

**Terre crue en milieu urbain:  
développement d'une architecture  
bioclimatique au Maroc**

*«Je choisirais [de vivre dans] un logement en terre sous condition que toutes les nécessités de ma vie actuelle soient disponibles»  
[Une rencontre à Casablanca ayant vécu par le passé dans un logement en terre]*

Quelle forme pour l'architecture de terre crue aujourd'hui au Maroc ?

Le patrimoine architectural marocain présente de nombreux exemples d'architecture en terre crue démontrant que celle-ci est bien adaptée au climat local exposé à de fortes chaleurs en été. Mais l'accroissement des matériaux industriels et leur rapidité de mise en œuvre ont favorisé leur utilisation massive au détriment des avantages qu'apportait l'architecture vernaculaire. Pourtant la population marocaine ayant vécu dans des habitations en terre a conscience des avantages thermiques que celle-ci possède. Au delà du côté «sentimental» des traditions, la terre crue n'est pas incompatible avec «confort moderne». Au delà du côté «sentimental» des traditions, la terre crue n'est pas incompatible avec «confort moderne».

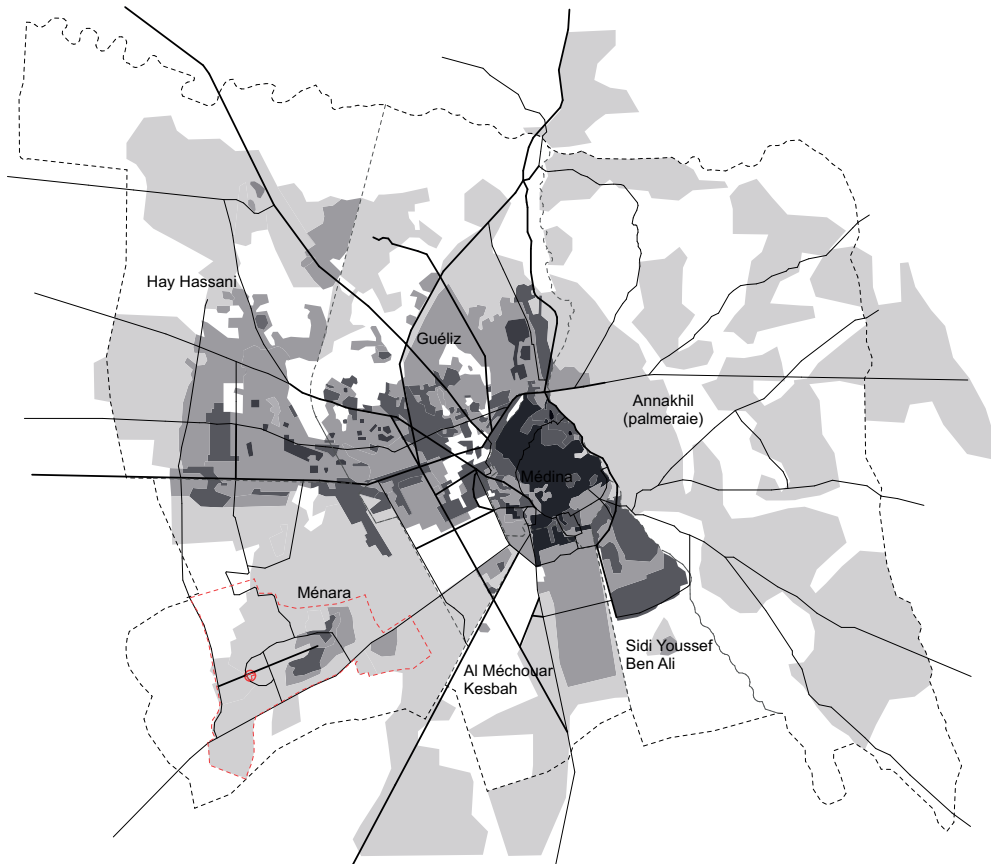
La prise de conscience des enjeux environnementaux donnent un nouvel intérêt pour la construction en terre crue, dans l'optique de favoriser des cycles courts et des matériaux renouvelables. Alors que le Maroc vient de mettre en place un règlement thermique pour la construction visant l'efficacité énergétique, le projet propose un modèle de logement bioclimatique redonnant une place à la terre dans la conception du bâtiment.

Il se situe à Marrakech et se concentre, à l'échelle d'un quartier, sur un nouveau modèle de «maison marocaine» pour la classe moyenne. Proche de l'architecture traditionnelle par sa forme urbaine à patio, il se différencie par sa matérialité. Les murs périphériques des logements sont en adobe créant une enveloppe massive et lisse protégeant des nuisances extérieures. La terre crue régule l'hygrométrie dans le bâtiment, apporte une inertie thermique, ainsi qu'un confort thermique supplémentaire par respiration du mur (absorption de l'humidité en hivers et diffusion de celle-ci en été). Les murs orientés sur le patio qui comportent les ouvertures, ainsi que le deuxième étage, sont en panneaux de bois avec un isolant permettant d'augmenter l'efficacité énergétique du bâtiment. Un revêtement métallique entrelacé recouvre ces façades plus légères. Il module à la fois la vue et la lumière estompant ainsi la limite entre l'espace intérieur et extérieur.

Le développement urbain de la parcelle se fait selon une densité basse R+2, avec une ou deux chambres au deuxième étage selon les besoins du ménage et des terrasses en toiture. Une variante de logement légèrement plus grande comporte une chambre au rez-de-chaussée pour les personnes âgées ou à mobilité réduite. L'orientation des bâtiments sur le patio permet une forme urbaine resserrée. Le quartier comporte également un parking pour l'ensemble des 101 logements, ainsi qu'un pavillon polyvalent pour accueillir diverses activités pour la population du quartier et des environs.

# IMPLANTATION

## Marrakech



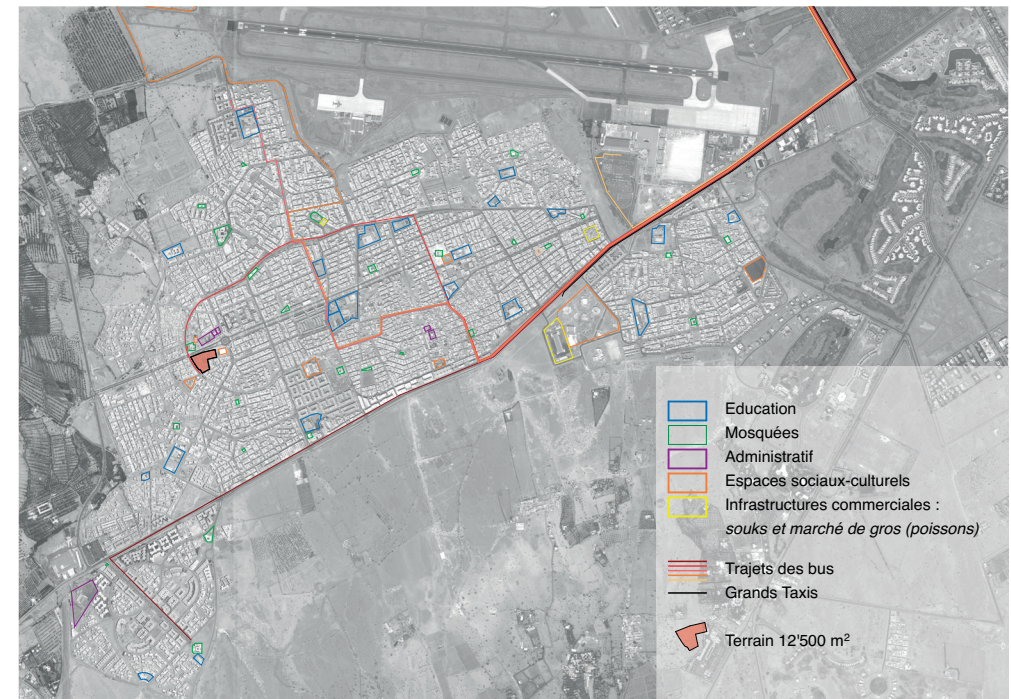
- Avant 1912 : Médina
- De 1912 à 1956: protectorat
- De 1956 à 2000
- Après 2000

## Arrondissement Ménara

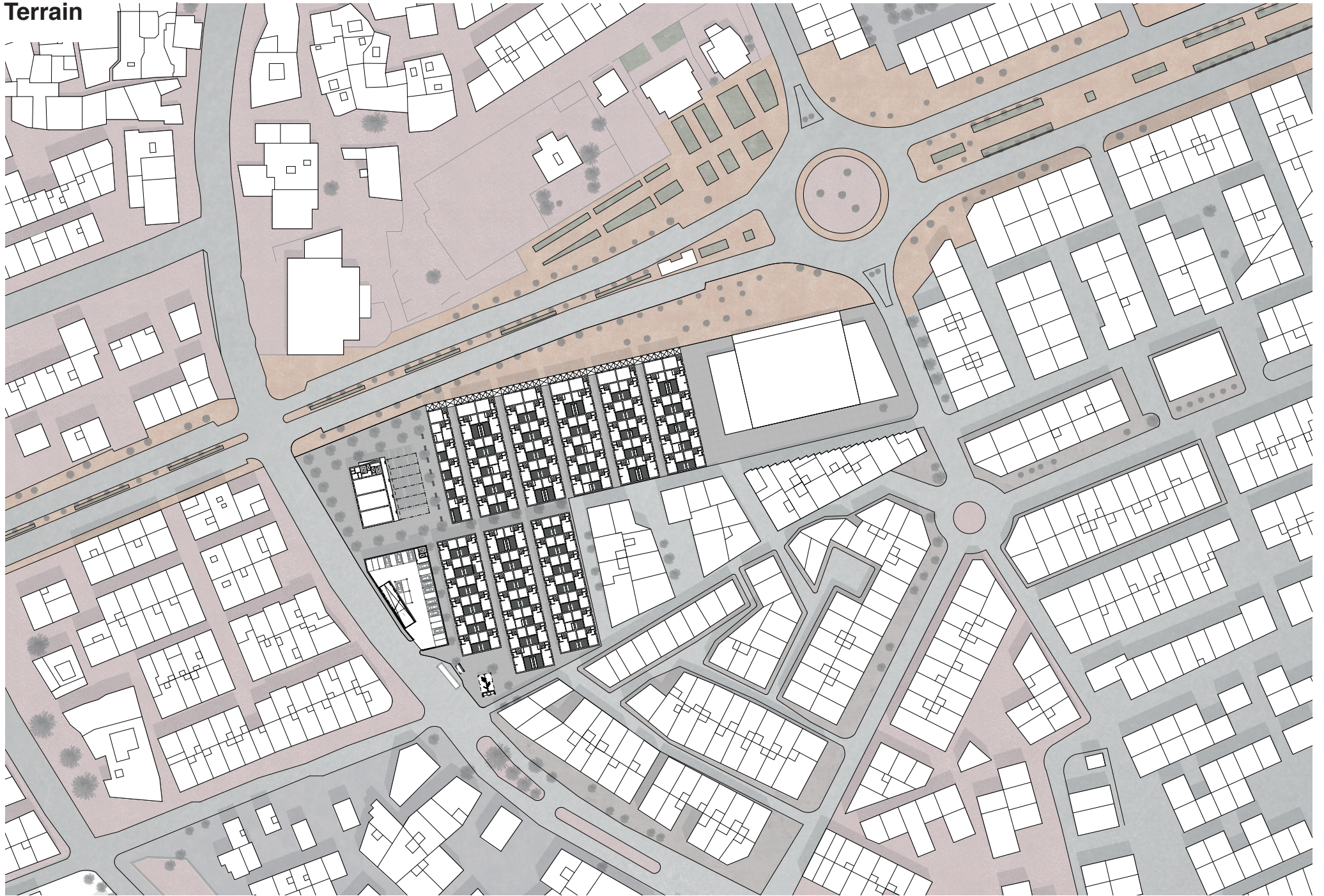
Le quartier est prévu à Marrakech, la ville ocre, qui tient son surnom de la couleur de son patrimoine en terre crue. Il occupe une surface de 15'000 m<sup>2</sup> actuellement inoccupée au sein de l'arrondissement Ménara au sud-ouest de la ville en dessous de l'aéroport. Cette agglomération est relativement récente, début des années 2000, et s'étend trop rapidement pour qu'elle puisse être correctement maîtrisée. Les logements de type économique sont répétés sans qualité architecturale, ni harmonie de l'ensemble. S'implanter dans l'étendue de la ville répond à un besoin de logement tout en proposant une autre forme urbaine de densité basse ( $16'839\text{m}^2/15'000\text{m}^2 = 1.12$ ) avec une surface d'occupation du sol de 0.58 ( $8'792\text{m}^2/15'000\text{m}^2$ ).

La parcelle se trouve en dessous du boulevard Anakhil, boulevard structurant l'arrondissement. Une salle de sport couverte se trouve à l'est de celle-ci.

Les bâtiments ne sont pas complètement orientés au sud, mais légèrement en direction du sud-est (azimut de 283°).



Terrain





Terrain



Aménagement du boulevard Anakhil



Terrain et front bâti au sud



Bordure du terrain le long du boulevard



Arrêt de bus à l'ouest



Bordure du terrain côté boulevard



Front bâti de l'autre côté du boulevard Anakhil au nord

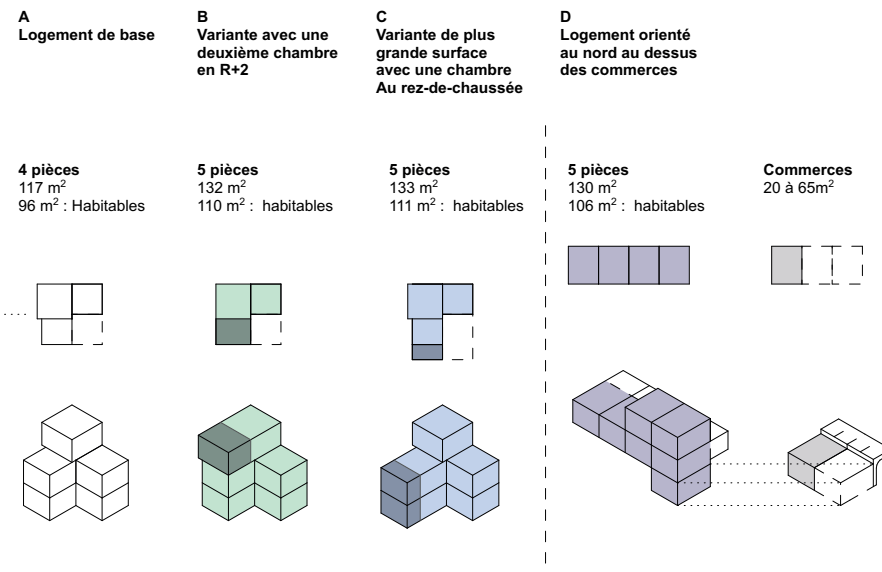
## PROGRAMME

La terre crue apporte un confort thermique au bâtiment. Le logement étant un programme au taux d'occupation important, le confort y est essentiel. De plus la ville de Marrakech ne cesse d'étendre la construction de logements pour subvenir aux besoins. Le projet développe un quartier de logement qui s'inscrit dans l'étendue de la ville tout en proposant un prototype d'habitat partiellement en terre qui peut se répéter en d'autres lieux.

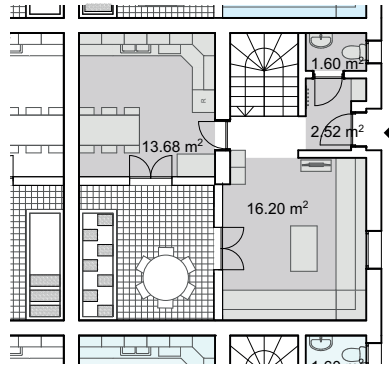
C'est la classe moyenne qui est visée, population importante au Maroc et majoritaire dans l'arrondissement Ménara.

Pour la réussite d'un tel projet voulant réintégrer la terre crue dans la conception architecturale, celui-ci doit s'inscrire dans un projet immobilier avec un encadrement professionnel et fixant une forme définitive. À l'échelle individuelle, le matériaux ne serait jamais intégré de manière correcte.

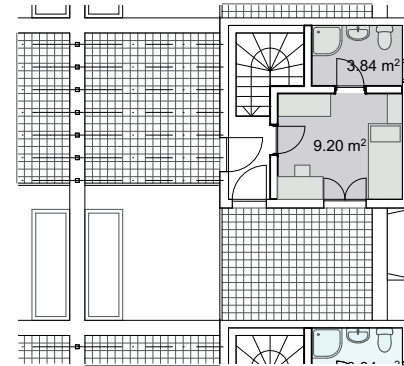
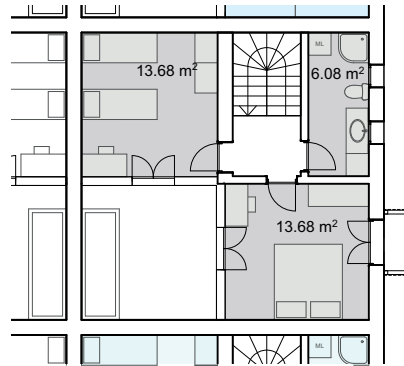
Les ménages font en moyenne 5 personnes et les logements de base on une surface habitable de 96 m<sup>2</sup> et pouvant aller jusqu'à 111 m<sup>2</sup> selon la variante.



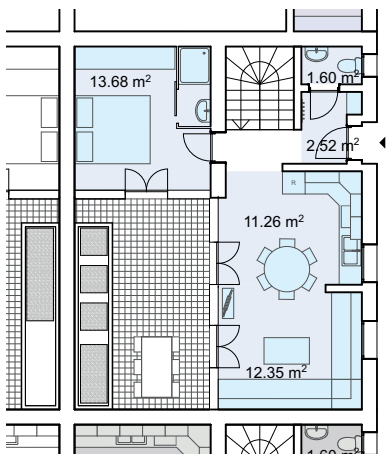
Pour les typologies à patio, la circulation est double. L'accès au logement est dans l'angle d'où part la distribution verticales et horizontale intérieure. Mais au rez de chaussée, le passage d'une pièce à l'autre (de la cuisine au séjour) peut également se faire via le patio lorsque le climat y est favorable.



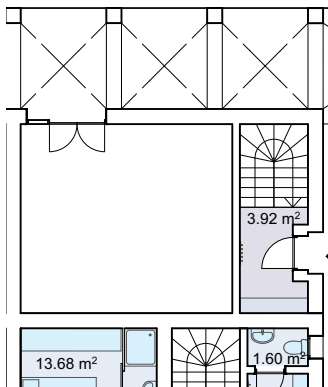
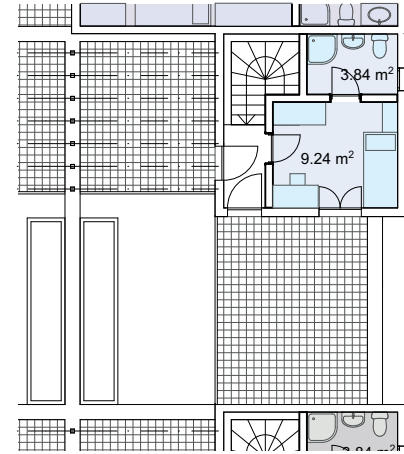
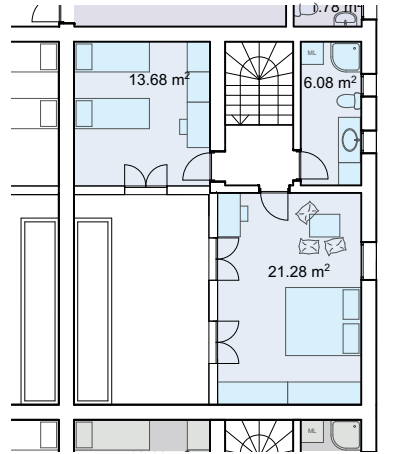
Logement de base A



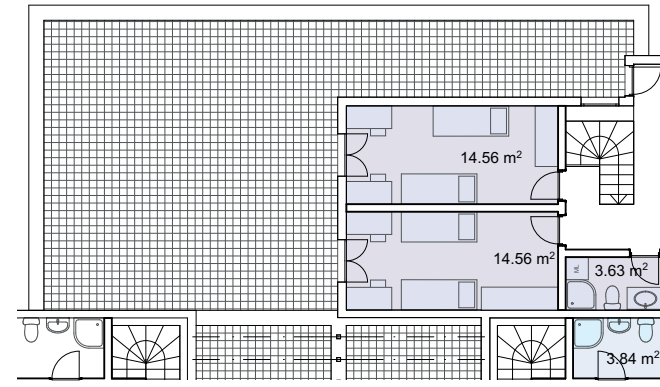
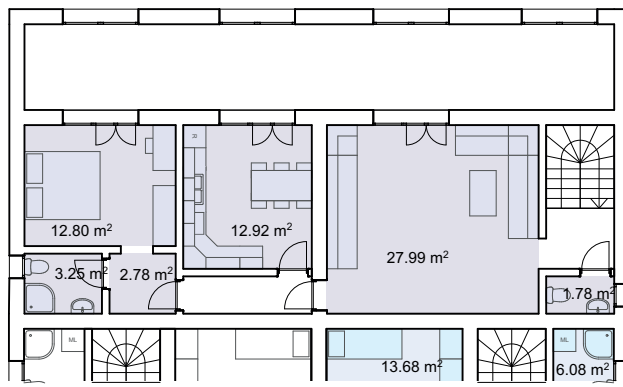
Variante B (2° étage)



Variante C avec chambre au rez-de-chaussée pour personnes âgées ou à mobilité réduite

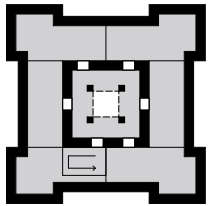
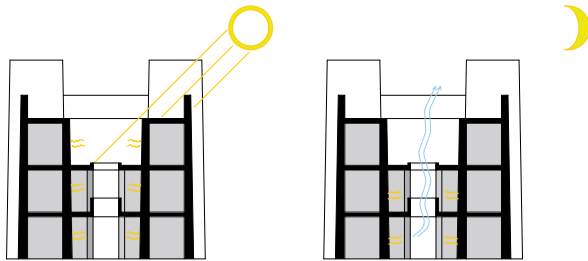


Logement orienté nord D



# RÉFÉRENCES

## Vernaculaire



Coupes et plans schématiques d'une kasbah

## Patio

- Orientation de l'architecture vers le centre
- Protection du regard
- Protection du soleil
- Espace de circulation et de distribution
- Pièce à ciel ouvert
- Apport de lumière naturelle
- Ventilation naturelle

Photos d'une kasbah et de la cour d'une maison en médina

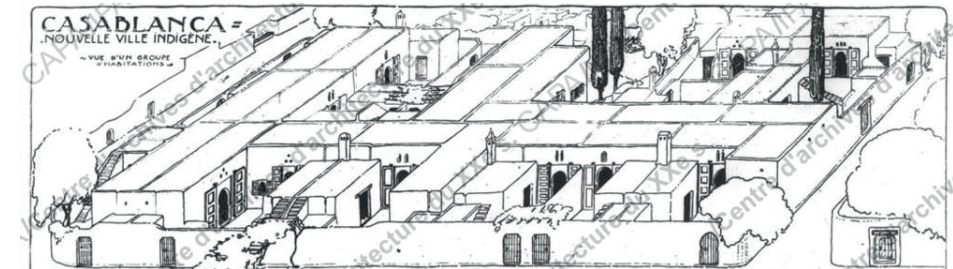
## Références modernes



Daoudiate, Marrakech



Trame Ecochard 8x8m, Casablanca



Quartier Habbous, Casablanca



«Nid d'abeilles», Casablanca



«Habitat marocain», Casablanca



# MATÉRIAUX

## Matériaux principaux

Terre crue (≈ 9'800 m<sup>3</sup> ensemble du projet)

Bois de cèdre

Béton armé: Fondations, chaînages et dalles

liège (isolation) panneaux de 20 à 120 mm

Paille

Chape ciment

Revêtement grillage en acier thermolaqué

Carrelage terre cuite

Placo plâtre

OSB

## Provenance

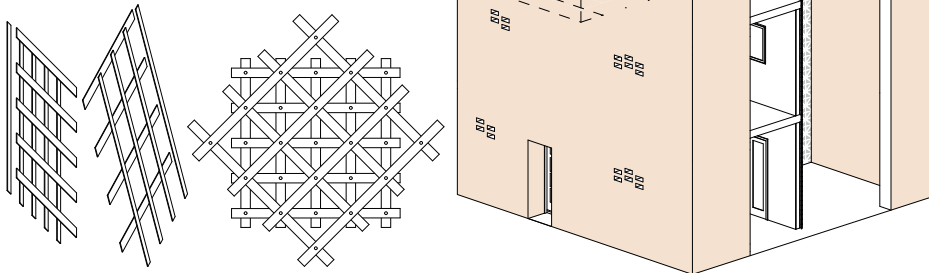
Excavation du parking (84%) et chantier à proximité

Haut Atlas oriental

Plateau central

agriculture locale

Mur périphérique en maçonnerie d'adobe et mur sur patio et deuxième étage en panneaux de bois revêtu d'un grillage en acier thermolaqué. Bande d'acier dans 4 directions rivetées entre elles.



## Énergie grise et émission de CO<sub>2</sub>

Comparaison de l'énergie grise et de l'émission de gaz à effet de serre à l'échelle d'un bâtiment (*Valeur pour la Suisse*\*). La comparaison se focalise sur la composition des murs porteurs en terre de 40cm et si ceux-ci étaient en parpaings de ciment ou en béton de 20 cm. De même pour les dalles.

	Volume [m <sup>3</sup> ]	Masse volumique p [kg/m <sup>3</sup> ]	Masse [kg]	Énergie non renouvelable (kg) [MJ oil-eq]*	Énergie non renouvelable total [MJ oil-eq]	Emission de CO <sub>2</sub> (kg) [kg CO <sub>2</sub> -eq]*	Emission de CO <sub>2</sub> total [kg CO <sub>2</sub> -eq]
Murs porteurs adobe 40 cm	64.84	1500	97260	0.129	12 546.54	0.023	2 236.98
Murs porteurs parpaing ciment 20 cm	32.4	700	22680	5.340	21 111.20	0.407	9 230.76
Murs porteurs béton 20 cm	32.4	2500	81000	0.201	16 281.00	0.099	8 019.00
Dalles béton (+adobe)	8	2500	20000	0.201	4 020.00	0.099	1 980.00
Adobe dalles	6	1500	9000	0.129	1 161.00	0.023	207.00
Dalle béton + adobe					5 181.00		2 187.00
Dalles 100% béton	14	2500	35000	0.201	7 035.00	0.099	3 465.00

\*Source : KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016, Données des écobilans dans la construction

Bien que la structure des murs en maçonnerie d'adobe soient deux fois plus volumineux, l'énergie grise est plus faible que pour une structure en béton: 12'546.54 < 16'281.00 [MJ oil-eq]. Concernant l'émission de gaz à effet de serre, la différence est presque 4 x plus petite pour une construction en terre: 2'236.98 < 8'019 [kg CO<sub>2</sub>-eq].

L'utilisation d'adobe dans la dalle à ourdis permet de diminuer la quantité de béton utilisée et de réduire l'emprunte écologique.

À l'échelle du quartier ces différences ne sont pas négligeables.



## Matériau terre



Quelle forme et quelle méthode de construction pour la terre crue?

Le pisé demande une main d'oeuvre très importante et se monte directement sur le chantier. Les briques de terre crue sont plus rationnelles, la maçonnerie est similaire aux briques de terre cuite et la production peut être indépendante de la construction.

Dans l'optique de ne pas stabiliser la terre dans la masse, l'adobe est plus intéressant que le bloc de terre comprimé (BTC). En comparaison, le BTC non stabilisé n'est pas beaucoup plus performant que l'adobe traditionnel. Pour un bâtiment avec de petites portées, la résistance à la compression de l'adobe est suffisante avec un mur de 40 cm d'épaisseur. L'adobe demande plus d'eau à la fabrication et donne un résultat moins régulier que les BTC, mais sa production demande moins de matériel technique.

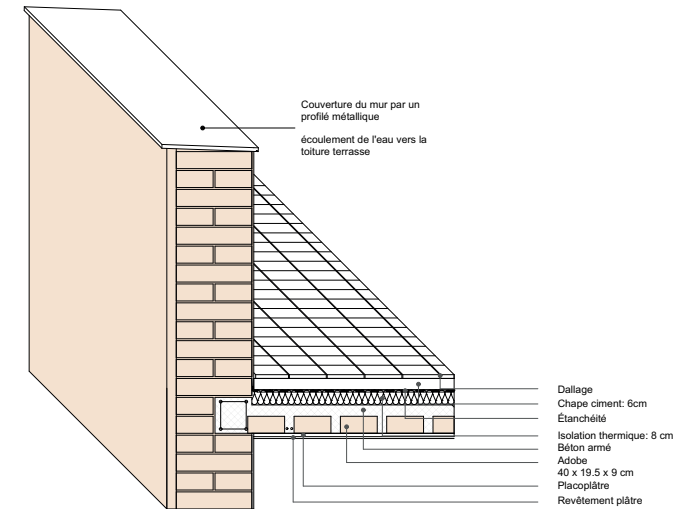
Les murs sont également revêtus d'un enduit de terre-paille à l'extérieur.

			Adobe (non stabilisé)	BTC (non stabilisé) comprimé à 20 bar
	Symbole	Unité		
<b>Caractéristiques mécaniques</b>				
Résistance à la compression, sec à 28 jours	$\sigma$ 28	bar	environ 20	environ 20
Masse volumique	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1200 - 1700	1700 - 2200
<b>Caractéristiques physiques</b>				
Chaleur spécifique (dépend fortement de la densité)	C	kJ/kg	environ 0.85	environ 0.85
Coefficient de conduction (dépend fortement de la densité)	$\lambda$	W/mK	0.46 - 0.81	0.81 - 0.93
Coefficient d'amortissement (mur de 40 cm)	m	%	5 à 10	5 à 10
Coefficient de déphasage (mur de 40 cm)	d	h	10 à 12	10 à 12
Coefficient d'affaiblissement acoustique (mur de 40 cm à 500 Hz)		dB	50	50
Coefficient d'affaiblissement acoustique (mur de 20 cm à 500 Hz)		dB	60	60
<b>Caractéristiques hydriques</b>				
Retrait de séchage		mm/m	0.2 - 1	0.2 - 1

Source : *Traité de construction en terre, CRAterre*

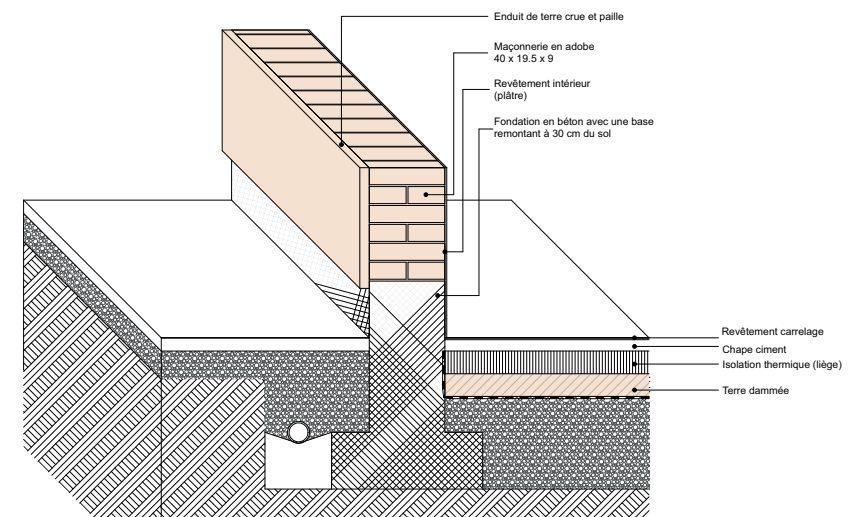
## L'architecture comme stabilisant

Une bonne conception architecturale diminue grandement les pathologies des constructions en terre. Ainsi des fondations protégeant le mur des infiltrations d'eau par capillarité, des protections pour éviter les rétentions d'eau, ainsi qu'une gestion de l'évacuation des eaux de pluie, permettent de ne pas stabiliser la terre dans la masse.



Protection du haut du mur par un profilé métallique.

L'écoulement de l'eau se fait vers la toiture terrasse et est évacuée coté patio.



Fondation en béton remontant à 30 cm du sol pour éviter les remontées capillaires

# FACTEURS TECHNIQUES

## Contexte

Le climat de Marrakech est contrasté avec des températures entre 1°C et 21°C en hivers, alors qu'à partir du mois de mai la température dépasse les 25°C en journée et du mois de juin à septembre il est nécessaire de se protéger de la chaleur variant de 17°C à 38°C en moyenne et dépassant les 40°C lors des jours spécialement chauds. Le besoin de refroidir est plus important que celui de chauffer, mais ce climat contrasté implique également un besoin de chauffage en hiver, il ne faut donc pas négliger la possibilité de gains solaires à cette période de l'année.

Il y a peu de précipitations à Marrakech et celles-ci sont généralement de courte durée. La pluviométrie est faible ce qui remet en question la possibilité de récupérer l'eau de pluie dans cette région.

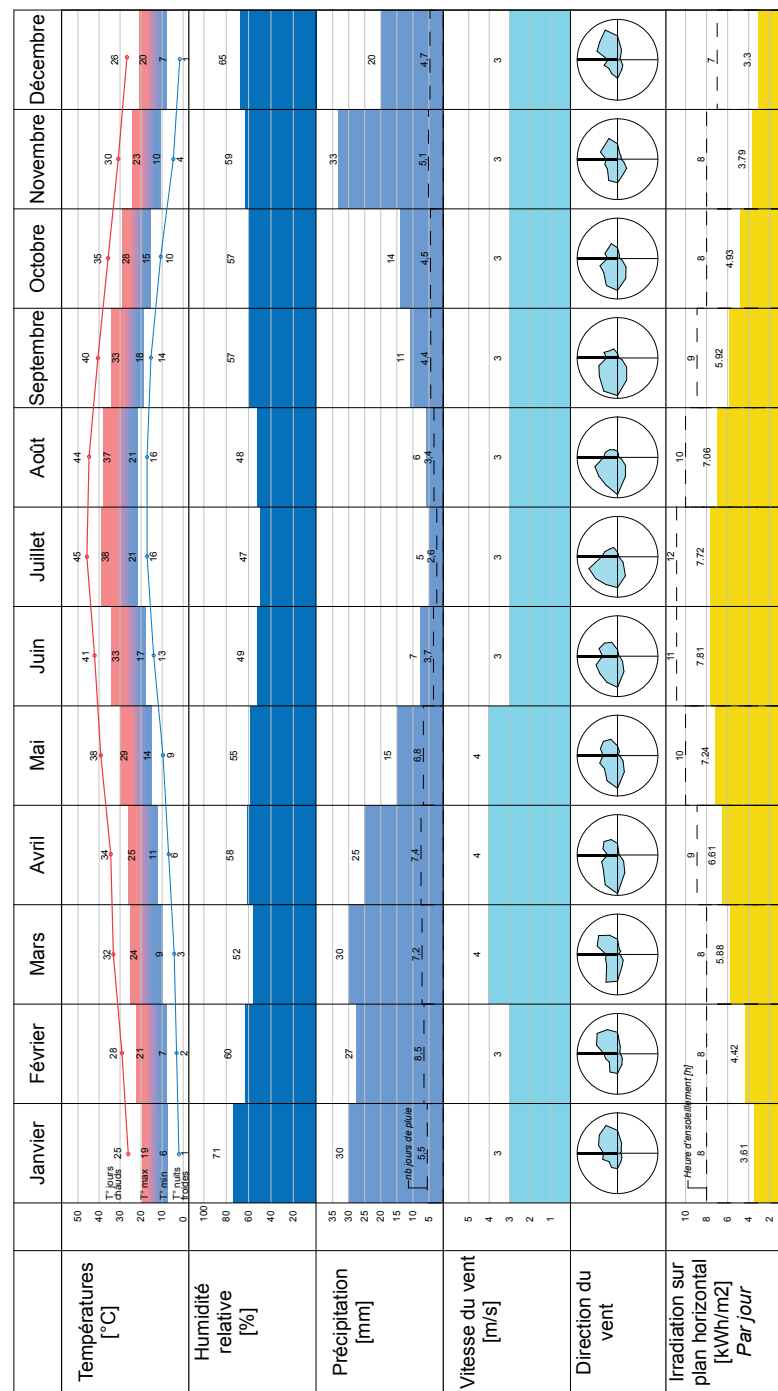
La terre crue doit être protégées aux extrémités, elle peut rester apparente pour autant que les eaux de pluie soit correctement évacuées pour ne pas rester en contact avec la structure en terre.

Le vent souffle majoritairement de l'ouest ou de l'est en hiver.

La région profite d'un grand ensoleillement. Si celui-ci n'est pas si profitable du côté confort thermique, il est avantageux pour la production d'électricité et d'eau chaude sanitaire par le biais de panneaux solaires.

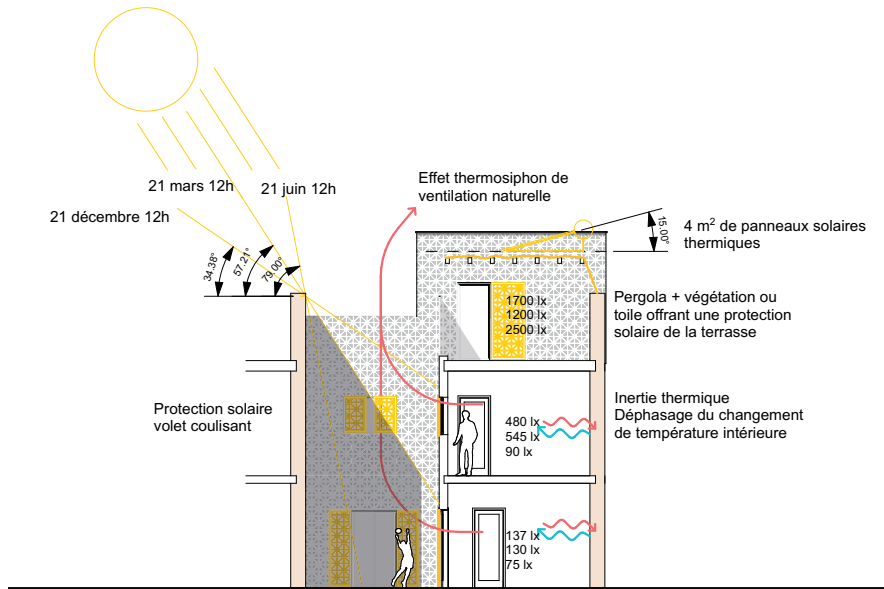
Sources données climatiques :

- [www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate/marrakech\\_maroc\\_2542997](http://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate/marrakech_maroc_2542997)
- [www.windfinder.com/windstatistics/marrakech-menara](http://www.windfinder.com/windstatistics/marrakech-menara)
- [re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr)



Données climatiques de Marrakech

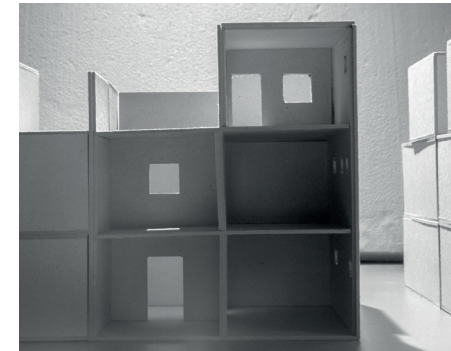
# Ensoleillement et lumière naturelle



Ensoleillement	10h	12h	14h	16h
21 décembre Solstice d'hiver	h : 24.14 ° 	h : 34.38 ° 	h : 30.87 ° 	h : 15.55 ° 
21 mars Equinoxe	h : 40.99 ° 	h : 57.21 ° 	h : 53.19 ° 	h : 33.13 ° 
21 juin Solstice d'été	h : 55.22 ° 	h : 79 ° 	h : 69.22 ° 	h : 43.93 ° 

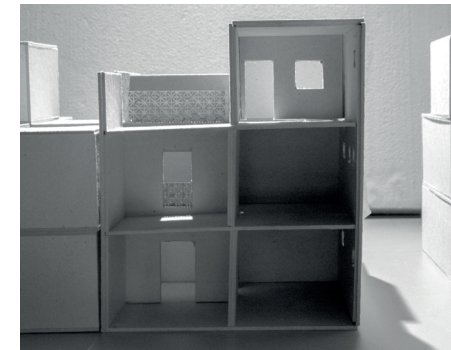
Avec un patio de 3.60m x 3.60m = 13 m<sup>2</sup>, Le soleil ne pénètre pas dans le patio en hiver (h= 34.38° à 12h). Seul l'étage du haut est ensoleillé aux équinoxes, tandis qu'en été, la façade sud est complètement ensoleillée aux environs de midi.

Le logement ne peut pas profiter de gains solaires en période froide via le patio. Et doit prévoir des protections solaires en période chaude au deuxième étage qui est très exposé, en toiture terrasse et en façade sud.

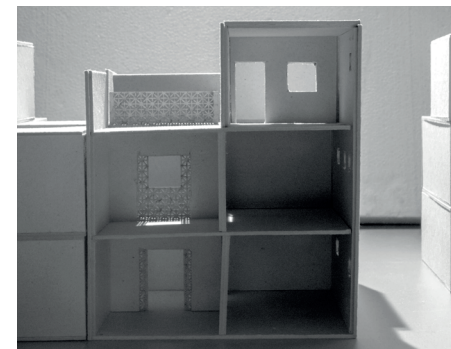


L'agrandissement des ouvertures vers le bas a peu d'influence sur la lumière naturelle. L'élargissement de la fenêtre donne un résultat légèrement meilleur, mais en comparaison du traitement de surface de la pièce et du patio, l'influence de l'ouverture sur la lumière est faible.

Choix d'agrandir les fenêtre pour une meilleure connexion avec le patio.



Le carton gris de la maquette absorbe beaucoup la lumière. Avec une surface de papier blanc, la quantité de lumière est presque du double. De même pour le revêtement perforé (brun sur la maquette). Peindre ce dernier de couleur clair améliore la luminosité dans le patio et donc dans les pièces. De plus en réfléchissant la lumière il protège la façade de la chaleur.



# Thermique

Le confort thermique consiste à maîtriser la différence de température moyenne entre l'intérieur du bâtiment et l'extérieur :  $\Delta\theta_m$ . Marrakech a un climat contrasté, on recherche donc un  $\Delta\theta_m$  élevé en période froide et faible en période chaude. La différence de température dépend des gains thermique (intérieurs et solaire) par rapport aux pertes thermique (enveloppe et ventilation) :

$$\Delta\theta_m = \theta_i - \theta_{ext} = (Q_i + Q_s) / (H_t + A_q)$$

L'oscillation des températures extérieures le long de la journée et des mois de l'année modifie constamment les paramètres. Pour limiter l'oscillation de la température intérieure, il faut prévoir un stockage par inertie thermique afin d'obtenir un déphasage entre la température intérieure et extérieure.

## Règlement thermique de construction au Maroc (RTCM)

L'agence marocaine pour l'efficacité énergétique a depuis peu mis en place un règlement thermique visant à alléger la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. «Quantitativement, le programme vise une économie d'énergie estimée à 1,2 Mtep/an à l'horizon 2020 et une réduction de gaz à effet de serre d'environ 4,5 MteCO<sub>2</sub>».

	Taux des baies vitrées TGBV	U des toitures exposées (W/m <sup>2</sup> .K)	U des murs extérieurs (W/m <sup>2</sup> .k)	U des vitrages (W/m <sup>2</sup> .k)	R minimale des planchers sur sol (m <sup>2</sup> .k/W)	Facteur Solaire FS* des vitrages
Zone climatique réglementaire Z5 (Réf. Marrakech)	≤ 15 %	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 1,00	NE
	16-25 %	≤ 0,65	≤ 0,70	≤ 3,30	≥ 1,00	Nord: NE Autres: ≤ 0,7
	26-35 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	≥ 1,00	Nord: ≤ 0,6 Autres: ≤ 0,4
	36-45 %	≤ 0,49	≤ 0,55	≤ 1,90	≥ 1,00	Nord: ≤ 0,5 Autres: ≤ 0,3

Les murs périphériques en terre des logements comportent peu ou pas d'ouvertures. Côté rue les ouvertures sont de l'ordre de 8,3 % << 15%, le U minimum des murs en terre doit être U ≤ 0.8

À Marrakech le besoin en froid est bien plus important que celui de chaud, les murs massifs en terre sont appropriés pour protéger de la chaleur grâce à leur inertie thermique et leur épaisseur.

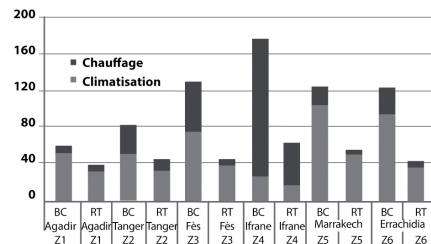


Figure 5 Comparaison cas de base et règlement thermique Bâtiment résidentiel (Ti = 26°C en été) en fonction de la zone climatique

## Gains internes

Les activités au sein d'un bâtiment produisent de la chaleur dont les activités métaboliques, l'utilisation d'appareils électriques et l'éclairage artificiel. Ces gains internes peuvent être estimés à 100 [Wh/m<sup>2</sup> jour] : Q<sub>i</sub> = 100/24 = 4.16 [W/m<sup>2</sup> jour]

## Gains solaires

Des gains de chauffage viennent de l'extérieur par le rayonnement solaire sur les surfaces vitrées. Les logements ne comportent pas de chauffage ni de climatisation (systèmes actifs), réguler la température intérieure du logement en profitant des gains solaires ou au contraire s'en protéger pour limiter la surchauffe est fondamental.

$$\text{Formule : } Q_s = I_{inc} \times a \times g \times R_e / R_{tot}$$

I<sub>inc</sub> : éclairement énergétique de l'absorbeur [W/m<sup>2</sup>]

a : coefficient d'absorption de l'absorbeur

g : transmission énergétique du vitrage

R<sup>ext/int</sup> : résistance thermique ext/int [W/m<sup>2</sup>K]

R<sub>tot</sub> : résistance thermique totale [W/m<sup>2</sup>K]

## Pertes thermiques par transmission et par ventilation

Formules : Flux de chaleur spécifique de l'intérieur vers l'extérieur pour une paroi : J<sub>s,i>e</sub> = U Δθ

Matériaux	unité	adobe	bois	isolant	plâtre	enduit terre-paille
d	m	0.4	0.02	0.08	0.02	0.05
λ	W/mK	0.5	0.1	0.04	0.25	0.17
Cp	J/kg	850				
ρ	kg/m <sup>3</sup>	1500				

$$R_{tot} = 1/h_{int} + \Sigma R + 1/h_{ext}$$

$$U = 1/R_{tot}$$

$$U_{mur \text{ en terre}} = 1.03 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$U_{paroi \text{ en bois}} = 0.4 \text{ [W/m}^2\text{K]} \ll 0.7 \text{ (24\% d'ouverture)}$$

Ajout d'un enduit terre-paille (5cm) sur le mur en terre pour diminuer la conductance de celui-ci : U<sub>mur en terre enduit</sub> = 0.74 [W/m<sup>2</sup>K] < 0.8

Perte thermique par ventilation : A x q x Δθ

A : coefficient A = 0.34 pour l'air

q : débit de l'air [m<sup>3</sup>/h]

## La terre crue et les caractéristiques thermiques

### Inertie thermique:

La terre crue possède une inertie thermique reconnue, mais sa capacité thermique est plus faible que celle d'un béton plein.

À volume égal  $C_{p, \text{adobe}} = 380$  [Wh/m³K] et  $C_{p, \text{béton}} = 590$  [Wh/m³K]

Mais il faut prendre en compte que la mise en oeuvre de la terre en adobe est un mur massif de 40cm ou plus, donc possède un volume de stockage plus grand.

### Conduction thermique:

Par contre comme la terre est moins dense (variation selon la mise en oeuvre), le  $\lambda$  de la terre est plus faible que celui du béton.

$\lambda_{\text{adobe}} \approx 0,45 - 0,8$  et  $\lambda_{\text{béton}} \approx 1,7$

### Diffusivité thermique:

«Avec une chaleur volumique moins élevée que pour d'autres matériaux lourds, la capacité de stockage de la terre - logiquement amoindrie - demeure excellente. La terre bénéficie d'une inertie latente liée à sa capacité d'absorption. La lenteur de la migration d'eau dans les murs de terre améliore la capacité de stockage pour les cycles longs (annuels).» (Traité de construction en terre, CRAterre, 2006, p.157)

Ainsi la terre crée un déphasage important, sa faible diffusivité amorti les variations de température externe.

## Humidité

À Marrakech l'humidité relative est entre 47% (hivers) et 71% (été).

Les murs massifs en terre crue «respirent», ils absorbent et rejettent l'humidité. Il est important de ne pas bloquer l'humidité dans le mur par l'utilisation d'un matériau complètement étanche tel qu'un enduit au ciment ou un isolant.

La terre crue régule l'humidité relative intérieure à HR = 50%

## Ventilation

Il y a deux principes qui permettent de ventiler naturellement : l'effet du vent et l'effet thermosiphon.

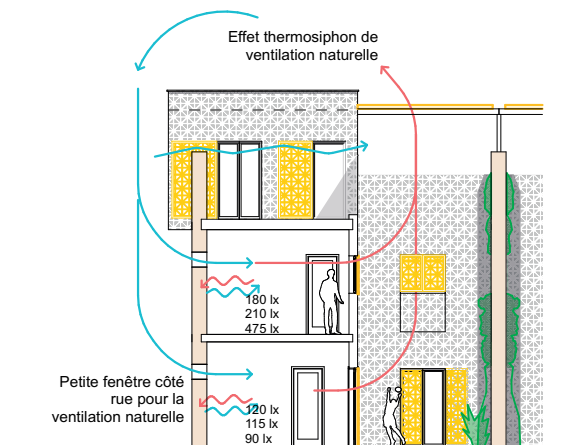
### Effet du vent :

ventilation traversante par ouvertures opposées, lorsqu'il y a une différence de pression entre deux zones.



### Effet thermosiphon :

Ventilation par effet de cheminée, du bas vers le haut, lorsque la température intérieure est plus élevée que la température extérieure. Le mouvement de l'air suit une boucle.



Le vent souffle majoritairement de l'ouest, ou de l'est en hiver. L'orientation des façades sur rue à l'est ou à l'ouest est idéal pour une bonne ventilation naturelle. Le patio permet également une ventilation par effet thermosiphon, cet espace est ventilé et peu ensoleillé, ainsi il reste frais.

Positionner les rues étroites perpendiculaires au vent permet d'éviter que celui-ci s'engouffre dans les ruelles et crée de fortes perturbations. La rue parallèle traversant le quartier est bien plus large (8m) ce qui ne pose pas ce type de problème.

## Récupération de l'eau de pluie?

- Le logement comporte :  
2 toiture terrasse : 11 m<sup>2</sup> et 14 m<sup>2</sup>  
1 toiture plate : 15 m<sup>2</sup>
- Marrakech a un climat sec : 30mm maximum cumulé sur un mois
- L'eau ne peut pas être récupérée en toiture accessible.
- Taux de récupération de l'eau de pluie des toitures plates :  
70 à 80 % (toit en pente 80 à 95%).
- Contexte urbain poussiéreux et pollué

D'après ces critères, la récupération d'eau de pluie possible est faible et donc pas intéressante dans ce projet.

## Acoustique

### Protection acoustique des bruits extérieurs

Les murs périphériques des logements sont construits en adobe de 40cm d'épaisseur. Ils constituent une enveloppe épaisse et massive qui est idéale pour une bonne isolation phonique. De plus les logements ne sont pas directement au bord des axes de circulation principaux, des commerces font écran au nord et un bâtiment public à l'ouest.

Les logements doivent être protégés des bruits ambiants notamment ceux de la circulation sur le boulevard Anakhil au nord de la parcelle et sur la route à l'ouest. Bruit émis par la route estimé à 80[dB]. Isolation également du voisinage, nuisances sonores plus faibles estimées à 58[dB].

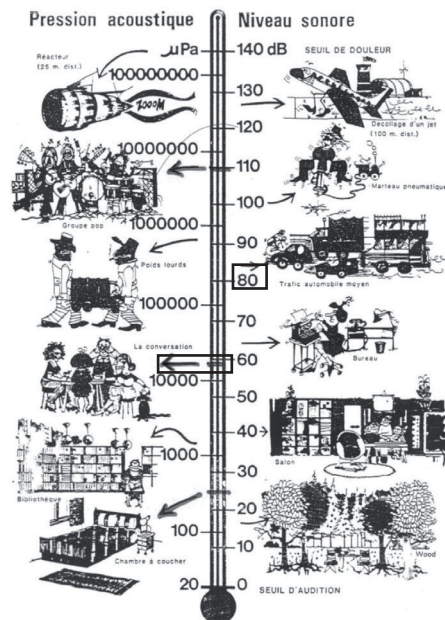


Tableau 3 Exigences minimales pour la protection contre le bruit aérien extérieur

Degré de nuisance	Nuisances dues au bruit extérieur			
	faible à modéré		important à très fort	
Situation du récepteur	à l'écart de voies de communication, pas d'exploitations gênantes		dans le domaine de voies de communication ou d'exploitations gênantes	
Période d'évaluation	Jour	Nuit	Jour	Nuit
Niveau d'évaluation dB(A)	$L_r \leq 60$	$L_r \leq 52$	$L_r > 60$	$L_r > 52$
Sensibilité au bruit	Valeurs d'exigences $D_e$			
faible	22 dB	22 dB	$L_r - 38$ dB	$L_r - 30$ dB
moyenne	27 dB	27 dB	$L_r - 33$ dB	$L_r - 25$ dB
élevée	32 dB	32 dB	$L_r - 28$ dB	$L_r - 20$ dB

Source: Norme SIA 181:2006-C1, correction de 2007

La sensibilité au bruit pour du logement est moyenne. Selon l'exigence de protection contre le bruit aérien : SIA 181:2006-C1  $D_e = 80-33 = 47$ [dB], l'isolation acoustique nécessaire pour la protection des bruits provenant de la route est donc :  $D_{nt,w} = 47$  [dB].

Et pour les bruits de voisinage,  $D_e = 27$  [dB]

Il faut définir les matériaux de façade qui permettent d'obtenir un indice d'affaiblissement acoustique pondéré plus grand ou égal à :  $R'w = D_{nt,w} + C = 47 + 0 = 47$  [dB]

C : Facteur de correction  $C = 0$  pour des petits volumes

$D_{nt,w}$  : Isolation acoustique nécessaire [dB]

Mur en adobe 40cm :  $R'w = 50$  [dB] > 47 [dB] => Bon (source : CRATerre)

Mur isolé en structure bois 16cm :  $R'w = 59$  [dB] > 27 [dB] => Bon (exemple avec un isolant laine de verre)

## Solaire actif

Marrakech profitant d'une grande période d'ensoleillement, il est judicieux d'en tirer profit pour produire de l'eau chaude sanitaire et de l'électricité pour subvenir à une partie des besoins du ménage.

La consommation d'électricité moyenne d'un ménage au Maroc est de 1262 kWh (2011)\*. En considérant plus précisément la consommation d'un logement 4 pièces, on peut estimer la consommation d'électricité (sans ECS) du logement à 2500 kWh\*\*.

Le besoin en eau chaude sanitaire est de 50 l/pers par jour, ainsi pour un ménage de 5 personnes en moyenne, il s'élève à 250 l/jour.

	Électricité	ECS
Besoins ménage (x101)	2500 [kWh] (= 252'500 [kWh])	250 [l/jour]
Besoins pavillon (300 [m <sup>2</sup> ])	60 [kWh/m <sup>2</sup> ] = 18'000 [kWh]	
Besoins commerces (350 [m <sup>2</sup> ])	10 [kWh/m <sup>2</sup> ] = 3500 [kWh]	
<b>TOTAL</b>	<b>274'000 [kWh]</b>	
Objectifs	100%	80%
Surfaces nécessaires	274'000/312[kWh/m <sup>2</sup> ] = 878,2 [m <sup>2</sup> ]	4 [m <sup>2</sup> ]

\*Source: Analyse des indicateurs énergétiques. Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, 2013

\*\*[www.energie-environnement.ch/economiser-l-electricite/situer-sa-consommation-d-electricite](http://www.energie-environnement.ch/economiser-l-electricite/situer-sa-consommation-d-electricite)

### Étude pour l'emplacement des panneaux solaires

Position	Surface disponible [m <sup>2</sup> ]	Irradiation globale [kWh/m <sup>2</sup> ] (année)	Exposition	Irradiation captée [kWh] (année)
Toiture 0°	15	2080	Pas d'ombrage extérieur	31'200
<b>Toiture 15°</b>	“	<b>2250</b>	“	<b>33'750</b>
Toiture 30°	“	2330	“	34'950
Façade sud	9	1380	Partiellement ombragé en hiver	12'420
Façade est	13	955	Ensoleillée jusqu'à midi	12'428
Façade ouest	15	1180	Ensoleillée après midi	17'700
<b>Toiture parking 0°</b>	<b>684</b>	<b>2080</b>	<b>Pas d'ombrage extérieur</b>	<b>1'422'720</b>
<b>Toiture pavillon 0°</b>	<b>270</b>	<b>2080</b>	“	<b>561'600</b>

### ECS:

Petite surface de production + circuit court idéal. Donc production individuelle en toiture de chaque logement.

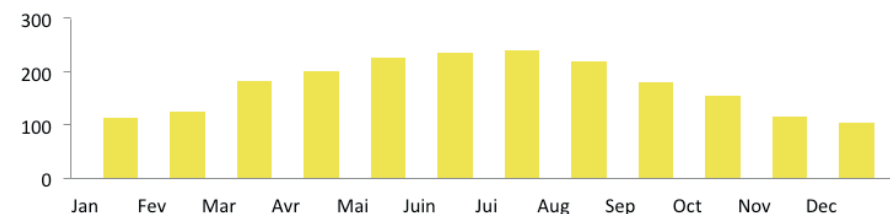
### PV:

Grande surface ensoleillée nécessaire + s'équilibre en fonctionnant avec le réseau. Donc production groupée sur les grandes toitures des bâtiments publics. De plus ça permet de regrouper les infrastructures techniques nécessaires à la production d'électricité et de diminuer leur nombre.

Type de panneau	Position	Nb de panneaux	Dimension [mm]	Irradiation globale [kWh/m <sup>2</sup> ]	Production [kWh]*
PV	Toiture 0° parking	342	100 x 200	2080	312 [kWh/m <sup>2</sup> ] = 213'408 [kWh]
PV	Toiture 0° pavillon	135	100 x 200	2080	312 [kWh/m <sup>2</sup> ] = 84'240
Thermique: thermosiphon	Toiture 10° logement	2	100 x 200	2210	-

\*Rendement des panneaux photovoltaïque estimé à 15%







### Irradiation globale [kWh/m<sup>2</sup>]



Source : Pvgis : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr>

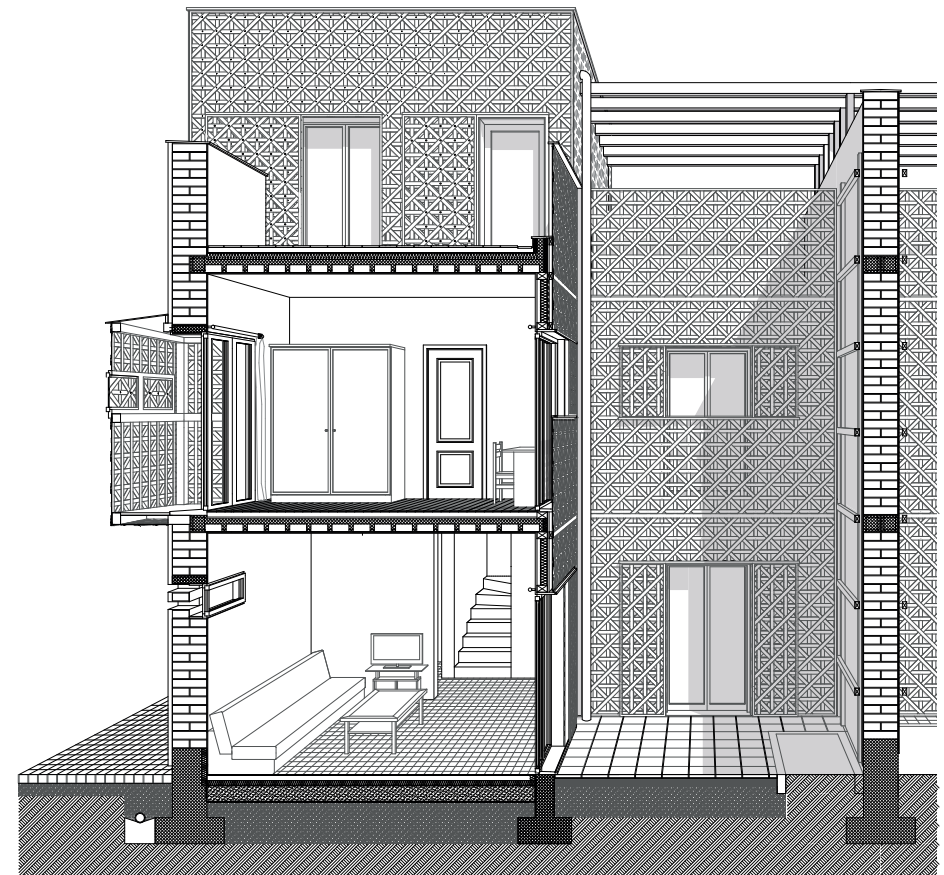
## Végétation

La végétation apporte de la fraîcheur dans les espaces extérieurs, elle peut également faire écran contre le soleil en recouvrant une façade.

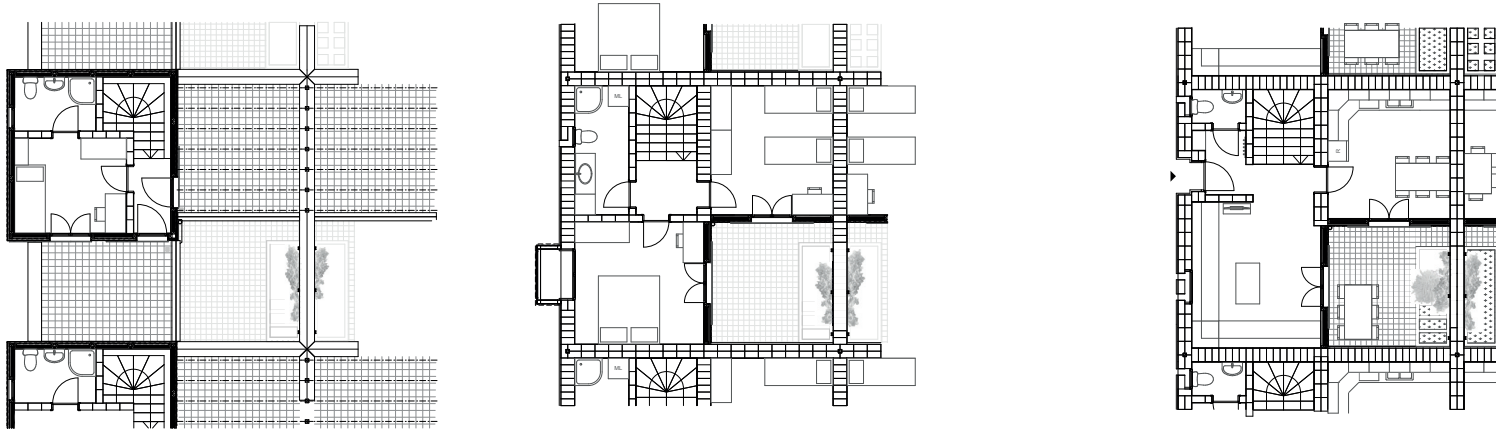
Arbres	Feuillage	Hauteur à maturité
Olivier 	persistant	2 à 10m voir +
Oranger et citronnier 	persistant	1 à 10m
Palmier 	persistant	> 10m
Plantes grimpantes	Feuillage	Hauteur à maturité
Vigne 	caduc	1.5 à 5m
Bougainvillier 	Semi-persistant	0.45 à 10m
Bignone (rose) 	Semi-persistant	1.50 à 10m

Les patios ont une surface de 13 m<sup>2</sup>, la végétation ne peut pas être très grande au risque d'avoir un ombrage trop prononcé qui restreindrait la lumière. Une plante grimpante est une bonne alternative aux arbres. Plaquée en façade, elle occupe moins de place au sol, mais offre un cadre végétal tout aussi important. Une plante au feuillage caduc serait idéale, ainsi il n'y aurait pas d'ombrage en hivers et la luminosité dans le patio ne serait pas restreinte par la plante, car le mur serait à nu. La vigne est un exemple répondant à ces critères.

## PROJET







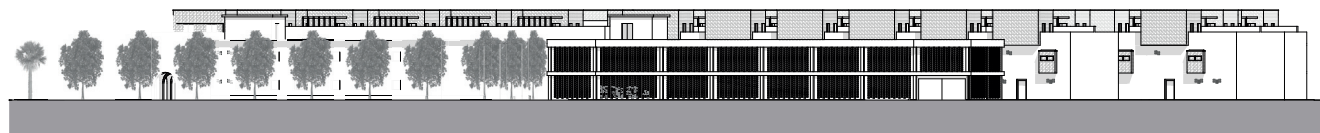
Plans du logement de base



Coupe ouest-est



Coupe sud-nord



Façade ouest

# Bibliographie

GUILLAUD, Hubert et Hugo HOUBEN, CRAterre. *Traité de construction en terre*. 3e éd. Marseille: Parenthèses Editions, 2006,

*RPCT 2011: Du règlement parasismique des constructions en terre*. Disponible sur : <http://adala.justice.gov.ma/production/html/Fr/185543.htm>

CRAterre, *Marrakech 87 habitat en terre*. Edition CRAterre, Grenoble, France, 1987

Agence Nationale pour le Développement des Énergies Renouvelables et de l'Éfficacité Énergétique, *Règlement thermique de la construction au Maroc (RTCM)*. Disponible sur : <http://www.amee.ma/index.php/fr/publicationsetmedias/publications>

Minister de l'Habitat et de la Politique de la Ville, *Cahier des charges des prescriptions minimales architecturales et techniques relatives au logement destiné à la classe moyenne*. Disponible sur : [http://www.mhvp.gov.ma/?page\\_id=109](http://www.mhvp.gov.ma/?page_id=109)

FERNADEZ Pierre et Pierre LAVIGNE. *Concevoir des bâtiments bioclimatiques fondements et méthodes*. Éditions du Moniteur, Paris, 2009

cours de physique du bâtiment I à VI, EPFL

Pvgis : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr>



Critères de confort	Caractéristiques locales	Principes	Appliqués au modèle de base	Remarques	Proposition d'amélioration	Modèle optimisé	
<b>Lumière naturelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le soleil est haut et proche de la verticale en été (79°)</li> <li>- En hivers il n'y a pas d'ensoleillement direct dans le patio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le rayonnement du soleil direct est une source d'éblouissement</li> <li>- C'est la lumière zénithale qui apporte la lumière naturelle (Attention au brise soleil horizontal)</li> <li>- C'est la partie haute de la fenêtre qui apporte la lumière le plus efficacement (vers le fond de la pièce). Augmenter la dimension d'une fenêtre vers le bas n'est pas intéressant.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- La diminution du patio de 20m<sup>2</sup> à 13m<sup>2</sup> réduit l'ensoleillement, ainsi que la lumière naturelle.</li> <li>- Il faut faire des compromis entre protection contre la surchauffe et l'éclairage naturel.</li> </ul> <p><i>Étude en maquette</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traiter la couleur des façades du patio et laisser le revêtement intérieur blanc pour optimiser la réflexion de la lumière dans les pièces</li> <li>- Positionnement des fenêtres au centre de la pièce pour bénéficier au mieux de l'apport lumineux</li> <li>- Agrandir la surface d'ouverture à peu d'influence sur la lumière naturelle.</li> </ul>		
<b>Gains solaires</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marrakech a un climat contrasté souffrant du froid l'hiver (sans descendre en dessous de 0°C) et de la chaleur l'été</li> <li>- Les mois de janvier et décembre sont les plus froids: entre 1 et 20°C</li> <li>- De juin à septembre, c'est de la chaleur dont il faut se protéger, les températures variant de 17°C à 38°C en moyenne et dépassant les 40°C lors des jours spécialement chauds</li> </ul>		<p>Hiver</p> <p>Equinoxes</p> <p>Été</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La façade sud dans le patio ne reçoit pas de soleil durant les mois froids (décembre et janvier). Par contre le soleil étant rapidement haut, il faut tout de même prévoir une protection pour les mois chauds.</li> <li>- R+2 est très exposé au soleil, il faut prévoir une protection durant les mois chauds.</li> <li>- Emplacement idéal pour des panneaux solaire en toiture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ajout de volet brise-soleil</li> <li>- Protection sur la toiture terrasse est/ouest qui n'est pas ombragée afin de protéger la façade est/ouest: pergola avec végétation ou toile tendue.</li> <li>- Couleur du revêtement de façade: clair, pour limiter l'absorption de chaleur</li> <li>- Végétation grimpante pour apporter de la fraîcheur dans le patio</li> </ul>		
<b>Pertes thermiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les constructions actuelles ne sont pour la plupart pas isolées.</li> <li>- Un règlement thermique pour la construction au Maroc (RTCM) a été mis en place en 2013.</li> </ul>	<p>RTCM:</p> <p>Umur (ouverture ≤ 15%) ≤ 0.8</p> <p>Umur (ouverture 16 - 25%) ≤ 0.7</p> $U = 1 / (1/h_i + \sum d/\lambda + 1/h_{ext})$	<p>Mur isolé en bois (12cm de liège) U = 0.29 W/m<sup>2</sup>K</p> <p>Adobe 40cm U = 1.03 W/m<sup>2</sup>K</p>	<p>Le mur en isolé en bois à une conductance satisfaisante, par contre celui constitué uniquement d'adobe ne remplit pas les conditions du règlement thermique pour la construction au Maroc :</p> <p>Isoler un mur massif en terre empêche les transferts d'humidité au travers du mur et diminue, voir rend nul l'utilisation de l'inertie thermique.</p>	<p>Mur isolé en bois</p> <p>Réduction de l'épaisseur de l'isolation à 8cm</p> <p>Mur en terre</p> <p>Ajout d'un enduit "isolant" terre paille de 5cm à l'extérieur</p> $\lambda = 0.17 \text{ W/mK}$	<p>Mur isolé en bois (8cm de liège) U = 0.4 W/m<sup>2</sup>K</p> <p>Adobe 40cm + enduit "isolant" 5cm U = 0.74 W/m<sup>2</sup>K</p>	
<b>Inertie thermique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La terre crue possède une capacité thermique plus faible que celle de la pierre ou du béton. À volume égal:</li> <li>- C<sub>p, adobe</sub> = 380 [Wh/m<sup>3</sup>K] et C<sub>p, béton</sub> = 590 [Wh/m<sup>3</sup>K]</li> <li>- Mais le mur en terre est plus volumineux: 40cm massif</li> </ul> <p>Coefficient de déphasage (mur de 40 cm) : 10 à 12h</p> <p>Source: CRAterre</p>	<p>Le confort thermique s'obtient en régulant les différences de températures : Δθ</p> <p>Comme la température extérieure est oscillante sur une période de 24h, il faut pouvoir stocker la chaleur ou la fraîcheur pour atténuer les changements de la température intérieure.</p> <p>L'inertie thermique intervient pour stocker les gains et les diffuser plus lentement.</p>					
<b>Ventilation naturelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le vent vient majoritairement de l'Est ou de l'ouest</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Effet du vent</li> <li>- Effet thermosiphon</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le patio permet un effet thermosiphon, il faut prévoir les entrées d'air côté rue.</li> <li>- Pour augmenter le débit d'air, il faut avoir une entrée d'air plus petite que la sortie et que cette dernière soit le plus proche de la forme carrée.</li> <li>- L'orientation des façades en est - ouest est idéale par rapport à la direction du vent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prévoir des ouvertures sur la rue pour avoir une ventilation de la rue au patio par effet thermosiphon.</li> <li>- Le deuxième étage est ventilé par effet du vent avec des ouvertures traversantes</li> </ul>		
<b>Acoustique</b>	<p>Nuisance due au contexte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Boulevard à double voies au nord</li> <li>- Routes</li> <li>- Isolation du voisinage</li> </ul>	<p>La sensibilité au bruit pour du logement est moyenne. Selon l'exigence de protection contre le bruit aérien :</p> <p>SIA 181:2006-C1, D<sub>e</sub> = 40[dB],</p> <p>l'isolation acoustique nécessaire est donc : D<sub>nt,w</sub> = 40 [dB].</p>	<p>60 dB</p> <p>Mur en adobe 40cm : R'<sub>w</sub> = 50 [dB] &gt; 40 [dB] =&gt; Bon</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les murs périphériques sont en terre crue massive: 40cm d'adobe. Ce qui assure une bonne isolation acoustique de l'extérieur</li> <li>- Prévoir une isolation acoustique pour le deuxième étage qui n'est pas en terre !</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Murs et toiture du deuxième étage: le liège comme isolant thermique est également efficace comme isolation acoustique.</li> </ul>		
<b>Hygrométrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Humidité relative entre 47% (hivers) et 71% (été)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les murs massifs en terre crue "respirent", ils absorbent et rejettent l'humidité. Il est important de ne pas bloquer l'humidité dans le mur par l'utilisation d'un matériau complètement étanche.</li> <li>- La terre crue régule l'humidité relative intérieure à HR ≈ 50%</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Choix d'un enduit isolant terre-paille pour conserver les qualités hygrométriques de la terre crue.</li> </ul>		
<b>Habitabilité</b>	<p>Confort moderne</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Raccord aux réseaux</li> <li>- Mobilier moderne (notamment modules de cuisine)</li> <li>- Surfaces adéquates au mode de vie actuel</li> <li>- Circulation intérieure</li> <li>- Accès voiture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Logement de classe moyenne: entre 80 et 150m<sup>2</sup> : 3 chambres, une cuisine et un salon</li> </ul>		<p>Le plan initial donne de grands appartements avec 4 chambres en R+1. Avec les surfaces suivantes:</p> <p>R+1 : 150 m<sup>2</sup></p> <p>R+2 : 175 m<sup>2</sup></p> <p>C'est au dessus des surfaces recherchées pour la classe moyenne : 80 à 150 m<sup>2</sup></p>	<p>Réduction de l'occupation au sol à 8 x 8 mètres. Pour avoir les surfaces suivantes:</p> <p>R+2 : 117 m<sup>2</sup> ou 132 m<sup>2</sup></p>		