

# Climat & Urbanisme

La relation entre le confort thermique  
et la forme du cadre bâti

## Mots Clefs (CNUEH<sup>1</sup> Thesaurus)

Afrique du Nord	Isolation thermique
Aménagement urbain	Maroc
Applications informatiques	Microclimats
Architecture urbaine	Matériaux de construction
Bâtiments	Panneaux de construction
Climat	Planification des établissements humains
Climat intérieur	Quartiers
Climat urbain	Recherche sur la construction
Conception	Règlements de la construction
Coopération technique	Règlements d'urbanisme
Economies d'énergie	Transfert de technologie
Environnement bâti	Zones urbanisées
Essai	
Etudes de pré-investissement	

<sup>1</sup> Centre des Nations Unies pour les Etablissements Humains (ONU-Habitat)

ISSN 1404-286X

ISBN 91-87866-22-6

ISRN LUHDM-R--8--SE

© 2003, Housing Development & Management (HDM) et  
Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE)

Ce rapport a été publié avec la participation économique de l'Asdi (Agence suédoise de coopération internationale au développement) et de l'Université de Lund. Le contenu et les idées exprimées dans ce rapport n'engagent que les auteurs et ne reflètent pas nécessairement la manière de penser de l'Asdi.



Mise en page : Jan-Anders Mattsson, HDM  
Traduction des parties suédoises : Franska Gruppen, Malmö, Suède  
Illustrations : Mattias Rückert

Imprimerie : Combi-Grafik, Lund, 2003  
Imprimé en Suède

Cette publication peut être commandée à  
HDM

Box 118	Tél.	+46-46 222 97 61
SE-211 00 LUND	Fax	+46-46 222 81 81
Suède	E-mail	hdm@lth.se

# Climat & Urbanisme

La relation entre le confort thermique  
et la forme du cadre bâti

*Karin Grundström*

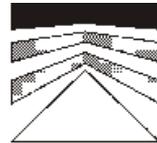
*Erik Johansson*

*Mohamed Mraissi*

*Djamel Ouahrani*



LUND UNIVERSITY  
Housing Development & Management



Laboratoire Public  
d'Essais et d'Etudes



# Avant propos

Le droit à l'environnement sain et sûr est l'une des préoccupations auxquelles les pouvoirs Publics au Maroc ne cessent de déployer tous les efforts en vue de garantir à chaque citoyen un logement et un environnement à la hauteur de ses espoirs et ces prétentions. Pour cela, les villes et les agglomérations sont depuis toujours des lieux stratégiques pour le développement durable parce que, concentrant désormais la plus grande partie de la population et de l'activité économique.

Cependant, ces localités connaissent de plus en plus des problèmes aigus d'environnement de consommation d'espaces et d'énergie. La dimension urbaine du développement durable se présente sous deux aspects essentiels : d'un côté par la contribution des villes à la durabilité de l'environnement par la préservation des ressources naturelles, la création d'un environnement bâti sain et sûr et de l'autre côté par la nécessité de conduire au sein de chaque agglomération une démarche de développement équilibré du point de vue économique, social et écologique.

La protection de l'environnement et le développement durable ; la préservation du patrimoine naturel et bâti ; le développement local et régional, tant d'aspect et de facteurs qui sont à prendre en compte dans toute démarche visant le confort du citoyen. Il ne faut pas non plus négliger les contraintes tant écologiques et naturelles que financières et sociales dans cette recherche.

C'est avec le souci de rechercher une meilleure adaptation entre l'environnement bâti marocain et les contraintes climatiques que ce projet de coopération entre le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes et le Housing Développement & Management de l'Université de Lund a été menée, Il vise avant tout à mener une réflexion sur les aspects liés à l'urbanisme, à l'habitat traditionnel et moderne, au confort, à la consommation d'énergie, aux matériaux de construction. Tous ces aspects aussi « hétérogènes » ont conféré à ce projet une attention particulière car il a permis d'éclairer un concept très peu abordé dans l'étude des bâtiments et des agglomérations à différents niveaux : celui du confort thermique au niveau urbain, au niveau quartier, au niveau bâtiment et au niveau matériau.

Le Maroc est certes confronté à un problème de production de logements, mais cette contrainte ne doit pas nous fermer les yeux sur la qualité de nos bâtiments, de nos quartiers et de nos villes car les bâtiments que nous construisons aujourd'hui sont destinés à nous loger et à loger nos enfants et les enfants de nos enfants.

# Remerciements

Ce rapport est l'aboutissement d'une coopération de recherche entre le LPEE et l'Université de Lund au cours de la période 1997 à 2002. Durant cette période, de nombreuses personnes nous ont apporté leurs précieux conseils et leurs connaissances et nous tenons ici à les remercier.

Nous citerons, tout d'abord, les participants aux tables rondes tenues au cours du projet et qui, à ces occasions, nous ont fait part de leurs avis qui nous ont été d'une aide précieuse et ont largement contribué à la réalisation de ce rapport, qu'il s'agisse des représentants des pouvoirs publics ou des chercheurs et des consultants.

Le personnel technique du LPEE qui a participé activement à la réalisation du projet, principalement en ce qui concerne leur engagement dans les relevés climatiques à Fès.

Nous tenons également à remercier les familles des quartiers Seffarine et Adarissa de Fès qui nous ont permis d'installer les instruments de mesure.

Enfin, nous voulons remercier la société Tepro Byggmaterial AB pour leur concours et leurs conseils apportés lors des essais de fabrication des panneaux en laine de bois à partir de matières premières marocaines.

*Les rédacteurs*

# Table des matières

Résumé	11
Summary	13
Introduction	15
L'objectif du projet	17
Réalisation du projet	18
Présentation des chapitres	20
Les participants au projet	23
Coopération technique financée par contrat	23
LPEE	24
HDM	25
Asdi	27
<u>Chapitre 1</u> L'habitat au Maroc	31
La situation du logement	31
Le secteur du logement	31
La politique du logement	32
La législation	33
La typologie de l'habitat	34
Les modes de construction	35
<u>Chapitre 2</u> Climat au Maroc et confort thermique	37
Le climat au Maroc	37
Le climat à Fès	39
Le climat à Ouarzazate	41
Climat urbain	42
Les caractéristiques du climat urbain	42
Confort thermique	44
Influence du climat sur le confort thermique	44
Définition des zones de confort	46
Le confort thermique urbain à Fès	47
<u>Chapitre 3</u> Urbanisme adapté au climat	49
La ville de Fès	50
Quartier Seffarine – Médina	50
L'espace urbain – rues et places	51
Typologie	52

Les points de mesure	53
Quartier Adarissa – Nouvelle Ville	54
L'espace urbain – rues et places	54
Typologie	55
Les points de mesure	55
Conclusion des quartiers étudiés	56
Mesures du climat urbain a Fès	58
Procédure de mesures	58
Equipement de mesure	58
L'emplacement de l'équipement de mesure	59
Etude comparative du climat urbain des deux quartiers	59
Variations climatiques au cours de l'année étudiée	59
Comparaison entre la période d'hiver et d'été	60
Confort thermique à l'extérieur	67
Conclusion	69
Etudes et simulations du climat urbain	71
Le modèle CTTC	71
Calcul de la longueur de l'ombre	74
Conclusion	77
Conception urbaine adaptée au climat	78
Recommandations au niveau Quartier	80
Recommandations au niveau du canyon urbain	82
Recommandations au niveau Bâtiment	87
Conclusion	90
<b>Chapitre 4</b> Vers une réglementation thermique	91
Comparaison des différentes réglementations internationales	91
Réglementation française	91
Réglementation algérienne	92
Réglementation libanaise	92
Réglementation américaine	93
Réglementation suédoise	93
Réglementation britannique	94
Conclusion	94
Découpage du Maroc en zones climatiques	94
Zonage climatique d'hiver	94
Zonage climatique d'été	96
Validation du découpage climatique	97
Conclusion	100
Exigences thermiques pour la région de Fès	100
Methodologie d'approche	100
Résultats du processus d'optimisation	104
Conclusion	113

---

<u>Chapitre 5</u> Proposition de matériaux isolants	115
Inventaire des matériaux isolants disponibles au Maroc	115
Etude de panneaux de laine de bois	116
Types de produits	117
Caractéristiques techniques	117
Etude de faisabilité	119
Proposition d'utilisation au Maroc	122
Stratégie de commercialisation des panneaux de laine de bois	124
Application au laboratoire LPEE à Ouarzazate	134
La conception originale du bâtiment	134
Amélioration virtuelle du climat intérieur du bâtiment	135
Instrumentation du Laboratoire	139
Le climat intérieur mesuré	140
Etudes de performance des différents éléments de conception	141
Conclusion	144
Conclusions	145
Urbanisme adapté au climat	145
Vers une réglementation thermique	147
Proposition de matériaux isolants	148
Etudes futures	148
Bibliographie	151



# Résumé

La géométrie du tissu urbain a une grande influence sur le microclimat et influence donc le confort thermique extérieur des habitants et, le microclimat urbain influence à son tour indirectement le climat intérieur. Une mauvaise adaptation climatique des environnements urbains a souvent pour conséquence l'utilisation d'une climatisation active et ainsi une augmentation de la consommation d'énergie.

Ce projet réalisé en collaboration entre le Laboratoire Public d'Essais et d'Etude (LPEE) au Maroc et le département de Housing Development & Management de l'Université de Lund en Suède, traite de la conception urbaine adaptée à un climat chaud et sec et comprend trois volets principaux.

Le volet *Urbanisme adapté au climat* traite de l'étude du climat de la ville de Fès, d'une part dans un quartier traditionnel au tissu urbain très dense dans la médina et, d'autre part dans un quartier relativement nouveau à faible occupation du sol. Les températures dans le quartier traditionnel étaient jusqu'à 10°C plus basses que dans le quartier moderne, et ceci, aussi bien en été qu'en hiver. Cette importante différence est due au fait que le quartier traditionnel est moins exposé au rayonnement solaire. En ce qui concerne le confort extérieur, le quartier traditionnel à forte occupation du sol est en principe confortable en été, tandis que dans le quartier moderne, les températures se situent bien au-delà de la zone de confort. Par contre, durant la période d'hiver, le quartier moderne est plus confortable, essentiellement en raison des possibilités d'ensoleillement.

Cette étude démontre qu'un tissu urbain plus dense que celui prévu dans les plans d'urbanisme d'aujourd'hui est nécessaire pour améliorer le confort en milieu urbain. Les simulations effectuées indiquent que pour obtenir un effet positif en été, le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur des rues (H/L) doit être au moins de 2. Afin de ménager des voies d'accès pour les véhicules, nous proposons dans ce rapport de prévoir des canyons de rues ayant un rapport H/L se situant entre 0,7 et 2 ; les rues plus larges étant bordées d'arbres et les constructions munies d'arcades pour ombrager le sol et protéger les piétons du soleil.

Dans le volet *Vers une réglementation thermique*, une délimitation préliminaire en zones climatiques du Maroc a été effectuée. Nous avons utilisé une méthode de simulation sur ordinateur du climat intérieur et de la consommation d'énergie afin d'étudier les exigences requises en performance thermique pour certains éléments de construction dans la zone climatique de Fès. Les principales exigences proposées sont un coefficient de transmission surfacique (U) se situant entre 1 et 1,25 W/m<sup>2</sup>.K pour les toitures et entre 1 et 1,5 W/m<sup>2</sup>.K pour les murs ainsi qu'un pourcentage de vitrage d'environ 15% pour les fenêtres orientées au Sud. Dans le cas d'un bâtiment à climatisation active, cette concep-

tion permet d'atteindre une économie d'énergie de 20 à 30% par rapport à un cas de bâtiment non isolé.

Les matériaux isolants ont un rôle important car ils permettent d'améliorer le climat intérieur et de limiter l'utilisation du chauffage et/ou de la climatisation. Dans le volet *Propositions de matériaux isolants*, on constate que des panneaux en laine de bois peuvent être fabriqués à partir de matières premières marocaines et des panneaux fabriqués ont été testés dans un bâtiment à Ouarzazate. Le panneau en laine de bois pouvant aisément s'intégrer aux techniques de construction utilisées aujourd'hui, le surcoût occasionné pour l'isolation sera donc limité. La demande en panneaux en laine de bois a été jugée satisfaisante et cet état de fait justifierait la mise en service d'une ou plusieurs usines de petite capacité.

# Summary

The geometry of the urban fabric greatly influences the microclimate and thus affects the thermal comfort of persons in the urban environment. Urban microclimate also indirectly affects the indoor climate. Poor adaptation of urban environments can result in a greater need for active climatisation and, thus, increased energy use.

This cooperation between the National Laboratory for Tests and Studies (LPEE) in Morocco and Housing Development & Management, Lund University, Sweden, dealt with the climatic design of buildings in urban environments in a warm and dry climate. There were three main parts to the project.

The section *Climate-conscious urban design* studied the urban climate in Fès, both in a traditional, densely built neighbourhood and in a relatively new, low-density area. The maximum temperature in the traditional neighbourhood was up to 10°C lower than in the modern, both during the winter and the summer. This difference can be explained by the greater shading at street level in the traditional area due to its higher building density. In terms of outdoor comfort, the dense, traditional area is in principle comfortable during the summer, while the low-density, modern area has temperatures far outside the comfort zone. However, in the winter the modern area is more comfortable, mainly because of the possibility of exposure to solar radiation.

The study showed that a more dense urban fabric than is practiced currently would achieve better comfort in urban areas. Simulations suggest that the ratio between the height (H) of the buildings and the width (W) of the streets should be at least 2 for positive effects in the summer. It is also necessary to allow vehicular access, so the report recommends street canyons with an H/W-ratio ranging from 2 to 0.7. The wider avenues should be lined by trees and the buildings have arcades to shade the ground and pedestrians.

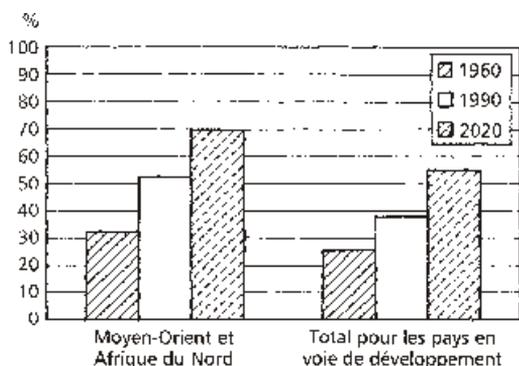
The section *Towards a thermal regulation* made a preliminary division of Morocco into climate zones. Computer simulations of indoor climate and energy use led to recommendations for technical requirements of thermal performance, for different building elements, in the Fez climate. The main proposals are a thermal transmittance coefficient (U-value) between 1 and 1.25 W/m<sup>2</sup>K for the roof and between 1 and 1.5 W/m<sup>2</sup>K for the walls. South-facing walls should have about 15% glazed window area. In an actively climatized building, this would save 20–30% of the energy used compared to a building that is not insulated.

Insulation materials are important to achieve better indoor climate and reduce the need for mechanical heating and/or cooling. The section *Proposals for thermal insulation materials* concluded that woodwool slabs could be produced with local raw materials in Morocco, and slabs produced in a full-scale test were used in a building in Ouarzazate. Woodwool slabs are easy to integrate into current building methods,

which means that there is little extra cost for the insulation. The estimated demand for woodwool slabs should be sufficient to establish one or more production plants.

# Introduction

Les questions d'urbanisme représentent aujourd'hui un problème important dans un contexte où l'on enregistre une forte croissance de la population des villes, une croissance qui, du point de vue historique, n'a jamais été aussi rapide que celle constatée aujourd'hui dans de nombreux pays en voie de développement. Actuellement, près de la moitié de la population vivant sur notre terre habite dans des cités et tout laisse à penser que la population des grandes agglomérations continuera à s'accroître dans les années à venir, voir ci-après.



*Part de la population urbaine au Moyen-Orient et en Afrique du Nord et total pour les pays en voie de développement*

Source : Banque Mondiale (2000)

La question n'est donc pas un problème d'urbanisation en soi mais un problème de croissance urbaine trop rapide. Dans un tel contexte, les pouvoirs publics ne disposent pas de ressources et de compétences suffisantes pour faire face à une évolution aussi rapide. C'est ainsi que l'on constate la mise en place de plans d'urbanisme qui laissent à désirer avec pour conséquence la construction de logements de mauvaise qualité et le développement croissant d'un habitat de construction spontanée et illégale. En plus des problèmes d'infrastructure ayant trait aux voies de circulation, à l'alimentation en eau potable, au réseau d'assainissement et des transports en commun sans oublier les problèmes importants de pollution de l'environnement.

Parallèlement aux problèmes engendrés par la croissance de la population urbaine, l'urbanisation permet la croissance économique et la modernisation des logements (Tannerfeldt 1996). En effet, une grande partie de la population urbaine dispose souvent de ressources économiques supérieures à celle vivant dans les campagnes. L'évolution économique des grandes agglomérations implique que les habitants demandent la construction de bâtiments d'un confort accru avec des équipements modernes. Tout un ensemble qui tend à accroître la consommation d'énergie principalement dans les secteurs de l'habitat et du tertiaire avec pour conséquence, dans le cas d'une mauvaise utilisation de l'énergie, des répercussions négatives sur l'environnement.

L'utilisation accrue de systèmes de chauffage et de climatisation peut avoir des conséquences importantes sur l'environnement sous forme de rejets polluants mais aussi sur le climat urbain. Il existe des exemples de villes exposées à un climat chaud où la climatisation intensive des bâtiments a conduit à un réchauffement considérable du milieu urbain qui a provoqué à son tour une augmentation des besoins en climatisation des bâtiments.

Il est à noter que l'on néglige souvent le problème du confort thermique en milieu urbain. Un mauvais climat urbain a un impact négatif sur l'utilisation des espaces urbains. En outre, un mauvais climat urbain influence négativement le confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Au niveau du confort thermique, les effets négatifs du climat se ressentent surtout dans les pays chauds étant donné que les villes enregistrent des températures plus élevées que les campagnes environnantes. (OMM, 1996).

Un urbanisme et une conception architecturale plus adaptés au climat rentrent dans la stratégie d'un développement durable et respectueux de l'environnement. Les économies d'énergie, le confort thermique des utilisateurs et le respect de l'environnement sont désormais des facteurs à considérer au même titre que les coûts des bâtiments et leur solidité. Ces nouvelles préoccupations devraient permettre d'éviter des crises énergétiques tout en étant un moteur important dans le secteur du bâtiment.

Pour le Maroc, la part de la population urbaine entre 1980 et 1996 est passée de 41% à 53% (Banque Mondiale 2000). Cette forte croissance, principalement enregistrée dans les villes de moyenne importance, a provoqué une crise du logement (Département de l'Habitat 2000). Pour remédier à cette crise, les pouvoirs publics ont ces dernières années mis en place des programmes de construction, programmes qui n'ont malheureusement pas suffi à arrêter la construction de logements illégaux et de bidonvilles.

Aujourd'hui, l'urbanisme au Maroc présente un tissu urbain avec des voies larges et des bâtiments d'une hauteur relativement peu élevée. Une telle conception fonctionne bien en période d'hiver ; par contre en été, le climat extérieur est souvent bien trop chaud, un problème particulièrement important à l'intérieur du pays et dans le sud car les températures y sont très élevées au cours de cette saison.

Au niveau du bâtiment lui-même, la conception n'est pas non plus adaptée au climat. Les techniques de construction utilisées sont pratiquement les mêmes dans tout le pays indépendamment du climat. Jusqu'à présent l'utilisation du chauffage et de la climatisation au Maroc se limite certes aux bâtiments du tertiaire, aux hôtels et aux logements réservés à une population favorisée mais, tout laisse à penser que la consommation d'énergie ira en s'accroissant au fur et à mesure de l'amélioration du niveau de vie de la population de faibles et de moyens revenus.

En outre, le Maroc ne possède pas de réglementation thermique pour ce qui est de la construction de bâtiments adaptés au climat et les pouvoirs publics n'ont pas pris de mesures incitatives permettant de limiter la consommation d'énergie dans les bâtiments. La mise en place d'une réglementation thermique sur l'ensemble du pays devrait permettre d'assurer un meilleur confort dans les bâtiments et donc de limiter la consommation énergétique. Une mauvaise conception, par exemple l'utilisation de grandes surfaces vitrées en façade, conduit automatiquement à des surchauffes conséquentes et à des charges de climatisation importantes, même pour les zones climatiques plus confortables.

Dans le cadre d'une conception de bâtiments adaptés au climat, le choix des matériaux de construction est un élément important. En effet, l'utilisation de matériaux isolants est à recommander si l'on veut obtenir un climat intérieur confortable et une consommation d'énergie limitée. Aujourd'hui au Maroc, les matériaux isolants sont peu utilisés dans la construction des bâtiments. La raison n'est pas seulement due au fait que le pays ne possède pas de réglementation thermique spécifiant l'isolation des parois mais aussi au fait que les matériaux isolants sont peu disponibles sur le marché. En outre, on constate un manque de matériaux isolants de production locale et adaptés au marché local.

## L'objectif du projet

Le domaine des conceptions urbaine et architecturale adaptées au climat couvre de nombreux aspects. Ce projet de collaboration maroco-suédoise a été divisé en trois principaux domaines représentés par : l'urbanisme adapté au climat, la réglementation thermique et le développement de matériaux isolants.

L'objectif principal de ce projet était de créer des conditions d'acquisition d'un savoir-faire local en vue de la conception de quartiers urbains et de bâtiments d'habitation destinés à une population de revenus faibles ou moyens, tout en assurant aux utilisateurs un bon confort thermique, une faible consommation d'énergie et leur intégration dans un environnement agréable.

L'étude d'un urbanisme adapté au climat a eu pour but de mettre en avant l'importance d'une conception urbaine adaptée au climat afin de limiter les contraintes climatiques auxquelles sont exposés les habitants dans un environnement urbain. L'objectif était donc de :

- dans un climat chaud et sec, d'étudier l'influence du tissu urbain sur le microclimat au niveau de la rue ;
- développer des outils permettant de prévoir les effets de différentes conceptions urbaines ;
- étudier de quelle manière les normes en vigueur gèrent la conception urbaine d'aujourd'hui ;

- proposer des lignes générales ayant trait à une conception urbaine adaptée à un climat chaud et sec.

Pour ce qui est de la réglementation thermique, il s'agissait en premier lieu d'une étude préliminaire dans le but de mettre en place au Maroc une réglementation thermique. L'étude réalisée traite non seulement de l'amélioration du confort thermique mais aussi de l'utilisation limitée de l'énergie dans les bâtiments, le but étant de :

- proposer une division du Maroc en zones climatiques ;
- développer une méthodologie d'approche pour ce qui est des exigences de performance thermique dans les logements marocains ;
- proposer des exigences de performance thermique dans un habitat type marocain dans une des zones climatiques proposées.

L'étude du développement de matériaux isolants avait pour objet de :

- réaliser une étude de faisabilité de production de matériaux isolants en utilisant les matériaux locaux disponibles et de les tester à grande échelle ;
- proposer des produits concurrentiels sur le marché adaptés aux techniques de construction utilisées et d'étudier la possibilité d'une fabrication locale.

## Réalisation du projet

Réparti en deux phases, le projet a fait tout d'abord l'objet d'une étude de caractère préparatoire entre 1997 et 1999 puis d'une étude approfondie des sujets retenus entre 1999 et 2002. Ci-après sont décrites les méthodes utilisées dans les trois domaines principaux faisant l'objet de ce rapport.

Tout au long du projet, les urbanistes, les architectes, les ingénieurs, les fabricants de matériaux et autres spécialistes ainsi que les représentants des pouvoirs publics ont pu suivre l'évolution des travaux de recherche et discuter, sous forme de tables rondes, les résultats de l'étude.

## Urbanisme adapté au climat

L'étude d'urbanisme adapté au climat a été réalisée dans la ville de Fès. Ce choix a été fait à cause de la forte variation de son tissu urbain représentée d'un côté par la Médina, vieille ville traditionnelle de très forte densité urbaine, et de l'autre par la ville moderne se caractérisant par une trame urbaine régulière et de grands espaces. En outre, la ville de Fès possède un climat varié, très chaud et sec en été et relativement froid et humide en hiver, voir chapitre 2.

Les deux quartiers retenus dans la Médina et dans la Nouvelle Ville ont fait l'objet d'une étude comparative. Ainsi, pour pouvoir permettre la comparaison des deux quartiers dans les domaines des conditions

de l'habitat, de l'utilisation des sols et du niveau de vie, de nombreux travaux de recherche ont été engagés sous forme d'inventaire, d'étude des cartes, de mesures des sections de rue, d'interviews, etc. Pendant la période d'inventaire, a été réalisée une première série de mesures à l'aide d'instruments portables afin d'avoir une estimation préliminaire des différences de climat et de confort thermique entre les deux quartiers.

Faisant suite à ces mesures préliminaires, d'autres mesures ont été effectuées en continu pendant un an à l'aide d'instruments installés en permanence dans une rue et dans un quartier choisis. A partir des résultats obtenus, des comparaisons de climat et de confort ont été effectuées entre les deux quartiers et particulièrement au cours des périodes d'été et d'hiver, voir chapitre 3.

Une recherche bibliographique approfondie et sur les bases de données ont permis de dresser le bilan des modèles informatisés disponibles afin de pouvoir simuler sur ordinateur les effets d'une conception urbaine sur le microclimat. Ainsi, certains calculs et programmes ont été utilisés afin de comparer les calculs et le résultat des relevés tout en tentant de prévoir les conséquences des différentes conceptions urbaines sur le microclimat.

Pour ce qui est des normes d'urbanisme, l'étude comprend un inventaire des normes en vigueur et leur application dans les plans d'urbanisme et d'architecture. En outre, un nombre limité d'urbanistes et d'architectes, aussi bien du secteur privé que public, a fait l'objet d'interviews.

A partir des mesures réalisées, des études bibliographiques et, dans une certaine limite, des simulations, le rapport prévoit des recommandations de conception urbaine adaptée au climat. Ces recommandations comprennent trois niveaux dans un tissu urbain : le quartier, le canyon de rue et le bâtiment, voir chapitre 3.

## Réglementation thermique

L'étude sur la réglementation thermique comprend l'ensemble du pays mais les applications traitent en premier lieu la zone climatique de Fès.

La réglementation thermique et la qualité de l'air dans un bâtiment ont fait l'objet d'une étude bibliographique des normes existantes dans plusieurs pays, y compris des pays exposés à un climat similaire à celui du Maroc, afin de se rendre compte de l'évolution en la matière.

Normalement, les normes en vigueur prévoient une division en zones climatiques à partir du climat extérieur. Dans le cas précis, le rapport indique une méthode de division en zones climatiques fonction non seulement du climat extérieur mais aussi des températures intérieures, ces dernières étant des données obtenues par simulation sur ordinateur. Ce rapport prévoit une division en zones en fonction du climat d'hiver et d'été.

L'étude réalisée a abouti à une méthode traitant des exigences de performance thermique des parois. Cette méthode est basée sur une si-

mulation du climat intérieur d'un bâtiment type. Cette méthode d'approche peut être utilisée indépendamment de la zone climatique mais dans le cas étudié ici, a été retenue la zone climatique de Fès qui fait l'objet d'une proposition traitant des exigences de performance thermique des parois.

## Développement des matériaux isolants

Suite à un premier inventaire sur les matériaux isolants disponibles sur le marché marocain, les travaux de recherche se sont consacrés à l'étude de faisabilité technique des panneaux de laine de bois et des blocs de perlite, deux matériaux jugés intéressants pour ce pays qui pourrait fabriquer ces matériaux à partir de matières premières locales. Les panneaux en laine de bois, qui sembleraient le produit le plus intéressant, ont été testés en vraie grandeur et utilisés en plafond dans un bâtiment à Ouarzazate conçu à partir de simulations sur ordinateur. L'étude réalisée comprend l'évaluation des performances thermiques suite aux mesures climatiques réalisées en parallèle dans le « prototype » et le bâtiment voisin.

L'introduction des panneaux de laine de bois sur le marché de la construction au Maroc nécessite qu'ils s'intègrent parfaitement aux techniques de construction du pays et remplissent des exigences acceptables pour ce qui est de l'isolation thermique des bâtiments. L'étude réalisée comprend en outre un calcul des coûts de production et du prix de vente par rapport aux produits concurrentiels en vente sur le marché marocain. Enfin, dans le cadre d'une introduction de ce produit, ont été étudiés les besoins du marché futur, le nombre et la grandeur des unités de production nécessaires et la gamme de production.

## Présentation des chapitres

Le chapitre *Les participants au projet* présente les acteurs ayant participé à la réalisation du projet.

Le chapitre 1 *L'habitat au Maroc* traite des questions se rapportant à la situation du logement actuelle au Maroc et aux types d'habitat les plus courants ainsi que des types de parois les plus courants.

Le chapitre 2 *Climat au Maroc et confort thermique* présente le climat au Maroc, les caractéristiques spécifiques du climat urbain et les paramètres influençant le confort thermique.

Le chapitre 3 *Urbanisme adapté au climat* traite de l'étude urbaine de la ville de Fès en y incluant les résultats des mesures climatiques et des simulations sur ordinateur ainsi que les recommandations de conception urbaine adaptée au climat.

Le chapitre 4 *Vers une réglementation thermique* présente une division du Maroc en zones climatiques et une proposition ayant trait aux exigences thermiques des parois sur la zone climatique de Fès.

Le chapitre 5 *Proposition de matériaux isolants* traite d'une étude de faisabilité technique d'une production locale de panneaux de laine de bois ainsi que des stratégies dans le but d'introduire ce matériau au Maroc.

Le rapport se termine par le chapitre *Conclusions* qui reprend succinctement les éléments importants du projet tout en apportant des recommandations ayant trait à la construction de quartiers d'habitation adaptés au climat.



# Les participants au projet

Ce projet fait partie de la coopération technique menée entre le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE) du Maroc et le département Housing Development & Management (HDM) de l'Université de Lund, Suède. Du côté marocain, ce projet a été financé par le LPEE et du côté suédois par l'Agence suédoise de coopération internationale au développement (Asdi). Cette forme de coopération technique entre dans le cadre du financement autorisé par l'Asdi dont les objectifs et les critères de la coopération technique financée par contrat sont présentés ci-après ainsi que les acteurs engagés dans ce projet, leur rôle et leurs activités.

## Coopération technique financée par contrat

Le but de la coopération technique financée par contrat est la promotion du développement des compétences dans les pays à revenus faibles et intermédiaires ainsi que le transfert des connaissances dans des domaines ayant une importance stratégique pour le développement des pays partenaires.

La coopération technique financée par contrat vise à favoriser l'augmentation des échanges de compétences et d'expériences entre la Suède et les pays partenaires et faciliter également la participation de nombreux acteurs suédois à ces activités.

La coopération concerne essentiellement les secteurs dans lesquels la Suède est très concurrentielle et où sa compétence est grande : il s'agit de l'environnement, de l'administration publique, de l'énergie, du secteur forestier, de l'industrie, des transports et des télécommunications.

Les caractéristiques de la coopération technique financée par contrat sont les suivants :

- *Développement des compétences* : grâce à la coopération technique financée par contrat l'Asdi contribue à différents types de développement des compétences dans des domaines stratégiques importants pour le développement des pays partenaires.
- *Ressources suédoises* : la coopération technique financée par contrat repose sur les expériences et le savoir-faire suédois, qui ont prouvé qu'ils étaient concurrentiels.
- *Demande précise* : l'Asdi base sa décision d'accorder son appui à un projet sur une demande précise et concrète émanant d'une autorité centrale de planification dans le pays partenaire.
- *Financement par contrat* : les deux parties, en Suède et dans le pays partenaire, passent un contrat pour la mise en œuvre d'activités que

finance l'Asdi. Les parties contractantes sont responsables de la réalisation du projet. L'Asdi ne finance aucun contrat qui aurait été passé avec une entreprise privée du pays partenaire.

- *Partage des coûts* : un partage des coûts est exigé pour toute activité. Cela signifie que le partenaire local prend à sa charge une partie des coûts du contrat, tout au moins les dépenses locales.
- *Partenaire compétent* : cette forme de coopération que finance l'Asdi, sans en être toutefois l'exécutant, exige que la partie adverse soit compétente et qu'elle ait la capacité de planifier des projets, de les mettre en œuvre et de tirer profit des expériences acquises.

## LPEE

Le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes est une entreprise publique au statut juridique d'une société anonyme.

Le rôle du LPEE est d'apporter à l'ensemble des participants à l'acte de construire les éléments dont ils ont besoin dans l'étude et la réalisation des projets. Il constitue ainsi un auxiliaire pour l'ensemble de la profession du bâtiment et des travaux publics.

Au niveau des études, il apporte aux projeteurs les données dont ils ont besoin en ce qui concerne le sol de fondation, les matériaux, l'environnement. Il participe directement aux études dans le cas d'ouvrages importants et peut en particulier réaliser des essais sur modèles physiques ou mathématiques en vue de déterminer les paramètres qui sont nécessaires au dimensionnement des ouvrages.

Au niveau des réalisations, il participe aux contrôles techniques et contrôle de qualité des matériaux et produits industriels, avant et au cours de leur mise en œuvre, à la réception des ouvrages ou parties d'ouvrages.

Après réalisation, le Laboratoire peut assurer le suivi des constructions, leur comportement, étudier les dispositions à prendre en cas d'anomalies laissant présager un risque, aider à définir les modalités de réhabilitation, de reprise, confortement, etc...

Parallèlement au développement de ses activités, le LPEE a renforcé ses moyens et ses actions d'information, d'animation et de formation au bénéfice de l'ensemble de la profession :

- Enrichissement et organisation d'un fonds documentaire, actuellement en cours de régionalisation ;
- Equipement en moyens audiovisuels et aménagement d'une salle de conférence climatisée de 250 places ;
- Publication d'une revue, « La Revue Marocaine du Génie Civil » au rythme bimestriel avec supplément de nombreux bulletins spécialisés à des rythmes divers ;
- Organisation de conférences, stages, séminaires et colloques au rythme mensuel ;

- Participations à des manifestations techniques nationales et internationales par des exposés et communications ;
- Tables rondes avec les différentes associations professionnelles.

Dans le domaine de la recherche, les travaux menés au LPEE sont conduits dans l'esprit de répondre aux besoins de la profession. Parmi les thèmes développés au LPEE on cite :

- Dans le domaine des matériaux et structures : la valorisation des matériaux locaux, les nouvelles voies de béton, la pathologie et les techniques de réhabilitation, le confort thermique et acoustique, etc...
- Dans le domaine des sciences de la terre : la caractérisation des géomatériaux marocains, l'établissement des cartes de zonage, etc...
- Dans le domaine de l'eau et de l'environnement : les études d'impact environnementale, le climat et les ressources en eau, l'assainissement urbain et autonome, etc...
- Dans le domaine des infrastructures de transport : les matériaux locaux routiers, l'étude et le renforcement des ouvrages d'art, etc...

La diffusion des résultats de recherche est réalisée à travers la participation à des séminaires, colloques, tables rondes ou par le biais des publications :

- Bilan de la recherche qui traite l'effort consenti dans les différents domaines de la recherche,
- Des guides de bonnes pratiques et les rapports de recherche,
- Des articles dans la Revue Marocaine de Génie Civil ou dans d'autres revues spécialisées.

Le groupe de travail du LPEE ayant participé à ce thème de recherche est :

Ahmed Mrhizou	Directeur du Centre Scientifique et technique des Constructions
Mohamed El Kortbi	Ingénieur, Chef de projet
Mohamed Mraissi	Ingénieur, Chercheur principal
Mustapha Lakbouchi	Ingénieur
Taoufik Mahyaoui	Technicien supérieur

## HDM

Le département Housing Development & Management (HDM) a pour objet, dans une perspective internationale, l'étude de la conception, de l'origine et de l'utilisation des logements ainsi que l'étude de l'intégration des bâtiments dans un pôle de maisons, dans un quartier et dans une agglomération. L'objectif est d'élargir ses connaissances afin de pouvoir améliorer les procédés permettant alors la réalisation de logements de qualité satisfaisante et permettant aussi d'assurer un dévelop-

pement global soutenable, principalement pour une population ayant de faibles revenus.

HDM dispense aussi des cours post-universitaire dans le domaine de l'habitat, entre autre un cours intitulé « Housing & Development » traitant des procédés de construction et s'adressant aux personnes actives aujourd'hui dans le domaine de l'habitat et des établissements humains. HDM dispense en outre un cours sur l'architecture, l'énergie et l'environnement « Architecture, Energy & Environment » dont le but est d'accroître ses connaissances dans les domaines de la construction adaptée au climat et d'économie d'énergie dans les bâtiments. HDM est aussi responsable du programme *PROMESHA* financé par l'Asdi dont l'objectif est le renforcement des capacités de l'ensemble des acteurs au sein du secteur du bâtiment en Amérique latine, voir la description de l'Asdi ci-après.

Depuis plus de vingt ans, le personnel de l'HDM est engagé dans différents projets ayant trait à l'habitat et à la construction adaptée au climat des pays du Maghreb dont le premier projet avait pour mission d'organiser un projet à Rohia, un village de campagne tunisien. Il s'agissait, par le biais de l'autoconstruction, d'apporter une solution aux problèmes du logement. (Andersson et al. 1985, Rodriguez et Åstrand 1996). A cette époque, l'Etat tunisien proposait à ses habitants des maisons type subventionnées qui malheureusement ne répondaient pas aux besoins de la population locale et n'étaient pas adaptées ni à la culture des campagnes ni au climat en vigueur. Et, bien souvent ces maisons étaient souvent trop chères. Réalisé en collaboration avec l'ASDEAR<sup>1</sup>, ce projet fut en 1984 et à l'initiative de l'actuel ministre du logement, repris comme modèle d'habitation dans les zones rurales et le Gouvernement changea sa politique de maison standard en un programme d'autoconstruction organisée.

Pour ce qui est de la construction adaptée au climat, l'HDM a poursuivi plusieurs années de recherche en collaboration avec le CNERIB<sup>2</sup> en Algérie. Les projets traitaient entre autres l'étude de la conception d'un bâtiment basée sur des simulations du climat intérieur par ordinateur et la construction d'un prototype expérimental à Ghardaïa. Le but de ce projet était de tester en pratique différents facteurs, tels que la ventilation nocturne (Rosenlund et Ouahrani 1989) afin d'améliorer le confort thermique dans un bâtiment. De même, en collaboration avec l'ASDEAR et l'ARRU<sup>3</sup> en Tunisie, deux projets ont été réalisés dans le domaine de l'architecture adaptée au climat sous forme de la construction de deux bâtiments prototypes publics, une maison de jeunes à Tamerza et un club d'enfants à Tozeur. Ces deux projets ont permis d'étudier les facteurs influants sur le climat ambiant dans un bâtiment exposé à un climat chaud et sec. (Rosenlund 1995, Rosenlund et al. 1997).

---

1 Association pour le Développement et l'Animation Rurale.

2 Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

3 Agence de Réhabilitation et de Rénovation Urbain.

Pour ce qui est des matériaux de construction, une étude sur le développement de matériaux isolants a été réalisée en collaboration avec le CNERIB. Ce projet avait pour objet l'étude de faisabilité des panneaux de laine de bois et du béton mousse non seulement fabriqués à partir des matières premières disponibles en Afrique du Nord mais aussi faciles à intégrer dans les techniques de construction du pays (Åstrand et al. 1994).

Les études réalisées entre autres sur les prototypes démontrent qu'il est possible d'améliorer le confort thermique à partir d'une conception architecturale adaptée au climat et que l'utilisation de matériaux isolants permet d'obtenir un confort thermique acceptable. Il faut cependant noter que les bâtiments étudiés étaient situés dans un environnement rural avec un coefficient d'occupation des sols très faible. Dans un milieu urbain, le problème est différent étant donné que les bâtiments et leur architecture créent un microclimat à l'intérieur du tissu urbain. C'est la raison pour laquelle, le projet en cours au Maroc traite de la conception urbaine adaptée au climat.

Le groupe de travail du HDM a été constitué comme ce qui suit :

Johnny Åstrand	Directeur du HDM, Responsable et chef de projet
Hans Rosenlund	Architecte, Docteur ès sciences, Chef de projet (phase 1)
Erik Johansson	Ingénieur, Chercheur principal
Karin Grundström	Architecte, Chercheur
Janis Kursis	Architecte, Chercheur
Djamel Ouahrani	Architecte, Docteur ès sciences

## Asdi

L'Agence Suédoise de Coopération Internationale au Développement (Asdi) est depuis 15 ans engagée dans des projets et des programmes d'aide au développement urbain et à l'environnement et dans ce contexte de nombreux projets financés par l'Agence suédoise ont attiré l'attention et le respect international dans le cadre de la lutte contre la pauvreté.

## Les objectifs en matière de coopération au développement

L'Asdi définit dans sa page d'accueil ([www.sida.se](http://www.sida.se)) ses objectifs en matière de coopération au développement, objectifs jugés essentiels dans ce rapport et repris ci-dessous :

- Croissance économique,
- Indépendance économique et politique,

- Égalité économique et sociale,
- Développement démocratique de la société,
- Utilisation durable des ressources naturelles et protection de l'environnement,
- Égalité entre les femmes et les hommes.

La Suède s'est en outre ralliée ainsi que de nombreux pays aux objectifs du millénaire devant être atteint en 2015.

## Aide au développement urbain et à l'environnement

La pollution de l'environnement, occasionné par une forte croissance de la population des grandes villes en Afrique, en Asie et en Amérique latine, représente un problème global. L'aide de l'Asdi dans le domaine de l'environnement urbain tend à contribuer à la réduction des rejets dans l'air et dans l'eau, à l'économie d'énergie et à l'utilisation de systèmes de transport efficaces.

L'aide au développement urbain est un objectif prioritaire pour l'Asdi face à une urbanisation en forte croissance avec pour conséquences des problèmes d'environnement. Certains sont occasionnés par la pauvreté et d'autres par l'augmentation du niveau de vie. Dans les deux cas, la situation va s'aggravant à cause d'une évolution rapide et que les ressources humaines, matérielles et financières ne suffisent pas pour gérer le problème. D'où des conséquences importantes, non seulement au niveau local mais aussi au niveau mondial.

## La lutte contre la pauvreté

La pauvreté parmi la population des villes est différente de celle constatée dans les campagnes et se distingue par un besoin d'argent, l'utilisation de moyens de transport onéreux sur de longues distances et une plus grande insécurité. Les chiffres montrent que près d'un milliard de personnes habitant dans les grandes villes des pays en voie de développement vit dans l'extrême pauvreté<sup>4</sup>. En outre, le nombre va croissant.

Dans ce contexte, l'Asdi formule des points capitaux ayant trait à son engagement urbain. Pour l'Agence suédoise, il s'agit de lutter contre la pauvreté, favoriser la croissance économique, combattre les maladies, améliorer l'environnement, renforcer la démocratie et améliorer les conditions de vie des femmes et leur influence dans la société. C'est ainsi que l'Asdi concentre son engagement sur six cibles particulières telles que l'environnement, les transports, l'habitat, l'environnement culturel, la pauvreté dans les villes et certains problèmes particuliers ayant trait à l'égalité des sexes. Actuellement et pour ce qui est des problèmes urbains, l'Asdi fournit une aide aux pays d'Amérique centrale, en Afrique du Sud autour des chutes Victoria et dans la région de Gaza.

---

4 Disposant de moins d'un dollar par jour.

## Amélioration de l'habitat

Les pays dans lesquels l'Asdi est engagée se caractérisent par une énorme crise du logement provoquée par la forte croissance de population des villes. Nombreux sont les sans abris et les habitants vivant dans des taudis représentant un risque pour la santé. L'accès à un logement représentant un point fixe, une sécurité et une qualité de vie, est donc capital dans la vie de l'être humain.

La réussite des programmes d'habitat de l'Asdi en Amérique centrale et en Afrique du Sud a retenu l'attention internationale. En effet, ces programmes promeuvent l'accès au logement pour une population de très faibles revenus. Ces programmes permettent aux familles défavorisées d'obtenir des prêts destinés à l'amélioration de leur logement ou à la construction. Les familles reçoivent une assistance technique et pratique. En outre, grâce à un apport personnel et une collaboration entre elles, les familles avec l'aide de l'Asdi peuvent améliorer les réseaux d'infrastructure tels que l'assainissement, l'approvisionnement en eau et en électricité.

De plus, l'évaluation des programmes réalisés démontre la bonne gestion des fonds utilisés et qu'ils ont permis non seulement la construction et l'amélioration de logements mais aussi l'amélioration des infrastructures tout en créant de nouveaux emplois. Les programmes mis en place permettent en outre de montrer comment on peut toucher les couches de population à faibles revenus et de mettre à leur disposition des outils leur permettant de changer et d'améliorer leurs conditions de vie. A ceci, ajoutons la réussite du programme pour ce qui est de la création de fonds roulants pouvant être poursuivie et même se développer, une fois le retrait de l'Asdi.

## Renforcement des capacités en Amérique latine

Le manque de logements est un problème important dans les villes d'Amérique latine et il s'agit non seulement de remédier à la vétusté des logements existants mais aussi de construire de nouveaux quartiers d'habitation selon des plans d'urbanisme bien adaptés. Il s'agit aussi de relever un défi en prévoyant la construction de logements à des coûts limités. Le programme PROMESHA (Programa de capacitación par el Mejoramiento Socio Habitacional) dans lequel l'Asdi est engagée, s'adresse aux experts impliqués dans les problèmes du logement. Depuis sa mise en place en 1995 jusqu'en 2000 près de 1.000 professionnels représentés par des architectes, des urbanistes, des ingénieurs et des avocats ont participé aux activités prévues dans ce programme.

PROMESHA a concentré ses efforts sur les pays les plus démunis de l'Amérique latine, à savoir la Bolivie, l'Equateur, El Salvador, le Guatemala, le Honduras, le Nicaragua et le Pérou. Les objectifs principaux y sont l'amélioration de l'infrastructure des bidonvilles et de la qualité des logements pour les couches de population les plus démunies. Les objectifs principaux de ce programme sont de permettre aux habitants

d'avoir accès à une infrastructure, à des services et de garantir un standing minimum acceptable et à un coût réduit.

Les objectifs et les fins de ce programme sont uniques en Amérique latine et les cours de renforcement des capacités dispensés sont considérés comme étant suffisants dans le temps et d'un bon niveau pour toucher les professionnels de l'habitat. Et, comme une suite naturelle, cette formation contribue à la création d'un réseau de spécialistes qui peuvent échanger leurs expériences et apporter des idées et des solutions nouvelles.

L'aide apportée par l'Asdi est canalisée par le département HDM de l'Université de Lund qui, en collaboration avec les partenaires de chaque pays engagé, réalise le programme mis en place.

# L'habitat au Maroc

Ce chapitre présente la situation actuelle du secteur de l'habitat au Maroc avec une description sommaire du secteur et de la politique du logement et la législation en vigueur. Il présente également les différents types de construction existants et donne un aperçu sur les modes de construction les plus répandus.

## La situation du logement

La situation du logement se caractérise aujourd'hui par un lourd déficit dont les raisons sont dues à une forte croissance de la population et une migration sans cesse croissante de la population rurale vers les villes. Après l'indépendance du Maroc, on a pu constater une croissance des grandes agglomérations et en 1994, la population urbaine représentait 51,4% de la population totale. Avec une croissance annuelle aujourd'hui estimée à 3,6%, le taux de la population urbaine s'élèvera 57% en l'an 2007. Bien que les 2/3 de la population urbaine résident dans les 20 villes de plus de 100.000 habitants, on peut malgré tout remarquer un freinage de la croissance de ces villes. Aujourd'hui, ce sont les villes moyennes qui attirent le plus les flux migratoires tandis que l'on constate parallèlement le développement des petites agglomérations de moins de 20.000 habitants.

Les régions de forte densité de population se situent au Centre et au Nord-Ouest. La moitié de la population occupe 10% de la superficie du pays et 60% de cette population habite dans les villes.

Avec cette croissance démographique, le déficit en logements est de plus en plus important. En milieu urbain, il est estimé à environ 750.000 logements alors que les seuls besoins additionnels dus à la croissance démographique dépassent le rythme actuel de production, soit 90.000 logements produits annuellement en milieu urbain contre des besoins additionnels de 125.000 logements par an. La conséquence de ce déficit est la prolifération de l'habitat sous-équipé et non réglementaire au rythme de 25.000 logements par an. Pour résorber ce déficit à l'horizon 2012, le nombre de logements neufs à construire est de 58.000 unités par an (Ministère de l'Habitat 2001).

## Le secteur du logement

Le secteur du logement grandit d'année en année. En 1995, 66.586 logements furent construits et en 1998 le nombre de nouveaux logements s'élevait à 87.262. Les constructions sont réalisées à 88,5% en autopromotion, c'est-à-dire que les personnes privées achètent un terrain et font ensuite appel à un constructeur. Les promoteurs publics ou privés,

les sociétés ou les entreprises ne représentent qu'une faible partie (Département de l'Habitat, 2000).

Dans les villes marocaines, la majeure partie des constructions est réservée au logement et représente près de 90% de la totalité comme le montre le tableau 1.1.

Tableau 1.1 Répartition des constructions en milieu urbain selon leur utilisation jusqu'à fin 1999 (usage mixte = usage d'habitation et professionnel)

Type de construction	Nombre de constructions	Nombre en %
Habitation	2.025.215	81
Usage mixte	330.430	13
Usage professionnel	92.998	4
Autres usages	58.799	2
Total	2.507.442	100

Source : Département de l'Habitat (2000).

Le nombre de logements en milieu urbain s'élève à 4.023.725, ce qui signifie que la proportion de logements par bâtiment est de 1,6. Sur l'ensemble, 3.019.184 logements sont occupés à titre de résidence principale. La majorité des constructions est de type maisons marocaines<sup>5</sup> et la proportion d'immeubles est également importante comme le montre le tableau 1.2.

Tableau 1.2 Répartition des logements selon le type d'habitat en milieu urbain au Maroc jusqu'à 1999

Type d'habitat	Nombre de logements	Nombre en %
Villa	94.449	3
Immeuble	437.344	14
Maison marocaine	2.195.883	73
Construction sommaire*	258.306	9
Habitat rural	33.204	1
Total	3.019.186	100

\*Habitat non réglementaire, bidonvilles, etc.

Source : Département de l'Habitat (2000).

## La politique du logement

Créé au début des années 70, le Ministère de l'Habitat prenait la responsabilité de la politique de l'habitat. Au niveau local, chaque région possède une Agence Urbaine responsable de la planification du développement futur des villes.

Quelques années plus tard étaient créés les promoteurs publics, des organisations ayant chacune une stratégie définie dans le cadre de la politique du logement. Ainsi, créés en 1974-75, les Etablissements Ré-

<sup>5</sup> Voir la description sur la typologie de l'habitat ci-après.

gionaux d'Aménagement et de Construction (ERAC) ont pour objectif l'aménagement et la construction de quartiers sociaux destinés aux ménages à faibles revenus. L'Agence Nationale de lutte contre l'Habitat Insalubre (ANHI) était créée en 1984 pour renforcer l'action de l'Etat en matière de lutte contre l'habitat sous-équipé (bidonvilles, quartiers d'habitat non réglementaires et tissus anciens). La Société Nationale d'Equipement et de Construction (SNEC) était créée en 1987 pour renforcer les actions dans les créneaux de l'habitat rural et de l'habitat social.

Dans le cadre des solutions apportées pour résoudre le problème de l'habitat, le programme national de construction de 200.000 logements a été initié en 1994 par sa Majesté le Roi Hassan II. Ce programme de logements sociaux en milieu urbain s'adresse aux ménages possédant de moyens et faibles revenus ne dépassant pas 350 dollars par mois. Le coût de la construction d'un appartement est limité au maximum à 20.000 dollars et la surface habitable ne dépasse pas 60 m<sup>2</sup>. La mise de fonds des ménages doit être de 10% du prix total tandis que l'Etat subventionne jusqu'à 50% le taux d'intérêt de l'emprunt contracté. Un appartement ne peut pas être acquis par un ménage dans le cas où il possède déjà un logement dans le quartier et l'acquisition est limitée à un appartement par famille. Un des projets du programme 200.000 logements est le quartier Sala Al Jadida à l'extérieur de Rabat-Salé, voir figure 1.1.



Fig. 1.1 Construction de 20.000 logements à Sala al Jadida à l'extérieur de Rabat-Salé

## La législation

Le Maroc a été doté, dès 1914 sous le protectorat français, d'une législation dans le domaine de l'urbanisme. Maintes fois complétée et modifiée, elle avait abouti à deux dahirs, l'un sur l'urbanisme en 1952 et l'autre sur les lotissements en 1953. Ces deux dahirs sont restés en vigueur jusqu'à ce qu'ils soient abrogés par deux lois en 1992, l'une relative à l'urbanisme et l'autre relative aux lotissements, groupes d'habitations et morcellements. La réalisation des documents d'urbanisme pose des difficultés de différentes natures, liées à la lenteur de leur conception, à la lourdeur de leurs procédures et au manque de moyens et de mesures d'accompagnement nécessaires à la mise en œuvre de leurs options (Ministère de l'Habitat 1996).

## La typologie de l'habitat

Au Maroc, l'habitat traditionnel se caractérise par des maisons introverties, construites autour d'une cour centrale donnant accès aux différentes pièces, une conception méditerranéenne typique. La différence entre les zones urbaines et les campagnes se situe au niveau du nombre d'étages tandis que la conception est basée sur le même principe.

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, la maison traditionnelle s'est transformée en maison marocaine (figure 1.2), une maison demandant moins d'espace. La maison marocaine représente aujourd'hui le type le plus courant construit dans les zones urbaines. Construite sur deux ou trois niveaux, cette maison utilise parfois le rez-de-chaussée comme commerce ou tout autre activité. Ouverte vers l'extérieur, elle possède tout de même une petite cour ou une prise de jour sur l'arrière. Ces maisons sont souvent mitoyennes. La maison accueille parfois une famille seulement et parfois un des étages est loué.

Par la suite, la construction d'appartements fit son apparition dans les années 70. Cette forme d'habitat, qui se développe de plus en plus dans les centres villes, est une solution bon marché lorsque les prix des terrains atteignent des niveaux très élevés. Les appartements se trouvent principalement dans les grandes villes.

Suite à la colonisation française, la villa fut et représente encore aujourd'hui la « maison de rêve » pour bien des gens. C'est l'exemple type



Fig. 1.2  
Maison marocaine moderne :  
exemple de Fès

de la maison occidentale ouverte vers l'extérieur. La villa est souvent construite avec certains détails de construction de style marocain. Ce type d'habitat s'adresse à la population la plus favorisée.

## Les modes de construction

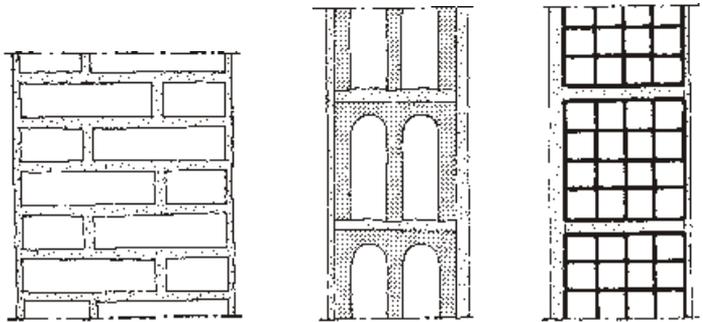
L'habitat en dur, c'est-à-dire un habitat réalisé avec des matériaux de construction tels que la pierre, la brique et le béton, représente la nature des constructions au Maroc. Aujourd'hui, les murs extérieurs et les toitures sont presque exclusivement réalisés en béton. Les toitures se composent à 96% soit d'un système de poutrelles et de hourdis, soit en dalles pleines tandis que les murs se composent à 83% d'une ossature poteaux-poutres avec un remplissage de briques ou de parpaings. La proportion de murs réalisés à l'aide d'autres matériaux tels que le pisé ou la pierre diminue d'année en année (Département de l'Habitat, 2000).

### Les murs

Traditionnellement, les murs sont construits en pierre naturelle, en brique ou en terre selon les matériaux disponibles localement.

Dans les constructions modernes, on utilise une ossature en béton armé avec remplissage de blocs creux de terre cuite ou de béton. Cette conception est la plus utilisée.

*Fig. 1.3*  
 Mur en briques pleines de terre cuite, solution traditionnelle (à gauche).  
 Murs en blocs creux de béton (au milieu) et blocs creux de terre cuite (à droite)



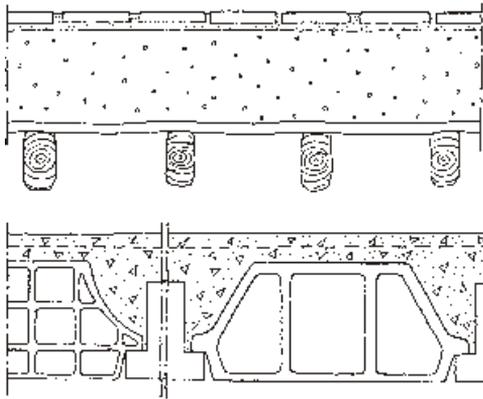
### Les toitures

Dans la majorité des cas, que ce soit dans les constructions traditionnelles ou modernes, les toits sont de conception plate.

Traditionnellement, les toitures étaient construites avec des poutrelles en bois sur lesquelles on apportait des panneaux en bois ou un tapis de joncs. On met ensuite en place une boue d'argile ou de terre puis l'ensemble est revêtu de carreaux de grès ou en terre damée puis d'un badigeon.

Dans les constructions modernes, les toits plats et les planchers sont réalisés à l'aide d'une ossature de poutrelles préfabriquées sur lesquel-

les reposent des hourdis en béton granulé ou en céramique et sur lesquels on coule un béton.



*Fig. 1.4*  
*Toiture traditionnelle en terre (en haut). Toiture moderne en béton armé avec hourdis en terre cuite ou béton (en bas)*

# Climat au Maroc et confort thermique

Ce chapitre donne un aperçu général sur le climat régnant au Maroc, tout en mettant l'accent sur le climat des sites étudiés dans le cadre des différents volets expérimentaux :

- La ville de Fès où les campagnes de mesure du climat urbain ont été menées et où la méthode d'approche concernant la réglementation thermique a été appliquée.
- La ville d'Ouarzazate où un bâtiment expérimental a été instrumenté.

Ce chapitre présente également les principales caractéristiques du climat urbain qui constituent la base de l'étude urbaine menée à Fès. Il présente en outre les principaux paramètres qui influencent le confort thermique : notions de base utilisées dans les chapitres 3 *Urbanisme adapté au climat* et 4 *Vers une réglementation thermique*.

## Le climat au Maroc

Le climat se caractérise par une très grande variation d'une région à l'autre, voir figure 2.1. Ainsi, les étés et les hivers sur le littoral nord-ouest de la côte Atlantique et sur le littoral nord-est entre la rive Méditerranéenne et le Rif, se caractérisent par un climat doux tandis que l'humidité de l'air reste élevée toute l'année. La figure 2.2 présente le climat de Rabat à titre d'exemple.

A l'intérieur du pays, entre le Rif et le Haut Atlas, le climat se caractérise par des variations élevées entre le jour et la nuit. Les étés y sont chauds et secs et quand le chergui/sirocco (vent d'est venant du Sahara) souffle, les températures peuvent dépasser 40°C. Le climat hivernal est en général agréable pendant la journée grâce au rayonnement solaire, mais les nuits sont froides. Voir l'exemple de Marrakech en figure 2.2.

Dans l'Atlas, le climat varie selon l'altitude. Les étés y sont en général chauds tandis que les hivers y sont froids. Dans des cas extrêmes, le thermomètre peut descendre jusqu'à -20°C et en haute altitude la neige peut tomber abondamment. Voir l'exemple d'Ifrane dans la figure 2.3.

Sur la côte Atlantique centrale et du sud du pays, le climat se caractérise par des hivers et des étés doux ; ceci est dû au courant froid des Canaries et de la brise de mer. Voir figure 2.3.

Dans la région saharienne, les températures varient fortement entre le jour et la nuit. En période d'hiver, le thermomètre, dans les cas extrêmes, peut descendre au-dessous de 0°C et l'été, la température diurne peut s'élever jusqu'à 45°C. Voir l'exemple d'Ouarzazate, juste au sud de l'Atlas, dans la figure 2.6.



Fig. 2.1  
Carte du Maroc

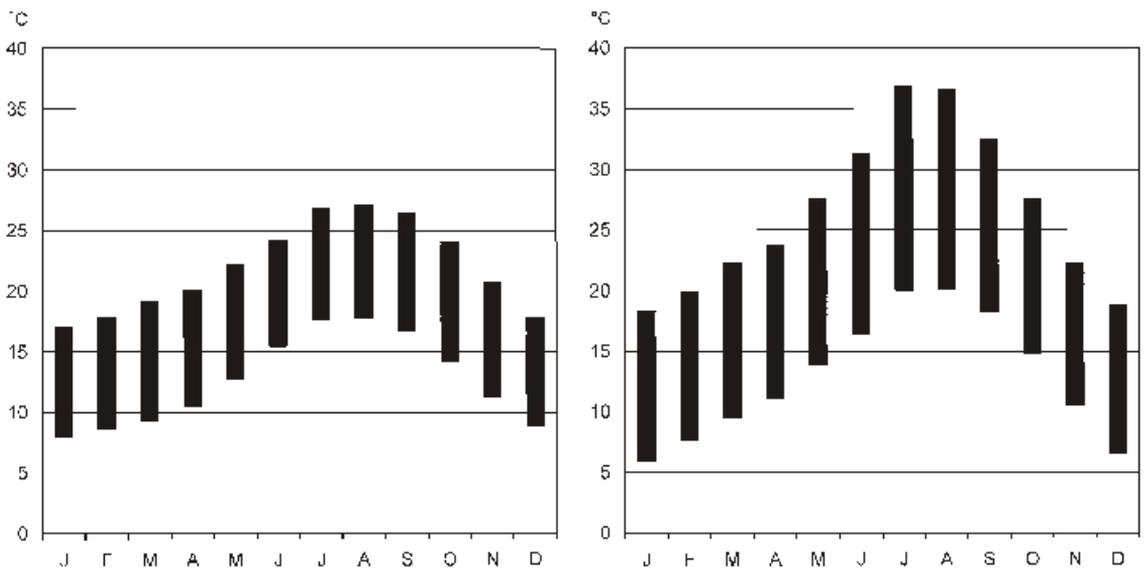


Fig. 2.2 Températures à Rabat (à gauche) et à Marrakech (à droite).  
(Données normales moyennes 1988-97, Direction de la Météorologie Nationale)

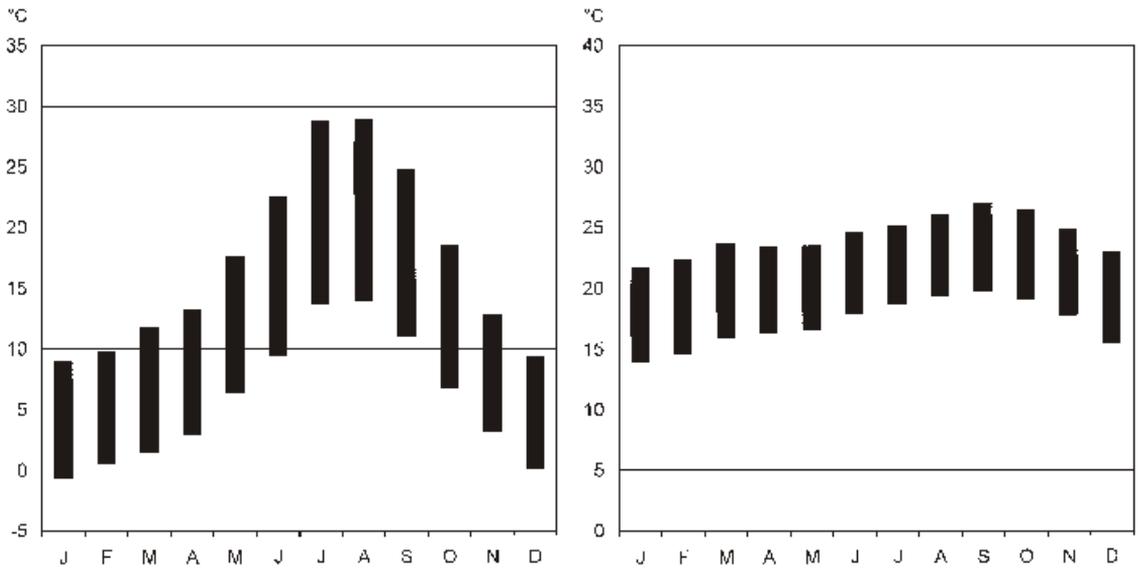


Fig. 2.3 Températures à Ifrane – Moyen Atlas – altitude 1660 m (à gauche) et à Dakhla – littoral Atlantique, Sahara (à droite). (Données normales moyennes 1988–97, Direction de la Météorologie Nationale)

## Le climat à Fès

Fès est située dans une région entre les deux chaînes montagneuses du Rif au nord et du Moyen Atlas au sud-est à latitude 33°58' nord et longitude 4°59' ouest. Le climat se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers froids et neige rare. La température moyenne annuelle est de 17°C et les précipitations sont de 540 mm en moyenne par an. Le climat officiel de Fès est mesuré dans une station située à l'aéroport de Fès-Saïs (à l'extérieur de la ville) à une hauteur de 571 mètres au-dessus de la mer. La figure 2.4 montre les variations de température et de l'humidité relative.

Les vents principaux sont ceux du sud-ouest, du nord-ouest et de l'est.

### Climat d'été

Les mois d'été les plus chauds sont juillet et août. La moyenne respective des températures maximales diurnes et minimales nocturnes est de 34°C et de 17°C. Dans les cas extrêmes la température peut atteindre 45°C quand le vent du désert le chergui (sirocco) souffle de l'est. L'humidité relative varie entre 25 et 80% mais peut, dans les cas extrêmes, être inférieure à 10%. La figure 2.5 montre les variations de la température et de l'humidité relative lors d'un jour d'été normal.

Le rayonnement solaire est très élevé, soit 10 à 11 heures d'ensoleillement par jour en juillet et en août.

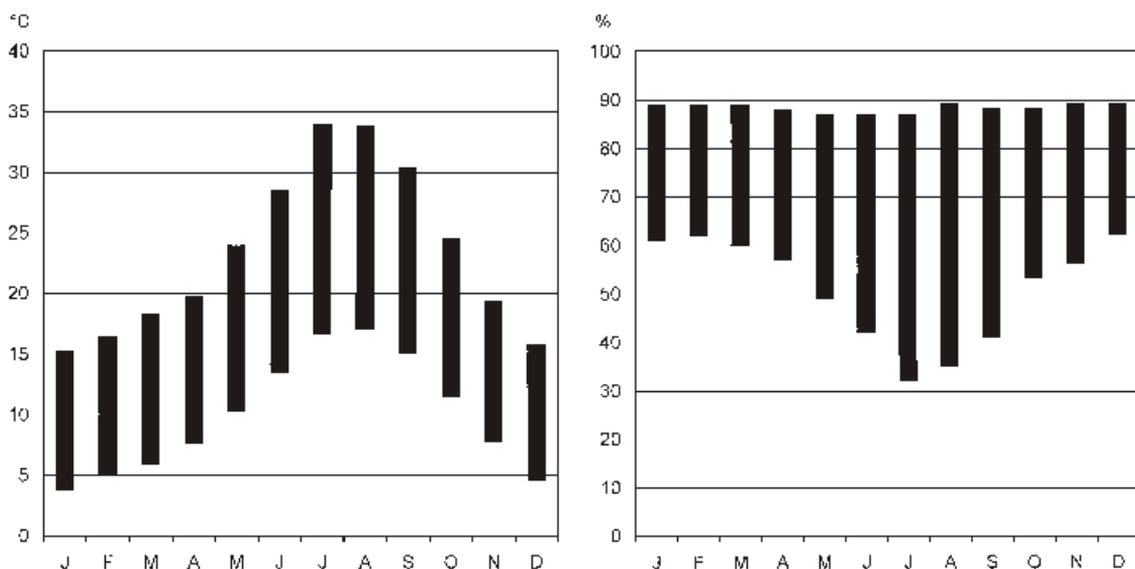


Fig. 2.4 Températures maximales et minimales moyennes (à gauche) et humidité relative à 06 heures et à 18 heures (à droite) à Fès. (Données normales moyennes 1988-97, Direction de la Météorologie Nationale)

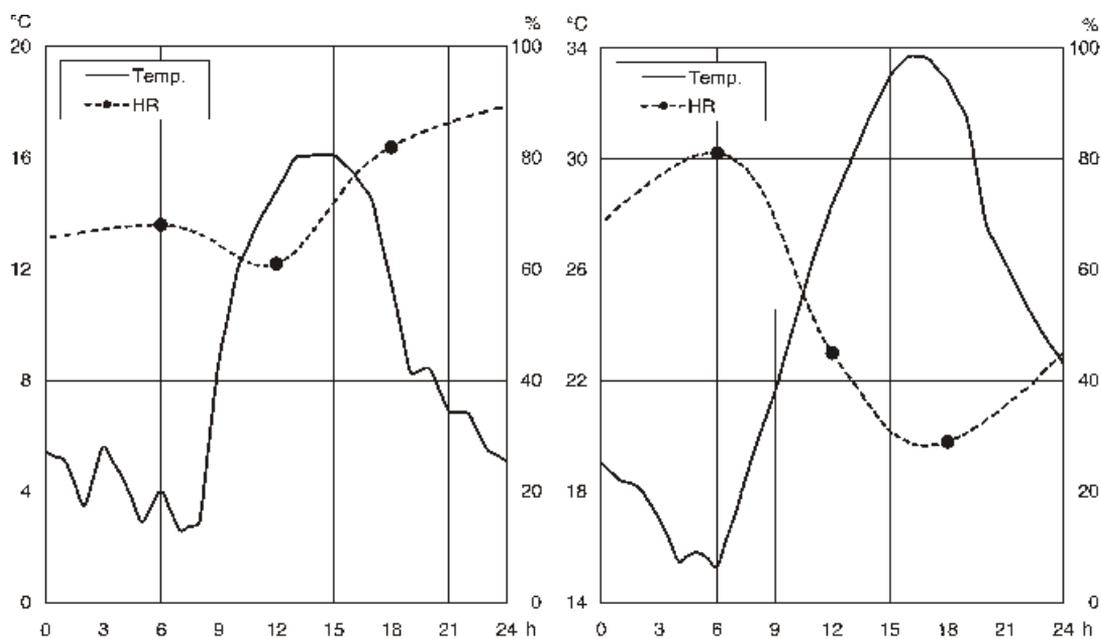


Fig. 2.5 Variations de température et d'humidité relative (HR) au cours d'une journée normale d'hiver (8 fév. 2000, à gauche) et d'une journée normale d'été (26 juil., à droite) à Fès. (Source : Direction de la Météorologie Nationale)

Au cours des mois les plus chauds, les précipitations sont pratiquement inexistantes, moins de 5 mm/mois pour juillet et août et le vent souffle en général du sud-est.

## Climat d'hiver

Les mois les plus froids sont décembre et janvier qui enregistrent des températures moyennes diurne de 16°C et nocturne d'environ 4°C. La température peut descendre au-dessous de 0°C mais la neige est peu fréquente. Pour les mois de décembre et janvier, l'humidité relative varie entre 45 et 90%. La figure 2.5 indique les variations de la température et de l'humidité relative au cours d'une journée typique d'hiver.

Le rayonnement solaire est peu élevé en période d'hiver et décembre, mois le moins ensoleillé, présente en moyenne plus de 6 heures d'ensoleillement par jour.

Quant aux précipitations, elles sont abondantes en hiver avec un cumul de 80 mm en décembre lorsque le vent souffle de l'ouest.

## Le climat à Ouarzazate

La ville d'Ouarzazate est située dans une région montagneuse à une altitude de 1140 mètres, latitude 30°56 nord et longitude 6°54 ouest. Les températures sont extrêmement élevées le jour en été et basses durant les nuits d'hiver. La différence de température entre la nuit et le jour est importante et peut atteindre 15°C. Les températures annuelles minimales et maximales sont indiquées dans la figure 2.6.

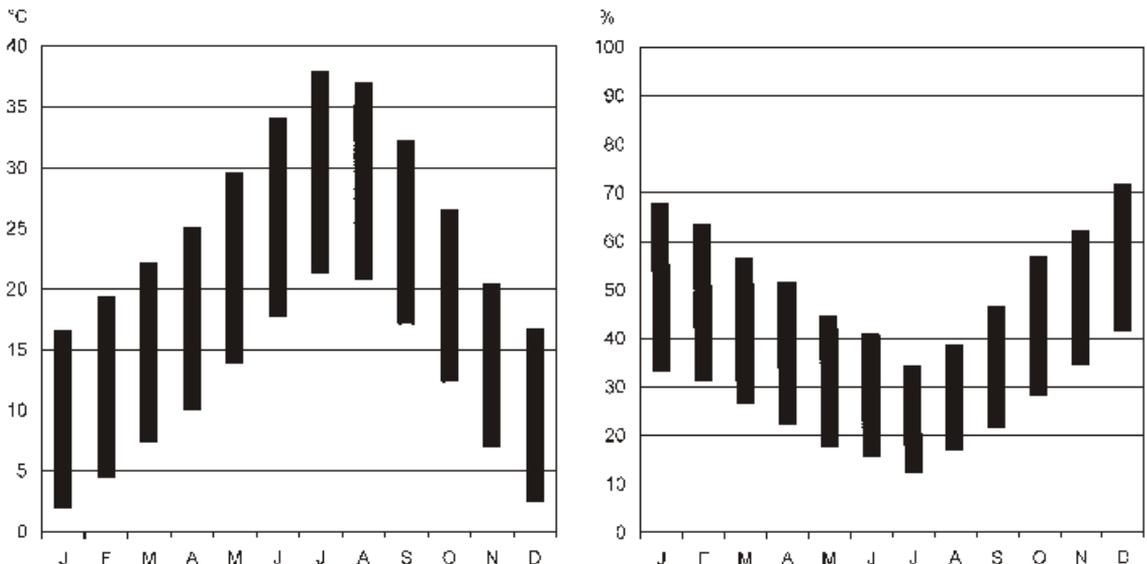


Fig. 2.6 Températures maximales et minimales moyennes (à gauche) et humidité relative à 06 heures et à 18 heures (à droite) à Ouarzazate. (Données normales 1988-97, Direction de la Météorologie Nationale)

L'humidité relative est faible, entre 15 et 40% durant les mois les plus chauds et entre 35 et 70% durant l'hiver, voir figure 2.6. Le rayonnement solaire est très fort avec un rayonnement direct dominant (par temps

clair). Le nombre d'heure d'ensoleillement varie entre environ 7 en hiver et 11 en été.

## Climat urbain

### Les caractéristiques du climat urbain

Au-delà des variations climatiques régionales, on peut constater dans une même région des variations locales dues à différents facteurs tels que l'altitude, la végétation, les vents et les constructions. Ces climats, souvent appelées microclimats, peuvent être fortement différents de ceux qui sont « officiellement » mesurés dans les stations climatiques à l'extérieur de la ville.

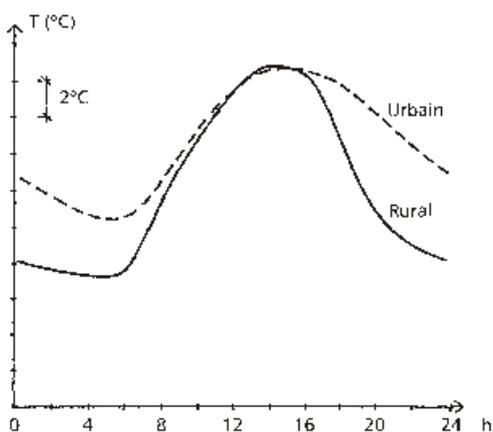


Fig. 2.7  
Différence entre le climat urbain et rural observée par vents faibles et ciel clair (selon Oke 1987)

### L'îlot de chaleur urbain

Le climat urbain correspond à un climat modifié et se différencie en général du climat de la campagne avoisinante. Dans les villes se crée un *îlot de chaleur* « urban heat island » avec une température plus élevée que celle des environs, voir figure 2.7. Ce phénomène est observé particulièrement la nuit lorsque les vents sont faibles et le ciel est clair. En général, l'augmentation de la température est fonction de la grandeur et de la densité des villes.

Les causes de la formation d'un îlot de chaleur urbain sont nombreuses mais trois raisons principales peuvent être retenues :

- La géométrie des constructions
- Les propriétés thermiques des matériaux
- Les activités produisant de la chaleur.

### La géométrie des constructions

La géométrie des constructions urbaines influence le climat des villes de différentes manières. En effet, les rayons de soleil réfléchis et absor-

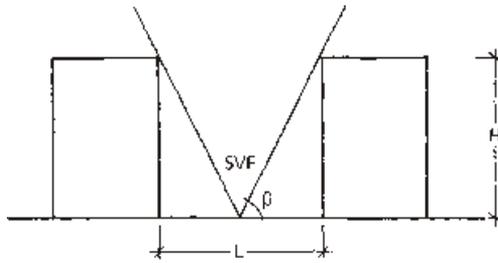


Fig. 2.8  
Rapport H/L et facteur SVF  
(sky view factor)

bés entre les bâtiments opèrent d'une façon assez complexe ; le refroidissement dû au rayonnement net d'ondes longues vers le ciel se produit principalement au niveau des toitures tandis qu'une faible proportion provient des rues et des façades. En conséquence, le refroidissement, qui a lieu principalement en période nocturne, s'effectue lentement au niveau de la rue.

De même, la géométrie des constructions influence l'état des vents en diminuant leur vitesse et en accentuant leur turbulence. Il est aujourd'hui démontré que la température des villes dépend de la hauteur des bâtiments (H) et de la largeur des rues (L) (Oke 1987). Plus le rapport H/L est élevé plus on remarquera le phénomène de l'îlot de chaleur. Au lieu du rapport H/L, on utilise souvent le *facteur de vue vers le ciel* « sky view factor » (SVF) qui définit la section de la rue qui s'ouvre vers le ciel et qui s'exprime selon la formule suivante.

$$\text{SVF} = \cos \beta \quad (\text{éq. 2.1})$$

où l'angle  $\beta$  est expliqué figure 2.8.

Lors d'un rapport H/L très élevé (faible SVF), on peut obtenir une température diurne inférieure à celle de la campagne avoisinante. Ce phénomène est appelé *îlot de fraîcheur* (« cool island »).

### Les propriétés thermiques des matériaux

Dans les villes, la majorité des sols et des constructions se composent d'éléments lourds tels que l'asphalte, le béton, la pierre et la brique. Ces matériaux, à la différence de la terre et de la végétation des campagnes, ont une inertie thermique importante, ce qui signifie qu'ils peuvent stocker la chaleur et le froid pendant de longues périodes.

### Les activités produisant de la chaleur

Les activités industrielles, le chauffage des bâtiments et la climatisation ainsi que les transports motorisés produisent de la chaleur avec pour effet une augmentation de la température. Pourtant, l'importance des activités produisant de chaleur est limitée (sauf en hiver pour des villes froides) et la chaleur émise dans les rues dépasse rarement  $50 \text{ W/m}^2$ , ce qui est presque négligeable par rapport au rayonnement solaire (Oke, 1987).

## L'influence de la pollution

La pollution de l'air influence aussi le climat. La radiation qui pénètre l'atmosphère est diminuée à cause des polluants, mais la radiation d'ondes longues vers le ciel est aussi diminuée. Par conséquent l'effet net de la pollution est limité (Oke, 1987). Cependant, cette couche d'air pollué peut contribuer à créer un effet de serre (cas de plusieurs grandes villes très polluées).

## L'effet des espaces verts

La végétation a un impact évident sur le climat urbain. Les effets d'îlots de chaleur les plus importants se produisent dans les zones urbaines de forte densité où il n'existe malheureusement que peu d'espaces verts.

La température de l'air dans les parcs est semblable à celle des zones construites au cours de la journée, mais plus fraîche la nuit. Les raisons majeures de cette température nocturne plus basse dans les parcs sont les mêmes que pour les zones rurales : un facteur vue vers le ciel (SVF) plus important et un stockage plus faible de la chaleur. Dans les régions arides et semi-arides, les parcs irrigués procurent un climat beaucoup plus frais que dans leurs zones environnantes. En présence d'un excès d'eau, l'évaporation provenant de la végétation et des sols humides est très forte et l'air ambiant produit une énergie ayant un effet rafraîchissant (« effet d'oasis »). Cependant, si l'irrigation est interrompue, cet effet finira par disparaître (Oke 1987).

Des plantations d'arbres le long des rues ont une influence sur le microclimat. On peut constater un abaissement de la température de jusqu'à 2°C sous l'effet de l'ombre apportée par les arbres. Les arbres créent un climat plus stable au niveau des rues : des journées plus fraîches et des nuits plus chaudes.

## L'influence de la vitesse du vent

En général la vitesse du vent est inférieure dans les villes parce que les bâtiments fonctionnent comme des obstacles qui diminuent sa vitesse. Mais la morphologie urbaine peut être telle que la vitesse du vent sera plus grande que dans la campagne, surtout en présence de grands bâtiments.

# Confort thermique

## Influence du climat sur le confort thermique

Le confort thermique signifie le bien être physique des êtres humains exposés à une influence climatologique. Les facteurs climatiques qui influencent le confort thermique sont *la température de l'air, l'humidité de l'air, le rayonnement* (ondes courtes et longues) et *les mouvements de l'air*. En plus de ces facteurs « extérieurs » il faut y ajouter d'autres

facteurs propres à chaque individu tels que *le degré d'activité et l'habillement*.

## Température et humidité de l'air

Par température de l'air, on entend la température ambiante mesurée soit à l'intérieur soit à l'extérieur à l'ombre.

L'humidité de l'air, pouvant être exprimée en tant qu'humidité relative ou pression de vapeur, influence le confort principalement sous de fortes températures de l'air : plus l'humidité de l'air est élevée moins la personne supporte des températures hautes, voir figure 2.9.

## Le rayonnement

Lors d'une exposition au soleil, rayonnement d'ondes courtes, l'habillement et/ou la peau absorbent les rayons qui se transforment en chaleur.

Un échange de chaleur s'effectue entre le corps de l'être humain et les surfaces avoisinantes par un rayonnement d'ondes longues. Si par exemple, un ou plusieurs murs d'une pièce sont chauds (par exemple pour des raisons d'exposition au soleil), on sentira une température plus élevée à l'intérieur que la température de l'air mesurée, la raison étant l'apport des murs chauds. De la même manière, on pourra sentir qu'il fait plus froid à l'extérieur que le thermomètre montre, la raison étant ici le rayonnement nocturne net vers le ciel. Pour mieux prendre en considération cet aspect on utilise souvent *la température opérative*. La température opérative est la mesure de la température que l'on ressent vraiment, c'est-à-dire qu'elle prend en compte l'échange des rayonnements avec l'ambiance. Pour une pièce, la température opérative  $t_{op}$  peut être exprimée selon la formule simplifiée suivante :

$$t_{op} = [t_a + A_s \times t_s / A_s] / 2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{éq. 2.2})$$

soit  $t_a$  = température de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $t_s$  = température des surfaces ( $^{\circ}\text{C}$ ) des parois  
 $A_s$  = surface ( $\text{m}^2$ ) des parois

## Mouvements de l'air

Les mouvements de l'air ont un effet de refroidissement dont la raison est la réduction du pouvoir isolant de la couche d'air qui entoure le corps. Plus la vitesse de l'air est élevée plus on ressentira un effet de froid. Par contre, pour des températures supérieures à  $37^{\circ}\text{C}$ , on sentira plutôt un effet d'un apport de chaleur (Givoni 1998).

## Degré d'activité humaine

L'être humain émet une chaleur métabolique continue. La quantité de chaleur émise dépend non seulement de la taille du corps et du degré d'activité mais aussi de l'individu (âge, sexe, etc...). Le tableau 2.1

indique la chaleur métabolique, en Watt et en unité met, selon différents degrés d'activités pour un adulte normal d'âge moyen.

Tableau 2.1

## Chaleur métabolique selon différentes activités

Activités	Chaleur métabolique	
	W	met
Dormant	75	0,7
Au repos, assis	110	1,0
Au bureau	110–145	1,0–1,4
Marche lente	135–180	1,3–1,7
Ménage	210–360	2,0–3,4
Marche rapide	270–395	2,6–3,8
Travaux manuels	425–505	4,0–4,8

(Source : ASHRAE 1997)

## Habillement

L'habillement fonctionne comme une couche isolante et contribue ainsi à accroître la température du corps. Le pouvoir isolant est normalement exprimé en *clo*, une unité standard pour la résistance à la chaleur de l'habillement (1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>.K/W). Le tableau 2.2 montre les valeurs clo pour différents vêtements.

Tableau 2.2

## Valeurs clo pour différents vêtements (y compris les chaussures)

Vêtements	Isolation (clo)
Short, chemise manche courte	0,4
Pantalon, chemise	0,6
Comme ci-dessus, plus veste	1,0
Costume laine, gilet, chemise manches longues	1,5
Jupe/robe, chemisier, collant	0,5–0,7
Comme ci-dessus plus pull laine manches longues	1,1
Vêtement chaud plus manteau laine	2,0–2,5

(Source : ASHRAE 1997, Markus et Morris 1980)

## Définition des zones de confort

Une zone de confort indique les limites, pour la température, l'humidité de l'air, etc., dans lesquelles le climat est considéré comme confortable. La zone de confort est entre autres utilisée comme instrument permettant de savoir quand il faut utiliser une forme active de production de chaleur ou de froid, par exemple à quelle température doit-on mettre en marche un appareil de chauffage.

Chaque être humain réagit différemment aux conditions climatiques externes, certains sont extrêmement sensibles au froid tandis que

d'autres sont extrêmement sensibles à la chaleur. Dans ce contexte, il serait peu réaliste de définir une zone de confort qui conviendrait à tout le monde. Cependant on définit souvent la zone de confort comme celle où le confort est éprouvé par 80 ou 90% de la population.

De nombreuses propositions existent dans la littérature spécialisée montrant sous forme de diagrammes ce qu'est une zone de confort. Cependant, conditionnée par de nombreux facteurs, il est difficile d'exposer dans un seul diagramme une zone de confort. Nous présentons ci-après l'exemple du diagramme du confort psychrométrique.

### Diagramme de confort psychrométrique

On utilise souvent ce que l'on appelle un diagramme psychrométrique dans lequel il est pris en compte aussi bien la température que l'humidité afin d'obtenir la zone de confort. La figure 2.9 montre un exemple de ce type de diagramme selon Markus et Morris (1980). Le diagramme est réalisé en fonction de la vitesse du vent, du degré d'activité et de l'habillement.

L'axe de température horizontal indique soit les températures à l'ombre (pour les études de l'extérieur) soit la température opérative (pour les études à l'intérieur des bâtiments). Le pouvoir de refroidissement du vent fait que la zone de confort se déplace vers la droite plus la vitesse du vent augmente. A l'extérieur, l'apport de chaleur provoqué par les rayonnements solaires a un effet négatif dans un climat de températures élevées, mais positif dans un climat de faibles températures.

### Variation de la zone de confort dans le temps

Le diagramme de confort psychrométrique ne permet pas de dire à quel moment de la journée (ou de l'année) le climat se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone de confort. Afin d'étudier l'aspect temps, on peut présenter la zone de confort dans un diagramme comprenant la température et le temps, voir figures 3.23 et 3.24.

### Le confort thermique urbain à Fès

La figure 2.9 représente les variations de la température et de l'humidité relative d'un jour typique pour les mois de janvier, d'avril, de juillet et d'octobre dans un diagramme psychrométrique avec une zone de confort. Cette dernière montre la zone dans laquelle 80% des personnes se sentent confortables (Markus et Morris 1980) et se base sur l'hypothèse d'une vitesse de vent moyenne dans les zones urbaines de Fès de 1 m/s et un degré d'activité de 1,3 met (correspondant à une marche lente). La limite inférieure (à gauche) considère un habillement correspondant à 1,4 clo (vêtements d'hiver) et la limite supérieure (à droite) de 0,6 clo (correspondant à des vêtements d'été).

L'automne et le printemps sont les saisons les plus agréables, le climat s'intégrant en majeure partie dans la zone de confort. Au cours des

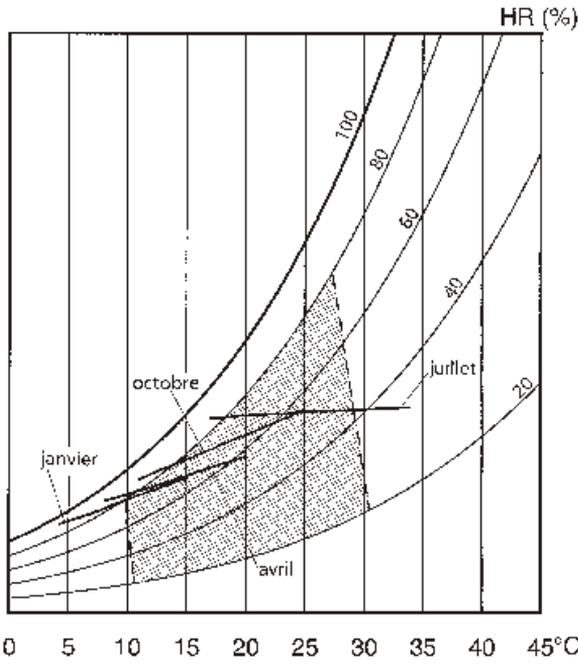


Fig. 2.9  
Zone de confort thermique de Fès selon Markus et Morris. Les lignes montrent les variations minimales et maximales moyennes de la température et de l'humidité relative pour les mois de janvier, d'avril, de juillet et d'octobre

mois de juillet et d'août, le climat se maintient en dehors de la zone de confort pendant la partie chaude de la journée. Au cours de l'hiver le climat n'est pas confortable pendant la nuit.

# Urbanisme adapté au climat

Le climat dans les villes se différencie de celui des campagnes environnantes étant donné que la géométrie des villes, les matériaux utilisés et les sources de chaleur artificielles contribuent à créer un microclimat spécial. Même au sein d'une agglomération, le microclimat peut être différent selon les quartiers. Le climat urbain influence directement les habitants qui se déplacent à l'intérieur de l'agglomération et indirectement le climat ambiant dans un bâtiment.

A ce jour, il n'existe aucune méthode simple et reconnue permettant de réaliser une conception urbaine adaptée au climat. Les connaissances acquises ne sont que rarement utilisées et la structure urbaine est définie à partir de normes souvent copiées provenant de pays ayant un climat tout à fait différent.

La ville de Fès a fait l'objet d'une étude comparative entre deux quartiers présentant un tissu urbain différent. A cet effet, deux quartiers ont été retenus : un quartier traditionnel dans le centre de la Médina présentant une forte densité urbaine et un quartier moderne en périphérie de la ville présentant une trame urbaine régulière et un tissu urbain de faible densité. Le but était d'étudier l'influence du tissu urbain et de la géométrie sur le microclimat des deux quartiers.

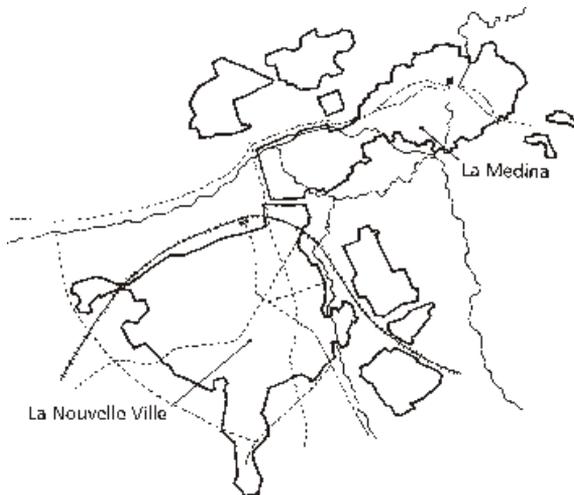
Dans le domaine de la recherche climatique dans une zone urbanisée, la notion de canyon urbain est un concept primordial et une expression de la géométrie urbaine. Cette expression est relative au rapport entre la hauteur des bâtiments ( $H$ ) et de la largeur d'une rue ( $L$ ). Ainsi lorsque l'on parle d'un canyon de rue (« street canyon ») profond cela signifie que la hauteur des bâtiments est élevée tandis que la rue est étroite et, à l'inverse, un canyon de rue peu profond implique une rue large et des bâtiments de faible hauteur.

L'étude réalisée à Fès traite des mesures climatiques effectuées sur des canyons de rues de rapport  $H/L$  différent dans les deux quartiers. Et, à cet effet ont été utilisés les modèles disponibles permettant de calculer la température de l'air ambiant dans les canyons de rues.

Les résultats de cette étude montrent entre autres de très grandes différences au niveau du microclimat constaté dans les deux quartiers. Cependant, il est impossible de dire que le climat de l'un des quartiers est meilleur que l'autre ; les deux ayant leurs inconvénients et leurs avantages.

## La ville de Fès

Avec près d'un million d'habitants, la ville de Fès est la quatrième ville du Maroc et est située dans la partie nord-est du pays dans la dépression qui sépare le Moyen Atlas au sud et le Rif au nord (latitude 34° nord). Fès se compose de deux villes distinctes : c'est-à-dire des parties construites sur des principes d'urbanisation totalement différents. La Médina, un exemple d'urbanisme traditionnel islamique du moyen âge, et la Nouvelle Ville, un exemple d'urbanisme français de l'époque coloniale.



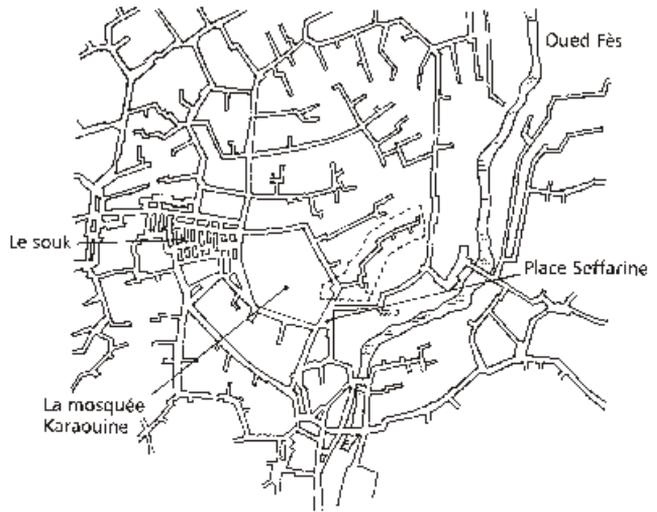
*Fig. 3.1  
Fès et ses deux villes distinctes. La Médina avec ses rues serpentantes, contraste de la Nouvelle Ville avec son tissu urbain rectangulaire*

La Médina de Fès est une des plus vieilles villes moyenâgeuses au monde fonctionnant encore comme cité ; une ville aux rues serpentantes, aux nombreuses ruelles et palais entourée d'un haut mur d'enceinte. La ville fut déclarée patrimoine culturel international en 1979 par l'UNESCO qui déclara alors : « Fès est une cité-musée surprenante et l'une des plus grandes métropoles islamiques où la variété des couches démographiques se reflète dans la plus grande variété de formes architecturales et de paysages urbains. » Située sur un plateau et séparée de la Médina, la Nouvelle Ville de Fès a été au départ construite pour une population européenne. Le premier plan d'urbanisme réalisé en 1917 par l'urbaniste français Henry Proust correspondait à l'idéal européen du début du XX<sup>ème</sup> siècle. Aujourd'hui, la Nouvelle Ville est le centre économique de l'agglomération et abrite la majeure partie des administrations publiques.

### Quartier Seffarine – Médina

Situé au centre de la Médina, Seffarine est le quartier le plus ancien, un quartier dominé aujourd'hui par les commerces, le marché, les écoles et la grande mosquée Karaouïne. Seffarine est non seulement le quar-

Fig. 3.2  
Centre de la Médina  
avec le quartier  
Seffarine



tier le plus dense de la Médina mais il est aussi le quartier où l'on trouve le plus de variations d'architecture traditionnelle.

### L'espace urbain – rues et places

Située devant la bibliothèque, la place Seffarine est l'une des rares places de la Médina. De forme triangulaire, la place, en pente vers le sud et recouverte de pierres, est desservie par 4 rues principales. Plantée d'arbres autrefois, la place ne voit pousser qu'un seul arbre aujourd'hui apportant de l'ombre.

Les rues sont étroites et la largeur ne dépasse pas 5 m pour la rue principale tandis que les impasses, donnant accès aux habitations, n'atteignent que 1,2 m. L'étroitesse des rues et la hauteur des maisons de 12 à 15 m donnent un urbanisme compact et dense, les rues formant de profondes entailles à travers la ville. Serpentine et irrégulières, les rues changent souvent d'orientation si bien que les bâtiments se font ombrager.

Les rues ne sont pas seulement étroites, elles sont aussi souvent couvertes, protégées parfois par une pièce d'habitation, des fenêtres en saillie ou des avancées sur toute la façade, autant de constructions rapportées afin d'accroître la surface habitable et avec pour conséquence des rues dans l'ombre. La circulation automobile est pratiquement impossible. Les transports dans ce quartier sont assurés à dos d'âne ou à pied.

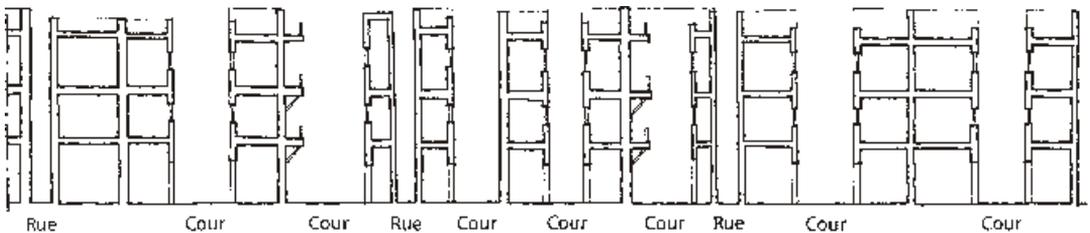


Fig. 3.3 Coupe de principe du tissu urbain traditionnel et dense

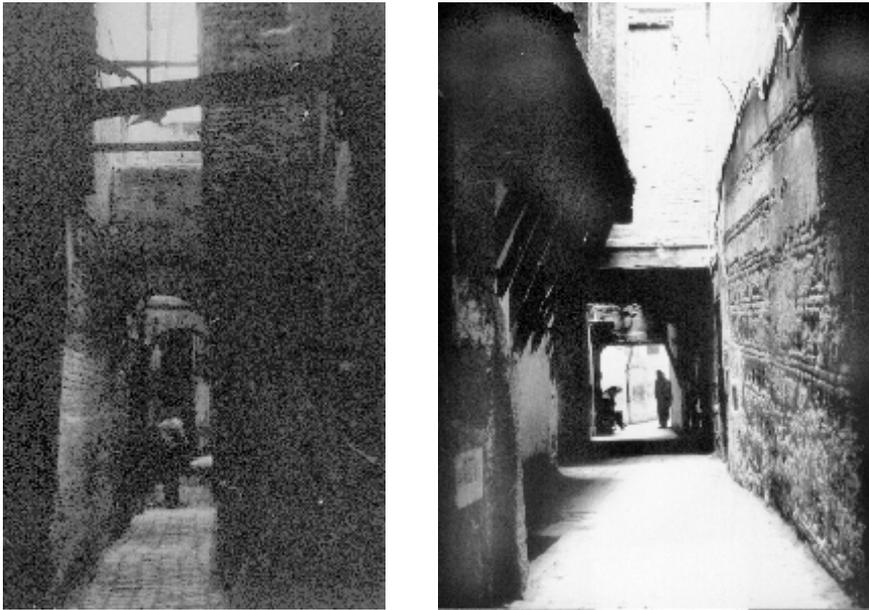


Fig. 3.4 Rues résidentielles du quartier Seffarine

## Typologie

L'ensemble des maisons constituant le quartier se compose de cours intérieures de différentes grandeurs fonctionnant comme centre de rencontre des ménages. Autour de la cour, les pièces sont multifonctionnelles et leur utilisation est différente selon la période du jour. Les bâtiments sont de deux et trois étages avec une terrasse sur le toit qui, lorsqu'elle est utilisée, est entourée d'un mur. Ces bâtiments introvertis ont les portes et les fenêtres donnant sur la cour décorée. La porte d'entrée

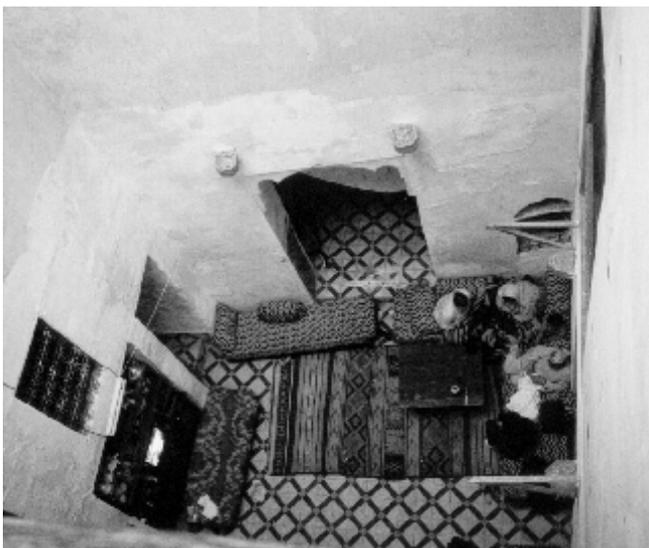


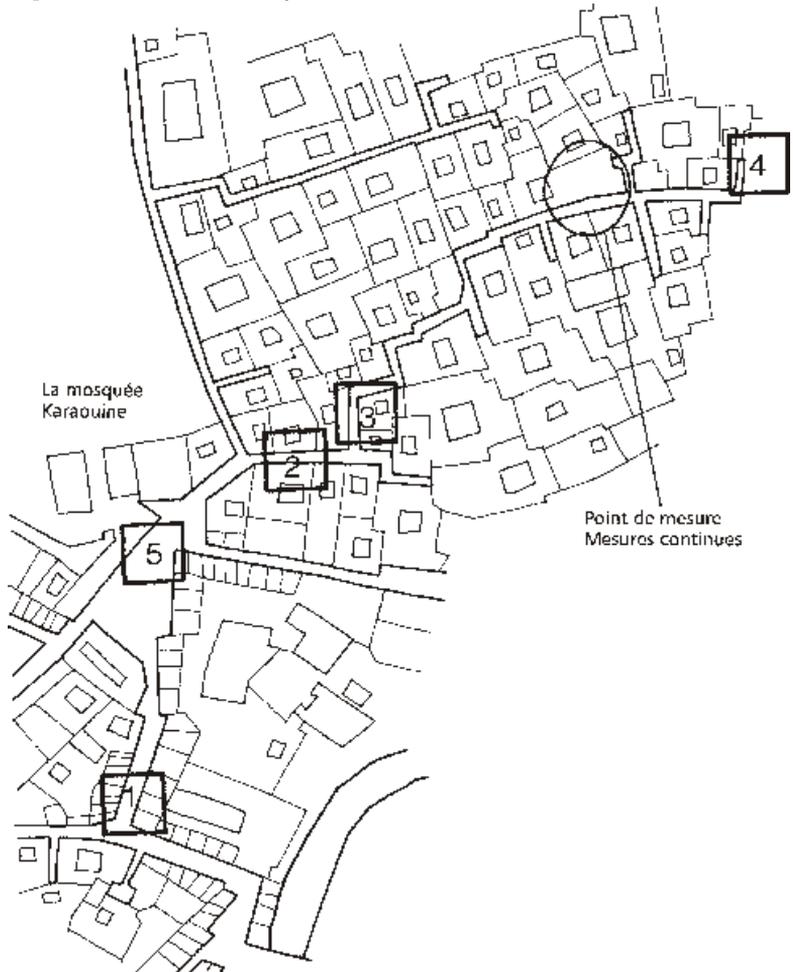
Fig. 3.5  
Habitation traditionnelle  
dans le quartier Seffarine

est le seul contact avec la rue et les façades construites en briques et donnant sur la rue sont seulement recouvertes d'un simple enduit. De tailles variées, les bâtiments d'habitation mitoyens du quartier accueillent une population de statut social différent.

## Les points de mesure

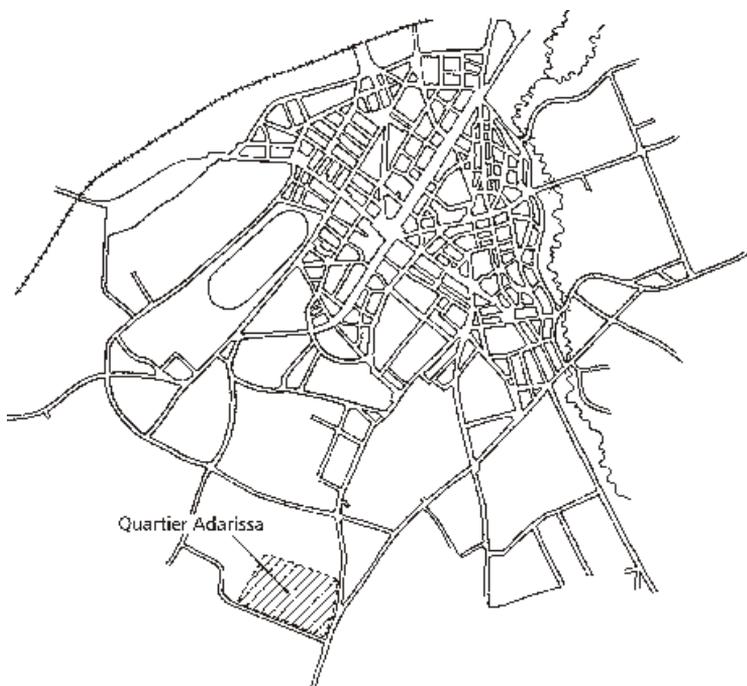
La première série de mesures réalisées dans le cadre de cette étude avait pour but d'étudier l'impact de l'orientation des rues et celui du rapport H/L sur le microclimat. L'ensemble des mesures momentanées a été réalisé à l'aide d'un instrument portable. Cinq points de relevé ont été retenus : trois points dans des rues d'orientations et de largeurs différentes (points 1, 2 et 4), un point dans une rue protégée par une construction annexe (point 3) et un point sur une place (point 5). Au cours de l'étude, nous avons choisi un point de mesure dans un canyon de rue orienté approximativement est-ouest afin d'effectuer des relevés en continu sur une année. Le but était de confirmer les résultats et d'étudier plus en détail un canyon de rue.

Fig. 3.6  
Plan du Quartier  
Seffarine. Les points  
de mesure 1 à 5 des  
mesures momenta-  
nées ainsi que le  
point de mesure des  
mesures continues



## Quartier Adarissa – Nouvelle Ville

Le quartier Adarissa, qui a été construit à la fin des années 80, est situé au sud-ouest en périphérie de la Nouvelle Ville à l'endroit où se rencontrent deux grands axes routiers. Le quartier possède un centre composé de commerces et de bureaux administratifs. Ce quartier représente un faubourg avec des immeubles et maisons marocaines, type le plus courant dans la construction d'aujourd'hui. Au sud de ce quartier il n'existe aucune construction.



*Fig. 3.7  
La Nouvelle Ville  
avec le quartier  
Adarissa au sud*

### L'espace urbain – rues et places

Le quartier possède une place centrale plantée d'arbres et d'arbustes. Ces plantations sont récentes et n'apportent que peu d'ombre.

Prévu pour la circulation automobile, le quartier d'Adarissa avec ses larges rues, possède des espaces de stationnement et de larges trottoirs. La chaussée de 10 m de large est bordée de trottoirs d'une largeur de 2,5 m. Les voitures sont stationnées le long des trottoirs ou rentrées dans les garages en sous sol des maisons possédant une cour donnant sur la rue. Les rues sont de grandeurs identiques, sans hiérarchie particulière, ainsi les voies d'accès au quartier sont aussi larges que celles du quartier. Le quartier est conçu à partir d'un axe central desservant le quartier par des rues orientées nord-est – sud-ouest et nord-ouest – sud-est (écart de 30° à 40° de l'axe nord-sud) lesquelles, vu leur largeur, ne permettent pas aux maisons de s'ombrager mutuellement.

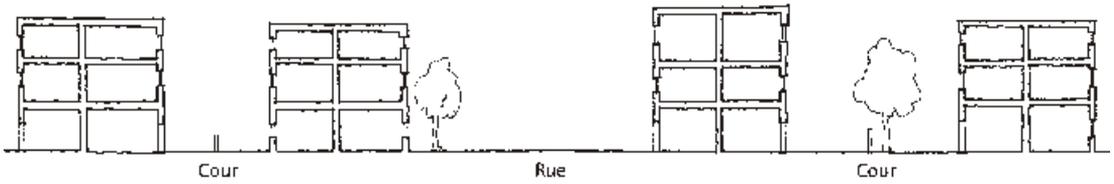


Fig. 3.8 Coupe de principe du tissu urbain moderne

L'absence de rues couvertes, d'arcades et de protection solaire architecturale fait que l'ensoleillement des espaces est maximal. Par contre, les rues sont bordées d'arbres et ces plantations ainsi que les arbres des cours sont entretenus par les habitants eux-mêmes.

## Typologie

Les bâtiments étudiés dans ce quartier se composaient de maisons marocaines comprenant un rez-de-chaussée plus un ou deux étages (R+1 et R+2) soit une hauteur de 9 et 12 m. En outre, plusieurs maisons possèdent aussi un demi sous-sol. Les maisons sont extroverties avec les portes et les fenêtres en façade sur la rue. Un mur entoure la cour donnant sur la rue et il existe une autre cour en partie arrière. Certaines familles ont planté des arbres et des arbustes, d'autres pas. Enfin, un mur de voisinage délimite les cours. Conçues au départ pour loger une famille, nombreuses sont les maisons transformées aujourd'hui en appartements.



Fig. 3.9 Rue résidentielle du quartier Adarissa avec des maisons marocaines (à gauche) et vue vers l'entrée nord du quartier avec des immeubles (à droite)

## Les points de mesure

La première série de mesures réalisées dans le cadre de cette étude avait pour but d'étudier l'impact de l'orientation des rues et celui du rapport H/L sur le microclimat. L'ensemble des mesures momentanées a été réalisé à l'aide d'un instrument portable. Cinq points de relevé ont été retenus : trois points dans des rues d'orientations différentes (points

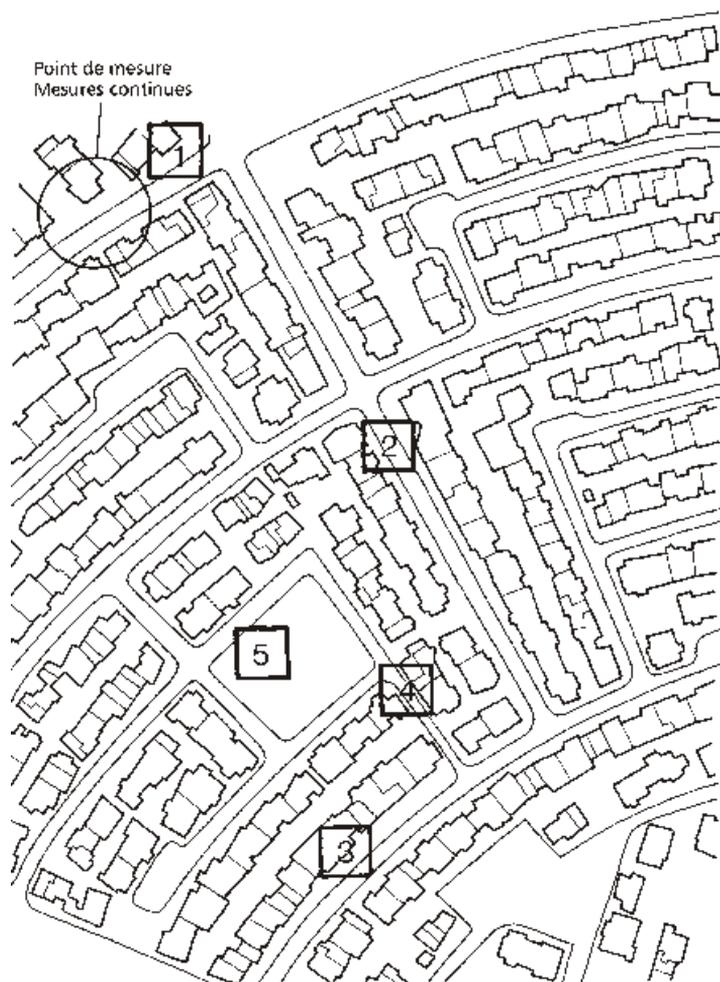


Fig. 3.10  
Plan du Quartier  
Adarissa. Les  
points de mesures  
1 à 5 des mesures  
momentanées  
ainsi que le point  
de mesure des  
mesures conti-  
nues

1, 2 et 3), un point dans une rue réservée aux piétons (point 4), et un point sur une place (point 5). Au cours de l'étude, nous avons choisi un point de mesure dans un canyon de rue orienté approximativement est-ouest afin d'effectuer des relevés en continu sur une année. Le but était de confirmer les résultats et d'étudier plus en détail un canyon de rue.

## Conclusion des quartiers étudiés

Les deux quartiers ont un certain nombre de points communs :

- circulation motorisée insignifiante,
- absence d'industrie lourde,
- chauffage et climatisation insignifiants des bâtiments.

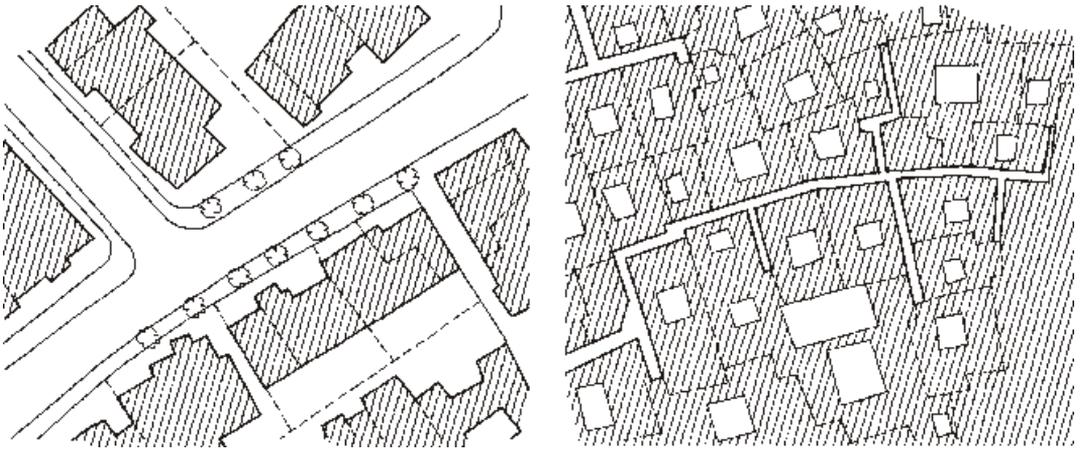


Fig. 3.11 Comparaison des tissus urbains du quartier moderne (à gauche) et du quartier traditionnel (à droite). Les parties grises représentent les rues et les cours, les parties blanches représentent les maisons. Les quartiers sont présentés à la même échelle

Il n'existe donc en pratique aucune source de chaleur artificielle et les microclimats urbains des deux quartiers dépendent principalement de la géométrie urbaine et des matériaux de construction utilisés. Pour ce qui est des matériaux de construction, les deux quartiers montrent des similitudes si l'on compare : d'une part la brique et la pierre utilisées à Seffarine et le béton et l'asphalte utilisés à Adarissa, ces matériaux ayant une chaleur massique similaire. La différence principale constatée entre les deux quartiers se situe au niveau de la géométrie : la configuration et la densité des quartiers d'une part et l'architecture et l'épaisseur des parois d'autre part.

Dans le quartier Seffarine l'ensemble de la superficie occupée par les rues et les cours représente environ  $1/3$  de la superficie totale et, étant donné la densité des constructions, on peut estimer que moins de  $1/3$  du sol est ensoleillé pendant la journée. Dans le quartier Adarissa l'ensemble de la superficie occupée par les rues et les cours représente environ  $2/3$  de la superficie totale et seuls les  $1/3$  de la surface du sol sont occupés par des bâtiments d'habitation. La différence de géométrie des quartiers implique des différences sur les facteurs ci-après, qui à leur tour influencent le microclimat :

- L'ensoleillement et la protection solaire,
- Le rayonnement de grande longueur d'ondes vers la voûte céleste,
- Le stockage thermique,
- La protection contre le vent.

# Mesures du climat urbain à Fès

## Procédure de mesures

L'étude climatique réalisée à Fès a débuté par des relevés de mesures momentanées sur cinq points et ceci pour les deux quartiers (voir figures 3.6 et 3.10). Les relevés ont été effectués au cours d'une période d'été (du 14 au 23 juillet 1998) et d'une période d'hiver (du 1er au 10 décembre 1998). Ces relevés ont été suivis de mesures en continu dans un canyon de rue situé dans chacun des quartiers. Les mesures continues ont été réalisées pendant une durée d'un an (février 2000 – janvier 2001). Les mesures ont été effectuées de façon continue avec un intervalle de 30 minutes. Ces mesures ont été complétées et contrôlées par des mesures momentanées réalisées pendant une semaine en hiver : du 2 au 6 février, et en été : du 26 au 30 juin, par un équipement portable. Les mesures ont été effectuées simultanément dans les deux quartiers trois fois par jour, au lever du jour, à midi et après le coucher du soleil.

Les paramètres climatiques mesurés avec les instruments permanents sont les suivants :

- *Température de l'air*, mesurée au niveau du toit d'un des bâtiments, dans le canyon de rue et à l'intérieur du bâtiment.
- *Température de surface*, mesurée à la surface du toit et des murs orientés nord et sud sur la rue.
- *Humidité relative*, mesurée dans la rue et à l'intérieur du bâtiment.

Les paramètres climatiques mesurés avec les instruments portables sont les suivants :

- *Température de l'air*, mesurée dans le canyon de rue à 2 m du niveau du sol.
- *Température de surface*, mesurée sur les façades dans le canyon de rue à 1,5 m du niveau du sol et à la surface de la rue.
- *Vitesse du vent*, mesurée horizontalement à 2 m de hauteur et verticalement à 1 m du sol.

## Équipement de mesure

Pour les mesures continues, différents types de chaînes d'acquisition de données ont été utilisés :

- *Tinytag Ultra* (Intab 2001), fig. 3.12, a été placé à l'intérieur du bâtiment mesurant la température et l'humidité relative.
- *Tinytag Plus* (Intab 2001), fig. 3.12, a été placé à l'extérieur du bâtiment mesurant la température et l'humidité relative.
- *Pocket-logger* (Pace Scientific 2001), a été placé à l'intérieur du bâtiment muni de 4 sondes permettant de mesurer la température de l'air au niveau du toit et la température des surfaces au niveau des façades nord et sud et sur le toit.

Les instruments utilisés dans un environnement extérieur ont été protégés contre les radiations solaires directes par un gobelet en plastique blanc perforé afin de permettre la libre circulation de l'air autour du capteur.

Pour les mesures momentanées l'instrument portable Swema Air 300 (Swema 2001) a été utilisé.



Fig. 3.12 Tinytag Ultra (à gauche) utilisé pour les mesures à l'intérieur du bâtiment (dimension : 8 × 8 cm) et Tinytag Plus (à droite) utilisé pour les mesures à l'extérieur (dimension : 8 × 8 cm)

## L'emplacement de l'équipement de mesure

Les instruments de mesures ont été installés à différents endroits des rues retenues dans les deux quartiers (figures 3.13 et 3.14).

## Etude comparative du climat urbain des deux quartiers

### Variations climatiques au cours de l'année étudiée

#### Température moyenne hebdomadaire de l'air

La figure 3.15 montre la température moyenne hebdomadaire au cours de la période d'étude (février 2000 – janvier 2001) dans les quartiers de Seffarine et d'Adarissa. La figure montre aussi la température moyenne hebdomadaire officielle (mesurée à l'aéroport). Le diagramme montre l'influence de la forte densité de bâtiments sur la température de l'air relevée dans un canyon, ce qui donne une température du quartier tra-

Fig. 3.13  
Coupe montrant  
l'emplacement des  
points de mesure  
(continues et  
momentanées) au  
quartier traditionnel  
Seffarine

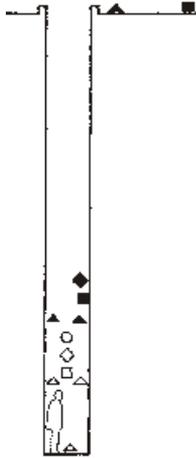
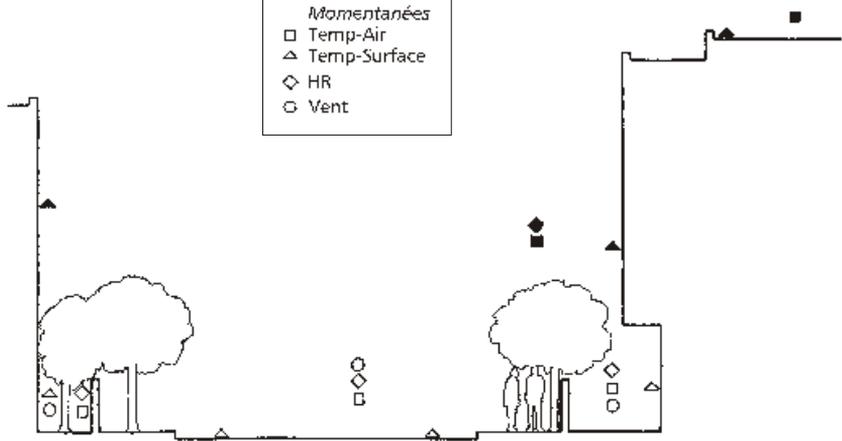


Fig. 3.14  
Coupe montrant  
l'emplacement des  
points de mesure  
(continues et mo-  
mentanées) au quar-  
tier moderne Adaris-  
sa



ditionnel moins variable. On note aussi que les deux quartiers sont plus chauds que la température officielle.

### L'humidité relative moyenne hebdomadaire

La figure 3.16 montre les moyennes hebdomadaires de l'humidité relative relevée au cours de la période de février 2000 à janvier 2001 dans les quartiers de Seffarine et d'Adarissa. Ce diagramme indique une variation plus importante de l'humidité de l'air dans le quartier d'Adarissa tandis que les valeurs sont plus stables pour le quartier traditionnel de Seffarine. En général Seffarine est légèrement plus humide qu'Adarissa.

### Comparaison entre la période d'hiver et d'été

Les premiers relevés montrent de grandes différences entre le climat des rues du quartier traditionnel et celui des rues du quartier moderne indépendamment de la saison (El Kortbi et al. 1999a). Pour ce qui est du quartier moderne, on constate peu de différences entre la température de l'air enregistrée dans les rues d'orientation différente. On cons-

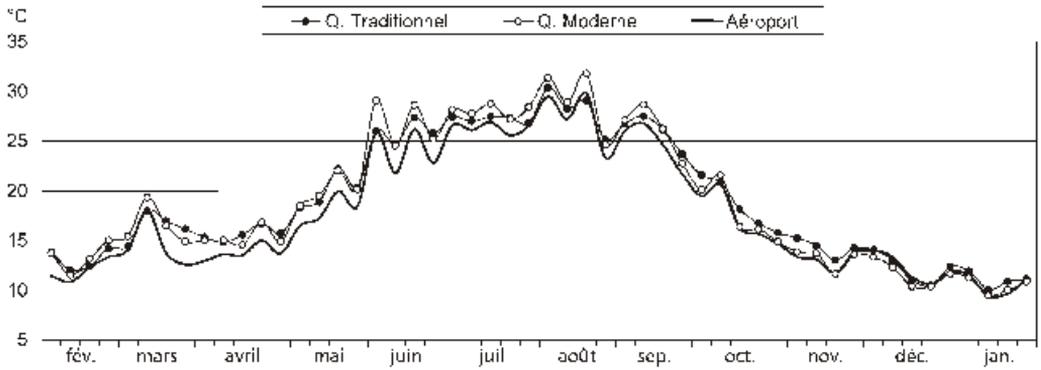


Fig. 3.15 Comparaison des températures moyennes hebdomadaires au cours de la période s'étalant de février 2000 à janvier 2001

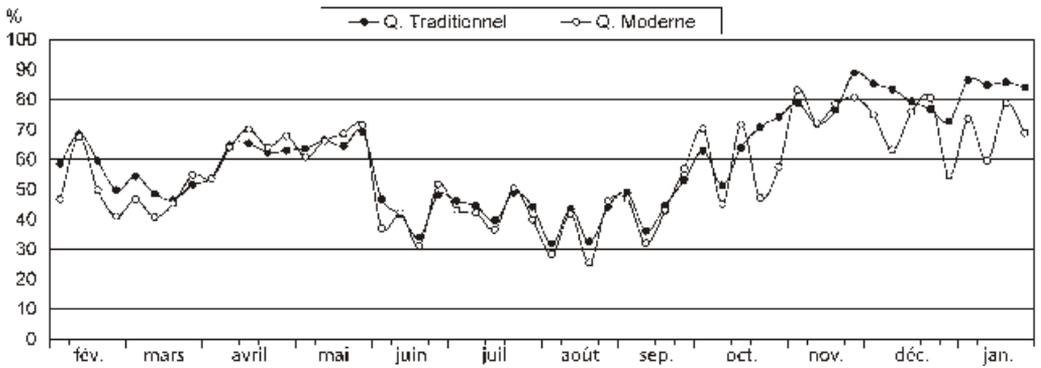


Fig. 3.16 Comparaison des moyennes hebdomadaires de l'humidité relative au cours de la période s'étalant de février 2000 à janvier 2001

tate la même tendance dans le quartier traditionnel. Par contre pour ce dernier, on constate une forte influence du rapport H/L. Par exemple, le point de mesures 1 et dans une certaine mesure le point 5 (figure 3.6) montrent des résultats similaires à ceux du quartier moderne ; les deux points de mesures du quartier traditionnel ayant des rapports H/L similaires à ceux du quartier moderne.

Les figures ci-dessous représentent les résultats enregistrés dans un canyon de rue profond par les instruments installés en permanence dans le quartier traditionnel (Seffarine, fig. 3.13) et dans un canyon de rue peu profond dans le quartier moderne (Adarissa, fig. 3.14). Pour ce qui est de la représentation type d'hiver et d'été, l'étude a retenu le 5 février et le 29 juin 2000. Malheureusement, certains instruments n'ont pas fonctionné au cours de ces dates précises si bien que l'on a retenu aussi le 10 février et le 29 mai, dates du point de vue climatique similaires à celles du 5 février et 29 juin.

### Température de l'air

La température de l'air a été mesurée au niveau du canyon de rue et au niveau de la toiture des bâtiments, les jours étudiés dans cette partie

sont le 10 février pour le cas d'hiver et les 29 mai et 29 juin pour le cas d'été.

### Température de l'air au niveau de la rue

Les températures de l'air relevées dans les deux quartiers d'habitation montrent des différences importantes (figure 3.17). Les différences entre ces deux quartiers sont similaires aussi bien en hiver qu'en été. Durant la période la plus froide du jour, la rue du quartier traditionnel est de 2 à 4°C plus chaude et durant la période la plus chaude du jour, l'après-midi, cette rue présente une température de près de 10°C inférieure à celle du quartier moderne.

L'amplitude diurne se situe autour des 20°C pour le quartier d'habitation moderne tandis qu'elle ne dépasse pas les 6°C dans le quartier traditionnel.

On note que l'îlot de chaleur nocturne est plus important dans le quartier traditionnel. Durant l'après-midi, la température maximale d'Adarissa dépasse la température officielle avec quelques degrés. Par contre, la température maximale au quartier Seffarine est environ 8°C plus basse que l'officielle.

Les deux cas représentent des relevés effectués par ciel clair ou peu couvert.

On a constaté également une différence de température de quelques degrés à proximité des façades du quartier moderne par rapport à celle relevée au milieu de la rue, les températures de l'air sont supérieures à proximité des façades au cours de la nuit et tôt le matin, et inférieures dans l'après-midi.

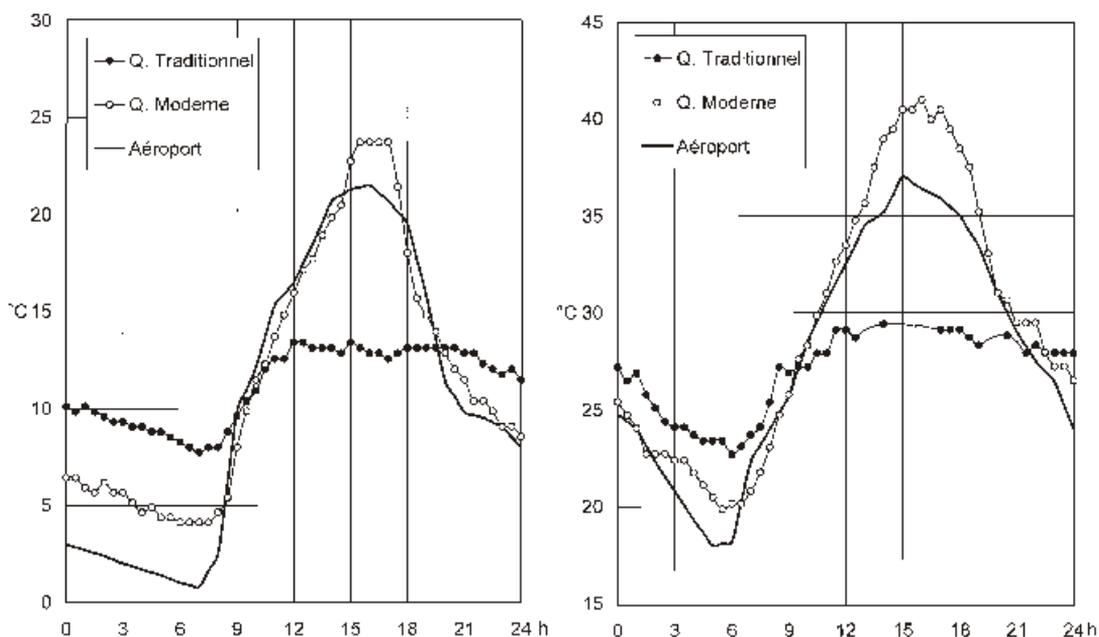


Fig. 3.17 Températures de l'air relevées dans les quartiers d'habitation ainsi qu'à l'aéroport au cours d'un jour d'hiver (10 février, à gauche) et d'été (29 juin, droite)

*Température de l'air au niveau de la toiture et de la rue*

On peut constater une température d'air au niveau de la toiture de Sefarine de 1 à 2,5°C (hiver) et 1 à 5°C (été) supérieure à celle relevée à Adarissa.

En hiver les deux quartiers montrent des différences importantes des températures de l'air entre toiture et canyon de rue. La différence la plus grande se trouve dans le quartier traditionnel, voir figure 3.18.

Dans le quartier moderne, on constate des températures similaires au niveau du toit et à l'intérieur du canyon de rue en été. Par contre, le quartier traditionnel montre une grande différence de température entre le climat de la rue et celui du toit, une différence allant jusqu'à 13°C, voir figure 3.18.

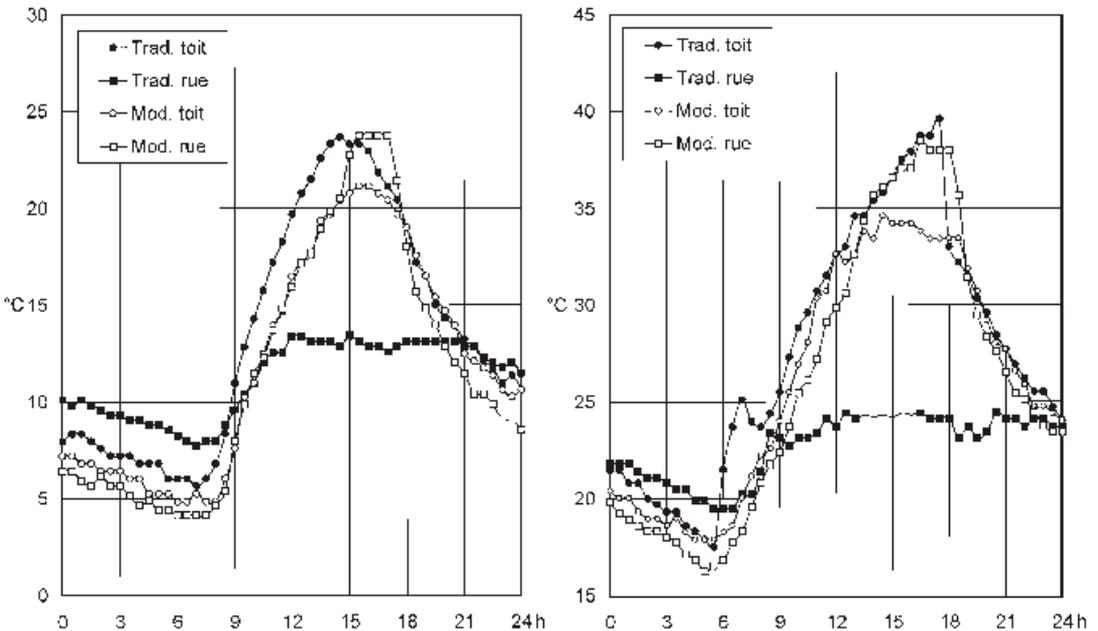


Fig. 3.18 Comparaison entre les températures d'air au niveau de la toiture et au niveau de la rue en hiver (10 février, à gauche) et en été (29 mai, à droite)

**Température de surface**

La température de surface a été mesurée à la surface du toit et des murs orientés nord et sud de la rue par des instruments permanents et aux façades dans le canyon de rue à 1,5 m du niveau du sol et à la surface de la rue par l'instrument portable. Les jours étudiés dans cette partie sont le 5 février pour le cas d'hiver et le 29 mai et 29 juin pour le cas d'été.

*Température de surface des façades*

Dans le quartier traditionnel, les températures de surface ne varient que légèrement et sont pratiquement identiques sur les deux façades et à

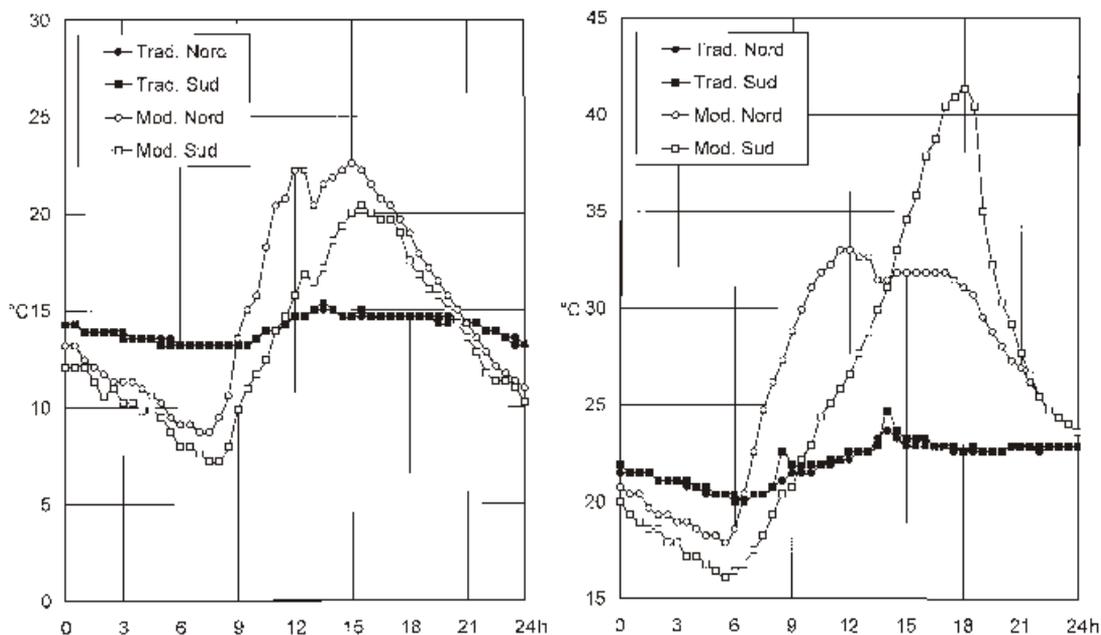


Fig. 3.19 Comparaison entre les températures de surface des façades nord et sud, relevées en hiver (5 février, à gauche) et en été (29 mai, à droite)

des hauteurs différentes (1,5 et 3 m). En février, ces façades ne sont pas exposées au rayonnement solaire à l'exception de la partie près du toit. En juin, la façade sud est exposée au soleil vers 10 heures (figure 3.19).

Dans le quartier moderne les températures de surface des façades varient par rapport à la hauteur des bâtiments. Les instruments de mesures continues situés à une hauteur de 6 à 7 mètres ont enregistré de plus grandes variations que les équipements portables à 1,5 mètre de hauteur. En hiver, la façade du côté nord de la rue (donnant vers le sud) soumise au rayonnement solaire est plus chaude que celle du côté sud de la rue et la température la plus élevée a été presque de 25°C. En juin, par contre, les deux façades sont exposées au soleil, la rue étant orientée nord-est – sud-ouest, les deux façades sont alors exposées au soleil et la façade sud exposée au soleil de l'après-midi devient la plus chaude avec une température maximale de plus de 40°C.

#### Température de surface de la rue et de la toiture

La figure 3.20 montre la comparaison entre les températures de surface des toitures et celles des rues aux quartiers Seffarine et Adarissa.

Dans le quartier traditionnel la surface de la chaussée présente des températures inférieures de 0,5 à 1°C par rapport aux murs et, ceci aussi bien en été qu'en hiver. Le toit, par contre, présente des températures très supérieures, similaires à celles relevées dans le quartier moderne.

Dans le quartier moderne, la surface de la chaussée présente une température maximale presque aussi élevée que sur le toit, aussi bien en été qu'en hiver. La partie nord de la rue plus exposée au soleil (sur-

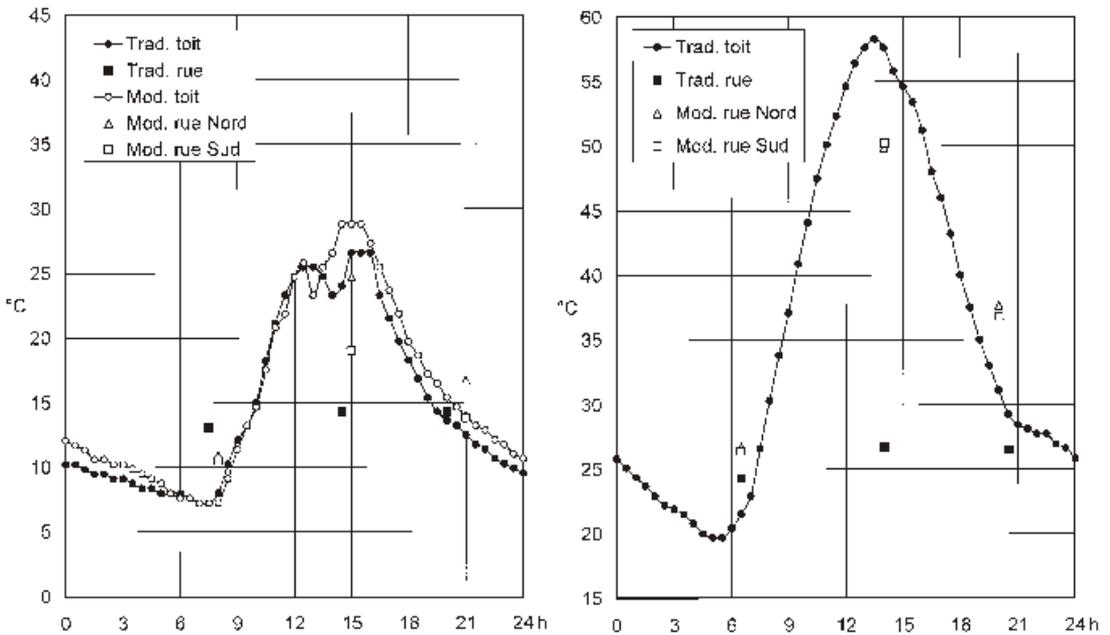


Fig. 3.20 Comparaison entre les températures des surfaces relevées au niveau de la toiture (mesures continues) et de la rue (mesures momentanées) en hiver (5 février, à gauche) et en été (29 juin, à droite) 2000. (NB : le 29 juin, les mesures permanentes au quartier moderne n'ont pas marché)

tout en hiver) montre des températures un peu plus élevées que la partie sud dans la journée.

Dans les deux quartiers, la température de la surface du toit la plus élevée était de plus de 25°C en hiver et de plus de 55°C en été.

## Humidité relative

Pour ce qui est de l'humidité, on peut noter que l'humidité relative (HR) est le miroir de la température ce qui signifie qu'un abaissement de la température provoque une augmentation de l'humidité relative et vice versa.

On constate une grande variation de l'humidité relative dans le quartier moderne tandis que celle du quartier traditionnel est plus stable, voir figure 3.21.

Pour ce qui est de l'humidité absolue, celle-ci a été, en hiver, d'environ 7 g/m<sup>3</sup> dans le quartier traditionnel et de 6 g/m<sup>3</sup> dans le quartier moderne et, en été, d'environ 11 g/m<sup>3</sup> dans le quartier traditionnel et de 9 g/m<sup>3</sup> dans le quartier moderne. Donc on constate un taux légèrement inférieur dans le quartier moderne aussi bien en hiver qu'en été.

## Vitesse du vent

La vitesse du vent a été mesurée aussi bien horizontalement que verticalement. D'une manière générale, on constate une vitesse de vent ho-

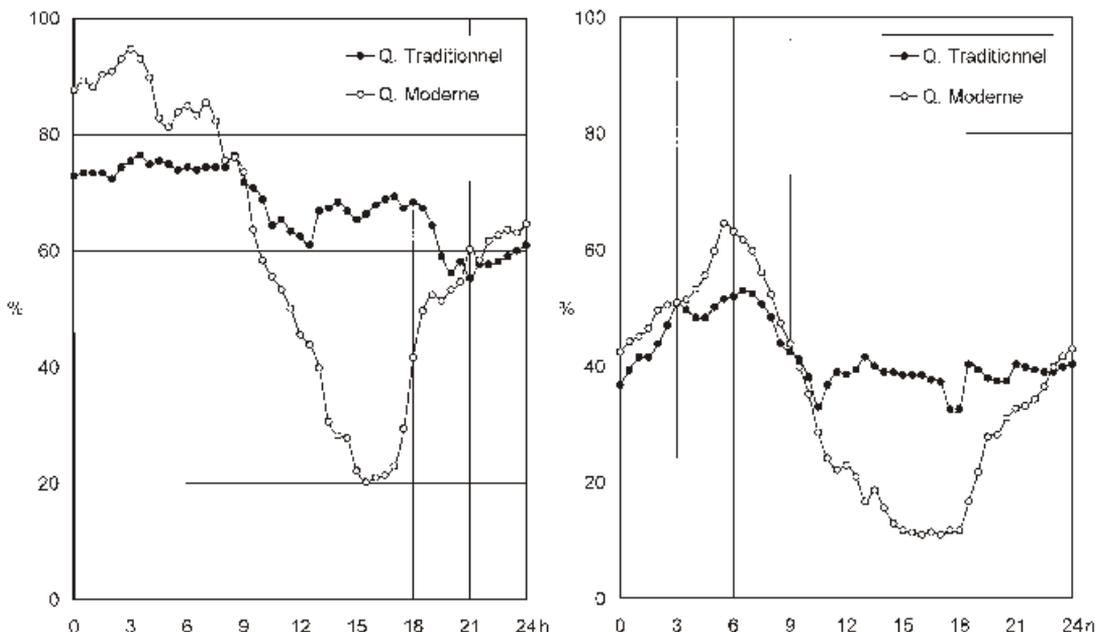


Fig. 3.21 Comparaison de l'humidité relative relevée au niveau de la rue en hiver (10 février, à gauche) et en été (29 juin, à droite)

horizontal supérieure. Au quartier moderne, la vitesse a été mesurée au milieu de la rue et près des façades. D'une manière générale, on constate une vitesse plus élevée au milieu de la rue mais dans certaines occasions c'est le contraire.

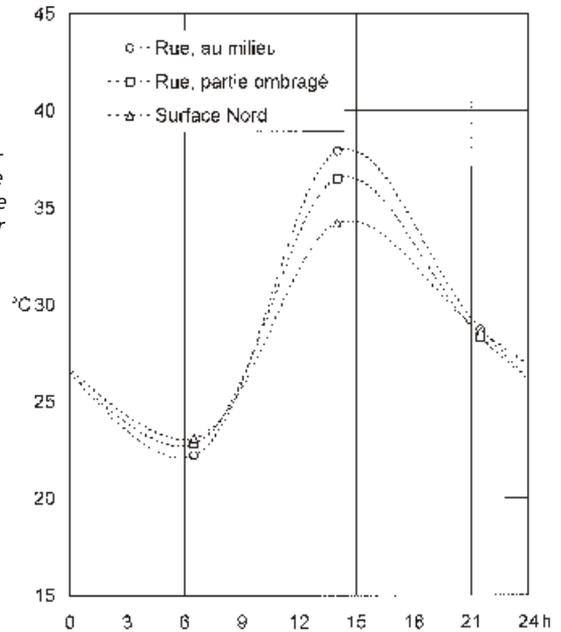
La vitesse du vent varie énormément d'un jour à l'autre et selon l'heure. La vitesse du vent et les turbulences sont moins importantes dans le quartier traditionnel. Les vitesses de vent moyennes mesurées la semaine de février et la semaine de juin 2000 dans les deux quartiers sont indiquées dans le tableau 3.1.

### Influence de la végétation sur le microclimat

Dans le quartier traditionnel, la végétation est inexistante sauf sur la place. Dans le quartier moderne, les relevés climatiques effectués indiquent des températures de surface plus basses lorsque les façades et les rues sont ombragées par la végétation ou d'autres constructions (voir aussi Grundström et al. 2002a). Les relevés climatiques à Adarissa montrent que la température de l'air à l'ombre des arbres est de 1 à 2°C plus basse qu'au centre du canyon de rue, voir figure 3.22.

Fig. 3.22

La température de l'air au centre de la rue est légèrement plus élevée que celle à l'ombre des arbres. La température à la surface des façades ombragées par les arbres est légèrement plus élevée le matin mais notamment plus basse à midi et un peu plus basse le soir



## Confort thermique à l'extérieur

A partir des mesures de la vitesse du vent et de l'humidité, il a alors été possible de définir les limites de température supérieures et inférieures ayant trait au confort thermique des deux quartiers d'habitation. Les zones de confort (figures 3.23 et 3.24) sont basées sur les valeurs moyennes de la vitesse du vent et de l'humidité par jour. Les limites du confort thermique supérieures et inférieures ont été calculées à partir d'un niveau d'activité de 1,0 met et d'une valeur d'habillement de 0,6 clo en été et d'une activité de 1,3 met et d'un habillement de 1,4 clo en hiver, voir tableau 3.1. (Voir aussi les tableaux 2.1 et 2.2.).

Tableau 3.1 Les conditions de confort dans les quartiers moderne (Adarissa) et traditionnel (Seffarine)

	Hiver		Été	
	Moderne	Trad.	Moderne	Trad.
HR moyen (%)	50	65	40	45
vitesse du vent	0,8	0,4	0,7	0,4
activité (met)	1,3	1,3	1,0	1,0
habillement (clo)	1,4	1,4	0,6	0,6

A noter que la température radiante moyenne a été considérée égale à la température de l'air ce qui signifie que le calcul ne considère pas ni le rayonnement solaire ni l'échange de rayonnement de grande longueur d'ondes entre la personne et les objets formant un environnement urbain tels que les murs, la chaussée et la voûte céleste. Pour ce qui est du quartier traditionnel, la marge d'erreur est certainement limitée car le facteur de forme vers le ciel, SVF (voir chapitre 2 *Climat au*

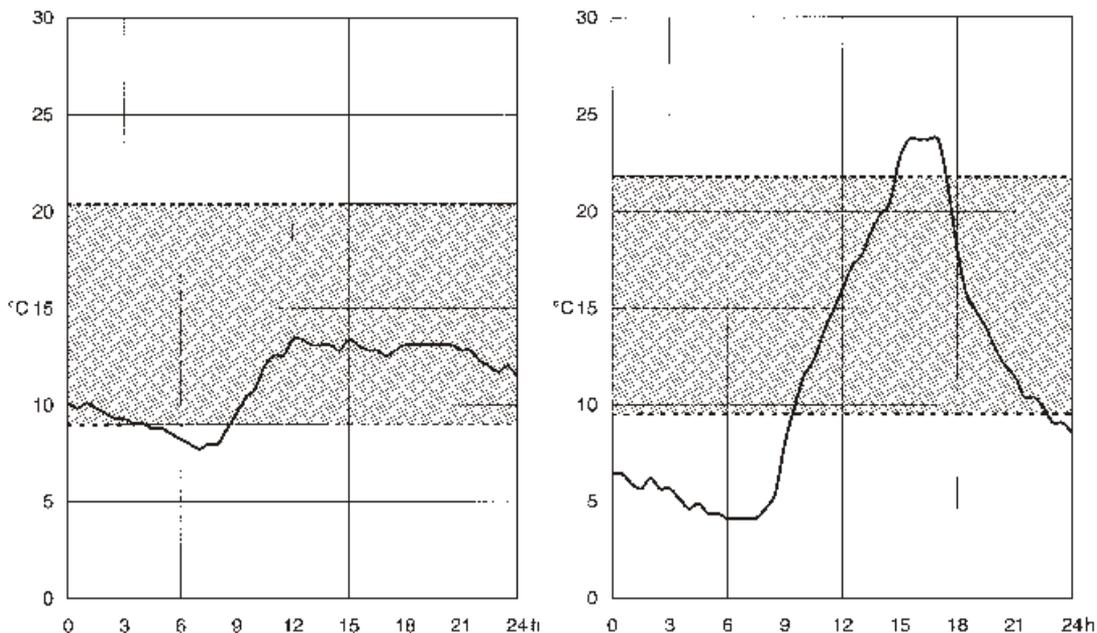


Fig. 3.23 Les zones de confort et les variations des températures de l'air relevées pour la journée d'hiver étudiée dans le quartier traditionnel (à gauche) et dans le quartier moderne (à droite)

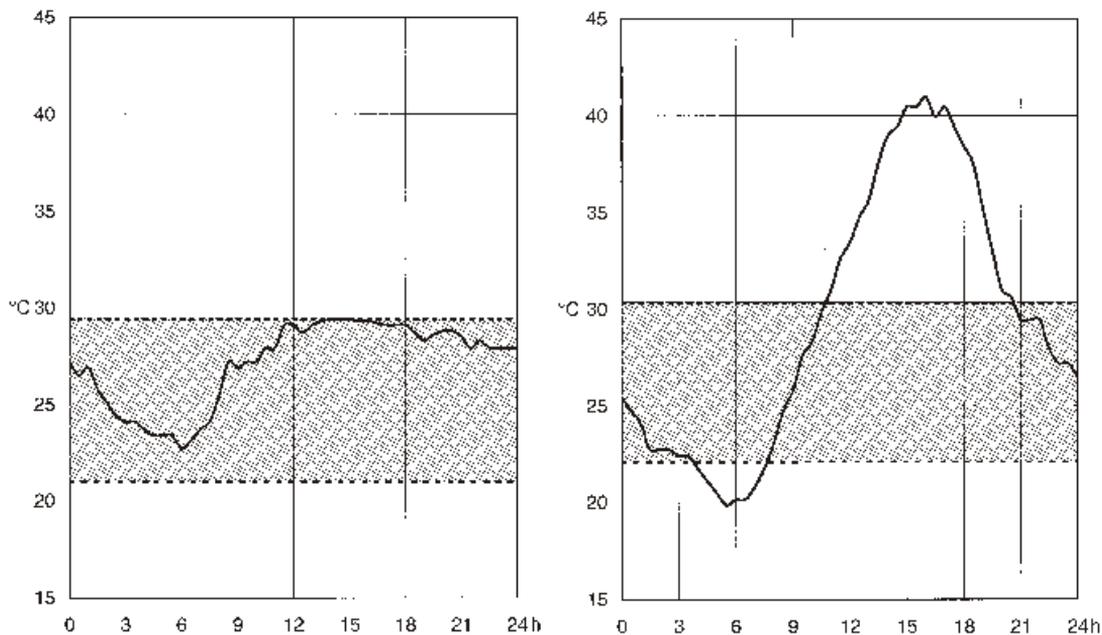


Fig. 3.24 Les zones de confort et les variations des températures de l'air relevées pour la journée d'été étudiée dans le quartier traditionnel (à gauche) et dans le quartier moderne (à droite)

*Maroc et confort thermique*), est faible et les températures de surface des murs et de la chaussée sont souvent égales à celles de l'air. Par contre, pour ce qui est du quartier moderne, le rayonnement de grande longueur d'ondes vers la voûte céleste et le rayonnement solaire influencent le confort thermique.

## Conclusion

L'étude réalisée montre des différences importantes de températures entre le quartier moderne et le quartier traditionnel de la Médina. Une différence de près de 10°C constatée durant la partie du jour la plus chaude aussi bien en hiver qu'en été est particulièrement intéressante.

On peut en outre constater que la grande différence du rapport H/L (et SVF) entre les deux quartiers joue un rôle important, à savoir que le quartier moderne est non seulement soumis à un plus fort rayonnement solaire direct et diffus mais aussi à une plus forte perte de rayonnement de grande longueur d'ondes vers la voûte céleste. Ceci explique le fait que le canyon urbain du quartier moderne (Adarissa) chauffe plus pendant le jour et se refroidit plus pendant la nuit.

Il est peu probable que certains facteurs tels que la chaleur émise par les véhicules, les espaces chauds et froids et les activités industrielles ont un impact significatif sur les quartiers d'habitation étudiés.

## Le climat urbain du quartier traditionnel Seffarine

Le climat stable constaté dans le quartier traditionnel est pour une grande part due à l'importante inertie que représentent les zones d'habitation traditionnelles. En effet, le rapport entre la surface totale représentée par les murs et la rue et le volume d'air dans une section est beaucoup plus élevé dans la Médina. Ainsi, au cours de la journée, une grande partie de l'élévation de la température est absorbée par les surfaces de la section et il faut attendre la nuit pour obtenir une baisse de température d'où une fluctuation réduite de la température diurne. En considération de la forte inertie thermique du quartier traditionnel, la Médina résiste mieux aux variations climatiques comparée à la nouvelle zone urbaine.

La densité des constructions de la Médina influe sur la vitesse du vent qui est inférieure à celle constatée dans le quartier d'Adarissa. On constate ainsi dans le quartier Seffarine une faible interaction entre l'air horizontal et vertical ce qui a pour effet la maintenance des différences entre les températures de l'air de la section et la couche d'air au-dessus du toit. La Médina présente une grande différence de climat entre la rue et le toit. Au cours de la nuit, l'air chaud plus léger monte et est remplacé par de l'air froid plus lourd venant des toits et formant un bassin froid au niveau de la rue. Au cours de la journée il n'existe pas de forces pour stimuler un tel échange d'air puisque l'air froid se trouve bloqué sous l'air chaud.

## Le climat urbain du quartier moderne Adarissa

A la base du canyon de rue d'Adarissa, les températures relevées varient peu entre celles enregistrées sur le toit. Cela correspond à une étude réalisée à Kyoto (35°N) sur une section d'un rapport H/L = 1 (Nakamura et Oke, 1988). Cependant dans l'aire entre le mur/les arbres et la façade se développe un microclimat (voir figure 3.14). Ceci explique le fait d'un climat plus conservateur dans cette aire. Au cours de la journée, les arbres donnent de l'ombre sur le mur et sur le sol, d'où des températures de surface moins élevées, tandis que le mur/les arbres font obstacle au rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste.

### Confort thermique

La figure 3.23 montre que, en période d'hiver, les deux rues se retrouvent à l'intérieur des limites de la zone de confort à l'exception de la nuit au quartier moderne. En considération des possibilités d'ensoleillement de la rue d'Adarissa, le confort d'hiver est meilleur que celui de Seffarine pendant la journée.

Au cours de l'été (figure 3.24), la rue de la Médina dispose d'un climat plus confortable que celui d'Adarissa. Le jour étudié, la rue de la Médina présente un climat entièrement compris dans la zone de confort. Par contre, pour ce qui est du quartier moderne, les températures relevées sont supérieures à celles de la zone de confort tout au long de l'après-midi et la température maximale dépasse de 10°C la limite supérieure de la zone de confort. A noter que les températures indiquées dans la figure 3.24 sont dans l'ombre. Par contre il faut savoir qu'il est difficile de trouver de l'ombre dans la rue d'Adarissa, le soleil étant haut dans le ciel d'été.

### Influence de la végétation et des espaces verts

Dans le quartier moderne, les mesures effectuées dans la partie de la rue protégée par les arbres montrent un effet d'amélioration assez faible, du fait que les arbres bordant les rues sont encore jeunes et ne donnent que peu d'ombre.

Pour les mêmes raisons et parce qu'il n'est pas arrosé régulièrement, le parc au centre du quartier n'a encore aucune influence sur le microclimat. En outre, le parc est entouré d'une large rue asphaltée qui capte les rayons solaires et emmagasine beaucoup de chaleur, ce qui neutralise l'effet tempérant normal d'un parc public. Par contre, les arbres dans les rues et dans le parc font obstacle au rayonnement solaire et apportent un meilleur confort thermique au niveau du sol.

# Etude et simulations du climat urbain

## Le modèle CTTC

Le modèle « Cluster Thermal Time Constant » (CTTC) est une méthode de prédiction des variations de température de l'air dans les canyons de rues (Swaid et Hoffmann 1990). Le modèle a été utilisé, entre autres, pour étudier différents quartiers à Al Qods (Jerusalem, 32°N, altitude : 750 m). Il simule, avec une bonne approximation, la température de l'air mesurée en temps clair, pendant la période d'été.

Puisque la ville de Fès est située à une latitude similaire (34°N, altitude : 571 m) et dans des conditions climatiques ressemblables, le modèle CTTC a été utilisé pour étudier le microclimat urbain.

Le modèle peut être utilisé pour des canyons de rues dont les hauteurs des bâtiments à chaque côté de la rue peuvent être différentes, et permet de faire évoluer les canyons urbains dans toutes les orientations possibles.

## Description du modèle

La température de l'air au niveau du canyon de rue,  $T_a$ , se calcule selon la formule :

$$T_a = T_0 + T_{a, \text{solar}} - T_{\text{NLWR}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{éq. 3.1})$$

Soit  $T_0$  = température moyenne officielle sur 24 heures  
 $T_{a, \text{solar}}$  = apport provenant de l'insolation  
 $T_{\text{NLWR}}$  = déduction pour le rayonnement net d'ondes longues vers le ciel (« net long-wave radiation »).

### *Influence de l'insolation*

L'apport d'insolation se calcule selon la formule :

$$T_{a, \text{solar}} = (a \times R_{se} \times I_{\text{pen}} (1 - e^{-(t-)/\text{CTTC}})) \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{éq. 3.2})$$

Soit  $a$  = l'absorptivité du rayonnement solaire de la rue  
 $R_{se}$  = la résistance superficielle entre la rue et l'air

Si une partie de la rue se trouve à l'ombre, l'insolation directe  $I$  devra être réduite. L'insolation nette dans la rue se calcule alors ainsi :

$$I_{\text{pen}} = (1 - \text{PSA}) \times I \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (\text{éq. 3.3})$$

Soit  $\text{PSA}$  = le facteur d'ombre (« partially shaded area »)

La part d'énergie solaire absorbée contribuant ensuite à chauffer l'air au niveau de la chaussée dépend de la résistance superficielle de la surface,  $R_{se}$ . Celle-ci dépend à son tour de la circulation d'air dans la rue; plus il y a de vent, plus  $R_{se}$  sera faible et plus faible sera l'apport de chaleur  $T_{a, \text{solar}}$ .

Etant donné que la rue stocke la chaleur, l'apport de chaleur se maintiendra plus longtemps dans la rue heure après heure, même après le coucher du soleil. La déperdition de  $T_{a, solar}$  dépend de la fonction  $(1 - e^{-(t-)/CTTC})$  où CTTC (« Cluster Thermal Time Constant ») dépend de la surface au sol construite et de la hauteur des bâtiments (un type de mesure de la densité et de l'inertie thermique des constructions) qui se calcule ainsi :

$$CTTC = 8 \times (1 - FA/S + WA/S) \quad [h] \quad (\text{éq. 3.4})$$

Soit  $FA$  = surface au sol construite  
 $WA$  = surface des murs bordant la rue  
 $S$  = superficie du terrain

Le facteur CTTC sera élevé pour les zones urbaines denses à maisons hautes, tandis qu'il sera faible pour les zones urbaines denses à maisons basses. Dans les zones urbaines de faible densité, ce facteur se situe quelque part entre les deux. On constate que plus CTTC est élevé, plus faible sera l'apport de température mais la durée de l'effet d'atténuation sera d'autant plus longue.

### Influence du rayonnement net de grande longueur d'onde vers le ciel

Le refroidissement provoqué par le rayonnement net de grande longueur d'onde se calcule selon les formules :

$$T_{NLWR} = SVF \times R_{se} \times (T^4 - BrT^4) \times (1-FA/S) + SVF' \times R_{se,roof} \times (T^4 - BrT^4) \times (FA/S) \quad [^\circ C] \quad (\text{éq. 3.5})$$

Soit  $SVF$  = facteur de forme vers le ciel (« sky view factor ») de la rue  
 $SVF'$  = facteur de forme vers le ciel des toits  
 $=$  constante de Stefan-Boltzmann  $= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$   
 $Br$  = nombre de Brunt [-]  
 $R_{se}$  et  $R_{se,roof}$  = coefficients de résistances superficielles respectivement pour la rue et les toits [ $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ]

L'équation, se composant de deux termes, définit le refroidissement au cours de la nuit. Le premier terme est le refroidissement à partir de la rue, le deuxième étant le refroidissement à partir des toits (l'air froid des toits est supposé descendre au niveau de la chaussée durant la nuit).

### Simulation des températures de l'air

Au cours de cette étude, nous avons utilisé le modèle CTTC afin d'étudier l'impact de la largeur et de l'orientation des canyons de rues sur le microclimat. Le modèle a été utilisé pour le calcul des températures de l'air à partir d'un canyon urbain de côtés égaux et d'orientations est-

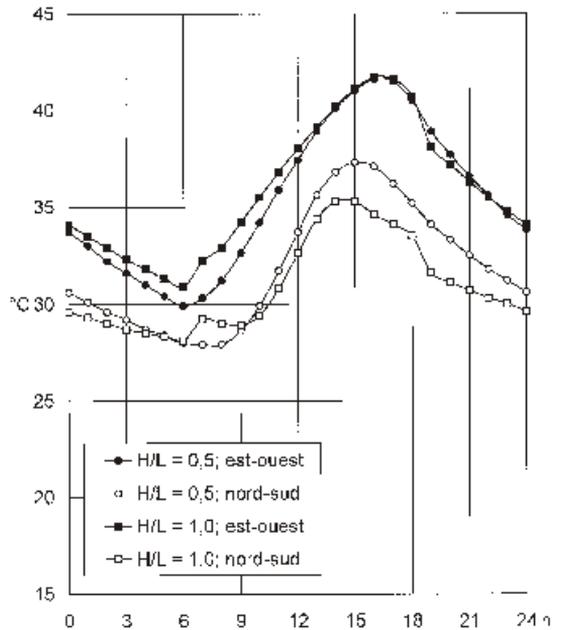
ouest et nord-sud. Quant au rapport  $H/L=0,5$ , il est le même que celui du quartier moderne Adarissa. Les simulations ont été effectuées pour la période d'été.

#### *Calcul relatif aux différentes orientations des canyons urbains*

L'étude comparative indique qu'une rue orientée est-ouest est plus chaude qu'une rue orientée nord-sud. La différence se situe entre 2 et 5°C avec une différence maximale au cours de l'après-midi. Les simulations tendent à démontrer qu'il existe une relation entre l'orientation et le rapport  $H/L$ . L'orientation aurait une plus grande importance lorsque le rapport  $H/L=1$  que lorsqu'il est égal à 0,5.

En utilisant des canyons de rues de différentes largeurs, soit  $H/L=0,5$  et  $H/L=1$  et des orientations différentes, on constate dans les deux cas, des températures de l'air inférieures dans les sections orientées nord-sud, voir figure 3.25. Il faut noter que les simulations montrent des plus grandes différences entre les différentes orientations que celles mesurées au cours de l'étude dans le quartier moderne. La raison pourrait être qu'en réalité il existe une interaction entre l'air provenant des secteurs nord-sud et est-ouest.

*Fig. 3.25  
Simulation et comparaison des températures de l'air dans les canyons de rues de largeurs et d'orientation différentes. Indépendamment de la largeur, l'orientation nord-sud indique des températures inférieures*



#### *Calcul relatif aux différents rapports H/L des canyons urbains*

Les simulations, dont on trouvera les résultats ci-après, ont été réalisées en retenant une hauteur de bâtiments fixe et quatre largeurs de rue correspondant à des rapports  $H/L$  de 0,62, 0,83, 1,25 et 2,5. Le but de ces simulations est d'étudier quelle pourrait être le rapport  $H/L$  d'un canyon de rue qui permettrait une baisse de température dans un canyon de rue au cours des mois les plus chauds, voir figures 3.26 et 3.27.

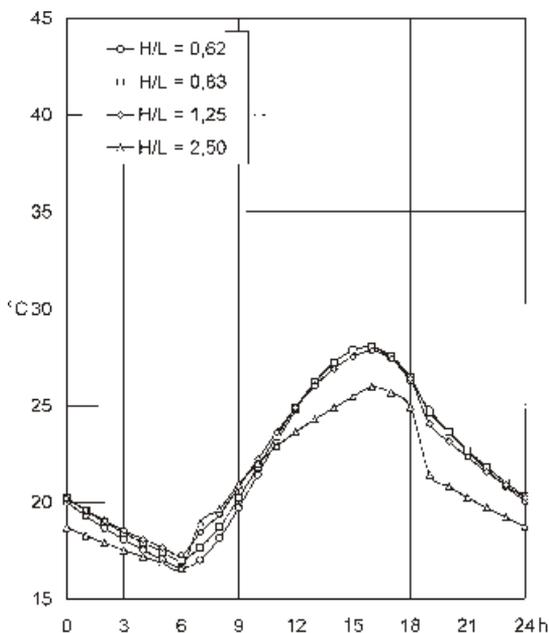


Fig. 3.26  
 Comparaison de la température de l'air en fonction des rapports H/L différents dans les canyons de rues. Les simulations ont été effectuées en mai

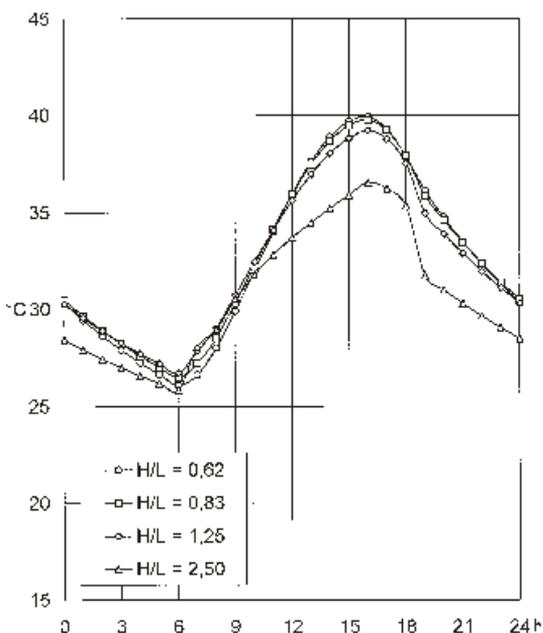


Fig. 3.27  
 Comparaison de la température de l'air en fonction des rapports H/L différents dans les canyons de rues. Les simulations ont été effectuées en juillet

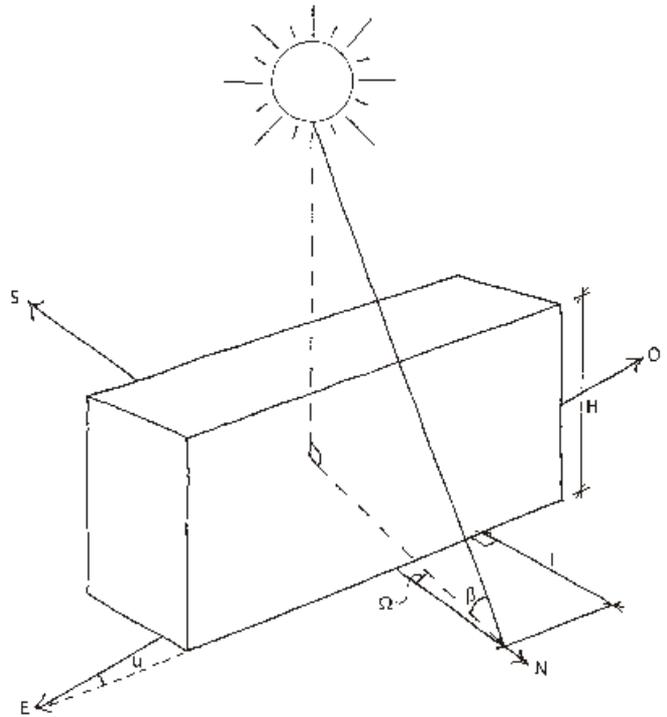
## Calcul de la longueur de l'ombre

Afin de visualiser l'étude de la relation entre le rapport H/L et le rayonnement solaire dans un canyon de rue de différentes largeurs, des calculs de longueur d'ombre ont été réalisés, le but étant de mieux se rendre compte des surfaces exposées au rayonnement solaire dans un canyon et de l'importance de l'influence de la largeur des rues sur les effets d'ombre au niveau de la chaussée. Cette même méthode peut aussi permettre d'étudier les protections solaires et leur effet sur l'ombre.

Les cas présentés ci-après (voir les figures 3.29 à 3.32) concernent les mois de février et de juin, deux mois étudiés plus en détails. Les calculs sont basés sur une exposition solaire partielle du canyon urbain entre 9h et 15h. Cette période de la journée se réfère à l'accès et à l'enveloppe solaires décrits par Knowles (1981). Les limites horaires doivent être choisis non seulement pour des raisons d'exposition solaire mais aussi pour des raisons d'exploitation afin de répondre aux nécessités d'adaptation du développement. Afin d'assurer un accès solaire maximum en période d'hiver, les rues doivent être larges et le volume des bâtiments limité. Si l'on considère canyon orienté est-ouest et un rapport H/L=1, 60% de la façade sud sera exposée au soleil en décembre, 70% en janvier et 100% en février.

La formule dans l'équation 3.6 a été utilisée pour calculer la longueur de l'ombre (voir figure 3.28)

Fig. 3.28  
Calcul de la longueur  
de l'ombre fonction  
des angles et des dis-  
tances



$$I = \frac{\cos(\alpha - u) \times H}{\tan \beta} \quad (\text{éq. 3.6})$$

- soit  $H$  = hauteur du bâtiment  
 $\alpha$  = angle entre les rayons solaires et la direction sud (l'azimut)  
 $u$  = angle entre l'axe est-ouest et la rue  
 $\beta$  = angle entre les rayons solaires frappant la terre et le plan horizontal (la hauteur du soleil)

Les angles  $\alpha$  et  $\beta$  ont été calculées selon la formule suivante :

$$\alpha = \arcsin(\cos \delta \sin h / \cos \phi)$$

$$\beta = \arcsin(\cos \delta \cos \phi \cos h + \sin \delta \sin \phi)$$

- soit  $\delta = -23,4 \cos(360(J+10)/365)$  (l'angle entre les rayons solaires et le plan équatorial)  
 $J$  = jour de l'année  
 $\phi$  = latitude  
 $h = \arccos(\tan \phi \tan \delta)$  (angle de l'heure).

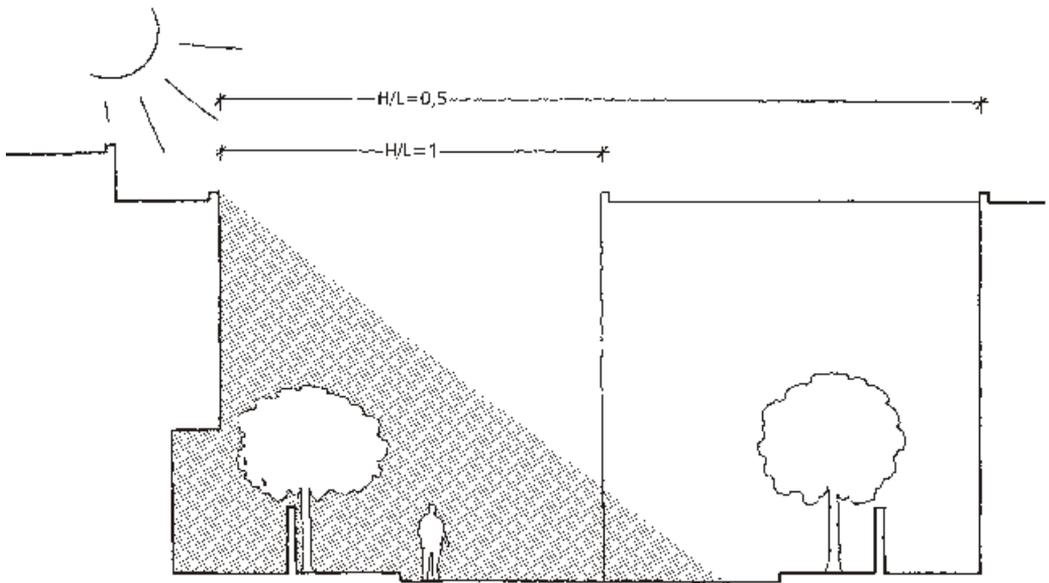


Fig. 3.29 Calcul de la longueur de l'ombre : canyon urbain orientation est-ouest en février à 9h et à 15h

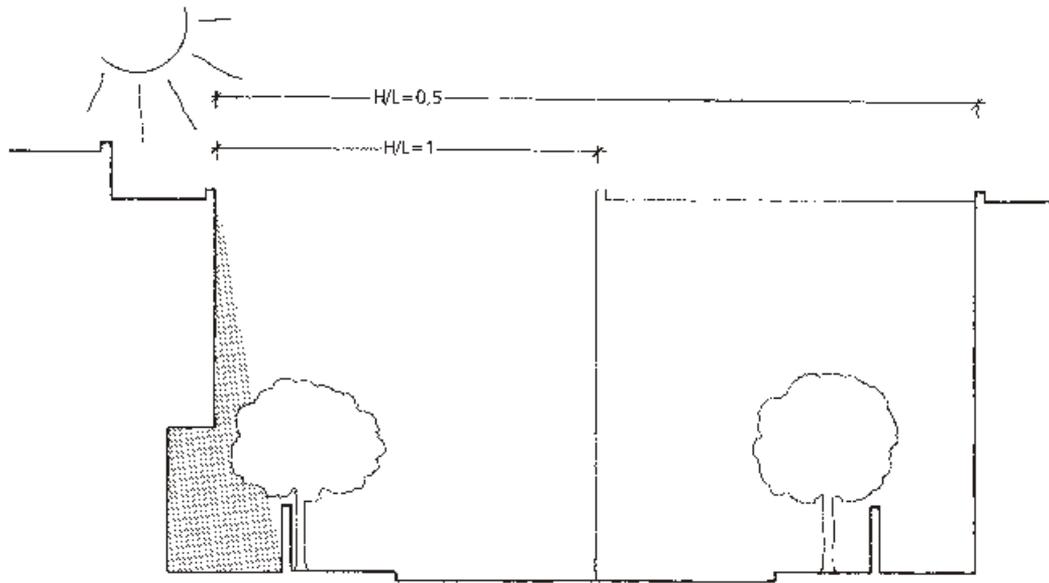


Fig. 3.30 Calcul de la longueur de l'ombre : canyon urbain orientation est-ouest en juin à 9h et à 15h

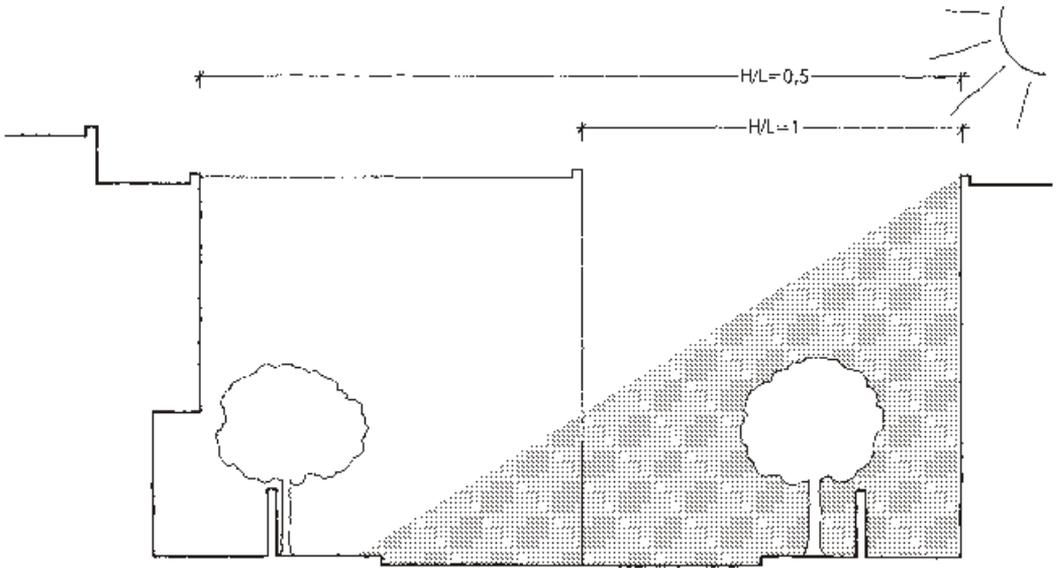


Fig. 3.31 Calcul de la longueur de l'ombre : canyon urbain orientation nord-sud en février 9 h du matin

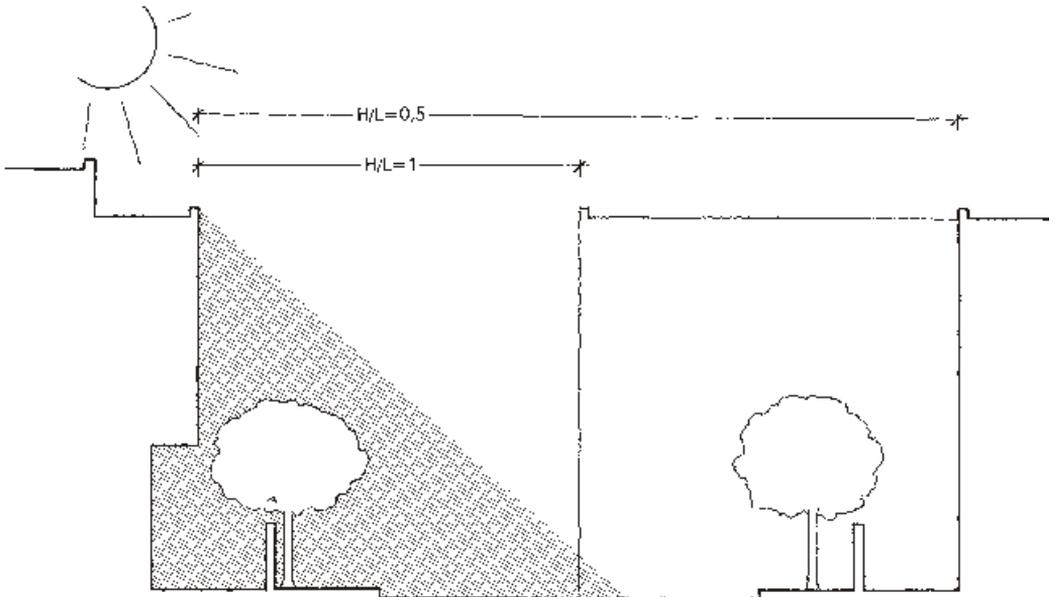


Fig. 3.32 Calcul de la longueur de l'ombre : canyon urbain orientation nord-sud en février, 15h l'après-midi

## Conclusion

### Calculs avec le modèle CTTC

Les résultats des simulations effectuées à partir du modèle CTTC, particulièrement adaptée à des simulations réalisées sur une période d'été, indiquent des tendances plutôt que des résultats confirmés. Si l'on

considère les mois de mai et de juillet, on constate une influence de la densité urbaine sur les températures diurne et nocturne. Dans ces cas, la température de l'air baisse plus les rues sont étroites (plus le rapport H/L augmente).

Les calculs effectués démontrent que la relation H/L doit être égale ou supérieure à 2, c'est-à-dire relativement élevée, pour que l'on constate une baisse de température de l'air dans une rue. Ainsi, dans le cas où la hauteur du bâtiment est de 8 m (R+1), la largeur de la rue ne devra pas être supérieure à 4 m pour que l'on obtienne une diminution marquante de la température de l'air dans un canyon.

## Calcul de la longueur d'ombre

Les calculs de longueurs d'ombre démontrent des différences importantes entre les cas d'été et d'hiver. En période d'hiver le soleil est bas avec pour effet une grande partie des canyons de rue à l'ombre, et en période d'été, le soleil se trouvant au plus haut, une grande partie des canyons de rue sont exposés au rayonnement solaire. Il existe aussi de grandes différences entre les canyons de rues orientés est-ouest et nord-sud. Au cours de la journée et pour l'orientation est-ouest, seule la partie nord (façade sud des bâtiments) est exposée au rayonnement solaire. Par exemple, dès le mois de mars, plus de 50% du canyon de rue canyon d'un rapport H/L=1 est ensoleillé entre 9h et 15h. Cela signifie que, même pendant le printemps, on constate un rayonnement solaire important réchauffant le canyon malgré la proximité des bâtiments. En ce qui concerne l'orientation nord-sud, les façades des bâtiments situés à l'ouest sont ensoleillées le matin et les façades est l'après-midi. Les ombres sont plus longues en mars et seul 1/3 du canyon est ensoleillé à 9h et à 15h. Cette méthode permet de visualiser l'influence de l'ombre selon les différentes largeurs de rue et ceci tous les jours de l'année.

## Conception urbaine adaptée au climat

L'habitat à Fès peut être divisé en deux groupes distincts, un habitat réalisé dans un tissu urbain traditionnel, ouvert sur une cour intérieure et fermé sur la rue et un deuxième réalisé dans un tissu urbain moderne dont les façades principales s'ouvrent sur la rue. Ainsi, l'évolution du type d'habitat est passé de la construction traditionnelle à la construction de maisons mitoyennes modernes depuis l'époque du colonialisme jusqu'à nos jours et, au niveau du tissu urbain, nous constatons que le plan d'urbanisme traditionnel a fait place à un urbanisme moderne ouvert vers la rue et d'un habitat de faible densité.

### *Influence de la géométrie du tissu urbain sur le climat*

La différence du microclimat dans les deux quartiers est directement liée à la géométrie urbaine

En *période d'été*, la géométrie du tissu urbain des quartiers modernes de type Adarissa, a un effet chauffant sur le microclimat. En effet, la faible occupation du sol engendre l'apparition d'îlots de chaleur créés par un climat urbain de température plus élevée que celle de la campagne avoisinante. Cette influence se constate principalement en période nocturne mais existe aussi dans l'après-midi, le climat se trouvant également en dehors de la zone de confort. Par contre, les quartiers traditionnels de type Seffarine, de forte densité urbaine, ont un impact régulateur sur le microclimat en été car ils compensent les grandes différences de températures diurne et nocturne permettant de maintenir le climat en majeure partie dans la zone de confort.

En *période d'hiver*, la géométrie du tissu urbain des quartiers modernes de type Adarissa, a un effet chauffant sur le microclimat. En effet, la faible occupation du sol permet au rayonnement solaire de réchauffer les espaces si bien que le climat se situe dans la zone de confort dans l'après-midi. Par contre, pour ce qui est des quartiers traditionnels de type Seffarine, on constate une faible variation des températures diurne et nocturne si bien que le thermomètre se maintient à une température constante minimale au sein de la zone de confort.

Les deux quartiers étudiés représentent deux extrêmes; d'un côté une forte densité du tissu urbain et de l'autre une faible densité. Tout laisse à penser qu'une conception urbaine adaptée au climat devrait se situer entre ces deux cas extrêmes.

### *Normes d'urbanisme*

La construction de nouveaux quartiers d'habitation dans les banlieues, que ce soit la construction de villas isolées, jumelées ou en bandes et d'immeubles collectifs, doit être conforme à la réglementation en vigueur « Le Règlement Général de Voirie et de Construction » (voir Kuri et Norell 2000). La réglementation indiquant les surfaces constructibles maximales, la distance minimale entre les bâtiments et la largeur minimale des rues, interdit non seulement la mise en place d'une urbanisation plus dense mais aussi une certaine liberté d'expression créative permettant l'interprétation de la réglementation. Il est clair que les urbanistes et les architectes ont suivi la réglementation en vigueur pour ce qui est du plan d'aménagement des nouveaux quartiers. Au cours des années 90, le plan d'aménagement de Fès prévoit des types de construction similaires à ceux réalisés dans la majeure partie des pays européens. Ces types de construction sont en fait peu adaptés au climat local. Le plan d'aménagement en vigueur à Fès prévoit des petits lots de 60 m<sup>2</sup> en R+1 et en R+2 et des lots d'une faible surface de 80 m<sup>2</sup>; possibilités toutefois non utilisées ces dernières décennies. Ce type d'urbanisme présente des avantages climatiques en conciliant les avantages de la Médina en période d'été et ceux de la Nouvelle Ville en période d'hiver.

### *Recommandations*

La recherche réalisée à Fès s'est concentrée sur l'étude des canyons de rues, c'est-à-dire sur l'espace existant entre deux bâtiments coupés par une rue. En outre, étant donné qu'il existe une relation complexe entre les différents éléments du tissu urbain que sont les bâtiments, les rues, un quartier, ce rapport comprend de recommandations pour chaque élément composant le tissu urbain.

## Recommandations au niveau Quartier

### Forme urbaine

Selon le model CTTC un rapport H/L égale ou supérieure de 2 (un tissu urbain compact) est à recommander. Un exemple de lotissement comprenant des lots de 80 m<sup>2</sup> avec des cours de 20 m<sup>2</sup>, des bâtiments d'une hauteur de 10 m, et une largeur des rues de 5 m donnent un tissu urbain assurant une protection acceptable contre le rayonnement solaire en été, d'où une température moins élevée, tandis qu'en hiver, un tel quartier donne accès à un certain rayonnement solaire (les chiffres correspondent à un habitat de type traditionnel à Fès, zones E1 et E2). Au cours de la période d'été, les protections solaires assurant de l'ombre aux façades et à la chaussée ont un rôle important, même s'il s'agit d'un tissu urbain de forte densité tel que H/L=2.

Un tissu urbain doit être conçu de sorte qu'il permet une bonne accessibilité aux bâtiments que ce soit par voies automobile ou piétonnière d'où un plan d'urbanisme comprenant des réseaux différenciés. Le plan doit donc comprendre des axes principaux et des voies d'accès aux quartiers d'une largeur suffisante assurant la circulation automobile, des rues à sens unique pour former des rues secondaires d'une largeur limitée et des rues piétonnières étroites. En outre, il est à noter que la typologie des bâtiments et le rapport H/L sont deux facteurs étroitement liés entre eux car les bâtiments extrovertis demandent, pour des raisons de voisinage, une rue plus larges que celle formée par des bâtiments introvertis.

### Orientation

Dans le cas d'une rue orientée est-ouest, les façades principales des bâtiments seront orientées au sud et au nord. L'orientation sud est importante en période d'hiver et, afin de permettre l'exposition des bâtiments au rayonnement solaire, les canyons de rues orientés est-ouest pourront être plus larges et servir de voie de desserte autorisant la circulation automobile. Au niveau de la rue, des arcades et des allées de feuillus assureront une protection solaire.

Les rues orientées nord-sud montrent des températures moins élevées et peuvent donc être retenues comme rue piétonnière et, en complétant avec des pergolas et des auvents, on obtiendra un microclimat amélioré.

## Ventilation

Les vents prédominants assurant un rafraîchissement du climat devront être absorbés par le tissu urbain et dirigés sur la zone urbanisée.

## Matériaux de construction

Il est recommandé de prévoir des coloris les plus clairs possibles pour les bâtiments et le revêtement des chaussées.

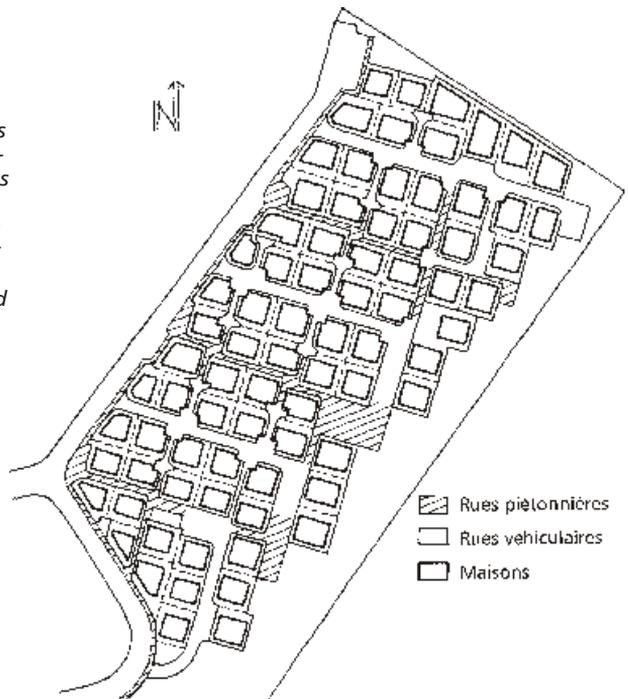
## Végétation et mobilier urbain

La végétation sous forme d'allées et d'espaces verts est, en plus de la géométrie, un facteur important influençant le plus la température.

*En été*, le soleil se trouve au plus haut et seules des protections solaires horizontales permettent d'abaisser les températures au sol et sur les façades. *En hiver*, le soleil est bas, et pour réchauffer la rue et les façades, les bâtiments devront donc être à une certaine distance des uns des autres. Ces conditions opposées demandent des solutions appropriées afin d'avoir de l'ombre en été et un maximum de rayonnement solaire en hiver. Ces solutions peuvent être :

- des arcades,
- des rentrées de façades,
- des pergolas avec de la végétation,
- des feuillus,
- des auvents, des stores.

*Fig. 3.33*  
Desert Solar à Neve-Zen.  
Etude d'une conception urbaine adaptée au climat. Rues larges orientées est-ouest autorisant la circulation, rues piétonnières orientées nord-sud. Vue l'orientation du site, il n'a pas été possible d'étudier une orientation strictement est-ouest – nord-sud



## Recommandations au niveau du canyon urbain

### Forme urbaine

Afin d'obtenir un microclimat modéré à partir des bâtiments et de leur géométrie, un tissu urbain compact dont les canyons de rue possèdent un rapport H/L équivalent à 2 est à prévoir. Ainsi, pour un bâtiment d'une hauteur de 10 mètres, la largeur de la rue devra être de 5 mètres afin de permettre un abaissement de la température de l'air dans la section de rue. Mais, en pratique, toutes les rues ne peuvent pas être aussi étroites, un quartier doit être étudié à partir d'un plan hiérarchique type comprenant des rues de différentes largeurs et des bâtiments de différentes hauteurs. Il s'agit entre autres de prévoir des rues autorisant la circulation automobile, des rues piétonnières et des espaces ouverts. Cette étude rend compte ci-après des résultats obtenus pour des canyons ayant un rapport H/L de 2, 1 et 0,7.

#### *H/L = 2, orientation est-ouest*

Dans ce cas, seules les façades orientées sud sont soumises au rayonnement solaire tout au long de l'année. Les températures les plus faibles se retrouvent à l'ombre nord des bâtiments.

#### *H/L = 1, orientation est-ouest*

Les rues autorisant la circulation automobile peuvent être conçues avec des arcades et des feuillus au niveau des espaces de stationnement afin d'obtenir un climat adouci.

#### *H/L = 0,7, orientation est-ouest*

Les rues larges autorisant la circulation automobile peuvent être conçues avec des arcades et des feuillus sur les deux côtés de la rue ainsi qu'au niveau des stationnements afin d'obtenir un climat plus doux.

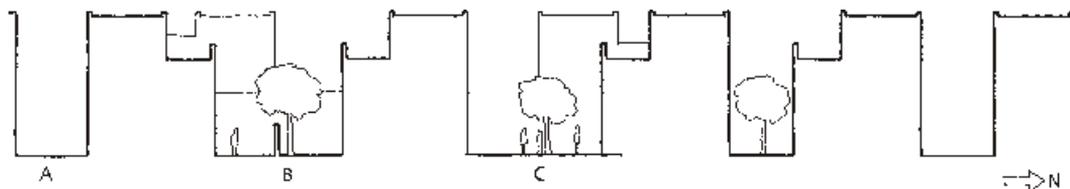


Fig. 3.34 Coupe de rue pour des bâtiments introverties avec des canyons de rue orientés est-ouest (façades principales orientées sud) et  $H/L = 2$ . Le rayonnement solaire sur les bâtiments est fonction de l'orientation du bâtiment et de leur emplacement réciproque dans le quartier (les maisons en terrasse peuvent être mises à l'envers dans certaines parties du quartier)

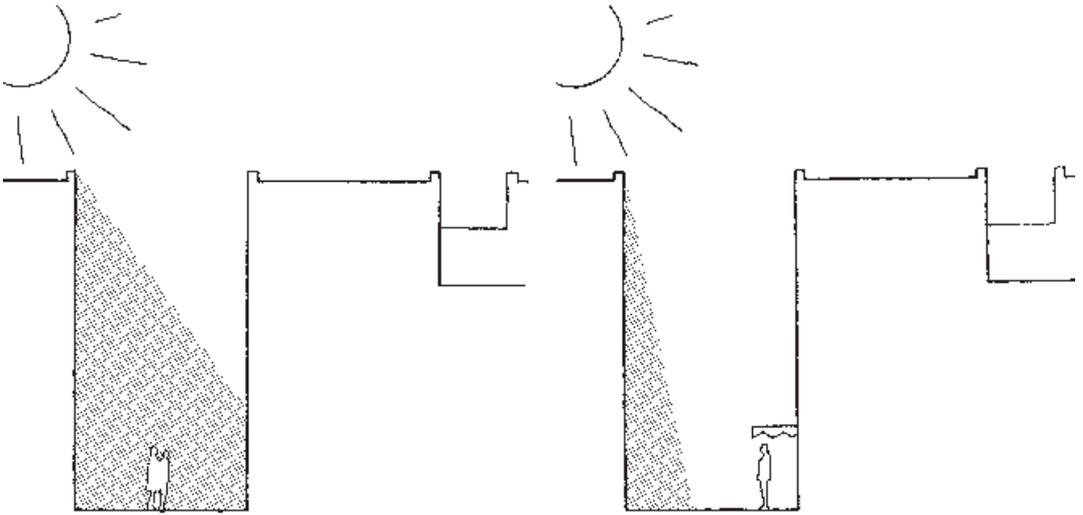


Fig. 3.35 Coupe Partie A de la figure 3.34. Canyon rapport H/L = 2. Ombrage en février entre 9h et 16h (à gauche). Ombrage en juin entre 9h et 16h. Les auvents protègent la rue en été (à droite)

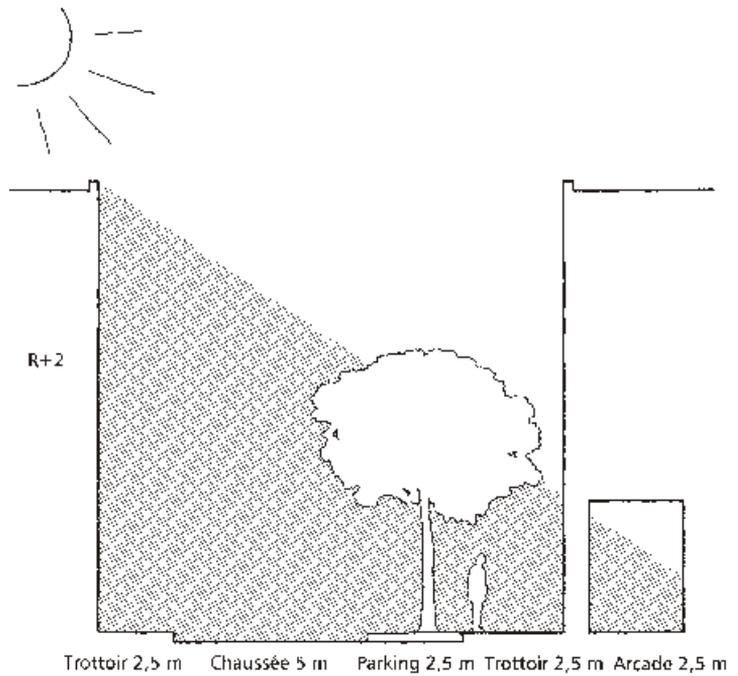


Fig. 3.36 Coupe orientée est-ouest avec canyon d'un rapport H/L = 1. L'ombrage calculé en février entre 9h et à 15h. Rue autorisant la circulation automobile en sens unique. Les arcades laissent passer le rayonnement solaire pendant la journée. Stationnements et trottoirs protégés par des feuillus

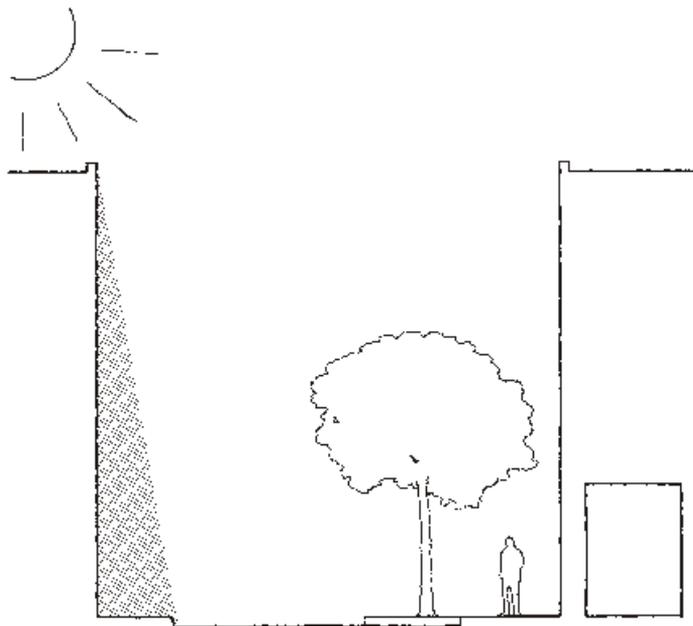


Fig. 3.37  
Coupe orientée  
est-ouest avec canyon  
d'un rapport H/L = 1.  
Ombrage en juin entre  
9h et 15h. Rue autori-  
sant la circulation auto-  
mobile en sens unique,  
stationnements et trot-  
toirs protégés par des  
arcades et des feuillus

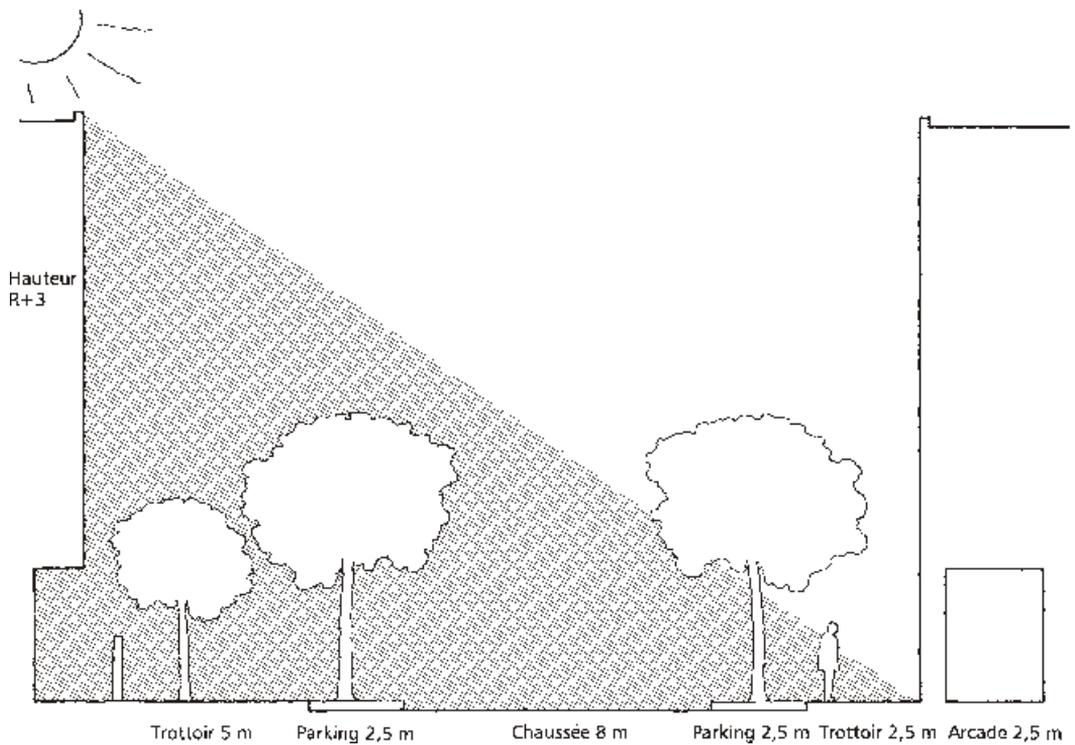


Fig. 3.38 Coupe est-ouest avec canyon d'un rapport H/L = 0,7. Ombrage en février entre 9h et 15h. Rue autorisant la circulation dans les deux sens. Les arcades laissent passer le rayonnement solaire pendant la journée. Stationnements protégés par des feuillus sur les deux côtés de la rue

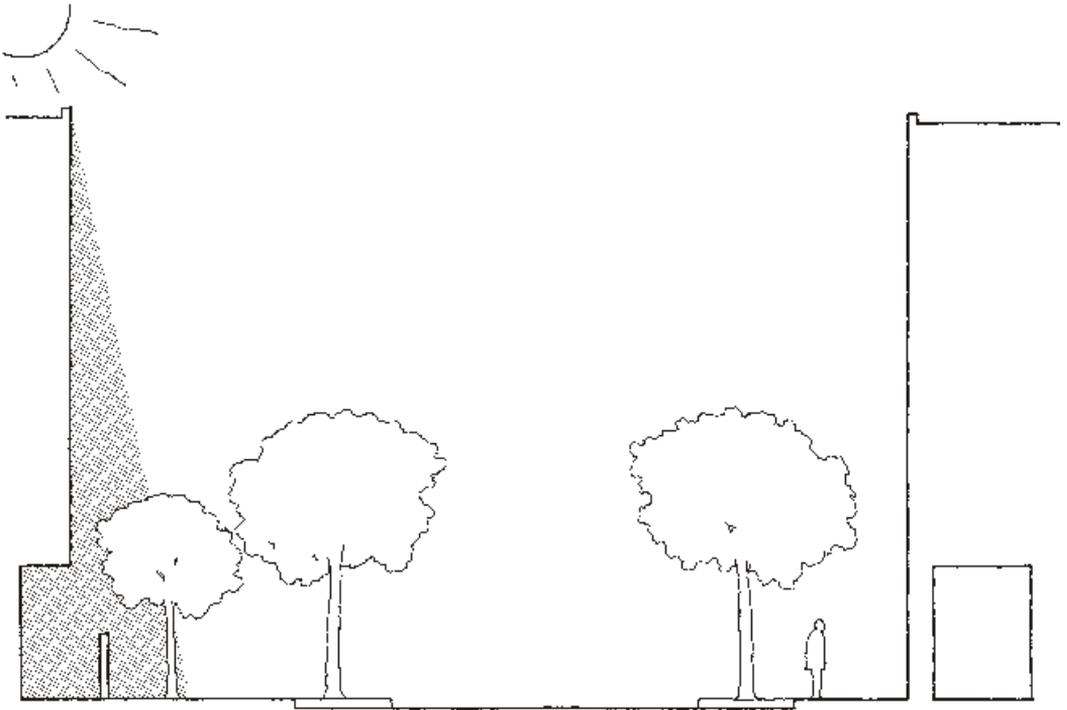


Fig. 3.39 Coupe est-ouest, avec canyon d'un rapport  $H/L = 0,7$ . Rue autorisant la circulation à double sens. Ombrage en juin entre 9h et 15h. Au cours de la journée, les arcades protègent les piétons du soleil. Stationnements des deux côtés de la rue protégés du soleil par des feuillus. Trottoir de 5 mètres de large, le côté nord n'étant pas exposé au rayonnement solaire, coupe de rue la plus fraîche

### Cour

Une orientation différente des cours des bâtiments permet de concevoir un tissu urbain varié. Dans le cas où tous les bâtiments sont orientés au sud, les cours seront plus à l'ombre que si elles sont l'une en face de l'autre (voir figure 3.40). Dans le cas où les cours donnent sur la rue, les façades seront plus exposées au rayonnement solaire tandis que l'espace formant la rue sera plus étendu allant jusqu'aux façades des bâtiments (voir figure 3.41).

### Orientation

La structure du quartier et son orientation seront adaptées aux canyons de rue larges orientées est-ouest et à celles des rues étroites orientées nord-sud.

### Ventilation

Normalement, la ville de Fès est soumise à des vents relativement faibles. En été, la circulation de l'air a un impact positif sur le confort, par

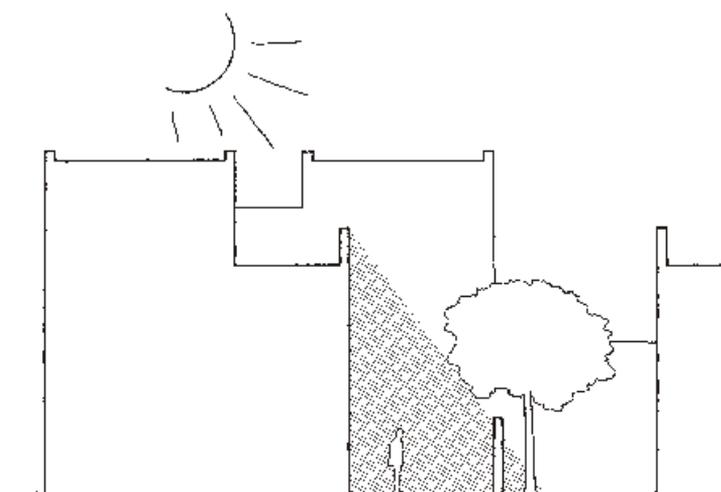


Fig. 3.40  
Coupe Partie B, cour de la figure 3.34. En prévoyant des bâtiments terrassés et des cours l'un en face de l'autre, on obtient des espaces verts plus importants entre les bâtiments

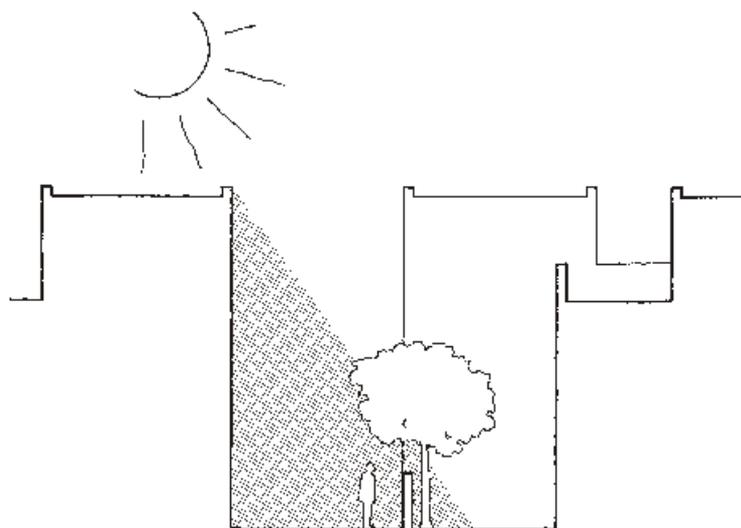


Fig. 3.41  
Coupe partie C, cour donnant sur la rue de la figure 3.34. En prévoyant les cours côté rue, on obtient en hiver un rayonnement solaire plus important tandis qu'en été, les feuillus protègent la rue du rayonnement solaire

contre le chergui, vent chaud du sud-est, représente un problème que l'on devra prendre en compte dans les sites les plus exposés à ce vent.

## Matériaux de construction

Les façades, les revêtements de chaussée et du sol des espaces libres devront être les plus clairs possibles (albédo élevé) afin de diminuer l'absorption du rayonnement solaire (ayant un impact direct sur l'augmentation de la température du microclimat).

## Végétation et mobilier urbain

Les arbres apportent une certaine fraîcheur dans la rue puisqu'ils donnent de l'ombre et une évaporation (lors de l'arrosage). Ainsi, la végéta-

tion assure une protection des façades et de la chaussée contre le rayonnement solaire.

## Recommandations au niveau Bâtiment

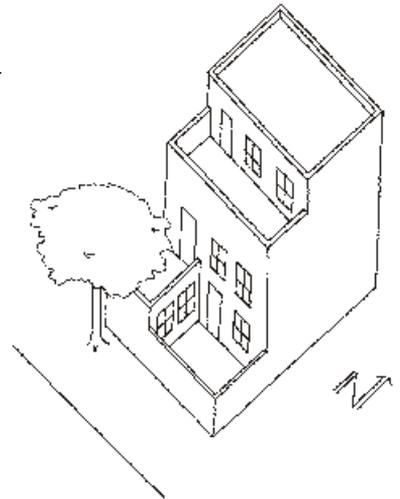
### Forme

#### *Habitat introverti*

Un tissu urbain compact permet de réduire au minimum en été l'exposition au rayonnement solaire. Des bâtiments avec des cours intérieures permettent de créer des zones climatiques intermédiaires très différentes du climat extérieur. La maison marocaine est aujourd'hui le type de bâtiment le plus courant et pourrait être plus adaptée au climat (figure 3.42). Une terrasse orientée au sud permet, en période froide, à l'étage supérieur d'être exposé au rayonnement solaire. Dans la cour est prévue une annexe donnant un climat intérieure plus frais en période d'été tandis que le toit peut fonctionner comme terrasse tout en permettant d'être exposé au soleil au cours du printemps et de l'automne. Des plantations de feuillus dans la cour apportent de l'ombrage en été et donnent accès au rayonnement solaire en hiver.

Les bâtiments introvertis permettent de réaliser un tissu urbain composé de rues étroites et de quartiers de forte densité.

*Fig. 3.42*  
 Perspective d'une maison (R+2) ouverte vers la cour avec des fenêtres orientées sud donnant sur la cour. Le bâtiment est construit en terrasse afin de donner de l'ombrage en été et d'être exposé au soleil en hiver



#### *Habitat extroverti*

Un bâtiment avec des ouvertures donnant sur la rue demande des rues d'une certaine largeur pour des raisons de voisinage. Ce type de tissu urbain exigera alors la plantation d'arbres et brise-soleils afin d'apporter de l'ombre sur les façades et les rues ainsi que l'utilisation de matériaux légers lors de la construction des rues et des places, voir figure 3.43. Et, dans ce contexte, il sera important de prévoir un arrosage afin d'abaisser la température en période d'été (l'effet d'oasis).

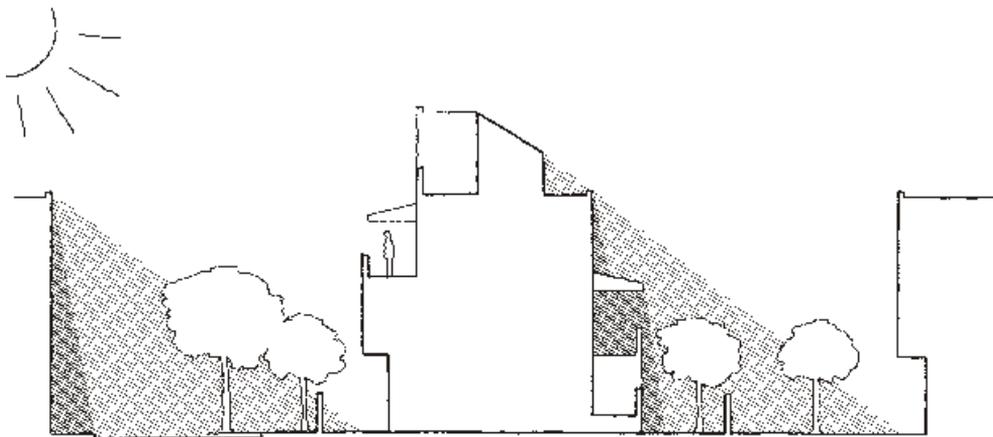


Fig. 3.43 *Bâtiment ouvert sur la rue. Un bâtiment en terrasse demande un volume important sans pour autant donner de l'ombre chez le voisin en hiver. En prévoyant l'utilisation d'auvents en été, le sol et les façades seront protégés du soleil. En période d'été, l'arrosage des plantations influencera positivement le microclimat*

## Orientation

L'orientation par rapport au soleil est un facteur important, et il sera donc préférable de choisir une orientation sud pour ce qui est de la façade principale. Un bon emplacement des fenêtres peut influencer le climat intérieur en période d'hiver. Les protections solaires ont un rôle important, principalement à l'ouest, car l'exposition au soleil de l'après-midi coïncide aux températures les plus élevées. Prévoir de grandes fenêtres orientées au sud avec des auvents protégeants du soleil la fa-

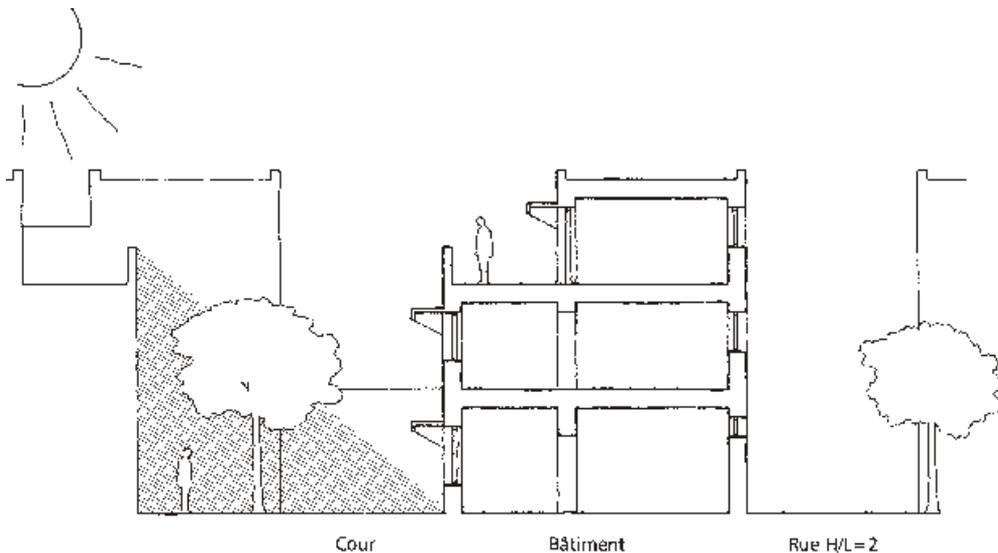


Fig. 3.44 *Coupe d'une maison d'habitation. Rayonnement solaire en février pour un bâtiment orienté au sud. Les bâtiments avoisinants ont le plus grand impact sur l'ombrage (à 9h et à 15h). Cette section possède deux cours mitoyennes permettant d'accroître le rayonnement solaire en période d'hiver*

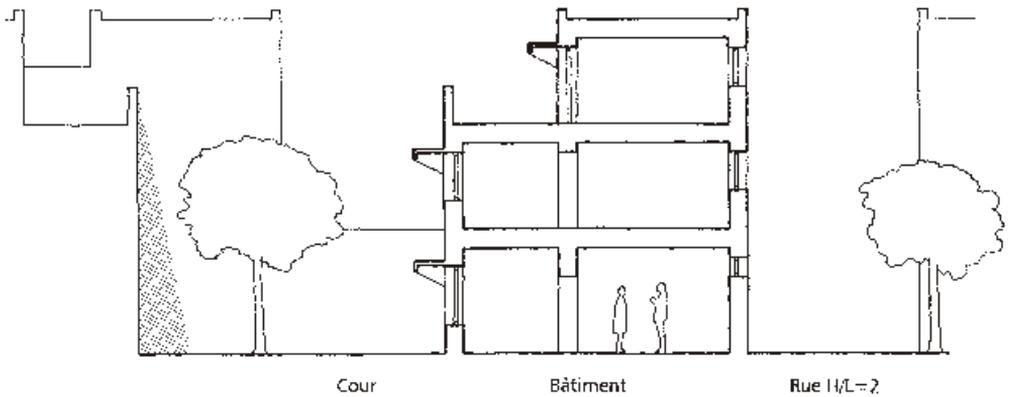


Fig. 3.45 Coupe d'une maison d'habitation. Rayonnement solaire en juin pour un bâtiment orienté au sud. Les bâtiments avoisinants, les arbres et les auvents permettent en commun l'ombrage des façades et du sol

çade en période d'été (voir figures 3.44 et 3.45) (référer au chapitre 4 *Vers une réglementation thermique*). Il est conseillé de prévoir de petites fenêtres sur les murs orientés est et nord (dans ce cas ici, les fenêtres donnant sur la rue) et éviter des fenêtres sur le mur ouest.

Les protections solaires ont un rôle important, principalement en période d'été, car elles permettent de protéger les façades et la chaussée du soleil et par conséquent d'abaisser les températures de surface. Ainsi, la longueur des protections solaires est un facteur primordial étant donné qu'elles doivent être suffisamment longues pour obtenir le plus d'ombre possible en été, tandis qu'en hiver, le soleil se trouvant au plus bas, elles doivent pouvoir laisser passer le soleil pour réchauffer les façades et la chaussée.

## Ventilation

Une ventilation accrue au cours des nuits d'été permet d'abaisser la température de la structure et, en maintenant fermées les ouvertures cela devrait permettre d'obtenir une température intérieure plus basse, voir figure 3.46. Une ventilation importante réduit les risques de création de poches d'air chaud sous les plafonds. Pour les coupoles et les voûtes, une ventilation au plafond, qui représente une zone de basse pression, est une solution efficace. De petites fenêtres donnant sur la rue et de plus grandes donnant sur la cour permettent d'assurer un courant d'air suffisant.

## Matériaux de construction

Les fortes différences constatées entre les températures diurne et nocturne peuvent être utilisées en prévoyant des matériaux lourds afin de maintenir un climat intérieur modéré. L'utilisation d'isolant thermique est une méthode intéressante, particulièrement au niveau du toit (voir chapitre 4 *Vers une réglementation thermique*) La toiture est un élé-

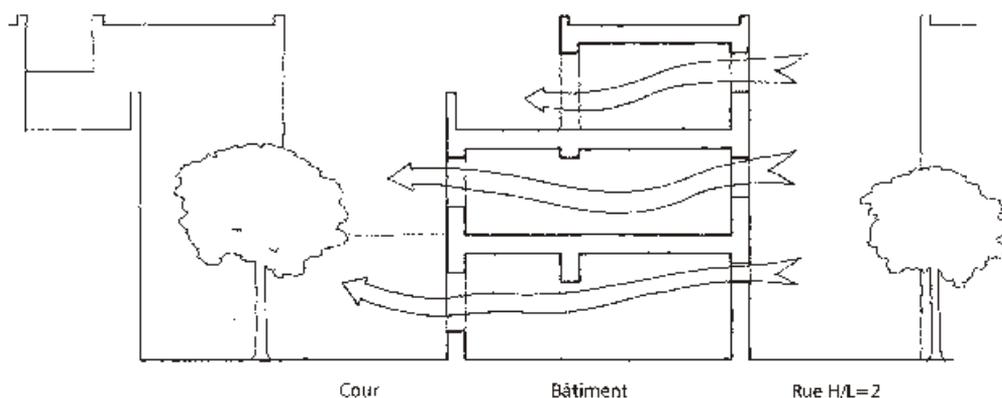


Fig. 3.46 Coupe d'une maison d'habitation. Principe d'un courant d'air basé sur de petites fenêtres donnant sur la rue et des plus grandes donnant sur la cour

ment important car on doit rechercher un pouvoir réfléchissant maximum pour ce type de climat, il est donc conseillé de choisir un matériau de couleur claire. De même, la couleur des façades des bâtiments devra être claire sans pour autant être éblouissante.

Il est à noter qu'une enveloppe légère et une isolation réduite dans l'ensemble du bâtiment les transferts thermiques, principalement en hiver, mais demande des éléments internes lourds pour le stockage de la chaleur.

## Végétation

La végétation, arbres et pergolas, permet d'abaisser la température, puisqu'elle apporte de l'ombrage dans les cours et sur les façades en période d'été. Les feuillus représentent une solution intéressante car ces arbres apportent de l'ombre en été et laissent passer le soleil en hiver.

## Conclusion

L'étude présente des recommandations sous forme de canyons de rues de rapports H/L différents. Le but recherché est de prévoir des canyons urbains aussi étroits que possible afin d'atténuer les effets climatiques étant donné que le microclimat est influencé par la densité totale du quartier. Des recherches futures devraient aboutir à une proposition d'un plan d'urbanisme à partir de ces canyons urbains denses.

Chaque site de constructions possède ses propres conditions permettant d'assurer une bonne conception climatique et c'est aux architectes de savoir exploiter les conditions positives et de refuser celles qui sont négatives.

# Vers une réglementation thermique

Ce chapitre présente les résultats d'une démarche visant l'optimisation de l'enveloppe des bâtiments au Maroc. Cette démarche se base, dans un premier temps, sur une étude et une analyse comparatives des différentes réglementations thermiques appliqués dans différents pays.

Afin de définir un zonage climatique pour les périodes d'hiver et d'été une combinaison de différentes méthodes a été utilisée, à savoir les degrés-jours de chauffage, la température de base ainsi que des simulations par ordinateur du climat à l'intérieur d'un bâtiment type.

Une méthodologie d'approche a été identifiée et a permis, à partir de simulations par ordinateur d'un bâtiment type, d'optimiser les différents types de parois, en hiver ainsi qu'en été. Il faut noter que cette démarche a été adoptée uniquement pour la région de la ville de Fès mais la méthodologie peut être parfaitement transposée pour les autres zones climatiques du Royaume.

## Comparaison des différentes réglementations internationales

L'objectif de cette partie est d'étudier et de comparer les principaux codes et règlements thermiques en vigueur dans les pays suivants : la France, l'Algérie, le Liban, les Etats-Unis, la Suède et la Grande-Bretagne.

Une description plus détaillée se trouve dans Johansson (2000).

### Réglementation française

Les normes françaises pour ce qui est de l'isolation thermique et le chauffage des logements se trouvent rassemblées dans le « Règlement thermique 1988 des logements neufs » qui comprend entre autre l'Arrêté du 5 avril 1988. Entré en vigueur en 1989, ce document règle la consommation d'énergie et l'installation des équipements de chauffage dans un logement. Cet arrêté est complété par un certain nombre de règles de calcul décrivant en détails la manière de calculer les différents paramètres.

La consommation d'énergie relative au chauffage des nouvelles habitations était en 1988 inférieures de 42% par rapport à la consommation moyenne enregistrée en 1974. Ce qui caractérise les normes françaises est que depuis 1974, aucune exigence n'a été formulée concernant la transmission thermique (coefficient U) des parois, les normes se concentrant sur les performances thermiques de l'ensemble du bâti-

ment. Les normes indiquant des débits d'air maximum et minimum permettent entre autre de compenser une perméabilité trop importante en prévoyant une isolation et vice versa. Et, dans le cas où l'on ne désire pas effectuer des calculs trop compliqués, on peut toujours utiliser des solutions type approuvées.

Les exigences d'isolation thermique sont plus sévères pour les habitations utilisant le chauffage électrique comparées à celles utilisant un autre type de chauffage.

A noter que les normes Françaises ont été revues en 2000 où une nouvelle réglementation – RT 2000 – a été adoptée et appliquée à partir de juin 2001. La RT 2000 a permis le passage d'une approche française à une approche européenne et s'appuie largement sur des méthodes de calcul et des caractéristiques définies dans les normes européennes.

## Réglementation algérienne

La première réglementation thermique algérienne a été publiée en 1997 sous le titre de Réglementation thermique des bâtiments d'habitation : DTR C 3-2. Les règles de calcul des déperditions calorifiques, DTR C 3-2 définissent les performances thermiques minimales mais comprennent aussi des conventions de calcul ainsi que des conventions de calcul pour le dimensionnement des installations de chauffage. La réglementation algérienne s'inspire en grande partie de la réglementation française, par contre les méthodes de calcul utilisées sont plus simples, elle autorise, tout du moins dans certaines limites, le calcul informatisé des besoins de chauffage. Ceci est un point positif puisque cela permet de profiter de l'inertie thermique d'un bâtiment, un facteur très important étant donné le type de climat et de constructions existants en Algérie.

Une nouvelle réglementation prenant en compte le confort thermique d'été vient d'être publiée mais n'était pas disponible au moment de la rédaction de ce rapport. Une telle réglementation est d'une importance capitale étant donné le problème du confort en période d'été et de la consommation d'énergie due à la climatisation utilisée dans de nombreuses régions d'Algérie.

## Réglementation libanaise

Le Liban ne possède pas aujourd'hui de réglementation thermique mais a réalisé une préétude proposant la mise en place d'une réglementation concernant l'isolation thermique en période d'hiver et le confort intérieur en période d'été. La proposition, comme celle de l'Algérie, utilise le modèle français d'une manière plus simplifiée.

La proposition prévoit une norme ayant trait au confort thermique et va dans le sens d'une climatisation passive complétée par une ventilation naturelle. Dans ce contexte, l'étude prévoit des exigences de protection solaire aussi bien pour les baies que pour les parois opaques. En

outre, l'étude indique des exigences sur l'inertie thermique en terme général, moyenne et forte, mais n'avance aucun chiffre.

## Réglementation américaine

La réglementation nationale de maîtrise de l'énergie dans les bâtiments, (« International Energy Conservation Code ») porte principalement sur les performances. L'objectif de la réglementation thermique américaine est de réglementer la conception de l'enveloppe des bâtiments afin que ceux-ci disposent d'une résistance thermique suffisante et d'une faible perméabilité à l'air.

La réglementation étudiée ne donne aucune norme spécifique ayant trait au confort thermique, celui-ci est traité dans d'autres normes. Le confort intérieur et le confort hygrométrique sont traités en détail dans « ASHRAE Handbook of fundamentals » (ASHRAE, 1997).

La réglementation américaine de la maîtrise de l'énergie permet le calcul des performances thermiques à l'aide d'un logiciel avancé. Cette méthode permet de concevoir un bâtiment d'une manière optimale. Les normes autorisent également l'utilisation de calculs simplifiés pour ce qui est des exigences maximales de la transmission surfacique des différentes parois ainsi que des solutions de type standard.

La norme prend en compte les climats d'hiver et d'été, et en régions chaudes, les normes d'isolation thermique ne sont pas aussi exigeantes mais spécifient l'utilisation de protection solaire des baies. Par contre, elle ne prévoit pas de protection solaire des façades.

Indépendamment des méthodes spécifiées, les calculs autorisés prennent en compte l'inertie thermique des murs extérieurs. Les calculs informatisés autorisent l'utilisation du chauffage passif provenant de l'énergie solaire ainsi que du refroidissement réalisé par une ventilation nocturne.

## Réglementation suédoise

La norme suédoise de construction, BBR 94, est une norme dictant les performances du bâtiment. Différents manuels complètent BBR 94, entre autre un manuel sur l'isolation thermique). La BBR n'indique aucune exigence d'isolation de chaque paroi mais spécifie une isolation thermique moyenne pour l'ensemble du bâtiment. Cette norme laisse donc aux ingénieurs et aux architectes une grande liberté dans la conception des bâtiments.

Les valeurs de conductivité thermique utile et de transmission surfacique font l'objet de calculs très précis et les apports de chaleur provenant de l'insolation sont pris en compte. Cependant, la capacité thermique et les apports internes des appareils et des utilisateurs ne sont pas pris en considération.

## Réglementation britannique

L'ensemble des règles contrôlant la construction en Grande-Bretagne se trouve rassemblé dans « Building Regulations ». Cette réglementation nationale remplace les arrêtés municipaux en vigueur jusqu'en 1984. La dernière réglementation date de 1991, modifiée en 1994.

La réglementation ne considère que la période d'hiver. De la même manière que les normes française et américaine, elle permet de choisir différents niveaux de calcul allant de la performance thermique de l'ensemble du bâtiment à des solutions standard. Les calculs les plus avancés prennent en compte les apports internes et les apports solaires. Par contre, les calculs ne prennent pas en compte l'inertie thermique.

De même qu'en France, la Grande-Bretagne autorise une moins bonne performance thermique dans le cas où les habitations utilisent une source d'énergie autre que celle provenant de l'électricité.

## Conclusion

Si l'on compare les six pays étudiés, on constate que chaque réglementation présente :

- un découpage climatique basé sur la notion de degrés-jours de chauffage (DJCH), sauf la grande Bretagne et la Suède qui appliquent leurs codes sans zonage climatique,
- des exigences différentes en matière d'isolation thermique des différentes parois du bâtiment (Coefficient U en fonction des zones climatiques),
- des conventions de calcul différentes, notamment le coefficient d'échange superficiel intérieur et extérieur,
- différents critères réglementaires à satisfaire qu'il s'agisse des déperditions thermiques de chaque paroi ou de la performance globale de toute la construction.

Le tableau 4.1 montre les paramètres qui sont pris en considération.

## Découpage du Maroc en zones climatiques

### Zonage climatique d'hiver

Le principe de découpage climatique d'hiver est basé sur la notion de degrés-jours de chauffage. Si l'on considère comme valeur de référence 18°C, qui est la valeur de référence la plus utilisée dans les réglementations étrangères, les valeurs normales annuelles indiqués en degrés-jours de chauffage ont été calculées en accumulant les différences entre 18°C et la température moyenne quotidienne pour chaque jour de l'année où elle est inférieure à 18°C.

Tableau 4.1 Comparaison entre les réglementations étudiées

	<i>Algérie</i>	<i>Etats-Unis</i>	<i>France</i>	<i>Grande-Bretagne</i>	<i>Liban</i>	<i>Suède</i>
<i>Isolation thermique (valeur U)</i>	Valeur maximale de l'ensemble de l'enveloppe	Valeur maximale de l'ensemble de l'enveloppe ou valeur maximale de chaque paroi	Valeur maximale de l'ensemble de l'enveloppe ou solutions techniques approuvées	Valeur maximale de l'ensemble de l'enveloppe ou valeur maximale de chaque paroi	Valeur maximale de chaque paroi	Valeur maximale de l'ensemble de l'enveloppe
<i>Inertie thermique</i>	N'est pas prise en compte	Une forte inertie thermique permet de réduire l'isolation thermique	Possible de la prendre en compte	N'est pas prise en compte	Des exigences en fonction de la zone climatique	N'est pas prise en compte
<i>Protection solaire</i>	Pas d'exigence	Une exigence existe pour les zones climatiques chaudes	Pas d'exigence	Pas d'exigence	Des exigences en fonction de la zone climatique	Pas d'exigence
<i>Apports solaires</i>	Ne sont pas pris en compte	Possible de les prendre en compte	Possible de les prendre en compte	Possible de les prendre en compte	Ne sont pas pris en compte	Sont pris en compte
<i>Apports internes</i>	Ne sont pas pris en compte	Possible de les prendre en compte	Possible de les prendre en compte	Possible de les prendre en compte	Ne sont pas pris en compte	Ne sont pas pris en compte
<i>Calcul informatisé</i>	Possible	Possible	Pas possible	Pas possible	Pas possible	Possible

Par approximation, le nombre de degrés-jours de chauffage peut être calculé suivant la formule suivante :

$$DJCH = (t_i - t_m) \times Nb \quad (\text{éq. 4.1})$$

avec : DJCH = Nombre de degrés-jours de chauffage.

$t_i$  = Température intérieure prise égale à 18°C.

$t_m$  = Température mensuelle extérieure moyenne.

Nb = Nombre de jour par mois.

En analysant les différentes données des stations météorologiques disponibles, le Maroc peut être découpé en quatre zones pour le confort d'hiver :

- La **zone 1** comprend les villes dont le DJCH est supérieur à 1300 : elle couvre principalement les régions montagneuses et caractérisées par un climat froid en hiver.
- La **zone 2** comprend les villes dont le DJCH est compris entre 900 et 1300 : elle couvre les régions du centre du Royaume et le Maroc oriental et caractérisées par un climat continental.
- La **zone 3** comprend les villes dont le DJCH est compris entre 500 et 900 : elle couvre les côtes Méditerranéennes et atlantiques et la région de Tensift caractérisée par un climat tempéré en hiver.

- La **zone 4** comprend les villes dont le DJCH est inférieur à 500, elle couvre les régions du Sud.

Le tableau 4.2 présente les principales villes pour chaque zone définie.

Tableau 4.2

Définition des zones d'hiver pour les principales villes

<i>Zone</i>	<i>Critère</i>	<i>Villes de la zone</i>	
Zone 1	DJCH > 1300	Ifrane	Midelt
Zone 2	900 < DJCH < 1300	Bouarfa Fès Oujda Errachidia Khouribga	Taza Meknès Ouarzazate Chefchaouen Nouasseur
Zone 3	500 < DJCH < 900	Beni Mellal Rabat Tanger Casablanca	Al Hoceima Safi Marrakech Sidi Slimane
Zone 4	DJCH < 500	Essaouira Agadir Tan-Tan	Smara Laâyoune Dakhla

## Zonage climatique d'été

Pour le confort d'été, le découpage climatique, en France et en Algérie, se base sur la notion de température sèche de base, elle est définie comme étant la température moyenne qui n'est dépassée que rarement pendant toute l'année : cinq jours par an pour le cas de la France et 2,5% d'heure en période d'été pour le cas de l'Algérie.

En analysant les résultats obtenus, le Maroc peut être découpé en trois zones :

- **Zone A** : elle regroupe les villes dont la température de base ne dépasse pas 35°C, et se constitue principalement des villes côtières caractérisées par un climat tempéré en été.
- **Zone B** : elle regroupe les villes dont la température de base est comprise entre 35°C et 38°C, et se constitue principalement des zones avoisinantes la zone A ainsi que les villes situées en montagne caractérisées par un climat chaud en été.
- **Zone C** : elle regroupe les villes dont la température de base dépasse 38°C et se constitue principalement des villes de la région de Fès, de Tensift et le Sud du Royaume caractérisé par un climat très chaud en été.

Le tableau 4.3 présente la répartition des villes par zonage climatique d'été.

Tableau 4.3  
Répartition des principales villes par zones climatiques d'été

Zonage	Critère	Villes
Zone A	Tb $\leq$ 35°C	Rabat Tanger Casablanca Al Hoceima Essaouira Agadir Tan-Tan Laâyoune Dakhla
Zone B	35°C < Tb $\leq$ 38°C	Ifrane Midelt Khouribga Sidi Slimane Meknès Chefchaouen Nouasseur Safi Oujda
Zone C	Tb > 38°C	Bouarfa Fès Taza Ouarzazate Beni Mellal Marrakech Smara

## Validation du découpage climatique

Pour étudier l'influence de tous les paramètres sur le découpage climatiques déjà établi (température, humidité relative, ensoleillement, etc...) et valider la répartition proposée ci-dessus, des simulations par ordinateur avec un bâtiment type (voir figure 4.1) ont été réalisées. Les simulations ont consisté à évaluer le niveau de confort thermique, calculé comme l'indice PMV<sup>6</sup> offert à l'intérieur du bâtiment en hiver et la température opérative en été. Deux villes ont été retenues pour chaque zone climatique d'hiver à savoir :

- Pour la zone 1 : Ifrane, Midelt,
- Pour la zone 2 : Fès, Ouarzazate,
- Pour la zone 3 : Rabat, Sidi Slimane,
- Pour la zone 4 : Essaouira, Tan-Tan.

Le modèle de bâtiment utilisé consiste en une maison de type marocaine moderne de surface 77 m<sup>2</sup> composé d'un salon, deux chambres, une cuisine et un hall. La figure 4.1 présente le plan du bâtiment étudié. Voir aussi figure 4.3 pour une description du modèle.

6 « Predictive Mean Vote », voir ISO 7730 (CEN 1995).

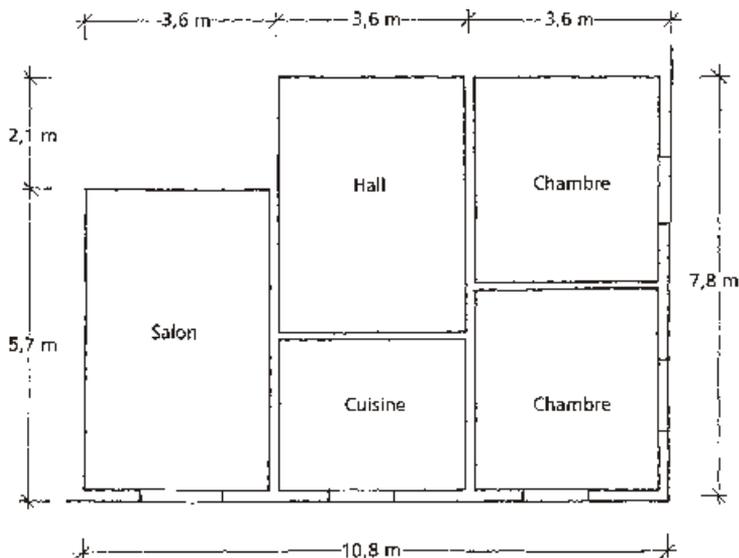


Fig. 4.1  
Plan du bâtiment étudié

### La période d’hiver

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 4.4.

A partir de ces résultats, on en déduit que les villes choisies dans chaque zone offrent bien des niveaux de confort homogènes à l’intérieur des bâtiments, les zones climatiques correspondent alors aux tranches PMV mentionnées dans le tableau 4.5.

Ville	Tranche PMV	Type d’ambiance
Ifrane	-1,5 < PMV < -1	légèrement fraîche
Midelt	-1 < PMV < -0,5	confortable à légèrement fraîche
Fès, Ouarzazate	-0,5 < PMV < 0	confortable « avec sensation de froid »
Rabat, Sidi Slimane	0 < PMV < 0,5	confortable « avec sensation de chaleur »
Tan Tan, Essaouira	0,5 < PMV < 1	confortable à légèrement tiède

Zone climatique	Tranche PMV
Zone 1	PMV < -0,5
Zone 2	-0,5 < PMV < 0
Zone 3	0 < PMV < 0,5
Zone 4	-0,5 < PMV

### La période d’été

Pour étudier le confort d’été, le climat intérieur du modèle soumis au climat des différentes villes a été étudié, les résultats sont donnés par la figure 4.2.

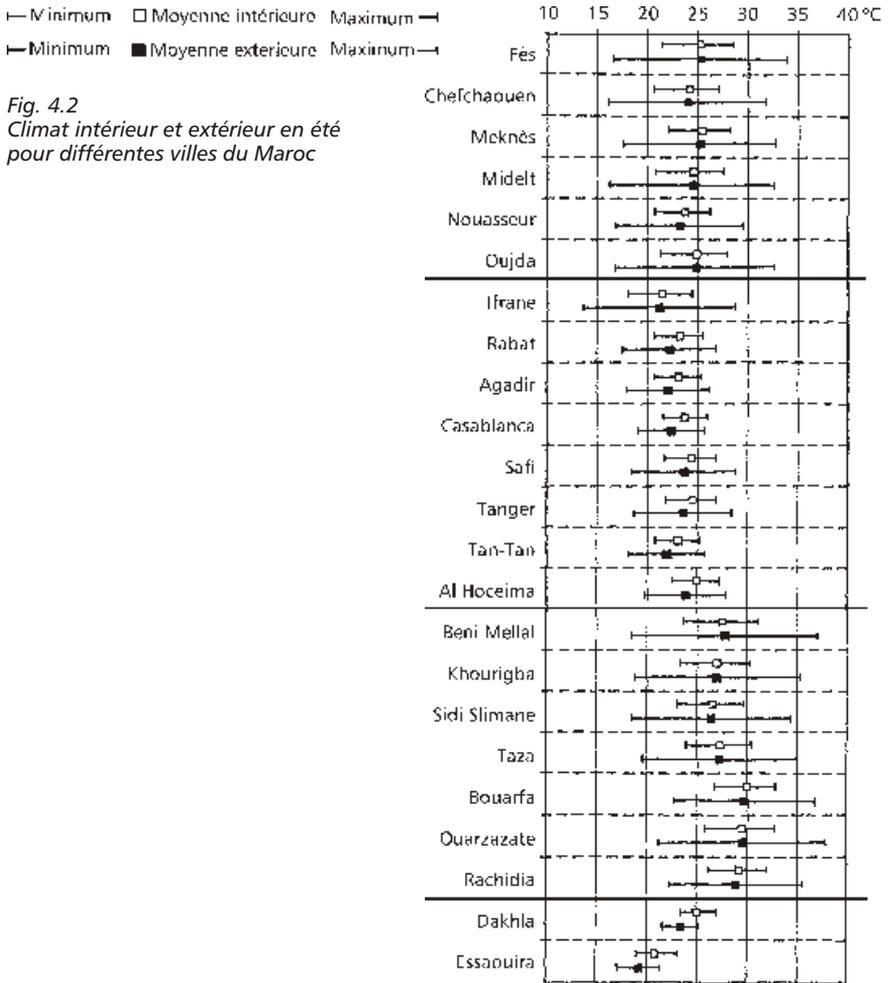


Fig. 4.2  
Climat intérieur et extérieur en été  
pour différentes villes du Maroc

A partir de ces résultats, on en déduit que :

- Les villes d'Ifrane et de Safi présentent des climats intérieurs similaires aux villes de la zone A. Par conséquent, la température de base limite proposée pour la zone A sera alors de 36°C au lieu de 35°C.
- La ville de Khourigba présente un comportement similaire aux villes de la zone C. Par conséquent, elle sera classée zone C.
- Les villes de Meknès et Fès présentent différentes températures de base, cependant, l'étude de simulation montre un même comportement à l'intérieur des bâtiments, les deux villes seront classées dans la même zone C.
- Les villes d'Essaouira et Dakhla présentent un microclimat particulier ; cependant le climat à l'intérieur entre dans la zone de confort.

## Conclusion

Le découpage climatique du Maroc pour le confort d'hiver et d'été a été basé sur les notions du degrés-jours de chauffage et de la température sèche de base, il a aboutit à la définition de quatre zones de confort d'hiver et trois zones pour le confort d'été.

Pour mieux affiner ce découpage et étudier l'influence des différents paramètres climatologiques sur le confort thermique, les simulations numériques par le logiciel DEROB ont permis de confirmer le zonage d'hiver et mieux affiner le découpage d'été.

## Exigences thermiques pour la région de Fès

### Méthodologie d'approche

La méthodologie décrite ci-après peut être appliquée à toutes les zones climatiques du Maroc. Nous nous sommes limités dans le présent rapport à la seule zone de Fès.

En vue d'identifier les parois les plus adaptées à la zone climatique de Fès, nous avons étudié le comportement d'un bâtiment modèle type maison marocaine en faisant varier les différents paramètres liés à sa conception à savoir :

- Murs extérieurs
- Toitures
- Taille des fenêtres.

Pour faire varier ces différents composants, nous avons procédé par simulation numérique, le logiciel de simulation utilisé étant le DEROB-LTH version 99.02 (Kvist, 2001). Pour chaque paramètre à optimiser, les autres paramètres étant fixés au cas de base.

Pour le calcul des charges de chauffage et de climatisation, les températures pour le confort d'hiver et d'été ont été fixées respectivement à 16°C et 26°C, ces valeurs ont été choisies pour garantir un confort thermique minimal et les valeurs de consommation qui en découlent n'ont pour objectif que de trouver la conception optimale du bâtiment en se basant sur la tendance globale de la consommation d'énergie sans se préoccuper de la valeur elle-même.

### Le modèle de bâtiment

Le modèle de bâtiment utilisé consiste en une maison de type marocaine moderne de surface 77 m<sup>2</sup>, de couleur claire et composée d'un salon, deux chambres, une cuisine et un hall. La figure 4.1 présente le plan du bâtiment étudié et la figure 4.3 le modèle.

La composition des parois retenues dans le cas de base sont mentionnées dans le tableau 4.6.

Fig. 4.3  
Modèle du bâtiment  
étudié

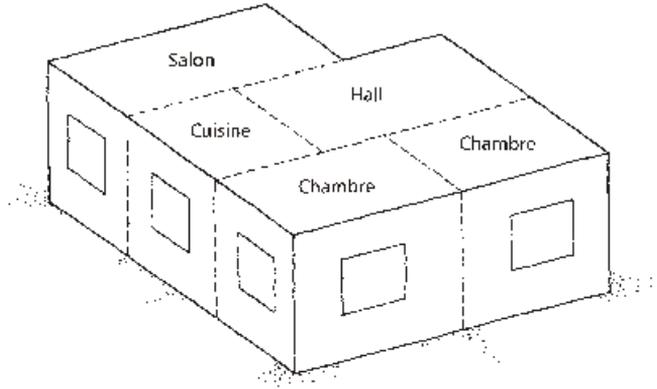


Tableau 4.6 Parois du modèle (cas de base)

<i>Parois</i>	<i>Composition</i>	<i>Epaisseur (cm)</i>
Mur extérieur	Enduit en mortier de ciment	1,5
	Maçonnerie en briques creuses	7
	Lame d'air	7
	Maçonnerie en briques creuses	7
	Enduit en mortier de ciment	1,5
Mur intérieur	Enduit en mortier de ciment	1,5
	Maçonnerie en briques creuses	7
	Enduit en mortier de ciment	1,5
Toiture	Enduit en mortier de ciment	2
	Dalle en béton armé	10
	Enduit en mortier de ciment	2
	Mortier de plâtre	3,5
Plancher bas	Couche de terre	50
	Enduit en mortier de ciment	1,5
	Dalle en béton armé	10
	Enduit en mortier de ciment	1,5
Portes	Bois	4
Fenêtres	Verre	4

### Taux ventilation et charge interne

Les taux de ventilation et charge interne utilisés par tranche horaire en hiver (du 10 novembre au 20 mars) et en été (du 20 juin au 20 septembre) ainsi que pour le reste de l'année figurent dans les tableaux 4.7, 4.8 et 4.9.

Tableau 4.7 Ventilation et charge interne en hiver

<i>Tranche horaire</i>	<i>Chambre Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>	<i>Salon Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>	<i>Cuisine Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>
01 – 08	1,5	330	1,5	0	1,5	0
09 – 12	2	0	2	110	2	800
13 – 14	1,5	220	1,5	660	1,5	800
15 – 18	1,5	0	1,5	330	1,5	0
19 – 24	1,5	330	1,5	700	1,5	400

Tableau 4.8 Ventilation et charge interne en été

<i>Tranche horaire</i>	<i>Chambre Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>	<i>Salon Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>	<i>Cuisine Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>
01 – 08	20	330	20	0	20	0
09 – 12	5	0	5	110	5	800
13 – 14	1,5	220	1,5	660	1,5	800
15 – 18	1,5	0	1,5	330	1,5	0
19 – 24	20	330	20	700	20	400

Tableau 4.9 Ventilation et charge interne pour le reste de l'année

<i>Tranche horaire</i>	<i>Chambre Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>	<i>Salon Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>	<i>Cuisine Taux de ventilation</i>	<i>Charge interne</i>
01 – 08	1,5	330	1,5	0	1,5	0
09 – 12	2	0	2	110	2	800
13 – 14	2	220	2	660	2	800
15 – 18	2	0	2	330	2	0
19 – 24	1,5	330	1,5	700	1,5	400

Les paramètres de taux de changement d'air ont été optimisés par simulation numérique pour déterminer, par exemple, à quelle heure il faut fermer et à quelle heure il faut ventiler et à quel taux.

A noter que le programme DEROB n'accepte que cinq tranches horaires.

## Entourage du bâtiment

Le bâtiment modèle sera étudié en fonction de son entourage, les cas de figure à tester sont les suivants :

- Bâtiment isolé,
- Bâtiment avec un mur mitoyen,
- Bâtiment avec deux murs mitoyens,
- Bâtiment avec trois murs mitoyens.

Nous nous sommes par contre limités dans le présent rapport à étudier un bâtiment avec deux murs mitoyens.

### Murs extérieurs

Les murs extérieurs sont étudiés en fonction de leur performance thermique (Valeur U), les valeurs testées sont les suivantes :

- Mur avec valeur  $U=1,5 \text{ W/m}^2.\text{K}$  (correspond au cas de base)
- Mur avec valeur  $U=1,25 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Mur avec valeur  $U=1 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Mur avec valeur  $U=0,75 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Mur avec valeur  $U=0,5 \text{ W/m}^2.\text{K}$

### Toiture

Les valeurs U testées pour le cas des toitures sont :

- Toiture avec valeur  $U = 2 \text{ W/m}^2.\text{K}$  (cas de base)
- Toiture avec valeur  $U = 1,5 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Toiture avec valeur  $U = 1 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Toiture avec valeur  $U = 0,75 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- Toiture avec valeur  $U = 0,5 \text{ W/m}^2.\text{K}$

### Fenêtres

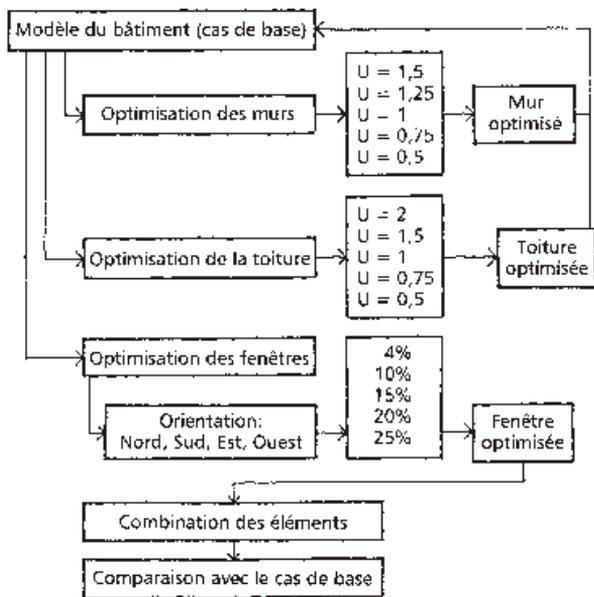
Les fenêtres sont optimisées en fonction de leurs orientations : sud, est, ouest et nord.

Pour chaque direction, on teste le comportement du bâtiment en fonction des pourcentages de surfaces de fenêtres suivants (% par rapport à la surface du plancher) :

- 4%
- 10%
- 15%
- 20%
- 25%

## Le processus d'optimisation

Le logogramme suivant schématise le processus d'optimisation des parois au Maroc.



## Résultats du processus d'optimisation

### Optimisation des murs extérieurs

Dans cette partie, cinq types de murs ont été étudiés, le tableau 4.10 donne la composition réelle de chaque type de mur et sa valeur U.

#### Cas passif

Dans cette partie, on a étudié le comportement du bâtiment de manière passive sans apport d'énergie (chauffage ou climatisation). La figure 4.4 donne les variations de la température opérative du salon en fonction des différents types de murs pour un jour typique d'hiver et d'été.

En hiver, on note une amélioration sensible de la température opérative à l'intérieur du local, cette amélioration varie en moyenne de 0,3°C entre le cas de base M0 et M1 et de 1,3°C entre le cas M0 et M4. Cependant, la zone de confort n'est pas atteinte surtout durant la nuit et la matinée où la température opérative ne dépasse pas dans tous les cas 14°C. En été, aucune amélioration de la température opérative à l'intérieur du local n'a été notée.

L'isolation des murs a donc un effet positif en hiver. Cependant, le recours à une source active d'énergie pour le chauffage et la climatisation est nécessaire pour garantir un meilleur confort à l'intérieur du bâtiment.

Tableau 4.10 Composition des différents types de murs étudiés

Cas correspondant	Matériau	Composition	Epaisseur (cm)	Valeur U (W/m <sup>2</sup> .K)
M0 (Cas de base)	Enduit en mortier de ciment		1,5	1,44
	Brique en terre cuite		7	
	Lame d'air		5	
	Brique en terre cuite		7	
	Enduit en mortier de ciment		1,5	
M1	Enduit en mortier de ciment		1,5	1,23
	Brique en terre cuite		7	
	Liège		1,5	
	Brique en terre cuite		7	
	Enduit en mortier de ciment		1,5	
M2	Enduit en mortier de ciment		1,5	0,99
	Brique en terre cuite		7	
	Liège		2,5	
	Brique en terre cuite		7	
	Enduit en mortier de ciment		1,5	
M3	Enduit en mortier de ciment		1,5	0,77
	Brique en terre cuite		7	
	Liège		4	
	Brique en terre cuite		7	
	Enduit en mortier de ciment		1,5	
M4	Enduit en mortier de ciment		1,5	0,50
	Brique en terre cuite		7	
	Liège		7,5	
	Brique en terre cuite		7	
	Enduit en mortier de ciment		1,5	

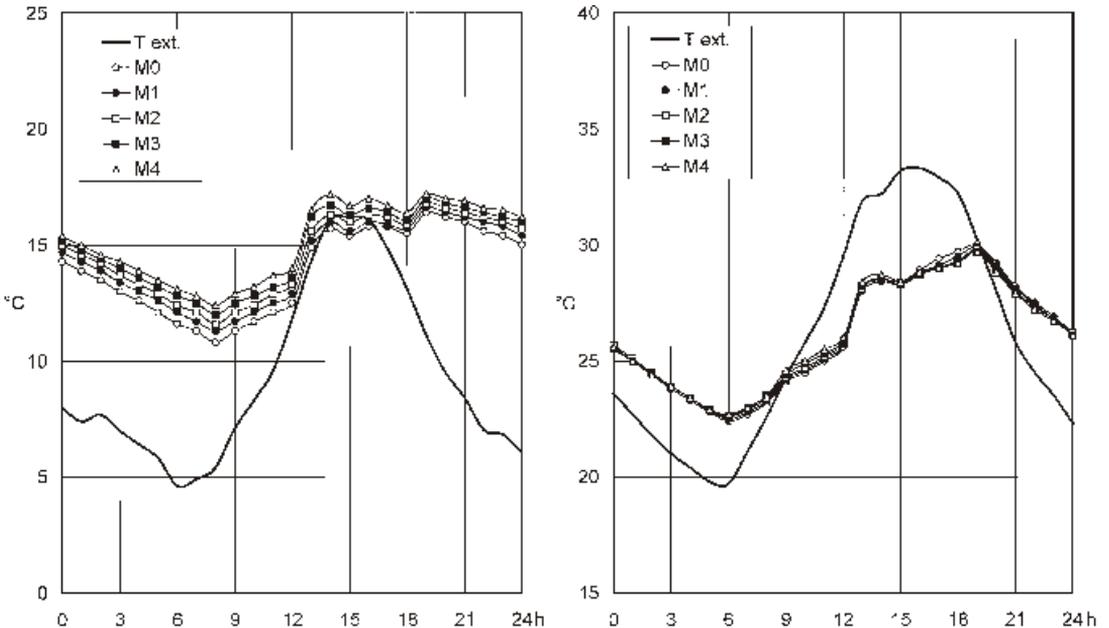


Fig. 4.4 Variation de la température opérative en hiver (à gauche) et en été (à droite)

### Cas actif

En vue d'assurer un confort thermique minimal, le bâtiment est équipé d'un système de chauffage et de climatisation où la température a été fixée à 16°C en hiver et à 26°C en été. La figure 4.5 donne l'évolution de l'énergie pour le chauffage et la climatisation des différents volumes du bâtiment pour les différents cas étudiés.

On note ici une diminution de la consommation d'énergie pour le chauffage, cette diminution est comprise entre 12% entre le cas M0 et M1 et 32% entre M0 et M4. Par contre, l'apport de l'isolation thermique des murs n'est pas toujours favorable pour la consommation d'énergie de la climatisation qui diminue légèrement entre M0 et M1 (2%) mais qui augmente par la suite d'environ 6%. **L'optimum d'isolation est donc compris entre le cas M1 et M2 soit une valeur U du mur comprise entre 1 et 1,25 W/m<sup>2</sup>.K.**

### Remarques

- Les résultats obtenus pour la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation sont donnés pour le modèle du bâtiment objet de cette étude, il n'existe cependant aucune donnée sur la consommation réelle d'un bâtiment de ce type au Maroc.
- Une valeur U comprise entre 1 et 1,25 W/m<sup>2</sup>.K correspond à une isolation comprise entre 1,5 et 2,5 cm de liège, ces valeurs sont des valeurs théoriques obtenues par un modèle de bâtiment bien défini. Il est évident que pour autre type de mur, un calcul de la valeur U est nécessaire pour pouvoir déterminer l'épaisseur de l'isolant.

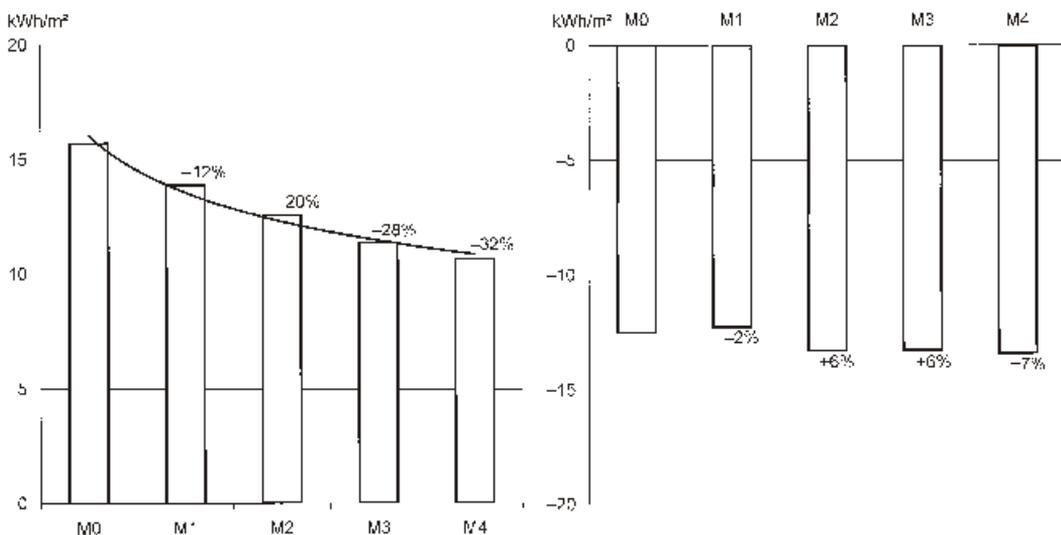


Fig. 4.5 Consommation d'énergie (kWh/m<sup>2</sup>) pour le chauffage (à gauche) et la climatisation (à droite)

## Optimisation de la toiture

Dans cette partie, cinq types de toiture ont été étudiés, le tableau 4.11 donne la composition réelle de chaque type de toiture et sa valeur U.

Tableau 4.11  
Composition des différents types de toitures étudiés

Cas correspondant	Matériau	Composition	Epaisseur (cm)	Valeur U (W/m <sup>2</sup> .K)
T0 (Cas de base)	Enduit en mortier de ciment		2	2,35
	Béton armé		10	
	Enduit en mortier de ciment		2	
	Enduit en plâtre		3,5	
T1	Enduit en mortier de ciment		2	1,41
	Liège		1,5	
	Béton armé		10	
	Enduit en mortier de ciment		2	
T2	Enduit en plâtre		3,5	1,00
	Enduit en mortier de ciment		2	
	Liège		3	
	Béton armé		10	
T3	Enduit en mortier de ciment		2	0,78
	Enduit en plâtre		3,5	
	Liège		4,5	
	Béton armé		10	
T4	Enduit en mortier de ciment		2	0,51
	Enduit en plâtre		3,5	
	Liège		8	
	Béton armé		10	
	Enduit en mortier de ciment		2	
	Enduit en plâtre		3,5	

### Cas passif

En suivant la même méthodologie adoptée pour les murs, on a étudié dans cette première partie le comportement passif du bâtiment sous différents types de toitures, la figure 4.6 donne les résultats obtenus pour les cas d'hiver et d'été.

De même pour les murs, l'amélioration du climat intérieur se fait sentir plutôt en hiver qu'en été. En hiver, la température moyenne a augmenté de 0,9°C entre le cas T0 et T1 et à environ 2°C entre le cas T0 et T4, sans atteindre pourtant la zone de confort pendant la nuit et le début de journée. En été, on note une diminution de la température en cours de journée par rapport au cas de base alors qu'en matinée, on remarque une augmentation. En moyenne, on ne relève aucune amélioration.

De même pour les murs, le recours à une source active d'énergie pour le chauffage et la climatisation est nécessaire pour garantir un meilleur confort à l'intérieur du bâtiment.

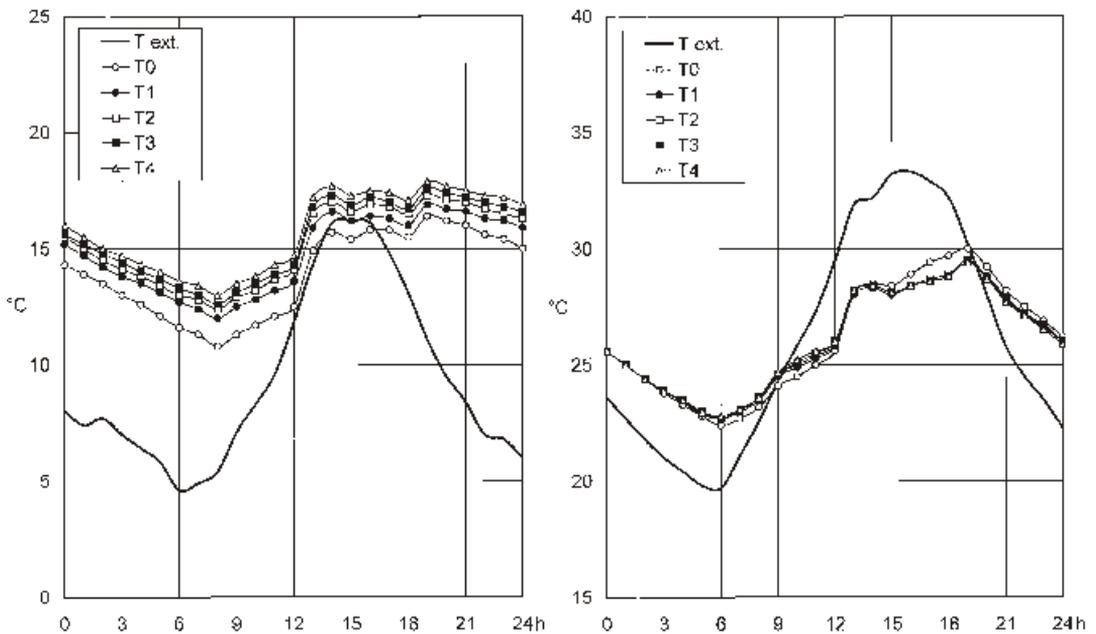


Fig. 4.6 Variation de la température opérative en hiver (à gauche) et en été (à droite)

*Cas actif*

La figure 4.7 donne la variation de la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation des différents volumes du bâtiment pour les différents cas étudiés.

L'amélioration du niveau d'isolation thermique de la toiture affecte considérablement la consommation d'énergie pour le chauffage, cette

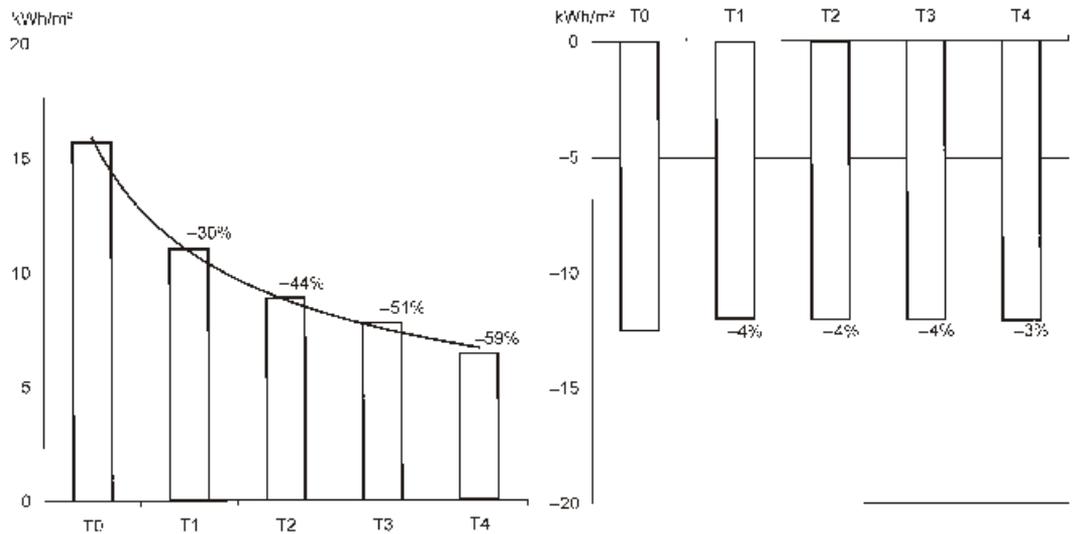


Fig. 4.7 Variation de la consommation d'énergie (kWh/m²) pour le chauffage (à gauche) et la climatisation (à droite)

amélioration varie entre 30% entre le cas de base (T0) et le cas T1 et peut atteindre environ 60% entre le cas T0 et T4. Cependant pour la climatisation, l'amélioration ne dépasse pas 4% dans la majorité des cas.

Etant donné qu'on vise une économie d'énergie globale de 25% par rapport au cas de base, on peut recommander une isolation minimale pour la toiture comprise entre le cas T1 et T2, **soit une valeur  $U$  de la toiture comprise entre 1 et 1,5  $W/m^2.K$** , soit dans notre cas, une isolation comprise entre 1,5 et 3 cm de liège.

## Optimisation des fenêtres

Dans cette partie, cinq cas de fenêtres ont été étudiés avec la même orientation Sud. Les pourcentages de fenêtres testés par rapport à la surface de plancher sont : 4, 10, 15, 20 et 25%.

Le cas de base correspond à un pourcentage d'environ 10% par rapport à la surface du plancher.

A noter que ces pourcentages correspondent à la surface de vitrage et non pas à la surface de la fenêtre qui occupe dans ce cas une surface plus grande.

### Cas passif

On s'intéresse dans un premier temps au comportement du bâtiment de manière passive, les résultats obtenus sont mentionnés dans la figure 4.8.

L'augmentation du pourcentage de la surface vitrée a pour effet d'augmenter la température opérative aussi bien en hiver qu'en été. En

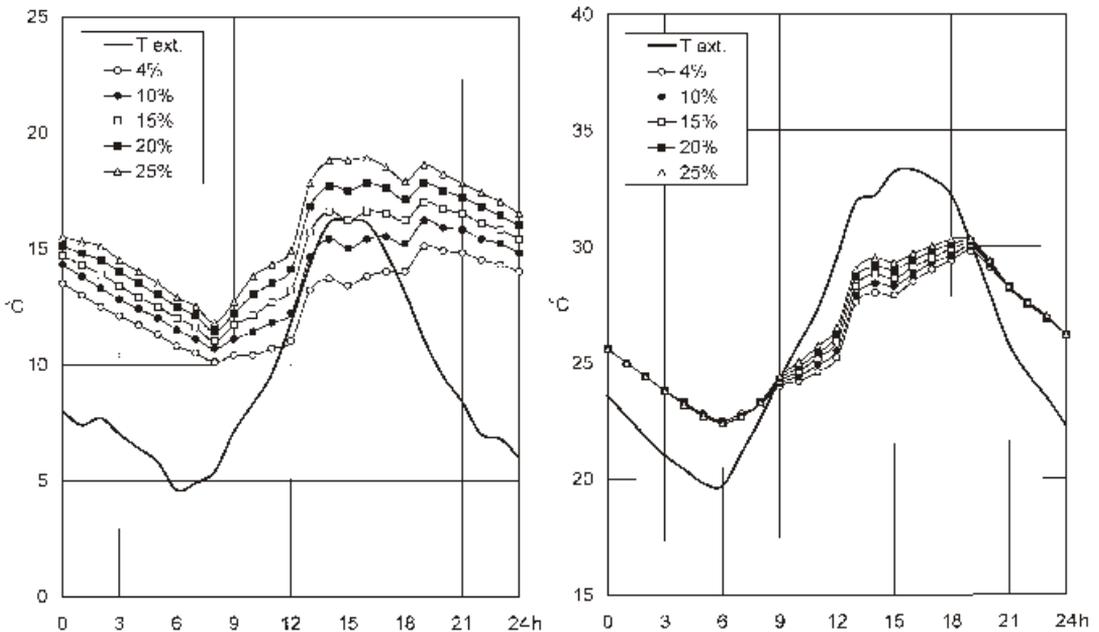


Fig. 4.8 Variation de la température opérative en hiver (à gauche) et en été (à droite)

hiver, cette augmentation varie en moyenne entre 1°C et 3,2°C et permet d'atteindre la zone de confort pendant la journée et de s'en approcher durant la nuit.

En été, cette augmentation a un effet négatif puisqu'elle crée un environnement non confortable pendant la journée. Par contre, aucune variation n'a été notée pendant la nuit.

*Cas actif*

La figure 4.9 présente l'évolution de la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation en fonction de la taille des surfaces vitrées.

On note ici une diminution de la consommation d'énergie pour le chauffage, cette réduction est comprise entre 14% et 35%. Cependant pour la climatisation, on note une augmentation de la consommation d'énergie. En effet, pour des pourcentages élevés de surfaces de vitrage, le bâtiment se comporte comme une serre emmagasinant de l'énergie que le système de climatisation doit pallier.

On a ensuite étudié la consommation globale du bâtiment pour le chauffage et la climatisation, la figure 4.10 donne la consommation globale pour les différents volumes.

On note alors que la consommation globale diminue de 6% entre les deux premiers cas et de 10% entre le premier et le troisième cas. On gagne donc environ 4% alors qu'entre le premier et le quatrième cas on ne gagne que 2%.

***L'optimum des tailles des surfaces vitrées pour une orientation sud est donc de 15%.***

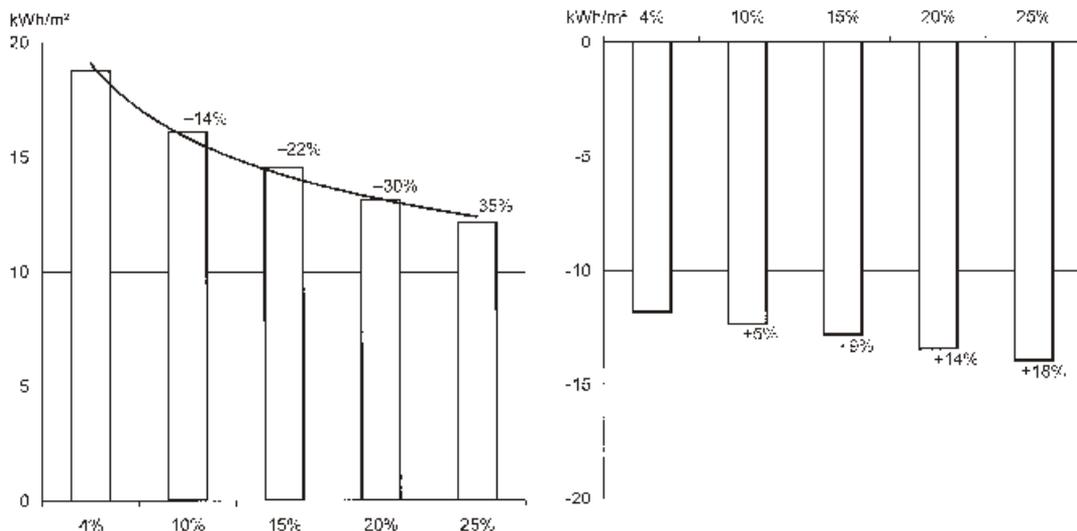
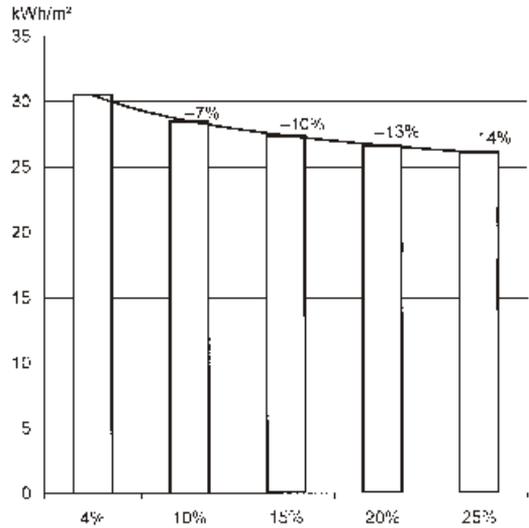


Fig. 4.9 Variation de la consommation d'énergie pour le chauffage (à gauche) et la climatisation (à droite)

Fig. 4.10  
Consommation globale  
du bâtiment pour le chauffage  
et la climatisation



Ce processus d'optimisation est à mener également pour les autres orientations du bâtiment.

### Combinaison des différents éléments optimisés

Dans cette partie, le bâtiment sera modélisé en apportant les différentes solutions optimisées à savoir :

- Des murs extérieurs isolés ( $U=1$  et  $U=1,25$   $W/m^2.K$ )
- Une toiture isolée ( $U=1$  et  $U=1,5$   $W/m^2.K$ )
- Des fenêtres orientées Sud avec une surface vitrée de 15%.

#### *Cas passif*

La figure 4.11 présente la variation de la température opérative entre le cas de base et le cas optimisé en hiver et en été. Les valeurs  $U$  des murs et toitures sont égales à  $1$   $W/m^2.K$ .

On note ici que le climat ambiant en hiver s'améliore considérablement, la différence entre le cas de base et le cas optimisé est d'environ  $2^{\circ}C$ , le bâtiment est dans la zone de confort toute la journée et même la nuit si on considère que les besoins en chaleur diminuent en soirée. Par contre, on note que la température en période estivale augmente relativement : ceci peut être expliqué par le fait que l'isolation thermique empêche le bâtiment de se refroidir passivement.

#### *Cas actif*

Dans un premier cas, on étudie les limites inférieures d'isolation des murs et toitures, c'est-à-dire  $U$  égale à  $1,25$   $W/m^2.K$  et celle des toitures égale à  $1,5$   $W/m^2.K$ .

Dans le deuxième cas, on présente les résultats de consommation d'énergie pour les limites supérieures d'isolation c'est-à-dire la valeur  $U$  des murs et toitures égale à  $1$   $W/m^2.K$ . La figure 4.12 donne la variation

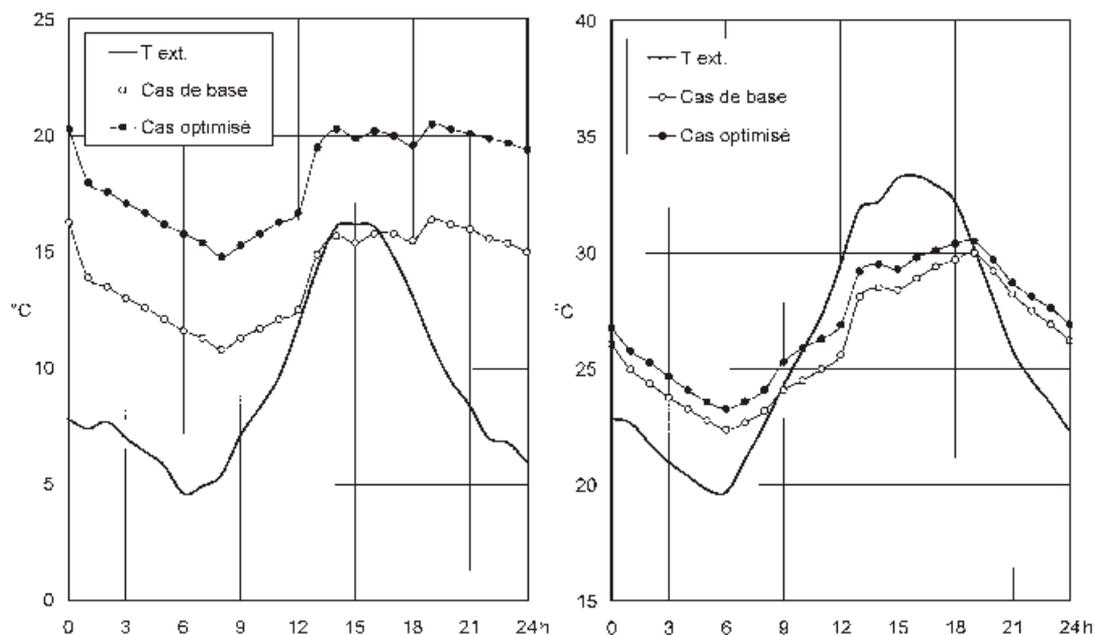


Fig. 4.11 Variation de la température opérative entre le cas de base et le cas optimisé en hiver (à gauche) et en été (à droite)

de la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation ainsi que la consommation globale du bâtiment.

On note ici que la consommation annuelle pour le chauffage diminue de 65% à 77% alors que la consommation d'énergie pour la climatisation augmente de 31% à 36%. Globalement, l'économie d'énergie réalisée est comprise entre 20 et 30%.

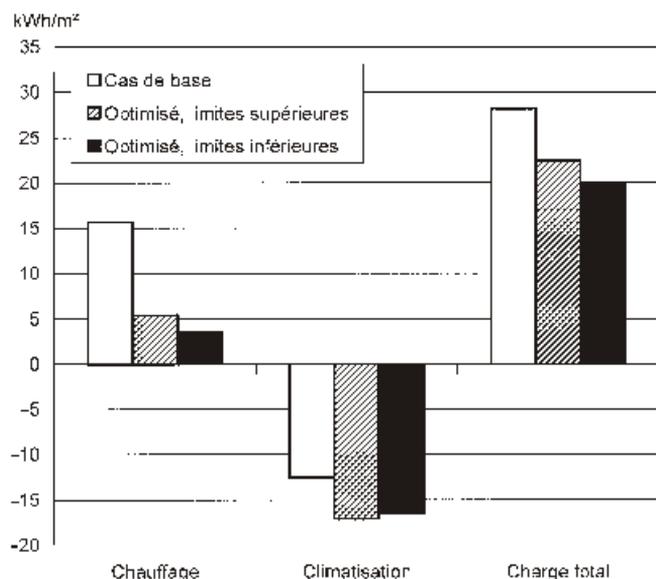


Fig. 4.12 Variation de la consommation d'énergie entre le cas de base et le cas optimisé avec les limites inférieures (à gauche) et supérieures (à droite)

## Conclusion

Au terme de ce chapitre, les principales conclusions qui en découlent peuvent être résumées comme suit :

- L'étude des normes internationales a permis d'identifier les différents paramètres à prendre en considération dans tout projet de réglementation thermique et a été couronné par l'élaboration d'une méthodologie de travail.
- Cette méthodologie a été appliquée pour obtenir dans un premier temps le découpage du Maroc en zones climatiques pour le confort d'hiver et d'été.
- Le processus d'optimisation des parois de constructions a été mené pour la région de la ville de Fès dans l'objectif de montrer que ce processus peut être bien appliqué à toutes les zones climatiques du Maroc.
- Les principales exigences de confort qui découlent de ce processus sont :
  - un coefficient d'isolation thermique compris entre 1 et  $1,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pour les toitures,
  - un coefficient d'isolation thermique compris entre 1 et  $1,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pour les murs,
  - un pourcentage de vitrage d'environ 15% pour les fenêtres orientées Sud.
- Cette conception permet d'atteindre une économie d'énergie globale comprise entre 20% et 30% par rapport à un cas de bâtiment non isolé.

Le développement futur de la réglementation doit être concentré sur l'application de cette méthodologie pour les différentes zones climatiques du Royaume en vue d'obtenir les parois optimisées et par la suite traduire ces exigences en terme sous forme d'un code de calcul. Les solutions sans calcul se découleront automatiquement des parois optimisées.

Le chapitre qui suit a pour objectif de trouver les matériaux d'isolations qui peuvent satisfaire les exigences réglementaires pour le cas de la région de Fès.



# Proposition de matériaux isolants

Un matériau thermiquement isolant est un matériau dont le rôle principal est de réduire la transmission de chaleur entre deux espaces de températures différentes. Cette propriété de transmission de chaleur est quantifiée par la *conductivité thermique* du matériau, plus il est faible plus la matière s'oppose au transfert de chaleur.

Les simulations dans le chapitre 4 *Vers une réglementation thermique* ont montré l'importance de l'utilisation des matériaux isolants afin d'améliorer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments et de diminuer la consommation d'énergie des bâtiments, surtout dans certaines régions du Maroc.

Dans un contexte où le Maroc ne produit qu'une quantité limitée de matériaux de construction isolants, nous avons étudié les possibilités d'introduire dans ce pays la fabrication de panneaux de laine de bois. Ce chapitre fait donc l'objet d'une description des propriétés des panneaux de laine de bois, d'une étude de faisabilité de production à partir des matières premières existantes au Maroc, des propositions d'applications possibles de ce matériau et une étude de stratégie de commercialisation du produit au Maroc.

Pour compléter cette étude, nous avons étudié l'utilisation des panneaux de laine de bois dans le laboratoire provincial du LPEE à Ouarzazate, une étude comprenant l'analyse d'une isolation de la toiture plafond avec des panneaux de laine de bois et son impact sur le confort intérieur du bâtiment.

## Inventaire des matériaux isolants disponibles au Maroc

Un inventaire des matériaux isolants disponibles au Maroc (Mraissi et Johansson 1998) a montré que les matériaux isolants qui sont fabriqués au Maroc à partir de matière première disponible localement sont l'aggloméré pur de liège, la laine de roche et la perlite. En plus le polystyrène et le polyuréthane sont fabriqués localement à partir de matière première importée. Pourtant, les produits nationaux ne peuvent pas satisfaire à toutes les applications de l'industrie et du bâtiment. On constate qu'une grande partie des matériaux d'isolation sont importés, tels que la laine de verre, ceci est dû principalement à un manque d'industrie spécialisée dans ce domaine et à une demande qui reste assez faible.

Les principales utilisations des matériaux isolants disponibles au Maroc sont dans les toitures plates (plaques de liège) et dans les toitures industrielles (laine de verre, laine de roche, polystyrène, polyuréthane).

On constate que les matériaux sont le plus souvent utilisés dans l'industrie, leur application dans le domaine du bâtiment reste assez limitée. La cause évoquée par les différents responsables des sociétés est le manque de réglementation régissant ces produits au Maroc.

L'inventaire a retenu deux matériaux intéressants pour le Maroc : les blocs de perlite et les panneaux de laine de bois. Ces matériaux ont l'avantage de pouvoir être fabriqués à partir de matières premières disponibles localement dans le pays. L'étude réalisée montre que ces deux matériaux possèdent toutes les conditions requises pour être introduits au Maroc avec un certain avantage pour les panneaux de laine de bois dont la fabrication pourrait être introduite dans un délai relativement rapide. C'est pourquoi cette étude traite plus en détails ce produit. Par contre pour ce qui est des blocs de perlite, une étude de faisabilité détaillée se trouve dans le rapport El Kortbi et al. (1999b).

## Etude de panneaux de laine de bois

Le panneau de laine de bois, fabriqué à partir de laine de bois, de ciment et d'eau, a été inventé en Autriche en 1908. Sa fabrication se propagea après dans les autres pays d'Europe et en Amérique du Nord. Ce matériau présente une bonne résistance à l'humidité, aux micro-organismes et aux insectes xylophages, sa fabrication gagna petit à petit plusieurs pays tropicaux en Asie, en Amérique Latine et en Afrique.

Les panneaux de laine de bois peuvent être utilisés dans plusieurs applications dans différents types de constructions et dans différents secteurs du marché du bâtiment : logements, bureaux, hôtels, industries, salles de sport et bâtiments publics. En tant que matériau d'isolation thermique, ils peuvent être utilisés pour les murs et la toiture tandis que comme absorbants acoustiques ils sont principalement utilisés pour l'isolation des plafonds mais aussi des murs. Etant donné les bonnes propriétés d'isolation thermique et d'absorption acoustique, nombreuses sont les applications combinées de ce matériau.



Fig. 5.1 Différents types de panneaux de laine de bois : panneau isolant (à gauche) et panneau acoustique (au milieu). A droite, un panneau autoporteur renforcé de rondins

## Types de produits

### Panneaux isolants

Les dimensions des panneaux sont normalement de 60 × 240 cm et leur épaisseur varie de 1,5 à 15 cm. On désigne par panneaux isolants les panneaux destinés à l'isolation thermique des toitures, des murs, etc. Ils sont fabriqués à partir de laine de bois grossière (grosseur : 2,5 – 4 mm) et de ciment portland composé leur donnant une surface irrégulière, voir figure 5.1.

### Panneaux acoustiques

Les panneaux de laine de bois destinés à l'absorption acoustique restant apparents, les exigences en matière d'esthétique sont plus élevées. Ces panneaux, dont l'épaisseur est de 2 à 5 cm, sont habituellement fabriqués à partir d'une laine de bois plus fine (1 – 3 mm), voir figure 5.1, et sont souvent peints ou fabriqués à partir d'un ciment blanc ce qui leur donne une couleur claire imitant le bois.

### Panneaux autoporteurs

L'épaisseur de ces panneaux est normalement entre 10 et 15 cm. Les panneaux autoporteurs sont des panneaux de laine de bois dont la résistance à la flexion est renforcée par une armature pouvant être constituée de liteaux ou rondins insérés dans le panneau, voir figure 5.1. La résistance à la flexion des panneaux autoporteurs est largement supérieure à celle des autres produits en panneaux de laine de bois.

### Panneaux composites

Les panneaux composites sont des panneaux associant une couche de laine de bois/ciment avec un autre matériau tel que le polystyrène, la laine de roche ou le polyuréthane. La couche de laine de bois/ciment est mince (seulement 5 – 10 mm) comparée à l'autre matériau utilisé. Ces produits assurent une résistance thermique supérieure pour une plus faible épaisseur de panneau. Ceci est particulièrement intéressant dans le cas d'une isolation complémentaire où l'on ne désire pas trop accroître l'épaisseur d'un mur par exemple.

## Caractéristiques techniques

Les propriétés des panneaux en laine de bois sont principalement fonction de leur masse volumique. Plus le panneau est mince, plus élevée devra être sa masse volumique afin d'obtenir un panneau offrant une résistance à la flexion requise.

## Conductivité thermique

La conductivité thermique est d'une part fonction de la masse volumique et d'autre part du taux d'humidité du panneau. Le tableau 5.1 montre la conductivité thermique utile en fonction de la masse volumique.

Tableau 5.1 Conductivité thermique et résistance à la flexion

<i>Épaisseur (mm)</i>	<i>Masse volumique* (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Conductivité thermique (W/mK)</i>	<i>Résistance à la flexion (MPa)</i>
15	570	0,15	1,7
25	460	0,09	1,0
50	390	0,09	0,5
75	380	0,09	0,5
100	360	0,09	0,4

\* Valeur maximale

Source : DIN 1989

## Résistance au feu

Bien que les panneaux de laine de bois contiennent du bois, ils sont très résistants au feu. Le matériau est classé comme difficilement inflammable et de ce fait le matériau est approuvé comme matériau de revêtement intérieur selon les normes internationales. Un panneau de 50 mm d'épaisseur peut résister au feu 60 minutes.

## Résistance mécanique

Le tableau 5.1 montre la résistance à la flexion des panneaux en laine de bois de différentes masses volumiques.

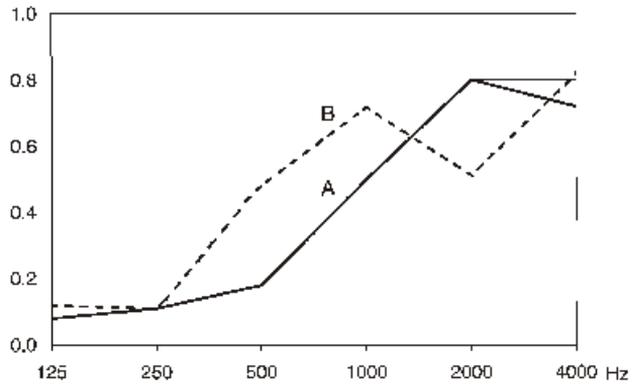
Quant à la résistance à la compression, elle est généralement indiquée par le rapport entre la charge et la compressibilité. Pour une compressibilité de 10%, la charge varie entre 0,1 et 0,3 MPa en fonction de la masse volumique.

## Propriétés acoustiques

La capacité d'absorption des panneaux varie en fonction de leur épaisseur et dépend de la manière dont ils sont posés, soit directement sur un support ou en prévoyant un espace, voir figure 5.2. La capacité d'absorption acoustique des panneaux revêtus d'une peinture reste inchangée.

En eux-mêmes, les panneaux de laine de bois ne procurent qu'une faible isolation acoustique mais en recouvrant d'un enduit l'une de leurs surfaces, on obtient une bonne isolation avec un indice d'affaiblissement acoustique, R 30 dB.

Fig. 5.2  
 Coefficient d'absorption  
 acoustique.  
 Epaisseur : 25 mm.  
 A) Distance entre  
 plafond et panneaux :  
 0 mm.  
 B) Distance entre  
 plafond et panneaux :  
 50 mm.



## Résistance à l'humidité et aux agents extérieurs

Les panneaux en laine de bois sont réputés pour leur bonne résistance à des taux d'humidité élevés. Il s'avère en outre que ces panneaux sont très résistants au pourrissement et à la moisissure. Les fibres de bois des panneaux étant enduites de ciment, la résistance contre les attaques de termites et autres insectes s'en trouve fortement accrue.

## Etude de faisabilité

### Ressources en matières premières

Les procédés de fabrication sont simples et ils utilisent des matières premières normalement disponibles dans tous les pays : le bois et le ciment.

La superficie totale plantée d'arbres est de 5,8 millions d'hectares, ce qui correspond à 8% de la superficie totale du Maroc. Pour la fabrication de panneaux de laine de bois on pourrait utiliser surtout le pin (pin d'Alep, pin maritime, etc...), mais aussi le cèdre, le peuplier et certaines espèces d'eucalyptus. Les ressources en pin sont d'environ 81.000 ha<sup>7</sup> ; un chiffre qui devrait augmenter car un important projet de reboisement est mis en place.

Les besoins en forêts de pin pour une production annuelle de 7.000 m<sup>3</sup> de panneaux de laine de bois (une petite usine) sont de 250 hectares. Les ressources en pin sont donc suffisantes pour démarrer la production de panneaux de laine de bois au Maroc.

On utilise généralement du ciment Portland artificiel, mais il est également possible d'utiliser du ciment à haute résistance initiale. Pour des raisons esthétiques, certains panneaux acoustiques sont fabriqués avec du ciment blanc. Le Maroc dispose d'une importante production de ciment, principalement le ciment composé. Par contre le ciment blanc est importé.

On utilise souvent un accélérateur – normalement du chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>) – afin de pouvoir démouler les panneaux après 24 heures.

7 Selon le Ministère des Eaux et Forêts.

## Essais de production

Ci-après se trouvent résumés les essais de production de panneaux de laine de bois décrits en détails dans El Kortbi et al. (1999b).

### *Moyens de production*

Les panneaux composés de laine de bois et de rondins provenant d'essences marocaines ont été fabriqués à l'usine de Tepro Byggmaterial AB à Österbymo, Suède.

### *Produit choisi*

L'objectif de cet essai était de produire des panneaux de toiture auto-porteurs armés de rondins d'un format de 15 × 60 × 240 cm (voir figure 5.1).

### *Matières premières*

La laine de bois destinée aux panneaux a été produite à partir du pin d'Alep (*Pinus Halepensis*), voir figure 5.3. Cette essence, jamais utilisée auparavant en production à grande échelle, est utilisée dans des applications industrielles limitées. Ce bois est assez tendre et donc facile à raboter, ce qui est indispensable pour produire de la laine de bois.

L'armature des panneaux a été réalisée avec des branches de faible diamètre d'*Eucalyptus Camaldulensis*. Cette essence d'eucalyptus est la plus courante au Maroc.

Au cours de cet essai, nous avons utilisé de la laine de bois fine (largeur = 2 mm) et un liant composé d'un mélange de 2/3 de ciment blanc et de 1/3 de chaux.

### *Fabrication*

Les troncs de pin d'Alep ainsi que les rondins d'*Eucalyptus Camaldulensis* ont été décortiqués avant d'être expédiés en Suède où le pin a en-

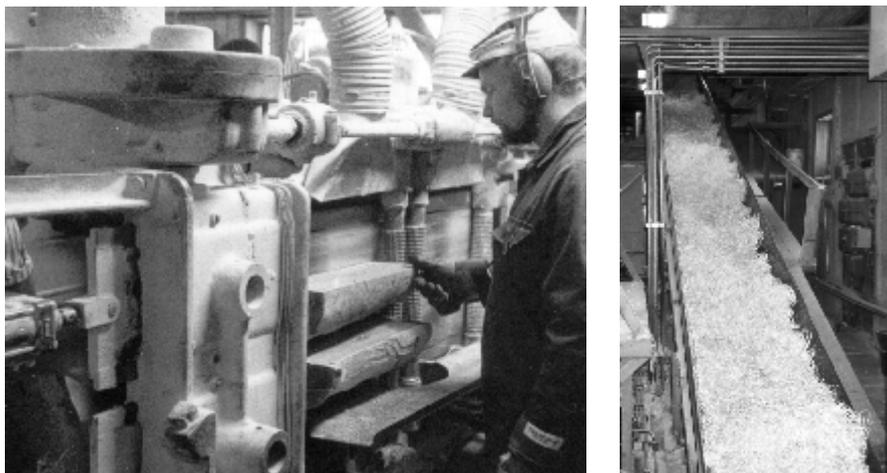


Fig. 5.3 Rabotage du pin d'Alep en laine de bois (gauche). La laine est ensuite transportée vers la cuve d'eau (droite)

suite été débité en longueurs de 50 cm, tandis que les rondins d'eucalyptus ont été sciés à la même longueur que les panneaux.

Les billes ont été transformées en laine dans les raboteuses de l'usine (figure 5.3), et la laine a ensuite d'abord été trempée dans la cuve d'eau avant d'être transportée vers le malaxeur (figure 5.4), consistant en un cylindre rotatif horizontal, dans lequel elle a été mélangée au liant (un mélange sec de ciment blanc et de chaux).

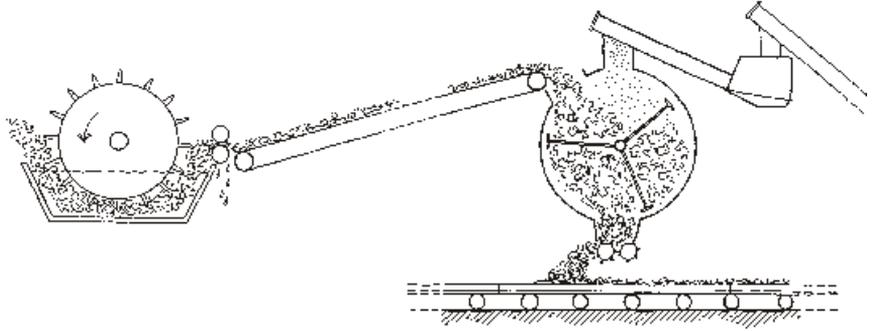


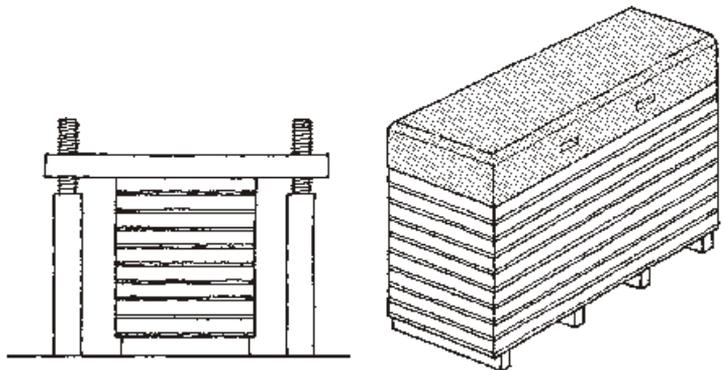
Fig. 5.4 Mélange de la laine de bois humide et du ciment dans le malaxeur à axe horizontal. Le mélange est ensuite versé dans les moules placés sous le malaxeur

Du malaxeur, le mélange de laine de bois et de ciment se répand dans les moules, placés les uns à côté des autres. Chaque moule est rempli à moitié et on y place ensuite deux rondins d'armature avant de verser le reste du mélange.

Les moules sont ensuite empilés et précomprimés dans une presse hydraulique. Après ceci, ils sont transportés par chariot dans la chambre de durcissement où ils restent pendant 24 heures. Au cours du durcissement, les panneaux sont maintenus pressés ensemble par une dalle de béton placée sur la pile de panneaux (figure 5.5).

Après durcissement, les panneaux sont démoulés et sciés aux bonnes dimensions. Les panneaux sont stockés généralement pendant 2 à 3 semaines avant livraison au client.

Fig. 5.5 Précompression (gauche) et durcissement pendant 24 heures (droite)



## Résultat

Les panneaux fabriqués au cours des essais avaient une masse volumique de  $450 \text{ kg/m}^3$ . La résistance à la flexion de trois des panneaux fabriqués a varié entre 0,5 et 1,2 MPa.

Les panneaux fabriqués ont été utilisés comme toiture dans un bâtiment destiné à abriter un laboratoire dans l'unité provinciale de LPEE à Ouarzazate, voir page 137.

## Proposition d'utilisation au Maroc

### Toitures plates

Le type de toiture/plancher illustré figure 1.4 du chapitre 1 est courant dans de nombreux pays. Ces toitures sont normalement composées de hourdis en terre cuite ou en béton placés entre les poutrelles en béton préfabriquées. En remplaçant ces hourdis avec des panneaux de laine de bois et en augmentant la distance entre les poutrelles (voir figure 5.6), on peut considérablement diminuer la transmission thermique de la construction.

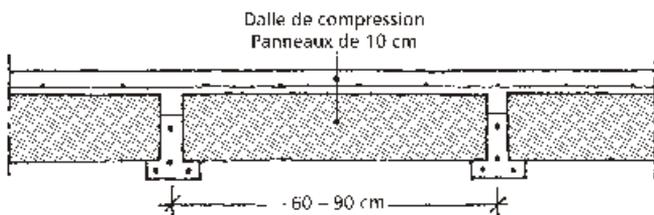


Fig. 5.6  
Panneaux de laine de bois entre poutrelles en béton

Fabriqués à partir d'une laine fine et de ciment blanc, les panneaux autoporteurs, montés entre des poutres, sont des produits couramment utilisés, voir l'exemple du laboratoire LPEE de Ouarzazate, figure 5.17. Ces panneaux sont souvent utilisés dans les lieux publics pour profiter de leurs propriétés d'absorption acoustique et d'humidité et, dans ce type d'application, la face inférieure des panneaux reste visible.

Les panneaux de laine de bois peuvent aussi être utilisés comme isolation rapportée sur les toitures plates déjà existantes. On peut utiliser soit des panneaux isolants, soit des panneaux composites.

### Toitures industrielles

Les panneaux de laine de bois peuvent aussi être utilisés comme isolation des toitures industrielles placés entre des profilés en I, voir figure 5.7. On peut utiliser soit des panneaux isolants, soit des panneaux composites.

### Faux plafonds

L'une des applications les plus courantes des panneaux de laine de bois est l'absorption acoustique des plafonds. Ils peuvent soit être posés di-

Fig. 5.7  
Isolation d'une toiture industrielle

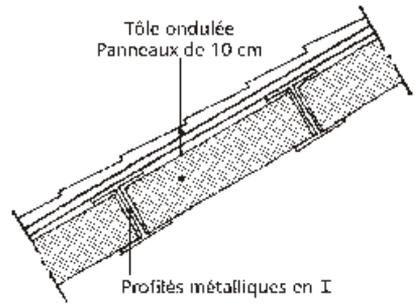
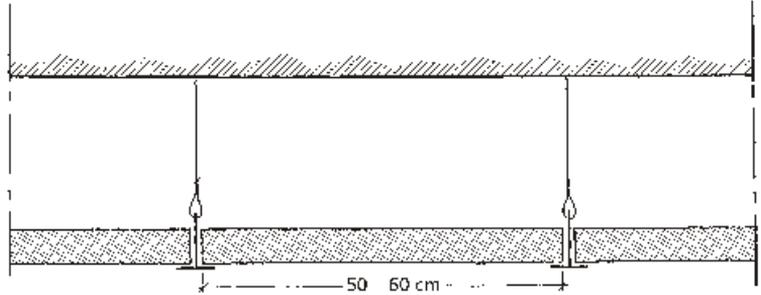


Fig. 5.8  
Panneaux  
acoustiques sus-  
pendus au pla-  
fond



rectement sur le plafond (appliqués sur le plancher en béton ou fixés à l'aide de vis) soit suspendus (voir figure 5.8).

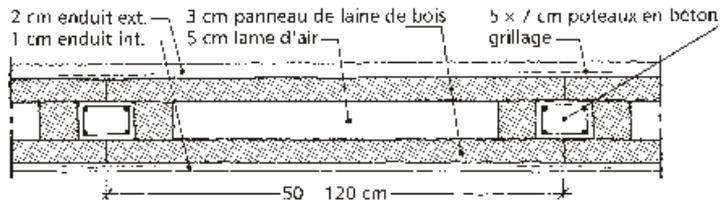
## Murs

Un type de mur couramment utilisé pour des constructions R+1 et R+2 se trouve décrit figure 5.9. Le mur se compose d'éléments verticaux assemblés par deux plaques minces. Les éléments ainsi placés les uns à côté des autres laissent un vide qui permettra de mettre en place l'armature et de couler ensuite le béton.

La figure 5.10 montre une méthode de construction pour une maison à un niveau où les murs se composent d'éléments préfabriqués réalisés en panneaux en laine de bois et en béton. A la fabrication, les panneaux sont placés dans un coffrage autour duquel on coule ensuite le béton armé en ayant ménagé des espaces pour les portes et les fenêtres.

Pour des murs extérieurs portants en béton armé on peut utiliser les panneaux de laine de bois en coffrage perdu.

Fig. 5.9  
Éléments verti-  
caux assemblés



La figure 5.11 montre l'isolation de panneaux en laine de bois rapportée du côté extérieur d'un bâtiment. On peut utiliser soit des panneaux isolants, soit des panneaux composites.

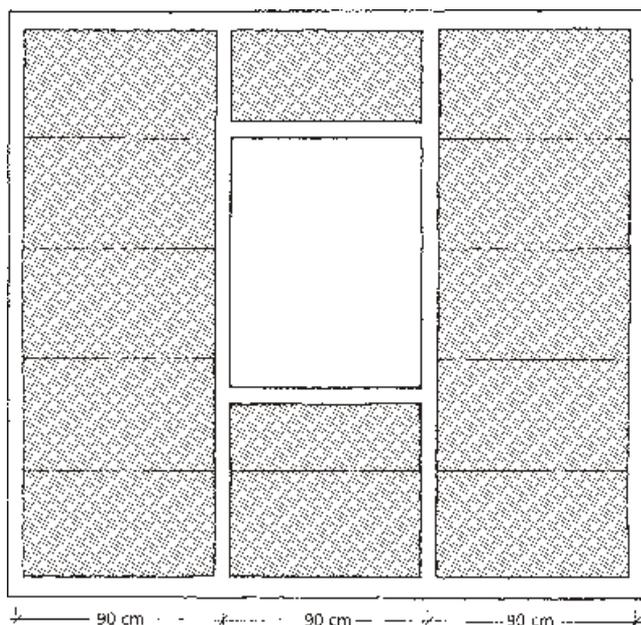


Fig. 5.10  
Éléments préfabri-  
qués réalisés en pan-  
neaux en laine de  
bois et en béton

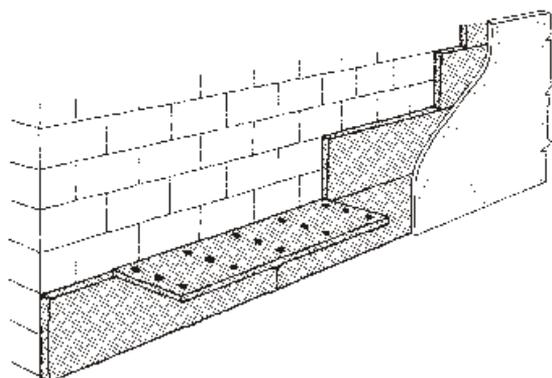


Fig. 5.11  
Isolation de panneaux en laine  
de bois rapportée du côté ex-  
térieur

## Stratégie de commercialisation des panneaux de laine de bois

### Évaluation de la demande en panneaux de laine de bois au Maroc

#### *Demande en matériaux de construction*

La surface de toitures et murs extérieur construits par an a été analysée (Johansson et al. 2002). Le tableau 5.2 donne une estimation approximative des surfaces de murs et de toitures bâtis annuellement dans les zones urbaines au Maroc pour les différentes catégories.

Tableau 5.2  
Estimation des surfaces totales des toitures (= surface au sol)  
et des murs extérieurs construits par an (Johansson et al. 2002)

Catégorie	Surface des toitures (m <sup>2</sup> )	Nbr. De niveaux moyen	Surface au sol moyen par construction (m <sup>2</sup> )	Surface des murs extérieurs (m <sup>2</sup> )
Immeubles	900.000	4	500	1.400.000
Villas	400.000	2	150	800.000
Habitations marocaines	2.250.000	2	100	2.000.000
Bâtiments commerciaux et industriels	1.000.000	1,2	500	500.000
Bâtiments administratifs	100.000	1,5	250	100.000
Autres	100.000	2	200	100.000
Total (m <sup>2</sup> )	4.750.000			4.900.000

Même si les calculs sont basés sur des estimations approximatives, ils démontrent qu'il existe un marché important pour les toitures et les murs extérieurs.

#### *Marché potentiel pour les panneaux isolants*

En partant du principe que dans une première phase le marché se compose de bâtiments utilisant des systèmes de climatisation actifs et partant d'une première hypothèse que dans 5% des surfaces de toitures et de murs extérieurs construits pour villas, bâtiments commerciaux, administratifs et autres on utilisera des panneaux de laine de bois, le tableau 5.3 montre la demande potentielle. Soit un total de 80.000 m<sup>2</sup> de panneaux pour toitures (soit un volume de 8.000 m<sup>3</sup> de panneaux de 10 cm d'épaisseur) et de 75.000 m<sup>2</sup> de panneaux pour murs extérieurs (soit un volume de 3.750 m<sup>3</sup> de panneaux de 5 cm d'épaisseur). Cela signifierait donc un besoin total de production de près de 12.000 m<sup>3</sup>.

À plus long terme, le marché devrait pouvoir s'étendre à toutes les catégories de bâtiments. En partant d'une deuxième hypothèse que dans 5% des surfaces de toitures construites et dans 2% des surfaces des murs extérieurs construits on utilisera des panneaux de laine de bois, le tableau 5.3 montre la demande potentielle. Soit un total d'environ 240.000 m<sup>2</sup> de panneaux pour toitures (soit un volume de 24.000 m<sup>3</sup> de panneaux de 10 cm d'épaisseur) et d'environ 100.000 m<sup>2</sup> de panneaux pour murs extérieurs (soit un volume de 5.000 m<sup>3</sup> de panneaux de 5 cm d'épaisseur). Cela signifierait donc un besoin total de production de près de 30.000 m<sup>3</sup>.

Tableau 5.3

Estimation de la demande potentielle en panneaux de laine de bois (m<sup>2</sup>) pour toitures et murs extérieurs selon hypothèse 1 et 2

Catégorie	Demande en toitures (m <sup>2</sup> )		Demande en murs extérieurs (m <sup>2</sup> )	
	hypothèse 1	hypothèse 2	hypothèse 1	hypothèse 2
Immeubles	–	45.000	–	28.000
Villas	20.000	20.000	40.000	16.000
Habitations marocaines	–	112.500	–	40.000
Bâtiments commerciaux et industriels	50.000	50.000	25.000	10.000
Bâtiments administratifs	5.000	5.000	5.000	2.000
Autres	5.000	5.000	5.000	2.000
Total (m <sup>2</sup> )	80.000	237.500	75.000	98.000

Les estimations ci-dessus sont basées sur la production actuelle de nouveaux bâtiments par an. Comme expliqué dans le chapitre 1, il faut en outre s'attendre à un accroissement important de la production de logements au cours des années à venir.

### *Marché potentiel pour les panneaux acoustiques*

Le marché pour les panneaux acoustiques diffère considérablement de celui pour les panneaux isolants car leur utilisation se limite aux locaux publics, industriels, aux bureaux, aux hôtels, aux salles de sport, etc. D'un autre côté, les entreprises privées, les communes et l'état faisant construire ce type de bâtiments disposent de moyens économiques tout différents de ceux d'un propriétaire immobilier privé moyen.

Le marché pour les plafonds est probablement moindre que pour les panneaux isolants mais d'un autre côté, il existe un important marché potentiel dans les bâtiments déjà construits et dont l'acoustique pourrait être améliorée à l'aide de panneaux isolants.

Le fait que ce matériau soit importé au Maroc et qu'il soit vendu à un prix relativement élevé indique qu'il existe bien une demande mais il n'existe aucun chiffre officiel permettant de connaître le volume des ventes.

### Analyse des coûts

Dans cette étude, deux unités de production de tailles différentes ont été analysées : une manuelle et une semi-automatique. L'équipement de l'unité de fabrication manuelle se composera d'une grande partie de matériel d'occasion tandis que celle semi-automatique sera équipée de matériel neuf. Les deux unités seront équipées de deux rabots.

Deux produits ont été étudiés :

- Panneaux isolants 10 cm (production manuelle et semi-automatique)
- Panneaux acoustiques 2 cm (production semi-automatique).

Ci-après se trouve résumée l'analyse des coûts pour la production de panneaux de laine de bois décrits en détails dans Johansson et al. (2002).

#### *Coûts d'investissements*

Les investissements comprennent un terrain et une unité de production d'une surface de 1.200 m<sup>2</sup> et d'une hauteur de 5 m.

Les équipements nécessaires pour la production et dont une partie devra être importée sont les raboteuses, l'unité pour l'immersion de la laine, l'unité complète pour dosage du ciment, le malaxeur pour mélange en continu, le poste de distribution pour le remplissage des moules (sauf pour la production semi-automatique), et le poste de sciage des bords. Notons également qu'il existe du matériel d'occasion de bonne qualité pouvant être racheté à un bon prix à des usines ayant modernisé leur parc machine ou qui ont été fermées.

L'installation des machines et les tests de mise en marche devront être effectués par du personnel qualifié. Le personnel futur de l'usine sera formé par des experts qui mèneront la formation et la mise en marche de l'installation pendant la période de montage, estimée à deux mois.

Un fonds de roulement suffisamment important est nécessaire pour pouvoir constituer un stock de matières premières et de produits finis. Il servira à l'achat des matières premières pour 2 mois et au paiement des salaires pendant 2 mois.

Le tableau 5.4 montre le total des investissements.

Tableau 5.4	Total des investissements	
	<i>Manuel Coût (DH)</i>	<i>Semi-automatique Coût (DH)</i>
Usine avec terrain	2.600.000	3.600.000
Équipement importé	1.175.000	5.172.000
Équipement local	1.290.000	1.407.000
Importation de l'équipement	58.000	136.000
Installation de l'équipement	475.000	900.000
Fonds de roulement	499.000	538.000
Coût total	6.097.000	11.753.000

#### *Coûts fixes*

En ce qui concerne les amortissements, nous avons calculé que les bâtiments et l'infrastructure seront amortis sur 20 ans et les équipements sur 10 ans et que les intérêts sur prêts seront de 8%. Le calcul des coûts fixes prévus est indiqué dans le tableau 5.5.

**Tableau 5.5** Calcul des coûts fixes

<i>Type d'usine</i>	<i>Coût annuel (DH)</i>	
	<i>Manuel</i>	<i>Semi-automatique</i>
Coûts salariaux	1.519.000	1.916.000
Frais administratifs	190.000	250.000
Marketing et publicité commerciale	300.000	300.000
Entretien des bâtiments et de l'infrastructure (4% de la valeur)	104.000	144.000
Dépréciation de l'unité de production (8%, 20 ans)	265.000	367.000
Dépréciation de l'équipement (8%, 10 ans)	367.000	980.000
Interêts des fonds de roulement	40.000	43.000
Coût total	2.785.000	4.000.000

*Coûts variables*

Le volume de production dépend du nombre de rabots et de l'épaisseur des panneaux fabriqués. Avec 7 heures de travail par jour et 220 jours de travail par an et 1 équipe de travail, on atteint les volumes de production indiqués ci-dessous. Cependant, il faut compter sur des arrêts de production dus à des pannes d'alimentation, au manque de matériaux, etc. La marge de sécurité est calculée être de 15%. Le tableau 5.6 montre le volume de production pour différentes épaisseurs.

**Tableau 5.6** Volume de production pour différentes épaisseurs

<i>Type de panneau</i>	<i>Isolant</i>	<i>Acoustique</i>
Epaisseur (cm)	10	2
Production/jour (m³)	37	26
Production brute/an (m³)	8.100	5.800
Capacité de production nette/an (m³)	6.900	4.900

**Tableau 5.7** Prévisions pour les coûts d'achat de matières premières

	<i>Prix/m³ (DH)</i>	<i>Prix/tonne (DH)</i>
Ciment CPJ 45	—	800
Ciment blanc	—	1.600
Bois (pin d'Alep)	500	1.000
Eau	8	8
CaCl <sub>2</sub>		1.000

Les moules font partie des équipements importants de la production. Les moules s'usent et ils seront à changer tous les 5 ans. Outre les moules, il faut de l'huile pour les moules, des lubrifiants, des palettes de livraison, etc...

Le calcul de la consommation d'énergie est basé sur une exploitation de l'usine de 60% et avec un prix de 1,00 DH/kWh.

Le tableau 5.8 montre les coûts variables annuels.

<i>Type de panneau</i>	<i>Coût annuel (DH)</i>		
	<i>Isolant</i>	<i>Acoustique</i>	
<i>Epaisseur (cm)</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>2</i>
<i>Type d'usine</i>	<i>Manuel</i>	<i>Semi-autom.</i>	<i>Semi-autom.</i>
Matières premières	2.053.000	2.053.000	3.278.000
Matériels consommables	252.000	336.000	507.000
Coûts énergétiques	78.000	92.000	93.000
Coût total	2.383.000	2.481.000	3.878.000

### *Coûts total de production*

Le coût de production annuel total est montré dans le tableau 5.9.

<i>Type de panneau</i>	<i>Coût annuel (DH)</i>		
	<i>Isolant</i>	<i>Acoustique</i>	
<i>Epaisseur (cm)</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>2</i>
<i>Type d'usine</i>	<i>Manuel</i>	<i>Semi-autom.</i>	<i>Semi-autom.</i>
Coûts fixes	2.785.000	4.000.000	4.017.000
Coûts variables	2.383.000	2.481.000	3.878.000
Coût total	5.168.000	6.481.000	7.895.000

Le tableau 5.10 montre le coût total par m<sup>3</sup>.

Type de panneau Type d'usine Production nette en m <sup>3</sup>	Isolant Manuel 6.900	Isolant Semi-automatique 6.900	Acoustique 4.900
<i>Coûts fixes (DH/m<sup>3</sup>)</i>			
Coût salarial	221	279	387
Coût du capital immobilisé	184	303	425
<b>Total coûts fixes</b>	<b>406</b>	<b>582</b>	<b>812</b>
<i>Coûts variables (DH/m<sup>3</sup>)</i>			
Matières premières	299	299	663
Matériels consommables	37	49	103
Coûts énergétiques	11	13	19
Coût pour peinture	0	0	750
<b>Total coûts variables</b>	<b>347</b>	<b>361</b>	<b>1.534</b>
<b>Coût de production total/m<sup>3</sup></b>	<b>753</b>	<b>944</b>	<b>2.347</b>

## Comparaison des prix

### *Prix des panneaux isolants*

Les prix de ventes des panneaux isolants d'une épaisseur de 10 cm, y compris un bénéfice de 33%, sont montrés tableau 5.11.

Tableau 5.11  
Prix de ventes des panneaux isolants d'un épaisseur de 10 cm

Type d'usine	Coût annuel (DH/m <sup>2</sup> )	
	Manuel	Semi-autom.
Coût de production total (DH/m <sup>2</sup> )	75	94
Bénéfice (env. 33%)	25	31
Prix de vente (DH/m <sup>2</sup> )	100	125

### *Comparaison avec les matériaux existants*

En remplaçant les hourdis avec des panneaux de laine de bois et en augmentant la distance entre les poutrelles (voir figure 5.5), on peut considérablement améliorer la valeur U d'une toiture conventionnelle. Les prix et valeur U des deux types sont comparés tableau 5.12.

En remplaçant la cloison intérieure d'un mur extérieur en double cloison avec un panneau de laine de bois de 5 cm, on peut améliorer la valeur U. Les prix et valeur U des deux types sont comparés tableau 5.13.

Tableau 5.12 Comparaison toiture hourdis

	Toiture hourdis		Toiture isolée	
		Prix/m <sup>2</sup>		Prix/m <sup>2</sup>
Elément de remplissage	Hourdis en béton, e = 15 cm	38	Panneau de laine de bois, e = 10 cm	100*
Nbr. De poutrelles/m <sup>2</sup>	1,67	90	1,00	54
Coût total poutrelles et hourdis (DH/m <sup>2</sup> )		128		154
Valeur U** (W/m <sup>2</sup> K)	2,5		0,8	

\*) Prix estimé.

\*\*) Y compris forme de pente (5 cm), dalle en béton (5 cm) et enduit du plafond (2 cm).

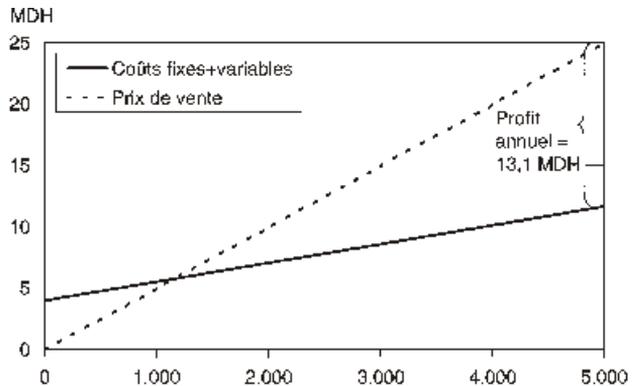
Tableau 5.13 Comparaison murs extérieurs

	Simple cloison		Double cloison		Mur isolé	
		Prix/m <sup>2</sup>		Prix/m <sup>2</sup>		Prix/m <sup>2</sup>
Nbr. de poteaux et poutres/m <sup>2</sup>	0,67	32	0,67	32	0,67	32
Elément de remplissage	20 cm parpaings	54	10 cm brique 5 cm lame d'air 10 cm brique	76	7 cm brique 5 cm lame d'air 5 cm PLB	105*
Coût total ossature et remplissage (DH/m <sup>2</sup> )		86		108		137*
Valeur U** (W/m <sup>2</sup> K)		2,8		1,6		1,3

\*) Prix estimé.

Les tableaux ci-dessus montrent que les prix des panneaux isolants sont supérieurs à ceux des matériaux utilisés aujourd'hui. En ce qui concerne les toitures, l'utilisation des panneaux de laine de bois à la place de hourdis permet d'obtenir une isolation thermique trois fois supérieure et l'on obtient donc une amélioration qualitative importante pour un surcoût raisonnable. En ce qui concerne les murs extérieurs, l'amélioration de l'isolation est cependant insignifiante si l'on compare à l'effet d'une double cloison. En conséquence, il serait probablement plus avantageux d'introduire de nouveaux types de murs que de modifier ceux existants, voir par exemple les exemples des figures 5.8 et 5.9.

Fig. 5.12 Analyse du seuil de rentabilité. La figure ci-dessus indique un bénéfice annuel (en cas de vente de toute la production) de 13,1 millions de DH et que le seuil de rentabilité se situe à 1.100 panneaux par an



### Prix des panneaux acoustiques

Les panneaux acoustiques pourront probablement être vendus à 100 DH/m<sup>2</sup> (HT) car les panneaux importés sont à 190 DH/m<sup>2</sup> (TTC). L'analyse du seuil de rentabilité (figure 5.12) indique que le bénéfice annuel (en cas de vente de toute la production) s'élèvera à 13,1 millions de dirhams et que le volume minimum de production/ventes devra se situer à 1.100 m<sup>2</sup> (55.000 m<sup>2</sup>) pour ne pas être en déficit.

### Temps de rentabilisation de l'investissement

Il faut cependant remarquer que malgré que l'amélioration de l'isolation thermique des toitures et des murs entraîne un certain surcoût, celui est normalement rapidement amorti (voir par ex. Mraissi et Johansson 1998).

Ci-dessus le temps de rentabilisation de l'investissement en remplaçant les hourdis par des panneaux de laine de bois de 10 cm dans la toiture est montré. Le calcul se base sur le bâtiment type utilisé dans le chapitre 4 (voir figures 4.1 et 4.3). Le tableau 5.12 indique qu'on aura un surcoût de 2.000 DH, mais les valeurs U de la toiture s'abaissent de 1,5 à 0,75 W/m<sup>2</sup>.K. Par conséquent, la consommation annuelle pour chauffage et climatisation diminuera de 847 à 593 kWh pour le chauffage et augmentera de 924 à 932 pour la climatisation selon la figure 4.7 (en supposant que la température ambiante acceptable doit être de 16 – 28°C).

Le prix de l'électricité au Maroc est de 1,0 DH/kWh. Les systèmes électriques de climatisation utilisés pour le refroidissement ont normalement un coefficient de performance (COP) égal au moins à 2, ce qui veut dire que le rendement est égal à deux fois l'alimentation. Pour le chauffage à l'électricité, le COP est de 1. Si l'on suppose que le bâtiment est chauffé et climatisé à l'électricité, ceci revient à un coût annuel de 1.309 DH pour le bâtiment non isolé et de 1.059 DH pour le bâtiment avec toiture isolée. Les coûts d'investissement et d'électricité pour le chauffage et la climatisation en fonction du temps sont indiqués dans la figure 5.13.

On peut constater que déjà après 8 ans les investissements pour l'isolation thermique ont été rentabilisés.

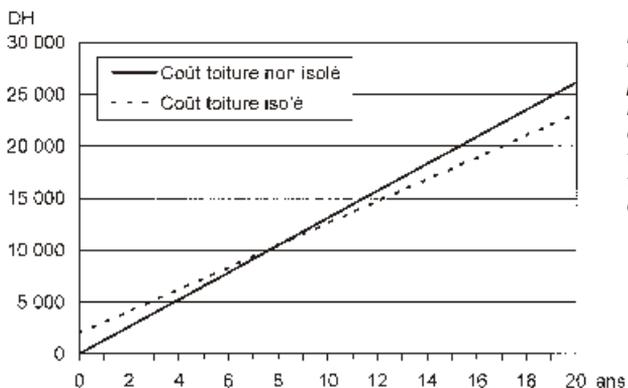


Fig. 5.13  
Le coût d'investissement pour l'isolation thermique et les coûts pour le chauffage et la climatisation en fonction du temps pour toiture isolée et non isolée

## Stratégie de commercialisation

### *Type d'usine*

L'analyse des coûts montre qu'une production manuelle permettrait d'abaisser les prix de vente. Les investissements étant dans ce cas considérablement moins importants que pour une usine semi-automatique, les risques s'en trouvent également réduits. Par ailleurs, une usine de production manuelle pourrait successivement être automatisée en cas de besoins.

Quant à son implantation géographique, l'usine devrait se trouver dans une région où le marché des matériaux de construction est important et où l'on peut s'attendre à ce que la demande en matériaux d'isolation soit forte, par exemple dans les régions froides à l'intérieur du pays. De plus, il faudra évidemment tenir compte de la proximité de sites de production de bois et de ciment.

### *Gamme de production*

Afin de faire face aux variations de la demande, il serait recommandé de prévoir une production mixte de panneaux isolants et acoustiques. Dans le cas d'une forte demande, l'usine pourrait fonctionner avec 2 ou 3 équipes afin de doubler ou de tripler le volume de production.

### *Stratégie de commercialisation*

Dans une première phase, il serait préférable de cibler la commercialisation vers les grands consommateurs d'énergie, qui ont tout intérêt à abaisser leur consommation d'énergie, comme les établissements publics, les hôtels, les bureaux, etc. en même temps que la population disposant de revenus moyens et élevés. En plus, dans les bâtiments publics le matériau pourrait être utilisé à la fois pour l'isolation thermique et pour l'absorption acoustique.

Comme le secteur du logement est entièrement dominant au Maroc, la stratégie à long terme serait de cibler aussi la population disposant de revenus faibles.

## Conclusion

Cette étude démontre qu'il existe de bonnes possibilités de production de panneaux de laine de bois au Maroc. Il existe suffisamment de forêts pour approvisionner plusieurs usines. L'essence la plus actuelle, le pin d'Alep, est principalement utilisée aujourd'hui comme bois de feu et de caisserie. Son utilisation pour la production de panneaux de laine de bois permettrait de valoriser cette espèce.

Le panneau de laine de bois étant aisément intégrable dans différents modes de constructions, il devrait y avoir un important potentiel au Maroc. L'étude de marché limitée a montré la compétitivité du matériau sur le marché marocain.

En outre, une production locale offre plusieurs avantages socio-économiques tels qu'une meilleure gestion du patrimoine forestier et

amélioration du rendement et la promotion de l'emploi pour la population locale et l'augmentation du nombre de matériaux de construction sur le marché, donc concurrence accrue et baisse des prix probable.

Au niveau des prix, les panneaux de laine de bois sont légèrement plus chers que les matériaux conventionnels mais les avantages tels qu'un meilleur confort intérieur et une plus faible consommation d'énergie devraient garantir la demande.

Pour terminer, l'introduction d'une réglementation thermique devrait considérablement améliorer les conditions de commercialisation du produit sur le marché. Les objectifs futurs devraient en conséquence être de diffuser des informations sur ce matériau et sa fabrication auprès de fabricants potentiels. Parmi les éventuels futurs fabricants de panneaux de laine de bois au Maroc, on peut envisager les fabricants de matériaux de construction spécialisés dans le ciment et les produits en bois. Mais, la fabrication pouvant être très simple, d'autres acteurs dans le secteur du bâtiment ou de nouveaux investisseurs peuvent être envisagés.

## Application au laboratoire LPEE à Ouarzazate

Le nouveau laboratoire LPEE à Ouarzazate constitue une expérimentation complémentaire aux précédentes expérimentations effectuées par l'université de Lund en collaboration avec le CNERIB (Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment) en Algérie et avec l'ARRU (Agence de Réhabilitation et de Rénovation Urbaine) en Tunisie. En Algérie lors du projet Thermique du bâtiment et Habitat bioclimatique, un bâtiment expérimental fut construit à Ghardaïa où l'effet de la ventilation nocturne fut testé en 1988 (Rosenlund et Ouahrani 1989). En Tunisie deux bâtiments furent construits à Tamerza et à Tozeur (Rosenlund et al. 1997). L'objectif des projets tunisiens était de tester les résultats des expériences précédentes dans des bâtiments institutionnels.

L'objectif du bâtiment de Ouarzazate était de tester des améliorations apportées du point de vue adaptation climatique à un bâtiment déjà conçu en plus de l'avantage de l'utilisation des panneaux de laine de bois en toiture dans le climat chaud et sec.

### La conception originale du bâtiment

Vision originale : le LPEE a confié au Centre de Coordination et Réalisation des Recherches dans le Bâtiment (CRR Bâtiment) la réalisation du laboratoire de Ouarzazate afin de vulgariser et de valoriser la construction en terre. Voir aussi El Kortbi et al. (1999b).

Le laboratoire se compose d'une salle de conférence de 51 m<sup>2</sup>, de deux bureaux de 23 m<sup>2</sup> chacun et d'un laboratoire matériaux de 55 m<sup>2</sup> et d'un nouveau laboratoire de 55 m<sup>2</sup> et des sanitaires de 23 m<sup>2</sup>. Ces



Fig. 5.14 Unité provinciale de LPEE à Ouarzazate: A droite, les bureaux et à gauche, le nouveau laboratoire (en cours de construction)

trois espaces sont reliés par un passage extérieur en arcade de 56 m<sup>2</sup> délimitant ainsi une cour extérieure sur trois cotés. L'orientation des trois salles est différente. En prenant comme axe la porte d'entrée et le mur des fenêtres, la salle de conférence a une orientation est-ouest, le vieux laboratoire a une orientation nord-sud et le nouveau laboratoire une orientation est-ouest.

Les fenêtres sont de tailles moyennes. Le vitrage représente 15% de la surface de la salle de conférence et 10% de la surface des deux laboratoires.

Les murs sont en blocs de béton de terre comprimée (BTC) de 32 cm d'épaisseur. Le laboratoire servant pour divulguer les différentes solutions de constructions en BTC, différents types de toiture ont été utilisés : toiture traditionnelle en poutraison en rondins de bois de peuplier, ourdissage en roseaux, étanchéité en film plastique, couche de terre renforcée de paille de 10 cm et finalement une couche de protection en terre stabilisée à la chaux et toiture en voûtins et en poutrelle.

## Amélioration virtuelle du climat intérieur du bâtiment

Dans le but d'améliorer le climat intérieur du bâtiment et d'accroître la performance thermique de ces éléments de constructions, plusieurs solutions ont été testées par simulation numérique avec le programme de simulation DEROB-LTH. Dans un premier temps, le bâtiment original est simulé et les résultats obtenus sont la base de comparaison pour les résultats des modifications testées.

Ci-après se trouvent résumés des résultats décrits en détails dans Rosenlund (2000) et Ouahrani et Rosenlund (2002).

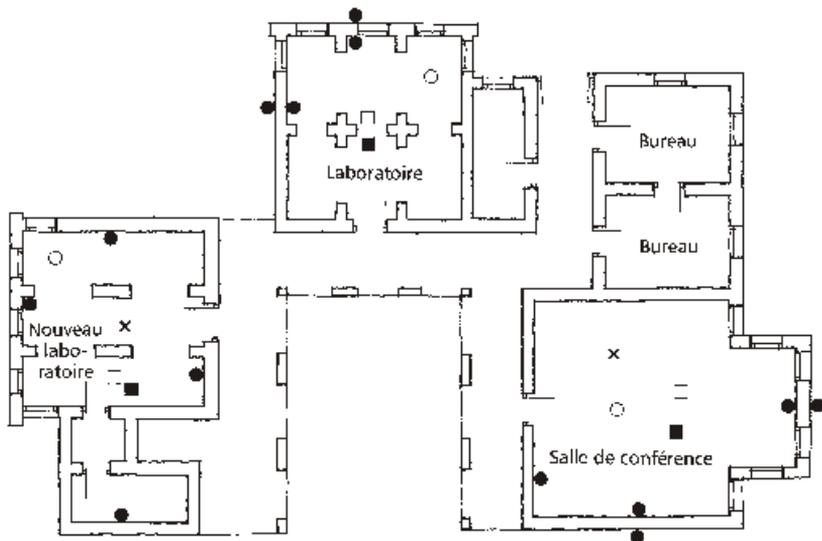


Fig. 5.15  
Plan du laboratoire  
et repérage de  
l'instrumentation

Légende :

- Température et humidité relative ambiante de l'air.
- ◊ Température de la surface extérieure de la toiture.
- Température de la surface des murs.
- Température de la surface intérieure de la toiture.
- × Température de la surface du sol.

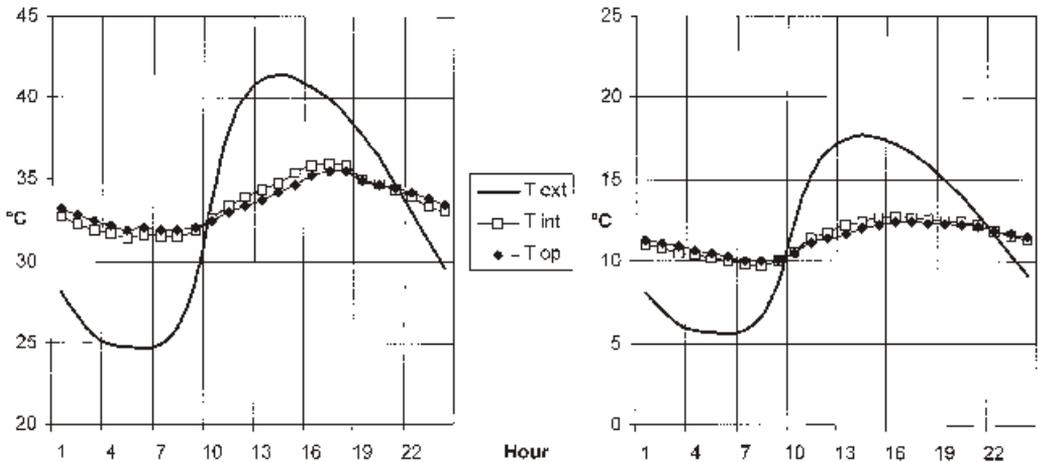


Fig. 5.16 Température extérieure, intérieure et opérative en janvier (à gauche) et en juillet (à droite) pour le cas de base avec une toiture en voûte traditionnelle

### Cas de base

Le cas de base correspond au bâtiment original. Les murs en BTC et une toiture en voûte traditionnelle. Le bâtiment est fermé (faible ventilation) et non utilisé.

Bien que non utilisé et construit en matériaux lourds, le climat intérieur du bâtiment est en dehors de la zone de confort en juillet et en



*Fig. 5.17 Les panneaux de laine de bois autoporteurs placés sur les murs en blocs de terre comprimée constituent une des plus importantes modifications apportées au bâtiment. La face inférieure des panneaux n'est pas revêtue pour obtenir une bonne acoustique dans le local*

janvier. La masse thermique ne suffit pas à elle-même pour assurer un confort thermique toute l'année.

### L'isolation de la toiture

La modification principale apportée au bâtiment est l'isolation de la toiture. La toiture en voûtins de BTC a été remplacée par une toiture en panneaux de laine de bois. Ces panneaux ont été fabriqués avec des pins marocains, voir page 120. Un type de toiture similaire a déjà été utilisé en Tunisie (Rosenlund et al. 1997) et représente une stratégie intéressante pour l'introduction de l'isolation dans les bâtiments au Maroc. L'isolant, les panneaux de laine de bois dans ce cas, remplacent un matériau existant, le hourdis en l'occurrence, et jouent le triple rôle de coffrage, d'isolant thermique et d'absorbant acoustique.

### La boîte de ventilation

La deuxième modification est la boîte de ventilation et d'éclairage rajoutée. La ventilation nocturne est une technique importante de climatisation passive en climat chaud et sec. Le bâtiment étant construit dans une zone isolée donc absente de microclimat favorable pour une ventilation transversale, la boîte de ventilation améliore le tirage thermique de l'air chaud et favorise donc une ventilation intense pendant les nuits fraîches d'été. A cela s'ajoute l'amélioration de l'éclairage naturel d'un bâtiment

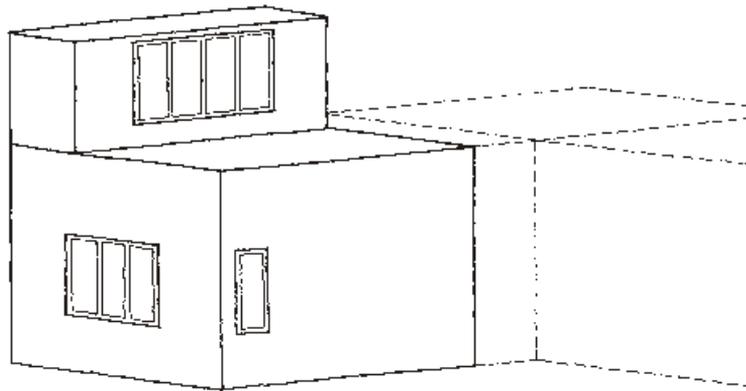


Fig. 5.18  
Le modèle pour les simulations avec DEROB. La boîte de ventilation et d'éclairage est une des plus importantes modifications apportées au bâtiment. Le rôle combiné de ventilation éclairage naturel et de chauffage passif en hiver a justifié l'adoption de cette solution

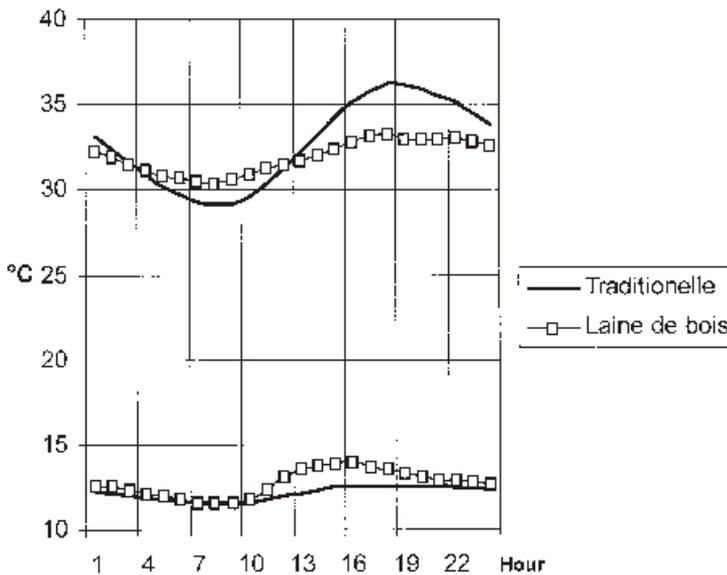


Fig. 5.19  
Toiture isolée comparée a une toiture traditionnelle (bâtiment ventilé). Température du plafond en janvier (à gauche) et en juillet (à droite)

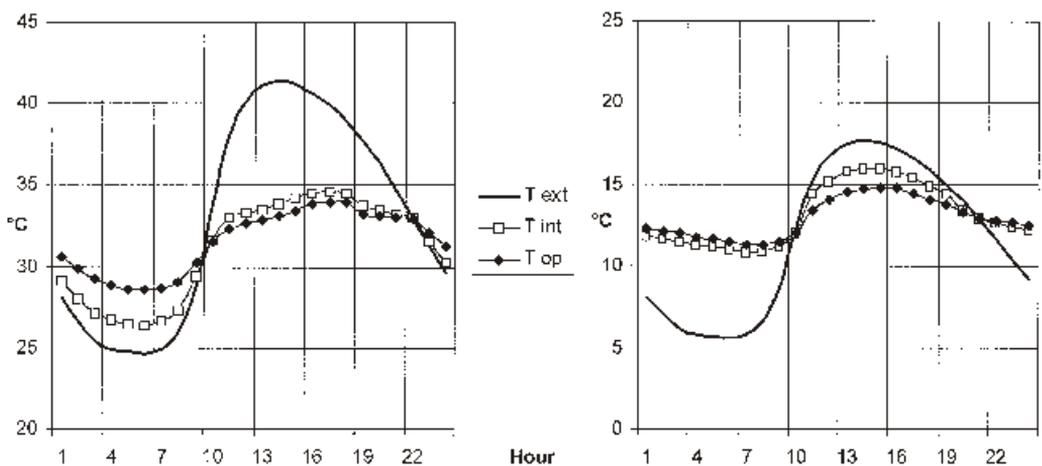


Fig. 5.20 L'effet combiné de toiture isolée (panneau de laine de bois), boîte de ventilation et d'éclairage et mur en BTC. Températures de l'air et opératives à l'intérieur et température à l'extérieur en janvier (à gauche) et en juillet (à droite). La ventilation nocturne a été utilisée en été

Comparé au cas de base, le cas où la toiture est en panneaux de laine de bois est amélioré sensiblement pour les deux cas d'hiver et d'été.

La combinaison de toiture isolée et boîte de ventilation a donné le meilleur confort possible pour le cas d'été. Néanmoins pour le cas d'hiver, le confort pourrait être amélioré avec de plus grandes surfaces de vitrage en orientation sud.

## Instrumentation du Laboratoire

L'instrumentation du laboratoire a démarré le 10 mai 1998 par l'installation du matériel de mesure et d'acquisition de données. La campagne de mesures thermiques a pris fin le 15 décembre 2000.

Le choix de l'emplacement de chaque équipement a été effectué de façon à :

- Optimiser l'utilisation de la chaîne d'acquisition des données (Data-logger).
- Pouvoir comparer les résultats obtenus par les simulations avec ceux qui seront mesurés.

La figure 5.15 présente le plan d'instrumentation. Ci-après se trouve résumée l'instrumentation décrite en détails dans El Kortbi et al. (1999b).

## Instruments de mesure

### *Température et humidité relative*

La température de surface a été mesurée à l'aide de fils thermocouple. Les mesures sont stockées dans la chaîne d'acquisition de données. Les températures d'ambiance ont été mesurées à l'aide d'une sonde qui permet également la mesure de l'humidité relative (type Campbell 50Y). L'intervalle de mesure de la température est de  $-10$  à  $+60^{\circ}\text{C}$  et celui de l'humidité relative de 10 à 90%. La sonde de la température et de l'humidité relative de l'ambiance extérieure a été logée dans une boîte de protection qui permet des mesures sans influence du rayonnement solaire.

### *Vent*

La vitesse et la direction du vent ont été mesurés à l'aide d'une girouette (type Young modèle 05103) qui permet la mesure de la vitesse dans un intervalle de 0 à 60 m/s.

### *Rayonnement solaire*

La mesure du rayonnement solaire s'est effectuée à l'aide d'un pyromètre de type SKYE 1110 qui permet la mesure de la radiation globale sur une surface horizontale.

### Chaîne d'acquisition des données

La chaîne d'acquisition des données a permis la collecte des informations recueillies des 9 voies connectées. Les données moyennes horaires sont stockées dans une mémoire et peuvent être récupérées moyennant un ordinateur portable équipé d'un logiciel de lecture de données qui permet aussi bien une visualisation instantanée des valeurs lues chaque seconde et le stockage des valeurs moyennes horaires de ces données.

## Le climat intérieur mesuré

### Comparaison du vieux et du nouveau laboratoire

En été, la température de l'air dans le nouveau laboratoire est plus proche de la zone de confort que celle du vieux laboratoire et de la salle de conférence (figure 5.21). Les conditions au cours desquelles les mesures thermiques de janvier ont été faites sont incontrôlables. De ce fait on ne peut en tirer de conclusions fiables. Néanmoins l'effet des vitrages de la boîte de ventilation est clairement visible. La température de l'air s'éleva très progressivement à partir de 8 heures du matin. Toutefois il serait difficile de comparer objectivement ces deux espaces vu la différence d'utilisation et d'orientation.

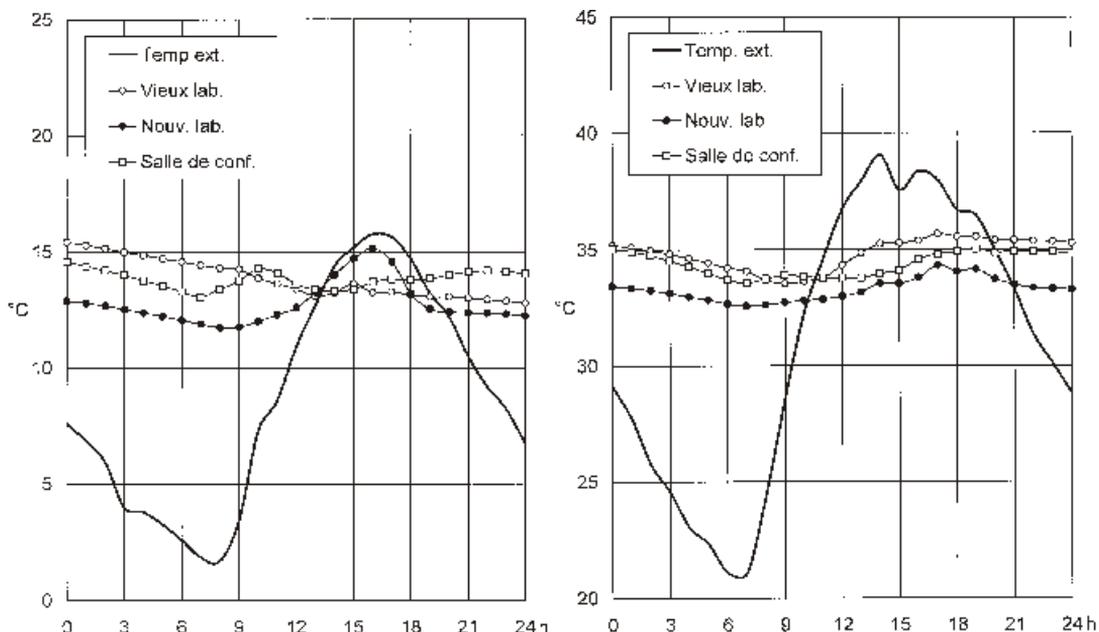


Fig. 5.21 Les températures d'air dans les trois locaux du laboratoire le 1er janvier (à gauche) et le 26 juillet 2000 (à droite).

## Etudes de performance des différents éléments de conception

### Performance de la toiture

Les performances thermiques de la toiture isolée en terme de déphasage sont de 7 heures et en terme d'amortissement de l'onde de chaleur de 30% (figure 5.22). Ces caractéristiques sont adéquates pour un climat chaud et sec. Généralement, les nuits sont claires et fraîches et favorisent l'utilisation de la ventilation nocturne et le rayonnement d'ondes longues vers le ciel ce qui permettra un rafraîchissement efficace de la structure du bâtiment pendant la nuit. Pour le cas de janvier (hiver), l'amortissement de 30% pénalise l'apport de chaleur gratuite par la toiture. Toutefois la toiture a un effet positif pour maintenir la stabilité de la température intérieure.

Les différences de températures de surfaces des trois toitures (figure 5.23) sont dues principalement au traitement de surfaces des trois toitures. Un même traitement de surface aurait été préférable pour une meilleure comparaison de performance. Toutefois, l'impact positif de la toiture isolée comparée aux deux autres types traditionnelles est clairement apparent dans les mesures effectuées. La température de surface du toit en panneaux de laine de bois est inférieure à celles des autres toitures. Toutefois en hiver, les températures de surfaces des toitures traditionnelles sont supérieures à celle du toit en panneaux de laine de bois. Une épaisseur moindre des panneaux de laine de bois aurait été préférable pour faciliter l'apport de chaleur gratuit par la toiture.

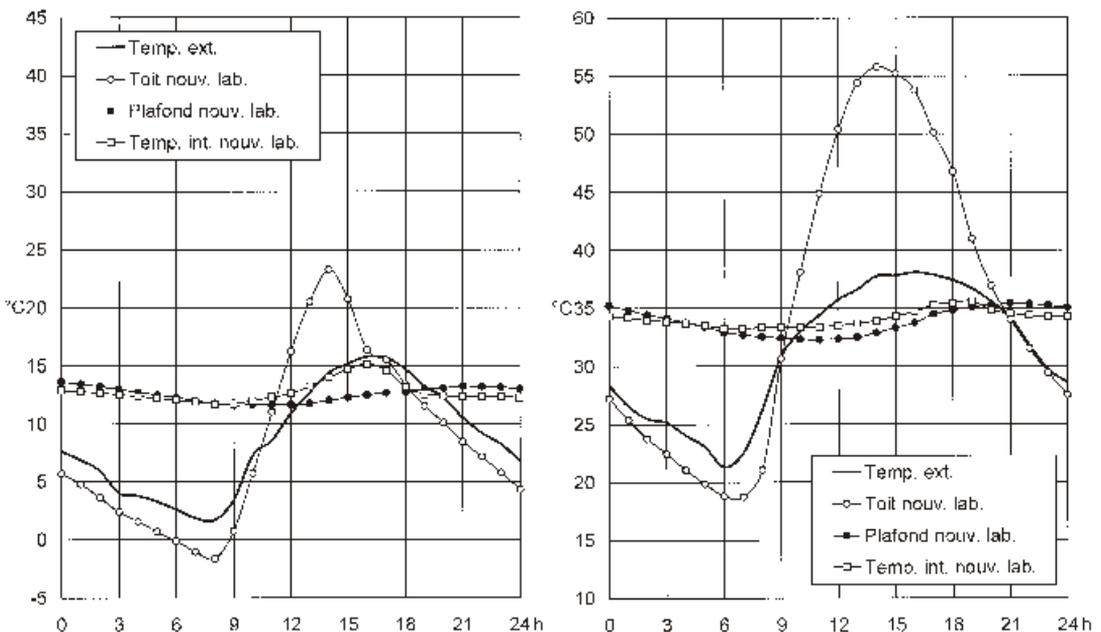


Fig. 5.22 Température de surface du toit et du plafond de la toiture isolée et température ambiante à l'intérieur du laboratoire d'Ouarzazate le 1er janvier (à gauche) et le 15 juillet (à droite) 2000

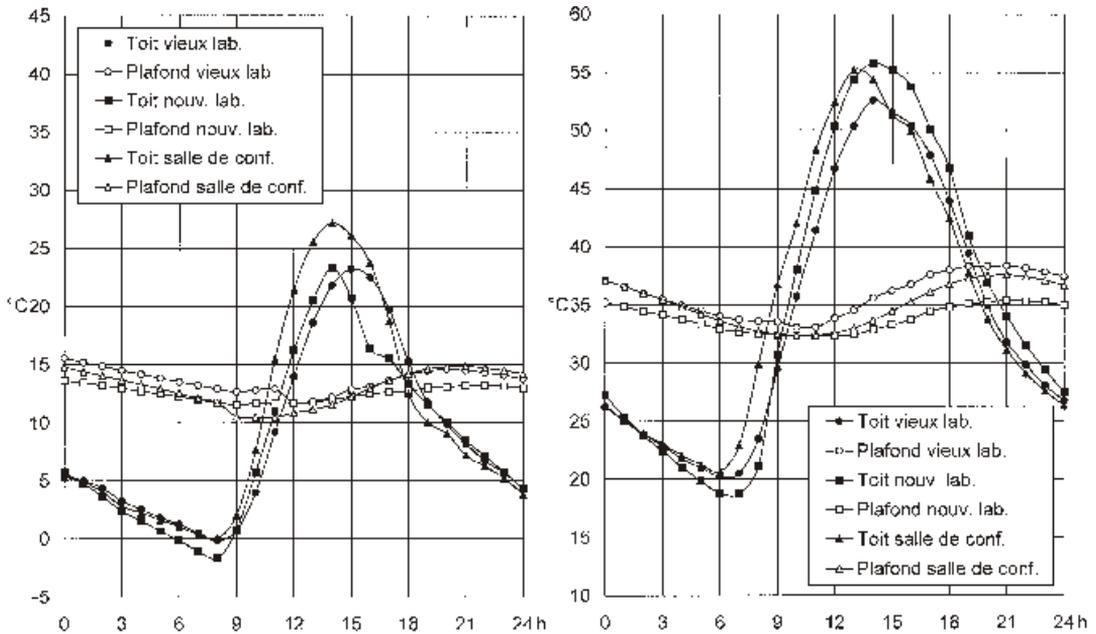


Fig. 5.23 Température de surface des trois toitures réalisées dans le laboratoire d'Ouarzazate le 1er janvier (à gauche) et le 15 juillet (à droite) 2000

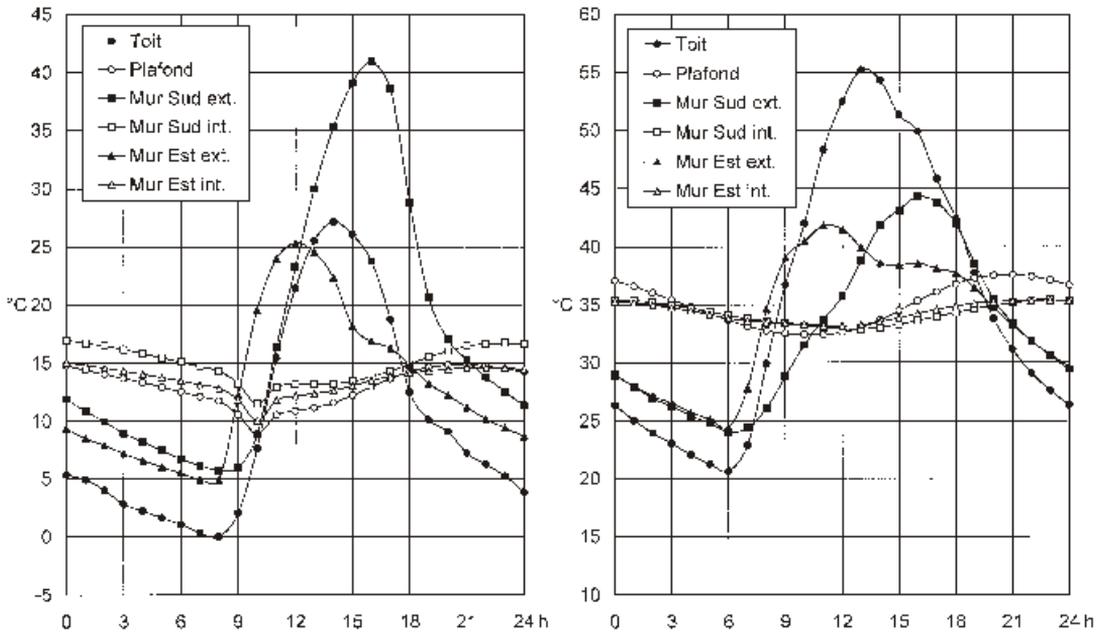


Fig. 5.24 Température de surface de la toiture et des murs sud et est de la salle de conférence le 21 février (à gauche) et le 15 juillet (à droite) 2000

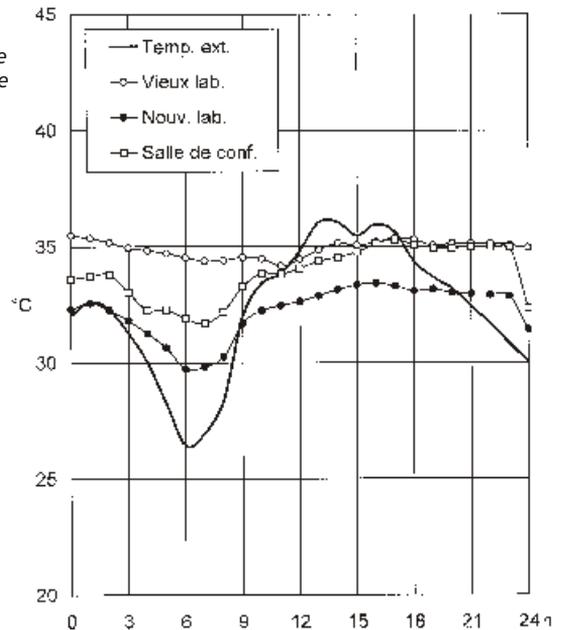
## Performance des murs

La température de surface du mur sud en hiver est supérieure à la température de surface de la toiture (figure 5.24, gauche). Ceci reste dans la logique de l'angle d'incidence du rayonnement solaire direct. En été, la température de surface du mur sud est aussi importante avec un décalage horaire d'environ trois heures à celle de la toiture (figure 5.24, droite). Initialement dans l'étude de l'amélioration de l'adaptation du bâtiment au climat, le choix de l'isolation de la toiture a été dicté principalement par le fait qu'elle est la plus exposée au rayonnement solaire, mais il s'est avéré par les mesures que l'isolation du mur sud est aussi importante quand la couleur externe du mur est relativement sombre donc absorbant beaucoup d'énergie solaire (couleur ocre dans notre cas).

## Effet de la ventilation nocturne

L'effet de la ventilation nocturne fut testé simultanément dans la salle de conférence et dans le nouveau laboratoire les 29 – 30 juillet 2000 (figure 5.25). Bien que le nouveau laboratoire soit pénalisé par des fenêtres orientées ouest ce qui favorise la surchauffe, la température de l'air est plus fraîche dans le nouveau laboratoire que dans la salle de conférence. La température dans la salle de conférence rejoint de très près la température du vieux laboratoire. L'isolation de la toiture du nouveau laboratoire préserve la fraîcheur accumulée pendant la nuit.

Fig. 5.25  
L'impact de la ventilation nocturne en été. La salle de conférence et le nouveau laboratoire sont ventilés alors que le vieux laboratoire est maintenu fermé



## Conclusion

Les expériences menées dans le laboratoire de Ouarzazate montrent que les solutions traditionnelles de construction ne sont pas toujours des solutions optimales pour les besoins et possibilités contemporaines. Les toitures en voûtins et en terre compactée offrent une masse thermique mais restent moins isolantes que la toiture en panneaux de laine de bois testée dans le nouveau laboratoire. L'isolation de la toiture est une exigence minimale pour améliorer le confort.

Dans le cas de bâtiment isolé avec des murs exposés au rayonnement solaire (pas d'ombre projetée par des bâtiments voisins) l'isolation des murs est à considérer. Pour le confort d'hiver, l'amélioration de ce dernier est tributaire d'une source de chaleur passive (surface de vitrage important orienté sud) ou active par un chauffage d'appoint. Les améliorations apportées à la conception originale du laboratoire ont été positives pour améliorer le confort thermique sans pour autant l'atteindre. Une prise en considération du climat au niveau même de l'esquisse du projet est la seule garantie pour obtenir une adaptation climatique du bâtiment optimale.

# Conclusions

Ce projet traite de la conception urbaine adaptée à un climat chaud et sec et pour laquelle il faut non seulement tenir compte de la géométrie des bâtiments et du choix des matériaux mais également du tissu urbain, c'est-à-dire de l'interaction entre les bâtiments et le milieu environnant. Il existe une relation complexe entre l'environnement construit et le climat où le microclimat autour des bâtiments évolue en fonction du climat régional existant dans la campagne avoisinante. Les résultats des mesures constatés dans les deux quartiers étudiés de la ville de Fès démontrent que le tissu urbain a une grande influence sur le microclimat existant autour des constructions. L'étude démontre que pour obtenir un meilleur confort climatique dans les zones urbaines, il faudrait prévoir un tissu urbain plus dense que celui existant aujourd'hui, ce qui présenterait également l'avantage d'obtenir une meilleure occupation du sol.

Les simulations sur ordinateur indiquent un climat intérieur inconfortable dans différentes régions : trop froid en hiver et/ou trop chaud en été. On pourrait remédier dans certains cas à cet inconfort grâce à une adaptation climatique passive des constructions, par un choix judicieux de l'orientation, des matériaux et la ventilation. Cependant, dans d'autres cas de climats plus sévères, le recours à une forme active de chauffage et/ou climatisation est jugé nécessaire. Dans tous les cas, une réglementation thermique est un outil indispensable permettant d'assurer une meilleure performance thermique des constructions.

Une performance thermique améliorée implique entre autres la nécessité d'une isolation thermique des constructions. Ainsi, il est jugé important d'introduire différents matériaux isolants et de développer leur utilisation en proposant des applications adaptées aux techniques de construction utilisées dans le pays.

Ci-après, les principales conclusions des trois volets de l'étude :

## Urbanisme adapté au climat

L'étude réalisée dans la ville de Fès confirme les études antérieures : le climat urbain diffère notablement du climat rural. Les relevés climatiques montrent également d'importantes différences selon les caractéristiques du tissu urbain et à ce sujet l'étude a retenu deux quartiers types « extrêmes » : le quartier traditionnel de Seffarine représentant la vieille médina avec un tissu urbain très dense et le quartier moderne d'Adarissa en périphérie de la ville.

Le quartier traditionnel présente un système de rues irrégulier et un rapport entre la hauteur des constructions (H) et la largeur des rues (L) se situant entre 7 et 10. A l'inverse, le quartier moderne se caractérise par un système de rues régulier et un rapport H/L de 0,5 à 0,7.

Les températures dans le quartier traditionnel de la médina étaient par journées claires jusqu'à 10°C plus basses que celles relevées dans le quartier moderne, et ceci, aussi bien en été qu'en hiver. Par contre la nuit, le quartier traditionnel reste toujours plus chaud que le quartier moderne. Les différences de températures constatées entre les deux quartiers s'expliquent par les caractéristiques du tissu urbain des deux quartiers. Du fait des différences géométriques, le quartier dense est moins exposé au rayonnement solaire. Parallèlement, il se refroidit plus lentement durant la nuit car seules de faibles surfaces sont exposées au ciel. En outre dans ce quartier, les faibles différences de températures relevées entre le jour et la nuit s'expliquent par le fait d'une plus grande proportion de surfaces construites exposées à l'air, ce qui accroît la capacité d'emmagasiner de la chaleur le jour et de dégagement la nuit.

Les températures superficielles des façades donnant sur les rues varient également fortement entre les deux quartiers. Dans le quartier traditionnel, les températures superficielles se maintiennent très stables et proches de la température de l'air tandis que dans le quartier moderne, où les façades sont généralement exposées au rayonnement solaire une partie de la journée, les températures superficielles varient fortement entre le jour et la nuit. Pour ce qui est de l'humidité relevée dans le quartier traditionnel celle-ci est de 15 à 20% supérieure à celle du quartier moderne, ce qui peut être attribué au fait que ce quartier se situe très près de l'oued Fès. Enfin, il est à noter que la vitesse moyenne du vent relevée dans le quartier traditionnel est inférieure de moitié à celle relevée dans le quartier moderne, la raison étant la densité des constructions.

Dans la ville de Fès, le climat se caractérise par des journées très chaudes en été et relativement froides en hiver. Et, quant au confort mesuré dans les deux quartiers, il est en principe confortable en été dans le quartier traditionnel tandis que dans le quartier moins dense, les températures se situent bien au-delà de la zone de confort – même supérieures à celles relevées dans la campagne avoisinante – et le degré d'ensoleillement y est élevé en raison du manque d'éléments d'ombrage. Par contre en hiver, cette fois-ci c'est le quartier moderne qui est plus confortable essentiellement en raison des possibilités d'ensoleillement.

Il est difficile de trouver de bons exemples de construction adaptée à un climat chaud et sec. Les cités traditionnelles sont souvent données en exemple, mais les solutions traditionnelles d'urbanisme et de construction ne représentent pas toujours des solutions optimales répondant aux besoins contemporains. Dans le cas de Fès, la médina est en général plus confortable que les quartiers modernes mais elle présente le désavantage de jouir d'un climat inconfortable en hiver.

Cette étude ayant comparé les mesures dans un quartier extrêmement dense avec celles d'un quartier à faible densité, il n'existe pas suffisamment d'éléments permettant d'indiquer un taux de densité optimal pour un climat d'hiver et un climat d'été. Il apparaît cependant

qu'un tissu urbain plus dense que celui réalisé aujourd'hui est nécessaire pour améliorer le confort. Les tests de simulation effectués avec des équipements simples indiquent que pour obtenir un effet positif en été, le rapport H/L doit être au moins de 2 et probablement encore plus serré. Il n'est cependant pas réaliste de ne concevoir que des rues étroites, car il faut, entre autres, prévoir l'accès des véhicules.

Nous proposons ici des canyons de rue ayant un rapport H/L se situant entre 0,7 et 2 ; les rues les plus larges étant bordées d'arbres pour ombrager autant que possible les façades et de prévoir des constructions avec des arcades pour protéger les piétons du soleil. Le revêtement des façades et des chaussées devra être aussi clair que possible afin d'obtenir des températures superficielles aussi faibles que possible. Indépendamment de la largeur des rues, les protections solaires sont importantes et devront être conçues de manière à procurer de l'ombre en été tout en assurant le libre passage des rayons solaires en hiver. L'adaptation climatique doit être étudiée aussi bien au niveau du plan d'urbanisme que des plans de construction étant donné que la typologie et la morphologie urbaine sont étroitement liées.

## Vers une réglementation thermique

Une délimitation préliminaire des zones climatiques marocaines a été effectuée en tenant compte des périodes d'hiver et d'été. Initialement, la délimitation des zones d'hiver s'est basée sur les degrés-jours de chauffage et celle des zones d'été sur la température de base. Afin de vérifier et d'affiner cette première délimitation, une méthode d'approche a été mise au point et permet de simuler le climat intérieur dans une construction type à l'aide du logiciel dynamique DEROB pour les différentes stations climatiques du pays.

Par ailleurs, en vue de déterminer les exigences de confort pour les différentes zones du Maroc, une méthodologie d'approche a été élaborée et appliquée à la région climatique de Fès. Un modèle de bâtiment typique a été étudié en vue d'optimiser l'isolation de la toiture et des murs ainsi que les dimensions des fenêtres de la façade exposée au sud. Les simulations sur ordinateur ont été effectuées d'une part pour le cas passif, c'est-à-dire sans aucun apport énergétique sous forme de chauffage ni de climatisation, afin d'étudier le climat intérieur et, d'autre part, pour le cas actif afin de calculer le besoin énergétique nécessaire afin d'atteindre un confort climatique.

Les résultats démontrent que, pour la zone climatique de Fès, l'isolation thermique de la toiture est une exigence minimale pour améliorer le confort. Dans le cas de bâtiments avec des murs exposés au rayonnement solaire, ou dans le cas de climatisation active, l'isolation des murs est à considérer. Pour la zone climatique de Fès, les principales exigences de confort qui découlent de ce début de processus d'optimisation paramétrique des différents éléments de construction sont :

- Un coefficient de transmission surfacique compris entre 1 et 1,25  $W/m^2.K$  pour les toitures.
- Un coefficient de transmission surfacique compris entre 1 et 1,5  $W/m^2.K$  pour les murs.
- Un pourcentage de vitrage d'environ 15% pour les fenêtres orientées sud.

Dans le cas d'un bâtiment à climatisation active, cette conception permet d'atteindre une économie d'énergie globale comprise entre 20 et 30% par rapport à un cas de bâtiment non isolé.

## Proposition de matériaux isolants

L'étude montre que les panneaux en laine de bois peuvent être fabriqués à partir de matières premières marocaines. L'utilisation de ce matériau n'exige aucune introduction de nouvelles méthodes de construction car les panneaux en laine de bois sont faciles à intégrer aux techniques constructives appliquées aujourd'hui. Selon les calculs des coûts effectués, le panneau en laine de bois serait moins cher que le liège dans le cas d'une fabrication locale mais serait légèrement plus cher que les autres matériaux isolants disponibles sur le marché marocain. Le panneau en laine de bois pouvant aisément s'intégrer dans les constructions existantes, le surcoût sera donc limité. Une étude du marché marocain indique qu'il devrait exister une demande satisfaisante en panneaux en laine de bois et que cet état de fait justifierait la mise en service d'une ou plusieurs usines de petite capacité.

Les panneaux en laine de bois fabriqués à partir de pin d'Alep marocain ont été testés au niveau de la toiture du Laboratoire LPEE à Ouarzazate au lieu des blocs de terre comprimée prévus initialement. Les améliorations du confort thermique apportées à la conception originale du laboratoire ont été positives mais l'adaptation climatique n'est cependant pas optimale. Pour arriver à un meilleur résultat, une prise en considération du climat au niveau même de l'esquisse du projet est nécessaire.

## Etudes futures

La présente étude a permis d'accroître les connaissances sur l'influence des tissus urbains sur le microclimat dans un climat chaud et sec. Des mesures ou des simulations complémentaires du climat urbain sont cependant nécessaires afin de connaître à l'avance avec certitude le microclimat avant de réaliser une nouvelle construction.

Afin de prévoir de nouvelles constructions dans les climats chauds et secs, il est important d'élargir les connaissances des différents acteurs tels que les urbanistes, les architectes, les ingénieurs, les décideurs, etc. Il est également important de collaborer avec les météorologues et les

climatologues qui, souvent, disposent de connaissances sur le climat urbain. Pour élargir ces connaissances, il serait souhaitable de mener une démonstration en vraie grandeur en réalisant un projet pilote de construction d'un quartier qui permettra d'appliquer les résultats de cette étude et d'étudier avec plus de précision les effets positifs d'une conception urbaine adaptée au climat.

D'autre part, les méthodes de calcul et les logiciels disponibles aujourd'hui pour l'évaluation du climat urbain sont souvent compliqués et permettent rarement d'obtenir une prévision exacte. Il est donc nécessaire de développer des logiciels d'utilisation facile pouvant être mis à la disposition des urbanistes, des architectes et des ingénieurs. Parallèlement à la mise au point de tels outils, il est important de poursuivre l'établissement de directives pour une construction adaptée au climat urbain.

Par ailleurs, il est important d'établir des normes urbaines de manière à ce qu'elles laissent plus de liberté de prendre les aspects climatiques en compte, une telle démarche normative ne peut être dissociée d'un long processus permettant le développement de la réglementation thermique, l'application de la méthodologie présentée dans cette étude pour les différentes zones climatiques du Royaume permettra d'obtenir les parois optimisées et par la suite traduire ces exigences sous forme d'un code de calcul. Outre les propriétés des parois étudiées dans ce rapport, d'autres paramètres tels que la masse thermique ou les éléments d'ombrage doivent être également optimisés.

Il nous semble opportun d'introduire les panneaux en laine de bois et autres matériaux isolants. Il s'agit donc à l'avenir d'informer les fabricants susceptibles d'être intéressés par cette fabrication et de rechercher sur le plan national et international les possibilités d'obtenir des crédits à cet effet.



# Bibliographie

- Andersson, L-A, L Arnsby, B Johansson, C Pering et J Åstrand  
1985 *Une solution du problème de l'habitat en région rurale.*  
Expériences d'un projet pilote en Tunisie basé sur les principes  
de l'autoconstruction organisée. SADEL, Lund, Suède
- ASHRAE  
1997 *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating,  
Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE).  
Atlanta, Georgia, Etats-Unis. (en anglais)
- Åstrand, J, L Bessadi, E Johansson, S Laïd, H Teggour et N Toumi  
1994 *Matériaux thermiquement isolant – béton mousse et panneaux  
en laine de bois*, Report 2, LCHS, Université de Lund, Suède.
- Banque Mondiale  
2000 *Cities in Transition: World Bank Urban and Local Government  
Strategy*. The World Bank Infrastructure Group. The World Bank,  
Washington, Etats-Unis. (en anglais)
- CEN  
1995 *Ambiances thermiques modérés. Détermination des indices PMV  
et PPD et spécification des conditions de confort thermique.*  
Norme européenne EN ISO 7730:1994. Comité Européen de  
Normalisation (CEN), Bruxelles, Belgique.
- Département de l'Habitat  
2000 *Enquête logement 2000. Synthèse et résultats*. Département de  
l'Habitat, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de  
l'Environnement, de l'Urbanisme et de l'Habitat, Rabat, Maroc.
- DIN  
1989 *Woodwool slabs and multilayered slabs as insulating materials  
in building: requirements, testing*, DIN 1101, Deutsches Institut für  
Normung, Berlin, Allemagne. (en allemand)
- Direction de la statistique  
2000 *Annuaire statistique du Maroc 2000*. Direction de la statistique,  
Ministère de la prévision économique et du plan, Rabat, Maroc.  
ISBN : 9981-20-178-2.
- El Kortbi, M, K Grundström, E Johansson, M Mraissi et H Rosenlund  
1999a *Conception urbaine adaptée au climat – Etude préliminaire de la  
ville de Fès*, LCHS, Université de Lund, Suède.
- El Kortbi, M, E Johansson, M Mraissi et H Rosenlund  
1999b *Isolation thermique et confort dans le bâtiment – Etude  
préliminaire*, LCHS, Université de Lund, Suède.
- Eltomation  
2000 *Woodwool cement boards – properties, applications and product  
technology*, Eltomation, Voorthuizen, Pays Bas. (en anglais)

Givoni, B

1998 *Climate Considerations in Building and Urban Design*, Van Nostrand Reinhold, New York, Etats-Unis. ISBN : 0-442-00991-7. (en anglais)

Grundström, K, E Johansson et M Mraissi

2002a *Etude urbaine – mesures et simulations du climat urbain à Fès*. Rapport Intermédiaire, HDM (Université de Lund, Suède)/LPEE (Maroc).

Grundström, K, E Johansson et M Mraissi

2002b *Etude urbaine – Recommandations d'une conception urbaine adaptée au climat*. Rapport Intermédiaire, HDM (Université de Lund, Suède)/LPEE (Maroc).

Intab

2001 Data loggers and data analysis tools. INTAB Interface-Teknik AB. [Http://www.intab.se](http://www.intab.se).

Johansson, E

1994 *Woodwool slabs – manufacture properties and use*. Building Issues, no. 3, vol. 6. LCHS, Université de Lund, Suède. (en anglais)

Johansson, E

2000 *Réglementation thermique – étude bibliographique*. Rapport Intermédiaire, HDM (Université de Lund, Suède)/LPEE (Maroc).

Johansson, E, K Grundström et H Rosenlund

2001 « Street canyon microclimate in traditional and modern neighbourhoods in a hot dry climate – a case study in Fez, Morocco ». En Pereira, F O R et al.: *Renewable Energy for a Sustainable Development of the Built Environment*, actes de la conférence PLEA, 7–11 novembre 2001, pp. 661–665. PLEA Association, Florianópolis, Brésil. (en anglais)

Johansson, E, M Mraissi et D Ouahrani

2002 *Panneaux de laine de bois – Etude de faisabilité et stratégie de commercialisation*, Rapport Intermédiaire, HDM (Université de Lund, Suède)/LPEE (Maroc).

Johansson, E et D Ouahrani

2002 *Utilisation de panneaux en laine de bois – Etude internationale et proposition de produits pour le Maroc*, Rapport Intermédiaire, HDM (Université de Lund, Suède)/LPEE (Maroc).

Knowles, R L

1981 *Sun Rhythm Form*, MIT Press, Etats-Unis. ISBN : 0-262-11078-4. (en anglais)

Kursis J et L Norell

2000 *Normes d'urbanisme et d'habitat – Une étude tenant en compte du climat urbain*. Rapport Intermédiaire, HDM (Université de Lund, Suède)/LPEE (Maroc).

- Kvist, H  
 2001 *DEROB-LTH Manual*. Dép. Energy and Building Design, Université de Lund, Suède. (en anglais)
- Markus T A et E N Morris  
 1980 *Buildings, Climate and Energy*, Pitman Publishing, Londres, Grande-Bretagne. ISBN : 0 273 00266. (en anglais)
- Ministère de l'Habitat  
 1996 *Rapport National*, 2ème conférence des Nations Unies sur les établissements humains Habitat II, Istanbul, Turquie, Juin 1996.
- Ministère de l'Habitat  
 2001 *Rapport National*, Conférence des Nations Unies sur les établissements humains Istanbul+5, New York, Etats-Unis, Juin 2001.
- Mraissi, M et E Johansson  
 1998 *Inventaire des matériaux isolants au Maroc*. Rapport Intermédiaire. LPEE, Maroc/HDM, Université de Lund, Suède.
- Nakamura, Y, et T R Oke  
 1988 « Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon », *Atmospheric Environment*, vol. 22, no. 12, pp.2691–2700. (en anglais)
- Oke, T R  
 1987 *Boundary Layer Climates*, Routledge, Londres, Grande-Bretagne. ISBN : 0-415-04319-0. (en anglais)
- OMM  
 1996 *Climate and urban development*, Document 844, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), Genève, Suisse. (en anglais)
- Ouahrani, D, et H Rosenlund  
 2002 *Prototype de Ouarzazate – Analyse des mesures*. Rapport Intermédiaire, HDM (Université de Lund, Suède)/LPEE (Maroc).
- Pace Scientific  
 2001 Data Loggers and Sensors. <http://www.pace-sci.com>.
- Recknagel, H, et al.  
 1995 *Le Recknagel: Manuel pratique du génie climatique. Tome 1: Données fondamentales*. PYC Editions livres, Paris, France.
- Rodríguez, M et J Åstrand  
 1996 *Organized Small-scale Self-help Housing*, Building Issues, no. 4, vol. 8. LCHS, Université de Lund, Suède. (en anglais)
- Rosenlund, H  
 1995 *Design for Desert*. An architect's approach to passive climatisation in hot and arid regions. Dép. Architecture and Development Studies, Université de Lund, Suède. (en anglais)

Rosenlund, H

2000 *Prototyp Ouarzazate : Mesures mai 1998 – mai 2000*. Rapport Intermédiaire, HDM (Université de Lund, Suède)/LPEE (Maroc).

Rosenlund, H, E Johansson, K Grundström, M Mraissi et M El Kortbi

2000 « Urban micro-climate in the city of Fez, Morocco ». En Steemers, K, et S Yannas: *Architecture City Environment*, actes de la conférence PLEA, 3–5 juillet 2000, pp. 453–458. James & James Ltd, Londres, Grande-Bretagne. (en anglais)

Rosenlund, H, et D Ouahrani

1989 *Experimental Building Ghardaïa*. Evaluation of climate measurements, August 1988. LCHS, Université de Lund, Suède. (en anglais)

Rosenlund, H, D Ouahrani et E Johansson

1997 *Architecture Adaptée aux Zones Arides*, Report 7, Dép. Architecture and Development Studies, Université de Lund, Suède.

Secrétariat d'Etat à l'Habitat

1999 *Secteur des matériaux de construction*. Secrétariat Général, Direction de la Promotion Immobilière, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement, de l'Urbanisme et de l'Habitat, Rabat, Maroc.

Secrétariat d'Etat à l'Habitat

2000 *Enquête logement 2000. Synthèse et résultats*. L'Observatoire de l'Habitat, Secrétariat d'Etat à l'Habitat, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement, de l'Urbanisme et de l'Habitat, Rabat, Maroc.

Swaid, H, et M E Hoffmann

1990 « Prediction of urban air temperature variations using the analytical CTTC model », *Energy and Buildings*, vol. 14, pp. 313–324. (en anglais)

Swema

2001 Instruments and Sensors. <http://www.swema.se>.

Tannerfeldt, G

1996 *Towards an Urban World. Urbanization and Development Assistance*. Agence suédoise de coopération internationale au développement (Asdi), Stockholm, Suède. (en anglais)