavillon, Le parallélépipède, la cour)
Fig. 5.7 : Méthode du coefficient d'efficacité
Fig. 5.8 : La valeur approximative 0.33 du Coefficient de bonne orientation
Fig. 5.9 : Approximation de l'enveloppe pure d'un même volume

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 01 :

Tab. 1.1 : Indice d'aridité selon Koppen. P

Tab. 1.2 : Pourcentage du rayonnement intercepté par une paroi selon l'angle d'incidence

Tab. 1.3 : Paramètres ayant de l'influence sur la sensation de confort thermique

Tab. 1.4 : L'effet du vent sur le confort thermique de l'individu.

Tab. 1.5 : Niveau de métabolisme pour diverses activités en (Kcal/h).

Tab. 1.6 : Bilan thermique du corps humain

Tab. 1.7 : L'échelle des réponses demandées aux sujets.

CHAPITRE 02 :

Tab. 2.1 : Éléments additionnels typiques des toitures jardins

Tab. 2.2 : Gains de chaleur par divers types de verres

Tab. 2.3 : inertie thermique selon le rapport (masse totale / surface habitable)

Tab. 2.4 : Les moyens de la réduction des gains, la minimisation des besoins

CHAPITRE 03 :

Tab 3.1 : Consommation d'énergie électrique pour la climatisation des édifices

Tab 3.2 : Valeurs du coefficient d'échange superficiel

Tab 3.3 : Facteur d'absorption de différentes couleurs (en %)

Tab3.4 : Elévation maximale de la température d'un mur due à la radiation

CHAPITRE 04 :

Tab. 4.1: Etude comparative de l'influence du climat sur la forme

Tab. 4.2: Rapport des surfaces des parois a la surface totale de l'enveloppe

Tab. 4.3: Rapport des surfaces ensoleillées a la surface de la façade ouest

Tab. 4.4: rapport des surfaces ensoleillées a la surface de la toiture

Tab. 4.5: Analyse Morphologique - Maison introvertie le M'Zab

Tab. 4.6: Rapport des surfaces des parois a la surface totale de l'enveloppe

Tab. 4.7: Rapport des surfaces ensoleillées à la surface de la façade Nord- est

Tab. 4.8: Rapport des surfaces ensoleillées a la surface de la façade Sud- ouest

Tab. 4.9: Rapport des surfaces ensoleillées a la surface de la toiture

Tab. 4.10 : Analyse Morphologique - Maison extravertie le Yémen

Tab. 4.11:Rapport des surfaces des parois a la surface totale de l'enveloppe

Tab. 4.12:Rapport des surfaces ensoleillées a la surface de la façade Ouest

Tab. 4.13 : Analyse Morphologique - Maison introvertie L'oued

Tab. 4.14 : Tableau récapitulatif [classification morphologique]

CHAPITRE 05 :

Tab. 5.1: Besoins recherchés pour la minimisation des gains de chaleur

Tab. 5.2: Résumé des besoins pour les formes de maisons, climat chaud et aride

Tab. 5.3: Caractéristiques géométriques des trois types (le pavillon, le parallélépipède, la cour)

Tab. 5.4: Tableau des valeurs du coefficient de forme pour les quatre géométries avec une variation de huit volumes

