

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ MENTOURI. CONSTANTINE.
Faculté des Sciences de la Terre de Géographie et de l'Aménagement du Territoire
Département d'Architecture et d'Urbanisme

N° d'ordre

Série.....

MEMOIRE

POUR L' OBTENTION DU DIPLÔME DE MAGISTERE

OPTION : ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

Présenté par : M^r. BOUMAUCHE NASR-EDDINE

THEME

**PRISE EN COMPTE DE L' HUMIDITE DANS LE PROJET DE
REHABILITATION DES MAISONS VERNACULAIRES
CAS DE LA MEDINA DE CONSTANTINE**

Sous la direction de Mme.Y. BOUCHAHM..... Maître de conférence

Jury d'examen :

Soutenu le.....

Président : M^r : **T. SAHNOUN**, Professeur, Université Mentouri. Constantine.

Encadreur : M^{me} : **Y. BOUCHAHM**, Maître de conférence, Université Mentouri. Constantine.

Examinateur M^{me} : **F. BOURBIA**, Maître de conférence, Université Mentouri. Constantine

Examinateur M^{me} : **S. ABDOU**, Maître de conférence, Université Mentouri. Constantine



Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes parents : Fatma, Fatima et Lamri,

À qui je dois énormément de choses. Qu'ils trouvent à travers ce mémoire un humble témoignage de reconnaissance pour leurs encouragements, leurs compréhensions et profondes préoccupations.

A ma femme : Nadia,

En reconnaissance de son soutien et surtout de sa patience et immense compréhension.

A ma chère enfant : Soundous,

Avec toute mon affection.

A mes frères et sœurs : Mohamed Larbi, Mourad et Souad,

Pour leurs aides et encouragements.

A tous mes amis et collègues, notamment Bencheikh-Lefgoun Farid.

Pour ses sincères amitiés.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance et tous mes remerciements à mon encadreur le Dr : Mme Bouchahm, Benamara Yasmina pour son suivi, sa disponibilité et ses orientations.

Je remercie chaleureusement et avec toute gratitude, mon ami, Mr Berrehal Moussa, professeur au département de génie climatique pour sa disponibilité et son aide si précieuse qui m'a permis de mener à terme cette modeste recherche.

Mes vifs remerciements à tous mes collègues de la cellule de réhabilitation et de sauvegarde de la vieille ville de Constantine qui m'ont aidé lors des campagnes d'investigations et surtout au moment du relevé architectural de la maison prototype. En particulier, à Mme Houari souad, Mme Benahcen Radia et Melle Souheila.

Je remercie également le personnel de la station de météorologie de Constantine pour leur aide en matériel (thermographe et hydrographe) et les informations relatives aux données météorologiques qui m'ont été fournies.

Je remercie les familles de la maison « testée » qui ont accepté et participé aux relevés des mesures des températures et des humidités relatives pendant deux périodes : été 2004 et hiver 2005.

Mes remerciements sont adressés aussi à : Mr Mazouz Said, docteur (université de Biskra), Mr Bendakir Mahmoud professeur chercheur au laboratoire : Cra-terre (université de Grenoble), Mr Tancredi charutio professeur à l'université de la sapienza (Rome Italie), Mme Antonella Docci, architecte restaurateur (Sapienza). Aux professeurs de l'université Romatré (Italie), notamment : le professeur carlo severati et Melle alessandra Fianza, et à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé :

L'équilibre recherché entre confort thermique, confort visuel et coût global est devenu l'équation à résoudre pour tout projet contemporain. Cet équilibre doit être préservé lors d'une réhabilitation, et si possible avec plus d'enthousiasme quant il s'agit d'un patrimoine menacé de pathologies graves.

L'examen de l'architecture vernaculaire, nous permet d'en tirer des leçons : nous découvrons un savoir faire, un style, une méthodologie d'approche, bref. Une harmonie qui règne entre l'homme, la nature et sa culture.

Il semble que la préoccupation majeure de certains concepteurs de projets d'interventions sur le bâti ancien, déjà entrepris dans le cadre des opérations de réhabilitations dans la ville de Constantine est consacrée vers la consolidation de la structure portante et l'étanchéité de l'enveloppe, alors que les problèmes de condensations et d'humidité ascensionnelles n'ont jamais été abordés.

La présente étude s'intéresse au phénomène de l'humidité qui apparaît dans l'habitation vernaculaire à Constantine. L'objectif est d'intégrer, cet important paramètre climatique dans le projet de réhabilitation des bâtiments anciens. Étant considéré, d'une part, comme l'ennemi numéro un (01) de la construction. Et d'autre part, il constitue un facteur déterminant du confort humain.

L'analyse statistique, quantitative et bioclimatique du climat de la ville de Constantine a permis de déterminer les caractéristiques climatiques de la ville et de définir la saison humide et froide qui influe directement sur l'ambiance thermique et hygrométrique intérieure. Et puis d'évaluer les besoins de confort physiologique. Il s'avère que le climat de Constantine est « semi-aride » et au même temps contrasté, caractérisé par un hiver froid et humide et un été chaud et sec.

L'analyse qualitative a révélé d'une part, la relation forte qui existe entre la construction vernaculaire et le climat, et d'autre part les mœurs et pratiques socioculturels. cette approche a permis de mettre en évidence certaines contraintes climatiques, eu égard aux caractéristiques morphologiques, spatiales et organisationnelles

Les campagnes d'investigations établies pendant les deux périodes : été 2004 et hiver 2005 ont révélé qu'il existe effectivement, des risques de condensation superficielle et interstitielle des murs extérieurs et quelques murs intérieurs. Les mesures hygrométriques ont confirmé aussi, que le taux d'humidité de l'air à l'intérieur de la chambre testée est trop élevé et qui peuvent atteindre 95 %. Ces résultats sont perceptibles uniquement en période hivernale.

L'assainissement des parois envahis par l'humidité de condensations peut s'opérer par des procédés très simple. Ils consistent en l'addition de couches de matériaux, sélectionnées selon leurs caractéristiques thermo-physiques, en vue d'améliorer la résistance thermique et/ou hygrométrique des parois. Une simulation a été effectuée à l'aide d'un modeste programme informatique, conçu par l'auteur. Celle-ci a contribué positivement à la recherche d'une meilleure performance thermique et hygrométrique des parois pour lutter contre les formes de condensations.

La ventilation naturelle notamment la «ventilation transversale» revêt une importance capitale dans l'amélioration du confort intérieur par le renouvellement d'air neuf, afin d'assurer une bonne qualité de l'air, en évacuant l'excès d'humidité, les odeurs et également éviter les risques de condensations. La ventilation "sanitaire" ou "hygiénique" doit être permanente: exigée en hiver comme en été et doit être assurée sous toutes les conditions climatiques. Dans le cas où il est difficile de l'obtenir au moyen d'une ventilation transversale. Ceci peut être concrétisé à l'aide de procédés passifs, comme celui adopté dans le cas de cette étude : Il s'agit d'une cheminée à tirage naturelle ou thermique.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Table des matières.....	V
Liste des figures	X
Liste des tableaux.....	XVIII
Nomenclature	XX

Chapitre 1. Introduction Générale

1.1 Introduction.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Méthodologie de recherche.....	8

Chapitre 2. Climat et Confort

2.1 Introduction.....	9
2.2 Définition du climat	10
2.3 Facteurs déterminant le climat.....	10
2.3.1 La latitude et l'altitude.....	10
2.3.2 L'éloignement de la mer.....	11
2.4 Les climats dans le monde.....	11
2.5 Les éléments climatiques.....	12
2.5.1 la température de l'air	12
2.5.2 l'humidité de l'air.....	13
2.5.3 Le vent.....	14
2.5.4 Les précipitations.....	15
2.5.5 Les rayonnements solaires.....	15
2.5.6 La pression.....	16
2.6 Les indices climatiques.....	18
2.6.1 indices climatiques globaux.....	18
2.6.2 indices climatiques de production.....	19
2.7 les échelles du climat.....	19
2.8 le climat en Algérie.....	20
2.9 Le climat à Constantine.....	21
2.9.1 introduction.....	21
2.9.2 Analyse quantitative du climat de Constantine.....	22
2.9.3 Calcul de l'indice d'aridité.....	25
2.10 Notion de confort thermique dans les habitation	26
2.10.1 Métabolisme de l'organisme humain.....	26
2.11 Conditions de confort.....	29
2.12 Outils d'aides à la conception architecturale bioclimatique.....	31
2.12.1 diagramme bioclimatique de V.Olgay.....	31
2.12.2 diagramme bioclimatique de B.Givoni.....	32
2.12.3 diagramme bioclimatique de S.zokolay.....	33
2.12.4 les tableaux d'analyse bioclimatique de Mahoney.....	35

2.13	Analyse bioclimatique de la ville de Constantine.....	36
2.13.1	Méthode de B.Givoni.....	36
2.13.2	Méthode de S.zokolay.....	37
2.13.3	Méthode de Mahoney.....	37
2.14	Conclusion.....	39

Chapitre 3. Humidité

3.1	Introduction.....	40
3.2	Définition.....	40
3.3	Les différentes type de l'humidité et leurs caractéristique.....	42
3.3.1	Types d'humidité.....	42
3.3.2	Symptômes et sources d'humidité.....	45
3.3.3	Répartition de l'humidité dans les ouvrages.....	49
3.3.4	Caractéristiques de l'humidité dans les constructions anciennes.....	50
3.4	Le phénomène de la capillarité dans les matériaux de construction.....	54
3.4.1	Hauteur de progression de l'humidité.....	57
3.5	L'humidité et ses nuisances.....	61
3.5.1	Effet de l'humidité sur les constructions.....	61
3.5.2	Effet de l'humidité sur la santé de l'homme.....	61
3.5.3	Effet de l'humidité sur les matériaux de construction.....	63
3.5.4	Les efflorescences.....	65
3.5.5	Effet de la apillarité.....	66
3.6	Insalubrité des locaux et condition d'habitabilité.....	67
3.6.1	L'humidité et le comportement des matériaux de construction.....	67
3.6.2	Classification des matériaux.....	68
3.6.3	Séchage des matériaux.....	73
3.6.4	Evaporation des matériaux humides.....	74
3.6.5	Seuil d'insalubrité de l'humidité de l'air.....	77
3.6.6	Taux maximum tolérable des murs.....	78
3.7	Jugement d'habitabilité.....	79
3.8	Conclusion.....	83

Chapitre 4. Réhabilitation

4.1	Introduction.....	84
4.2	Objectifs de la réhabilitation.....	85
4.3	Enjeux de la réhabilitation.....	85
4.4	Reconsidérer une architecture existante.....	86
4.5	Le projet de réhabilitation.....	86
4.5.1	Le diagnostic préalable.....	87
4.5.2	Les relevés.....	87
4.5.3	La conception d'un projet de réhabilitation.....	87
4.6	Techniques de lutte contre l'humidité.....	88
4.6.1	Remède contre l'humidité de condensation.....	89
4.6.2	Remède contre l'humidité ascensionnelle.....	99
4.6.3	Assainissement des sous-sols. Méthodes des « trois maçonneries » et méthode « à sec ».....	109

4.6.4 Techniques utilisés pour camoufler les effets de l'humidité de remonté capillaire sur les murs.....	110
4.7 Remèdes contre l'humidité due à la pluie battante.....	113
4.7.1 Les revêtements de façades	115
4.8 Procèdes destinés à évacuer l'eau qui imprègne les murs.....	116
4.8.1 l'électro-osmose.....	116
4.8.2 l'électro-osmose phorèse.....	116
4.8.3 Siphons atmosphériques de Knapen	118
4.9 Enduits spéciaux.....	119
4.9.1 L'enduit hydrofuge à base de ciment	119
4.9.2 L'enduit hydrofuge à base de chaux.....	120
4.9.3 L'enduit anticondensant.....	120
4.10 Conclusion.....	122

Chapitre 5. Ventilation

5.1 Introduction.....	123
5.2 Le vent	123
5.2.1 Définition.....	123
5.2.2 Le phénomène vent à l'échelle urbain.....	124
5.2.3 Influence des constructions sur les écoulements d'air	126
5.2.4 Les Zones calmes ou abritées.....	130
5.3 Rôle et objectifs de la ventilation.....	131
5.4 Techniques et systèmes de la ventilation naturelle.....	134
5.4.1 Ventilation provoquée par la force du vent.....	134
5.4.2 Ventilation provoquée par la force thermique ou tirage thermique.....	136
5.4.3 Effets combinés.....	138
5.5 Ventilation transversale.....	139
5.6 Contrôle du vent ou de la ventilation.....	140
5.6.1 Influence des aménagements intérieurs sur l'écoulement d'air.....	140
5.6.2 Les déflecteurs d'air.....	142
5.6.3 Les Ouvertures : Emplacements et Usages.....	146
5.7 L'impact de la vitesse de l'air sur le confort intérieur.....	152
5.8 Effet de cheminée.....	153
5.9 La cheminée solaire.....	155
5.10 La ventilation et les solutions traditionnelles.....	157
5.10.1 Le capteur à vent.....	157
5.10.2 Le malkaf traditionnel.....	159
5.10.3 Le mur double ventilé.....	160
5.11 Conclusion.....	161

Chapitre 6. Investigation

6.1 Introduction.....	163
6.2 Choix de la ville.....	163
6.3 Choix de la maison	163
6.3.1 situation.....	163
6.3.2 typologie d'habitation.....	164
6.4 Description de la maison « Dar E' diaf ».....	167

6.4.1 Organisation spatiale.....	167
6.4.2. Matériaux utilisés dans la construction.....	174
6.4.3 Organisation fonctionnelle.....	177
6.5 Analyse morphologique des éléments architecturaux structurant la maison	178
6.5.1 Le patio.....	178
6.5.2 Les ailes du bâtiment.....	178
6.5.3 La galerie.....	178
6.6 Étude de l'enveloppe de la maison.....	179
6.6.1 Texture extérieures.....	179
6.6.2 Texture intérieures.....	179
6.6.3 Toiture.....	180
6.7 Étude d'ensoleillement et de ventilation.....	180
6.7.1 Ensoleillement	180
6.7.2 Étude de la ventilation	183
6.8. Diagnostic.....	185
6.8.1 Méthodes de Mesures de l'humidité.....	186
6.9 Objectif des campagnes de mesures.....	193
6.9.1 Facteurs climatiques mesuré.....	193
6.9.2 Appareils de mesures utilisés.....	194
6.10 Méthode de déroulement des campagnes de mesures.....	195
6.11 Interprétation des résultats des mesures.....	196
6.11.1 Étude comparative de la variation de l'humidité relative et de la température de l'air (Intérieure et extérieure). Période hivernale.....	196
6.11.2 Étude comparative de la variation de l'humidité relative et de la température de l'air (intérieure et extérieure). Période estivale.....	204
6.12. Vérification du risque de la condensation	211
6.13 Illustration des effets de l'humidité.....	221
6.13.1 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité de condensations.....	222
6.13.2 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité de ascensionnelle.....	222
6.13.3 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité d'origine accidentelle	223
6.13.4 Moisissures.....	224
6.14 Conclusion	224

Chapitre 7. Simulation

7.1 Introduction.....	226
7.2 Programme de calcul informatique.....	226
7.2.1 première étape	227
7.2.2 deuxième étape.....	228
7.3 Méthodologie de simulation.....	231
7.4 Méthode mathématique de calcul	232
7.4.1 Test de condensation superficielle.....	232
7.4.2 Test de condensation dans la masse (méthode de Glaser).....	233
7.5 Paramètres de calcul.....	234
7.6 Interprétation des résultats de simulation	235
7.6.1 Tests de condensations effectués sur le mur nord (après modification ou amélioration).....	235
7.6.2 Tests de condensations effectués sur le mur ouest (après correction).....	240
7.7 Diminution du taux hygrométrique de l'air	243

7.7.1 renouvellement de l'air humide et vicié.....	243
7.7.2 dimensionnement de la cheminée de ventilation à tirage thermique.....	244
7.8 Conclusion.....	248

Chapitre 8. Conclusion générale

8.1 Introduction.....	249
8.2 étendue de l'étude	250
8.3 Conclusion et aboutissement aux objectifs.....	250
8.4 Recommandations.....	254
8.5 Suggestions pour des recherches futures.....	256
Références	258
Annexes :	
- annexes (I)	265
- annexes (II)	270
- annexes (III)	276
- annexes (IV)	278

Liste des figures

Chapitre 2

Fig. 2.1 : Classification des climats selon Köppen.....	12
Fig. 2.2 : Évaporation moyenne annuelle (en cm) par latitude.	13
Fig. 2.3 : Subdivision de l'atmosphère.....	13
Fig. 2.4 : Capacité hygrométrique de l'air (à 1015 pa).....	13
Fig. 2.5 : Mouvement verticaux et horizontaux.....	15
Fig. 2.6 : le cycle de l'eau.....	17
Fig. 2.7 : Les rayonnements solaires	17
Fig. 2.8 : carte géographique de l'Algérie.....	21
Fig. 2.9 : position géographique de Constantine.....	22
Fig. 2.10 : températures moyennes mensuelles.....	23
Fig. 2.11 : Humidité relatives moyennes mensuelles.....	23
Fig. 2.12 : précipitations moyennes mensuelles.....	24
Fig. 2.13 : Variation des températures, humidités relatives et précipitations.....	24
Fig. 2.14 : vents moyens mensuels.....	25
Fig. 2.15 : déperdition de l'organisme humain.....	28
Fig. 2.16 : zone de confort en fonction des températures sèches.....	31
Fig. 2.17 : Diagramme d'Olgay.....	32
Fig. 2.18 : Diagramme bioclimatique de B. Givoni.....	34
Fig. 2.19 : Diagramme bioclimatique de S. Szokolay.....	35
Fig. 2.20 : Diagramme bioclimatique de B. Givoni, appliquée à la ville de Constantine.....	36
Fig. 2.21 : Diagramme bioclimatique de S. Szokolay appliquée à la ville de Constantine...	38

Chapitre 3

Fig. 3.1 : Diagramme de Mollier.....	41
Fig. 3-2 : Les différents types d'humidité.....	42
Fig. 3.3 : Remontée capillaire dans une maison vernaculaire à Suika.....	43
Fig.3.4 : Les différentes causes d'humidité.....	43
Fig.3.5 : Infiltration directe par le toit.....	43
Fig.3.6 : Infiltration directe par le mur extérieur dans une Maison vernaculaire à Suika.....	43
Fig.3.7: La condensation superficielle.....	44
Fig.3.8 : Effet de la vapeur de cuisine.....	44
Fig.3.9 : La condensation interne.....	44
Fig.3.10 : débordement d'évier.....	44
Fig.3.11 : Toiture très dégradée.....	44
Fig.3.12 : Érosion.....	45
Fig. 3.13 : Moisissures sur les murs.....	45
Fig.3.14 : Éclatement du mortier après gonflement.....	45
Fig.3.15 : Mouillures.....	45
Fig.3.16 : Remontée capillaire.....	46
Fig.3.17 : Mouillures variables isolée.....	46
Fig.3.18 : détérioration de l'enduit à la limite supérieure de la zone d'imbibition.....	47
Fig.3.19 : Passage couvert : érosion due à la condensation intermittente d'origine Atmosphérique.....	47
Fig.3.20 : Écaillage de la peinture.....	47

Fig.3.21 : Efflorescences.....	48
Fig.3.22 : Zone horizontale humide.....	48
Fig.3.23 : Moisissures sur différentes matières organiques.....	48
Fig.3.24 : Diagramme, établis d'après les types d'humidité, de la distribution de l'eau dans la section horizontale, de la face intérieure à la face extérieure d'un mur dont la capillarité est excellente.....	51
Fig.3.25 : Schéma représentant le sens et la direction de la provenance de l'humidité.....	53
Fig.3.26 : Phénomène de la capillarité.....	54
Fig.3. 27 : Cheminement de l'humidité.....	55
Fig. 3.28 : Rapport entre la hauteur d'affinité et la hauteur du moellon.....	55
Fig. 3.29 : Expérience de Talenti.....	57
Fig. 3.30 : patio étroit.....	58
Fig.3.31 : proportionnalité de l'humidité aux épaisseurs.....	59
Fig.3.32 : Hauteur atteinte par l'humidité dans les murs.....	59
Fig.3.33 : La hauteur de l'humidité est fonction de l'épaisseur du mur et à la ventilation auquel est soumis.....	60
Fig.3.34 : immeuble, quartier Suika.....	61
Fig.3.35 : place, quartier Suika basse.....	61
Fig.3.36 : Détérioration des revêtements intérieurs.....	61
Fig. 3.37 : Champignons.....	61
Fig. 3.38 : Acariens.....	62
Fig.3.39 : Moisissures.....	62
Fig.3.40 : Mur en pierre et en brique.....	63
Fig.3.41 : Mur en pierre calcaire.....	63
Fig.3.42 : Résistance du pin rouge à la force de compression en Fonction de son taux d'humidité.....	64
Fig.3.43 : Moisissure du bois.....	64
Fig.3.44 : Diffusion d'eau en milieu poreux.....	66
Fig.3.45 : expérience, principe de la capillarité.....	66
Fig.3.46 : Porométrie d'un béton.....	66
Fig.3.47 : Expérience d'absorption d'eau et hauteur d'affinité dans la pierre naturelle.....	70
Fig.3.48 : Comportement différent dans le séchage des matériaux.....	73
Fig.3.49 : Diagramme de séchage des matériaux.....	76
Fig.3.50 : Différence de taux d'humidité entre le matériau et son mortier de liaisonnement dans un mur humide.....	78
Fig. 3.51 : Paroi très humide : 17%.....	80
Fig. 3.52 : Paroi moins humide : 4,5 %.....	80

Chapitre 4

Fig. 4.1a : Le vitrage isolant type TPS.....	91
Fig. 4-1b : Comparaison entre le vitrage traditionnel et le type TPS, dans les mêmes conditions de températures.....	92
Fig. 4-2 : condensation dans les bâtiments en béton armé, Pont thermique au niveau de la colonne d'angle.....	92
Fig. 4-3 : Condensation dans la masse.....	94
Fig. 4-4 : Isolation par l'extérieur. Ventilation de la lame d'air.....	94
Fig. 4-5 : Résistance thermique de la lame d'air. Double mur renforcé, comprenant une feuille d'aluminium.....	95

Fig. 4-6 : Protection d'un plancher sur terre-plein contre l'humidité ascensionnelle et de condensation.....	96
Fig. 4-7 : Condensation provoquée.....	98
Fig. 4-8 Les bâtisses situées sur les sommets des collines attaquées par l'humidité s'explique seulement par le phénomène de la condensation tellurique.....	98
Fig. 4-9 : Basilique Saint-Pierre à Rome. Un exemple de l'humidité tellurique par excellence.....	99
Fig. 4-10 : différentes méthodes pour entraver les remontés capillaires. Les deux premiers arrêtent la montée de l'humidité les deux derniers empêchent la pénétration latérale.....	100
Fig. 4-11 : trois types de travaux pour empêcher l'humidité de sortir de la paroi sous forme de vapeur.....	100
Fig. 4-12 : Réduction de la section absorbant.....	101
Fig. 4-13 : expérience sur le comportement des briques ordinaires à section absorbante Réduite.....	101
Fig. 4-14 : méthode appliquée par Koch pour sauver les fresques à St-Louis-des-Français.....	102
Fig. 4-15 : changement de la maçonnerie à la base d'un mur.....	102
Fig. 4-16 : introduction d'une couche horizontale anticapillaire.....	102
Fig. 4-17 : sciage d'un mur par étape.....	102
Fig. 4-18 : introduction d'une résine à la base d'un mur épais.....	103
Fig. 4-19 : saignée réalisée au moyen d'un carottier.....	103
Fig. 4-20 : introduction d'une plaque inoxydable dans un mur à l'aide d'un marteau pneumatique.....	104
Fig. 4-21 : forage de trous dans la maçonnerie. injection de produits imperméabilisants.....	104
Fig. 4-22a : percements de trous obliques.....	105
Fig. 4-22b : percements de trous horizontaux.....	105
Fig. 4-23 : injection de produits.....	105
Fig. 4-24 : travaux d'imperméabilisation.....	105
Fig. 4-25 : injection de produits.....	105
Fig. 4-26 : tranchée ouverte et tranchée fermée.....	106
Fig. 4-27 : tranchée ouverte autour d'une bâtisse.....	106
Fig. 4-28 : pénétration latérale d'eau superficielle.....	106
Fig. 4-29 : la tranchée peut intercepter l'eau perdue.....	106
Fig. 4-30 : la tranchée n'arrête pas les remontées capillaires.....	107
Fig. 4-31 : la partie ensoleillée de la tranchée, reliée à la partie ombrée permet d'activer le tirage thermique.....	107
Fig. 4-32 : les deux types de radiers traditionnels : Protègent contre les remontés capillaires et non contre les condensations.....	108
Fig. 4-33 : planchers efficaces contre les remontés capillaires et les condensations.....	108
Fig. 4-34 : remède par la méthode des trois maçonneries, première combinaison.....	109
Fig. 4-35 : remède par la méthode des trois maçonneries, deuxième combinaison.....	109
Fig. 4-36 : remède par la méthode « à sec ».....	110
Fig. 4-37a : application erronée d'un traitement Imperméable « horizontal ».....	111
Fig. 4-37b : application erronée d'un traitement Imperméable « vertical ».....	111
Fig. 4-38 : trois types de contre-murs corrects.....	112
Fig. 4-39 : contre-mur traditionnel, construit par les Romains.....	112
Fig. 4-40 : exemple de remède efficace appliqué à la Farnesina de Rome.....	113

Fig.4.41 : réparation d'une fenêtre non étanche à l'eau	113
Fig. 4-42 : infiltration d'eau pluviale dans la maçonnerie Ne dépasse pas 5 à 6 cm.....	114
Fig. 4-43 : assèchement du mur après évaporation de la pluie.....	114
Fig. 4-44 : La lame de plomb introduite dans le vide d'air n'a apporté aucun effet la condensation a persisté.....	115
Fig. 4-45 : diagramme du taux d'humidité prouve que l'origine de l'humidité se trouve sur la paroi intérieure.....	115
Fig. 4-46 : phénomène de l'électro-osmose.....	117
Fig. 4-47 : électro-osmose active par interposition d'une source de courant entre la maçonnerie et le terrain.....	117
Fig. 4-48 : schéma d'une installation d'électro-osmose phorèse.....	117
Fig. 4-49 : deux types de siphons atmosphériques.....	118
Fig. 4-50 : le principe sur lequel est basé le fonctionnement des siphons.....	118
Fig. 4-51 : le principe de fonctionnement des siphons.....	118
Fig. 4-52 : enduit absorbant appliqué sur un pare-vapeur, Remède efficace contre la Condensation.....	119

Chapitre 5

Fig. 5-1 : Vitesse du vent.....	124
Fig. 5-2 : Variation de la vitesse du vent en fonction de la rugosité du site.....	125
Fig. 5-3 : Densité élevée d'un tissu ancien /Accidents aérodynamiques au niveau bas de la tour.....	125
Fig. 5-4 : Comportement du vent autour des constructions.....	126
Fig. 5-5 : Effet des obstacles bas (<15 m).....	127
Fig.5-6 : Effet de coin	127
Fig. 5-7 : Effet de venturi.....	127
Fig. 5-8 : Effet de la forme du bâtiment sur l'écoulement d'air.....	128
Fig. 5-9 : Effet de rouleur.....	128
Fig. 5-10 : Effet de sillage.....	128
Fig. 5-11 : courant d'air créé par plusieurs obstacles.....	129
Fig. 5-12 : déviation du vent au dessus des cours ou patios	129
Fig. 5-13 : barrières végétales : Création des pertes de charges	129
Fig. 5-14 : zones calmes créées par l'agencement des bâtiments.....	130
Fig. 5-15 : La porosité urbaine, dont dépend la ventilation à l'intérieure des locaux...	131
Fig. 5-16 : protection contre les vents chauds et canalisation des brises	131
Fig. 5-17 : Longueurs des abris du vent, derrière les constructions, selon la volumétrie....	133
Fig. 5-18 : Zone de haute pression en avant et basse pression en arrière.....	135
Fig. 5-19 : Distribution schématique des pressions autour d'un bâtiment.....	135
Fig.5.20 : tirage thermique. Un excellent système central de ventilation naturelle, constitué par une cage d'escalier ouverte surmontée par un lanterneau et un dispositif d'aération.....	137
Fig. 5-21 : principe de la ventilation naturelle par prises basse et haute.....	137
Fig. 5-22 : répartition du champ de pression autour d'un bâtiment sous l'effet du vent au niveau du sol.....	139
Fig. 5-23 : Ventilation transversale d'une construction	140
Fig.5-24 : Inertie des filets d'air entrant dans une construction à une seule pièce d'épaisseur.....	140

Fig.5-25 : influence d'une dissymétrie sur la direction des filets d'air entrant dans une Construction.....	141
Fig.5-26 : influence d'un auvent sur la direction des filets d'air entrant dans une Construction.....	141
Fig. 5-27 : influence des lames orientables sur la direction des filets d'air.....	142
Fig.5-28 : Résultats d'essais en soufflerie montrant comment le cloisonnement affecte l'écoulement de l'air dans un plan rectangulaire.....	143
Fig. 5-29 : déflecteurs agissant par effet de barrage.....	144
Fig. 5-30 : les saillis en façade augmentent la pression d'air.....	144
Fig. 5-31 : contrôle de la ventilation par un dispositif simple (courant).....	145
Fig. 5-32 : Dispositif architectural créant une ventilation naturelle.....	145
Fig.5-33 : Distribution des vitesses d'air intérieur (en % de la vitesse extérieure) dans des modèles où les rapports de dimensions pour l'entrée et la sortie de l'air sont différents.....	148
Fig. 5-34 : Effet du type de fenêtre sur le contrôle de la ventilation.....	149
Fig.5-35 : Dispositifs de ventilation intégrés qui exploitent la capacité de succion d'un toit à faible pente.....	150
Fig.5-36 : Vitesses d'air intérieure dans des modèles équipés de saillies verticales de différentes profondeurs. Comparées aux vitesses dans des modèles dépourvus de saillies.	151
Fig.5-37 : Influence d'un changement de direction, horizontal et vertical, des filets d'air sur la vitesse.....	152
Fig.5-38 : Schéma illustrant l'influence de la dimension des orifices de sortie sur la vitesse de l'air à l'intérieur d'un local.....	152
Fig. 5-39 : Effet de cheminée, schéma de principe.....	153
Fig. 5-40a : principe de rafraîchissement.....	153
Fig.5-40b : principe de rafraîchissement Principe du puit provençal et de la cheminée Thermique.....	154
Fig.5-41 : ventilation verticale par effet de thermosiphon.....	154
Fig. 5-42 : Effet de cheminée dans un local avec plafond incliné.....	155
Fig.5-43 : trois types de cheminées solaires.....	156
Fig.5-44 : malkaf sculpté sur les tombes Pharaoniques.....	157
Fig.5-45 : malkaf traditionnel (nouvelle école de gourna).....	157
Fig.5-46 : tour à vent multidirectionnelle surmontant les constructions dans les jardins de Dawlat-Abad à Yazd en iran.....	159
Fig. 5-47 : principe de fonctionnement d'une tour de vent.....	160
Fig.5-48 : tour à vent d'une maison à BAM.....	160
Fig. 5-49 : malkaf solaire.....	161
Fig. 5-50 : différends murs ventilés et masques variantes utilisées par A. Ravéreau au M' Zab.....	161
Fig.5-51 : Murs cheminés, façade de l'office « ONERSOL » au Niger.....	161

Chapitre 6

Fig.6-1 : Plan de la médina de Constantine.....	164
Fig.6-2 : Vue panoramique à partir du pont El-Kantara.....	164
Fig.6-3 : Plan de masse.....	165
Fig.6-4 : Grande maison « E'Dar ».....	165

Fig.6-5 : Petite maison « El' Aâly ».....	165
Fig.6-6 : « Dar-Ediaf ».....	166
Fig.6-7 : « El' Aâly » de « Dar-Ediaf ».....	166
Fig.6-8 : homogénéité du tissu de la médina.....	167
Fig.6-9 : 1er corps de bâtiment : la maison El-âaly, surmontant E'dar.....	168
Fig.6-10 : 2eme corps de bâtiment : la grande maison E'dar.....	168
Fig.11 : fontaine dans le patio.....	168
Fig.12 : Colonne en marbre (galerie).....	168
Fig.13 : Slam au 2è niveau.....	168
Fig.6-14 : différents vues en plans de la grande et la petite maison.....	169
Fig.15 : patio ouvert vers le ciel.....	170
Fig.16 : galerie à arcades et colonnades.....	170
Fig.6-17 : impasse Bencheikh el-fegoune, menant à Dar-ediaf.....	170
Fig.6-18 : différence de niveau marquant le seuil de la skiffa.....	170
Fig.6-19 : revêtement mural dégradé (Skifa).....	171
Fig.6-20 : faux plafond dégradé (Skifa).....	171
Fig.6-21 : bit utilisée comme salle de séjour.....	172
Fig.6-22 : bit inoccupée (dégradée).....	172
Fig.6-23 : K'bou, avec coupole.....	172
Fig.6-24 : K'bou, sans coupole.....	172
Fig.6-25 : Maqsura.....	173
Fig.6-26 : Doukana.....	173
Fig.6-27 : construction précaire et illicite (habitée).....	173
Fig.6-28 : Buanderie, transformée en logement.....	173
Fig.6-29 :quelques matériaux utilisés dans la maison « Dar-Ediaf ».....	174
Fig.6-30 : Murs en élévation : épaisseurs variables de 0,40 à 0,80 m.....	175
Fig.6-31 : Toiture inclinée en tuile rouge.....	175
fig.6-32 : structure d'un comble en bois (genévrier).....	175
fig.6-33 : structure d'un plancher en bois (genévrier).....	175
Fig.6-34 : Plancher (haut/bas et terrasse) en bois genévrier (aâraâr).....	176
Fig.6-35 : dimensions des ouvertures.....	177
Fig.6-36 . Galerie étroite.....	179
Fig. 6-37 : Escalier principal assurant la relation verticale entre galeries.....	179
Fig.6-38 : Représentations sur le diagramme solaire : Ombre projeté sur le mur nord de la chambre testée.....	181
fig.6-39 . : ensoleillement au mois de juin hauteur solaire (hs) : 76°.....	182
fig.6-40 : ensoleillement au mois de janvier hauteur: solaire (hs) : 36°.....	182
fig.6-41 : ensoleillement du patio au mois de juin à 12 :00h ; hs : 76°.....	182
fig.6-42 : ensoleillement du patio au mois de juin à 10 :00h ; ; hs : 61° ; azimut : 20° .	182
fig.6-43 : patio totalement ombré au mois de janvier ; hs : 36°.....	183
Fig.6-44 : ensoleillement du patio au mois de juillet à 12 :00h.....	183
Fig.6-45 : écoulement de l'air sur la médina de Constantine.....	184
Fig.6-46 : écoulement de l'air sur le quartier Suika.....	185
Fig.6-47 . L'hygromètre à cheveu.....	188
Fig.6-48 Hygromètre enregistreur (jules richard).....	188
Fig.6-49 . Psychromètre traditionnelle.....	188
Fig.6-50 : principe du psychromètre.....	188

Fig.6-51 : L'hygromètre digital, pour les mesures de l'humidité relative de l'air.....	189
Fig.6-52 : Hygromètre à diffusion.....	189
Fig.6-53 : Hygromètre enregistreur.....	189
Fig.6-54 : échelle de confort.....	190
Fig.6-55 : Appareil de Mesure superficielle: mur	190
Fig.6-56 : Appareil de Mesure superficielle : bois.....	190
Fig.6-57 : dépôt des fragments du matériau (échantillon).....	191
Fig.6-58 . Procédé de dessiccation des échantillons par ventilation.....	192
Fig.6-59 : Four de Massari, Tizzano et Talenti.....	193
Fig.6-60 : emplacement des appareils de mesures à intérieure de la chambre	194
Fig.6-61 : emplacement des appareils de mesures à l'extérieur de la chambre (galerie).	195
Fig.6-62 : Variation de l'humidité relative intérieure (chambre) et extérieure (patio et station météo).....	199
Fig.6-63 : Variation de la température de l'air intérieure (chambre) et les températures extérieure (Patio et station météo).....	201
Fig.6-64 : écart de la température horaire.....	201
Fig.6-65 : diagramme de confort.....	203
Fig.6-66 : Courbe des variations de la température (patio) et humidité relative (patio). Période hiver.....	204
Fig.6-67 : Courbe des variations de la température intérieure et humidité relative intérieure. Période hiver.....	204
Fig.6-68 : courbes des variation de la température de l'air (intérieure, patio et station météo).....	206
Fig.6-69 : Courbes des variation de l'humidité relative de l'air (intérieure, patio et station météo).....	206
Fig.6-70 : Courbe des variations de la différence de température de l'air (intérieure et patio)	208
Fig.6-71 : Courbes des variations de la température extérieure et humidité relative extérieure. Période été.....	209
Fig.6-72 : courbes des variations de la température intérieure et humidité relative intérieure. Période d'été.....	210
Fig.6-73 : Diagramme de mollier ou de l'air humide : permet de déterminer les points de rosées et les pressions	213
Fig. 6-74 : Gradient de températures.....	214
Fig.6-75 : Test de condensation interstitielle. Période hivernale	215
Fig.6-76 : sens de migration de vapeur d'eau. Période hivernale.....	216
Fig.6-77 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005.....	216
Fig.6-78 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005.....	217

Fig.6-79 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005.....	217
Fig.6-80 : Test de condensation interstitielle. Période : été 2004.....	221
Fig.6-81 : sens de migration de vapeur d'eau. Période estivale.....	221
fig.6-82 : effet de l'humidité de condensations.....	222
fig.6-83 : effet de l'humidité ascensionnelle.....	223
Fig.6-84 : plan de masse, origine des sources d'eau souterraine.....	223
fig.6-85 : effet de l'humidité d'origine accidentelle.....	223
fig.6-86 : effet de l'humidité sur les matières organiques et minérales.....	224
Chapitre 7	
Fig.7.1a : Position incorrecte de l'écran pare-vapeur.....	229
Fig.7.1b : Position correcte de l'écran pare-vapeur	229
Fig.7.2 : Plan R.D.C, maison testée.....	235
Fig.7.3 : Test de condensation après ajout brique 8cm, polystyrène : 10cm.....	236
Fig.7.4 : Test de condensation après ajout placoplâtre 2cm, polystyrène : 4 cm.....	236
Fig.7.5 : Test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, polystyrène : 10cm.....	237
Fig.7.6 : Test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, polystyrène : 5cm.....	237
Fig.7.7 : Test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, laine minérale : 5cm.....	238
Fig.7.8 : Test de condensation après ajout : placoplâtre 5cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 5cm.....	238
Fig.7.9 : Test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 4cm.....	239
Fig.7.10a : Test de condensation interstitielle du mur nord, avant correction. (t.base. ext=+1°C et ti=10°C).....	239
Fig.7.10b : Test de condensation interstitielle du mur nord, avant correction. (temp.base ext =+1°C et ti=13°C).....	240
Fig.7.11 : Test de condensation après ajout placoplâtre 2cm, polystyrène: 4cm.....	241
Fig.7.12 : Test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, polystyrène : 4cm.....	241
Fig.7.13 : Test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, polystyrène : 5cm Sans pare-vapeur.....	242
Fig.7.14 : Test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, pare-vapeur en Aluminium 0,04, laine minérale: 5cm.	242
Fig. 7.15 : Test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 4cm.....	243
Fig.7.16 : Proposition d'une cheminée de ventilation, à tirage thermique.....	247

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tab. 2.1 : Échelle de Beaufort.....	16
Tab. 2.2 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de « De Martonne »	19
Tab. 2.3 : Les échelles des climats.....	20
Tab. 2.4 : Données météorologiques de Constantine.....	23
Tab. 2.5 : Métabolisme de base.....	27

Chapitre 3

Tab. 3.1 : Les différents types d'humidités et leurs symptômes.....	49
Tab. 3.2 : Caractéristiques de l'humidité dans les constructions.....	52
Tab. 3.3 : Classification des matériaux selon le taux d'imbibition.....	68
Tab. 3.4 : Taux moyens d'absorption d'eau.....	69
Tab. 3.5 : Coefficient d'affinité des matériaux.....	69
Tab. 3.6 : Taux humidité absorbé en émergence.....	71
Tab. 3.7 : Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité calculé d'après le taux pondéral d'humidité.	71
Tab. 3.8 : Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité, calculé d'après leur résistance thermique.	72
Tab.3.9 : Perte de poids provoquée par l'évaporation superficielle des matériaux.....	75

Chapitre 4

Tab. 4.1 : Remède adaptés aux cas simples d'humidité de condensation.....	90
Tab. 4.2 : Regroupant les trois (03) groupes de solutions.....	100
Tab. 4.3 : Expériences des briques à section absorbante réduite.....	101
Tab. 4.4 : Remède par la méthode des trois maçonneries.....	109
Tab. 4.5 : Types de revêtement.....	115
Tab. 4.6 : Capacité d'évaporation des enduits.....	121

Chapitre 5

Tab. 5.1 : Débit de renouvellement d'air admis.....	134
Tab. 5.2 : Effet de la position de la fenêtre et de la direction du vent sur les vitesses moyennes de l'air.....	146
Tab. 5.3 : Effet des dimensions de fenêtres dans des locaux sans ventilation transversale sur les vitesses d'air moyennes.....	147
Tab. 5.4 : Vitesses moyennes d'air intérieur (% de la vitesse du vent extérieur) dans les pièces à mono exposition.....	151
Tab. 5-5 : Vitesses du vent et pressions équivalentes.....	154
Tab.5.6 : coefficient « C »	155

Chapitre 6

Tab. 6.1 : Matériaux utilisés dans la construction de la maison « Dar-Ediaf ».....	174
Tab. 6.2 : Comparaison entre tension de vapeur et humidité absolue.....	187
Tab. 6.3 : Calcul des résistances thermiques de chaque couche constituant la paroi.....	211
Tab. 6.4 : Calcul des résistances à la diffusion de la vapeur d'eau de chaque couche constituant la paroi.....	214
Tab. 6.5 : Résumé des résultats de calculs (températures, pressions partielles et pressions saturantes).....	215
Tab. 6.6 : Calcul de la résistance thermique de chaque couche constituant la paroi.....	218
Tab. 6.7 : calcul des résistances à la diffusion de la vapeur d'eau de chaque couche constituant la paroi.....	220
Tab.6.8 : résumé des résultats de calculs (températures, pressions partielles et pressions saturantes).....	220

Chapitre 7

Tab.7.1 : Détermination du coefficient « K », après amélioration de la résistance thermique.	227
Tab.7.2 : Détermination de la température surfacique en °C, et comparaison avec la température de rosée.....	227
Tab.7.3 : Détermination des températures interstitielles en °C de chaque couche composant la paroi.....	228
Tab.7.4 : Détermination des pressions partielles en [mmHg] de chaque couche composant la paroi.....	228
Tab.7.5 : Synthèse des résultats, nécessaires pour tracer les courbes indiquant l'existence ou non du risque de condensation.....	229
Tab.7.6 : Détermination de la température surfacique en °C, et comparaison avec la température de rosée.....	240
Tab.7.7 : Détermination du coefficient « K », après amélioration de la résistance thermique.	240
Tab.7-8 : Détermination de la masse volumique de l'air humide.....	244

NOMENCLATURE

Symboles	Significations	Unité
A	section en.....	(m ²)
C	coefficient (constante).....	-
dm	diamètre moyen	mm
e	épaisseur du matériau de la couche « n ».....	m
g	la pesanteur	m ²
H, H1 et H2 ou h	hauteurs	m
HR	humidité relative	%
I _{DM}	indice d'aridité.....	-
k	coefficient de transmission calorifique	w/m ² .°C
M	le métabolisme.....	W
P	Précipitation de l'année	mm
Ppe	pressions partielles extérieures.....	mmHg
Ppi	pressions partielles intérieures.....	mmHg
Ppn	pression de la couche considérée (n).....	mmHg
Ppn-1	pression de la couche antérieure (n-1).....	mmHg
Psi	pression saturante intérieure	mmHg
Pse	pression saturante extérieure.....	mmHg
Pv	pression du vent	N/m ²
ΔPv	exprime la différence de pression.....	mm d'eau
Q	Densité du flux thermique.....	w/m ²
r	coefficient des pertes particulières	-
ra	perte globale par mètre linéaire.....	mm d'eau/m
Rth	résistance thermique du matériau composant la paroi	
Rf	les pertes dues aux frottements.....	m2. °c/w
R, C, E	respectivement, échanges de chaleur par rayonnement, convection et évaporation.....	-
S	surface des orifices d'entrée	m ²
T	température moyenne annuelle.....	°C
ta	température de l'air ambiant.....	°C
te	température extérieure.....	°C
tg	température radiante relevée sur thermomètre globe.....	°C
ti	température intérieure.....	°C
T _m	température moyenne extérieure pour la période de calcul.....	°C
T _n	température neutre.....	°C
Tpi	température surfacique de la face intérieure de la paroi	°C
Tpn	température surfacique de la face « n » de la paroi considérée...	°C
Trad	température radiante.....	°C
Δt	différence de température.....	°C
U _{zm}	vitesse moyenne du vent sur une période donnée.....	m/s
U' _z (t)	fluctuation du vent correspondante variable avec le temps...	m/s
V	vitesse de l'air	m/s
V (i)	vitesse moyenne intérieure	m/s

V1	vitesse du vent correspondant à la hauteur H1	m/s
V2	vitesse du vent correspondant à la hauteur H2	m/s
X	rapport de la surface de la fenêtre sur celle du mur.....	-
Z	les pertes particulières (coudes, rétrécissement...etc.).....	-

Symboles grecques :

α_i	coefficient intérieur d'échanges superficiels.....	w/m ² . °C
α_e	coefficient extérieur d'échanges superficiels.....	w/m ² . °C
ϕ_i	humidité relative intérieure.....	%
ϕ_e	humidité relative extérieure	%
λ	conductivité thermique.....	w/m°C
π	perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de la couche « n »...	g/m.h.mmHg
e/π ou Rd	résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.....	m ² .h.mmHg/g
γ	pois spécifique moyen de l'air en.....	N/kg

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Table des matières.....	V
Liste des figures	X
Liste des tableaux.....	XVIII
Nomenclature	XIX
Chapitre 1. Introduction Générale	
1.1 Introduction.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Méthodologie de recherche.....	8
Chapitre 2. Climat et Confort	
2.1 Introduction.....	9
2.2 Définition du climat	10
2.3 Facteurs déterminant le climat.....	10
2.3.1 La latitude et l'altitude.....	10
2.3.2 L'éloignement de la mer.....	11
2.4 Les climats dans le monde.....	11
2.5 Les éléments climatiques.....	12
2.5.1 la température de l'air	12
2.5.2 l'humidité de l'air.....	13
2.5.3 Le vent.....	14
2.5.4 Les précipitations.....	15
2.5.5 Les rayonnements solaires.....	15
2.5.6 La pression.....	16
2.6 Les indices climatiques.....	18
2.6.1 indices climatiques globaux.....	18
2.6.2 indices climatiques de production.....	19
2.7 les échelles du climat.....	19
2.8 le climat en Algérie.....	20
2.9 Le climat à Constantine.....	21
2.9.1 introduction.....	21
2.9.2 Analyse quantitative du climat de Constantine.....	22
2.9.3 Calcul de l'indice d'aridité.....	25
2.10 Notion de confort thermique dans les habitation	26
2.10.1 Métabolisme de l'organisme humain.....	26
2.11 Conditions de confort.....	29
2.12 Outils d'aides à la conception architecturale bioclimatique.....	31
2.12.1 diagramme bioclimatique de V.Olgay.....	31
2.12.2 diagramme bioclimatique de B.Givoni.....	32
2.12.3 diagramme bioclimatique de S.zokolay.....	33
2.12.4 les tableaux d'analyse bioclimatique de Mahoney.....	35
2.13 Analyse bioclimatique de la ville de Constantine.....	36
2.13.1 Méthode de B.Givoni.....	36

2.13.2	Méthode de S.zokolay.....	37
2.13.3	Méthode de Mahoney.....	37
2.14	Conclusion.....	39

Chapitre 3. Humidité

3.1	Introduction.....	40
3.2	Définition.....	40
3.3	Les différentes type de l'humidité et leurs caractéristique.....	42
3.3.1	Types d'humidité.....	42
3.3.2	Symptômes et sources d'humidité.....	45
3.3.3	Répartition de l'humidité dans les ouvrages.....	49
3.3.4	Caractéristiques de l'humidité dans les constructions anciennes.....	50
3.4	Le phénomène de la capillarité dans les matériaux de construction.....	54
3.4.1	Hauteur de progression de l'humidité.....	57
3.5	L'humidité et ses nuisances.....	61
3.5.1	Effet de l'humidité sur les constructions.....	61
3.5.2	Effet de l'humidité sur la santé de l'homme.....	61
3.5.3	Effet de l'humidité sur les matériaux de construction.....	63
3.5.4	Les efflorescences.....	65
3.5.5	Effet de la apillarité.....	66
3.6	Insalubrité des locaux et condition d'habitabilité.....	67
3.6.1	L'humidité et le comportement des matériaux de construction.....	67
3.6.2	Classification des matériaux.....	68
3.6.3	Séchage des matériaux.....	73
3.6.4	Evaporation des matériaux humides.....	74
3.6.5	Seuil d'insalubrité de l'humidité de l'air.....	77
3.6.6	Taux maximum tolérable des murs.....	78
3.7	Jugement d'habitabilité.....	79
3.8	Conclusion.....	83

Chapitre 4. Réhabilitation

4.1	Introduction.....	84
4.2	Objectifs de la réhabilitation.....	85
4.3	Enjeux de la réhabilitation.....	85
4.4	Reconsidérer une architecture existante.....	86
4.5	Le projet de réhabilitation.....	86
4.5.1	Le diagnostic préalable.....	87
4.5.2	Les relevés.....	87
4.5.3	La conception d'un projet de réhabilitation.....	87
4.6	Techniques de lutte contre l'humidité.....	88
4.6.1	Remède contre l'humidité de condensation.....	89
4.6.2	Remède contre l'humidité ascensionnelle.....	99
4.6.3	Assainissement des sous-sols. Méthodes des « trois maçonneries » et méthode « à sec ».....	109
4.6.4	Techniques utilisés pour camoufler les effets de l'humidité de remonté capillaire sur les murs.....	110
4.7	Remèdes contre l'humidité due à la pluie battante.....	113
4.7.1	Les revêtements de façades.....	115
4.8	Procèdes destinés à évacuer l'eau qui imprègne les murs.....	116

4.8.1 l'électro-osmose.....	116
4.8.2 l' électro-osmose phorèse.....	116
4.8.3 Siphons atmosphériques de Knapen	118
4.9 Enduits spéciaux.....	119
4.9.1 L'enduit hydrofuge à base de ciment	119
4.9.2 L'enduit hydrofuge à base de chaux.....	120
4.9.3 L'enduit anticondensant.....	120
4.10 Conclusion.....	122

Chapitre 5. Ventilation

5.1 Introduction.....	123
5.2 Le vent	123
5.2.1 Définition.....	123
5.2.2 Le phénomène vent à l'échelle urbain.....	124
5.2.3 Influence des constructions sur les écoulements d'air.....	126
5.2.4 Les Zones calmes ou abritées.....	130
5.3 Rôle et objectifs de la ventilation.....	131
5.4 Techniques et systèmes de la ventilation naturelle.....	134
5.4.1 Ventilation provoquée par la force du vent.....	134
5.4.2 Ventilation provoquée par la force thermique ou tirage thermique.....	136
5.4.3 Effets combinés.....	138
5.5 Ventilation transversale.....	139
5.6 Contrôle du vent ou de la ventilation.....	140
5.6.1 Influence des aménagements intérieurs sur l'écoulement d'air.....	140
5.6.2 Les déflecteurs d'air.....	142
5.6.3 Les Ouvertures : Emplacements et Usages.....	146
5.7 L'impact de la vitesse de l'air sur le confort intérieur.....	152
5.8 Effet de cheminée.....	153
5.9 La cheminée solaire.....	155
5.10 La ventilation et les solutions traditionnelles.....	157
5.10.1 Le capteur à vent.....	157
5.10.2 Le malkaf traditionnel.....	159
5.10.3 Le mur double ventilé.....	160
5.11 Conclusion.....	161

Chapitre 6. Investigation

6.1 Introduction.....	163
6.2 Choix de la ville.....	163
6.3 Choix de la maison	163
6.3.1 situation.....	163
6.3.2 typologie d'habitation.....	164
6.4 Description de la maison « Dar E' diaf ».....	167
6.4.1 Organisation spatiale.....	167
6.4.2. Matériaux utilisés dans la construction.....	174
6.4.3 Organisation fonctionnelle.....	177
6.5 Analyse morphologique des éléments architecturaux structurant la maison	178
6.5.1 Le patio.....	178
6.5.2 Les ailes du bâtiment.....	178
6.5.3 La galerie.....	178

6.6 Étude de l'enveloppe de la maison.....	179
6.6.1 Texture extérieures.....	179
6.6.2 Texture intérieures.....	179
6.6.3 Toiture.....	180
6.7 Étude d'ensoleillement et de ventilation.....	180
6.7.1 Ensoleillement	180
6.7.2 Étude de la ventilation	183
6.8. Diagnostic.....	185
6.8.1 Méthodes de Mesures de l'humidité.....	186
6.9 Objectif des campagnes de mesures.....	193
6.9.1 Facteurs climatiques mesuré.....	193
6.9.2 Appareils de mesures utilisés.....	194
6.10 Méthode de déroulement des campagnes de mesures.....	195
6.11 Interprétation des résultats des mesures.....	196
6.11.1 Étude comparative de la variation de l'humidité relative et de la température de l'air (Intérieure et extérieure). Période hivernale.....	196
6.11.2 Étude comparative de la variation de l'humidité relative et de la température de l'air (intérieure et extérieure). Période estivale.....	204
6.12. Vérification du risque de la condensation	211
6.13 Illustration des effets de l'humidité.....	221
6.13.1 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité de condensations.....	222
6.13.2 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité de ascensionnelle.....	222
6.13.3 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité d'origine accidentelle	223
6.13.4 Moisissures.....	224
6.14 Conclusion	224
 Chapitre 7. Simulation	
7.1 Introduction.....	226
7.2 Programme de calcul informatique.....	226
7.2.1 première étape	227
7.2.2 deuxième étape.....	228
7.3 Méthodologie de simulation.....	231
7.4 Méthode mathématique de calcul	232
7.4.1 Test de condensation superficielle.....	232
7.4.2 Test de condensation dans la masse (méthode de Glaser).....	233
7.5 Paramètres de calcul.....	234
7.6 Interprétation des résultats de simulation	235
7.6.1 Tests de condensations effectués sur le mur nord (après modification ou amélioration).....	235
7.6.2 Tests de condensations effectués sur le mur ouest (après correction).....	240
7.7 Diminution du taux hygrométrique de l'air	243
7.7.1 renouvellement de l'air humide et vicié.....	243
7.7.2 dimensionnement de la cheminée de ventilation à tirage thermique.....	244
7.8 Conclusion.....	248
 Chapitre 8. Conclusion générale	
8.1 Introduction.....	250
8.2 étendue de l'étude	250

8.3 Conclusion et aboutissement aux objectifs.....	254
8.4 Recommandations.....	256
8.5 Suggestions pour des recherches futures.....	258
Références	
Annexes :	265
- annexes (I)	270
- annexes (II)	276
- annexes (III)	278
- annexes (IV)	

Liste des figures

Chapitre 2	
Fig. 2.1 : Classification des climats selon Köppen.....	12
Fig. 2.2 : Évaporation moyenne annuelle (en cm) par latitude.	13
Fig. 2.3 : Subdivision de l'atmosphère.....	13
Fig. 2.4 : Capacité hygrométrique de l'air (à 1015 pa).....	13
Fig. 2.5 : Mouvement verticaux et horizontaux.....	15
Fig. 2.6 : le cycle de l'eau.....	17
Fig. 2.7 : Les rayonnements solaires	17
Fig. 2.8 : carte géographique de l'Algérie.....	21
Fig. 2.9 : position géographique de Constantine.....	22
Fig. 2.10 : températures moyennes mensuelles.....	23
Fig. 2.11 : Humidité relatives moyennes mensuelles.....	23
Fig. 2.12 : précipitations moyennes mensuelles.....	24
Fig. 2.13 : Variation des températures, humidités relatives et précipitations.....	24
Fig. 2.14 : vents moyens mensuels.....	25
Fig. 2.15 : déperdition de l'organisme humain.....	28
Fig. 2.16 : zone de confort en fonction des températures sèches.....	31
Fig. 2.17 : Diagramme d'Olgay.....	32
Fig. 2.18 : Diagramme bioclimatique de B. Givoni.....	34
Fig. 2.19 : Diagramme bioclimatique de S. Szokolay.....	35
Fig. 2.20 : Diagramme bioclimatique de B. Givoni, appliquée à la ville de Constantine.....	36
Fig. 2.21 : Diagramme bioclimatique de S. Szokolay appliquée à la ville de Constantine...	38
Chapitre 3	
Fig. 3.1 : Diagramme de Mollier.....	41
Fig. 3-2 : Les différents types d'humidité.....	42
Fig. 3.3 : Remontée capillaire dans une maison vernaculaire à Suika.....	43
Fig.3.4 : Les différentes causes d'humidité.....	43
Fig.3.5 : Infiltration directe par le toit.....	43
Fig.3.6 : Infiltration directe par le mur extérieur dans une Maison vernaculaire à Suika.....	43
Fig.3.7 : La condensation superficielle.....	44
Fig.3.8 : Effet de la vapeur de cuisine.....	44
Fig.3.9 : La condensation interne.....	44
Fig.3.10 : débordement d'évier.....	44
Fig.3.11 : Toiture très dégradée.....	44
Fig.3.12 : Érosion.....	45
Fig. 3.13 : Moisissures sur les murs.....	45
Fig.3.14 : Éclatement du mortier après gonflement.....	45
Fig.3.15 : Mouillures.....	45
Fig.3.16 : Remontée capillaire.....	46
Fig.3.17 : Mouillures variables isolée.....	46
Fig.3.18 : détérioration de l'enduit à la limite supérieure de la zone d'imbibition.....	47
Fig.3.19 : Passage couvert : érosion due à la condensation intermittente d'origine Atmosphérique.....	47
Fig.3.20 : Écaillage de la peinture.....	47
Fig.3.21 : Efflorescences.....	48
Fig.3.22 : Zone horizontale humide.....	48
Fig.3.23 : Moisissures sur différentes matières organiques.....	48

Fig.3.24 : Diagramme, établis d'après les types d'humidité, de la distribution de l'eau dans la section horizontale, de la face intérieure à la face extérieure d'un mur dont la capillarité est excellente.....	51
Fig.3.25 : Schéma représentant le sens et la direction de la provenance de l'humidité.....	53
Fig.3.26 : Phénomène de la capillarité.....	54
Fig.3. 27 : Cheminement de l'humidité.....	55
Fig. 3.28 : Rapport entre la hauteur d'affinité et la hauteur du moellon.....	55
Fig. 3.29 : Expérience de Talenti.....	57
Fig. 3.30 : patio étroit.....	58
Fig.3.31 : proportionnalité de l'humidité aux épaisseurs.....	59
Fig.3.32 : Hauteur atteinte par l'humidité dans les murs.....	59
Fig.3.33 : La hauteur de l'humidité est fonction de l'épaisseur du mur et à la ventilation auquel est soumis.....	56 60
Fig.3.34 : immeuble, quartier Suika.....	61
Fig.3.35 : place, quartier Suika basse.....	61
Fig.3.36 : Détérioration des revêtements intérieurs.....	61
Fig. 3.37 : Champignons.....	61
Fig. 3.38 : Acariens.....	62
Fig.3.39 : Moisissures.....	62
Fig.3.40 : Mur en pierre et en brique.....	63
Fig.3.41 : Mur en pierre calcaire.....	63
Fig.3.42 : Résistance du pin rouge à la force de compression en Fonction de son taux d'humidité.....	64
Fig.3.43 : Moisissure du bois.....	64
Fig.3.44 : Diffusion d'eau en milieu poreux.....	66
Fig.3.45 : expérience, principe de la capillarité.....	66
Fig.3.46 : Porométrie d'un béton.....	66
Fig.3.47 : Expérience d'absorption d'eau et hauteur d'affinité dans la pierre naturelle.....	70
Fig.3.48 : Comportement différent dans le séchage des matériaux.....	73
Fig.3.49 : Diagramme de séchage des matériaux.....	76
Fig.3.50 : Différence de taux d'humidité entre le matériau et son mortier de liaisonnement dans un mur humide.....	78
Fig. 3.51 : Paroi très humide : 17%.....	80
Fig. 3.52 : Paroi moins humide : 4,5 %.....	80
Chapitre 4	
Fig. 4.1a : le vitrage isolant type TPS.....	91
Fig. 4-1b : Comparaison entre le vitrage traditionnel et le type TPS, dans les mêmes conditions de températures.....	92
Fig. 4-2 : condensation dans les bâtiments en béton armé, Pont thermique au niveau de la colonne d'angle.....	92
Fig. 4-3 : Condensation dans la masse.....	94
Fig. 4-4 : Isolation par l'extérieur. Ventilation de la lame d'air.....	94
Fig. 4-5 : Résistance thermique de la lame d'air. Double mur renforcé, comprenant une feuille d'aluminium.....	95
Fig. 4-6 : Protection d'un plancher sur terre-plein contre l'humidité ascensionnelle et de condensation.....	96
Fig. 4-7 : Condensation provoquée.....	98
Fig. 4-8 : Les bâtisses situées sur les sommets des collines attaquées par l'humidité s'explique seulement par le phénomène de la condensation tellurique.....	98
Fig. 4-9 : Basilique Saint-Pierre à Rome. Un exemple de l'humidité tellurique par excellence.....	99

Fig. 4-10 différentes méthodes pour entraver les remontés capillaires. Les deux premiers arrêtent la montée de l'humidité les deux derniers empêchent la pénétration latérale.....	100
Fig. 4-11 : trois types de travaux pour empêcher l'humidité de sortir de la paroi sous forme de vapeur.....	100
Fig. 4-12 : Réduction de la section absorbant.....	101
Fig. 4-13 : expérience sur le comportement des briques ordinaires à section absorbante Réduite	101
Fig. 4-14 : méthode appliquée par koch pour sauver les fresques à St-Louis-des-Français.....	102
Fig. 4-15 changement de la maçonnerie à la base d'un mur.....	102
Fig. 4-16 introduction d'une couche horizontale anticapillaire.....	102
Fig. 4-17 sciage d'un mur par étape.....	102
Fig. 4-18 : introduction d'une résine à la base d'un mur épais.....	103
Fig. 4-19 saignée réalisée au moyen d'un carottier.....	103
Fig. 4-20 : introduction d'une plaque inoxydable dans un mur à l'aide d'un marteau pneumatique.....	104
Fig. 4-21 forage de trous dans la maçonnerie. injection de produits imperméabilisants.....	104
Fig. 4-22a : percements de trous obliques	105
Fig. 4-22b : percements de trous horizontaux.....	105
Fig. 4-23 injection de produits	105
Fig. 4-24 : travaux d'imperméabilisation	105
Fig. 4-25 injection de produits.....	105
Fig. 4-26 : tranchée ouverte et tranchée fermée.....	106
Fig. 4-27 : tranchée ouverte autour d'une bâtisse.....	106
Fig. 4-28 : pénétration latérale d'eau superficielle	106
Fig. 4-29 : la tranchée peut intercepter l'eau perdue.....	106
Fig. 4-30 la tranchée n'arrête pas les remontées capillaires.....	107
Fig. 4-31 : la partie ensoleillée de la tranchée, reliée à la partie ombrée permet d'activer le tirage thermique.....	107
Fig. 4-32 : les deux types de radiers traditionnels : Protègent contre les remontés capillaires et non contre les condensations.....	108
Fig. 4-33 : planchers efficaces contre les remontés capillaires et les condensations.....	108
Fig. 4-34 : remède par la méthode des trois maçonneries, première combinaison.....	109
Fig. 4-35 : remède par la méthode des trois maçonneries, deuxième combinaison.....	109
Fig. 4-36 : remède par la méthode « à sec »	110
Fig. 4-37a : application erronée d'un traitement Imperméable « horizontal ».....	111
Fig. 4-37b : application erronée d'un traitement Imperméable « vertical »	111
Fig. 4-38 : trois types de contre-murs corrects.....	112
Fig. 4-39 : contre-mur traditionnel, construit par les Romains.....	112
Fig. 4-40 : exemple de remède efficace appliqué à la Farnesina de Rome.....	113
Fig. 4-41 : réparation d'une fenêtre non étanche à l'eau	113
Fig. 4-42 : infiltration d'eau pluviale dans la maçonnerie Ne dépasse pas 5 à 6 cm.....	114
Fig. 4-43 : assèchement du mur après évaporation de la pluie.....	114
Fig. 4-44 : La lame de plomb introduite dans le vide d'air n'a apporté aucun effet la condensation a persisté.....	115
Fig. 4-45 diagramme du taux d'humidité prouve que l'origine de l'humidité se trouve sur la paroi intérieure.....	115
Fig. 4-46 : phénomène de l'électro-osmose.....	117
Fig. 4-47 : électro-osmose active par interposition d'une source de courant entre la maçonnerie et le terrain.....	117

Fig. 4-48 : schéma d'une installation d'électro-osmose phorèse.....	117
Fig. 4-49 : deux types de siphons atmosphériques.....	118
Fig. 4-50 : le principe sur lequel est basé le fonctionnement des siphons.....	118
Fig. 4-51 : le principe de fonctionnement des siphons.....	118
Fig. 4-52 : enduit absorbant appliqué sur un pare-vapeur, Remède efficace contre la Condensation.....	119
 Chapitre 5	
Fig. 5-1 : Vitesse du vent.....	124
Fig. 5-2 : Variation de la vitesse du vent en fonction de la rugosité du site.....	125
Fig. 5-3 : Densité élevée d'un tissu ancien /Accidents aérodynamiques au niveau bas de la tour.....	125
Fig. 5-4 : Comportement du vent autour des constructions.....	126
Fig. 5-5 : Effet des obstacles bas (<15 m).....	127
Fig.5-6 : Effet de coin	127
Fig. 5-7 : Effet de venturi.....	127
Fig. 5-8 : Effet de la forme du bâtiment sur l'écoulement d'air.....	128
Fig. 5-9 : Effet de rouleau.....	128
Fig. 5-10 : Effet de sillage.....	128
Fig. 5-11 : courant d'air créé par plusieurs obstacles.....	129
Fig. 5-12 : déviation du vent au dessus des cours ou patios	129
Fig. 5-13 : barrières végétales : Création des pertes de charges	129
Fig. 5-14 : zones calmes créées par l'agencement des bâtiments.....	130
Fig. 5-15 : La porosité urbaine, dont dépend la ventilation à l'intérieure des locaux...	131
Fig. 5-16 : protection contre les vents chauds et canalisation des brises	131
Fig. 5-17 : Longueurs des abris du vent, derrière les constructions, selon la volumétrie....	133
Fig. 5-18 : Zone de haute pression en avant et basse pression en arrière.....	135
Fig. 5-19 : Distribution schématique des pressions autour d'un bâtiment.....	135
Fig.5.20 : tirage thermique. Un excellent système central de ventilation naturelle, constitué par une cage d'escalier ouverte surmontée par un lanterneau et un dispositif d'aération.....	137
Fig. 5-21 : principe de la ventilation naturelle par prises basse et haute.....	137
Fig. 5-22 : répartition du champ de pression autour d'un bâtiment sous l'effet du vent au niveau du sol.....	139
Fig. 5-23 : Ventilation transversale d'une construction	140
Fig.5-24 : Inertie des filets d'air entrant dans une construction à une seule pièce d'épaisseur.....	140
Fig.5-25 : influence d'une dissymétrie sur la direction des filets d'air entrant dans une Construction.....	141
Fig.5-26 : influence d'un auvent sur la direction des filets d'air entrant dans une Construction.....	141
Fig. 5-27 : influence des lames orientables sur la direction des filets d'air.....	142
Fig.5-28 : Résultats d'essais en soufflerie montrant comment le cloisonnement affecte l'écoulement de l'air dans un plan rectangulaire.....	143
Fig. 5-29 : déflecteurs agissant par effet de barrage.....	144
Fig. 5-30 : les saillis en façade augmentent la pression d'air.....	144
Fig. 5-31 : contrôle de la ventilation par un dispositif simple (courant).....	145
Fig. 5-32 : Dispositif architectural créant une ventilation naturelle.....	145
Fig.5-33 : Distribution des vitesses d'air intérieur (en %de la vitesse extérieure) dans des modèles où les rapports de dimensions pour l'entrée et la sortie de l'air sont différents.....	148

Fig. 5-34 : Effet du type de fenêtre sur le contrôle de la ventilation.....	149
Fig.5-35 : Dispositifs de ventilation intégrés qui exploitent la capacité de succion d'un toit à faible pente.....	150
Fig.5-36 : Vitesses d'air intérieure dans des modèles équipés de saillies verticales de différentes profondeurs. Comparées aux vitesses dans des modèles dépourvus de saillies.	151
Fig.5-37 : Influence d'un changement de direction, horizontal et vertical, des filets d'air sur la vitesse.....	152
Fig.5-38 : Schéma illustrant l'influence de la dimension des orifices de sortie sur la vitesse de l'air à l'intérieur d'un local.....	152
Fig. 5-39 : Effet de cheminée, schéma de principe.....	153
Fig. 5-40a : principe de rafraîchissement.....	153
Fig.5-40b : principe de rafraîchissement Principe du puit provençal et de la cheminée Thermique.....	154
Fig.5-41 : ventilation verticale par effet de thermosiphon.....	154
Fig. 5-42 : Effet de cheminée dans un local avec plafond incliné.....	155
Fig.5-43 : trois types de cheminées solaires.....	156
Fig.5-44 : malkaf sculpté sur les tombes Pharaoniques.....	157
Fig.5-45 : malkaf traditionnel (nouvelle école de gourna).....	157
Fig.5-46 : tour à vent multidirectionnelle surmontant les constructions dans les jardins de Dawlat-Abad à Yazd en iran.....	159
Fig. 5-47 : principe de fonctionnement d'une tour de vent.....	160
Fig.5-48 : tour à vent d'une maison à BAM.....	160
Fig. 5-49 : malkaf solaire.....	161
Fig. 5-50 : différents murs ventilés et masques variantes utilisées par A. Ravéreau au M' Zab.....	161
Fig.5-51 : Murs cheminés, façade de l'office « ONERSOL » au Niger.....	161
Chapitre 6	
Fig.6-1 : Plan de la médina de Constantine.....	164
Fig.6-2 :Vue panoramique à partir du pont El-Kantara.....	164
Fig.6-3 : Plan de masse.....	165
Fig.6-4 : Grande maison « E'Dar ».....	165
Fig.6-5 : Petite maison « El'Aâly ».....	165
Fig.6-6 : « Dar-Ediaf ».....	166
Fig.6-7 : « El'Aâly » de « Dar-Ediaf ».....	166
Fig.6-8 : homogénéité du tissu de la médina.....	167
Fig.6-9 : 1er corps de bâtiment : la maison El-âaly, surmontant E'dar.....	168
Fig.6-10 : 2eme corps de bâtiment : la grande maison E'dar.....	168
Fig.11 : fontaine dans le patio.....	168
Fig.12 : Colonne en marbre (galerie).....	168
Fig.13 : Slam au 2è niveau.....	168
Fig.6-14 : différents vues en plans de la grande et la petite maison.....	169
Fig.15 : patio ouvert vers le ciel.....	170
Fig.16 : galerie à arcades et colonnades.....	170
Fig.6-17 : impasse Bencheikh el-fegoune, menant à Dar-ediaf.....	170
Fig.6-18 : différence de niveau marquant le seuil de la skiffa.....	170
Fig.6-19 : revêtement mural dégradé (Skifa).....	171
Fig.6-20 : faux plafond dégradé (Skifa).....	171
Fig.6-21 : bit utilisée comme salle de séjour.....	172
Fig.6-22 : bit inoccupée (dégradée).....	172

Fig.6-23: K'bou, avec coupole.....	172
Fig.6-24 : K'bou, sans coupole.....	172
Fig.6-25 : Maqsura.....	173
Fig.6-26 : Doukana.....	173
Fig.6-27 : construction précaire et illicite (habitée).....	173
Fig.6-28: Buanderie, transformée en logement	173
Fig.6-29 : quelques matériaux utilisés dans la maison « Dar-Ediaf ».....	174
Fig.6-30 : Murs en élévation : épaisseurs variables de 0,40 à 0,80 m.....	175
Fig.6-31 : Toiture inclinée en tuile rouge.....	175
fig.6-32 : structure d'un comble en bois (genévrier).....	175
fig.6.33 : structure d'un plancher en bois (genévrier).....	175
Fig.6-34 : Plancher (haut/bas et terrasse) en bois genévrier (aâraâr).....	176
Fig.6-35 : dimensions des ouvertures	177
Fig.6-36. Galerie étroite	179
Fig. 6-37 : Escalier principal assurant la relation verticale entre galeries.....	179
Fig.6-38: Représentations sur le diagramme solaire : Ombre projeté sur le mur nord de la chambre testée.....	181
fig.6-39. : ensoleillement au mois de juin hauteur solaire (hs) : 76°	182
fig.6-40 : ensoleillement au mois de janvier hauteur: solaire (hs) : 36°	182
fig.6-41 : ensoleillement du patio au mois de juin à 12 :00h ; hs : 76°	182
fig.6-42 : ensoleillement du patio au mois de juin à 10 :00h ; ; hs : 61° ; azimut : 20° ..	182
fig.6-43 : patio totalement ombré au mois de janvier ; hs : 36°.....	183
Fig.6-44 : ensoleillement du patio au mois de juillet à 12 :00h.....	183
Fig.6-45 : écoulement de l'air sur la médina de Constantine.....	184
Fig.6-46 : écoulement de l'air sur le quartier Suika.....	185
Fig.6-47. L'hygromètre à cheveu.....	188
Fig.6-48 Hygromètre enregistreur (jules richard).....	188
Fig.6-49. Psychromètre traditionnelle.....	188
Fig.6-50 : principe du psychromètre.....	188
Fig.6-51 : L'hygromètre digital, pour les mesures de l'humidité relative de l'air.....	189
Fig.6-52 : Hygromètre à diffusion.....	189
Fig.6-53 : Hygromètre enregistreur.....	189
Fig.6-54 : échelle de confort.....	190
Fig.6-55 : Appareil de Mesure superficielle: mur	190
Fig.6-56 : Appareil de Mesure superficielle : bois.....	190
Fig.6-57 : dépôt des fragments du matériau (échantillon).....	191
Fig.6.58. Procédé de dessiccation des échantillons par ventilation.....	192
Fig.6-59 : Four de Massari, Tizzano et Talenti.....	193
Fig.6-60 : emplacement des appareils de mesures à intérieure de la chambre	194
Fig.6.61 : emplacement des appareils de mesures à l'extérieur de la chambre (galerie).	195
Fig.6.62 : Variation de l'humidité relative intérieure (chambre) et extérieure (patio et station météo).....	199
Fig.6-63 : Variation de la température de l'air intérieure (chambre) et les températures extérieure (Patio et station météo).....	201
Fig.6-64 : écart de la température horaire.....	201
Fig.6-65 : diagramme de confort.....	203

Fig.6-66 : Courbe des variations de la température (patio) et humidité relative (patio). Période hiver	204
Fig.6-67 : Courbe des variations de la température intérieure et humidité relative intérieure. Période hiver.....	204
Fig.6-68 : courbes des variation de la température de l'air (intérieure, patio et station météo).....	206
Fig.6-69 : Courbes des variation de l'humidité relative de l'air (intérieure, patio et station météo).....	206
Fig.6-70 : Courbe des variations de la différence de température de l'air (intérieure et patio)	208
Fig.6-71 : Courbes des variations de la température extérieure et humidité relative extérieure. Période été.....	209
Fig.6-72 : courbes des variations de la température intérieure et humidité relative intérieure. Période d'été.....	210
Fig.6-73 : Diagramme de mollier ou de l'air humide : permet de déterminer les points de rosées et les pressions	213
Fig. 6-74 : Gradient de températures.....	214
Fig.6-75 : Test de condensation interstitielle. Période hivernale	215
Fig.6-76 : sens de migration de vapeur d'eau. Période hivernale.....	216
Fig.6-77 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005.....	216
Fig.6-78 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005.....	217
Fig.6-79 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005.....	217
Fig.6-80 : Test de condensation interstitielle. Période : été 2004.....	221
Fig.6-81 : sens de migration de vapeur d'eau. Période estivale.....	221
fig.6-82 : effet de l'humidité de condensations.....	222
fig.6-83 : effet de l'humidité ascensionnelle.....	223
Fig.6-84 : plan de masse, origine des sources d'eau souterraine.....	223
fig.6-85 : effet de l'humidité d'origine accidentelle.....	223
fig.6-86 : effet de l'humidité sur les matières organiques et minérales.....	224
Chapitre 7	
Fig.7.1a : Position incorrecte de l'écran pare-vapeur.....	229
Fig.7.1b : Position correcte de l'écran pare-vapeur	229
Fig.7.2 : Plan R.D.C, maison testée.....	235
Fig.7.3 : Test de condensation après ajout brique 8cm, polystyrène : 10cm.....	236
Fig.7.4 : Test de condensation après ajout placoplâtre 2cm, polystyrène : 4 cm.....	236
Fig.7.5 : Test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, polystyrène : 10cm.....	237
Fig.7.6 : Test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, polystyrène : 5cm.....	237
Fig.7.7 : Test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, laine minérale : 5cm.....	238
Fig.7.8 : Test de condensation après ajout : placoplâtre 5cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 5cm.....	238

Fig.7.9 : Test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 4cm.....	239
Fig.7.10a : Test de condensation interstitielle du mur nord, avant correction. (t.base. ext=+1°C et ti=10°C).....	239
Fig.7.10b : Test de condensation interstitielle du mur nord, avant correction. (temp.base ext =+1°C et ti=13°C).....	240
Fig.7.11 : Test de condensation après ajout placoplâtre 2cm, polystyrène: 4cm.....	241
Fig.7.12 : Test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, polystyrène : 4cm.....	241
Fig.7.13 : Test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, polystyrène : 5cm Sans pare-vapeur.....	242
Fig.7.14 : Test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, pare-vapeur en Aluminium 0,04, laine minérale: 5cm.	242
Fig. 7.15 : Test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 4cm.....	243
Fig.7.16 : Proposition d'une cheminée de ventilation, à tirage thermique.....	247

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tab. 2.1 : Échelle de Beaufort.....	16
Tab. 2.2 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de « De Martonne »	19
Tab. 2.3 : Les échelles des climats.....	20
Tab. 2.4 : Données météorologiques de Constantine.....	23
Tab. 2.5 : Métabolisme de base.....	27

Chapitre 3

Tab. 3.1 : Les différents types d'humidités et leurs symptômes.....	49
Tab. 3.2 : Caractéristiques de l'humidité dans les constructions.....	52
Tab. 3.3 : Classification des matériaux selon le taux d'imbibition.....	68
Tab. 3.4 : Taux moyens d'absorption d'eau.....	69
Tab. 3.5 : Coefficient d'affinité des matériaux.....	69
Tab. 3.6 : Taux humidité absorbé en émergence.....	71
Tab. 3.7 : Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité calculé d'après le taux pondéral d'humidité.	71
Tab. 3.8 : Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité, calculé d'après leur résistance thermique.	72
Tab.3.9 : Perte de poids provoquée par l'évaporation superficielle des matériaux.....	75

Chapitre 4

Tab. 4.1 : Remède adaptés aux cas simples d'humidité de condensation.....	90
Tab. 4.2 : Regroupant les trois (03) groupes de solutions.....	100
Tab. 4.3 : Expériences des briques à section absorbante réduite.....	101
Tab. 4.4 : Remède par la méthode des trois maçonneries.....	109
Tab. 4.5 : Types de revêtement.....	115
Tab. 4.6 : Capacité d'évaporation des enduits.....	121

Chapitre 5

Tab. 5.1 : Débit de renouvellement d'air admis.....	134
Tab. 5.2 : Effet de la position de la fenêtre et de la direction du vent sur les vitesses moyennes de l'air.....	146
Tab. 5.3 : Effet des dimensions de fenêtres dans des locaux sans ventilation transversale sur les vitesses d'air moyennes.....	147
Tab. 5.4 : Vitesses moyennes d'air intérieur (% de la vitesse du vent extérieur) dans les pièces à mono exposition.....	151
Tab. 5-5 : Vitesses du vent et pressions équivalentes.....	154
Tab.5.6 : coefficient « C »	155

Chapitre 6

Tab. 6.1 : Matériaux utilisés dans la construction de la maison « Dar-Ediaf ».....	174
Tab. 6.2 : Comparaison entre tension de vapeur et humidité absolue.....	187
Tab. 6.3 : Calcul des résistances thermiques de chaque couche constituant la paroi.....	211
Tab. 6.4 : Calcul des résistances à la diffusion de la vapeur d'eau de chaque couche constituant la paroi.....	214
Tab. 6.5 : Résumé des résultats de calculs (températures, pressions partielles et pressions saturantes).....	215
Tab. 6.6 : Calcul de la résistance thermique de chaque couche constituant la paroi.....	218
Tab. 6.7 : calcul des résistances à la diffusion de la vapeur d'eau de chaque couche constituant la paroi.....	220
Tab.6.8 : résumé des résultats de calculs (températures, pressions partielles et pressions saturantes).....	220

Chapitre 7

Tab.7.1 : Détermination du coefficient « K », après amélioration de la résistance thermique.	227
Tab.7.2 : Détermination de la température surfacique en °C, et comparaison avec la température de rosée.....	227
Tab.7.3 : Détermination des températures interstitielles en °C de chaque couche composant la paroi.....	228
Tab.7.4 : Détermination des pressions partielles en [mmHg] de chaque couche composant la paroi.....	228
Tab.7.5 : Synthèse des résultats, nécessaires pour tracer les courbes indiquant l'existence ou non du risque de condensation.....	229
Tab.7.6 : Détermination de la température surfacique en °C, et comparaison avec la température de rosée.....	240
Tab.7.7 : Détermination du coefficient « K », après amélioration de la résistance thermique.	240
Tab.7-8 : Détermination de la masse volumique de l'air humide.....	244

INTRODUCTION GENERALE

1.1 Introduction

Un nouveau concept venait d'enrichir l'art de bâtir depuis quelques années et ne cessait d'être dénommé : « solaire ». À ce qualificatif sont venus se greffer par la suite d'autres attributs qui ont tenté de chercher une symbiose ou l'unanimité : « solarisée », « tournée vers le soleil », « passive », « active », « écologique » puis enfin « bioclimatique ». Le souci majeur de tous est la gestion des ressources naturelles renouvelables.

Toutefois, la cause principale qui semble avoir déclenché cet axe de recherche est « la crise énergétique » des années soixante dix (70). Aussi, et une fois de plus, le monde en entier souffre et reste perplexe ces jours-ci, devant la flambée des prix des énergies non renouvelables.

Cet état de fait, nous poussent à remettre en question les régimes de notre mode de vie et d'habitat créés dans l'euphorie de la fièvre spéculatrice, du standard importé, du rendement, amenant l'uniformité, la dépersonnalisation, le gaspillage et finalement la perte d'identité¹.

« L'architecture s'internationalise en même temps qu'elle s'affadit et le confort n'est pas toujours atteint »²

L'examen de l'architecture vernaculaire³, nous permet d'en tirer des leçons très utiles. Elle est le miroir qui reflète les valeurs d'une culture populaire investies dans l'habitation. Certes, il existe peu ou pas de préoccupation esthétique dans l'architecture traditionnelle⁴. Cependant, nous découvrons une démarche, un équilibre, un style..., bref. Une harmonie qui règne entre l'homme, son environnement et sa culture. « L'architecture traditionnelle participe à une transformation naturelle du milieu. Elle offre à l'architecte qui veut bien y être sensible une leçon de modestie »⁵.

En effet, L'impact de cette architecture peut être considéré comme un facteur générateur d'un renouveau des théories architecturales, surtout sur le plan thermique et économique.

Le bâti vernaculaire ou traditionnel à Constantine est réputé être adapté aux mœurs et coutumes locales « arabo-musulmanes ». Toutefois, son comportement vis-à-vis du climat de la région reste contestable. À cet effet, nous distinguons deux niveaux d'appréciations :

À l'échelle urbaine : la densité des constructions, l'imbrication des volumes, les façades aveugles et les passages couverts...etc, se combinent pour obtenir un filtrage subtil des éléments climatiques : radiations solaires, vents, température et humidité. Par contre, à l'échelle

¹ Silvio Guindani et Ulrich Doepper, *architecture vernaculaire*, presses polytechniques et universitaires romandes, suisse, 1990

² Lavigne Pierre, *architecture climatique*, ÉDUSUD, Aix-en-Provence, 1994.

³ Vernaculaire est un terme consacré actuellement par l'usage dans le sens de *propre au lieu*. Rapoport (1969) distingue trois « niveaux » dans les constructions : architecture primitive, architecture indigène ou populaire, architecture contemporaine. L'objet de notre étude se situerait au deuxième niveau et l'on peut rapporter à la médina de Constantine, les généralités qu'il énonce à propos de la conception, de la construction et du processus d'élaboration du plan de l'habitation ».

⁴ Nous entendons par [architecture traditionnelle] les constructions produites par un groupe culturel, pour lui-même, et qui servent de cadre à sa vie quotidienne : s'y inscrivent les besoins et les désirs du groupe, et, dans la mesure où ils s'en distinguent, ceux de l'individu. Qualifiée parfois de populaire, ou de spontanée, elle est rarement l'œuvre d'un spécialiste. Elle s'oppose aux monuments, aux bâtiments de style qui représentent la culture d'une élite

⁵ Donnadiou Catherine et pierre. Didillon Henriette et Jean-Marc, *habiter le désert*, les maisons mozabites, pierre mardaga, éditeur, 1986.

architecturale : la typologie des maisons « introvertie », l'inertie des matériaux, les masques architecturaux et environnementaux...etc. font que, certaines pathologies apparaissent à cause des multiples effets de l'humidité sous ses différentes formes, surtout en période d'hiver.

La déshumidification des espaces intérieurs est d'une importance capitale, elle influe directement sur la qualité de l'air en le purifiant et participe d'une part, à l'augmentation des résistances thermiques des parois, d'où diminution des consommations d'énergie et d'autres parts elle permet une bonne conservation des matériaux qui favorisent une plus longue longévité des ouvrages¹.

Par ailleurs, les textes législatifs des pays développés comme ceux de l'union européenne par exemple² exigent un certain seuil du taux d'humidité à ne pas dépasser dans les locaux d'habitation. Ainsi, l'humidité est considérée non seulement comme un indice de confort mais aussi, comme un critère de jugement sur l'habitabilité des logements du point de vue hygiénique.

Il est à signaler, à priori, qu'aucune étude, faisant ressortir l'impact de l'humidité sur les maisons vernaculaires à Constantine n'a été effectuée à ce jour. La préoccupation majeure des concepteurs de tous les projets d'interventions sur le bâti ancien, déjà entrepris dans le cadre des opérations de réhabilitations dans cette ville est consacrée vers la consolidation de la structure portante et l'étanchéité de l'enveloppe, alors que les problèmes de condensation et d'humidité ascensionnelle n'ont jamais été abordés.

Dans ce domaine, beaucoup de points restent à développer, et un travail de longue haleine attend les architectes bioclimaticiens pour adopter des solutions convenables aux différentes typologies de constructions existantes.

Cette étude se veut une approche analytique des différents facteurs climatiques : humidité, température et vitesse de l'air agissant sur le confort des espaces intérieurs des maisons vernaculaires. L'impacte des méfaits des éléments atmosphériques, notamment, l'humidité : « ennemi numéro un » du bâtiment, source de désordres structurel et d'inconfort physiologique et visuel sera examiné et présenté comme un danger réel à combattre. Les divers remèdes adoptés tels que : la ventilation, l'amélioration des résistances thermiques et résistance à la diffusion de la vapeur d'eau sont également présentés en tant que moyens efficaces de lutte contre les condensations. Nous démontrerons, par la suite, la possibilité de prise en charge de certaines formes d'humidité dans les projets de réhabilitation suivie de quelques recommandations.

1.2 Problématique

La Médina de Constantine présente un chef-d'œuvre du génie créateur de l'homme à travers toutes les civilisations qu'elle a connu et exerce une influence considérable sur le développement de l'architecture, des arts, de la planification des villes et de la création des paysages. Sa dimension socioculturelle et historique, d'une valeur, inestimable rayonne à ce jour, et constitue l'identité de toute la ville de Constantine.

¹ MASSARI. *Géovani. Bâtiments humides et insalubres*, Eyrolles, Paris, 1971.

² Arrêté du 20 février 1991 (JO du 9-03-1991), modifiant l'arrêté du 30-12-1988, relatif à l'attribution, pour des bâtiments d'habitation, d'un label haute performance énergétique et d'un label solaire. Directives européennes : Directive du conseil n°89-106/CEE du 21-12-1988. J.O. N° L 40-2 du 11-02-1989.

Un patrimoine bâti, témoin unique et exceptionnel d'une culture ancestrale, illustré par un ensemble architectural riche, doté d'une authenticité : dans sa conception, ses matériaux, son système constructif son organisation spatiale et fonctionnelle,... bref un héritage monumental porteur de symboles appartenant à la mémoire collective.

Malheureusement son cadre bâti se dégrade de plus en plus, avec une vitesse accélérée surtout ces dernières années.

C'est un pan entier de l'histoire de l'Algérie qui est menacé de disparaître rapidement, faute de prise en charge réelle. Tout le monde assiste impuissant devant cette situation incontrôlée ou incontrôlable ! Effets de l'homme ou de la nature ?

Plusieurs facteurs semblent être les générateurs de cette dégradation dont le climat, est aussi prépondérant.

La problématique de cette recherche s'inspire d'une double réalité controversée, l'une considère que l'architecture traditionnelle ou vernaculaire est le résultat d'un savoir faire ingénieux qui s'adapte entre autre, au climat et l'autre voit que la conception n'est que l'image d'un modèle de culture d'une société, qui ne répond pas forcément à toutes les conditions climatiques.

Le regard vers le passé à travers son architecture est un apprentissage certain, qui permettrait la découverte des règles de contrôle de l'environnement et du savoir vivre avec le climat. Il ne s'agit pas de nier le modernisme, il s'agit plutôt d'exploiter cet héritage pour en profiter dans le nouveau.

La maison vernaculaire à Constantine, se caractérise par une conception « introvertie » autour d'un patio, sur lequel s'ouvrent toutes les pièces. Un toit en tuile rouge, rappelle les villes andalouses, et une structure porteuse, d'une grande inertie, se constitue essentiellement de pierres, briques pleines, adobe et arââr (genévrier). Ce type se généralise, et offre une morphologie spatiale qui se reproduit sans pour autant être un prototype. C'est surtout à son site que la cité doit sa grandeur suprême et sa prospérité, ne l'a-t-on pas qualifié de ville majestueuse ?

Cette approche se penche sur l'étude des paramètres climatiques, notamment « l'humidité », qui influent négativement sur le bâti et par conséquent sur les ambiances intérieures des maisons vernaculaires, et ce dans le but d'améliorer les conditions de confort climatique à l'intérieure des espaces ; En même temps, on assure une pérennité d'un patrimoine architectural, culturel et historique inestimable et non renouvelable.

L'ambiance climatique dans les espaces intérieurs est gouvernée par un certain nombre de facteurs. L'humidité et la température font parties des paramètres climatiques dont les manifestations conditionnent énormément le désagrément ressenti par l'homme. L'effet du

vent semble être négligé, vu que sa vitesse est excessivement diminuée par la compacité du tissu¹ et de l'organisation spatiale « introvertie » de la maison traditionnelle à Constantine.

Ceci est conforté par les travaux de la cellule² de réhabilitation et de sauvegarde du patrimoine de la vieille ville de Constantine, qui enregistre quotidiennement dans ses rapports d'expertises, établis sur demande des propriétaires, désirant réhabiliter leurs maisons, bon nombre de constats, relatifs aux effets négatifs du climat à savoir :

- Ø Dégradation et gondolement des revêtements des murs et des plafonds
- Ø Murs humides et fissurés
- Ø Présence de moisissures
- Ø Mauvaises odeurs à l'intérieur des pièces
- Ø Chaleur insupportable la nuit pendant la période d'été
- Ø Apparition des maladies pneumoniques.

Tout ceci peut se résumer en : l'inconfort et le risque d'effondrement.

L'intérêt porté à la médina de Constantine a été omniprésent, elle fût l'objet d'une série de politiques urbaines souvent contradictoires, l'une consiste à la conserver et la réhabiliter, l'autre à la démolir et reconstruire des tours nouvelles, une autre vise à garder juste une partie en vue d'une muséographie. Finalement, un consensus s'est rétabli, du sommet de la pyramide politique jusqu'à la base et qui œuvre pour la réhabilitation. Ainsi un secteur à sauvegarder couvrant toute la médina a été adopté, conformément aux dispositions de la loi 98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel. En outre, une étude urbanistique a été lancée, dénommée « Master Plan » pour la médina de Constantine, sous forme de dispositif opérationnel, vise la requalification physique du vieux bâti selon les spécificités locales en mesure de se consolider et de se renouveler dans le temps et dans l'espace (souple et flexible).

Des questions peuvent être posées sur la manière d'agir ; Quels sont les méthodes et mécanismes à opter pour entreprendre des actions d'interventions sur un tissu historique ? Et définir avec précision les opérations d'interventions qu'il faut adopter ?

La volonté de vaincre le climat, chez l'homme, est une forme d'épanouissement, et de développement qui se manifeste à travers son architecture typique à une zone climatique donnée. L'évolution scientifique a permis à des techniques plus élaborées d'apparaître au profit de l'homme, pour son confort physique et psychique.

L'homme possède donc la faculté d'intervenir sur l'espace pour le rendre thermiquement confortable. Cette adaptation thermique par des interventions régulatrices peut être obtenue à

¹ Chatelet Alain, Fernandez Pierre, Lavigne Pierre, *Architecture climatique : une contribution au développement durable*. Tome2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, France,Édisud, 1998 pp 44-51.

² Commission, composée des représentants de plusieurs directions de wilaya, des élus « A.P.C et A.P.W » et des associations. Elle est crée par décision de monsieur le wali en février 2003 et ayant pour mission : la réhabilitation et la sauvegarde du patrimoine de la médina de Constantine.

l'aide de procédés passifs et durables en combinaison avec des éléments architectoniques du lieu considéré tels que : Malkafs, tours de vents, cheminées solaire ...etc. C'est dans cette perspective, que nous allons tenter d'intervenir en prenant en considération, ce volet « climatique » et essayer de réfléchir comment réhabiliter avec ?

Le confort est une notion essentiellement subjective qu'il est difficile de définir d'une façon rigoureuse. En général, on peut dire qu'un individu est placé dans des conditions confortables lorsqu'il n'éprouve aucune « gêne » et aucune contrainte de nature à le distraire de ses activités du moment¹. L'absence de gêne ou de contrainte résulte de l'équilibre d'un ensemble de conditions physiologiques, biologiques et psychologiques qui se trouvent réunies à un moment donné.

Trop souvent, les concepteurs considèrent que l'humidité intérieure a peu d'importance alors qu'ils accordent plus d'attention à la température ambiante plus facile à quantifier, à comprendre et à maîtriser.

L'humidité est un des graves problèmes sanitaires de la dégradation de la qualité de l'air intérieur. Causé essentiellement par les infiltrations d'eau ou condensations et le manque de ventilation. Ces phénomènes provoquent le développement de moisissures et de bactéries au sein des matériaux, accompagné de l'émission de substances odorantes et irritantes. L'humidité de condensation augmente le risque d'infestation par les acariens² et favorise sur les surfaces qu'elle humidifie la prolifération fongique (moisissures) et bactérienne.

Elle influence donc le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort et la maladie sous forme d'allergies, de sensation de chaleur et de sécheresse des muqueuses des voies respiratoires ainsi que d'autres plus graves. Néanmoins, à des températures modérés, les effets thermiques sont moindres. La recherche de P.O. Fanger³ montre qu'avec une humidité d'environ 50%, il est possible de réduire les risques de rhumes, gripes et autres maladies des voies respiratoires⁴.

La qualité de l'air a, donc, une influence certaine sur un grand nombre de facteurs dont dépend la sensation de confort de l'individu. Les différentes fonctions de l'organisme humain qui sont directement influencés par la teneur en humidité de l'air sont essentiellement² :

La fonction respiratoire : Les faibles valeurs hygrométriques créent une gêne respiratoire qui apparaît aux environs de 30%.

La Sudation : Les échanges par évaporation de la sueur sont considérablement réduits lorsque le degré hygrométrique de l'air est supérieur à 60%.

Le sens olfactif : L'accroissement de l'humidité de l'air entraîne une diminution de l'acuité olfactive

¹ [Enligne] [http:// www. Inrs.fr/pdf](http://www.Inrs.fr/pdf), 2006

² Les acariens sont des animaux minuscules dont la taille est en générale proche de 0.5 mm

³ FANGER P-O, *Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*. New-York, Mc-Grew Hill, 1972

⁴ DEOUX .Pierre et Suzanne, *Le guide de l'habitat sain*, Médico Editions, andorra, 2002

Par conséquent le jugement des hygiénistes sur l'habitabilité ou l'insalubrité de la construction peut être basé sur la valeur du taux de l'humidité aussi bien si ses murs sont parfaitement secs, qu'ils sont imbibés d'eau. La salubrité d'un local d'après Massari. Giovanni (1971), Proviens toujours de la présence d'air humide et froid, même en été.

En outre, l'humidité détruit certains éléments constitutifs des murs et enlève à d'autres toute leur valeur décorative. Certains matériaux sont soumis, sous l'action de l'humidité capillaire, à un véritable processus de destruction, dont l'intensité varie en fonction de leur orientation et de leur disposition dans la structure de l'édifice.

La plupart des grès ou calcaires par exemple, s'ils se conservent bien dans la superstructure d'un bâtiment, se détériorent dans l'infrastructure, c'est-à-dire là où règne l'humidité¹

Par ailleurs, une humidité excessive augmente la consommation d'énergie et diminue le pouvoir isolant des murs ; vu que le refroidissement de l'air causé par l'évaporation superficielle du sol et des murs peut atteindre plusieurs degrés.

On sait que certaines populations méridionales exploitent ce phénomène physique pour se procurer de l'eau fraîche, en plein été, par l'emploi de vases poreux qui favorisent l'évaporation.

La perte de chaleur due aux murs périmétriques qui ne résistent pas peut atteindre la proportion de 1/3 environ dans les cas normaux² et des proportions beaucoup plus élevées dans les cas graves. Autrement dit, dans les cas normaux, un mur de 60cm d'épaisseur ne protège pas plus que s'il en avait 40. On pourrait donc dire, en quelques sortes, que l'humidité « amincit » les murs.

L'assainissement de l'air uniquement, dans ces vieux immeubles, est un traitement que les médecins qualifieraient de symptomatique, parce qu'il élimine le symptôme (l'humidité ambiante), mais non la cause du mal (l'humidité de la maçonnerie).

L'assainissement direct de la maçonnerie par des dispositifs spéciaux est, au contraire, un traitement causal, parce qu'il élimine les causes de l'humidité ambiante, en empêchant, selon les cas, soit l'infiltration de l'eau dans les maçonneries, soit son passage de la maçonnerie à l'air ambiant, soit encore, la condensation sur les parois du local.

Les méthodes à utiliser pour lutter contre l'humidité nécessitent des procédés faisant appel à des normes techniques universelle alors que dans les opérations de réhabilitations de ce bâti « exceptionnel », la question de prise en compte des exigences normative³ et réglementaire se pose de façon marginale en raison de sa forte valeur culturelle, historique, esthétique et d'authenticité.

¹ Collombet Raymond, *l'humidité des bâtiments anciens*, éditions du Moniteur, Paris, 1985

² MASSARI. Géovani. *Bâtiments humides et insalubres*, Eyrolles, Paris, 1971.

³ Dans les opérations de réhabilitation sur un tissu historique, il est difficile d'appliquer les normes standard et les textes réglementaires non spécifiques car il se pourrait qu'il y ait inadéquation entre ces derniers et les objectifs de qualité architecturale et urbaine.

En effet, ces éléments les plus remarquables du bâti ancien sont pour ainsi dire « hors normes » dans la mesure où, précisément, ce qui est en jeu dans leur sauvegarde c'est leur restitution dans leur état d'origine.

Les exigences normatives et réglementaires, principalement issues du champ de la construction neuve interfèrent alors avec le faisceau de valeurs associées au bâti ancien et il convient de s'interroger sur ce que l'on souhaite transmettre aux générations futures et quel équilibre il serait souhaitable d'atteindre entre préservation et mise à niveau suivant nos exigences de confort.

Les constatations directes des dégâts apparus, au niveau des monuments historiques de la médina, qui viennent juste d'être achevés en travaux de réhabilitation sont dues essentiellement à l'effet négatif du climat et en particulier l'humidité. Par conséquent, celles-ci peuvent nous renseigner sur la nécessité de prendre en compte les paramètres climatiques, entre autres « l'humidité », lors des études d'interventions, et en même temps, renforce notre vision de l'approche qu'on envisage à entreprendre.

Le rôle joué par ce facteur est souvent de caractère modifiant, parfois de caractère déterminant dans la qualité du cadre de vie.

Ce simple constat n'est pas fait dans une optique passéiste et affective, mais il permet de faire ressortir l'impacte réel de l'humidité sur la construction et de comprendre les interactions qui en résultent sur l'état de confort et de santé des usagers et leur comportement face aux exigences du lieu. Ainsi, plusieurs questions précises se posent quant aux problèmes cités précédemment :

Quels sont les principaux facteurs climatiques qui ont réellement provoqué la dégradation ?

Comment peut-on expliquer l'apparition de l'humidité et des moisissures dans les maisons vernaculaires ? S'agit-il seulement d'une humidité d'infiltration ?

Les hypothèses de cette étude, relèvent d'un constat et d'une observation qui s'articule autour d'une conviction personnelle alimentée par certaines expériences vécues dans le monde du travail. Et qui peuvent se formuler par :

Première hypothèse: Humidité provenant du sous-sol, par ascension capillaire¹ (par manque de drainage et d'étanchéité), ou infiltration de pluie battante.

Deuxième hypothèse : Taux d'humidité trop élevé dans l'air ambiant et condensation (dû à l'absence de ventilation et à l'insuffisance de la résistance thermique des parois)

¹ La capillarité est un phénomène physique très spécial qui semble contredire la loi de la pesanteur, selon laquelle le niveau du liquide doit être le même dans deux vases communicants. Dans un enduit capillaire, plus le conduit est étroit, plus le niveau du liquide monte.

1.3 Méthodologie de la recherche

Durant la recherche, ces hypothèses feront l'objet d'une vérification à l'aide des outils cités ci-dessous; Ainsi, les résultats finaux de ces investigations peuvent confirmer ou infirmer les hypothèses sus-citées.

Étant donné que La problématique, objet de cette étude, vise à comprendre l'effet de l'humidité sur les ambiances thermiques intérieures, le confort et la santé des occupants ainsi que les dommages causés sur les éléments constitutifs des maisons vernaculaire et le mode de réponse de ses habitants, dans un contexte de réhabilitation en vue d'une adaptation climatique. Il paraît ainsi, utile d'aborder les axes suivants : climat, l'homme, architecture et les opérations d'interventions sur le bâti. Selon les étapes suivantes :

Partie Théorique

Comporte : définitions, concepts et théories émergentes dans le domaine climatique plus précisément sur l'humidité, la ventilation, la bioclimatique ainsi que la réhabilitation. D'où : une Analyse typologique et morphologique (architecturale), une analyse statistique, quantitative des éléments du climat (Humidité, température) avec interprétations et une analyse bioclimatique seront élaborés afin de constituer une base de données permettant de définir les principales orientations à l'analyse critique.

Partie : investigation

Cette partie expérimentale est basée essentiellement sur un travail de terrain où des campagnes de mesures seront effectuées en deux périodes : l'été (le mois le plus chaud) et l'hiver (le mois le plus froid) dans une maison vernaculaire (échantillon) de style arabo-musulman, ouverte principalement sur le patio et présentant des problèmes d'ordre climatiques. Ceci, nous permet de procéder à une analyse «quantitative» thermique, afin d'aboutir à des résultats concrets et convaincants qui mettent en évidence l'impact réel des effets négatifs du climat en particulier l'humidité, aussi bien sur les constructions que sur les habitants .

Une simulation, par le moyen d'un programme de calcul informatique est envisagé pour, nous permettre d'imaginer des scénarios à travers les quelles, on propose des améliorations du taux d'humidité de l'air et des remèdes pour éliminer les condensations superficielles et interstitielles.

CHAPITRE 2 : CLIMAT ET CONFORT

2.1 Introduction

«Le système planétaire est en équilibre interne grâce à de multiples interactions et rétroactions. On dit qu'il est autorégulé et métastable ce qui n'exclut pas des fluctuations, des variations voire une évolution. L'atmosphère qui est à l'interface des différents éléments du système est le siège d'un grand nombre de transferts qui assurent la pérennité de la vie sur terre.»¹.

Alors, nous nous souvenons que la vie et la mort des êtres vivants sont conditionnées par le climat et qu'il suffit un déchaînement de l'un de ses éléments pour remettre en question tout l'équilibre biologique.

Depuis, son existence, l'homme a toujours cherché un abri pour se protéger contre les méfaits du climat et de la nature. Ce refuge lui permettait un certain confort et sécurité qu'il développa progressivement à travers le temps. Les solutions les plus remarquables, qu'il a adopté persistent encore jusqu'à aujourd'hui et témoignent d'un savoir faire ingénieux, que nos prédécesseurs ont pris soins de nous transmettre à travers l'architecture vernaculaire.

«L'architecture est déterminée par une série de facteurs dont un seul ne varie jamais, le climat. On s'est toujours protégé du soleil de la même façon soit en construisant des murs épais soit en se mettant à l'ombre.»²

En effet, Le climat joue un rôle déterminant dans la définition de la notion de confort et la détermination de la forme architecturale de la construction. Depuis l'antiquité, l'architecte essaie toujours de chercher d'intégrer le climat dans sa conception et delà en tirer profit : que se soit un rafraîchissement dans les pays chauds ou un réchauffement dans les territoires froids.

Certes, le climat n'est pas la seule composante auquel se réfère l'architecte lors de sa conception, mais il est l'élément critique de l'oeuvre globale. Les variations des radiations solaires, des températures, des humidités, des régimes des vents et des précipitations, constituent un environnement physique contraignant auquel l'architecte et le thermicien doivent répondre.

Cela nécessite avant tout une compréhension approfondie des éléments météorologiques, permettant ainsi d'appréhender leur effet, aussi bien, sur les constructions que sur le confort humain et son métabolisme.

L'architecture bioclimatique est considérée comme une solution adéquate, visant l'adaptation de l'être humain avec son environnement, parfois rigoureux. Et permet de réduire les dépenses d'énergie consacrée à la climatisation des habitations en utilisant les ressources naturelles du climat et offre une possibilité d'améliorer le cadre de vie.

¹ Tabeaud Martine, *la climatologie*, Armand Colin, , Paris, 2000. P: 8.

² Belmont Joseph, *les quatre fondements de l'architecture*, « le Moniteur, Paris, 1987.

La première partie du chapitre consiste à traiter et à comprendre l'ensemble des phénomènes climatiques par la définition de ses éléments, les échelles et la classification du climat.

La seconde partie est consacrée à la notion de confort et l'étude climatique, puis l'analyse bioclimatique de la ville de Constantine. Où des données météorologiques seront étudiées, commentées et interprétées afin de définir le type et les caractéristiques du climat local ; l'approche bioclimatique sera effectuée selon les méthodes de Givoni, Szokolay et Mahoney en vue de définir les stratégies d'interventions lors de l'élaboration d'un projet architecturale et ce dans le but d'optimiser ou d'atteindre le confort thermique durant les différentes périodes de l'année.

2.2 Définition du climat

Le mot climat vient du mot grec « *Klimat* », qui fait référence à l'inclinaison des rayons solaires par rapport à la surface de la terre¹.

Le dictionnaire le petit Larousse définit le mot : « climat », comme l'ensemble des phénomènes météorologiques (température, pression, vents, précipitations) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné.

Alors que, le géographe Sorre² désigne le climat comme : la série des états de l'atmosphère qui se produisent au dessus d'un lieu, dans leur succession habituelle.

Contrairement au temps qui est fonction d'éléments individuels tel que la pluie, le soleil, exercés en un temps particulier et sur une période assez courte. Le climat est le résultat sur plusieurs années de tous les phénomènes atmosphériques observés dans un endroit particulier³

On peut donc distinguer deux notions différentes qui caractérisent le climat à savoir :

- Le climat moyen
- La variabilité climatique

Si le premier indique l'ensemble des facteurs climatiques qui définissent l'état moyen de l'atmosphère dans une région donnée, le second correspond à la dispersion statistique de ces paramètres autour de leurs valeurs moyennes dans une période météorologique de référence⁴.

2.3 Facteurs déterminant le climat

Les principaux éléments qui déterminent le climat d'un lieu sont la latitude, l'altitude et l'éloignement de la mer :

2.3.1 La latitude et l'altitude

Pente, inclinaison, sont des mots qui définissent le terme climat chez les Grecs. Ces derniers croyaient que la terre s'élevait de l'équateur jusqu' au pôles. Déjà ils pensaient que les climats variaient selon la latitude. Leur classification s'est affinée par la suite mais elle reste exacte pour l'ensemble.

Les sommets de certaines montagnes sont aussi froids que les régions arctiques ; cette constatation s'explique par le fait que la température diminue régulièrement avec l'altitude, ainsi à 1000 m elle est de 7° moins élevée qu'au niveau de la mer⁵.

¹ Collection Microsoft Encarta, 2005

² SORRE. Maximilien, *les fondements de la géographie humaine, 1943*, in, [Enligne]http// :www.amazon.fr, 2006

³ Sealy A ,*introduction to building climatology*, published by the CAA, 1979

⁴ G. Guyot, *climatologie de l'environnement*, 2è édition, DUNOD, Paris, 1999. p : 287.

⁵ Keith. Lye, *notre planète la terre*, Hatier, Fribourg (Suisse), 1985. PP: 40-56.

Les montagnes sont également plus arrosées puisque l'air en s'élevant se refroidit et que la vapeur d'eau se condense en nuages qui donnent de la pluie. Mais il y a une grande disparité entre les versants d'une même montagne : le versant « au vent » c'est à dire celui où l'air est obligé de s'élever pour escalader la montagne, est très arrosé alors que le versant « sous le vent » est beaucoup plus sec car l'air qui redescend s'est déchargé de son humidité sur l'autre versant.

2.3.2 L'éloignement de la mer

Les continents se réchauffent plus vite que les océans mais à l'inverse ils se refroidissent plus vite qu'eux. Aussi dans les régions côtières, par beau temps, le sol se réchauffe pendant la journée, l'air chaud s'élève créant une zone locale de basses pressions vers laquelle souffle une brise de mer. Durant la nuit la situation inverse se produit ; la mer se refroidit moins vite que la terre, l'air chaud s'élève et une brise de terre souffle vers la mer.

La température des eaux des océans est déterminée en grande partie par les courants océaniques. Il y a deux sortes de courants, des courants chauds qui, depuis les régions tropicales, viennent baigner les régions tempérées et des courants froids originaires des océans arctique et antarctique dont l'action se fait sentir en certaines périodes, très loin vers le sud. Ainsi le Gulf Stream, formé dans la mer des Caraïbes, réchauffe les côtes de l'Europe occidentale en hiver et son action se fait sentir jusqu'en Norvège. A l'inverse, le courant froid du Benguela qui vient de l'antarctique refroidit la côte sud-ouest de l'Afrique.

L'effet adoucissant des océans s'estompe au fur et à mesure que l'on s'éloigne des côtes ; il est pratiquement nul au cœur des continents. Les régions continentales ont en général des climats extrêmes, très froids et secs durant l'hiver et chauds et orageux durant l'été.

Le climat de mousson est une variante du climat tropical avec des vents saisonniers qui soufflent l'hiver des hautes pressions continentales (Sibérie) vers les basses pressions océaniques et qui, l'été, soufflent depuis l'anticyclone stationné sur l'océan Indien vers le continent ; la mousson d'été chaude et humide provoque des pluies souvent bénéfiques, parfois catastrophiques.

2.4 Les climats dans le monde

La climatologie est une science récente qui donne une description et une explication de la répartition des climats.

La classification la plus fréquente admise est celle de Vladimir Koppen, météorologue soviétique du début du siècle ; elle est établie d'après des seuils thermiques et pluviométriques (fig.2-1) :

Koppen divise le monde en 05 grandes zones climatiques qu'il symbolise chacune par une lettre de l'alphabet¹ :

Type A : est le climat Tropical Humide : caractérisé par de fortes précipitations et une température toujours supérieure à 18°C .Parfaitement représenté au niveau de l'équateur, se dégrade au fur et mesure que l'on se rapproche des tropiques jusqu'à devenir un climat aride.

Type B : est le climat Désertique : Le total des précipitations annuelles est inférieure à 250 mm, la chaleur très forte et l'évaporation intense.

Type C : est le climat Tempéré : en général celui des régions comprises aux latitudes moyennes ; les critères sont une amplitude thermique annuelle modérée, une moyenne du mois le plus froid

¹ Keith. Lye, *notre planète la terre*, Hatier, Fribourg (Suisse), 1985. PP: 52-53

supérieure à -3°C , le plus chaud supérieur à 18°C . Ce climat connaît quatre saisons bien tranchées.

Type D : est le climat Continentale : froid avec de long hivers neigeux ; la température moyenne du mois le plus froid est inférieure à -3°C mais la température moyenne du mois le plus chaud est à peine supérieure à 10°C .

Type E : est le climat Polaire : la température moyenne du mois le plus chaud est toujours inférieure à 10°C .

Type H : est le climat de Montagne en raison de l'altitude, des données comparables à celles du climat polaire.

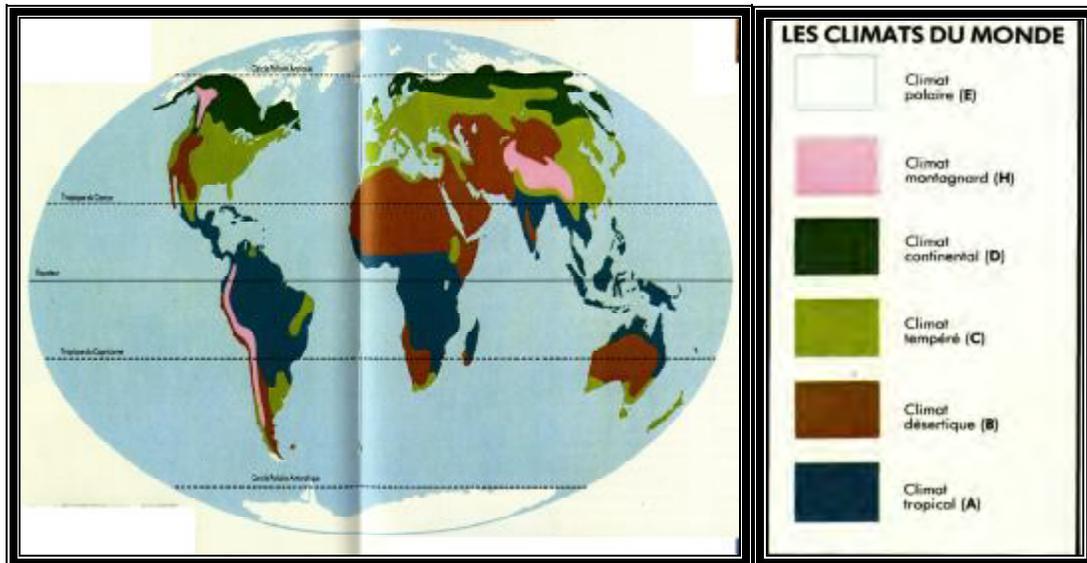


Fig. 2.1 : Classification des climats selon Köppen. **Source** : Keith Lye, 1985

2.5 Les éléments climatiques

Le climat est un état original de l'atmosphère pour la latitude de l'endroit considéré et de son substrat (continents, océans). Celui d'une région se détermine par la combinaison des paramètres suivants : la température de l'air, l'humidité de l'air, les vents, les précipitations et les radiations solaires (insolation et intensité du rayonnement solaire). Ces éléments sont quantifiables à l'aide d'instruments de mesures, et l'analyse de leurs valeurs permet d'évaluer la nature et la qualité du climat. En météorologie, on utilise aussi la pression en plus des facteurs énoncés précédemment, dans le but de prévoir l'état futur de l'atmosphère.

2.5.1 La température de l'air

La température est une grandeur très fluctuante, car elle résulte de plusieurs facteurs¹ : l'altitude, le rayonnement solaire incident, rayonnement émis par le substrat, éventuels apports issus de la mobilité de l'air, densité de l'air, quantité d'énergie consommée pour l'évapotranspiration.

¹ Martine Tabeaud, *la climatologie*, Armand Colin, 2000, Paris. P :28.

- Les variations de température sont la somme d'une variation saisonnière et de fluctuations journalières.
- les variations saisonnières sont fonction des variations saisonnières, du rayonnement solaire et de la position géographique du lieu par rapport aux mers.
- les fluctuations journalières sont fortement influencées par l'importance de l'ensoleillement.

La température est mesurée en degré Celsius ou en Kelvin à l'aide de thermomètres. Les relevés se font à l'ombre sous abri à intervalles réguliers fixes (toutes les 3 heures), au moyen de thermomètres à mercure, à alcool, à cheveux ou bien électroniques.

2.5.2 L'humidité de l'air

La présence de l'humidité dans l'air provient de l'évaporation à la surface des océans, des eaux intérieures, des nappes d'eau et de la transpiration des plantes et de tous les êtres vivants. Lorsque l'air est sec et chaud passe au dessus des océans par exemple, l'atmosphère pompe 1 à 2 mètres d'eau par an¹, alors qu'au-dessus du Sahara, la sécheresse limite l'évaporation, et qu'au-dessus des glaciers continentaux la sublimation (passage de l'état solide à l'état gazeux) est très faible (fig.2-2)

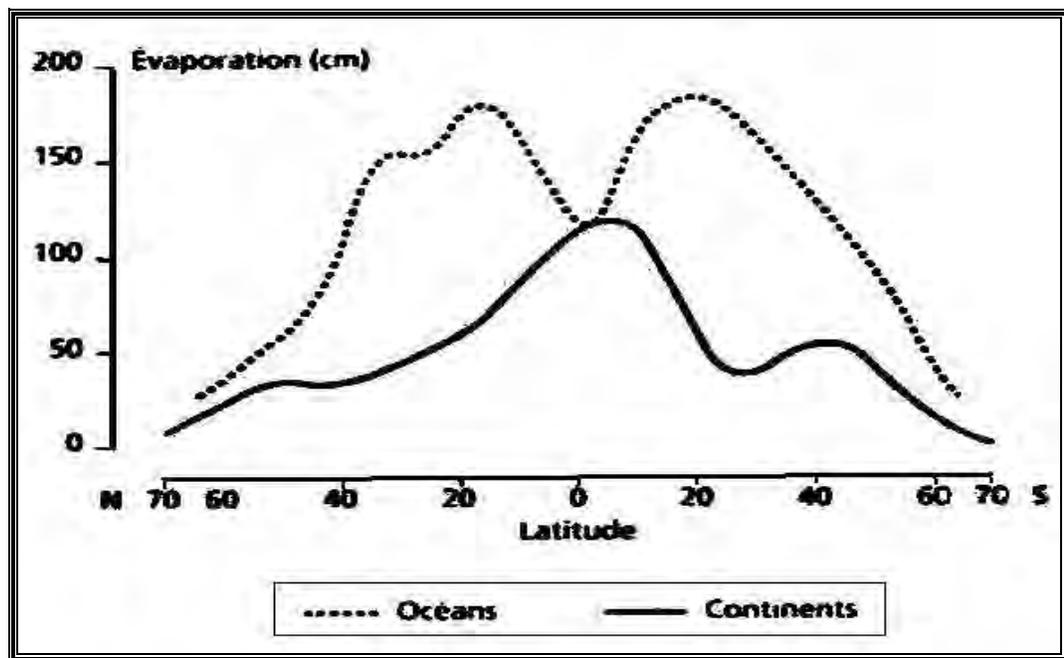


Fig. 2.2 : Évaporation moyenne annuelle (en cm) par latitude. Source : Martine Tabeaud, 2000

Dans la couche : « Troposphère » (fig.2-3), l'air contient toujours de l'eau sous forme de vapeur. La teneur en eau de l'air s'appelle l'humidité. À pression constante, plus l'air est chaud plus il peut absorber la vapeur d'eau (fig.2-4).

¹[En ligne], [http://www. Météorologie élémentaire, 2004](http://www.Météorologie élémentaire, 2004)

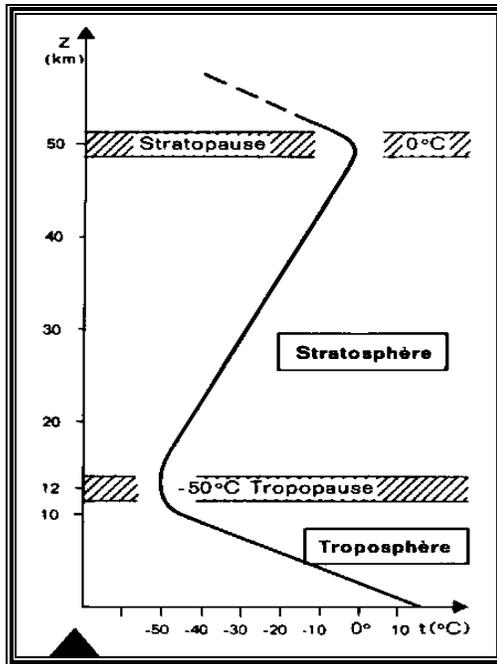


Fig. 2.3 : Subdivision de l'atmosphère
Source : ONM (Alger), 2004

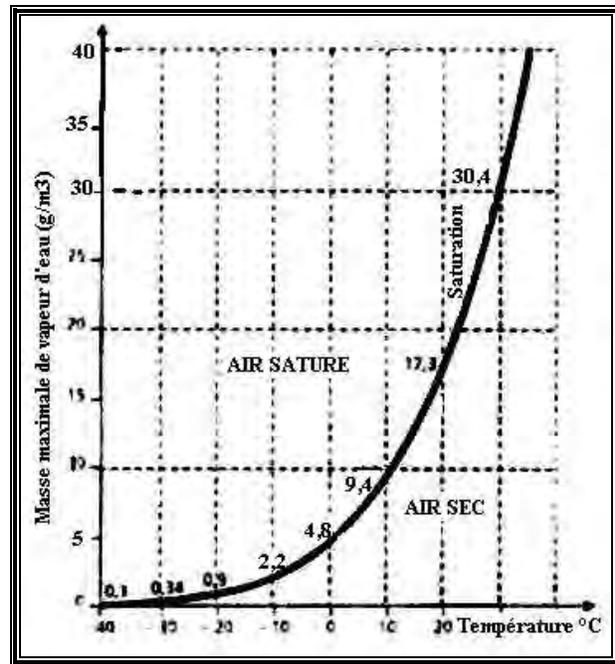


Fig. 2.4 : Capacité hygrométrique de l'air (à 1015 Pa)
Source : Martine Tabeaud, 2000

L'air humide est donc, un mélange de vapeur d'eau et d'air sec. Ainsi l'humidité peut s'exprimer de plusieurs manières :

- Humidité absolue (g/m^3)
- Humidité spécifique (g/kg)
- Humidité relative (%)

Les relations entre ces trois types et les instruments de mesures sont expliquées dans le chapitre humidité (pp.36-74)

2.5.3 Le vent

Le vent est le mouvement de l'air dans diverses directions par rapport à la surface de la Terre. Il s'effectue sur un plan horizontal, cependant les déplacements horizontaux ne peuvent être dissociés des mouvements verticaux. Les mouvements synoptiques sont verticaux, malgré leur faible intensité. Ils modifient de manière assez sensible l'état thermodynamique de l'air. Ces modifications résultent essentiellement des variations de pression subies par les particules ascendantes ou descendantes (fig.2-5).

Le vent est né de l'inégalité des pressions qu'on observe en différents lieux à un même instant, provoquées essentiellement par les différences de températures. Cet élément climatique est très instable, il est défini par : la vitesse (m/s), la direction et la fréquence.

Différents types d'instruments sont utilisés pour les mesures, allant de la simple girouette à l'anémographe le plus complet. Ces données sont représentés graphiquement sur un diagramme appelé : « Rose de vent ». L'appréciation de l'homme vis-à-vis de l'état du vent peut se baser sur l'échelle de Beaufort (tab : 2-1)

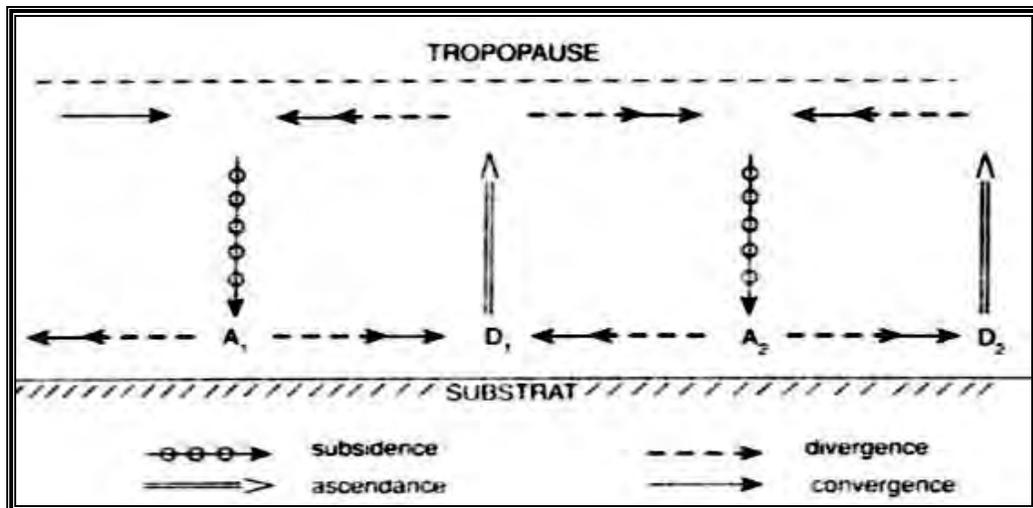


Fig. 2.5 : Mouvement verticaux et horizontaux. Source : Martine Tabeaud, 2000

2.5.4 Les précipitations

On appelle « précipitations » toutes les eaux qui se condensent dans l'atmosphère et tombent ou se déposent ensuite à la surface de la Terre : pluie, neige, grêle, rosée, etc.

Leur répartition à la surface du globe est très inégale : les zones les plus arrosées se situent dans la zone chaude, à proximité de l'équateur, et dans la zone tempérée, à l'ouest des continents. Les régions sèches se trouvent près des tropiques ainsi que dans les zones polaires.

Si la quantité des précipitations est inférieure à moins de 250 mm par an, la région devient désertique. Si au contraire la pluie est trop abondante, elle devient très dangereuse et dévastatrice.

Les précipitations tombées sur un bassin versant, s'écoulent linéairement vers une rivière. Elle s'infiltre aussi dans le terrain en proportion variable selon la pente et la nature du sol. Cependant, une partie d'entre elle sont interceptées et évaporées sans atteindre le substrat, d'autres sont pompées du sol pour être transpirées par les plantes et donc n'alimentent jamais l'écoulement. (fig : 2.6). L'unité de mesure est le mm, relevé à l'aide d'un pluviomètre. La quantité cumulée des mois de l'année permet de déterminer les saisons sèches et les saisons humides. Cet élément peut être considéré comme facteur déterminant dans la conception architectural : forme et inclinaison des toitures, drainage, types de matériaux ...etc.

2.5.5 Les rayonnements solaires

Le rayonnement solaire se divise en deux composantes (fig.2.7), on distingue:

- Le rayonnement direct (issu du soleil), est constitué par la proportion de rayonnement initial et qui parvient jusqu'à la surface de la terre (mesuré par les pyréliomètres)
- le Rayonnement diffus en provenance de la voûte céleste, qui est dû a la réflexion par les particules de vapeur d'eau, d'ozone, ou de poussière, et qui est reparti de façon uniforme à la surface de la terre.

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et le rayonnement diffus. Il est mesuré par un appareil appelé « pyromètre ». La durée d'insolation (mesuré par les héliographes), est exprimée en heure et l'intensité de la radiation solaire en watt / m²

Les valeurs des rayonnements directs et diffus réels affectant les parois d'une construction dépendent de la limpidité de l'atmosphère, de l'altitude, de l'humidité de l'air, de l'orientation, de la latitude et du mois.

La valeur du rayonnement le plus important est obtenue sur un plan horizontal et par ciel clair. Pour les parois verticales, le rayonnement dépend de l'orientation, mais également du coefficient de réflexion de l'environnement (albédo).

Vitesse du vent (m/s)		Caractéristiques du vent
Force	Z=2m	
2	1,5 - 3	Les visages ressentent le froid, les feuilles bruissent.
3	3 - 4,5	Feuilles et petits rameaux en mouvement permanent, le vent déploie pleinement les drapeaux, les cheveux sont dérangés, les vêtements amples battent au vent.
4	4,5 - 7	Les poussières et les papiers se soulèvent, les branches s'agitent, les cheveux se décoiffent.
5	7 - 9	Les petits arbres avec les feuilles oscillent, la marche est légèrement perturbée.
6	9 - 11	Les grosses branches se mettent en mouvement, le vent siffle dans les fils téléphoniques, la marche devient instable.
7	11 - 14	Les branches d'arbres très en mouvement, grosse difficulté à marcher contre le vent.
8	14 - 17	Les branches d'arbres se cassent, progression pedestre très difficile et dangereuse.
9	17 - 20	Risque d'être violemment projeté à terre.

Tab. 2.1 : Échelle de Beaufort. Source : P. Lavigne, 1994

2.5.6 La pression:

La pression atmosphérique en un point donné est déterminée par la densité des diverses couches de l'atmosphère située selon une même verticale. La pression est mesurée en millibars, à l'aide d'un baromètre. La distribution horizontale de la pression est variable. Elle joue un rôle fondamental en météorologie car elle est directement liée aux mouvements atmosphériques horizontaux, c'est à dire au vent. Selon, la direction verticale, la pression décroît quand l'altitude augmente. Ainsi, on a une décroissance de 1 mb pour une élévation de 8 m au voisinage du sol. Bien que le taux de décroissance ne soit pas constant, il est plus important quand l'air est froid que lorsque l'air est chaud¹.

¹ Étude de l'office nationale de météorologie, 2004.

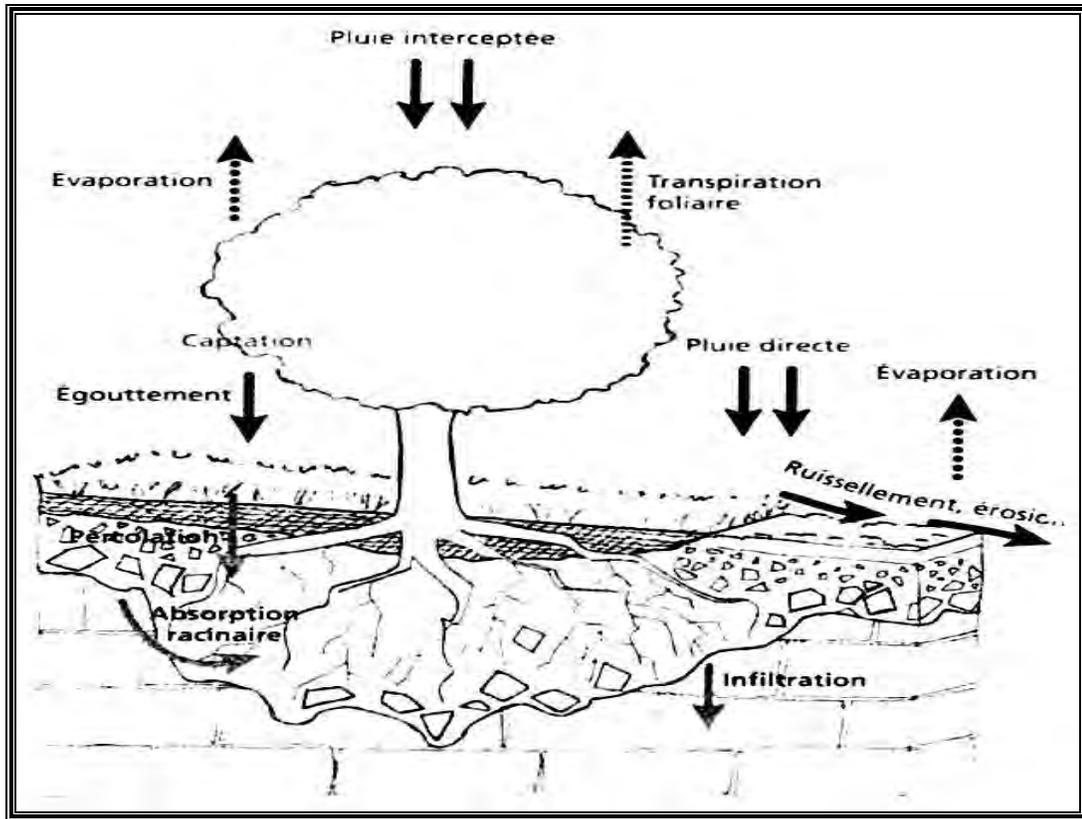


Fig. 2.6 : le cycle de l'eau. Source : Martine Tabeaud, 2000

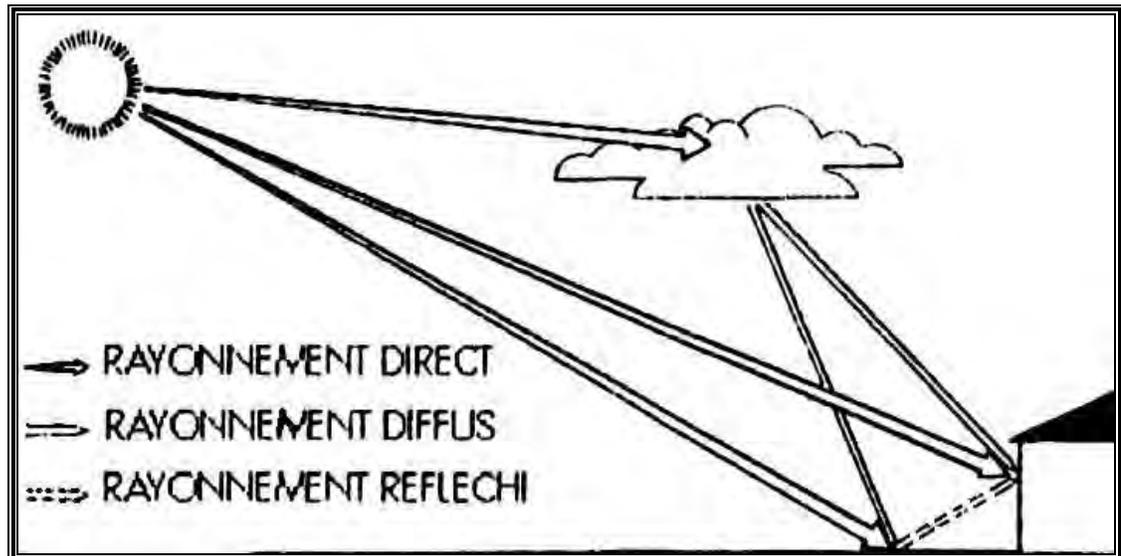


Fig. 2.7 : Les rayonnements solaires. Source: J-L . Izard, 1993

2.6 Les indices climatiques

Les indices climatiques permettent l'identification des climats et leurs classifications par l'établissement de critères de comparaison basés sur les données météorologiques. Cette notion a évolué quant les chercheurs ont introduit en plus, d'autres paramètres comme la nature des sols et le comportement de la végétation. Par conséquent, on peut distinguer deux grands types d'indices climatiques : les indices climatiques globaux et les indices climatiques de production¹.

2.6-1 indices climatiques globaux :

Les indices globaux sont issus de la combinaison de plusieurs données climatiques moyennes, souvent annuelles. Les résultats obtenus sont des variables synthétiques et représentatifs de la région considérés. La plus courante des combinaisons est celle qui intègre la pluie et la température ou température et humidité relative.

L'objectif de l'utilisation de ces indices est de classer les climats en fonction de leur « aridité » par les hydrologues et les géomorphologue tel que : Lang, de Martonne, Gaussen, Moral) puis par le botanistes, comme : Emberger, Thornthwaite.

Les indices qui font intervenir uniquement la pluie et la température sont :

- § Indice pluviométrique (Angot, début du siècle) ;
- § Facteur de pluie (Lang, 1920) ;
- § Indice d'aridité de de Martonne ;
- § Indice pluviométrique annuel (Moral, 1964) ;
- § Indice ombrothermique de Gaussen (1952) ;
- § Indice xérothermique de Gaussen ;
- § Quotient pluviothermique de Emberger (1930).

Les indices utilisant le pouvoir évaporant de l'air sont :

- § Indice d'évaporation de Transeau, (1905) ;
- § Indice de Meyer (1926) ;
- § « Moisture index » de Thornthwaite, (1948)

L'indice le plus courant et le plus largement utilisé par les géographes est celui de « de Martonne », du fait de sa simplicité et son efficacité. A cet effet, l'étude propose de l'appliquer ultérieurement pour la définition du climat de la ville de Constantine. La formule de l'indice de « de Martonne » est la suivante :

$$I_{DM} = \frac{P}{T + 10} \dots\dots\dots [1]$$

Avec,

- I_{DM} = indice d'aridité
- P = Précipitation de l'année (mm)
- T = température moyenne annuelle (°C)

Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température. D'où la classification des climats en fonction des valeurs de l'indice, selon De Martonne (tab : 2.2):

On remarque que les valeurs sont d'autant plus élevées que le climat est plus humide, et dans le cas contraire, le climat est plus sec.

¹ Guyot. G, *climatologie de l'environnement*, 2è édition, DUNOD, Paris, 1999.

Valeur de l'indice	Type de climat
$0 < I_{DM} < 5$	Hyper-aride
$5 < I_{DM} < 10$	aride
$10 < I_{DM} < 20$	semi-aride
$20 < I_{DM} < 30$	Semi-humide
$30 < I_{DM} < 55$	humide

Tab. 2-2 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de « De Martonne »
Source : G. Guyot, 1999

2.6.2 Indices climatiques de production :

Ces indices sont créés afin de nous renseigner sur la quantification de la production agricole pour une durée et dans une région donnée. Les facteurs utilisées sont : la pluie, la température, le rayonnement global, évapotranspiration, durée du jour. Voici, quelques indices les plus courants : Indice de Papadakis (1975), Indice héliothermique de Geslin (1947), Indice de Huglin (1978), Indice CA de Turc (1967), Indice ACRI de Williams (1983)¹.

2.7 Les échelles du climat

Le climat dépend de la latitude du lieu, des mouvements atmosphériques, de la nature du terrain et de l'environnement des sites. La climatologie distingue plusieurs échelles de climats à des grandeurs variées. Plus l'espace est étendue, moins est la description détaillée du climat, si la zone est restreinte, le climat sera décrit avec plus de détails. Cela veut dire que, les paramètres climatiques à relever pour une meilleure compréhension du climat seront nombreux dans les zones réduites.

Le tableau : (2.3), regroupe les différentes échelles du climat, allant du macro-échelle à la micro-échelle en passant par l'échelle locale :

Cette étude s'intéresse à la micro échelle ou microclimat et plus précisément à celui concernant le tissu urbain.

Les microclimats sont les climats des zones de faibles étendues, qui peuvent changer dans quelques mètres. Les facteurs qui influent sur le microclimat sont : La nature du sol ; La topographie ; Le couvert végétal ; L'orientation. Les constructions.

En effet, ce sont les bilans radiatifs locaux et les mouvements de l'air de faible amplitude qui jouent le rôle essentiel dans leur détermination.

Il existe plusieurs types de microclimats : la côte, plaines, plateaux, les vallées, bois – forêts et les villes. Nous allons essayer de détailler ce dernier type pour les raisons évoquées plus haut.

Certains chercheurs ont démontré que la température en ville est plus élevée qu'en banlieue, la différence peut atteindre 5°C. Le climat urbain est complexe car il est influencé par la combinaison de plusieurs facteurs, en voici quelques uns² :

- Ø rugosité du tissu, orientation des rues par rapport à la direction des vents dominants, forme et hauteurs des constructions influent sur la vitesse et la répartition des filets d'air. En général, les vents sont faibles dans les tissus denses³ .

¹ G. Guyot, *climatologie de l'environnement*, 2^e édition, DUNOD, Paris, 1999.

² Izard Jean-louis et Guyot Alain, *archibio*. Éditions Parenthèses, Roquevaire, 1979. p54

³ Chatelet Alain, Fernandez Pierre, Lavigne Pierre, *Architecture climatique : une contribution au développement durable*. Tome2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998 pp 44-51.

- Ø Émission de chaleurs par toutes les constructions utilisées (logements, équipements, usines...)
- Ø la diminution de l'albédo moyen des surfaces conduit à de forts échauffements sous le soleil.
- Ø Émission de polluants surtout par les véhicules de transport et l'industrie provoque l'augmentation des pluies et modifie la transparence de l'atmosphère (induisant un effet de serre).
- Ø Le revêtement des sols (asphalte, bétons et céramique), réduit les espaces verts et induit à une perturbation hydrique. L'eau devient rare et prive ainsi la ville d'un facteur de refroidissement naturel par consommation de la chaleur latente.

LES ECHELLES DES CLIMATS					
Echelle du climat	Ex. de mécanismes caractéristiques	Espace géographique	Extension horizontale	Extension verticale	Durée de vie des processus
Global	Radiation solaire, circulation générale	planète	20000 Km	40 Km	1an
Zonal	Flux de moussons,	Zone	5000 Km	15 Km	Quelques semaines
Synoptique	Anticyclone, perturbation	Portion de continent, océan	3000 à 1000 Km	15 Km	90 h
Régional méso climat	Ascendance Orographique Brise de mer tempête	'pays'	300 à 50 Km	12 à quelques Km	48 à 5h
Local Topo climat	Orage brise de versant, inversion thermique	Vallée, ville	5 Km	100 m	24 h à 1h
Microclimat	Turbulence	Site de clairière, rue	10 m	2 m	Quelques minutes

Tab : 2. 3 : Les échelles des climats. **Source** : Tabeaud. M, 2000

Les bâtiments dans la ville constituent des écrans ou obstacles solaires, l'ombre ainsi créée se projette sur les constructions voisines et espaces extérieurs, il en résulte une irrégularité dans l'ensoleillement (une succession d'ombre et de soleil) et par conséquent un microclimat particulier en un lieu donné. On observe le même phénomène, d'une part, au niveau des squares ou jardins publics, les passages couverts, rues, ruelles, places et placettes. Et d'autre part au niveau des constructions, surtout dans les espaces communiquant avec l'extérieur, tels que : patio, cour, préau, coursives, loggia, moucharabieh et terrasses. Tous ces espaces permettent la création de microclimats spécifiques, le concepteur peut ajouter d'autres éléments naturels ou architectoniques pour obtenir un effet thermique recherché. Par exemple, si l'occupant souhaite un rafraîchissement, l'architecte peut améliorer les conditions climatiques par l'implantation d'arbres ou aménagement de plans d'eau, si par contre l'ambiance thermique nécessite un apport d'énergie, le concepteur peut proposer la construction d'une serre par exemple. Le microclimat influe donc sur le confort thermique grâce à la modification des différents facteurs climatiques.

2.8 Le climat en Algérie

L'Algérie s'étend sur une superficie de 2.81.741 Km. Elle est comprise entre 18 et 38 ° de latitude Nord et entre 9 et 12° de longitude d'ouest vers l'est (fig.2-8).

Le territoire algérien est caractérisé par une diversité de zones climatiques, classés en trois catégories, à savoir :

- Ø Le « tell », concerne le nord du pays, dont le climat est typiquement Méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et relativement humide, et des hivers doux et pluvieux (400 mm à 1 000 mm de pluie par an)¹. L'amplitude thermique est très faible.
- Ø Les hauts plateaux, situés à l'intérieur du pays, caractérisés par un climat continental, dont les précipitations sont en moyenne comprise entre 200 et 400mm. La période froide (hiver) est caractérisée par des températures basses qui peuvent atteindre 0°C, Alors que, la période chaude (été) est sèche pendant laquelle la température peut atteindre parfois 40°C.
- Ø Le Sahara : s'érige sur une très grande étendue par rapport au tell (environ 4/5 de la surface totale). située au sud, le désert est caractérisé par un climat aride : chaud et sec dont les précipitations ne dépassent pas 130mm/an. La période froide est très courte. L'amplitude thermique y est très importante (de 49 °C le jour à moins de 10 °C la nuit). Le rayonnement solaire y est très intense et dépasse parfois le 900w/m². les vents sableux, secs et très chaud sont forts et fréquents, le plus célèbre est le siroco, qui peut atteindre le continent européen.



Fig.2.8 : carte géographique de l'Algérie. Source : Collection Microsoft Encarta, 2005

2.9 Le climat à Constantine

2.9.1 Introduction

Constantine est une ville de l'intérieur du pays « Algérie », élevée de 687,00 m par rapport au niveau de la mer.

C'est une métropole et capital de l'est algérien depuis des siècles, dont la commémoration de ses 2500 ans a été célébrée en juillet 1999.

¹ Collection Microsoft Encarta, 2005

Située au Nord-est algérien, Constantine est localisée à une latitude de : 36°, 17' Nord et une longitude de 6°, 37' Est (fig.2-9). Elle s'érige sur une superficie de : 5832 hectare avec une population de : 800.000 habitants.

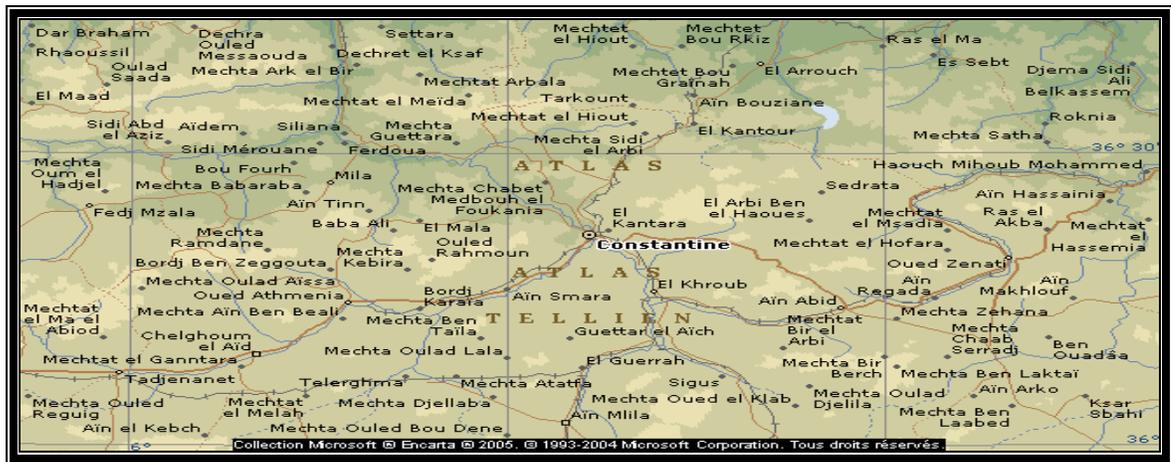


Fig.2.9 : position géographique de Constantine. **Source** : Collection Microsoft Encarta, 2005

2.9.2 Analyse quantitative du climat de Constantine :

a) Température

L'interprétation des données climatiques de la ville de Constantine (tab : 2.4), illustrée sur les courbes (fig. 2.10), révèle que, les plus hautes valeurs de températures marquent la période estivale « été » : La température moyenne maximale annuelle du mois le plus chaud est de : 26,5°C en « Août », et ce, pendant la décennie allant de 1990 à 2000 ; alors que, les températures maximales du même mois varient de 31,2°C à 37,4°C¹.

Les plus basses sont enregistrées en hiver, La température moyenne minimale annuelle du mois le plus froid est de : 7,2°C en « Janvier ». Sachant que, les fluctuations des températures minimales oscillent entre : -0,3°C et 5,4°C au mois de « janvier », durant la dernière décennie. En général, les températures mensuelles fluctuent d'une façon régulière. La température moyenne annuelle est de 16°C.

Tandis que, les variations des amplitudes mensuelles sont faibles, l'amplitude annuelle est de l'ordre de 18,45°C. C'est ce qui différencie les deux périodes de l'année :

Une période très chaude et sèche (précipitation faible) (tab : 2.4), qui couvre pratiquement les mois suivants : juin, juillet, août, septembre.

Une période froide, relativement plus longue et pluvieuse, couvre les mois suivants : Novembre, décembre, janvier, février, mars.

Nous constatons que Le mois d'octobre s'aligne avec les mois d'avril et Mai, caractérisés par les températures moyennes « de confort » situés entre 12 et 18°C¹.

¹ Station météorologique de Constantine, 2005

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	sept	Oct	Nov	Dec
Temp moy min [°c]	2.8	2.8	4.6	6.3	11.1	15.5	17.8	18.9	16.1	12.1	7.3	4
Temp moy max [°c]	11.6	13.3	15.9	18.4	25	30.1	33.6	34.1	29.3	23.2	17.1	12.9
Temp moy mens [°c]	7.2	8.05	10.2	12.3	18.1	22.8	25.7	26.5	22.7	17.6	12.2	8.45
Hum.rel moy max [%]	93.3	94.3	92.5	91.2	87.3	82.5	74.2	75.6	87.66	90.66	91.2	92.7
Hum.rel moy min [%]	56.6	53.2	44.7	41	37	30.5	25	25.5	35.66	43	49.2	55
Hum.rel moy mens [%]	75	73.7	68.6	66.1	62.2	56.5	49.6	50.5	61.66	66.83	70.2	73.8
Précipitations [mm]	60.4	94	64.1	47.6	41.9	14.9	8.56	8.4	26.83	46.92	43.6	47
Rad sol moy mens [hr]	9.91	10.1	11.8	12.9	13.9	14.4	14.2	13	12.31	11.11	10.2	9.65
Energie incid [wh/m²]	3636	4902	6372	7734	8562	8818	8524	7772	6592	5162	3874	3254
Vitesse moy vent [m/s]	2.3	2.6	2.6	2.7	2.3	2.4	2.2	2.2	2.2	2.2	2.6	2.9
Orientation des vents	↗	↘	↘	↘	↘	↓	↓	↓	↓	↘	→	↗

Tab. 2. 4 : données météorologiques de Constantine. Source : Station météorologique de Ain el Bey, 1990-2000

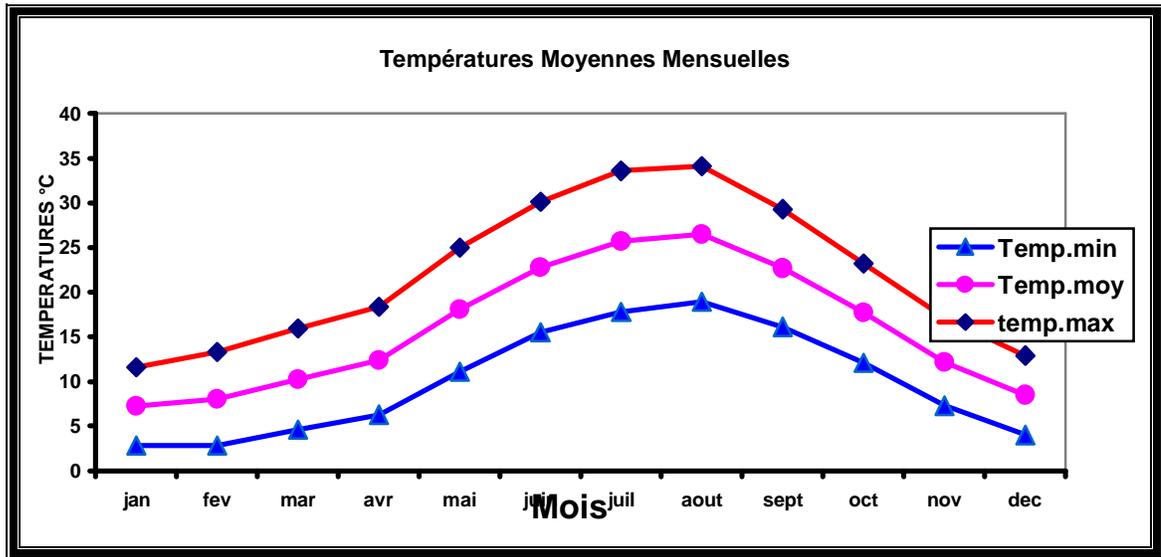


Fig.2.10 : températures moyennes mensuelles (1990-2000). Source : auteur, 2005

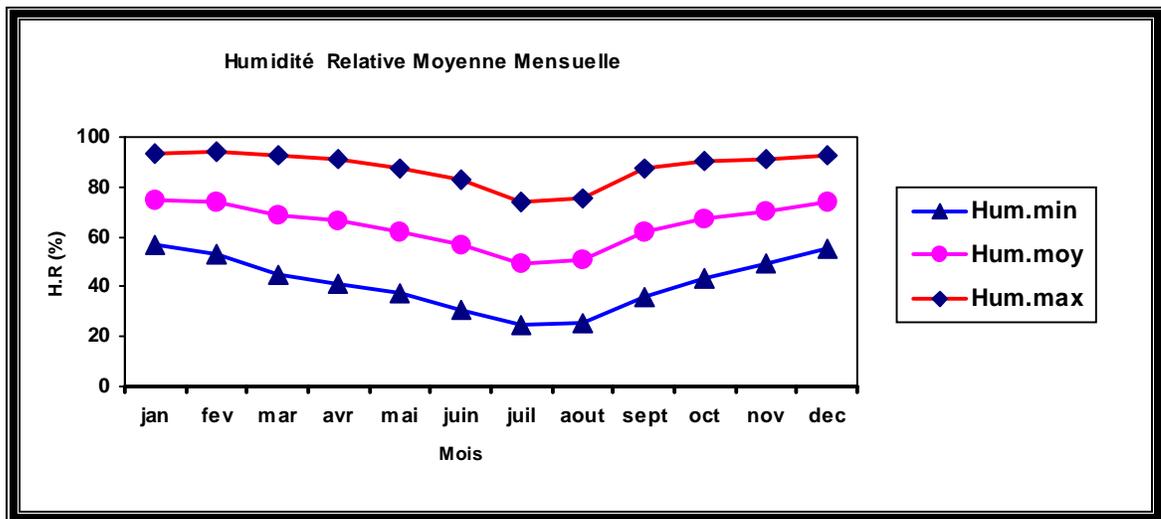


Fig. 2.11 : Humidités relatives moyennes mensuelles (1990-2000/météo). Source : auteur, 2005

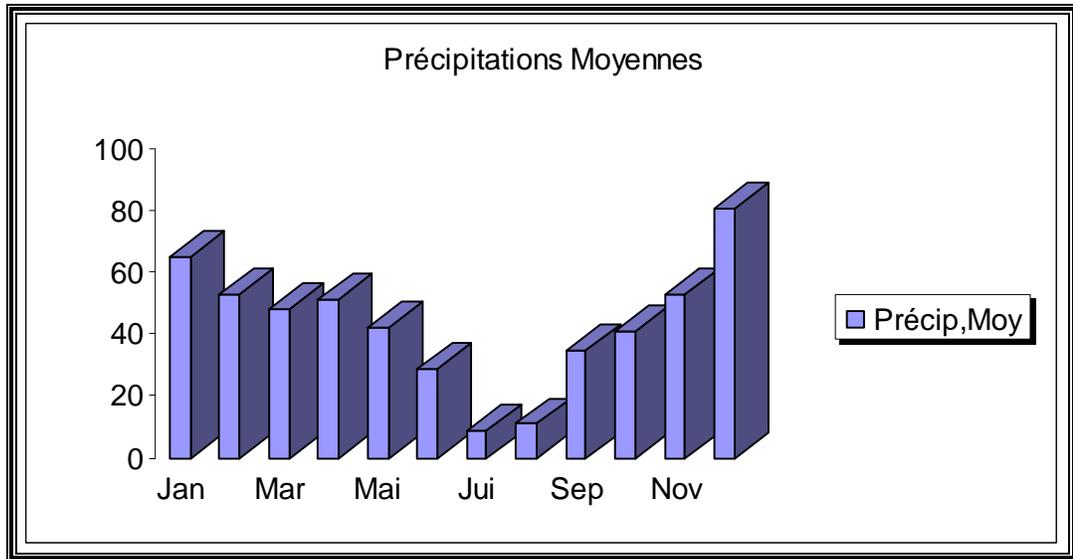


Fig.2.12 : précipitations moyennes mensuelles (1990-2000/ météo). Source : auteur, 2005

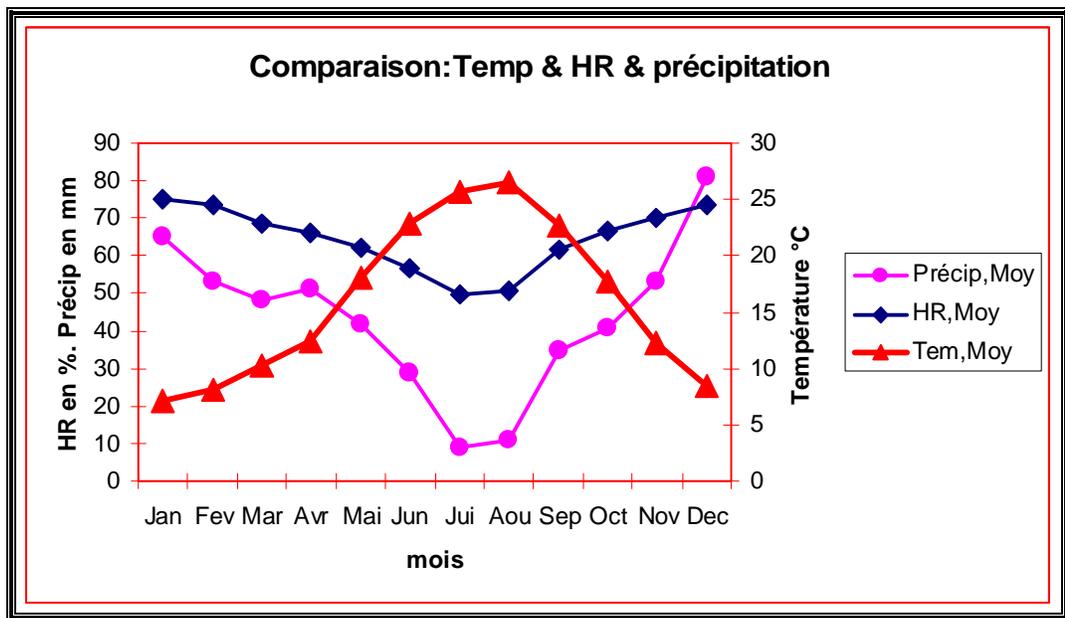


Fig.2.13 : Variation des températures, humidités relatives et précipitations (moyenne mensuelle/ annuelle) Source : auteur, 2005

b) Humidité relative

La courbe de l'humidité relative, suit une allure contradictoire à celle de la température (fig.2.13). Les plus importantes valeurs (supérieur à 70%) sont enregistrés pendant l'hiver et les plus faibles (environ 50%) pendant l'été. Ce qui indique que l'hiver est très humide. Par ailleurs, le taux maximal, moyen, annuel du mois le plus humide (février, 1995-2000) est de 94,33%. Cependant, le taux minimal, moyen, annuel du mois le plus sec (juillet, 1995-2000) est de : 25%. Ceci permet aussi la distinction de deux périodes (sèche et humide).

Il est à noter que, le taux moyen annuel est de 64,5%, considéré comme un taux très proche de celui du confort d'où son rôle important dans l'adoucissement du climat.

c) Précipitations

Les variations de la courbe des précipitations illustrés sur la figure N° :2-13, suit le même rythme que celui de l'humidité par contre elles évoluent à l'inverse des fluctuations de la température. Nous constatons que lorsque les précipitations sont faibles, le taux de l'humidité régresse, et vice versa. Alors qu'en ces moments la température augmente.

L'allure de l'histogramme indiquant la répartition des précipitations annuelle (fig : 2-12) montre clairement une période de sécheresse qui se déploie sur quatre mois : du mois de juin à septembre. L'autre période est marquée par des précipitations moyennes et relativement appréciables surtout pendant l'hiver, où nous assistons à des averses. La quantité moyenne annuelle est de : 518mm (tab.2-4).

d) Vents et directions des vents

Les vents dominants proviennent de la direction Nord et Nord-ouest (tab.04), soufflent pendant l'hiver donc sont froids et humides avec des vitesses moyennes qui varient entre 2,2 m/s à 2,9 m/s (fig : 2.14). La vitesse moyenne annuelle est de 2,4 m/s avec une fréquence de 45%. En automne et au printemps et cinq à dix fois au moins par an, souffle le vent de sable provenant du Sud-Ouest appelé « SIROCCO » donc chaud et sec.

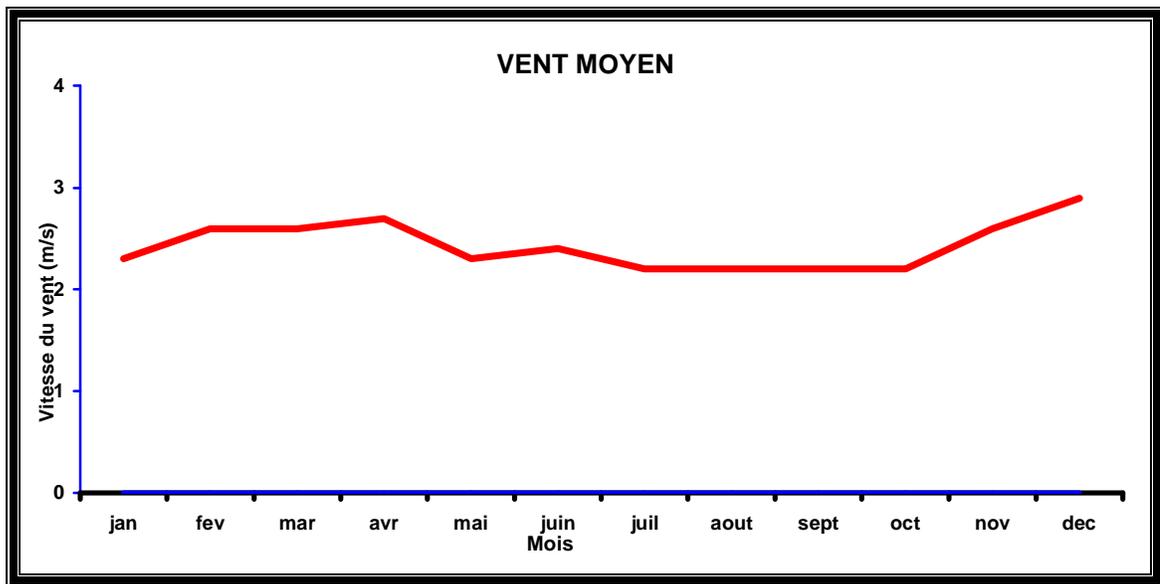


Fig. 2.14 : vents moyens mensuels (1990-2000/météo). Source : auteur, 2005

2.9.3 Calcul de l'indice d'aridité

La formule de « De Martonne » nous permet de déterminer l'indice d'aridité, comme suite :

$$I_{DM} = \frac{P}{T + 10} = 19,92 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Avec,

- I_{DM} = indice d'aridité
- P = Précipitation de l'année, soit : 518 mm.
- T = température moyenne annuelle, soit : 16°C.

$$I_{DM} = 19.92, \quad \text{Donc : } 10 < I_{DM} < 20$$

De ce fait, et selon la méthode de classification des climats par « de Martonne », nous pouvons dire que le climat à Constantine est : «Semi-aride ». Ce climat est défini par deux saisons seulement avec une courte saison de confort, où les températures et les humidités sont portées à l'extrême et inversement les unes des autres : chaudes et sèches en été, froides et humides pendant l'hiver. Tandis qu'il était un climat « tempéré », caractérisé par les quatre saisons (hiver, printemps, été et automne) pendant les dernières décennies (60-70)¹.

2.10 Notion de Confort Thermique dans les habitations

Dans l'habitat, la création de l'abri prime, le but est l'élaboration d'un milieu propice à la vie, améliorant le climat rude de l'extérieur. En effet, l'homme est un être vivant fragile. Un refuge contre les dangers est pour lui, une nécessité vitale. Par conséquent, l'habitation doit, avant tout, assurer les fonctions essentielles tels que : la protection des occupants contre le froid, la chaleur, les vents, les pluies et tous les aléas naturels (séismes, inondations...etc.).

Nos prédécesseurs ont essayé de s'adapter au climat, en créant des conditions de confort optimum dans leurs logements en se basant sur l'héritage expérimental dans le domaine de la construction.

Le confort climatique est atteint lorsque dans certaines conditions thermiques plus de 50% des gens ne connaissent pas leur environnement climatique, c'est-à-dire qu'ils ne ressentent pas le besoin de réajuster leur climat²; en d'autres termes le confort thermique est une sensation qui peut être synthétisée en deux mots : « pas trop chaud » ni « trop froid ».

Alors, et d'une manière générale, le confort se définit comme l'état de bien être physique et moral. État où, l'organisme humain se trouve en parfait équilibre avec l'environnement où il se trouve, qu'il soit en activité ou au repos.

« Le confort thermique n'est pas une notion absolue, il s'apprécie différemment selon la société et pour une société suivant les individus »³

La notion de confort est donc une impression subjective et assez complexe du moment qu'elle dépend de plusieurs facteurs : physiques et physiologiques. Cette notion de subjectivité renferme en elle-même un ensemble d'éléments objectifs, telle que : les réponses physiologiques.

2.10.1 Métabolisme de l'organisme humain

Le métabolisme est le processus par lequel les aliments digérés par l'homme et en combinaison avec l'oxygène donne l'énergie nécessaire pour le fonctionnement des divers organes du corps⁴. Ces derniers sont responsables des activités volontaires et involontaires (circulation sanguine, respiration, transpiration...etc).

La valeur maintenue au repos total et en position couchée (dans des conditions de confort), est prise comme métabolisme de base. En d'autres termes, c'est la quantité de chaleur que doit fournir le corps humain pour entretenir la vie est d'environ : 60-70 Kcal/h. le tableau : 2.5 donne

¹ Office nationale de météorologie, Alger, 2004

² [Enligne] : [http:// www. Inrs.fr/pdf](http://www.Inrs.fr/pdf), 2006.

³ Dard Philippe, *le confort ente la norme et le caprice*, Bâtiment et énergie, N° 60, janv-fev, 1990

⁴ Givoni B, *L'homme, L'architecture et le climat*, édition le Moniteur, paris, 1978, p.41

quelques métabolismes de base, pour un homme adulte accomplissant différents travaux, en Kcal/h par personne³.

Métabolisme de base	60-70
Repos assis	90-100
Activité sédentaire	100-120
Marche à 4 km/h	210-270
Marche à 7 km/h	300-400
Marche à 4 km/h sur pente 10 %	340-480
Travail industriel léger	150-300
Travail industriel modéré	300-480
Travail industriel lourd	450-600
Travail très lourd	600-750

Tab.2.5 : Métabolisme de base. **Source :** B. Givoni, 1978

Quant la « machine humaine »¹ marche correctement, la température intérieure sera constante aux environs de 37°C (±0,8). Cette température est le résultat de la production de la chaleur interne et des conditions d'échanges de chaleur entre le corps et l'ambiance. Cet état d'équilibre est assuré par des mécanismes de thermorégulation, intervenant dès que les conditions d'ambiance tendent à modifier la température interne : si le sujet est dans une ambiance froide, un frissonnement apparaîtra pour augmenter la production de chaleur, ainsi le corps tend vers un équilibre thermique qui peut se traduire par une activité physique comme se frotter les mains par exemple. Toutefois, dans une ambiance chaude, les vaisseaux sanguins se dilatent pour augmenter les échanges, ainsi une influence considérable se produit sur l'augmentation du flux sanguin et la sudation, car l'évaporation de la sueur absorbe de la chaleur⁴.

Ces réactions aux excitations thermiques ont pour objectif de faciliter l'établissement de l'équilibre thermique, toutefois et dans certaines conditions extrêmes, Le corps sera incapable d'établir cet équilibre.

La formule générale qui décrit l'échange thermique entre le corps et son environnement est :

$$Q = M \pm R \pm C - E \dots\dots\dots [3]$$

Où,

Q : modification du contenu calorifique du corps, qui reflète les variations de la température moyenne du corps

M : le métabolisme

R, C, E : respectivement, échanges de chaleur par rayonnement, convection et évaporation.

La régulation physique de la température du corps est fonction de plusieurs facteurs qui ajustent la quantité de chaleur que l'organisme va évacuer. Sur la totalité de l'énergie produite par le corps humain, seulement 20 % est utilisé, les 80% en excès se dissipent dans l'ambiance thermique où se trouve le corps. Une dissipation trop forte entraîne une baisse de la température du corps et, à la limite, des troubles physiologiques. Une dissipation trop faible entraîne une hausse de la température et, à la limite un coup de chaleur². Cette émission de chaleur s'effectue selon les modes de transfert³ suivants (fig.2.15), (avec une approximation relative due à différentes pertes mineures) :

- 30 % s'échappent par convection (en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air) ;

¹ Izard Jean-louis, *Architecture d'été*, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1993. p.7

² Hernot. D et Porchet. G, *Thermique appliquée aux bâtiments*, les éditions parisiennes, paris, 1984

³ Massari G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971. p 109

- 43 % s'échappent par radiation (phénomène dépendant exclusivement de l'écart de température existant entre la peau et les surfaces environnantes : parois, mobilier, plancher et plafond).
- 21 % s'échappent par évaporation de la sueur sécrétée par la peau, (en fonction de l'humidité relative de l'air et de la vitesse de ventilation).
- Accessoirement, la conduction¹.

La chaleur qui s'échappe par convection est celle qui est véhiculée par l'air venant au contact de la peau. Les échanges de chaleur par convection seront plus intenses dans un air en mouvement qu'en air calme. Étant donné que, la température de la peau est comprise entre 31 et 35°C, si la température de l'air est égale à la température de la peau, le phénomène s'annule.

La chaleur perdue par rayonnement sera d'autant plus élevée que les parois environnantes seront plus froides. Toutefois, si la température du corps est inférieure à celle de son environnement (parois ou radiation solaire directe), le phénomène s'inverse : c'est le corps humain qui capte la chaleur

Du point de vue du rayonnement, le ciel doit être considéré comme paroi. La sensation de fraîcheur que l'on ressent à l'extérieur, par une nuit claire, vient en partie du rayonnement du corps vers le ciel, dont la température radiante moyenne est inférieure à celle de l'air ambiant³.

L'émission de chaleur par évaporation se crée à la surface de la peau dès qu'il y a sudation, et sous l'effet de la respiration aussi. L'évaporation est accélérée quand l'air ambiant est plus sec, c'est-à-dire son humidité relative est basse. Par contre, elle devient plus difficile si le taux d'humidité est très élevé, et entraîne, une stagnation de la sueur sur la surface de la peau, alors qu'en air chaud et sec, la peau reste sèche malgré la sudation.

Les pertes de chaleur par conduction interviennent notamment lorsqu'une partie ou la totalité d'un individu légèrement habillé se trouve en contact direct avec une paroi solide (pieds nus sur un sol conducteur : carrelage, marbre, béton. Une certaine quantité de chaleur passe par conduction de la peau des pieds par exemple, vers le sol.

La quantité de chaleur est d'autant plus faible que la surface de la peau en contact avec la paroi est plus petite.

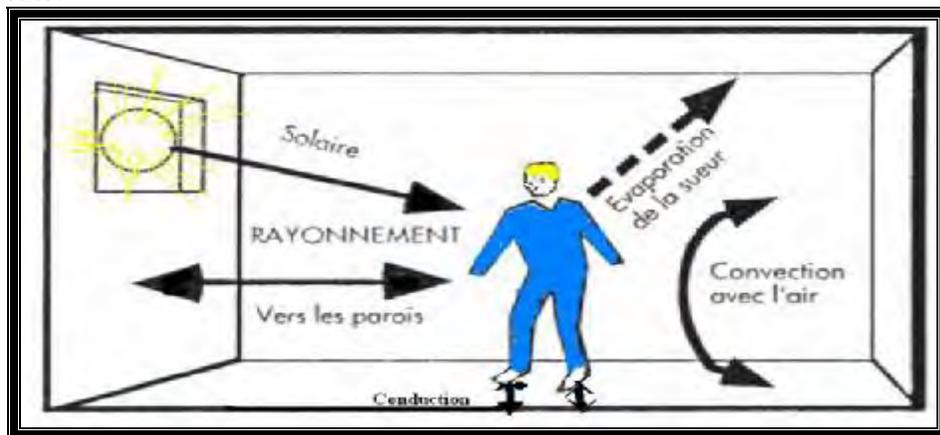


Fig. 2-15 : déperdition de l'organisme humain. Source : J-L . Izard , 1993 (avec modification de l'auteur)

¹ Dreyfus.Jacques, *Le confort dans l'habitat en pays tropical*, Eyrolles, Paris, 1960, p.33

2.11 Conditions de confort

Bien que l'acclimatation est l'une des capacités que l'homme possède afin de s'adapter aux conditions climatiques fluctuantes¹. Néanmoins, Il existe des conditions particulières pour les quelles, il éprouve une sensation de bien-être. La zone de confort définit, justement, les limites dans lesquelles, le corps se trouve en équilibre thermique, et ce quelques soient les conditions atmosphériques.

Il est très difficile d'avoir une zone de confort « parfaite », car plusieurs facteurs rentrent en jeu en même temps, en plus de la température de l'air et du taux d'humidité, la sensation du confort est influencée par :

- les vêtements;
- santé et constitution physique du corps;
- âge et sexe;
- bruit, éclairage, couleurs ;
- alimentation;
- types de travail et relations humaines;
- considérations psychologiques.

Toutefois, les chercheurs ont essayé d'adopter les paramètres les plus déterminants d'une ambiance thermique afin d'arriver à une zone de confort optimum, et ce en négligeant certains facteurs énumérés ci-dessus.

Tizzano a dit « dans un local à parois froides, la température de l'air peut être un critère de confort absolument faux »². Il est bien connu que notre sensation subjective de chaud et de froid, de bien être ou de malaise, ne dépend pas uniquement de la température de l'air indiquée par le thermomètre à mercure traditionnel, mais aussi du degré hygrométrique de l'air, de l'état de repos ou d'agitation de l'air même, de la température radiante moyenne et enfin des températures des surfaces qui nous entourent, si cette température est différente de celle de l'air. Bref, le thermomètre ordinaire n'indique qu'un seul des facteurs de la température ressentie, autrement dit celle qui, pour nous, est la vraie température, que Missenard et l'école française ont appelée la température résultante.

Ces paramètres (déterminants) influent, directement, sur le confort hygro-thermique qui caractérise la facilité avec laquelle le corps humain peut éliminer la quantité de chaleur qu'il dégage vers son environnement.

À cet effet, il semble nécessaire de clarifier certains paramètres qui n'ont pas été touchés dans la présente étude.

§ La température radiante moyenne

Cette température est mesurée à l'aide d'un thermomètre ordinaire dont le réservoir est placé dans une sphère de 10 cm de diamètre en noir (thermomètre globe).

La température radiante est donnée par la relation suivante³ :

$$T_r = t_g + 2,8 (t_g - t_a) V. \dots\dots\dots [4]$$

¹ [Enligne], <http://www.inrs.fr/pdf>, 2006

² Tizzano. A. In, Massari. Giovanni. , *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971.p.108.

³ Centre de recherche en architecture et urbanisme, *village solaire intégré*, OPU, Alger, 1983

Avec,

t_g = température radiante relevée sur thermomètre globe [°C]

t_a = température de l'air ambiant [°C]

V = vitesse de l'air [m/s]

§ Le degré hygrométrique de l'air

- **La température humide** : elle se mesure à l'aide d'un psychromètre qui est un appareil Composé d'un thermomètre ordinaire et un thermomètre mouillé montés sur un même Support, indiquent les valeurs, communément appelées : température sèche et Température humide.

Le taux d'humidité peut être déterminé à partir d'un diagramme psychrométrique.

«La capacité de rétention de la vapeur par l'atmosphère est fonction de sa température. Celle-ci augmente avec la température jusqu'à saturation »¹.

- **l'humidité relative** : est une mesure de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air exprimée en pourcentage de la quantité maximum de vapeur d'eau que l'air peut renfermer à la même température. Et peut être exprimé par le rapport de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale (cf, chapitre humidité). Du point de vue physiologique, il semble que la pression de la vapeur de l'air est la manière la plus convenable pour exprimer les conditions d'humidité. Ceci du fait que le taux d'évaporation du corps est proportionnel aux différences de pression de la vapeur entre la surface de la peau et l'air ambiant¹.

- **la température résultante** est fonction de : la température radiante moyenne, de la température humide et de la vitesse de l'air, d'où elle permet de fixer un niveau de confort dans une ambiance donnée.

La figure (2-16), représente la zone de confort pour des températures résultantes sèches t_{rs} comprises entre 19 et 23°C (axe des abscisses). L'axe des coordonnées porte les températures superficielles des parois t_p pour une température extérieure t_e de (-10 °C)

Lorsque un individu est satisfait de l'ambiance thermique où la température des parois est à 20-22°C, par exemple, cela veut dire que, la température de l'air est très proche de la température moyenne des parois.

Dans le cas où, la température des parois est nettement inférieure à la température de l'air, une température ambiante de 20°C sera ressentie comme trop froide et devra être relevée pour obtenir une même sensation de confort. Cette température est appelée (en air calme) : température résultante sèche, qui représente la moyenne entre la température de l'air et la températures superficielles des parois.

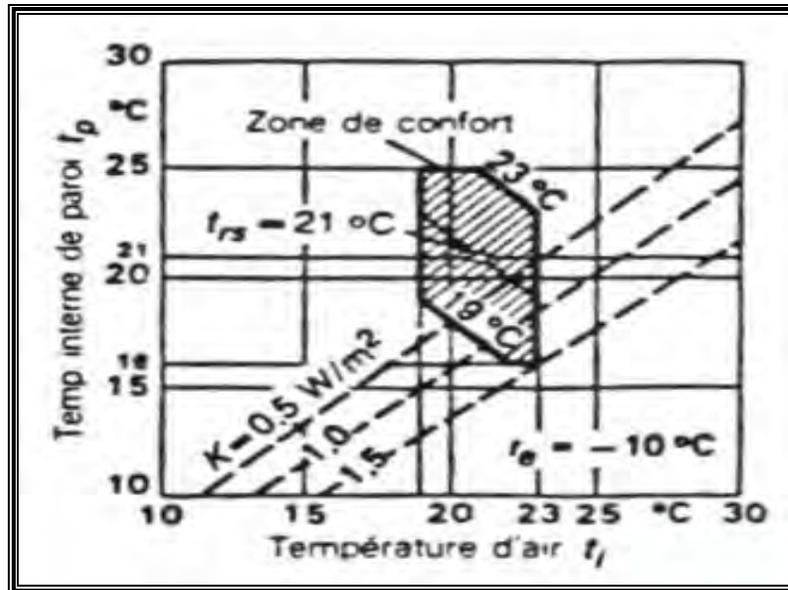


Fig.2.16 : zone de confort en fonction des températures sèches (trs). Source : Recknagel, 1986

2.12 Outils d'aides à la conception architecturale bioclimatique.

L'évaluation des conséquences de la combinaison des paramètres climatiques (temp, Hr, vent...) sur la sensation de l'individu et sur son comportement physiologique nécessite l'utilisation d'outils conventionnels qui permettent de réaliser une analyse rapide.

Ces méthodes qui intègrent les facteurs météorologiques déterminants dans la conception architecturale, peuvent être exprimées sous forme de : représentations graphiques, diagrammes ou tableaux.

Ces diagrammes sont basés sur des expérimentations. ils présentent une succession de différentes zones adjacentes et qui donnent des informations sur l'ambiance thermique et proposent des recommandations « bioclimatiques », en utilisant des systèmes passifs ou mécaniques de contrôle climatique, d'une agglomération donnée, dans le but d'arriver à un confort optimum.

Certes les crises énergétiques des années 70 ou celles d'aujourd'hui, continuent à inciter les architectes à repenser leurs conceptions dans un but de limiter les grandes consommations d'énergie. Néanmoins l'application des conclusions de ces procédés sur le terrain trouve beaucoup de contraintes et reste très limités.

Parmi, ces méthodes, on peut citer : le diagramme bioclimatique de « Olgyay », B. Givoni, la méthode de Mahoney et le diagramme bioclimatique de S. Szokolay.

2.12.1 Diagramme bioclimatique de V. Olgyay

V.Olgyay, est le premier chercheur à mettre en place une méthode systématique, afin d'accommoder les constructions aux exigences de l'homme et les conditions climatiques¹. Cette méthode a été élaborée au moyen d'essais expérimentaux dans des zones climatiques en USA, basées sur la zone de confort en fonction des éléments climatiques : température de l'air, humidité, vitesse de l'air et température radiante moyenne, le rayonnement solaire et la perte de chaleur par évaporation. Et présente aussi une limite, à partir de laquelle, l'occultation du soleil

¹ Konya. A. *Design primer for hot climates*. The architectural press, London, 1980.

est souhaitée. Quant à l'humidité, ce diagramme précise des limites de confort entre 30% et 65%, extensibles à un intervalle de tolérance compris entre : 18% et 77 ; sachant que cette méthode est valable uniquement pour des conditions climatiques extérieures

Au-delà de la zone de confort (au-dessus ou au-dessous), le diagramme fournit des recommandations nécessaires afin d'ajuster l'ambiance thermique à la recherche d'un confort optimum, qu'ils soient : un refroidissement par évaporation, en cas de périodes chaudes et sèches, ou un chauffage lors de la saison froide où les températures sont basses (fig.2-17).

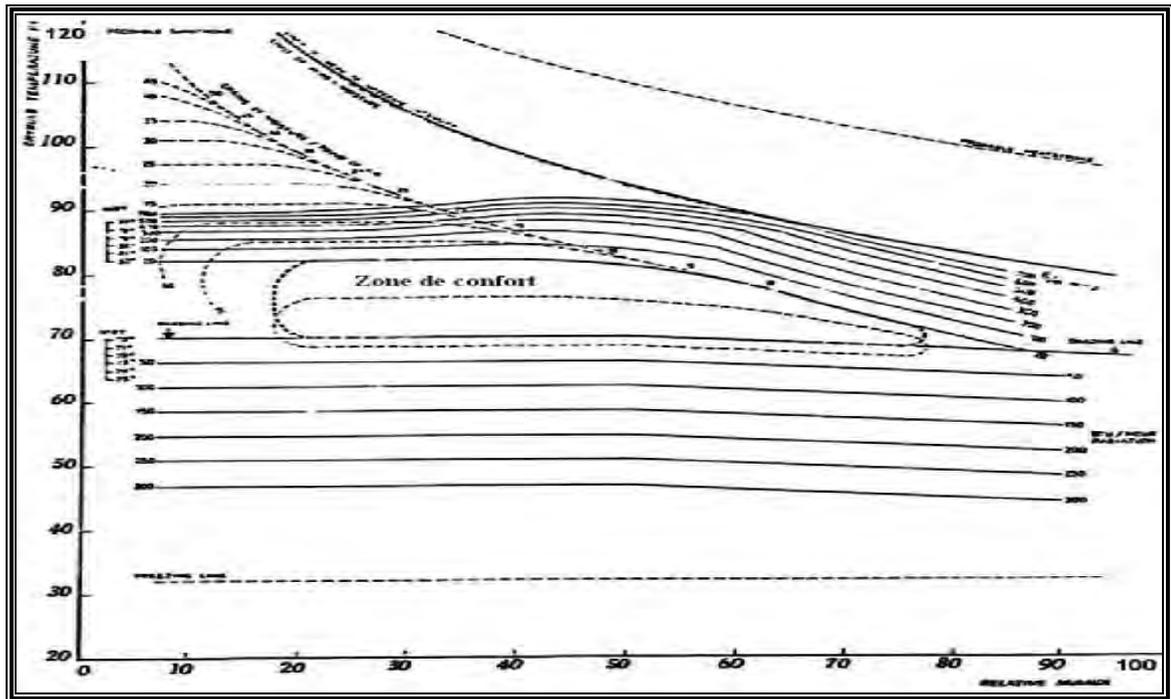


Fig. 2.17 : Diagramme d'Olgay. Source : Victor. Olgay, 1962

Seulement, ce procédé a été vivement critiqué car son objectif principal était le rendement de travail et non le confort thermique et qu'il est applicable pour les climats chauds et humides¹ et aux constructions légères, du fait qu'il n'y a pas une grande différence entre les conditions climatiques intérieur et l'extérieur.

2.12.2 Diagramme bioclimatique de B. Givoni

« Ce diagramme est établi pour des sujets acclimatés, au repos ou engagés dans une activité sédentaire, avec une tenue vestimentaire adaptée »². Si les températures sont hautes, les vêtements sont considérés légers, dans le cas opposé, la tenue est de l'ordre de 1 clos.

Il est supposé aussi que les entrées solaires directes à travers les ouvertures et les parties opaques d'enveloppes sont négligeables, grâce aux occultations solaires d'été.

Ce diagramme psychrométrique, utilise quatre paramètres : température sèche, température humide, humidité absolue et humidité relative afin d'évaluer les besoins de l'individu en confort d'où la détermination d'une zone de confort auquel se rattache des zones d'interventions, où des

¹ Givoni B, *L'homme, L'architecture et le climat*, édition le Moniteur, paris, 1978.

² Chatelet Alain, Fernandez Pierre, Lavigne Pierre, *Architecture climatique : une contribution au développement durable. Tome2 : concepts et dispositifs*, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998. p19

dispositifs architecturaux ou techniques sont prévus pour remédier aux conditions climatiques fluctuantes. La figure (2.18), montre les zones d'influences établis par Givoni et Milné et qui sont les suivants¹:

- Ø « **C** » : **zone de confort en air calme**, elle est indépendante des caractéristiques des constructions.
- Ø « **V** » : **zone d'influence de la vitesse d'air**, effet de la vitesse de l'air sur l'évaporation cutanée au moyen des échanges thermiques par convection. Et permet d'éviter le phénomène de condensation sur les parois des bâtisses. Cette zone n'implique les caractéristiques de l'immeuble qu'en ce qui concerne son aptitude à être ventilé, d'autant plus que la vitesse de l'air peut être obtenue par l'utilisation des ventilateurs.
- Ø « **I et I'** » : **double zone d'influence des inerties**, cette zone implique les caractéristiques des bâtisses, du point de vue « inertie de la masse », et elle est subdivisée en deux sous-zones : l'une du côté des températures basses et l'autre de celui des températures hautes. Ce qui entraîne une possibilité de réduire les variations de températures intérieures, pendant les périodes chaudes ou froides de tel manière que le point représentatif de l'ambiance reste dans « **C** » ou « **V** » .
- Ø « **VN** » : **zone d'influence d'une ventilation nocturne importante liée à une forte inertie par absorption**, elle est d'autant plus importante que le cycle jour/nuit est contrasté. Cette zone dépend des caractéristiques inertielles des constructions, et ses possibilités de ventilation.
- Ø « **RE** » : **zone d'influence d'un refroidissement par évaporation**, est relative uniquement de l'état hygrométrique de l'air ayant une grande capacité d'absorption de la vapeur d'eau.
- Ø « **AS** » : **zone d'influence de captage solaire passif**, elle n'a d'intérêt que pour les basses températures. Elle concerne les possibilités de captage d'énergie par les vitrages du bâtiment.
- Ø « **H, DH, AC** » : **zone d'obtention artificielle du confort thermique**, elle touche, les types de climats suivants :
 - **Chaud et Humide « DH »** : c'est une zone de déshumidification afin d'atteindre le confort ;
 - **Chaud et Sec « AC »** : c'est une zone de refroidissement ;
 - **Froid « H »** : c'est une zone de chauffage pour atteindre le confort optimum.

2.12.3 Diagramme bioclimatique de S. Szokolay

S. Szokolay a établie un outil d'évaluation bioclimatique, le plus récent (1987), qui est inspiré des travaux antérieurs comme ceux, d'Olgay et de Givoni, mais largement plus développé, car il a essayé d'intégrer quelques conclusions de certaines recherches, comme celles de Humphrey (1978) et Auliciens (1981) sur la définition de la température neutre et la température effective standard d'ASHRAE , afin de définir des zones de confort propre à chaque saison en fonction du climat local ; puis, il détermine avec précision les zones de contrôle potentiel pour diverses interventions (fig.2-19).

Cette méthode permet de prendre compte des stratégies passives de conception du bâtiment tel que l'inertie thermique, l'utilisation de systèmes de refroidissement évaporatif, la ventilation nocturne. Cela, quant le point représentatif est en dehors de la zone de confort.

¹ Chatelet Alain, Fernandez Pierre, Lavigne Pierre, Architecture climatique : une contribution au *développement durable*. Tome2 : *concepts et dispositifs*, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998. p20

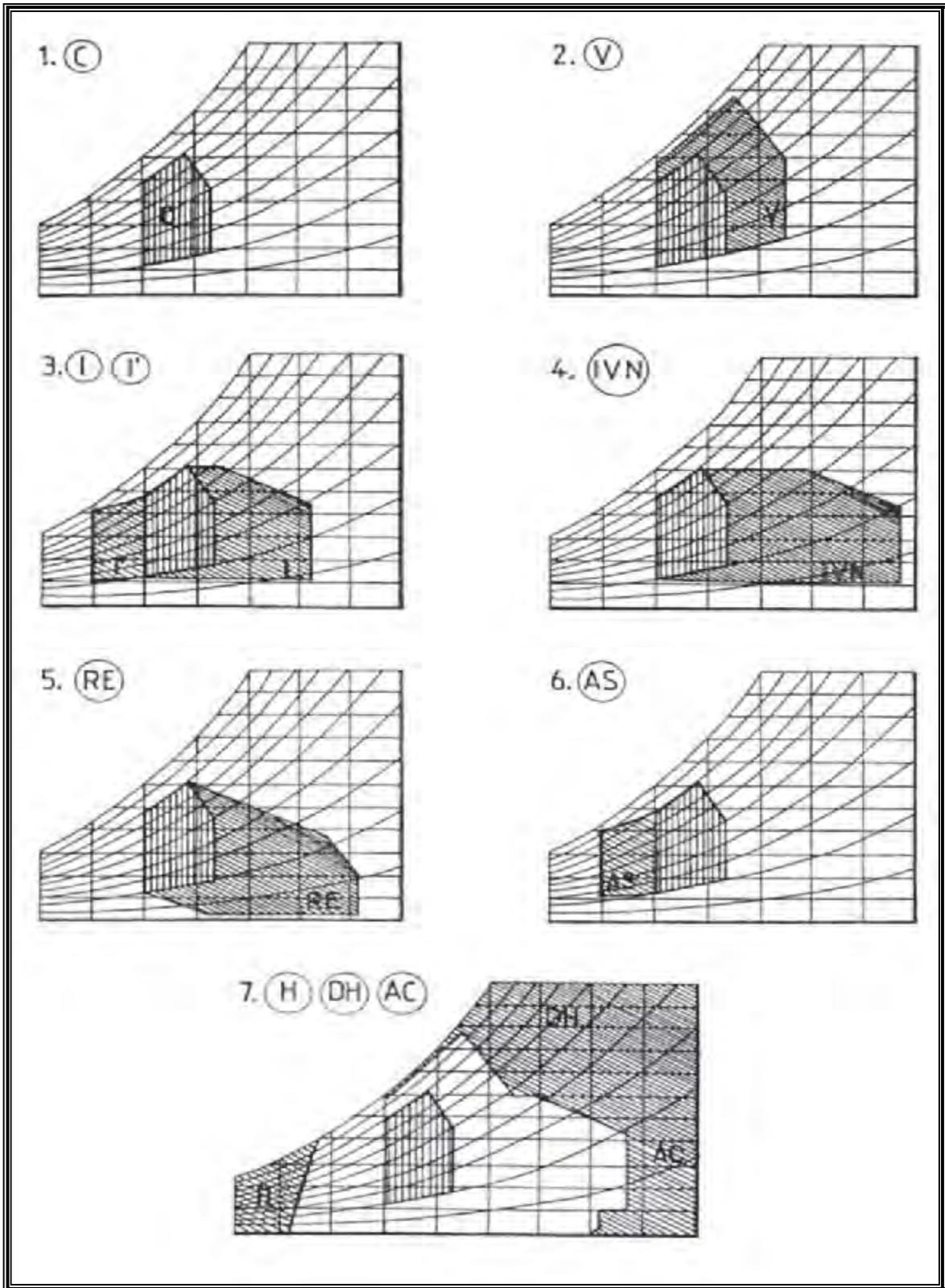


Fig. 2.18 : Diagramme bioclimatique de B. Givoni. **Source** : A.Chatelet, P. Fernandez, P.Lavigne, 1998

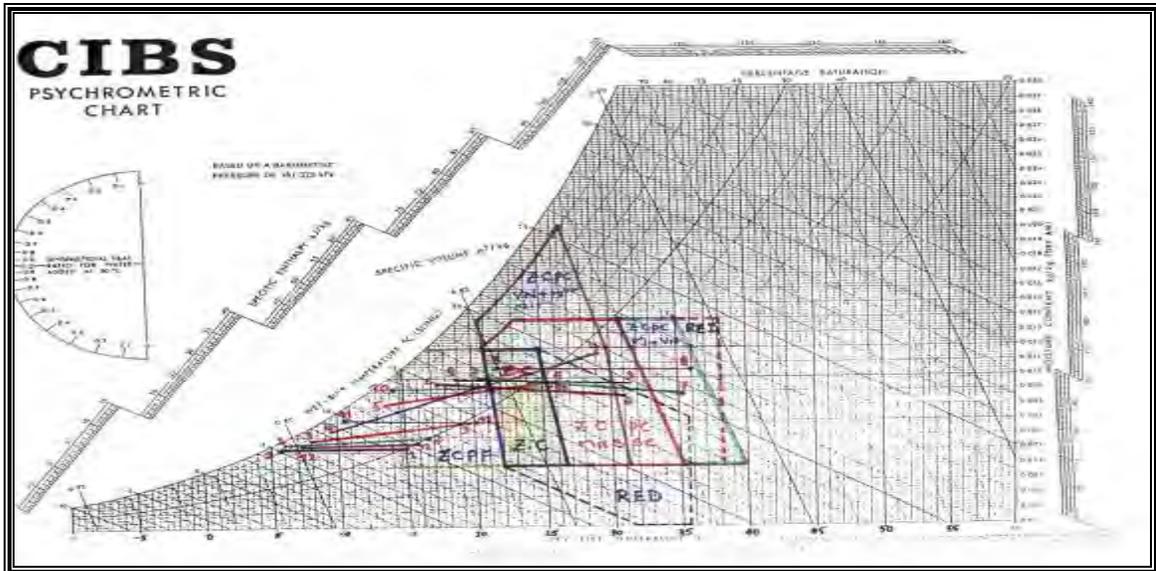


Fig.2.19 : Diagramme bioclimatique de S. Szokolay. Source : Szokolay. S. V, 1980 (application par l'auteur, 2004)

2.12.4 Les tableaux d'analyse bioclimatique de Mahoney

La méthode de C. Mahoney est basée sur un nombre important de facteurs climatiques et de la durée de leur effet, tel que les températures, humidité relative, précipitation, orientation des vents, ainsi que la notion de confort diurne et nocturne (cf. annexe). Ce procédé consiste donc à établir un diagnostic détaillé, en définissant des seuils de confort diurne et nocturne, à l'aide desquels, il donne des indications et recommandations architecturales qui portent sur les axes suivants :

Ø Orientations et disposition des constructions :

La méthode propose l'allongement du bâtiment selon une orientation, l'espacement entre les constructions, la protection contre les vents et la compacité du tissu.

Ø Caractéristiques des éléments architectoniques :

Ce procédé suggère certains rapports de dimensions des ouvertures par rapport aux surfaces pleines, leurs positions en relation avec les orientations, ainsi que leurs protections.

Par ailleurs il donne des indications sur les propriétés physiques des matériaux de construction au niveau des murs, planchers et toitures.

Ø Les espaces extérieurs

Mahoney recommande l'utilisation des espaces extérieurs ou intermédiaires : cours, patios, terrasses,...etc, si les conditions climatiques l'exigent, en imposant un système de drainage adéquat.

Sachant que ces espaces joueront un rôle très important pour le confort des occupants, ils permettent d'une part, l'aération, l'optimisation de l'éclairage et la minimisation à l'exposition des radiations solaires des surfaces bâties. Et d'autres parts, ils servent à mener plusieurs activités familiales et facilitent les déplacements saisonniers à la recherche de la fraîcheur pendant l'été surtout.

2.13 Analyse bioclimatique de la ville de Constantine

2.13.1 Méthode de Givoni B.

L'application du diagramme bioclimatique aux conditions climatiques de la ville de Constantine selon la **méthode de Givoni** permet de distinguer deux périodes distinctes, dans la mesure où, nous nous référons à la température limite égale à 10°C (fig : 2.20):

Ø **Période froide** : définie par des températures basses et des humidités relatives élevées. On constate que les mois les plus froids sont : Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril et Novembre. Le confort souhaité nécessite un chauffage passif avec un complément d'énergie d'appoint.

Les mois de : Octobre et Mai sont considérés confortables, il suffit une masse Thermique adéquate et de l'ombre.

Ø **Période chaude** : caractérisée par des températures hautes et des humidités relatives basses correspondant aux mois suivants : Juin, Juillet, Août et Septembre.

Cette période nécessite une grande inertie thermique, une ventilation nocturne et parfois un refroidissement par évaporation pendant les canicules. Le contrôle de la radiation solaire à la recherche de l'ombre s'avère impératif.

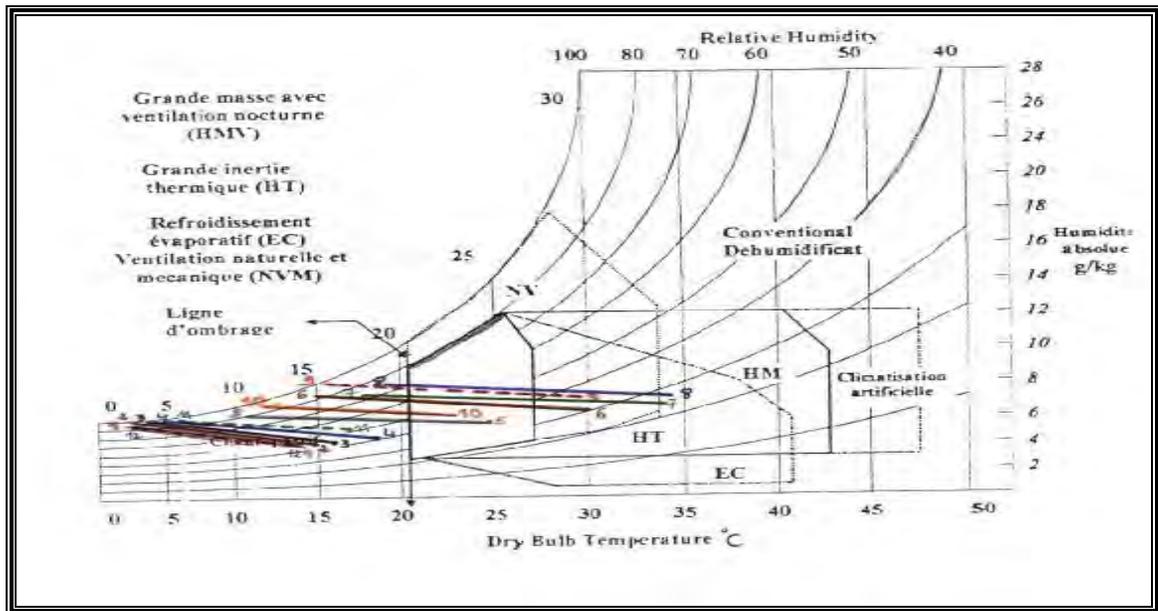


Fig.2.20 : Diagramme bioclimatique de B. Givoni, appliquée à la ville de Constantine. Source : auteur, 2005

Si nous utilisons la méthode de S. Szokolay, il sera nécessaire de calculer d'abord la température neutre qui est fonction de la température moyenne annuelle, d'après les formules de Humphrey et Auliciems.

Pour la période hivernale, nous utilisons la formule de Auliciems :

$$T_n = 17,6 + 0,31 (T_m) ; \text{ d'où } T_n = 20,04^\circ\text{C} \dots \dots \dots [5]$$

Où, T_m est la température moyenne extérieure pour la période de calcul

Pour la période estivale, nous utilisons la formule de Humphrey :

$$T_n = 11,09 + 0,534 (T_m) ; T_n = 27, 89^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots [6]$$

Où, T_m est la température moyenne extérieure pour la période de calcul

Sachant que les limites des zones de confort varient de : $\pm 2^{\circ}\text{C}$ par rapport aux valeurs des températures neutres.

2.13.2 Méthode de Szokolay S.

La lecture du diagramme bioclimatique pour la ville de Constantine selon la méthode de S. Szokolay a donné de résultats presque similaires à celle de Givoni, avec un peu plus de détails. Il en résulte aussi, de distinguer deux périodes différentes seulement (fig : 2.21) :

Ø **Période froide** : caractérisée par des températures basses et des humidités relatives élevées correspondant aux mois suivants : Décembre, Janvier, Février, Novembre. Qui sont inclus dans la zone de contrôle potentiel pour les périodes froides, nécessitant un chauffage solaire passif avec un complément d'énergie d'appoint ; de même que les mois de Mars et Avril qui sont partiellement inclus dans la zone de confort.

Les mois suivants : Mai et Octobre sont considérés confortables

Ø **Période chaude** : lors de cette période, les températures sont hautes et les humidités relatives sont basses correspondant aux mois suivants : Juin, Juillet, Août et Septembre. Ils sont inclus dans la zone de contrôle potentiel pour les périodes chaudes. Par conséquent, il est recommandé :

- une importante inertie thermique ou effet de masse ;
- une ventilation nocturne ;
- un mouvement d'air pendant la journée ;
- en temps de canicule, il est conseillé de prévoir des systèmes de refroidissement par évaporation directe ou indirecte.

2.13.3 Méthode des tableaux de Mahoney

La méthode des tableaux de Mahoney appliquée à la ville de Constantine, dans le cadre de cette étude (cf. annexe I), nous donne les orientations et recommandations architecturales suivantes :

A) Au niveau du plan de masse

- Orientation : Sud et Nord (Long axe de l'Est à l'Ouest)
- Organisation spatiale et composition urbaine : compacte.

B) Au niveau de l'édifice

- Taille des ouvertures Moyennes : 20 à 40 % de la surface du mur de la pièce considéré
- Murs extérieurs et intérieurs à grande inertie (Matériau ayant une grande masse thermique) permettant un temps de déphasage supérieur à 8 heures.
- Les Planchers doivent être massifs (épais et lourd), permettant un temps de déphasage supérieur à 8 heures.
- Mise en place d'un système de protection des toits, terrasses ainsi que les ouvertures contre les eaux pluviales tels : auvents, étanchéité, collecte et évacuation des eaux pluviales.
- Prévoir des ouvertures hautes dans les murs intérieurs.
- Prévoir des espaces extérieurs (terrasses, cours,... etc.) pour dormir la nuit.

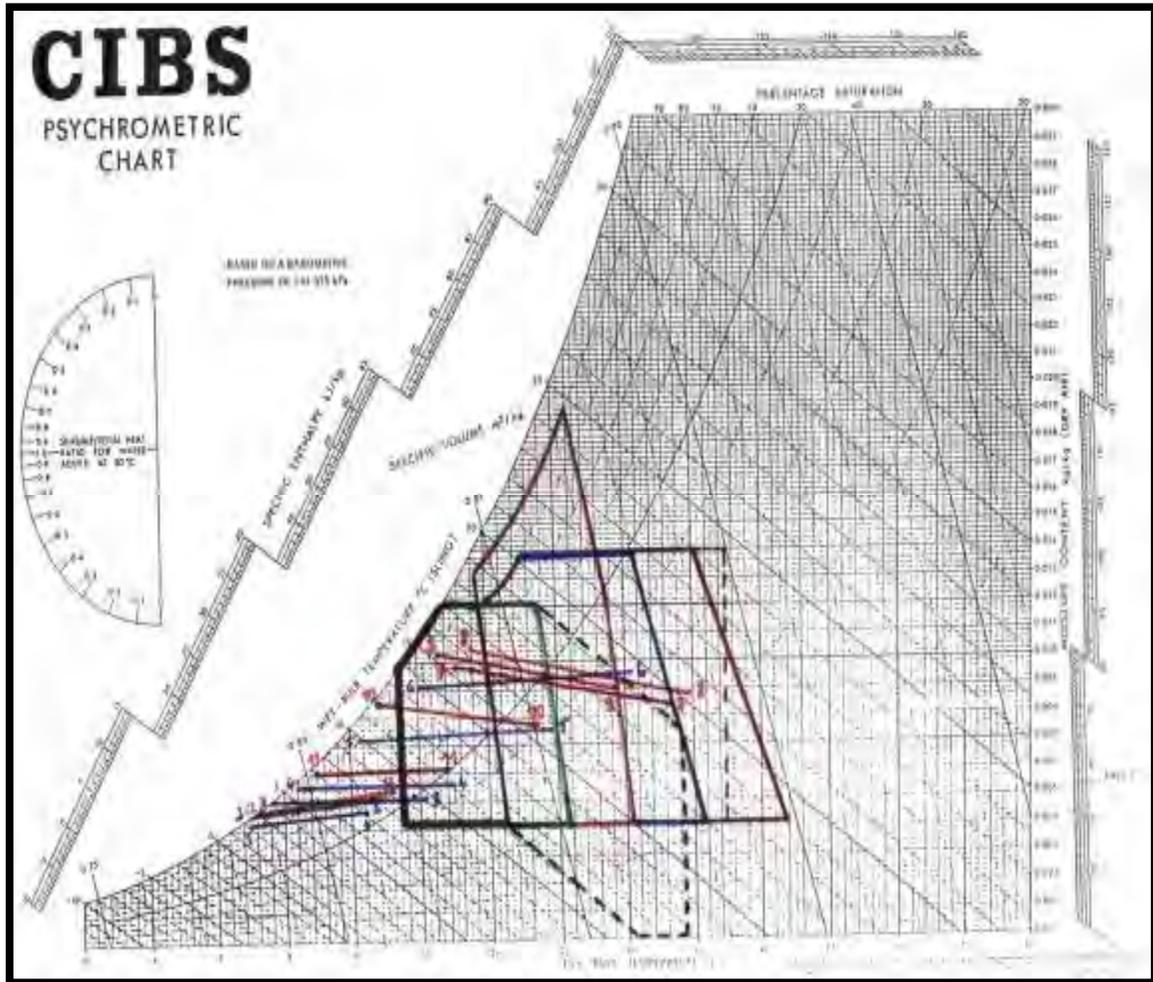


Fig. 2.21: Diagramme bioclimatique de S. Szokolay appliquée à la ville de Constantine. **Source :** auteur, 2005

2.14 Conclusion

Ce que l'on peut déduire de ce chapitre, après avoir passé en revue, les notions générales sur le climat et le confort humain. C'est qu'il existe une interaction entre l'homme et son environnement immédiat, visant en premier lieu l'équilibre thermique du corps.

Le métabolisme humain nécessite le maintien de cet équilibre thermique, considéré comme l'un des principaux besoins, pour la santé et le confort. Là où il se trouve et à n'importe quelle latitude, l'homme est à la recherche perpétuelle de cet équilibre avec le milieu extérieur, qui dépend de la combinaison de nombreux éléments. Certains sont d'ordre individuel comme les vêtements et l'activité,...etc. ; et d'autres sont d'ordres climatique, tel que la température de l'air, le rayonnement, l'humidité et les vitesses de l'air.

La construction des habitations bioclimatiques dans les régions à climat contrasté, comme ce lui de la ville de Constantine est très difficile mais pas impossible car, le problème du confort a des solutions accessibles aux architectes, avec des moyens qui leur sont familiers¹.

L'étude quantitative du climat de la ville de Constantine révèle que le climat est justement, de type semi-aride, conformément à la théorie de « De Martonne », caractérisé par deux saisons seulement où les températures et les humidités sont portées aux extrêmes (froid et humide ou chaud et sec), avec bien sur, une courte saison de confort.

Une conception architecturale dans cette région, doit tenir compte de certaines conditions abordables, non onéreuses et durables, à savoir, en entre autres:

Prévoir un chauffage passif pour les périodes froides par gains solaire direct ; une bonne orientation Sud/Nord qui permet un meilleur contrôle de l'ensoleillement, et favoriser la ventilation pour éviter d'une part, les condensations de la vapeur d'eau pendant la saison froide, et d'autres part, atténuer les températures hautes lors des périodes chaudes.

Faire un choix adéquat des matériaux de constructions ayant une bonne inertie thermique afin d'obtenir l'effet de masse, avec l'utilisation judicieuse et étudiée des isolants pour un meilleur déphasage thermique, sans oublier les dispositifs de protections (solaire et pluvial).

Ainsi il semble qu'il serait possible d'atteindre le confort souhaitable optimum toute l'année. Sauf pendant les courtes périodes critiques, où un chauffage d'appoint est nécessaire au moment du grand froid, et le recours au système de refroidissement par évaporation lors des canicules.

Par ailleurs, l'acclimatation et les pratiques sociales sont aussi des facteurs très important qui rentrent en jeu dans la sensation du confort. Ainsi les autochtones, peuvent supporter aisément les périodes critiques chaudes de l'été ou les périodes critiques froides de l'hiver d'un tel type de climat.

¹ Izard Jean-louis, *Architecture d'été*, la calade, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1993

Chapitre 3 : Humidité

3.1 Introduction

Dès les années septante, la priorité a été consacrée à l'économie d'énergie. En effet, les études à l'époque ont sensibilisé le monde du bâtiment, avec l'amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe des immeubles, alors que les constructions traditionnelles étaient très perméables à l'air, a eu pour effet d'empêcher les échanges naturels d'air, ce qui a rapidement entraîné une augmentation du taux de l'humidité de l'air ambiant.

Si le progrès des sciences et des techniques de la construction permet d'améliorer le confort des occupants, il faut bien admettre que le gêne provoqué par l'apparition d'humidité est encore bien existant de nos jours.

L'eau sous ses différentes formes dans les bâtiments constitue à la fois un danger potentiel pour la santé et le confort et une source de dommages réels : esthétiques et matériels.

On ne peut sous estimer les effets nuisibles de l'eau sur les matériaux de construction. Si ces effets n'existaient pas, la construction de bâtiments durables seraient grandement simplifiée ainsi que la tâche des architectes.

J.K.Latta¹, déclare : « on a dit que, les recherches en construction, ne seraient pas nécessaires s'il n'y avait pas l'effet de l'eau sur les matériaux de construction. »

L'humidité dans une maison est déterminée par :

- Ø les paramètres extérieurs : températures, humidité, ventilation et l'ensoleillement.
- Ø les caractéristiques du bâtiment : présence de fuites, de ponts thermiques, capillarité des matériaux, ... etc.
- Ø le comportement de l'habitant : fréquence de l'aération, températures intérieures, production de vapeur d'eau

Le présent chapitre traite des conditions et des mécanismes à l'origine de l'humidité, de la classification des différents types et de leurs caractéristiques, de l'insalubrité des locaux et des exigences d'habitabilité, de ses nuisances et ses effets aussi bien, sur la santé de l'homme que sur le bâtiment et le confort des habitants en général.

3.2 Définition

D'après Larousse, l'humidité est l'état de ce qui est humide c'est-à-dire chargé d'eau ou de vapeur d'eau.

D'après Encarta (2005), l'humidité est définie par : eau, vapeur d'eau ou liquide (renfermés par une matière ou un objet).

Il est important de noter que ce qu'on appelle généralement l'humidité est en réalité l'humidité relative. C'est une mesure de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air exprimée en pourcentage de la quantité maximum de vapeur d'eau que l'air peut renfermer à la même température. Lorsque la température change, l'humidité relative change aussi, étant donné que la capacité de l'air à retenir la vapeur d'eau augmente avec la température. Des courbes psychrométriques sont établies pour représenter ces relations. La figure (3-1) montre le contenu (masse en g/kg d'air sec) de vapeur d'eau de l'air au point de saturation pour diverses températures.

¹Latta J.K et Beach R.K, *Diffusion de la vapeur et condensation*, <http://www.irc.com>, 2006.

Lorsqu'un mélange d'air et de vapeur est chauffé ou refroidi, le processus qui en résulte peut être représenté par une ligne horizontale sur la courbe. Le développement ABC représente l'air d'une pièce à 21°C et 50% d'humidité relative qui est refroidi au contact d'une paroi froide. Quand il est refroidi à 10,3°C, le mélange devient saturé. S'il est refroidi davantage, de l'humidité sera formée au moyen d'une condensation sur la paroi froide.

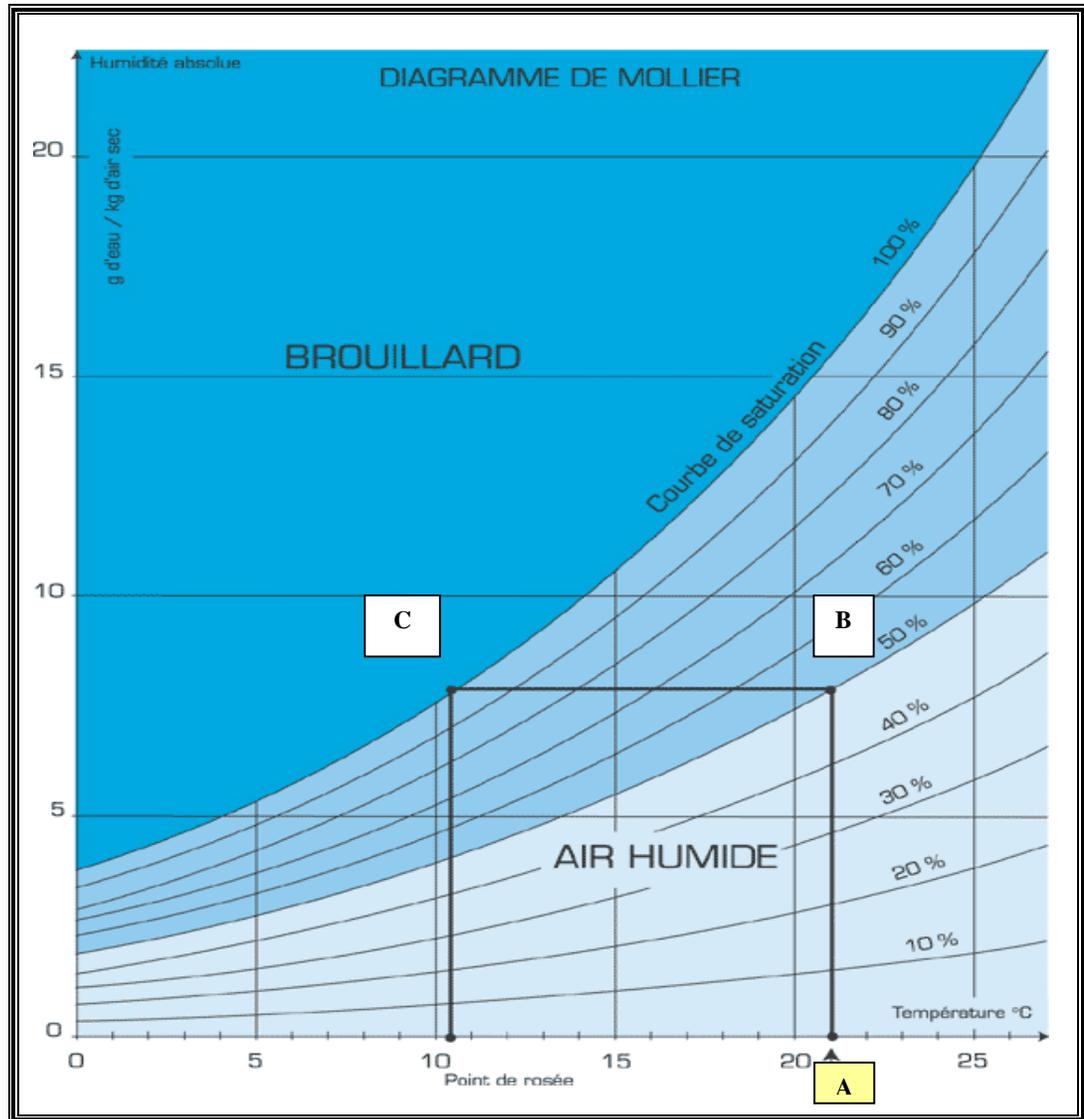


Fig. 3.1: Diagramme de Mollier. **Source :** www.Domosystem.fr, 2006.

L'humidité de l'air peut s'exprimer de plusieurs manières¹ : teneur en eau (en volume ou en poids), pression de vapeur, humidité relative et point de rosée.

La teneur en eau peut s'exprimer de plusieurs façons :

- Ø le rapport de mélange, x , est le rapport de la masse de la vapeur d'eau à la masse d'air sec contenu dans un volume d'air ;
- Ø la concentration en eau, g , est le rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse totale

¹ Belakhowsky.S, Chauffage & Climatisation, Technique & Vulgarisation, Paris, 1980, pp94-97

d'un volume d'air, en kg/m^3 ;

- Ø l'humidité absolue, φ , représente la masse d'eau par unité de volume d'air, en kg/m^3 ;
- Ø la pression partielle de vapeur d'eau, p , s'obtient en supposant que la vapeur d'eau occupe à elle seule le volume à disposition. cette pression s'exprime en pascals [pa]. la pression atmosphérique est égale à la somme des pressions partielles de tous les composants de l'air (azote, oxygène, vapeur d'eau, gaz carbonique, argon, etc.)

À chaque température correspond une pression partielle de vapeur d'eau maximum, appelée pression de vapeur saturante. La part d'eau en excès se condense sous forme de liquide ou de glace, suivant la température. La pression de vapeur saturante est donnée dans les diagrammes psychrométriques (voir chapitre 6 : investigation, figure.6.73).

3.3 Les différents types de l'humidité et leurs caractéristiques.

3.3.1 Types d'humidité

Les différents types d'humidité que l'on retrouve dans les constructions anciennes, si l'on écarte le cas banal de l'humidité accidentelle, provenant d'une défaillance d'entretien, peuvent se ramener à quatre (fig.3.2) :

- L'humidité ascensionnelle ou de remontée capillaire des eaux souterraines;
- L'humidité de condensation superficielle ;
- L'humidité de condensation dans la masse;
- L'humidité par infiltration latérale de pluie battante.
-

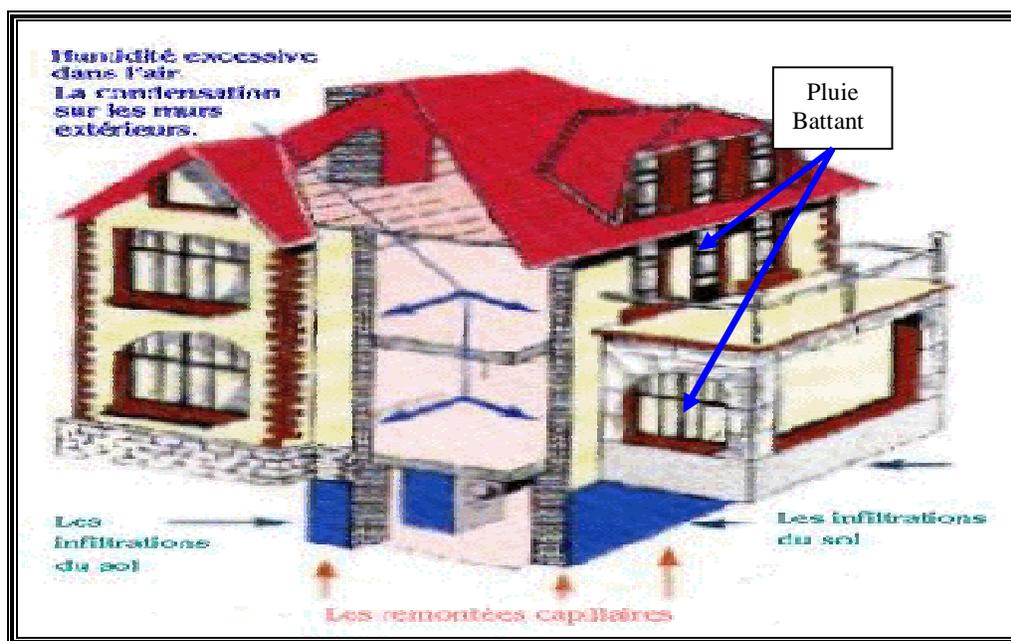


Fig. 3.2 : Les différents types d'humidité. Source : auteur, 2005.

a) L'humidité ascensionnelle (eau provenant du sol)

La remontée capillaire (fig.3.3), provient de :

- Ø Des eaux souterraines (nappe phréatique)
- Ø Des fuites de canalisations
- Ø Des eaux superficielles (ruissellement des eaux de pluie)

b) Les infiltrations

Causés par des précipitations : pluie, neige...(fig. 3.4): l'eau pénètre dans la maçonnerie par :

- Ø infiltration directe de la pluie à travers les fissures, microfissures, menuiseries (fig.3.5-3.6).
- Ø Par infiltration suite à un rejaillissement des pluies (fig. 3.4).

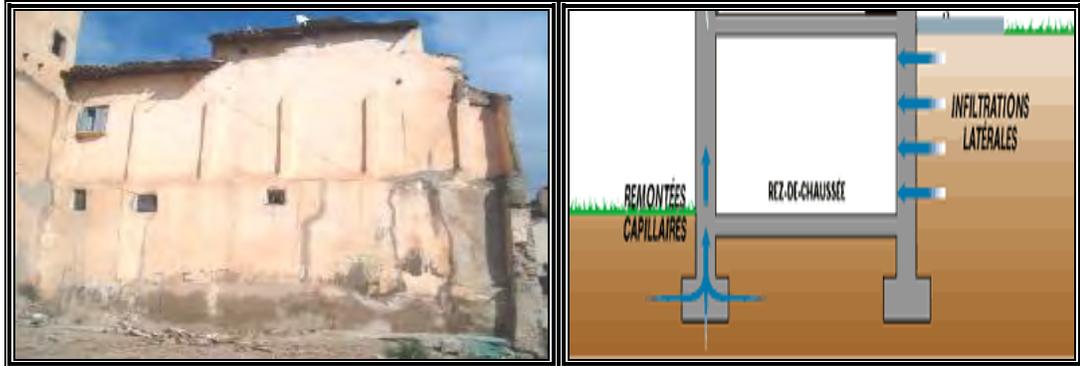


Fig. 3.3 : Remontée capillaire dans une maison vernaculaire à Suika. Source : auteur, 2005

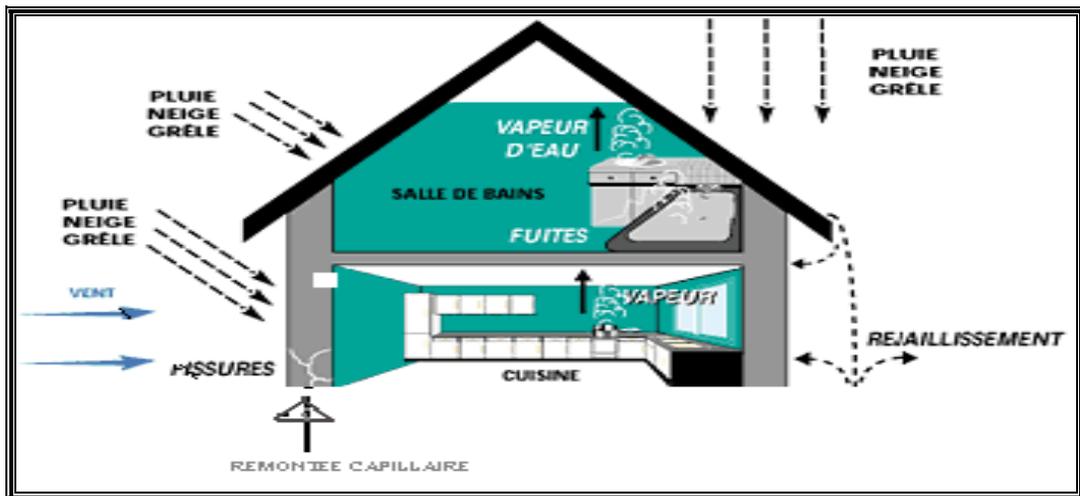


Fig.3.4 : Les différentes causes d'humidité. Source : <http://www.universimmo.com>, 2004



Fig.3.5 : Infiltration directe par le toit.



Fig.3.6 : Infiltration directe par le mur extérieur dans D'une maison vernaculaire à Suika

Source : auteur, 2005

c) Les eaux de condensation

Ils proviennent de¹ :

- Ø La respiration des occupants
- Ø La production de vapeur en cuisine, salle de bains (fig. 3.8).
- Ø La restitution de l'eau des murs sous forme de vapeur (par exemple en sous sol)

Ce phénomène se manifeste en particulier lorsqu'il y a une mauvaise ventilation des locaux :

- Ø On peut constater les condensations superficielles sur les vitrages et sur toutes les parois froides dans la construction (fig.3.7).
- Ø Les condensations internes, par contre sont cachées : en effet, le phénomène constaté sur une vitre dans une salle de bains peut, par temps froid, se produire dans les murs en profondeur (fig.3.9).

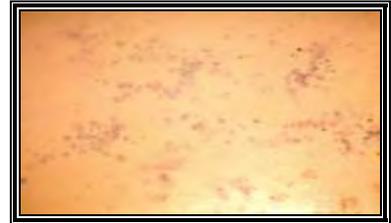
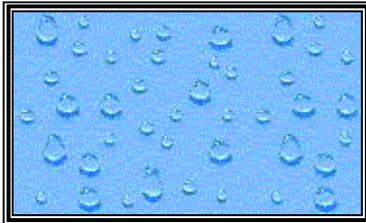


Fig.3.7: La condensation superficielle **Fig.3.8 :** Effet de la vapeur de cuisine **Fig.3.9 :** La condensation interne
Source : auteur, 2005

d) L'humidité d'origine accidentelle

Elle se produit à cause de :

- Ø Toutes les fuites dues à un mauvais entretien : toiture (tuiles ou ardoises brisées) (fig.3.11), canalisations d'eau pluviale, eau sanitaire, égouts.
- Ø Les débordements de baignoires, éviers (fig.3.10), lave-linge.

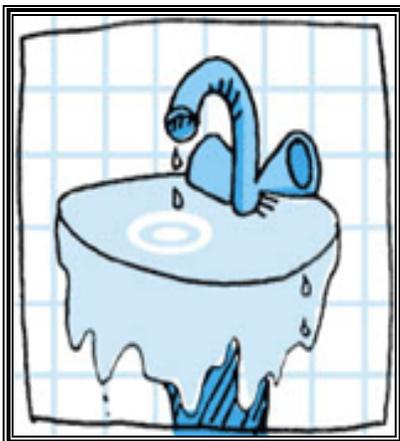


Fig.3.10 : débordement d'évier

Fig.3.11 : Toiture très dégradée. Zeleika. Suika. **Source :** auteur, 2005

¹Couasnet Y : *les condensations dans les bâtiments : guide pratique et éléments d'analyse*. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 1990.

Remarque :

Avant toute décision, un diagnostic s'avère indispensable ; celui-ci permettra de déterminer la ou les origines de l'humidité. Sans diagnostic, on prend le risque d'adopter une solution inefficace.

3.3.2. Symptômes et sources d'humidité

Les symptômes apparents de l'humidité ne constituent pas les vrais critères pour juger la gravité de l'invasion de l'humidité dans une construction. Cependant ils peuvent nous renseigner sur les origines de cette invasion (tab.3.1).

De ce fait, il serait utile d'en tenir compte, d'examiner avec précision sa localisation et d'étudier les déplacements d'air afin de savoir si la ventilation est faible ou forte, si toutes les zones sont balayées ou non. En effet l'apparition d'humidité et la ventilation du local sont deux phénomènes intimement liés : c'est à cause des conditions de stagnation ou de renouvellement d'air que dépendent soit l'existence, la multiplication ou, soit la disparition des signes extérieurs de l'humidité, tels que les moisissures, les mouillures, les efflorescences et les érosions¹ (fig.3.12—13-14-15).



Fig.3.12 : Érosion. **Source :** auteur, 2005 **Fig. 3.13 :** Moisissures sur les murs. **Source :** auteur, 2005

Les boursofflures et le décolllement des meubles dépendent moins du haut degré d'humidité des murs que de la stagnation de l'air : on peut estimer à première vue, que la carence de ventilation en est la cause. L'analyse des maçonneries confirmera ou infirmera cette opinion.



Fig.3.14 : Éclatement du mortier après gonflement
Source : auteur, 2005

Fig.3.15 : Mouillures.

La présence de taches visibles, foncées et persistantes d'une tonalité stable, sur le plancher et sur les murs est la preuve d'une humidité des remontées capillaires des sous-sols. Celle-ci peut être

¹ Cohas M : *ventilation et qualité de l'air dans l'habitat*, Édition parisiennes, paris 1996

décelé facilement parce qu'elle obscurcit les murs à partir de la base jusqu'à une certaine hauteur déterminée, qui ne dépassera pas en générale trois (03) mètres¹, (fig.3.16).

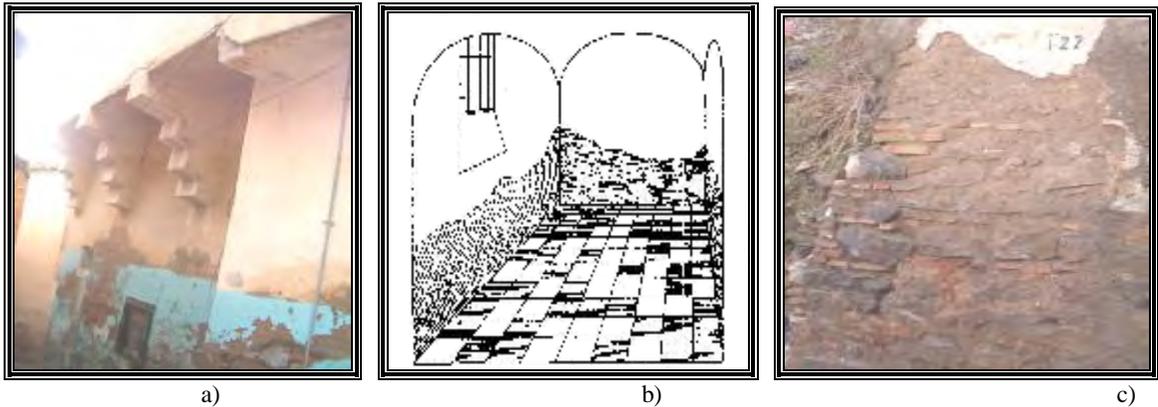


Fig.3.16 : Remontée capillaire. **Source** : auteur, 2005

Par contre, si on constate que les murs et les planchers sont recouvert d'un film uniforme et très léger qui, parfois enlève leur éclats aux : marbre, revêtements céramique « zellige », plinthes vernissées. On peut dire, qu'il s'agit certainement d'une humidité de condensation superficielle¹ (fig.3.7).

Des mouillures isolées² sur le mur, qu'on rencontre à différentes hauteurs, de tons variables, au point de s'estomper entièrement par temps sec et de réapparaître brusquement pendant les journées de sirocco ou de pluie, trahissent une humidité intermittente de matériaux isolés, parfois liée à une légère humidité ascensionnelle ou de condensation (fig.3.17-a ; b ; c-).

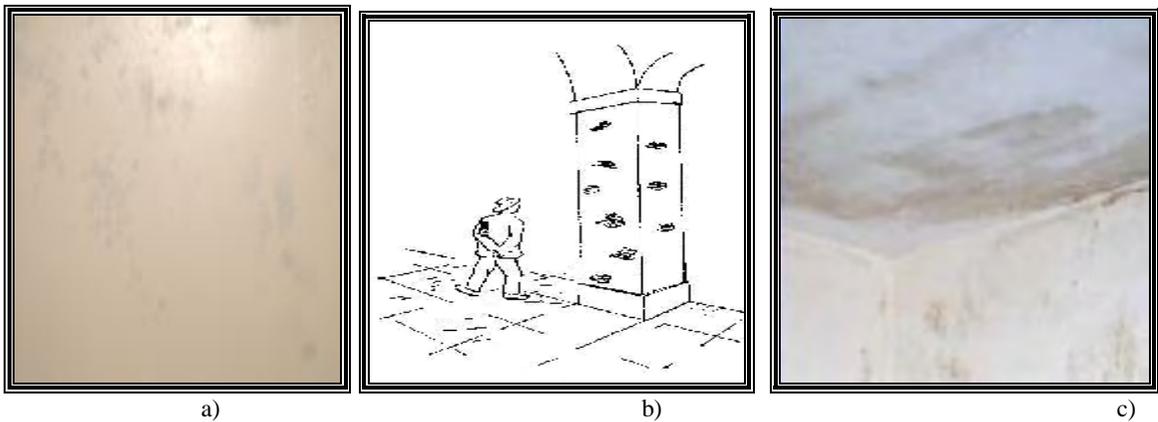


Fig.3.17 : Mouillures variables isolée. **Source** : auteur, 2005

L'action combinée de l'humidité ascensionnelle, les grandes variations de la température et d'une ventilation énergique provoque une nette détérioration de l'enduit à la limite supérieure de la zone d'imbibition, il se trouve que celui-ci soit : fortement érodé et criblé de trous sur une bande de sa partie supérieure. Cela indique que l'enduit est soumis à des alternances de

¹ Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Éditions du Moniteur, Paris, 1985

² L'humidité à mouillure variable ou intermittente est également une humidité de condensation

déshydratation et d'imbibition (fig.3.18-a ; b ; c). De telles érosions se produisent surtout dans les halls, sous pilotis et sur des murs extérieurs¹.

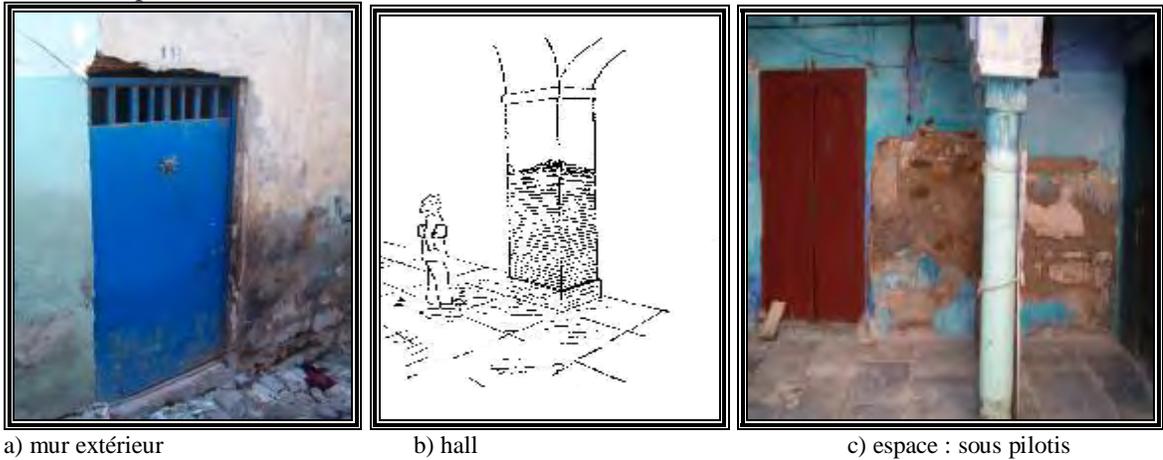


Fig.3.18 : détérioration de l'enduit à la limite supérieure de la zone d'imbibition. **Source** : auteur, 2005

Par contre si l'érosion de l'enduit est légère, située dans le bas des murs à quelques centimètres du plancher ou juste au-dessus des plinthes, cela signifie qu'elle dépend plutôt de l'action alternée, en hiver, de vents humides et chauds qui provoquent une stillation d'eau de condensation, et de vents froids et asséchants (fig.3.19), de telles cas se produisent dans les passages couverts et les corridors ouverts à l'air extérieur².



Fig. 3.19 : Passage couvert : érosion due à la condensation intermittente d'origine atmosphérique. **Source** : auteur

La décoloration, aussi, et l'écaillage des vernis sur les murs sont des signes soit de l'humidité ascensionnelle si les dégâts sont importants et situés dans la partie supérieure, soit la condensation s'ils ne sont que légers et situés dans la partie inférieure (fig.3.20). Les mêmes phénomènes apparaissent dans les constructions récentes, lorsque l'on pose des vernis sur les parois fraîches³



Fig.3.20 : Écaillage de la peinture.
Source : auteur, 2005

¹ Massari G : *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles – Paris, 1971.

² . [Http://www.travaux.com](http://www.travaux.com). 2005.

³ Croiset. M : *l'hygrométrie dans les bâtiments : confort thermique d'hiver et d'été : condensation*. EYROLLES, 1968.

L'apparition d'efflorescences est toujours liée à la présence de sels migrateurs amenés par capillarité par l'eau venant du sous-sol (fig.3-21), ou déjà présent dans le matériau de construction avant sa mise en œuvre, comme dans les briques isolées couvertes d'efflorescences. Quand ces derniers apparaissent sous forme de traînées, à une certaine hauteur, à la limite de la zone humide, elles relèvent d'une phase d'assèchement de l'humidité. Elles sont, en effet, plus visibles en été qu'en hiver.

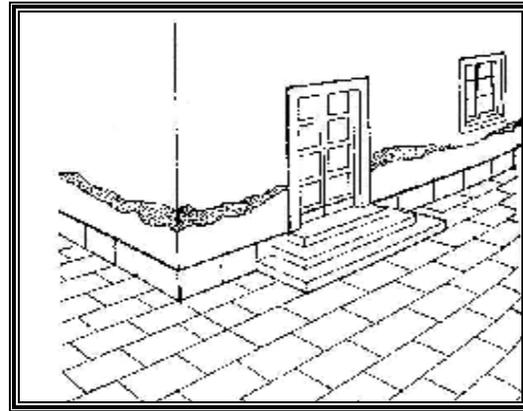


Fig.3.21 : Efflorescences. **Source :** auteur ,2005

Fig.3.22 : Zone horizontale humide

Il arrive, d'autre part, qu'une bande horizontale d'enduit soit humide entre deux zones sèches. Ce phénomène est dû à un dépôt de sels, laissé dans un temps passé par un envahissement d'humidité souterraine¹. Ces sels absorbent la vapeur d'eau de l'air et conservent humide la mince bande d'enduit qui les contient (fig.3.22).

Enfin, l'apparition de moisissures (fig. 3.23) est, en particulier, l'indice d'une carence absolue de ventilation : certains de ces champignons ont besoin de beaucoup d'humidité, d'autres de très peu, mais tous exigent une parfaite stagnation de l'air. On les constate si facilement sur les matières organiques et surtout sur le cuir (sur les reliures des livres, les chaussures, les bagages)².



a)



b)



c)

Fig. 3.23: Moisissures sur différentes matières organiques. **Source :** auteur, 2005

¹ Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985

² Ministère de l'équipement, direction de la construction, *Amélioration thermique de l'habitat existant*, Eyrolles, Paris, 1977.113-114

SYMPTÔMES	TYPE D' HUMIDITÉ	OBSERVATIONS
Taches permanentes sur le plancher	Humidité ascensionnelle	probable
Mouillures permanentes sur la paroi, à partir du plancher	Humidité ascensionnelle	
Forte érosion de l'enduit, dans la partie centrale ou supérieure de la paroi	Humidité ascensionnelle accompagnée d'une bonne ventilation	
Film léger recouvrant uniformément l'ensemble des parois et du plancher	Humidité de condensation	
Taches isolées de ton variable d'un jour à l'autre	Humidité alternante de matériaux isolés, Humidité de condensation	
Érosion légère de l'enduit, dans le bas, juste au-dessus du plancher ou de la plinthe	Humidité de condensation ; plus rarement : Humidité ascensionnelle	Très légère
Efflorescences de « salpêtre », apparaissant sous forme de traînées ou de taches	Humidité ascensionnelle Dans certains cas : humidité d'infiltration latérale de pluie	
Mêmes efflorescences sur des briques isolées de parement	-----	Symptômes insuffisants pour déterminer ce type d'humidité
Moisissures	Tout types d'humidité, même très légère	À condition qu'il y ait stagnation de l'air, carence d'insolation et support de matière organique
Champignons domestiques	Tout types d'humidité	À condition qu'il y ait absence de ventilation et présence de cellulose.

Tab. 3.1 : les différents types d'humidités et leurs symptômes. **Source** : Collombet. R, 1985

Remarque :

Ces notes n'ont qu'une valeur indicative. Elles ne peuvent jamais être utilisées automatiquement. Les moisissures peuvent apparaître même dans un milieu sec, si leur support de matière organique conserve assez longtemps une certaine quantité d'eau. D'autre part, il arrive souvent que, dans des locaux fermés, tranquilles, froids non aérés, aux parois nues et complètement envahies par l'humidité ascensionnelle, on ne constate aucun dommage apparent, ne fût-ce que cet obscurcissement de l'enduit, si fréquent sur les murs extérieurs.

Il faut toujours vérifier les conclusions que l'on pourrait tirer des symptômes apparents, au moyen d'instruments de mesure déterminant le degré hygrométrique de l'air, et surtout le taux d'humidité de la maçonnerie.

3.3.3 Répartition de l'humidité dans les ouvrages

A cause de la capillarité des maçonneries, l'humidité ascensionnelle provoque les taux d'humidités les plus élevés, par contre l'humidité de condensation dans la masse enregistre les plus basses. Donc, Les valeurs d'humidité de la maçonnerie varient selon les types d'humidité (fig. 3-24).

L'humidité de remontée capillaire diminue au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol. Dans la maçonnerie des rez-de-chaussée, lorsque la situation est grave, on constate des taux

pondéraux excessifs¹ de 9 à 15% dans les plinthes et un taux normal et tolérable de 3%, à une hauteur d'environ 3m. Lorsque la situation est courante et moins grave, le taux dans les plinthes est de 5 à 9%.

L'humidité ascensionnelle est uniformément répartie, le taux d'humidité reste constant et identique dans la même section horizontale du mur (fig.3.24). Mais il se pourrait qu'il y est une légère différence, lorsque le locale est habité, et ce du côté intérieur du mur à cause d'une éventuelle condensation, de l'ordre de 2 à 4 %.

Cependant, l'humidité de condensation, présente un taux relativement constant sur toute la hauteur de la paroi intérieure, mais un taux décroissant de la face interne vers la face externe, dans la section horizontale du mur.

Quant à l'humidité provenant d'une infiltration latérale de pluie battante, ses manifestations sont des plus contradictoires : dans certains cas, seule la paroi extérieure du mur est humide ; dans d'autres, contre toute attente, les deux parois extérieure et intérieure sont humides, mais la masse intermédiaire reste sèche (fig.3.24).

Le diagramme représentant les variations saisonnières des taux d'humidité dans la maçonnerie (fig.3.24.) n'enregistre aucun fléchissement dans le cas de l'humidité de remontée capillaire. Par contre, il n'en va pas de même dans le cas de l'humidité de condensation, qui est un phénomène transitoire. En effet, on remarque la disparition de l'humidité après la fin de l'hiver.

L'humidité par infiltration latérale de pluie battante et l'humidité à mouillure intermittente sont plus transitoires encore et peuvent se manifester et disparaître d'un jour à l'autre.

3.3.4 Caractéristiques de l'humidité

Si l'on compare l'humidité ascensionnelle à l'humidité de condensation, on trouve que la première apparaît surtout dans les constructions anciennes et seulement aux deux niveaux inférieurs (cave et RDC ou sous-sol et entresol), en revanche l'humidité de condensation, qui se manifeste le plus souvent aux étages supérieurs des constructions en béton armé, à cause de la minceur excessive des murs.

En général, l'humidité de remontée capillaire touche toute l'aire de l'immeuble et tous les édifices d'une même zone quand ils datent de la même époque et qu'ils sont construits avec les mêmes matériaux². Elle imprègne le plus fortement les murs de briques, puis ceux de pierraille légère ; d'un poids spécifique inférieur à 1,9. Surtout les murs rejointoyés par du mortier de pouzzolane que ceux rejointoyés par du mortier de sable ; mais elle ne réussit pas à envahir les murs en pierre naturelle dures et lourde, telles que le granit, le gneiss, le basalte, le calcaire compact, le marbre, le travertin,...etc. Surtout si ces pierres sont mises en œuvre sous forme de moellons équarris (tab.3.2).

¹ Massari G : Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements, Éditions Eyrolles – Paris, 1971

²[Enlign <http://www.irc.com>, 2005.

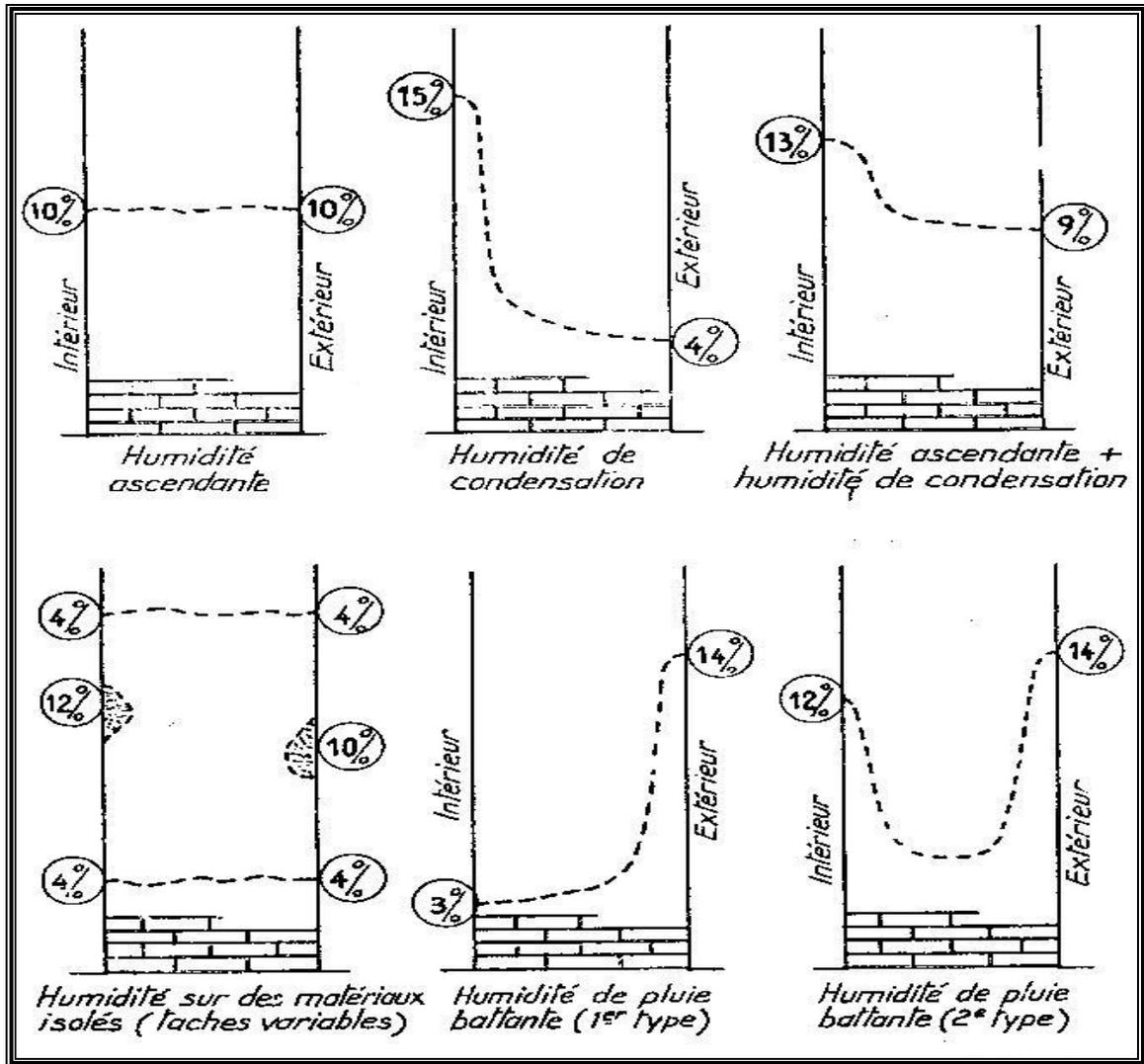


Fig.3.24 : Diagramme, établi d'après les types d'humidité, de la distribution de l'eau dans la section horizontale, de la face intérieure à la face extérieure d'un mur dont la capillarité est excellente. **Source** : Massari, 1971.

Humidité de remonte	Humidité par condensation de l'air	Humidité intermittente de matériaux isolés	Humidité due à la pluie battante
I. PREFERENCES			
Constructions anciennes	En été dans les sous-sols.	A tout étage, mais le plus souvent aux étages inférieurs	A tout étage
Exclusivement aux étages inférieurs et dans les sous-sols.	Aux étages supérieurs en hiver.		
Murs très épais	Murs périphériques	Murs construits avec des matériaux de démolition ou	Une ou deux façades exclusivement

Brique légère ou tuf	peu épais. Pierres lourdes	des matériaux de poids spécifiques très différents	Murs en briques d'une épaisseur inférieure à 3 têtes de briques ou de moins de 60cm, en pierre non équarries.
II- ASPECT			
Manifestations Constantes Quelquefois, taches persistantes et obscures s'étendant du plancher vers le haut Érosion éventuelle de l'enduit, dans le haut, en bordure de la zone sèche	Manifestations intermittentes. Pellicule uniforme et légère sur toute la paroi intérieure Érosion légère de l'enduit, dans le bas, près de la plinthe.	Manifestations intermittentes Taches isolées d'intensité variable selon les jours, localisées toujours aux mêmes endroits.	Manifestations accentuées après la pluie Tache accentuées, mais irrégulières ; dans certains cas, légère pellicule recouvrant toute la paroi intérieure.
III- TAUX D'HUMIDITÉ			
Décroissant à mesure que l'on s'élève au-dessus du plancher Constante dans une section horizontale dans toute l'épaisseur du mur	Constant sur toute la hauteur de la paroi. Décroissant dans l'épaisseur, de la paroi intérieure vers l'extérieur du mur.	Très différent d'un point à l'autre. Élevé dans les zones tachées, faisant ailleurs, en général	Très différent d'un point à l'autre quelquefois élevé sur les deux parois intérieures et extérieures, l'ossature du mur restant sèche.

Tab.3.2 : Caractéristiques de l'humidité dans les constructions anciennes. **Source** : Massari, 1971

Il a été constaté aussi, que l'invasion (humidité ascensionnelle) est d'autant plus rapide et profonde lorsque le mur est bien construit. Cet envahissement dépend toujours de la présence simultanée de deux facteurs :

- Ø quantité de la réserve d'eau dans le terrain ;
- Ø capillarité du matériau de construction uni au mortier

Il en résulte que seul la capillarité du mortier ne suffit pas, pour que l'humidité puisse monter dans la masse de la bâtisse. Il faut que le matériau de construction soit poreux et pourvu d'un coefficient d'affinité élevé, comme le sont les tufs, les calcaires, les grès tendre et les briques ordinaires.

L'humidité ascensionnelle peut être alimentée par :

- 1) La nappe phréatique ;
- 2) Des nappes superficielles d'eau perdue.

La première source d'alimentation est la plus difficile à maîtriser car il s'agit d'une marée souterraine que l'on ne peut ni l'assécher, ni contenir mais facilement identifiable puisque c'est un phénomène uniforme et général. Quant au second cas, il est aisé de l'intercepter par des

moyens adéquats et l'assainir, elle est généralement accidentelle, cependant elle est difficilement identifiable parce que c'est un phénomène local et limité, échappant à l'observation. En effet, les méthodes d'intervention sont différentes pour les deux cas

Les nappes superficielles d'eau perdue s'alimentent généralement, d'eaux de pluie mal recueillie, des fuites des conduites d'eau potable ou d'égouts, des puits, des réservoirs d'eau ou encore d'eau de condensation. Il en résulte toujours, et quelque soit leur origine, une imprégnation de certaines parties des fondations lorsqu'elle est profonde, si non les parties de l'ossature juste au-dessous du sol si cette eau perdue est superficielle.

Il se trouve que fréquemment, les cas d'humidité issue de la mauvaise collecte des eaux pluviales des toits et terrasses déversent le long des murs au lieu d'être canalisés jusqu'aux regards. Pour cela et afin de déterminer avec précision l'origine de l'eau d'alimentation, il faut procéder à l'expertise suivante :

- Ø Creuser des tranchées le long des murs humides, jusqu'à une zone sèche ;
- Ø Contrôler l'étanchéité des puits, des citernes, des égouts intérieurs ou extérieurs ;
- Ø Inspecter minutieusement l'état des canalisations de la voie publique et celui des gouttières ;
- Ø Mettre à nu les conduites d'eau sous pression et, toutes vannes fermées, rechercher, au manomètre ou par tout autre moyen, les fuites éventuelles.

L'assèchement des nappes d'eau perdue dépend donc des résultats de l'expertise, Il s'agit de travaux manuels utilisant un matériel élémentaire. Ces travaux exigent aussi une certaine patience en raison non seulement de leur caractère fragmentaire mais aussi de la configuration et de la densité urbaine du site.

Il arrive que le diagramme des sections humides révèle, à lui seul, de quelle direction vient l'eau (fig.3-25).

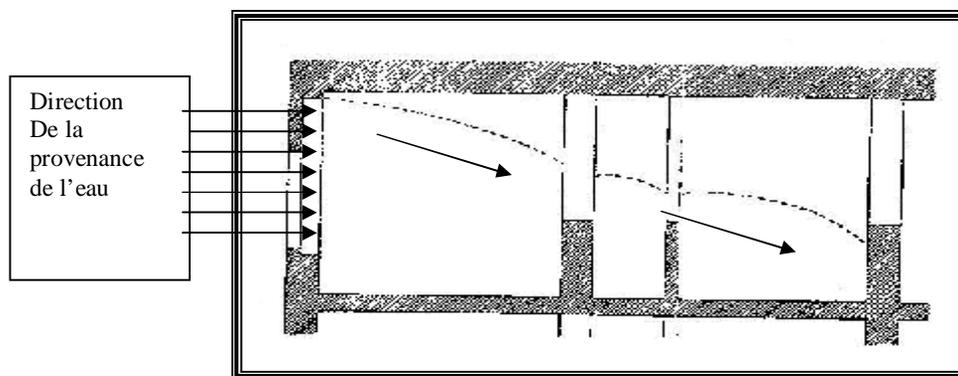


Fig.3.25 : schéma, représentant le sens et la direction de la provenance de l'humidité

Il se pourrait qu'il y ait une double alimentation : eau provenant à la fois de nappes superficielles et de la nappe phréatique. En effet, si l'alimentation se fait à partir d'une nappe d'eau profonde, phréatique, le taux d'humidité de la maçonnerie sera assez uniforme dans l'édifice entier ; mais si l'eau d'alimentation provient de nappes superficielles d'eau perdue, certaines parties malsaines de l'édifice concentreront l'humidité, Tandis que d'autres seront sèches¹. L'examen de ces manifestations est particulièrement utile quand il est impossible d'inspecter directement l'état du terrain au moyen de sondages ou de prélèvements effectués le long des murs.

¹ Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985

a) Propriétés de l'humidité provenant d'eau perdue :

- Elle n'apparaît que d'un seul côté du bâtiment
- Elle n'envahit, en général qu'une bâtisse ou petit ensemble de constructions contiguës
- Ses manifestations sont variables au cours de l'année

b) Propriétés de l'humidité provenant de la nappe phréatique :

- Elle imbibe très uniformément toute la base de l'édifice, sauf si l'infrastructure est construite avec des matériaux hétérogènes;
- Elle atteint une hauteur maximum sur les faces orientées nord et nord-est « non ensoleillées », et minimum au sud, sud-est et sud-ouest « parties très ensoleillées »;
- Elle envahit tous les immeubles d'un même îlot, datant de la même époque et construits avec les mêmes matériaux ;
- Ne présente pas de variations, la hauteur qu'elle atteint dans les murs est constante pendant toute l'année.

3.4 Le phénomène de la capillarité dans les matériaux de construction

L'étude des propriétés des matériaux, nous permet de comprendre leur comportement vis à vis de l'humidité. Certaines expériences de laboratoire ont été effectuées sur des échantillons de même taille ont révélé que la hauteur d'affinité varie d'un matériau à l'autre.

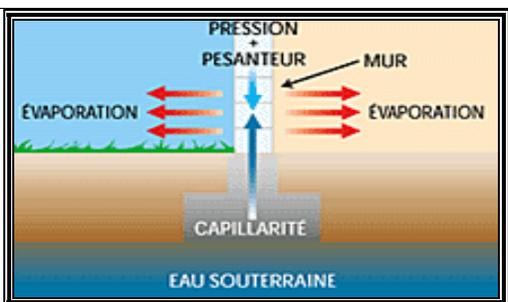


Fig.3.26 : phénomène de la capillarité.

Source : [http:// www.irc](http://www.irc), 2005

Le pouvoir d'absorption d'un mur se rapproche de celui du matériau de base : plus le rejointoiment en mortier sera mince, plus le comportement général du mur se rapprochera du comportement spécifique du matériau de base. A titre d'exemple et pour mieux comprendre, un mur en brique rejointoyées avec peu de mortier réagira beaucoup plus comme une brique (matériau de base) qu'un mur irrégulier de gros blocs de travertin rejointoyés avec beaucoup de mortier ne réagira comme le travertin.

On peut dire que pendant l'invasion de l'humidité, le comportement du matériau de base (brique ou pierraille) peut être, par rapport au mortier, soit actif, soit passif : actif si le matériau véhicule directement l'humidité avec autant ou plus de rapidité que le mortier ; passif s'il retient l'humidité aux dépens du mortier. Ainsi, le comportement des matériaux qui constituent un mur influence ce dernier pour autant que le mortier qui le rejointoie fasse des différents éléments de construction un ensemble homogène.

Si l'on prend le cas de la brique ordinaire qui a un pouvoir d'affinité de trois à cinq fois supérieur à celui du mortier¹ : un mur construit avec ce matériau permet à l'humidité de monter d'autant plus rapidement que ce mur sera plus soigneusement construit, que les briques seront de meilleure qualité et qu'elles seront mieux rejointoyés avec du mortier réparti en couches minces et bien étirées.

Une ossature élevée en matériaux anticapillaire, comme par exemple le grès ou le silex, ne favorise pas le passage de l'humidité, l'eau passe très lentement à travers le mortier. Par contre dans un mur de brique, c'est la brique même qui permet le passage de l'humidité d'une couche

¹ DANIEL.B ; CHAMPETIER. J-P ; VIDAL. T, *Anatomie de l'enveloppe des bâtiments*, le Moniteur, Paris, 1997

« horizontale » de mortier à l'autre et sert de raccourci par rapport au joint vertical du mortier (fig.3.27).

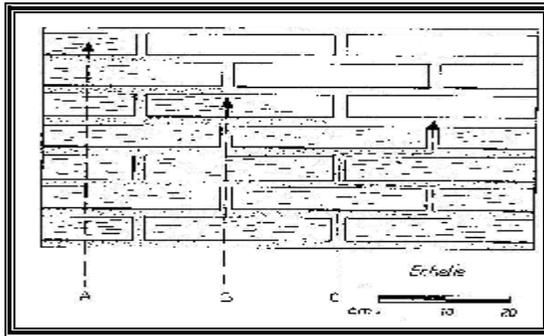


Fig.3. 27 : Cheminement de l'humidité
le plus cours est « A »

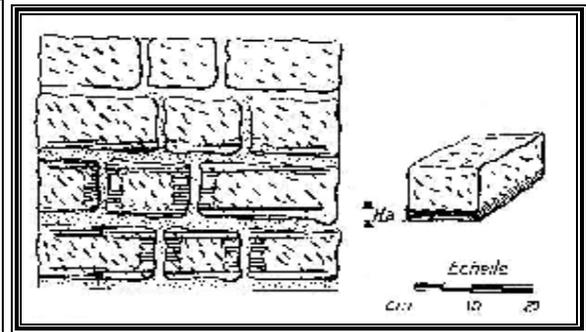


Fig. 3.28 : Rapport entre la hauteur d'affinité et la
hauteur du moellon

Source : Massari, 1971

L'imbibition (fig.3.27) s'effectue donc avec plus de rapidité par les trajets A ou B, qui traversent les lits de briques. Ainsi s'expliquent ces hauteurs considérables que l'humidité réussit à atteindre dans les murs de briques, en un temps relativement bref.

Par ailleurs, la participation active d'un matériau à la progression de l'humidité dépend aussi des grandeurs des blocs employés. Si la hauteur du bloc dépasse de beaucoup la hauteur H_a d'affinité (fig.3.28), ce bloc ne contribue en rien à la montée de l'humidité, parce qu'il tend à retenir l'eau qu'il a prise au mortier, tout en restant sec ou presque sec, à l'intérieur de sa masse.

Si une disproportion existe entre l'épaisseur du bloc et son potentiel d'affinité, la progression de l'humidité dans le mur est extrêmement lente et la hauteur maximum qu'elle peut atteindre est relativement peu importante. En effet si l'on dispose de deux murs construits avec un même matériau identique mais taillé moellons gros (hauteur $> H_a$) dans l'un et petits (hauteur $< H_a$) dans l'autre, se comportent différemment, le premier se montrant réfractaire et le second favorable au passage de l'humidité. Par conséquent, les matériaux réfractaires à toute imbibition comme le silex, grès et basaltes peuvent être utilisés en petites dimensions sans craindre l'humidité par contre, les matériaux ayant un grand pouvoir d'affinité doivent être employés sous formes de moellons de la plus grande dimension possible.

En conclusion, pour que l'humidité de remontée capillaire puisse progresser facilement à l'intérieur des matériaux, il faut la présence de deux conditions sine qua non :

1. alimentation continue de l'ossature par une nappe d'eau ou mouillure du terrain,
2. une grande capacité d'absorption du matériau de construction lié au mortier.

Remarque :

Il est à signaler que si, l'alimentation est discontinue, l'humidité s'étend plutôt vers le bas ou à la rigueur horizontalement, au lieu de monter en haut même si le matériau est capillaire.

1.6.1 Expérience de Talenti

Talenti¹ a injecté plusieurs hectolitres d'eau colorée à l'éosine dans un gros pilastre sec en brique jaunes, à haut potentiel d'affinité. L'injection d'eau, effectuée par un trou d'une profondeur de 60 cm, incliné vers l'intérieur du pilastre (fig.3.29), se poursuivit pendant 20 jours consécutifs, à raison de 17 à 18 litres par jour. Après cinq jours, les premières tâches rouges de l'éosine apparurent sur l'enduit extérieur ; ensuite elles s'agrandirent et s'accumulèrent jusqu'à former une large bande autour du pilastre. Cependant, contrairement à ce qu'il avait supposé, l'humidité ne progressa pas vers le haut, mais demeura tout entière en dessous de l'orifice d'injection. Il apparaissait donc que l'humidité se propageait rapidement, sans doute à cause du haut pouvoir d'absorption du matériau, mais seulement vers le bas.

Conclusion

Cette expérience assez élémentaire a permis de tirer une conclusion très intéressante pour déterminer l'origine de l'humidité ascensionnelle et comprendre le comportement des matériaux : l'humidité tend à monter, et prend donc la forme caractéristique d'humidité ascensionnelle, uniquement si elle est véhiculée dans une série de vaisseau capillaire s'alimentant à des nappes souterraines.

Dans tous les autres cas, l'humidité subit la loi de la pesanteur et se propage donc vers le bas ; ce n'est que lorsque le mur est saturé de façon continue, dans sa partie inférieure, que l'humidité devient ascensionnelle, se propageant dans la seule direction restée libre, vers le haut (fig.).

Quant à la vitesse moyenne d'ascension, Salmoiraghi cite le cas des pylônes en briques de la citerne géante de Livourne, construite en 1828, où l'humidité atteignait une hauteur de 2 à 2,40 m au-dessus du niveau de l'eau en 1887 : elle aurait donc progressé là d'environ 4 cm par an.

Remarque :

Au départ, la progression de l'humidité ascensionnelle à travers un mur nouvellement construit et assez rapide sur les premiers décimètres, mais devient ensuite de plus en plus lente à cause de l'évaporation superficielle qui l'entrave.

¹ Talenti.M. « Microbiologia », in MASSARI, Bâtiments humides et insalubres, Paris, 1970.

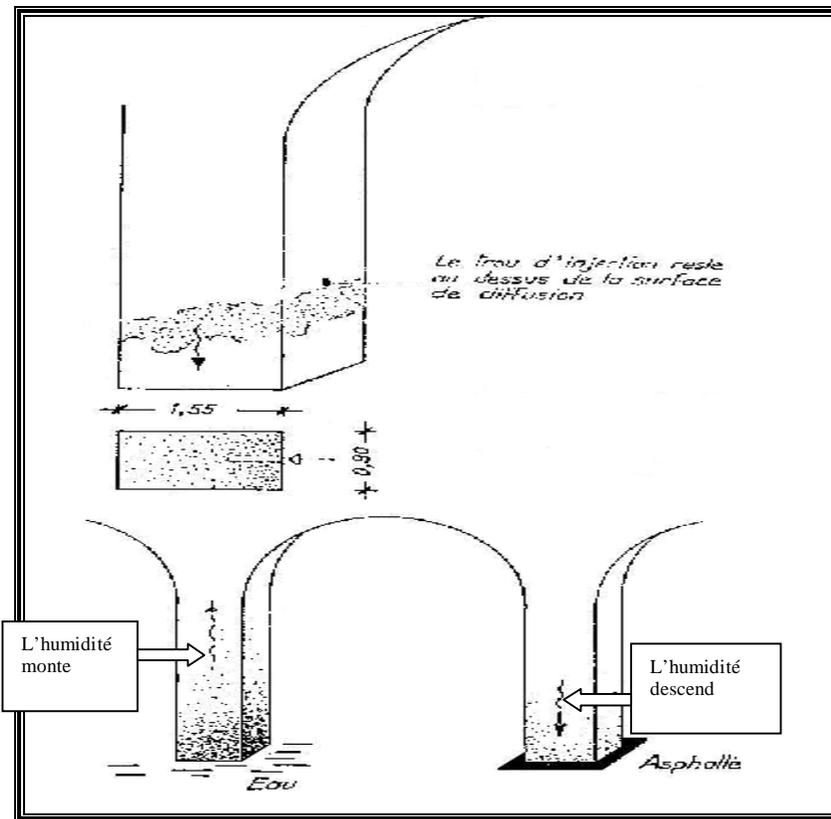


Fig. 3.29 : Expérience de Talenti, 1971.

3.4.1 Hauteur de progression de l'humidité

L'effet des conditions climatiques sur la hauteur de progression de l'humidité est considérable. Dans le cas où l'air est très humide « proche de son point de saturation », sa capacité d'absorption de la vapeur d'eau est donc très faible, ce qui favorise l'humidité, non soumise à l'évaporation, de se propager au maximum. Par contre l'inverse se réalisera si le vent est sec et chaud.

Les cas graves de l'humidité, du point de vue hygiénique, et les plus spectaculaires se manifestent généralement dans les lieux situés à l'ombre et à l'abri de tout déplacement d'air : dans les patios étroits (fig. 3.30), dans les rez-de-chaussée non ensoleillés, sous-sols, impasses et les parties orientés Nord-est et bordées d'écran vert à feuilles persistantes...etc ; bref, en d'autres termes c'est la portée du « microclimat ». ceci peut être vérifié dans l'exemple de la villa Farnesina¹, en Italie : bâtisse isolé, datant du 15eme siècle, dont la structure est en tuf, la hauteur de l'humidité mesurée sur les colonnes atteint 1,50 m du coté sud (très ensoleillé) et 3,10 m du coté nord.

¹. MASSARI G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971



Fig. 3. 30 : patio étroit. Suika Constantine. **Source** : auteur, 2005

Sachant qu'aucun autre facteur n'intervient comme la ventilation par exemple. Nous pouvons déduire que, dans ce cas-ci, l'insolation effective réduit de 1,60 m la hauteur de l'absorption. Si, par hypothèse, l'action asséchante du soleil venait à être supprimée, soit par la construction d'un édifice contigu, soit par l'implantation d'un rideau d'arbre à feuilles persistantes, plusieurs années après, nous verrions l'humidité atteindre, du côté sud, la même hauteur que du côté nord.

A cet effet, nous pouvons conclure ainsi : Quand les deux conditions de l'humidité de remonté capillaire citées précédemment existent sur site à savoir l'alimentation continue et le pouvoir d'affinité du matériau, la hauteur que peut atteindre l'humidité dans le mur dépend :

- Ø des conditions climatiques : ventilation et ensoleillement;
- Ø De l'insolation effective ou, mieux, du manque d'insolation du mur humide ;
- Ø de l'âge du bâtiment.

Il serait peut être utile de citer quelques exemples sur les hauteurs de progression de l'humidité dans quelques pays et ce à titre de comparaison :

En Italie, elle peut atteindre le premier étage, c'est-à-dire 4 à 5 m au-dessus du niveau du sol. elle est de 1 à 2 m en Allemagne et en France¹. A Athènes, cependant, elle est pratiquement insignifiante, en raison soit de la sécheresse du climat, soit de la nature du terrain.

Quelque soit la hauteur atteinte par l'humidité, on peut imaginer qu'elle monte dans le mur, comme un véritable conduit de vaisseaux capillaires. Cette propagation dans le mur n'est pas infinie, au contraire, elle se stabilise à une certaine distance, selon les conditions du lieu déjà énuméré au paravent, de ce fait, on appelle ce phénomène « l'équilibre hydrique » résultant de l'équivalence entre le débit de la section absorbante inférieure¹, d'une part, et l'évaporation totale des parois, d'autre part. Autrement dit, il entre autant d'eau par absorption qu'il en sort par évaporation.

Dès que la surface d'évaporation se réduit par n'importe quel phénomène, l'humidité recommence à monter.

Plusieurs spécialistes ont remarqué la proportionnalité qui existe entre le débit de la section absorbante et celle de l'épaisseur des parois, cette hypothèse a fait l'objet d'une vérification par

¹ [Enligne] <http://www.CSTB.fr,2004>.

Massari au palais Corsini où les deux murs parallèles d'un passage couvert humide contiennent des taux d'humidité proportionnels à leur épaisseur (fig.3.31 et fig.3.32). Par conséquent, d'une part, plus un mur est épais, plus le niveau de l'humidité sera élevé, d'autre part, plus le mur dispose d'une plus large surface d'évaporation pour compenser sa capacité d'absorption.

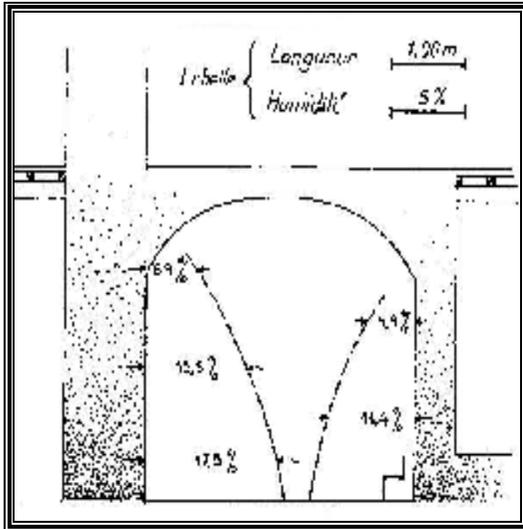


Fig. 3. 31 : proportionnalité de l'humidité aux épaisseurs des murs

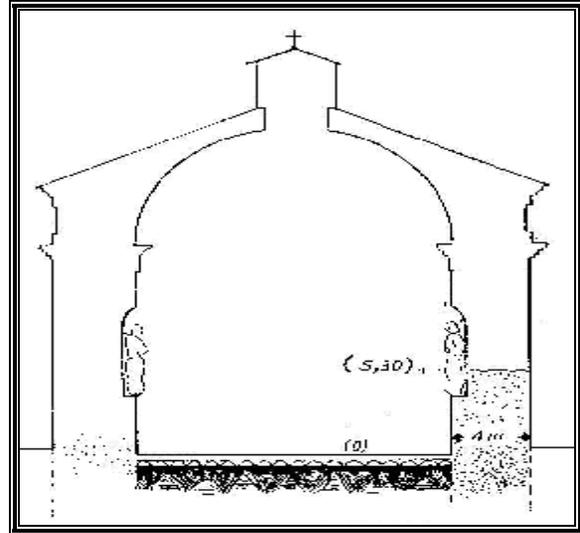


Fig. 3. 32 : Hauteur atteinte par l'humidité: 5,30m dû à l'épaisseur du mur

Source : Massari, 1970

Indice de progression ou de montée

Plusieurs études ont été effectuées sur les murs humides de certains édifices de Rome ont révélé que le rapport entre la surface évaporante et la section absorbante était en moyenne, comme suit

- Ø Dans les pilastres isolés surf.évap/surf.absor = de 2 à 3 ;
- Ø Dans des mur à parois extérieures « de 3 à 8 ;
- Ø Dans des murs d'angle « de 4 à 10.

Mais en pratique, il est plus commode de calculer le rapport entre la hauteur maximale de progression de l'humidité, soit « Ha », et « l'épaisseur du mur ».

Nous appellerons ce rapport de deux mesures linéaires : « l'indice de montée » $IM = Ha/S$.

Ainsi, la figure (fig.3.33) montre la relation qui existe entre l'humidité et l'épaisseur du mur :

- Ø dans des pilastres isolés, naturellement bien aérés, la hauteur de progression étant égale à l'épaisseur du pilastre, l'indice de montée est égal à 1 ;
- Ø dans des murs à parois extérieures, la hauteur de progression mesurant de 1,5 à 4 fois l'épaisseur du pilastre, l'indice varie entre 1,5 et 4.
- Ø dans des murs intérieurs (d'angle), où la hauteur de progression mesure entre 2 et 5 fois l'épaisseur du mur, l'indice varie entre 2 et 5.

La meilleure période pour observer la hauteur de progression de l'humidité est « l'hiver », dans les maçonneries ayant le plus grand pouvoir d'absorption et orientées au nord. La limite est atteinte quand l'air est saturé ou près de l'être. Sachant que, la constante de capillarité augmente avec la basse température et la quantité des sels minéraux dissous dans l'eau absorbée par affinité par les murs.

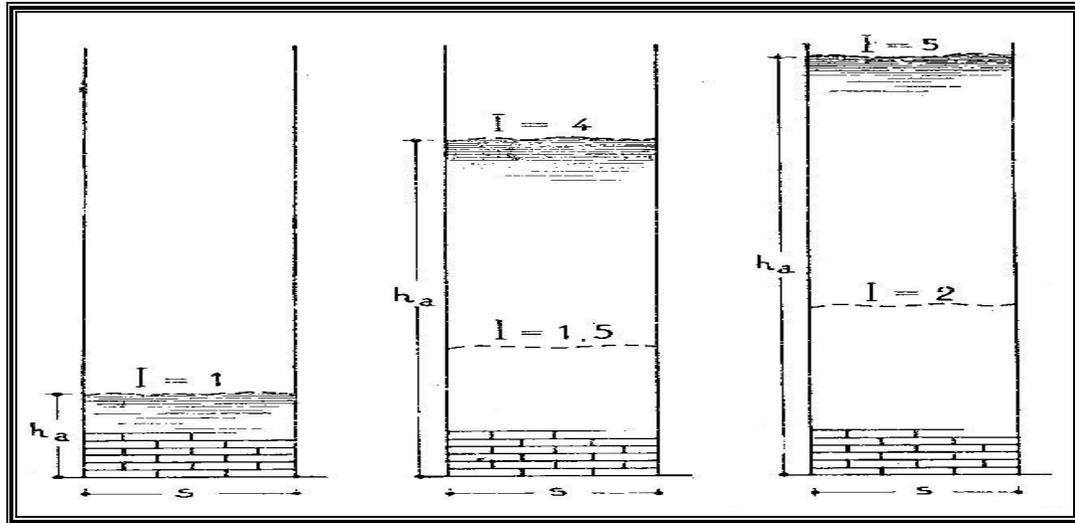


Fig. 3. 33 : La hauteur de l'humidité est fonction de l'épaisseur du mur et à la ventilation auquel est soumis
Source : Massari, 1971

Hypothèse de Kettenacker¹

L'évaporation superficielle des murs, provoquée par la ventilation et l'action du soleil, est une contrainte à la progression de l'humidité qui finit par l'arrêter. Les expériences ont montré aussi que la ventilation et le soleil ont pour action d'activer l'évaporation et qu'à toute augmentation de celle-ci correspond une égale augmentation de la quantité d'eau absorbée, par le bas, dans le réservoir.

En réalité Kettenacker voit autrement, et d'après lui le début de l'assèchement, commencerait par le haut du mur, tandis que la partie en dessous de la ligne de délimitation reste humide, et qui a uniquement pour cause : les pertes de charges dus à la résistance de l'eau lors de la traversée de son débit dans les vaisseaux capillaires et ce pour répondre à l'augmentation de l'évaporation. Le mur se comporte donc comme un conduit capillaire, ayant la même perte progressive de charge, à mesure que croit la vitesse du débit, phénomène similaire, que l'on retrouve généralement dans un réseau d'eau potable à cause des frottements avec les parois des conduits. Par conséquent la hauteur de progression de l'humidité tendrait à diminuer à mesure qu'augmente la vitesse d'évaporation superficielle.

Cette hauteur de montée capillaire dépend alors, seulement de la nature des matériaux qui constituent le mur, Plus les vaisseaux capillaires seront réguliers et fins, plus la progression de l'humidité sera élevée et elle atteint son point le plus haut, seulement si l'air est saturé ou presque, c'est à dire qu'il y ait impossibilité d'évaporation.

¹ KETTENACKER, L, *l'humidité des murs*, Gesundheit-Ingenieur, 1930. p721

3.5 L'humidité et ses nuisances

3.5.1 Effet de l'humidité sur les constructions

L'humidité est l'une des principales causes des désordres qui affectent les constructions. Elle peut menacer la bonne conservation des structures et des matériaux constitutifs du bâtiment. Elle se manifeste par un grand nombre de désordres : salissures, décollement de revêtements, effritement des enduits, gonflement et gauchissement des bois, etc (fig :3.34-35-36-37). Elle peut en cas de gel avoir des conséquences encore plus graves telles les fissurations et les éclatements de matériaux.



Fig. 3. 34 : immeuble dégradé, quartier Suika



Fig. 3. 35 : place, quartier Suika basse

Source : auteur, 2005

Par ailleurs, elle porte atteinte au confort :

- Ø Par le développement de moisissures et de champignons à l'intérieur des logements.
- Ø Par la diminution de l'isolation thermique lorsque les murs ne sont pas suffisamment secs.



Fig. 3. 36 Détérioration des revêtements intérieurs



Fig. 3.37 : Champignons

Source : auteur, 2005

3.5.2 Effet de l'humidité sur la santé de l'homme

Un milieu de vie sain passe nécessairement par une bonne qualité de l'air au foyer. Un surcroît d'humidité dans l'air peut favoriser la croissance de moisissures, un phénomène qu'on associe toujours à des problèmes respiratoires pour les occupants. L'humidité est donc, l'un des plus graves facteurs de dégradation de la qualité de l'air intérieur des logements. Un air humide altère

l'atmosphère d'une maison de plusieurs façons. Dans les cas graves, il peut même affecter la santé.

De récentes études¹ ont sensibilisé le monde du bâtiment ; avec l'amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe des bâtiments (alors que les constructions traditionnelles étaient très perméables à l'air), le taux d'humidité à l'intérieur des logements a augmenté. Cette préoccupation se révèle particulièrement sensible dans les régions où les températures extérieures, basses en hiver, engendrent une condensation sur toutes les surfaces où la température est inférieure au point de rosée (niveau de saturation) de l'air ambiant.

L'humidité d'infiltration a pour conséquence le développement de moisissures et de bactéries au sein des matériaux, accompagné de l'émission de substances odorantes et irritantes (fig : 3.39).

L'humidité de condensation augmente le risque d'infestation par les acariens et favorise sur les surfaces qu'elle humidifie la prolifération fongique (moisissures) et bactérienne (fig : 3.38).

Les moisissures sont à l'origine d'un large éventail de pathologies² pour les personnes qui y sont exposées de façon prolongée, ce qui est le cas quand il s'agit de l'habitation : les plus fréquentes sont les allergies, avec en tête l'asthme, les enfants étant les plus exposés avec une respiration plus rapide et un développement respiratoire inachevé.

En effet, les allergies sont dues principalement aux spores que les moisissures diffusent dans l'air pour se reproduire. Mais elles produisent aussi de puissants agents inflammatoires qui sont à l'origine d'irritations des yeux, du nez, de la gorge, associés à de la fatigue et à des maux de tête. Enfin, plus exceptionnellement, elles produisent des mycotoxines qui peuvent avoir des conséquences dermatotoxiques, immunotoxiques et cancérigènes. Leur inhalation peut provoquer des maladies très graves. Les trichothécènes produites par *Stachybotrys atra* ont été incriminées, chez de très jeunes enfants, dans des hémorragies pulmonaires mortelles. Cette moisissure se développe particulièrement dans les bâtiments après des dégâts des eaux. Les spores mortes sont encore allergisantes et toxiques. L'espèce *Aspergillus versicolor*, la seconde espèce la plus fréquente, selon une étude réalisée sur cent trente maisons belges (76,1%), produit une toxine cancérigène appelée la sterigmatocystine...

En outre, l'humidité et en particulier celle de condensation produit des émissions toxiques par la dégradation chimique de certains matériaux de construction³ comme les revêtements de sol en PVC, le béton, les chapes de ragréage, etc



Fig. 3.38 : Acariens **Source** : www.travaux.com, 2005 **Fig.3.39** : Moisissures. **Source** : auteur

¹ DEOUX S et p, *le guide de l'habitat sain*, MEDICO, Andorre, 2002.pp181-197

² [Enligne. <http://www.sandrine.com>, 2005.

³ Couasnet Y : *les condensations dans les bâtiments : guide pratique et éléments d'analyse*. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 1990.

3.5.3 Effet de l'humidité sur les matériaux de constructions

a) pierres naturelles

Sous l'effet de l'humidité capillaire, certains matériaux subissent des dégradations énormes dont l'intensité dépend surtout de leurs positions et leurs orientations dans la structure (3.40). La plus part des grès, par exemple, s'ils se conservent bien en superstructure, se détériorent en infrastructure c'est-à-dire, là où règne l'humidité.

En général, il faut savoir que, parmi les substances qui entrent dans la composition des matériaux naturels, il existe ceux qui sont favorable à la lutte contre l'humidité et d'autres qui l'entravent. Comme la silice par exemple qui en résiste bien, alors que les substances carbonées ou bitumineuses ne le sont pas.

Certaines roches soumises à des actions chimiques comme la « kaolinisation¹ » se désagrègent très facilement par l'humidité, tel que le granit et le porphyre, considérés souvent comme des matériaux éternels (fig : 3.40 ; 3.41).

Comment s'explique alors, la réputation d'éternité de certains matériaux. La réponse est simple. D'après Massari², « l'éternité du granit est réelle à condition qu'on l'emploi de façon classique, dans les obélisques ou d'autres monuments extérieurs soumis à des climats très secs, tels que celui de l'Égypte. Mais si l'on employait ce même granit à Venise, dans des fondations soumises à une humidité intermittente, sa détérioration serait aussi inéluctable que son éternité dans un obélisque ».



Fig. 3. 40 : Mur en pierre et en brique



Fig. 3. 41 : Mur en pierre calcaire

Source : auteur, 2005

L'érosion des enduits ciments et des pierres calcaires causées par la salinité des bâtiments est aussi un autre type de dégradation chimique, provoqué par l'humidité de condensation provenant de l'air marin. Après réaction, il se forme un sel dangereux appelé : chlorure de calcium qui est délétère. Il attaque et détruit les pierres calcaires et les mortiers très rapidement.

b) le bois

Attaquée par l'humidité, le bois perd ses propriétés physiques tel que : la résistance à la pression en revanche, sa résistance à la traction reste la même. Le diagramme de Geiger, (fig.3.42), montre bien comment la charge maximum supporté par le pin, qui dans les conditions normales

¹ Kaolinisation : hydratation des silicates d'alumine, ce dernier se transforme par hydratation en kaolin tendre, c'est-à-dire en argile pure.

² MASSARI G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971

d'humidité (12%) est d'environ 470 kg/cm², tombe à 220-200 kg/cm² lorsque le bois approche de la saturation (2 - 40 %).

On peut conclure que le bois, et à cause de l'humidité, serait moins résistant en hiver et en automne qu'en été. Cette observation est d'une grande utilité vis-à-vis des surcharges saisonnières.

L'autre ennemi du bois est le champignon qui apparaît avec l'humidité, au moment où le taux de celle-ci dépasse 18% ou plus, d'autres conditions aussi qui favorisent l'apparition et la multiplication sont :

- Ø L'absence de l'aération ;
- Ø Un minimum constant de chaleur qui favorise le développement du mycélium.

Le champignon le plus répandu est le « *Merulius lacrimans* », appelé communément « pourriture rouge ». Il est le type le plus dangereux car il n'a besoin que de très peu d'humidité pour se développer, bien que dans la pénombre des greniers il apparaisse recouvert de gouttes d'eau.

Outre, l'odeur prenante qu'il dégage, ce champignon détériore le bois en détruisant soit la lignine, soit la cellulose, mais jamais les deux à la fois sauf que l'action successive de différentes espèces ne les ronge l'une après l'autre¹. On peut combattre ce champignon par le biais de la ventilation et une température élevée, car, il semble qu'il ne puisse vivre qu'à une température inférieure à 27° C (fig. 3.43).

c) matières organiques

En toutes périodes (été ou hiver), les matières organiques telles que : cuire, papier ...etc. sont endommagé par l'humidité et la chaleur qui favorisent le développement des bactéries, insectes, champignons et surtout les moisissures. L'humidité peut agir seule ou avec le concours d'agents biologiques sus-cités.

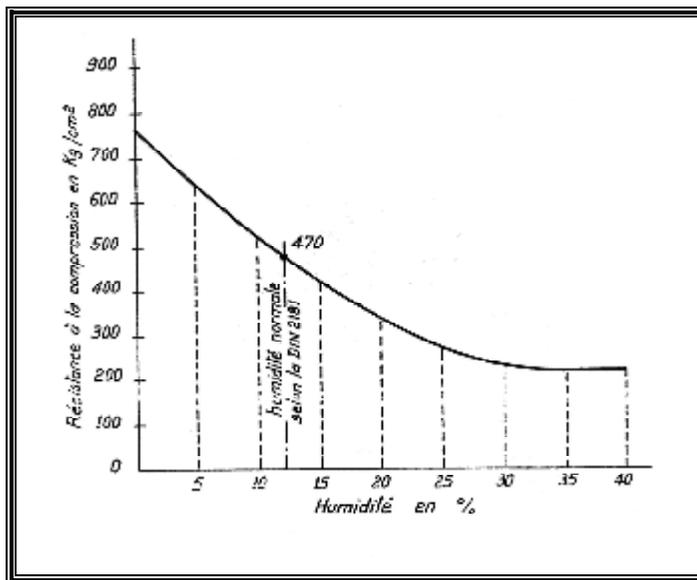


Fig.3.42 : Résistance du pin rouge à la force de compression en fonction de son taux d'humidité. **Source** : Collombet, 1985.



Fig.3.43 : Moisissure du bois
Source : auteur, 2005

¹ Collombet Raymond, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985 pp57-79

Lorsqu'elle agit seule, au cas où la température est basse, elle provoque le ramollissement progressif jusqu'à la véritable désagrégation du tissu, manuscrits et papier, sachant que ce dernier supporte bien une humidité relative de l'air variant entre 40 et 65 %. Mais lorsque le taux d'humidité se stabilise entre 80 et 90 %, il se détériore rapidement.

L'action des agents biologiques provoque toujours, une odeur de moisi qui révèle le développement des spores.

A Londres, le seuil du taux d'humidité relative a été fixé à 72 %, en dessous duquel, les spores ne se développent plus. En Italie, une disposition imposée aux bibliothèques publiques gouvernementales, sur le conseil de M. Alfonso Gallo, l'auteur éminent de la pathologia del libro a fixé le taux maximum d'humidité relative à 65 % et le minimum à 40 %, à condition que la température moyenne ne dépasse pas 18 ou 20°. Pour qu'un papier puisse être considéré comme sec, son taux d'humidité ne doit pas dépasser 12%.⁽¹⁾

La lumière du jour ou, à défaut, les rayons ultraviolets arrêtent la propagation des moisissures ; on obtient le même effet par une aération énergique des locaux.

3.5.4 Les efflorescences :

C'est la transformation en poudre par déshydratation des cristaux ou des minéraux. On trouve les sels solubles dans les mortiers, les pierrailles et les briques ou proviennent des nappes souterraines avec l'humidité ascensionnelle.

La cristallisation de certains sels dans les vaisseaux capillaires des matériaux, sous l'effet de l'alternance de l'humidification et de l'assèchement entraîne dans le cas des enduits des effritements. La partie endommagée de ce dernier se situe dans la zone sèche, juste au dessus de la zone humide. Quant à la zone de démarcation entre les deux, elle est recouverte d'efflorescence en large bande continue².

En revanche, sur les revêtements en brique, ces efflorescences sont discontinues et n'apparaissent que sur certaines briques isolées, laissant les autres intactes. Ce phénomène est dû à l'humidité, qui favorise la migration des sels solubles.

Les efflorescences continues, caractérisés par une couleur blanche, sont le résultat d'une concentration de sels migrateurs qui se produit presque toujours à l'endroit où l'humidité s'arrête.

Ces sels peuvent être : le sulfate de magnésium, sulfates de calcium et de sodium. Par contre les chlorures sont rares, sauf, là où souffle l'air marin.

Quant au salpêtre ou efflorescence de nitrate, il est presque inexistant, sauf dans le cas où un dépôt de déchets organiques (égouts, écuries...) se trouve très proche du mur. Il est à noter qu'autrefois, on utilisait le nitrate de potassium (insoluble dans l'eau) dans la fabrication de la poudre à canon.

On peut conclure que la cause des : efflorescences, effritements, et les gondolements est la migration des sels solubles selon deux possibilités³ :

Ø La capillarité: mouvement du liquide des parties humides vers les parties sèches ;

¹ MASSARI G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971.

² Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985

³ Couasnet Y : *Contribution à l'étude du transfert de vapeur d'eau en régime permanent et non stationnaire dans les matériaux poreux hygroscopiques*. Cahier du CSTB N°2349, Paris, 1989

Ø La diffusion: déplacement moléculaire des sels au sein du liquide, allant de la zone de solution la plus concentrée à la zone de solution la plus diluée c'est le phénomène de l'osmose (fig.3.44).

Il est à noter qu'il n'est pas aisé de distinguer l'effet de ces deux causes de migration des sels.

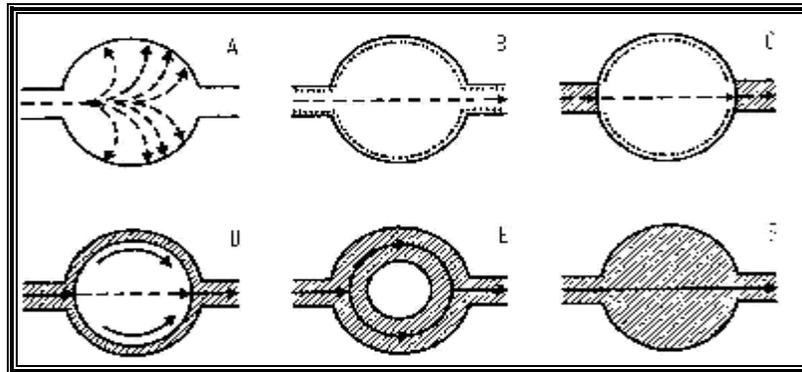


Fig.3.44 : Diffusion d'eau en milieu poreux. Source : Alain Roulet. C, 1987

3.5.5 effet de la capillarité

C'est un phénomène physique naturel, qui semble s'opposer à la loi de la pesanteur, d'après cette dernière, le liquide se trouvant dans deux vases communiquant doit être au même niveau. Le principe de la capillarité s'observe, lorsque l'un des vases soit réduit de manière à devenir un conduit capillaire, alors, le niveau du liquide monte d'autant plus que le conduit se réduit plus (fig.3.45)

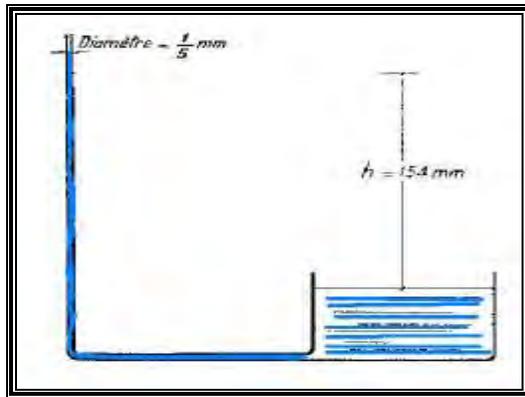


Fig.3.45 : expérience, principe de la capillarité.

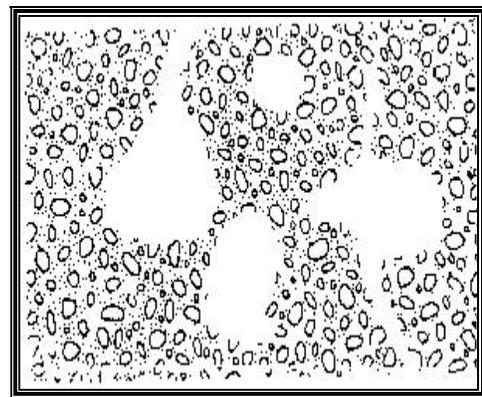


Fig.3.46 : Porométrie d'un béton

Source : Alain Roulet. C, 1987

L'expérience montre que dans un tube de 1mm de diamètre, l'eau monte de 31 mm ; si l'on réduit ce diamètre à un cinquième, elle monte de 154 mm, et ainsi de suite.

Il a été constaté que dans les vieux murs humides en brique, souvent le taux de 30 % de volume d'eau est dépassé c'est-à-dire pour un mètre cube de brique correspond 300 kg d'eau, véhiculé par la remontée capillaire.

Dans certains édifices anciens, il a été démontré que leurs murs contenaient, plus de 300 tonnes d'eau au dessus du niveau (0,00) du sol comme celui du palais Corsini, à Rome¹.

Les dommages provoqués par le phénomène de la capillarité sont les suivants :

- Ø Les décollements et les effritements de certaines pierres naturelles et des briques, dus à la pression exercée par les sels en cours de cristallisation ;
- Ø L'éclatement des matériaux au moment du gel ;
- Ø La formation d'efflorescences qui provoquent l'érosion des enduits et mortiers ;
- Ø Insalubrité des locaux causés par migration de vapeur d'eau.

On signale aussi que même les matériaux imperméables, anticapillaires et compacts finissent par être désagrégés par l'humidité (fig.3.46). Si on applique par exemple un enduit de ciment sur un mur en maçonnerie humide. Le résultat sera catastrophique, du moment qu'en bloquant la respiration ou l'évaporation l'enduit sera soumis, à cause des variations de températures, à des sollicitations vers l'extérieur qui provoqueront des boursouffures, des fissures qui permettent les infiltrations et ensuite le décollement. Ce décollement sera favorisé par de multitude de petits dépôts de sels solubles, expulsés de la maçonnerie, qui restent emprisonnés sous le nouvel enduit².

3.6 Insalubrité des locaux et conditions d'habitabilité

3.6.1 L'humidité et le comportement des matériaux de construction

Les normes techniques de constructions et d'hygiène traitent le rapport entre les matériaux et l'eau sur trois critères différents³ :

- la quantité d'eau absorbée;
- la vitesse ou la puissance d'absorption d'eau ;
- la vitesse d'évaporation ;

Ces trois critères ont fait l'objet d'expériences par plusieurs chercheurs dans le monde, et elles portent toutes sur des échantillons totalement immergés. En réalité ces expériences ne sont pas très utiles, du moment qu'un matériau posé dans une bâtisse n'est jamais entièrement immergé, accepté quelques cas particuliers, quant le niveau des fondations est inférieur à celui de la nappe phréatique ou les constructions sont implantées au bord d'une rivière ou au bord d'un étang.

Il est plutôt important, d'étudier le pouvoir d'absorption d'un matériau de construction usuel, partiellement immergé, autrement dit : la quantité d'eau absorbée par la partie du matériau qui émerge dans le liquide. De cette manière, les résultats obtenus seront similaires aux conditions réelles d'absorptions d'une construction au dessus du sol, dans lequel l'humidité s'infiltré par les fondations.

Quant aux roches alvéolaires comme le travertin par exemple, elles présentent un coefficient d'affinité nul.

En ce qui concerne le pouvoir d'évaporation et la vitesse de séchage, on ne trouve pas assez d'informations chez les hygiénistes.

¹MASSARI. G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971

² [Enligne] <http://www.travaux.com>. 2005.

³Grunau Edvard. B, *La lutte contre l'humidité dans les façades*, Éditions Eyrolles, Paris, 1970.

3.6.2 Classification des matériaux

a) Classification selon le taux d'imbibition

Le tableau ci-après (tab.3.3), nous renseigne sur le taux volumétrique d'humidité de certains matériaux lorsqu'ils sont soumis à une immersion totale.

Taux volumétrique d'humidité en (%)	Matériaux
De 0 % à 0,1 %	Les roches très compactes, le granit, le marbre de carrare et les calcaires saccharoïdes en général.
De 0,1 % à 5 %	Ces mêmes roches, mais moins compactes : le « macigno », le calcaire compact ordinaire, etc.
De 5 % à 20 %	Les grès, le calcaire demi-dur, le travertin, le mortier de ciment et de sable ; le mortier de chaux et de sable ; les briques dures et celle de parement.
De 20 % à 35 %	La molasse, le calcaire tendre, le tuf de bonne qualité, le mortier de chaux et de pouzzolane. Les briques ordinaires faites à la machine.
De 35 % à 55 %	Le tuf calcaire et le tuf volcanique, les briques faites à la main, les plâtres.

Tab.3.3 : Classification des matériaux selon le taux d'imbibition. **Source** : Grunau, 1970

L'analyse des données sus-citées, révèle que les matériaux dotés du plus haut coefficient d'imbibition, sont ceux qui possèdent une grande résistance thermique et un poids léger. Par conséquent c'est des matériaux qui conviennent le mieux dans le domaine de construction, malheureusement, ils présentent l'inconvénient de s'humidifier très rapidement.

L'humidité des matériaux peut être originelle, c'est à dire existante dans le matériau dès sa constitution dans les carrières et ce pendant des millénaires. Comme elle peut provenir lors de leur mise en œuvre.

Certaines roches conservent l'humidité pendant une longue durée lorsque les conditions lui sont favorables tels que : l'absence du soleil et le vent ou dans un climat humide.

Nous avons vu précédemment au paragraphe (§3.5.1), les dégâts que provoquent les maçonneries humides lors de leurs utilisation dans les constructions sans séchage préalable.

b) Classification selon le taux d'affinité

l'étude de l'humidité des murs doit prendre en considération, nécessairement, la capacité d'affinité c'est-à-dire la capacité que possède un matériau partiellement plongé dans l'eau de s'humidifier dans sa partie non immergée. Le tableau suivant (tab.3.4) indique le taux moyen d'humidité absorbée par la partie émergée du matériau.

Matériau	poids spécifique	pourcentages d'affinité	
		par rapport au poids de la partie émergée de l'échantillon	par rapport au volume de la partie émergée de l'échantillon
Mortier de pouzzolane.....	1,30	23,8	31
Tomette jaune sur mortier de pouzzolane adhésif.....	1,45	21,5	31,2%
Brique romaine jaune (fabriquée à la machine).....	1,55	19,6	30,4
Tuf volcanique.....	de 1,25 à 1,80	de 22 à 11,2 %	de 27,5 à 23,8%
Brique romaine rouge (fabriquée à la machine).....	1,60	15	24
Brique rouge	2	11,5	23
péperin.....	1,95	10,2	19,9
Mortier de sable siliceux.....	1,54	12,2	18,8
Mortier de ciment et de sable.....	1,75	8,4	14,7
Mortier de pouzzolane avec hydrofuge.....	1,10	13	14,3
Mortier de ciment et de sable avec hydrofuge	1,90	3,5	6,7
Travertin.....	2,55	1,1	2,8

Tab.3.4 : Taux moyens d'absorption d'eau (échantillons séchés au préalable à l'air libre et à température normale)

Source : Massari, 1971

On remarque dans le tableau précédent (3-4), les matériaux qui possèdent un important pouvoir d'affinité, sont ceux qui ont un poids spécifique plus léger comme la brique jaune, et le mortier de pouzzolane. Le mortier de ciment et de sable s'imbibe moins facilement que la brique rouge; les adjuvants hydrofuges mélangés au mortier ne lui enlèvent pas sa capacité d'affinité mais la réduire de moitié seulement.

Le tableau ci-dessous (tab.3.5) est le résultat d'expériences pratiquées sur les mêmes échantillons pour déterminer le coefficient d'affinité exprimé en gramme d'eau absorbée en moyenne en une heure par décimètre carré du matériau.

	Matériau	Poids (g)
1	Brique romaine jaune (à la machine)	29,5
2	Tomette jaune sur lit de mortier adhésif	19,7
3	Brique rouge de parement	16
4	Brique romaine rouge (à la machine)	14,5
5	Mortier de chaux et de pouzzolane	6,5
6	Mortier de chaux et de sable siliceux	7,9
7	Tuf romain volcanique dur	4,3
8	Tuf romain volcanique semi dur, rouge	3,2
9	Tuf romain volcanique tendre, jaune	5,7
10	Péperin	1
11	Mortier de ciment et de sable	0,64
12	Mortier de chaux et de pouzzolane avec hydrofuge	0,6
13	Mortier de ciment et de sable avec hydrofuge	0,1
14	Travertin	0,09

Tab.3.5 : coefficient d'affinité des matériaux. **Source** : Massari, 1970

On constate que les briques sont classées premières par rapports au mortier de ciment et de sable donc elles ont un potentiel d'absorption plus élevé. Quant au pouvoir d'absorption du mortier de chaux et de sable, il est plus rapide que celui du mortier de chaux et de pouzzolane mais moins importante. Il est à noter aussi : l'absorption dans le mortier de ciment et de sable est dix fois plus lente que dans les mortier de chaux, et de 60 à 70 fois plus lente s'il est hydrofugé.

Pour se rapprocher plus du comportement d'un mur d'immeuble face à l'humidité, il serait intéressant de combiner deux ou plusieurs matériaux et procéder à des expériences d'absorption, chose qui a été réalisée par Massari, il a choisi une brique jaune en terre cuite et un joint vertical de mortier (fig.3.47a). Il en résulte comme attendu, la différence entre les vitesses d'imbibition : la terre cuite s'imprègne beaucoup plus rapidement que le mortier, même si celui-ci adhère étroitement à la brique.

La hauteur d'affinité dans des matériaux diffère selon leur nature en raison de la structure des vaisseaux capillaires internes (diamètre). Ainsi, les matériaux tendres tel que les briques, se caractérisent par de la plus grande hauteur d'affinité, alors que, les matériaux durs comme les pierres (granit, basalte), considérés réfractaires, leurs hauteurs d'affinité est très limitées¹.

Dans sons expérience, Kettenacher², a remarqué que dans les matériaux en terre cuite, l'absorption de l'humidité se fait uniformément car tous les vaisseaux capillaires ont le même diamètre. Par contre, dans les pierres naturelles, ils ont des diamètres différents dont les plus étroits attireraient l'eau beaucoup plus haut que les autres (fig.3-47b). Ce qui explique que la couche supérieure contient moins d'eau que les couches inférieures. La quantité d'eau ainsi absorbée est inversement proportionnelle à la hauteur d'affinité

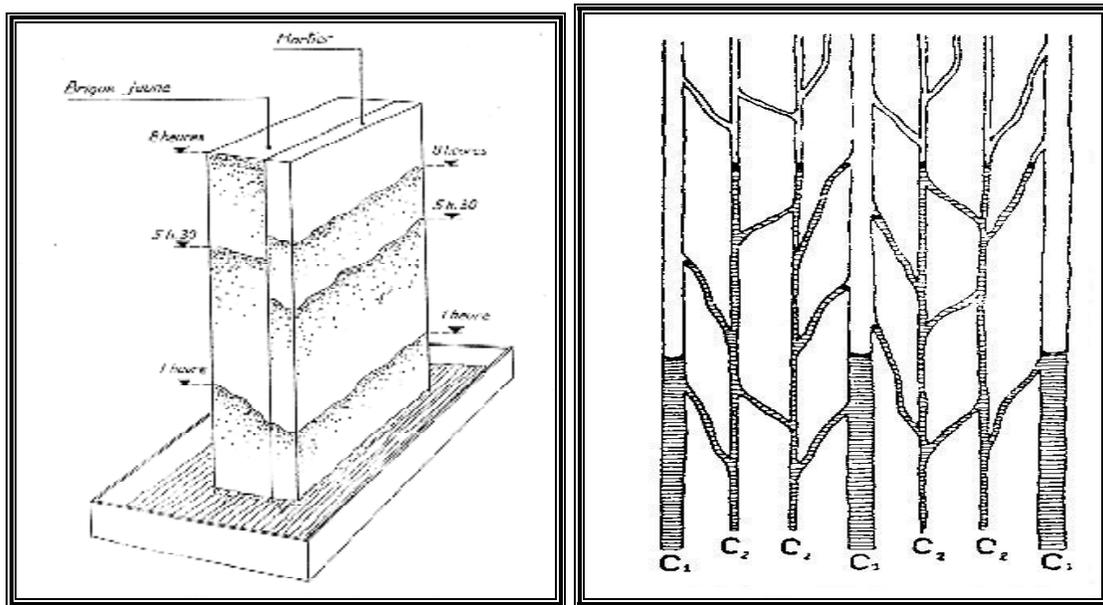


Fig. 3.47 : a) expérience d'absorption d'eau. b) hauteur d'affinité dans la pierre naturelle. **Source** : Massari, 1971.

L'uniformité des diamètres des vaisseaux capillaires, explique l'identique comportement des matériaux tendres que se soit en immersion qu'en émergence. Le contraire se produit dans les

¹ Claude-Alain Roulet, *Energétique du bâtiment I, Interactions entre le climat et le bâtiment*, presse polytechniques romandes, Lausanne, 1987. pp.51-56

² KETTENACKER, L, *l'humidité de murs*, Gesundheit-Ingenieur, 1930. p721

matériaux compacts. Cette déduction est confortée par l'expérience de J.S. Cammerer¹ (tab.3.6) qui a procédé ainsi : Il a pris plusieurs échantillons de divers matériaux, qu'il a immergé sur le un cinquième (1/5) de leur hauteur, les taux d'humidité absorbée par chaque cinquième sont les suivants :

Matériau	Poids spécifique				
	Dans l'eau (%)		Hors de l'eau (%)		
Brique normale	30,4	29,7	29,7	29,7	29,7
Grès léger	28,1	26,7	25,6	23,7	18
Brique de scories	13,9	12	9,1	5,8	5,5
Béton poreux	21,7	15,8	45,8	15	14,5

Tab.3.6 : taux humidité absorbé en émerison. Source : cammerer,

c) selon leurs taux d'humidité

Lorsque le local est atteint par l'humidité partielle, on ne doit pas prendre en considération seulement le taux maximum d'humidité dans les murs mais aussi leurs taux moyen.

Souvent, dans les constructions anciennes, on constate que, le taux le plus élevé, se situe très proche des planchers, puis diminuent progressivement vers le haut ; doit-on déclarer le local inhabitable à cause d'un taux élevé d'humidité partiel et non généralisé, même s'il est bien orienté (ensoleillé) ? Si l'on ne constate, aucune trace d'humidité, la réponse est non !

Dans ce cas, les experts admettent un taux moyen qui doit être inférieure ou égale à la limite maximale tolérée par les hygiénistes.

Comme nous allons le voir, chaque type de matériau possède une humidité résiduelle prouvée, scientifiquement et expérimentalement, qu'elle est inoffensive.

À cet effet, les hygiénistes ont mis une règle générale pour déterminer le taux hygiéniquement tolérable, dans n'importe qu'elle matériau en construction mis en œuvre, en ajoutant 2% à l'humidité spécifique du matériau en question, de dimension d'une brique, asséché à l'air libre mais à l'abris des intempéries. Le tableau suivant (tab.3.7), montre les taux d'humidité maxima pouvant être normalement contenues dans les murs de locaux habitables et les taux au-delà desquels les locaux deviennent véritablement insalubre et donc inhabitables.

Type de maçonnerie	Parfaitement sèche (hum. originelle)	Sèche du point de vue hygiénique	Humidité hygiéniquement tolérable dans certains cas	Humide	Très humide
En brique ordinaires.	1%	jusqu'à 3%	jusqu'à 4%	De 3 à 9%	Plus de 9%
En pierres légères et absorbante (p.s. < 1,9)	jusqu'à 4%	jusqu'à 6%	jusqu'à 7%	De 6 à 15%	Plus de 15%
En tout autre matériau naturel	L'humidité originelle se calcule d'après le séchage à l'air libre.	L'humidité originelle majorée d'une valeur pouvant atteindre 2%	L'humidité originelle majorée d'une valeur pouvant atteindre 3%		

Tab.3.7 : Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité calculé d'après le taux pondéral d'humidité. Source : Massari, 1971

¹ Cammerer I-S. Capacité d'évaporation des différents enduits, l'humidité des murs dans les immeubles d'habitation, les étables et les entrepôts frigorifiques, Gesundheits-Ingenieur, 1944.

d) Selon leurs résistances thermiques

Rappelons que, l'insuffisance de la résistance thermique peut provoquer l'apparition de l'humidité de condensation à cause du refroidissement de l'air, sans pour autant que le taux de l'eau contenu dans les murs extérieurs ne dépassent les limites requises.

Le tableau suivant (tab.3.8) montre une classification des murs, selon protection thermique qu'elle assure dans deux climats méditerranéens, où la température soit, elle est inférieure à quatre soit elle est supérieure à quatre. Les valeurs se rapportent aux trois surfaces susceptible de provoquer une perte de chaleur : le mur, le plancher et la couverture.

Remarque : on ne doit pas être toujours être transigeant, lors de notre jugement sur la protection, « suffisante » ou « insuffisante » surtout lorsque le local ne présente aucune trace d'humidité, en aucune saison, on doit considérer le local comme habitable, même si, d'après, le tableau, quelques partie de maçonnerie présente une protection thermique dite insuffisante. En revanche, si les signes d'humidité sont évidents, les indications du tableau deviennent décisives.

Type de maçonnerie	Epaisseur en m	Résistance thermique total R=1/K	Protection thermique	
			Température moyenne de janvier T < 4°	T > 4°
Mur en brique pleines ordinaires ($\lambda=0,67$).....	0,55	1	Suffisante toléré.	excellente
	0,50	0,90	Dans certain cas.	excellente
	0,45 0,42		insuffisante Insuffisante	suffisante suffisante
2. Mur en matériaux lourds (p.s.de 2,5 à 3) : gneiss, basalte, marbre, calcaire dur.....	0,75	0,46	mauvaise	mauvaise
3. Mur en grès calcaire tendre, pierres de taille (p.s. de 1,8 à 2,2)...	0,75 0,60	0,82 0,70	insuffisante insuffisante	suffisante insuffisante
4. Mur en tuf léger (p.s. 1,4 ou 1,6).	0,65 0,60 0,50	1,28 1,18 1	suffisante suffisante suffisante	excellente excellente excellente

Tab. 3.8 : Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité, calculé d'après leur résistance thermique.

L'inconvénient du béton armé malgré les progrès grandioses accomplis par sa technique, n'ont pas été suivis de progrès analogues dans le domaine de l'hygiène¹. En effet, les ouvrages de maçonnerie destinés à parachever l'armature sont loin d'assurer le minimum requis de protection thermique. Les éléments les plus exposés à la condensation dans les constructions en B.A sont :

- Ø les colonnes de béton, surtout les colonnes d'angles ;
- Ø les parois minces (excessivement) des cours intérieures et des structures en saillie ;
- Ø les couvertures ;
- Ø les parois en béton armé adossées au terrain ;

¹ Hernot.D et Porcher.G, *thermique appliquée aux bâtiment*, les éditions parisiennes CFP, Paris,1984,pp95- 117.

- Ø les caissons de stores ;
- Ø les appuis des fenêtres ;
- Ø les semelles de béton hautes et minces ;
- Ø les parois d'escaliers, coulées en béton par mesure de sécurité contre les incendies ;
- Ø le premier plancher des structures en saillie ;

3.6.3 Séchage des matériaux

Dans une atmosphère confinée où l'humidité relative est de 70 %, Cardières¹, a établie le temps nécessaire à la dessiccation de matériaux divers, voici, les valeurs de leurs coefficients dont-ils sont proportionnels :

Brique.....	0,28	Béton cellulaire.....	1,20
Pierre calcaire.....	1,20	Mortier de ciment.....	2,50
Béton de ciment (250 kg).....	1,60	Mortier de chaux.....	0,25
Béton bims.....	1,40	Liège.....	0,14

Si l'on veut savoir, sommairement et à titre indicatif, le nombre de jours nécessaire au séchage d'un matériau : on multiplie le coefficient correspondant par le carré de l'épaisseur du mur exprimé en centimètre. Ainsi, un mur en pierre de 80 cm d'épaisseur, pour qu'il soit parfaitement sec, il faut compter : $1,2 \times 80^2 = 7680$ jours ; soit : 256 mois ou 21 ans.

Un mur en brique de 30 cm :

$$0,28 \times 30^2 = 252,0 \text{ jours, soit : } \mathbf{7 \text{ mois.}}$$

D'où l'on constate que, la différence du temps de séchage est très importante entre les matériaux, ceci, est dû essentiellement à leur structure interne, et par conséquent leur capacité de conductibilité capillaire.

En général, on peut subdiviser les matériaux en deux catégories :

- ceux qui possèdent une bonne conductibilité capillaire comme la brique, liège, le mortier de chaux (sèchent rapidement)
- ceux, caractérisés par une mauvaise conductibilité capillaire, (sèchent en surface mais reste imbibé d'eau dans la masse pendant plusieurs années), comme la pierre calcaire, le béton de ciment...etc.

Les schémas suivants (fig.3.48), nous montrent, le comportement différent de deux catégories de matériaux :

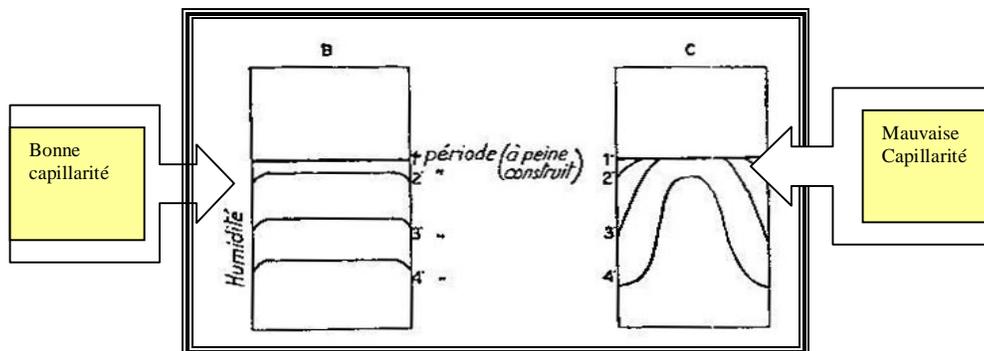


Fig. 3. 48 : Comportement différent dans le séchage des matériaux. Source : Grunau. E.B,1970.

¹ Cardières R, *isolation et protection des bâtiments*, Eyrolles, Paris, 1954.

On remarque donc que, les matériaux en quatrième phase, présentent des quantités d'eau très différentes :

Le mur en brique est en dernière phase de séchage, son taux d'humidité est illustré par une ligne horizontale et uniforme, donc, il est entièrement sec, alors que, le mur en pierre, seule sa surface est sec.

Dans les locaux construits par le second type de murs, il apparaît très tôt, des taches et des moisissures abondantes dues à la condensation, phénomène qui retardera d'avantage l'assèchement définitif.

Les murs intérieurs à grande inertie, récemment construits, sèchent beaucoup moins vite que les murs extérieurs, à cause de l'insuffisance d'aération. À cet effet, les hygiénistes doivent en tenir compte lors des expertises.

Dans la pratique et afin que le séchage arrive à terme, il faut :

- favoriser la ventilation
- ne pas utiliser l'anhydride carbonique pour accélérer la prise du mortier (inefficace) ;
- s'attarder pour plusieurs mois avant de poser l'enduit sur les parois ;
- le recours à l'utilisation du chauffage artificiel accentue le phénomène tels que les boursoufflures, les taches et les décollements affectant les peintures, les vernis ou les plastiques appliqué avant que l'assèchement des murs ne soit parfait. Ces inconvénients sont dus à la présence de petites efflorescence invisible qui se forment sous la peinture ou l'enduit décoratif (poussés aux quelles le mur continu à expulser aussi longtemps qu'il contient de l'eau pour les véhiculer).

3.6.4 Évaporation des matériaux humides

L'humidité de remontée capillaire qui envahit un bâtiment fini par se stabiliser à une certaine hauteur, sous l'effet de la ventilation, l'ensoleillement ou autre phénomène ; on dit alors qu'il se réalise un certain équilibre interne entre la quantité d'eau provenant du sous-sol et celle qui s'évapore des parois exposées à l'air.

Malheureusement, à ce jour on ne connaît pas les coefficients réels d'évaporation superficielle des différents matériaux de constructions pour déterminer l'aération suffisante afin d'abaisser le taux d'humidité et rétablir ainsi l'état de salubrité des locaux. À ce propos, tous les calculs sont imprécis parce qu'on ne pourrait pas tenir compte de l'extrême variabilité des conditions climatiques extérieures.

Néanmoins des expériences pratiques ont été effectuées sur des échantillons de la dimension d'une brique, dans le but de déterminer la quantité approximative de l'évaporation totale. La méthode est simple, il suffit de déposer le récipient qui contient l'échantillon sur une balance, et mesurer ensuite la perte de poids provoquée par l'évaporation superficielle du matériau, qui continue à absorber de l'eau par la base¹. Sachant que ces expériences sont passés sous les conditions climatiques suivantes :

- Températures : de 13 à 26 °C
- Humidité : de 63 à 85°C
- Vitesse de l'air : 2 m/s ; 0 m/s ; confiné
- Durée : plusieurs mois

Les résultats sont enregistrés sur le tableau (3.9) :

¹ Massari Gi, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971.

Matériau	Perte de poids dû à l'évaporation en (g/dm ² /h)		
	Quand l'air est confiné	Quand l'air est en mouvement (2 m/s)	Quand l'air est immobile, et en cas d'insolation
Brique romaine jaune	1	3,25	1,75
Brique romaine rouge	1,15	5,85	2,72
Tuf volcanique tendre, jaune	0,75	4,80	1,90
Mortier de chaux et de	0,90	3,20	2,85
Mortier de ciment et de	0,37	1,25	2,1

Tab.3.9 : perte de poids provoquée par l'évaporation superficielle des matériaux. **Source** : Massari, 1971.

La lecture du tableau précédent permet de révéler que l'évaporation totale augmente de 2 à 3 fois sous l'action du soleil alors qu'elle est de 3 à 5 fois sous l'action du vent.

Dans les conditions d'un air confiné, la différence du taux d'évaporation est presque négligeable entre les quatre premiers matériaux saturés (les différentes briques, le tuf et le mortier de chaux).

On remarque aussi que les valeurs trouvées sont beaucoup plus supérieures à ceux qu'on devrait trouver réellement dans un bâtiment existant. Par exemple le pouvoir d'évaporation d'une brique romaine jaune est de 1 g/dm² / h, soit 100g/m² /h, cependant, dans la pratique, les taux moyens d'évaporation de murs ou de planchers ordinaires humides varient entre 4 et 10g/m² /h. l'expertise de Massari, effectuée au dépôt provisoire de livres de l'Institut d'archéologie de la Lungara a montré que le pavement, produit en moyenne, une évaporation de 1g/m² /h environ dans des condition moyennes et normales d'humidité de l'air.

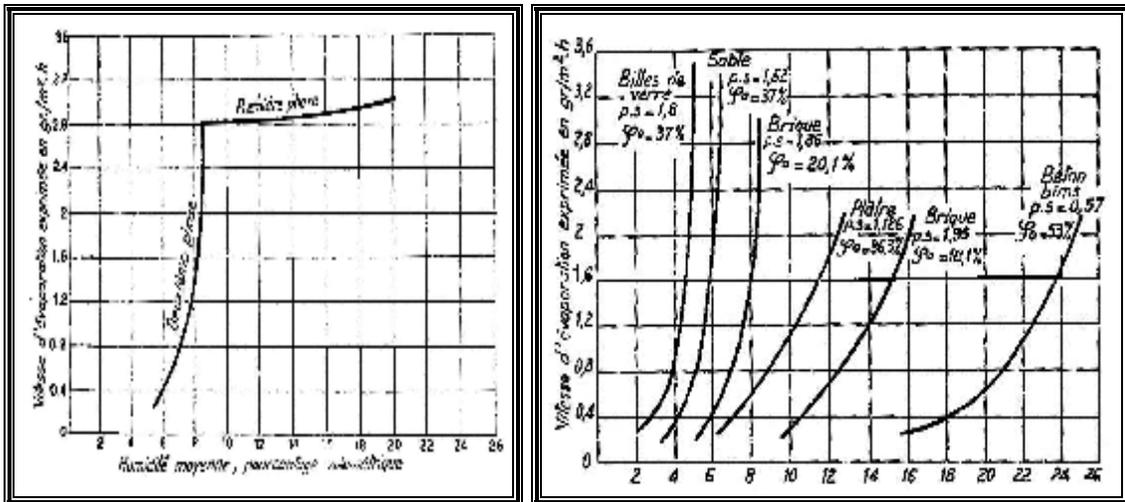
L'assèchement des matériaux reste un domaine non encore exploré à fond, parmi les chercheurs qui s'y intéressé, on peut citer : KrÖll, Krischer et GÖrling¹, leurs travaux ont contribuer à résoudre le problème de l'assainissement des constructions, voici, brièvement les conclusions de leurs recherches :

L'assèchement d'un matériau humide soumis à une forte évaporation se présente sous deux phases :

- une première phase d'évaporation quasi constante ;
- une deuxième phase où l'évaporation est en chute libre.

La première est accompagnée d'une diminution progressive de la masse d'eau qui imbibe le matériau, la seconde débute à un certain point appelé « point d'inflexion » au moment où le taux d'humidité devient inférieur à un certain niveau (fig.3.49a); pendant cette période, la dessiccation s'accomplit avec une grande rapidité.

¹ Krischer O et GÖrling P, *expérience de dessiccation des matériaux poreux et leur explication*, V.D.I, Zeitschrift, 1939.



a) les deux phases d'évaporation pour l'assèchement. b) comparaison de la deuxième phase des différents matériaux

Fig. 3. 49 : diagramme de séchage des matériaux. **Source** : Massari, 1971

La lecture du diagramme, nous permet de constater que, la première phase est presque horizontale et que l'évaporation tourne autour de 2,9 g, alors que le taux d'humidité intérieure ne cesse de diminuer.

Cette nette distinction entre la première phase et la deuxième phase peut s'expliquer ainsi :

- Ø phase I : l'évaporation dépend du taux de saturation de l'air uniquement, ce phénomène est similaire à celui d'un étang dont la vitesse d'évaporation dépend seulement de la capacité d'absorption de l'air.
- Ø Phase II : au cours de cette phase, la zone du matériau non encore saturée, continue à être alimenté par l'humidité issue de masse du matériau lui-même, de façon très lente, parce que la quantité a déjà trop diminué lors de la première phase ; c'est alors qu'interviennent les propriétés de conductibilité capillaire de chaque matériau, facteur principal et déterminant de la vitesse d'évaporation.

Par conséquent, on peut se permettre de dire que, l'effet négatif de l'évaporation sur le comportement du mur ou sur le confort des usagers, est beaucoup plus prononcé pendant la première phase à cause du taux élevé et constant de l'évaporation superficielle.

En revanche, lors de la deuxième phase, l'évaporation diminue très rapidement. La figure (3.49b), montre les conclusions du travail consacré à la deuxième phase (séchage), établi par Krischer et GÖrling. On constate que la courbe est d'autant plus verticale que le matériau est plus homogène. Les plus verticales sont les billes de verre et le sable.

Il semble qu'on peut affirmer que, les matériaux dotés d'une structure grains fin et homogène, leur première phase sera plus longue par rapport aux matériaux hétérogène et incohérent. Tandis que, leur deuxième phase est beaucoup plus courte et brusque.

En d'autres terme, un mur en brique de première qualité et rejointoyé avec un mortier tamisé, continue à dégager une énorme quantité de vapeur d'eau, même si celle-ci diminue progressivement, jusqu'à arriver à un taux minimum (6 à 8%), à ce moment débutera la deuxième phase, pendant laquelle l'évaporation diminuera très rapidement et on arrivera à l'assèchement du matériau en un laps de temps très court.

Cependant, dans un matériau hétérogène comme le tuf, rejointoyé avec un mortier épais et non tamisé, la première phase d'évaporation est brève et constante. L'évaporation de la seconde est lente et débutera lorsque le taux est encore très élevé de l'ordre de 15 à 20 %.

De ce qui précède, et en ce qui concerne l'humidité des murs et ses dommages, il en ressort, que les murs en brique sont donc beaucoup plus insalubres que les murs en pierres en général, ceci est dû essentiellement à l'évaporation abondante de l'eau renfermée dans la masse du matériau même si son taux est faible ; alors que dans les pierres légères, l'humidité est gardée dans la masse du matériau.

Les expériences accomplies par Building research Board (1929) ont confirmé le fait, que les matériaux hétérogènes, dont la surface est saturée, produisent une évaporation totale identique.

Ce résultat, est très intéressant et très utile surtout lors de l'établissement d'un diagnostic. Il est impératif que ce dernier doit préciser la position de l'état de la phase d'évaporation, car s'il s'agit de la première, qui est la plus dangereuse d'ailleurs, l'intervenant saura de quelle solution adaptera-t-il ?

Prenons l'exemple, de la brique (matériau couramment utilisé), caractérisé par un point de flexion, de l'ordre de 8%, si l'intervenant réduit ce taux, seulement à 15%, l'évaporation superficielle, resterait à peu près la même, d'où l'utilité et l'obligation d'abaisser le taux jusqu'à 8%, pour constater réellement, la diminution de l'évaporation et puis arriver à son élimination c'est à dire la dessiccation.

D'après, les expériences de plusieurs chercheurs, dont Krischer et GÖrling, le passage de la phase I à la phase II, nécessite que le taux pondéral ne dépassera pas certains seuils, en voici, quelques exemples :

- Brique légère ordinaire5%
- Pierres – Tuf -14%
- Plâtre..... 9,5 %

En d'autres termes, sous l'effet du vent et de la chaleur, l'évaporation superficielle, ne commencera pas, si le taux d'humidité de chacun de ces matériaux, ne descendra pas en dessous des valeurs indiquées ci-dessus.

Ces valeurs, indiquent seulement, le taux d'humidité d'un seul matériau et non un ensemble. Par conséquent, un assainissement efficace des maçonneries humides, nécessite obligatoirement la connaissance du point de flexion de chaque type de mur, recouvert d'enduits intérieur et extérieur, qui marque le seuil, à partir duquel le travail déshumidification peut être entrepris.

3.6.5 Seuil d'insalubrité de l'humidité de l'air

Autrefois, dans les années soixante, lorsque la température effective, c'est-à-dire : la température que notre corps ressent vraiment et non celle que marque le thermomètre, on fixait le taux de l'humidité hygiéniquement tolérable à 70 % approximativement. Mais, depuis quelques années déjà, on critiquait ce seuil, qui semble être en inadéquation avec toutes les conditions de température et de chauffage.

D'après G. Massari (déjà cité), le seuil de l'humidité peut être fixé, après avoir procédé à une comparaison entre deux volumes d'air confinés de deux locaux, dont l'un est suspecté humide et l'autre considéré sec, appelé « local-témoin ».

Le local témoin peut être choisi parmi les étages supérieurs car, généralement, sont exempt d'humidité par rapport à ceux du rez-de-chaussée.

Dans le local considéré humide, à température égale, l'humidité relative de l'air qu'il contient dépasse d'au moins cinq points celle du « local-témoin ».

À ce sujet, on peut se permettre de conclure que l'examen de l'air n'est jamais suffisant pour émettre un verdict sur l'habitabilité d'un local, il faut en outre, vérifier si, la maçonnerie aussi est humide ou qu'elle est sujette à des déficiences en matière de protection thermique contre le refroidissement.

3.6.6 Taux maximum tolérable des murs

Les hygiénistes estiment qu'un mur doit être sec afin d'éviter le problème de l'évaporation et au même temps assurer une bonne résistance thermique.

La distribution de l'humidité dans un mur n'est jamais uniforme (fig.3.50), confirmé par des prélèvements, faites par des chercheurs italiens, qui ont constaté ce qui suit :

1. dans les murs à humidité élevée (25%), le matériau et le mortier de liaisonnement ont un taux d'humidité identique ;
2. dans les murs moyennement humides, ces taux sont légèrement différents.
3. dans les murs sans enduits, peu humides et soumis à une forte ventilation, la brique apparaît presque sèche, alors que le mortier contient encore une bonne quantité d'humidité.

Quant le mortier de liaisonnement est à base de sable et de chaux, la différence de comportement entre maçonnerie en brique et le mortier est insignifiante, à moins qu'il s'agisse d'une brique de parement à poids spécifique élevé.

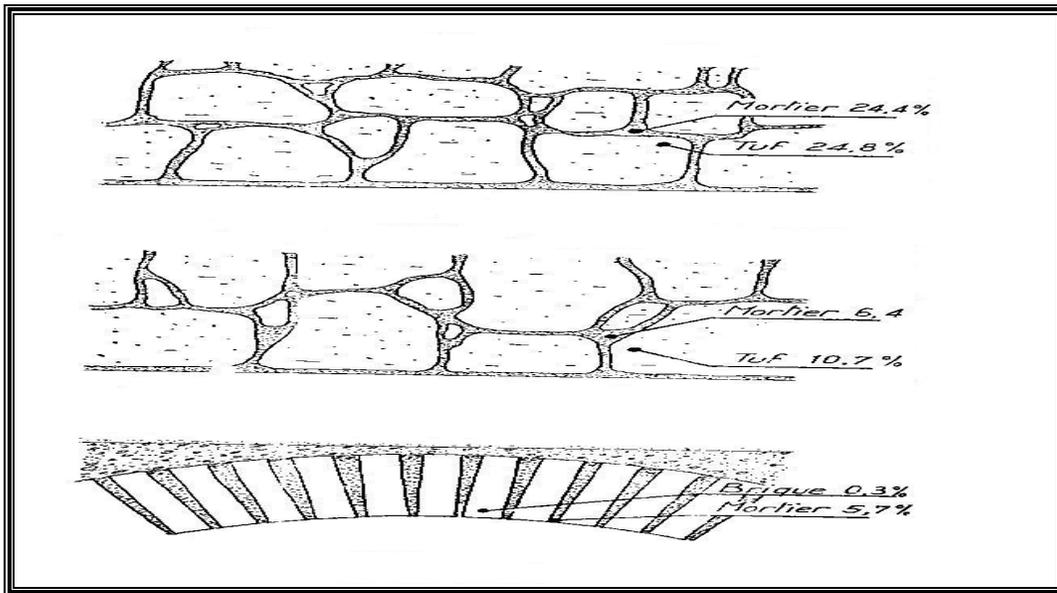


Fig.3.50 : Différence de taux d'humidité entre le matériau et son mortier de liaisonnement dans un mur humide

Source : Grunau, 1970

Par conséquent, la capacité d'absorption d'un mur est celle de la maçonnerie avec laquelle est construit et non celle du mortier de liaisonnement.

Ainsi, les experts en la matière recommandent, que l'échantillon, objet d'analyse, doit contenir une plus grande partie de la maçonnerie.

Tursini (1891), à Naples (Italie), a remarqué que les murs en tuf jaune de bâtiments anciens contenaient 7 à 8 %, sans qu'il y ait des traces d'humidité ni aucun dommages ; de même à pausilippe, le tuf blanc en contient 6,2%, et le tuf volcanique rougeâtre 5,98%.

Quant à cammerer¹, il a procédé à des analyses des matériaux après séchage, il a obtenu les résultats suivants relatives à l'humidité résiduelle par rapport au volume :

Brique.....de 0,1 à 0,7 % ;
Grès.....de 5 à 7 % ;
Brique de scorie.....environ 4 % ;
Ciment spongieux.....de 3 à 6 % .

Cette humidité résiduelle que contient les matériaux naturelles qui constituent les murs, ne présentent aucun danger, soit : puisqu'elle est prisonnière, soit : parce qu'elle s'évapore avec une lenteur extrême, seulement son inconvénient est de diminuer la résistance thermique du matériau².

Les recherches effectuées par Massari, dans divers villes en Italie, sur les maçonneries des locaux humides ou secs, de bâtiments nouveaux ou séculaires, affirment que les murs les plus sains même s'ils sont bien exposés au soleil et au vent, contiennent encore de 0,5 à 2 % d'humidité s'ils sont en briques et environ 3% s'ils sont en tuf et peuvent s'élever sans danger pour l'hygiène des habitants, respectivement jusqu'à 3 et 7%.

Il a été constaté aussi que, dans les constructions datant d'une dizaine d'années, maintiennent un taux élevé d'humidité (6 – 9 %) et ce même aux étages supérieurs, qui sont pourtant bien aérés.

En conclusion et au vue des hygiénistes, un mur en maçonnerie est considéré comme sain, lorsque son taux d'humidité maximale en fonction de son poids spécifique est estimé à :

- Ø 3 %, dans les briques ordinaires
- Ø 6 à 7 %, dans les tufs, grès, ou toute autre pierre légère très absorbante, ayant un poids spécifique inférieur à 1,9.

3.7 Jugement d'habitabilité

a) Impacte d'une paroi humide sur l'air ambiant intérieur

L'insalubrité d'un local peut provenir de trois facteurs physiques :

- Diffusion de la vapeur d'eau, de la paroi à l'air intérieur ;
- Refroidissement de la paroi sous l'action de l'évaporation superficielle;
- Chute de la résistance thermique des murs extérieurs, imbibés d'eau.

On peut trouver ces trois critères réunis, et au plus haut degré dans les murs en briques et de mortier de sable, qui sont très dangereux du point de vue de la salubrité. Par contre dans la maçonnerie en pierre, les deux premiers facteurs sont beaucoup moins prononcés, alors que le troisième, c'est-à-dire : la perte de chaleur à travers la paroi, reste considérable.

L'évaporation superficielle des maisons malsaines, affecte immédiatement les habitants, surtout durant l'hiver, parmi ses effets : les maladies pulmonaires et rhumatismales.

Kettenacker, a procédé à des expériences très intéressantes, relatives au passage de l'eau par évaporation, du mur à l'air renfermé du local. Son objectif, était d'arriver à savoir à quelle distance, se fait sentir l'action d'évaporation superficielle. Les résultats de ces expériences sont

¹ Cammerer I-S. Capacité d'évaporation des différents enduits, l'humidité des murs dans les immeubles d'habitation, les étables et les entrepôts frigorifiques, Gesundheits-Ingenieur, p.31, 1944.

² [Enligne] <http://www.irc.com>. 2005.

illustrés sur les deux graphes suivants (fig.3.51 & 3.52). Elles sont effectuées sur des échantillons d'humidité pondérale différentes, respectivement, 17 % (très humide) et 4,5 (humide).

La lecture des données des deux graphes (fig.3.51 et 3.52), nous indique deux points très essentiels :

- L'air renfermé se sature dans la couche immédiatement en contact avec le mur, quelle que soit la quantité d'eau qu'il contient ;
- L'influence néfaste directe de la paroi sur l'air cesse à une distance de 6 à 8 centimètres.

La première leçon surprenante qu'on peut tirer, à première vue, c'est que : tous les murs en maçonnerie humides, sont dangereux du point de vue hygiénique, et ce, quelque soit leur nature ou leur taux d'humidité, parce que dans les conditions d'air confiné, l'évaporation superficielle engendre la saturation de la couche d'air en contact avec leurs surfaces intérieures.

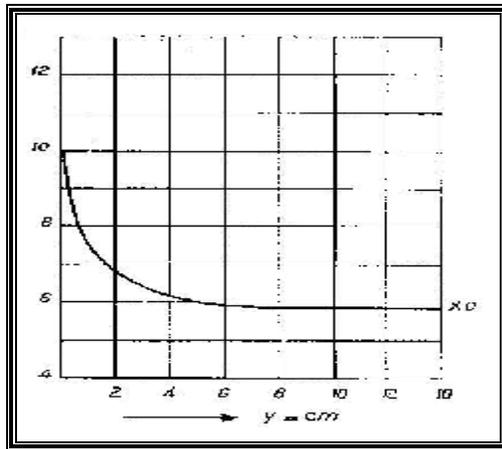


Fig. 3.51 : Paroi très humide : 17%.

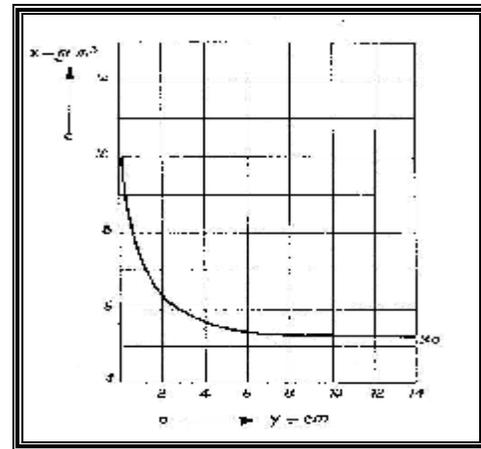


Fig. 3.52 : Paroi moins humide : 4,5 %.

Source : www.irc.com irc, 2004

Cette situation provoque en général, en absence de ventilation, l'apparition de moisissures dans les locaux, considérés comme secs, c'est-à-dire : là où l'on ne constate pas des traces d'humidité.

Il serait évident, de trouver des objets en matière organique (livres, valises, derrière un tableau ou à l'intérieur des armoires), recouverts de moisissures s'ils sont rangés à une distance inférieure à 8 cm des murs.

Donc, si le local n'est pas aéré, la moindre humidité contenue dans le mur produira, au bout d'un certain temps, des effets aussi néfaste qu'une quantité d'humidité considérable. À cet effet, et pour assainir un local, on doit veiller à ce que la ventilation doit affleurer continuellement la surface d'évaporation et qu'il n'y ait pas de stagnation dans les angles mort.

b) Ancienne formulation de Scala.

Bien que cette formulation aujourd'hui, est dépassée, ses recommandations méritent d'être citées en raison du haut sens des responsabilité dont elle témoignent : « on peut considérer qu'un local à habiter ou habité est humide lorsque l'humidité relative de l'air intérieur est supérieure à 70% ou constamment supérieure à l'humidité relative de l'air extérieur en contact avec le local, pour autant que la différence de température ne soit pas très grande, ou bien lorsque l'humidité des murs est supérieure à 3%. Les chercheurs sont, en effet, très loin d'être unanime en cette matière.

Son inconvénient est d'avoir, ignorer le phénomène de l'humidité de condensation, dû essentiellement à la déficience de la protection thermique à cause de l'insuffisance de l'épaisseur des maçonneries sèches. On rencontre fréquemment ce problème, dans les constructions en béton armé, pendant l'hiver, dans les pays froids comme l'Amérique et l'Europe, et ce même dans les maisons modernes bien chauffé, tant riche que pauvre.

c) Nouvelle formulation de Massari et Talenti

Cette nouvelle formulation du critère d'habitabilité consiste à vérifier les trois points suivants :

- le type et l'intensité des manifestations extérieures d'humidité : taches, moisissures, érosions, efflorescences, détériorations de meubles et de marchandises ;
- l'air : en observant si l'humidité relative de l'air confiné depuis six heures dans un local hermétiquement fermé dépasse ou non de cinq points au moins l'humidité relative de l'air du local-témoin ;
- le mur : en vérifiant, d'une part, si le taux d'humidité des échantillons dépasse ou non la limite toléré par l'hygiène, dans le cas du matériau employé dans le mur, et, d'autre part, dans l'éventualité d'un mur sec, si sa protection thermique est suffisante.
- Si, la paroi contient une proportion d'eau supérieure à la limite admise, dans ce cas, le local est inhabitable, par exemple : elle dépasse 3% dans les murs en brique ou 6% dans les tufs.
- Si, la paroi est sèche, mais quelques signes sont apparents tel que : moisissures, érosions, efflorescences, détériorations diverses, dans ce cas le local est habitable, à condition qu'il n'existe pas de défaut de constructions réduisant la protection thermique.
- Si, le mur est sec et présente des signes courants d'humidité ; en outre, en raison d'un défaut de constructions réduisant la protection thermique par rapport au climat de l'endroit : dans ce cas, le local est inhabitable.

Rappelons que, la valeur « R » de la résistance thermique totale, se calcule par « m2 » dans tous les murs du local selon la formule :

$$R=1/k \text{ [m2.h.}^\circ\text{C/cal]} \dots\dots\dots (1)$$

Avec, K: coefficient de déperdition thermique en cal/ m2.h. °C

Dans le cas de Constantine, où la température en janvier peut être inférieure à 4°C, il suffit que « R » d'un seul mur, soit inférieure à 1 pour que la protection doit être déclarée insuffisante. Cette valeur descend à 0,8 lorsque la température est supérieure à 4°C.

Les spécialistes admettent, à titre exceptionnel, un écart de 10% de la valeur de « R », dans les endroits ensoleillés et protégé du vent, c'est-à-dire : sont considérés comme suffisants, les résistances atteignant respectivement 0,9 et 0,72 [m2.h.°C/cal]

Ainsi, la déficience de la protection thermique, explique parfois, pourquoi l'humidité apparaisse –t-elle au printemps et l'été ; phénomène, souvent mal compris, du fait que les murs présentent les symptômes d'humidité, alors que leurs taux ne dépassent pas, à l'analyse, les limites maximales admises. Dans ce cas l'humidité ne parvient pas des murs, mais plutôt de l'air qui se refroidit en contact avec les parois, à cause de l'insuffisance de la protection thermique de celles-ci. Cette déficience a probablement pour cause :

- Ø Épaisseurs des murs insuffisantes ;
- Ø Poids spécifique des matériaux élevé ;
- Ø Infiltration d'eau dans les matériaux ;
- Ø Vétusté des immeubles, engendre les déperditions.

Et a pour conséquence, la condensation et souvent la saturation de l'air, source d'odeurs désagréables (moiteurs).

Tizzano¹ a dit : « dans un local à parois froides, la température de l'air peut être un critère de confort absolument faux. »

En effet, le confort est un état de sensation subjective, du chaud et du froid, il dépend de plusieurs facteurs :

- Ø Température de l'air ;
- Ø Humidité relative ;
- Ø Vitesse de l'air ;
- Ø Température surfacique des murs qui entour l'individu, si elle est différente de la température de l'air.

L'homme peut sentir physiquement, épidermiquement le froid des murs, même dans une atmosphère douce. L'importance d'un tel facteur de froid, pour déterminer la température résultante éprouvée par nous, est évidente, si l'on considère la manière dont se répartit la chaleur émise par le corps humain. Dans une ambiance moyenne :HR=50% et T= 17,5°C , les 2700 calories, un adulte légèrement vêtu dégage :

- Ø 30 % par conduction (en fonction de la température et de HR) ;
- Ø 21 % par évaporation (en fonction de HR et de la vitesse de la ventilation) ;
- Ø 43 % par radiation (phénomène dépendant uniquement de l'écart de température existant entre la peau et les surfaces environnantes : plancher, parois et plafond) ;

Cet échange thermique entre le corps humain et son environnement, révèle l'énorme influence des parois sur la sensation de confort ou d'inconfort des individus.

On peut conclure que, le jugement d'habitabilité doit être fondé sur l'examen des maçonneries, l'examen de l'air n'a qu'une importance tout à fait secondaire.

¹ Tizzano A, *Su alcune esigenze igieniche delle abitazioni*, Documenti di architettura e industria edilizia, n°6, Rome, 1951.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de montrer comment l'humidité peut avoir des effets négatives sur le confort de l'individu à l'intérieur de sa maison, et à quel point elle peut affecter sa santé, et puis les dommages qu'elle peut causer à la construction.

Ce faisant, nous avons dû nous rendre compte que l'humidité, quelque soit son origine a des effets sur :

- Ø la résistance thermique des murs engendrant ainsi le refroidissement de toute la pièce.
- Ø les variations dimensionnelle des matériaux qui se manifestent par : retrait, gonflement et dilatation causant ainsi des fissures.
- Ø la résistance mécanique des matériaux, tel : le fluage, éclatement des revêtements, action du gel, etc.
- Ø les interactions physico-chimiques des matériaux poreux comme la corrosion (acier), sels minéraux (terre cuite), hydrolyse
- Ø le développement biologique, tels que : moisissures, champignons, micro-organismes.
- Ø l'insalubrité des locaux, l'esthétique des parois et même les défauts de fonctionnement des équipements surtout les installations utilisant l'énergie électrique.
- Ø les maladies : allergies, rhumatisme, cancers.

Ces effets auront donc un impact sur l'économie : d'une part, des dépenses d'énergie supplémentaires en chauffage pour compenser les déperditions thermiques à travers les parois et les isolants affectés par l'humidité, d'autre parts, les dommages et la pathologie qui engendrent des coûts pour la réparation des ouvrages et les charges des missions d'expertises.

Par conséquent, La pathologie et les désordres liés à l'humidité sont important en nombre d'intervention et en coût, elle justifie ainsi l'intérêt qu'il y a lieu d'accorder aux recherches dans ce domaine.

La lutte contre l'humidité est l'un des principaux soucis des architectes, nous envisageons donc, de traiter certains cas, dans le chapitre suivant : réhabilitation où nous présenterons quelques remèdes efficaces contre toutes les formes de l'humidité.

Chapitre 3 : Humidité

3.1 Introduction

Dès les années septante, la priorité a été consacrée à l'économie d'énergie. En effet, les études à l'époque ont sensibilisé le monde du bâtiment, avec l'amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe des immeubles, alors que les constructions traditionnelles étaient très perméables à l'air, a eu pour effet d'empêcher les échanges naturels d'air, ce qui a rapidement entraîné une augmentation du taux de l'humidité de l'air ambiant.

Si le progrès des sciences et des techniques de la construction permet d'améliorer le confort des occupants, il faut bien admettre que le gêne provoqué par l'apparition d'humidité est encore bien existant de nos jours.

L'eau sous ses différentes formes dans les bâtiments constitue à la fois un danger potentiel pour la santé et le confort et une source de dommages réels : esthétiques et matériels.

On ne peut sous estimer les effets nuisibles de l'eau sur les matériaux de construction. Si ces effets n'existaient pas, la construction de bâtiments durables seraient grandement simplifiée ainsi que la tâche des architectes.

J.K.Latta¹, déclare : « on a dit que, les recherches en construction, ne seraient pas nécessaires s'il n'y avait pas l'effet de l'eau sur les matériaux de construction. »

L'humidité dans une maison est déterminée par :

- Ø les paramètres extérieurs : températures, humidité, ventilation et l'ensoleillement.
- Ø les caractéristiques du bâtiment : présence de fuites, de ponts thermiques, capillarité des matériaux, ... etc.
- Ø le comportement de l'habitant : fréquence de l'aération, températures intérieures, production de vapeur d'eau

Le présent chapitre traite des conditions et des mécanismes à l'origine de l'humidité, de la classification des différents types et de leurs caractéristiques, de l'insalubrité des locaux et des exigences d'habitabilité, de ses nuisances et ses effets aussi bien, sur la santé de l'homme que sur le bâtiment et le confort des habitants en général.

3.2 Définition

D'après Larousse, l'humidité est l'état de ce qui est humide c'est-à-dire chargé d'eau ou de vapeur d'eau.

D'après Encarta (2005), l'humidité est définie par : eau, vapeur d'eau ou liquide (renfermés par une matière ou un objet).

Il est important de noter que ce qu'on appelle généralement l'humidité est en réalité l'humidité relative. C'est une mesure de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air exprimée en pourcentage de la quantité maximum de vapeur d'eau que l'air peut renfermer à la même température. Lorsque la température change, l'humidité relative change aussi, étant donné que la capacité de l'air à retenir la vapeur d'eau augmente avec la température. Des courbes psychrométriques sont établies pour représenter ces relations. La figure (3-1) montre le contenu (masse en g/kg d'air sec) de vapeur d'eau de l'air au point de saturation pour diverses températures.

¹Latta J.K et Beach R.K, *Diffusion de la vapeur et condensation*, <http://www.irc.com>, 2006.

Lorsqu'un mélange d'air et de vapeur est chauffé ou refroidi, le processus qui en résulte peut être représenté par une ligne horizontale sur la courbe. Le développement ABC représente l'air d'une pièce à 21°C et 50% d'humidité relative qui est refroidi au contact d'une paroi froide. Quand il est refroidi à 10,3°C, le mélange devient saturé. S'il est refroidi davantage, de l'humidité sera formée au moyen d'une condensation sur la paroi froide.

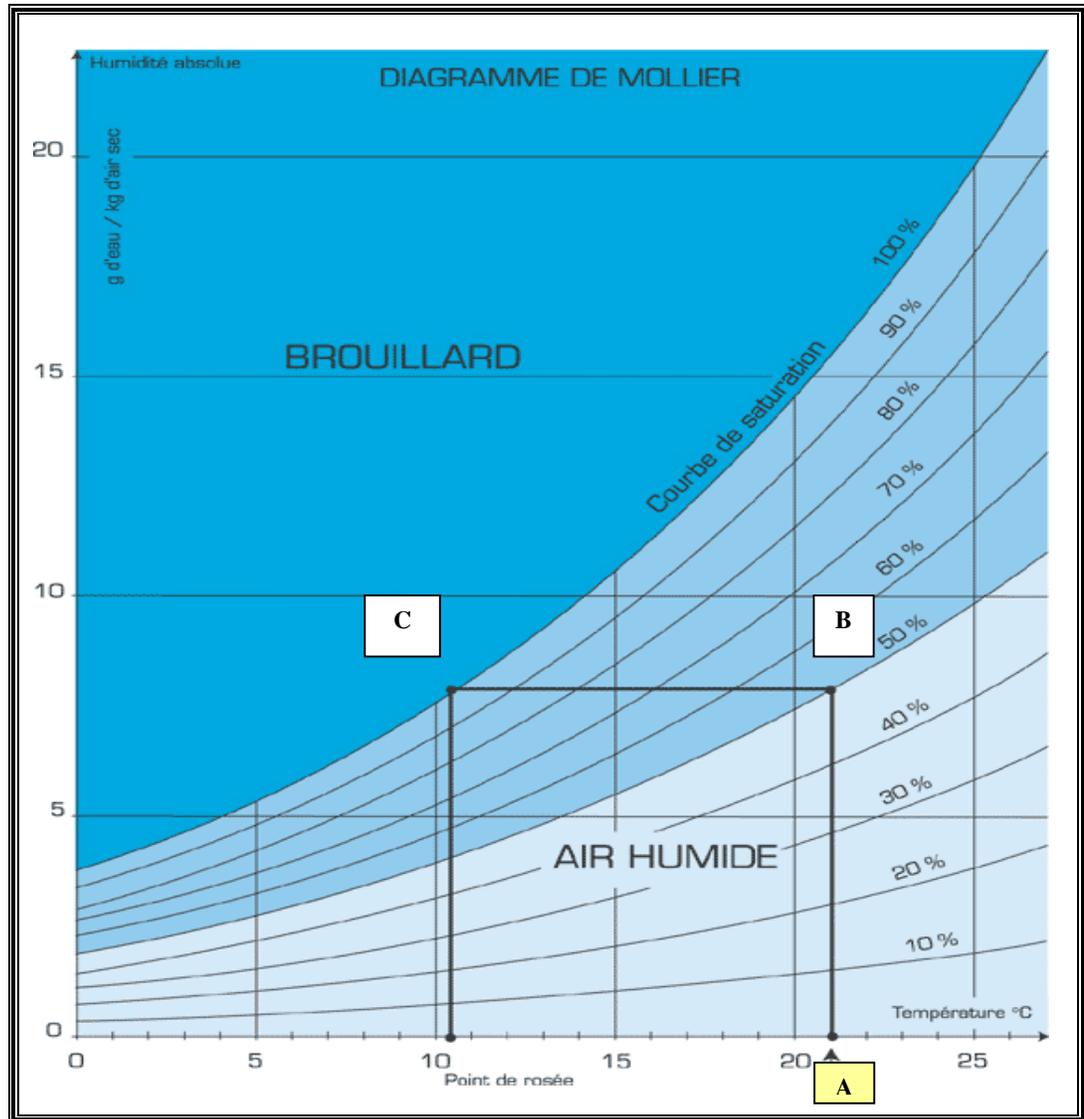


Fig. 3.1: Diagramme de Mollier. **Source :** www. Domosystem.fr, 2006.

L'humidité de l'air peut s'exprimer de plusieurs manières¹ : teneur en eau (en volume ou en poids), pression de vapeur, humidité relative et point de rosée.

La teneur en eau peut s'exprimer de plusieurs façons :

- Ø le rapport de mélange, x , est le rapport de la masse de la vapeur d'eau à la masse d'air sec contenu dans un volume d'air ;
- Ø la concentration en eau, g , est le rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse totale

¹ Belakhowsky.S, Chauffage & Climatisation, Technique & Vulgarisation, Paris, 1980, pp94-97

d'un volume d'air, en kg/m^3 ;

- Ø l'humidité absolue, φ , représente la masse d'eau par unité de volume d'air, en kg/m^3 ;
- Ø la pression partielle de vapeur d'eau, p , s'obtient en supposant que la vapeur d'eau occupe à elle seule le volume à disposition. cette pression s'exprime en pascals [pa]. la pression atmosphérique est égale à la somme des pressions partielles de tous les composants de l'air (azote, oxygène, vapeur d'eau, gaz carbonique, argon, etc.)

À chaque température correspond une pression partielle de vapeur d'eau maximum, appelée pression de vapeur saturante. La part d'eau en excès se condense sous forme de liquide ou de glace, suivant la température. La pression de vapeur saturante est donnée dans les diagrammes psychrométriques (voir chapitre 6 : investigation, figure.6.73).

3.3 Les différents types de l'humidité et leurs caractéristiques.

3.3.1 Types d'humidité

Les différents types d'humidité que l'on retrouve dans les constructions anciennes, si l'on écarte le cas banal de l'humidité accidentelle, provenant d'une défaillance d'entretien, peuvent se ramener à quatre (fig.3.2) :

- L'humidité ascensionnelle ou de remontée capillaire des eaux souterraines;
- L'humidité de condensation superficielle ;
- L'humidité de condensation dans la masse;
- L'humidité par infiltration latérale de pluie battante.
-

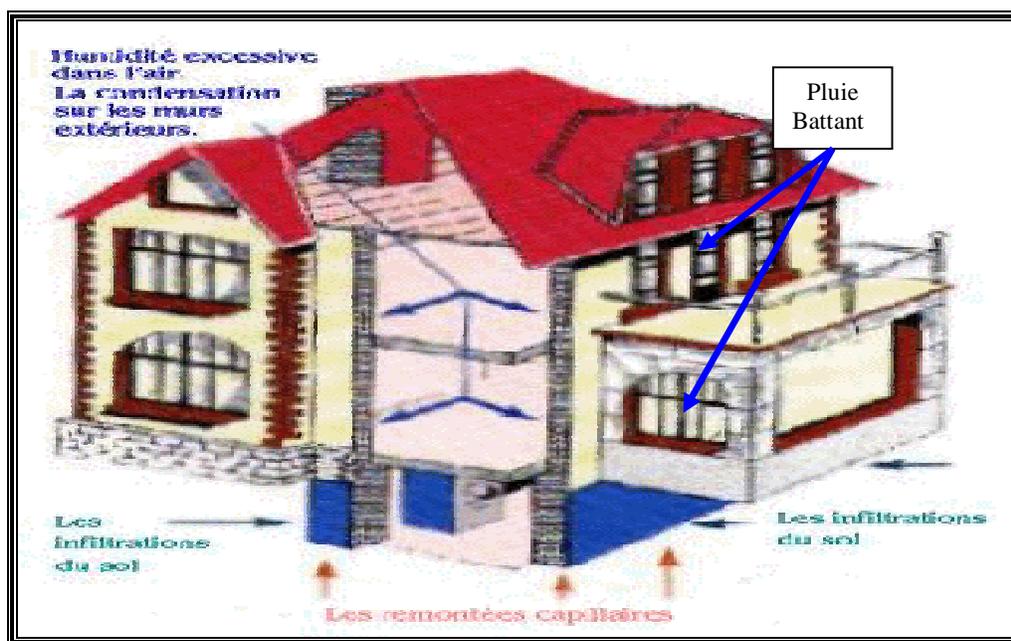


Fig. 3.2 : Les différents types d'humidité. Source : auteur, 2005.

a) L'humidité ascensionnelle (eau provenant du sol)

La remontée capillaire (fig.3.3), provient de :

- Ø Des eaux souterraines (nappe phréatique)
- Ø Des fuites de canalisations
- Ø Des eaux superficielles (ruissellement des eaux de pluie)

b) Les infiltrations

Causés par des précipitations : pluie, neige...(fig. 3.4): l'eau pénètre dans la maçonnerie par :

- Ø infiltration directe de la pluie à travers les fissures, microfissures, menuiseries (fig.3.5-3.6).
- Ø Par infiltration suite à un rejaillissement des pluies (fig. 3.4).

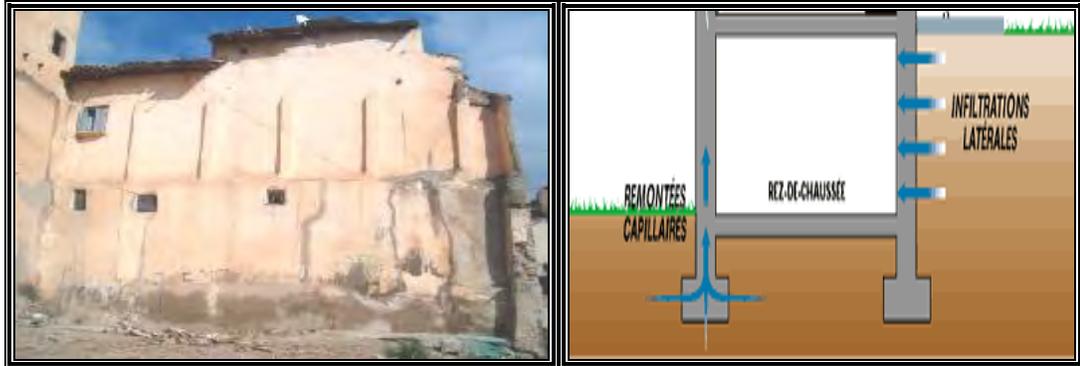


Fig. 3.3 : Remontée capillaire dans une maison vernaculaire à Suika. Source : auteur, 2005

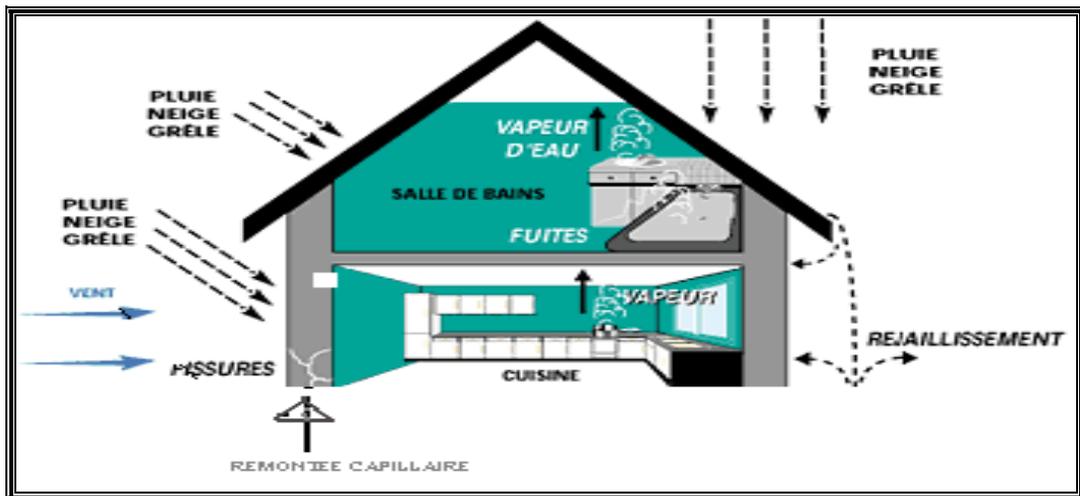


Fig.3.4 : Les différentes causes d'humidité. Source : <http://www.universimmo.com>, 2004



Fig.3.5 : Infiltration directe par le toit.



Fig.3.6 : Infiltration directe par le mur extérieur dans D'une maison vernaculaire à Suika

Source : auteur, 2005

c) Les eaux de condensation

Ils proviennent de¹ :

- Ø La respiration des occupants
- Ø La production de vapeur en cuisine, salle de bains (fig. 3.8).
- Ø La restitution de l'eau des murs sous forme de vapeur (par exemple en sous sol)

Ce phénomène se manifeste en particulier lorsqu'il y a une mauvaise ventilation des locaux :

- Ø On peut constater les condensations superficielles sur les vitrages et sur toutes les parois froides dans la construction (fig.3.7).
- Ø Les condensations internes, par contre sont cachées : en effet, le phénomène constaté sur une vitre dans une salle de bains peut, par temps froid, se produire dans les murs en profondeur (fig.3.9).

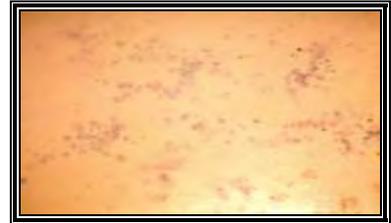
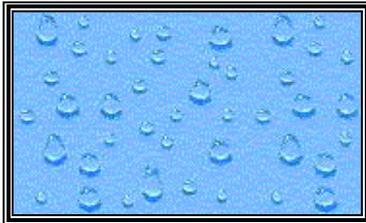


Fig.3.7: La condensation superficielle **Fig.3.8 :** Effet de la vapeur de cuisine **Fig.3.9 :** La condensation interne
Source : auteur, 2005

d) L'humidité d'origine accidentelle

Elle se produit à cause de :

- Ø Toutes les fuites dues à un mauvais entretien : toiture (tuiles ou ardoises brisées) (fig.3.11), canalisations d'eau pluviale, eau sanitaire, égouts.
- Ø Les débordements de baignoires, éviers (fig.3.10), lave-linge.



Fig.3.10 : débordement d'évier

Fig.3.11 : Toiture très dégradée. Zeleika. Suika. **Source :** auteur, 2005

¹Couasnet Y : *les condensations dans les bâtiments : guide pratique et éléments d'analyse*. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 1990.

Remarque :

Avant toute décision, un diagnostic s'avère indispensable ; celui-ci permettra de déterminer la ou les origines de l'humidité. Sans diagnostic, on prend le risque d'adopter une solution inefficace.

3.3.2. Symptômes et sources d'humidité

Les symptômes apparents de l'humidité ne constituent pas les vrais critères pour juger la gravité de l'invasion de l'humidité dans une construction. Cependant ils peuvent nous renseigner sur les origines de cette invasion (tab.3.1).

De ce fait, il serait utile d'en tenir compte, d'examiner avec précision sa localisation et d'étudier les déplacements d'air afin de savoir si la ventilation est faible ou forte, si toutes les zones sont balayées ou non. En effet l'apparition d'humidité et la ventilation du local sont deux phénomènes intimement liés : c'est à cause des conditions de stagnation ou de renouvellement d'air que dépendent soit l'existence, la multiplication ou, soit la disparition des signes extérieurs de l'humidité, tels que les moisissures, les mouillures, les efflorescences et les érosions¹ (fig.3.12—13-14-15).



Fig.3.12 : Érosion. **Source :** auteur, 2005 **Fig. 3.13 :** Moisissures sur les murs. **Source :** auteur, 2005

Les boursofflures et le décollement des meubles dépendent moins du haut degré d'humidité des murs que de la stagnation de l'air : on peut estimer à première vue, que la carence de ventilation en est la cause. L'analyse des maçonneries confirmera ou infirmera cette opinion.



Fig.3.14 : Éclatement du mortier après gonflement
Source : auteur, 2005

Fig.3.15 : Mouillures.

La présence de taches visibles, foncées et persistantes d'une tonalité stable, sur le plancher et sur les murs est la preuve d'une humidité des remontées capillaires des sous-sols. Celle-ci peut être

¹ Cohas M : *ventilation et qualité de l'air dans l'habitat*, Édition parisiennes, paris 1996

décelé facilement parce qu'elle obscurcit les murs à partir de la base jusqu'à une certaine hauteur déterminée, qui ne dépassera pas en générale trois (03) mètres¹, (fig.3.16).

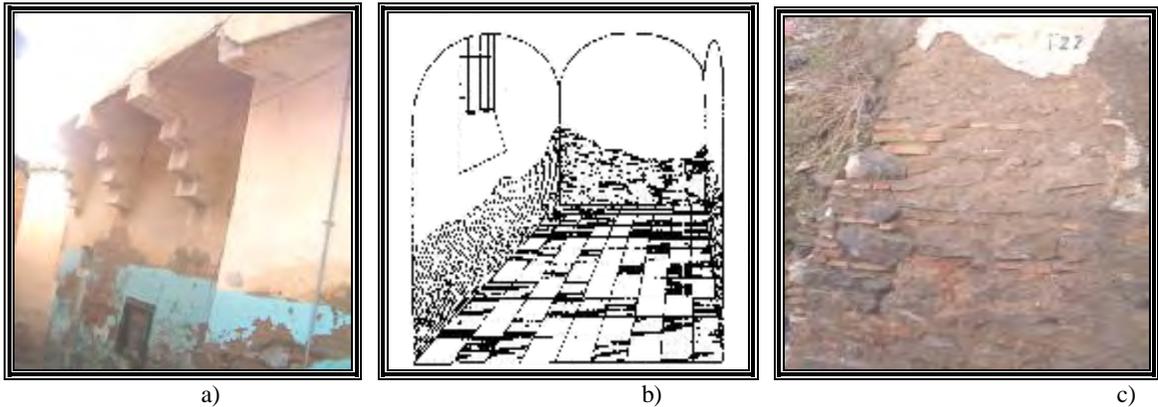


Fig.3.16 : Remontée capillaire. **Source** : auteur, 2005

Par contre, si on constate que les murs et les planchers sont recouvert d'un film uniforme et très léger qui, parfois enlève leur éclats aux : marbre, revêtements céramique « zellige », plinthes vernissées. On peut dire, qu'il s'agit certainement d'une humidité de condensation superficielle¹ (fig.3.7).

Des mouillures isolées² sur le mur, qu'on rencontre à différentes hauteurs, de tons variables, au point de s'estomper entièrement par temps sec et de réapparaître brusquement pendant les journées de sirocco ou de pluie, trahissent une humidité intermittente de matériaux isolés, parfois liée à une légère humidité ascensionnelle ou de condensation (fig.3.17-a ; b ; c-).

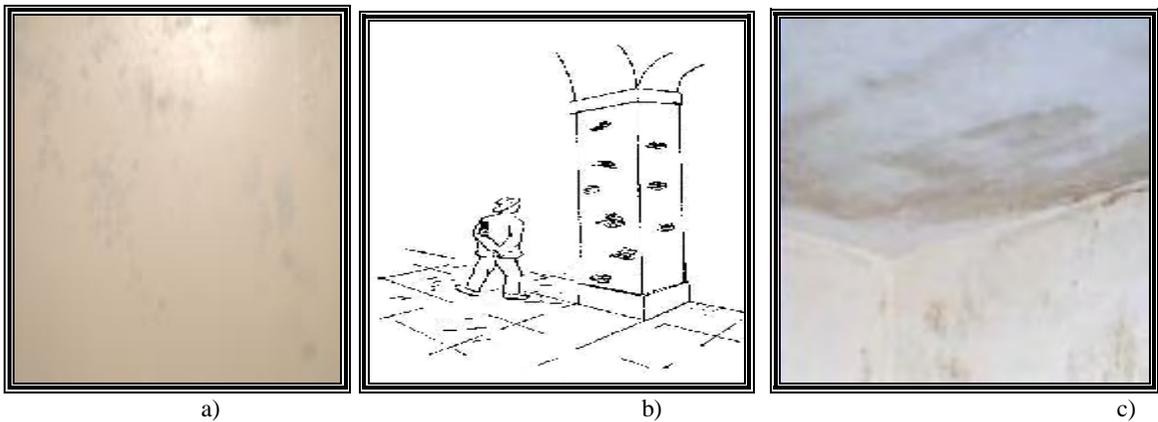


Fig.3.17 : Mouillures variables isolée. **Source** : auteur, 2005

L'action combinée de l'humidité ascensionnelle, les grandes variations de la température et d'une ventilation énergique provoque une nette détérioration de l'enduit à la limite supérieure de la zone d'imbibition, il se trouve que celui-ci soit : fortement érodé et criblé de trous sur une bande de sa partie supérieure. Cela indique que l'enduit est soumis à des alternances de

¹ Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Éditions du Moniteur, Paris, 1985

² L'humidité à mouillure variable ou intermittente est également une humidité de condensation

déshydratation et d'imbibition (fig.3.18-a ; b; c). De telles érosions se produisent surtout dans les halls, sous pilotis et sur des murs extérieurs¹.

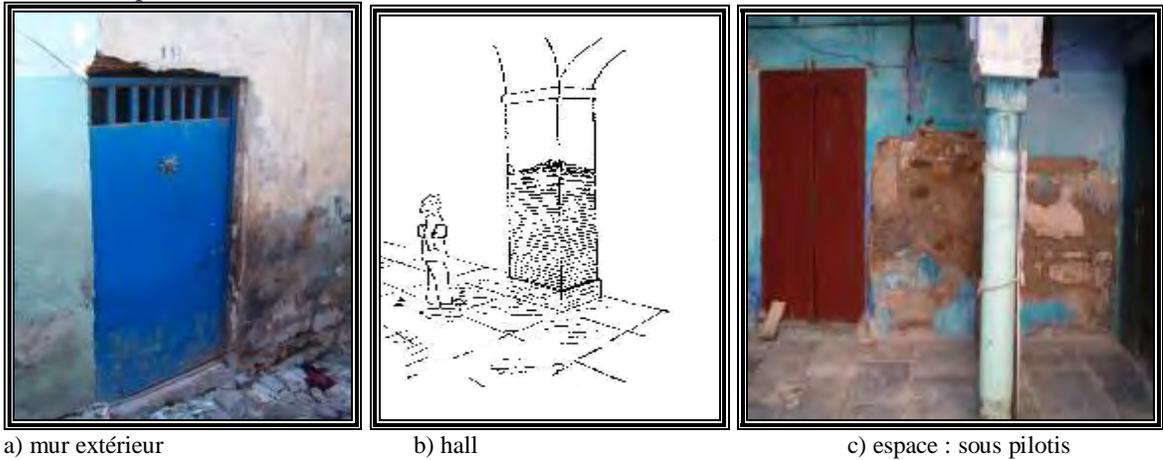


Fig.3.18 : détérioration de l'enduit à la limite supérieure de la zone d'imbibition. **Source** : auteur, 2005

Par contre si l'érosion de l'enduit est légère, située dans le bas des murs à quelques centimètres du plancher ou juste au-dessus des plinthes, cela signifie qu'elle dépend plutôt de l'action alternée, en hiver, de vents humides et chauds qui provoquent une stillation d'eau de condensation, et de vents froids et asséchants (fig.3.19), de telles cas se produisent dans les passages couverts et les corridors ouverts à l'air extérieur².



Fig. 3.19 : Passage couvert : érosion due à la condensation intermittente d'origine atmosphérique. **Source** : auteur

La décoloration, aussi, et l'écaillage des vernis sur les murs sont des signes soit de l'humidité ascensionnelle si les dégâts sont importants et situés dans la partie supérieure, soit la condensation s'ils ne sont que légers et situés dans la partie inférieure (fig.3.20). Les mêmes phénomènes apparaissent dans les constructions récentes, lorsque l'on pose des vernis sur les parois fraîches³



Fig.3.20 : Écaillage de la peinture.
Source : auteur, 2005

¹ Massari G : *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles – Paris, 1971.

² . [Http://www.travaux.com](http://www.travaux.com). 2005.

³ Croiset. M : *l'hygrométrie dans les bâtiments : confort thermique d'hiver et d'été : condensation*. EYROLLES, 1968.

L'apparition d'efflorescences est toujours liée à la présence de sels migrateurs amenés par capillarité par l'eau venant du sous-sol (fig.3-21), ou déjà présent dans le matériau de construction avant sa mise en œuvre, comme dans les briques isolées couvertes d'efflorescences. Quand ces derniers apparaissent sous forme de traînées, à une certaine hauteur, à la limite de la zone humide, elles relèvent d'une phase d'assèchement de l'humidité. Elles sont, en effet, plus visibles en été qu'en hiver.

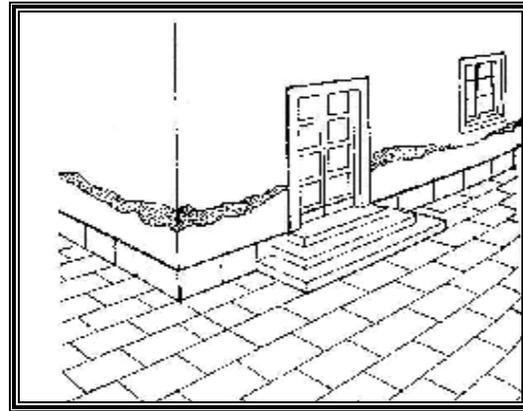


Fig.3.21 : Efflorescences. **Source :** auteur ,2005

Fig.3.22 : Zone horizontale humide

Il arrive, d'autre part, qu'une bande horizontale d'enduit soit humide entre deux zones sèches. Ce phénomène est dû à un dépôt de sels, laissé dans un temps passé par un envahissement d'humidité souterraine¹. Ces sels absorbent la vapeur d'eau de l'air et conservent humide la mince bande d'enduit qui les contient (fig.3.22).

Enfin, l'apparition de moisissures (fig. 3.23) est, en particulier, l'indice d'une carence absolue de ventilation : certains de ces champignons ont besoin de beaucoup d'humidité, d'autres de très peu, mais tous exigent une parfaite stagnation de l'air. On les constate si facilement sur les matières organiques et surtout sur le cuir (sur les reliures des livres, les chaussures, les bagages)².



a)



b)



c)

Fig. 3.23: Moisissures sur différentes matières organiques. **Source :** auteur, 2005

¹ Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985

² Ministère de l'équipement, direction de la construction, *Amélioration thermique de l'habitat existant*, Eyrolles, Paris, 1977.113-114

SYMPTÔMES	TYPE D' HUMIDITÉ	OBSERVATIONS
Taches permanentes sur le plancher	Humidité ascensionnelle	probable
Mouillures permanentes sur la paroi, à partir du plancher	Humidité ascensionnelle	
Forte érosion de l'enduit, dans la partie centrale ou supérieure de la paroi	Humidité ascensionnelle accompagnée d'une bonne ventilation	
Film léger recouvrant uniformément l'ensemble des parois et du plancher	Humidité de condensation	
Taches isolées de ton variable d'un jour à l'autre	Humidité alternante de matériaux isolés, Humidité de condensation	
Érosion légère de l'enduit, dans le bas, juste au-dessus du plancher ou de la plinthe	Humidité de condensation ; plus rarement : Humidité ascensionnelle	Très légère
Efflorescences de « salpêtre », apparaissant sous forme de traînées ou de taches	Humidité ascensionnelle Dans certains cas : humidité d'infiltration latérale de pluie	
Mêmes efflorescences sur des briques isolées de parement	-----	Symptômes insuffisants pour déterminer ce type d'humidité
Moisissures	Tout types d'humidité, même très légère	À condition qu'il y ait stagnation de l'air, carence d'insolation et support de matière organique
Champignons domestiques	Tout types d'humidité	À condition qu'il y ait absence de ventilation et présence de cellulose.

Tab. 3.1 : les différents types d'humidités et leurs symptômes. **Source** : Collombet. R, 1985

Remarque :

Ces notes n'ont qu'une valeur indicative. Elles ne peuvent jamais être utilisées automatiquement. Les moisissures peuvent apparaître même dans un milieu sec, si leur support de matière organique conserve assez longtemps une certaine quantité d'eau. D'autre part, il arrive souvent que, dans des locaux fermés, tranquilles, froids non aérés, aux parois nues et complètement envahies par l'humidité ascensionnelle, on ne constate aucun dommage apparent, ne fût-ce que cet obscurcissement de l'enduit, si fréquent sur les murs extérieurs.

Il faut toujours vérifier les conclusions que l'on pourrait tirer des symptômes apparents, au moyen d'instruments de mesure déterminant le degré hygrométrique de l'air, et surtout le taux d'humidité de la maçonnerie.

3.3.3 Répartition de l'humidité dans les ouvrages

A cause de la capillarité des maçonneries, l'humidité ascensionnelle provoque les taux d'humidités les plus élevés, par contre l'humidité de condensation dans la masse enregistre les plus basses. Donc, Les valeurs d'humidité de la maçonnerie varient selon les types d'humidité (fig. 3-24).

L'humidité de remontée capillaire diminue au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol. Dans la maçonnerie des rez-de-chaussée, lorsque la situation est grave, on constate des taux

pondéraux excessifs¹ de 9 à 15% dans les plinthes et un taux normal et tolérable de 3%, à une hauteur d'environ 3m. Lorsque la situation est courante et moins grave, le taux dans les plinthes est de 5 à 9%.

L'humidité ascensionnelle est uniformément répartie, le taux d'humidité reste constant et identique dans la même section horizontale du mur (fig.3.24). Mais il se pourrait qu'il y est une légère différence, lorsque le locale est habité, et ce du côté intérieur du mur à cause d'une éventuelle condensation, de l'ordre de 2 à 4 %.

Cependant, l'humidité de condensation, présente un taux relativement constant sur toute la hauteur de la paroi intérieure, mais un taux décroissant de la face interne vers la face externe, dans la section horizontale du mur.

Quant à l'humidité provenant d'une infiltration latérale de pluie battante, ses manifestations sont des plus contradictoires : dans certains cas, seule la paroi extérieure du mur est humide ; dans d'autres, contre toute attente, les deux parois extérieure et intérieure sont humides, mais la masse intermédiaire reste sèche (fig.3.24).

Le diagramme représentant les variations saisonnières des taux d'humidité dans la maçonnerie (fig.3.24.) n'enregistre aucun fléchissement dans le cas de l'humidité de remontée capillaire. Par contre, il n'en va pas de même dans le cas de l'humidité de condensation, qui est un phénomène transitoire. En effet, on remarque la disparition de l'humidité après la fin de l'hiver.

L'humidité par infiltration latérale de pluie battante et l'humidité à mouillure intermittente sont plus transitoires encore et peuvent se manifester et disparaître d'un jour à l'autre.

3.3.4 Caractéristiques de l'humidité

Si l'on compare l'humidité ascensionnelle à l'humidité de condensation, on trouve que la première apparaît surtout dans les constructions anciennes et seulement aux deux niveaux inférieurs (cave et RDC ou sous-sol et entresol), en revanche l'humidité de condensation, qui se manifeste le plus souvent aux étages supérieurs des constructions en béton armé, à cause de la minceur excessive des murs.

En général, l'humidité de remontée capillaire touche toute l'aire de l'immeuble et tous les édifices d'une même zone quand ils datent de la même époque et qu'ils sont construits avec les mêmes matériaux². Elle imprègne le plus fortement les murs de briques, puis ceux de pierraille légère ; d'un poids spécifique inférieur à 1,9. Surtout les murs rejointoyés par du mortier de pouzzolane que ceux rejointoyés par du mortier de sable ; mais elle ne réussit pas à envahir les murs en pierre naturelle dures et lourde, telles que le granit, le gneiss, le basalte, le calcaire compact, le marbre, le travertin,...etc. Surtout si ces pierres sont mises en œuvre sous forme de moellons équarris (tab.3.2).

¹ Massari G : Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements, Éditions Eyrolles – Paris, 1971

²[Enlign <http://www.irc.com>, 2005.

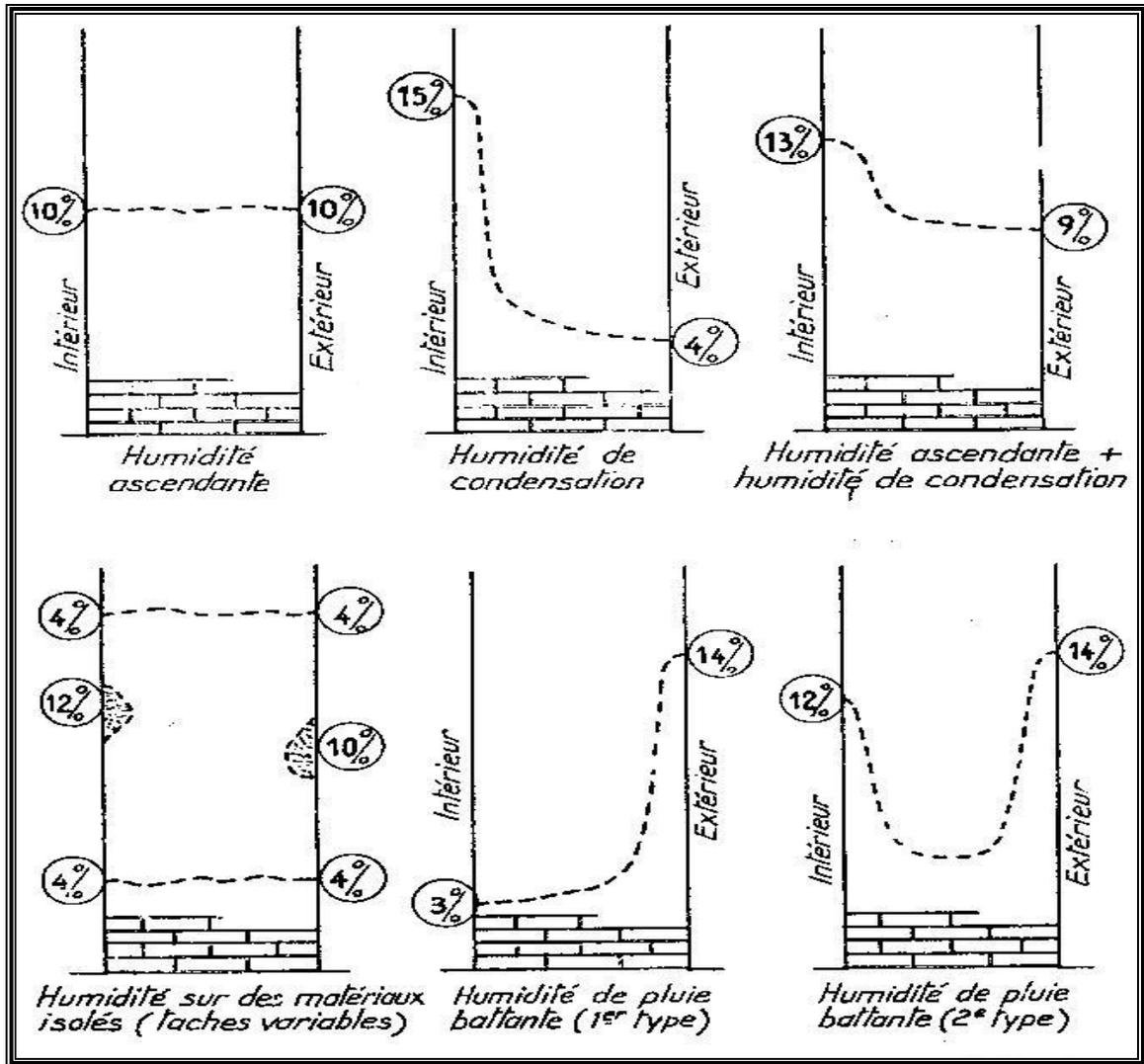


Fig.3.24 : Diagramme, établi d'après les types d'humidité, de la distribution de l'eau dans la section horizontale, de la face intérieure à la face extérieure d'un mur dont la capillarité est excellente. **Source** : Massari, 1971.

Humidité de remonte	Humidité par condensation de l'air	Humidité intermittente de matériaux isolés	Humidité due à la pluie battante
I. PREFERENCES			
Constructions anciennes	En été dans les sous-sols.	A tout étage, mais le plus souvent aux étages inférieurs	A tout étage
Exclusivement aux étages inférieurs et dans les sous-sols.	Aux étages supérieurs en hiver.		
Murs très épais	Murs périphériques	Murs construits avec des matériaux de démolition ou	Une ou deux façades exclusivement

Brique légère ou tuf	peu épais. Pierres lourdes	des matériaux de poids spécifiques très différents	Murs en briques d'une épaisseur inférieure à 3 têtes de briques ou de mois de 60cm, en pierre non équarries.
II- ASPECT			
Manifestations Constantes Quelquefois, taches persistantes et obscures s'étendant du plancher vers le haut Érosion éventuelle de l'enduit, dans le haut, en bordure de la zone sèche	Manifestations intermittentes. Pellicule uniforme et légère sur toute la paroi intérieure Érosion légère de l'enduit, dans le bas, près de la plinthe.	Manifestations intermittentes Taches isolées d'intensité variable selon les jours, localisées toujours aux mêmes endroits.	Manifestations accentuées après la pluie Tache accentuées, mais irrégulières ; dans certains cas, légère pellicule recouvrant toute la paroi intérieure.
III- TAUX D'HUMIDITÉ			
Décroissant à mesure que l'on s'élève au-dessus du plancher Constante dans une section horizontale dans toute l'épaisseur du mur	Constant sur toute la hauteur de la paroi. Décroissant dans l'épaisseur, de la paroi intérieure vers l'extérieur du mur.	Très différent d'un point à l'autre. Élevé dans les zones tachées, faisant ailleurs, en général	Très différent d'un point à l'autre quelquefois élevé sur les deux parois intérieures et extérieures, l'ossature du mur restant sèche.

Tab.3.2 : Caractéristiques de l'humidité dans les constructions anciennes. **Source** : Massari, 1971

Il a été constaté aussi, que l'invasion (humidité ascensionnelle) est d'autant plus rapide et profonde lorsque le mur est bien construit. Cet envahissement dépend toujours de la présence simultanée de deux facteurs :

- Ø quantité de la réserve d'eau dans le terrain ;
- Ø capillarité du matériau de construction uni au mortier

Il en résulte que seul la capillarité du mortier ne suffit pas, pour que l'humidité puisse monter dans la masse de la bâtisse. Il faut que le matériau de construction soit poreux et pourvu d'un coefficient d'affinité élevé, comme le sont les tufs, les calcaires, les grès tendre et les briques ordinaires.

L'humidité ascensionnelle peut être alimentée par :

- 1) La nappe phréatique ;
- 2) Des nappes superficielles d'eau perdue.

La première source d'alimentation est la plus difficile à maîtriser car il s'agit d'une marée souterraine que l'on ne peut ni l'assécher, ni contenir mais facilement identifiable puisque c'est un phénomène uniforme et général. Quant au second cas, il est aisé de l'intercepter par des

moyens adéquats et l'assainir, elle est généralement accidentelle, cependant elle est difficilement identifiable parce que c'est un phénomène local et limité, échappant à l'observation. En effet, les méthodes d'intervention sont différentes pour les deux cas

Les nappes superficielles d'eau perdue s'alimentent généralement, d'eaux de pluie mal recueillie, des fuites des conduites d'eau potable ou d'égouts, des puits, des réservoirs d'eau ou encore d'eau de condensation. Il en résulte toujours, et quelque soit leur origine, une imprégnation de certaines parties des fondations lorsqu'elle est profonde, si non les parties de l'ossature juste au-dessous du sol si cette eau perdue est superficielle.

Il se trouve que fréquemment, les cas d'humidité issue de la mauvaise collecte des eaux pluviales des toits et terrasses déversent le long des murs au lieu d'être canalisés jusqu'aux regards. Pour cela et afin de déterminer avec précision l'origine de l'eau d'alimentation, il faut procéder à l'expertise suivante :

- Ø Creuser des tranchées le long des murs humides, jusqu'à une zone sèche ;
- Ø Contrôler l'étanchéité des puits, des citernes, des égouts intérieurs ou extérieurs ;
- Ø Inspecter minutieusement l'état des canalisations de la voie publique et celui des gouttières ;
- Ø Mettre à nu les conduites d'eau sous pression et, toutes vannes fermées, rechercher, au manomètre ou par tout autre moyen, les fuites éventuelles.

L'assèchement des nappes d'eau perdue dépend donc des résultats de l'expertise, Il s'agit de travaux manuels utilisant un matériel élémentaire. Ces travaux exigent aussi une certaine patience en raison non seulement de leur caractère fragmentaire mais aussi de la configuration et de la densité urbaine du site.

Il arrive que le diagramme des sections humides révèle, à lui seul, de quelle direction vient l'eau (fig.3-25).

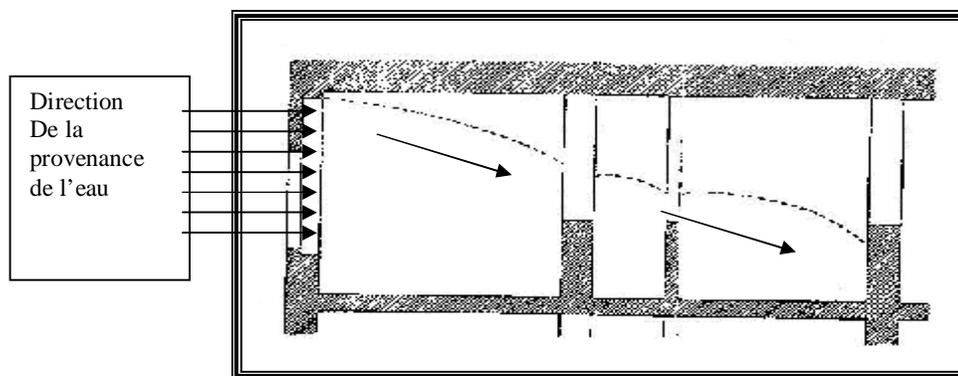


Fig.3.25 : schéma, représentant le sens et la direction de la provenance de l'humidité

Il se pourrait qu'il y ait une double alimentation : eau provenant à la fois de nappes superficielles et de la nappe phréatique. En effet, si l'alimentation se fait à partir d'une nappe d'eau profonde, phréatique, le taux d'humidité de la maçonnerie sera assez uniforme dans l'édifice entier ; mais si l'eau d'alimentation provient de nappes superficielles d'eau perdue, certaines parties malsaines de l'édifice concentreront l'humidité, Tandis que d'autres seront sèches¹. L'examen de ces manifestations est particulièrement utile quand il est impossible d'inspecter directement l'état du terrain au moyen de sondages ou de prélèvements effectués le long des murs.

¹ Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985

a) Propriétés de l'humidité provenant d'eau perdue :

- Elle n'apparaît que d'un seul côté du bâtiment
- Elle n'envahit, en général qu'une bâtisse ou petit ensemble de constructions contiguës
- Ses manifestations sont variables au cours de l'année

b) Propriétés de l'humidité provenant de la nappe phréatique :

- Elle imbibe très uniformément toute la base de l'édifice, sauf si l'infrastructure est construite avec des matériaux hétérogènes;
- Elle atteint une hauteur maximum sur les faces orientées nord et nord-est « non ensoleillées », et minimum au sud, sud-est et sud-ouest « parties très ensoleillées »;
- Elle envahit tous les immeubles d'un même îlot, datant de la même époque et construits avec les mêmes matériaux ;
- Ne présente pas de variations, la hauteur qu'elle atteint dans les murs est constante pendant toute l'année.

3.4 Le phénomène de la capillarité dans les matériaux de construction

L'étude des propriétés des matériaux, nous permet de comprendre leurs comportements vis à vis de l'humidité. Certaines expériences de laboratoire ont été effectuées sur des échantillons de même taille ont révélé que la hauteur d'affinité varie d'un matériau à l'autre.

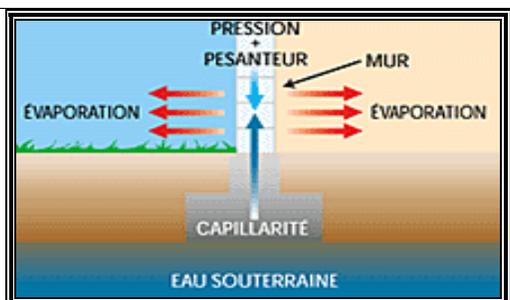


Fig.3.26 : phénomène de la capillarité.

Source : [http:// www.irc](http://www.irc), 2005

Le pouvoir d'absorption d'un mur se rapproche de celui du matériau de base : plus le rejointoiment en mortier sera mince, plus le comportement général du mur se rapprochera du comportement spécifique du matériau de base. A titre d'exemple et pour mieux comprendre, un mur en brique rejointoyées avec peu de mortier réagira beaucoup plus comme une brique (matériau de base) qu'un mur irrégulier de gros blocs de travertin rejointoyés avec beaucoup de mortier ne réagira comme le travertin.

On peut dire que pendant l'invasion de l'humidité, le comportement du matériau de base (brique ou pierraille) peut être, par rapport au mortier, soit actif, soit passif : actif si le matériau véhicule directement l'humidité avec autant ou plus de rapidité que le mortier ; passif s'il retient l'humidité aux dépens du mortier. Ainsi, le comportement des matériaux qui constituent un mur influence ce dernier pour autant que le mortier qui le rejointoie fasse des différents éléments de construction un ensemble homogène.

Si l'on prend le cas de la brique ordinaire qui a un pouvoir d'affinité de trois à cinq fois supérieur à celui du mortier¹ : un mur construit avec ce matériau permet à l'humidité de monter d'autant plus rapidement que ce mur sera plus soigneusement construit, que les briques seront de meilleure qualité et qu'elles seront mieux rejointoyés avec du mortier réparti en couches minces et bien étirées.

Une ossature élevée en matériaux anticapillaire, comme par exemple le grès ou le silex, ne favorise pas le passage de l'humidité, l'eau passe très lentement à travers le mortier. Par contre dans un mur de brique, c'est la brique même qui permet le passage de l'humidité d'une couche

¹ DANIEL.B ; CHAMPETIER. J-P ; VIDAL. T, *Anatomie de l'enveloppe des bâtiments*, le Moniteur, Paris, 1997

« horizontale » de mortier à l'autre et sert de raccourci par rapport au joint vertical du mortier (fig.3.27).

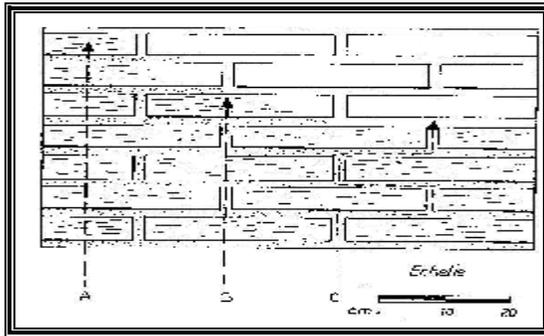


Fig.3. 27 : Cheminement de l'humidité
le plus cours est « A »

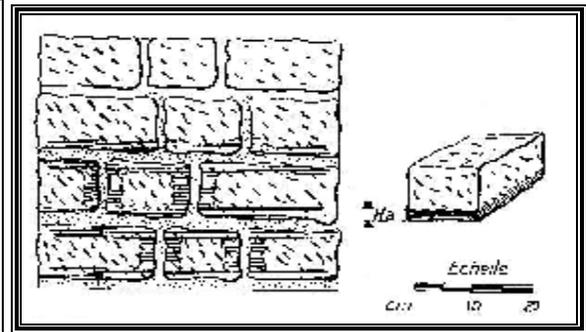


Fig. 3.28 : Rapport entre la hauteur d'affinité et la
hauteur du moellon

Source : Massari, 1971

L'imbibition (fig.3.27) s'effectue donc avec plus de rapidité par les trajets A ou B, qui traversent les lits de briques. Ainsi s'expliquent ces hauteurs considérables que l'humidité réussit à atteindre dans les murs de briques, en un temps relativement bref.

Par ailleurs, la participation active d'un matériau à la progression de l'humidité dépend aussi des grandeurs des blocs employés. Si la hauteur du bloc dépasse de beaucoup la hauteur H_a d'affinité (fig.3.28), ce bloc ne contribue en rien à la montée de l'humidité, parce qu'il tend à retenir l'eau qu'il a prise au mortier, tout en restant sec ou presque sec, à l'intérieur de sa masse.

Si une disproportion existe entre l'épaisseur du bloc et son potentiel d'affinité, la progression de l'humidité dans le mur est extrêmement lente et la hauteur maximum qu'elle peut atteindre est relativement peu importante. En effet si l'on dispose de deux murs construits avec un même matériau identique mais taillé moellons gros (hauteur $> H_a$) dans l'un et petits (hauteur $< H_a$) dans l'autre, se comportent différemment, le premier se montrant réfractaire et le second favorable au passage de l'humidité. Par conséquent, les matériaux réfractaires à toute imbibition comme le silex, grès et basaltes peuvent être utilisés en petites dimensions sans craindre l'humidité par contre, les matériaux ayant un grand pouvoir d'affinité doivent être employés sous formes de moellons de la plus grande dimension possible.

En conclusion, pour que l'humidité de remontée capillaire puisse progresser facilement à l'intérieur des matériaux, il faut la présence de deux conditions sine qua non :

1. alimentation continue de l'ossature par une nappe d'eau ou mouillure du terrain,
2. une grande capacité d'absorption du matériau de construction lié au mortier.

Remarque :

Il est à signaler que si, l'alimentation est discontinue, l'humidité s'étend plutôt vers le bas ou à la rigueur horizontalement, au lieu de monter en haut même si le matériau est capillaire.

1.6.1 Expérience de Talenti

Talenti¹ a injecté plusieurs hectolitres d'eau colorée à l'éosine dans un gros pilastre sec en brique jaunes, à haut potentiel d'affinité. L'injection d'eau, effectuée par un trou d'une profondeur de 60 cm, incliné vers l'intérieur du pilastre (fig.3.29), se poursuivit pendant 20 jours consécutifs, à raison de 17 à 18 litres par jour. Après cinq jours, les premières tâches rouges de l'éosine apparurent sur l'enduit extérieur ; ensuite elles s'agrandirent et s'accumulèrent jusqu'à former une large bande autour du pilastre. Cependant, contrairement à ce qu'il avait supposé, l'humidité ne progressa pas vers le haut, mais demeura tout entière en dessous de l'orifice d'injection. Il apparaissait donc que l'humidité se propageait rapidement, sans doute à cause du haut pouvoir d'absorption du matériau, mais seulement vers le bas.

Conclusion

Cette expérience assez élémentaire a permis de tirer une conclusion très intéressante pour déterminer l'origine de l'humidité ascensionnelle et comprendre le comportement des matériaux : l'humidité tend à monter, et prend donc la forme caractéristique d'humidité ascensionnelle, uniquement si elle est véhiculée dans une série de vaisseau capillaire s'alimentant à des nappes souterraines.

Dans tous les autres cas, l'humidité subit la loi de la pesanteur et se propage donc vers le bas ; ce n'est que lorsque le mur est saturé de façon continue, dans sa partie inférieure, que l'humidité devient ascensionnelle, se propageant dans la seule direction restée libre, vers le haut (fig.).

Quant à la vitesse moyenne d'ascension, Salmoiraghi cite le cas des pylônes en briques de la citerne géante de Livourne, construite en 1828, où l'humidité atteignait une hauteur de 2 à 2,40 m au-dessus du niveau de l'eau en 1887 : elle aurait donc progressé là d'environ 4 cm par an.

Remarque :

Au départ, la progression de l'humidité ascensionnelle à travers un mur nouvellement construit et assez rapide sur les premiers décimètres, mais devient ensuite de plus en plus lente à cause de l'évaporation superficielle qui l'entrave.

¹ Talenti.M. « Microbiologia », in MASSARI, Bâtiments humides et insalubres, Paris, 1970.

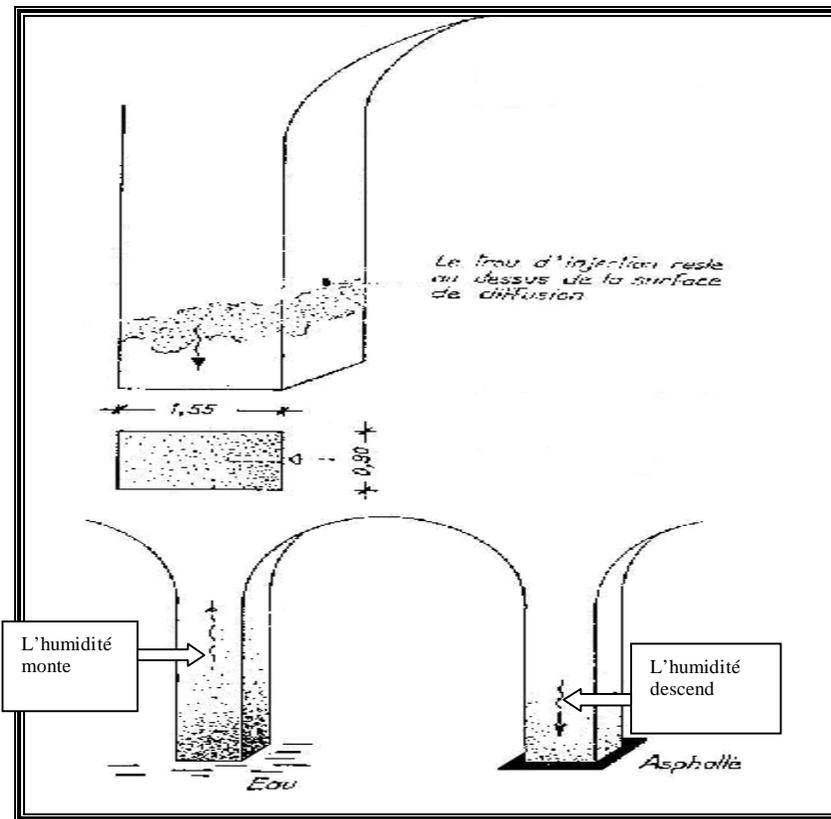


Fig. 3.29 : Expérience de Talenti, 1971.

3.4.1 Hauteur de progression de l'humidité

L'effet des conditions climatiques sur la hauteur de progression de l'humidité est considérable. Dans le cas où l'air est très humide « proche de son point de saturation », sa capacité d'absorption de la vapeur d'eau est donc très faible, ce qui favorise l'humidité, non soumise à l'évaporation, de se propager au maximum. Par contre l'inverse se réalisera si le vent est sec et chaud.

Les cas graves de l'humidité, du point de vue hygiénique, et les plus spectaculaires se manifestent généralement dans les lieux situés à l'ombre et à l'abri de tout déplacement d'air : dans les patios étroits (fig. 3.30), dans les rez-de-chaussée non ensoleillés, sous-sols, impasses et les parties orientés Nord-est et bordées d'écran vert à feuilles persistantes...etc ; bref, en d'autres termes c'est la portée du « microclimat ». ceci peut être vérifié dans l'exemple de la villa Farnesina¹, en Italie : bâtisse isolé, datant du 15eme siècle, dont la structure est en tuf, la hauteur de l'humidité mesurée sur les colonnes atteint 1,50 m du coté sud (très ensoleillé) et 3,10 m du coté nord.

¹. MASSARI G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971



Fig. 3. 30 : patio étroit. Suika Constantine. **Source** : auteur, 2005

Sachant qu'aucun autre facteur n'intervient comme la ventilation par exemple. Nous pouvons déduire que, dans ce cas-ci, l'insolation effective réduit de 1,60 m la hauteur de l'absorption. Si, par hypothèse, l'action asséchante du soleil venait à être supprimée, soit par la construction d'un édifice contigu, soit par l'implantation d'un rideau d'arbre à feuilles persistantes, plusieurs années après, nous verrions l'humidité atteindre, du côté sud, la même hauteur que du côté nord.

A cet effet, nous pouvons conclure ainsi : Quand les deux conditions de l'humidité de remonté capillaire citées précédemment existent sur site à savoir l'alimentation continue et le pouvoir d'affinité du matériau, la hauteur que peut atteindre l'humidité dans le mur dépend :

- Ø des conditions climatiques : ventilation et ensoleillement;
- Ø De l'insolation effective ou, mieux, du manque d'insolation du mur humide ;
- Ø de l'âge du bâtiment.

Il serait peut être utile de citer quelques exemples sur les hauteurs de progression de l'humidité dans quelques pays et ce à titre de comparaison :

En Italie, elle peut atteindre le premier étage, c'est-à-dire 4 à 5 m au-dessus du niveau du sol. elle est de 1 à 2 m en Allemagne et en France¹. A Athènes, cependant, elle est pratiquement insignifiante, en raison soit de la sécheresse du climat, soit de la nature du terrain.

Quelque soit la hauteur atteinte par l'humidité, on peut imaginer qu'elle monte dans le mur, comme un véritable conduit de vaisseaux capillaires. Cette propagation dans le mur n'est pas infinie, au contraire, elle se stabilise à une certaine distance, selon les conditions du lieu déjà énuméré au paravent, de ce fait, on appelle ce phénomène « l'équilibre hydrique » résultant de l'équivalence entre le débit de la section absorbante inférieure¹, d'une part, et l'évaporation totale des parois, d'autre part. Autrement dit, il entre autant d'eau par absorption qu'il en sort par évaporation.

Dès que la surface d'évaporation se réduit par n'importe quel phénomène, l'humidité recommence à monter.

Plusieurs spécialistes ont remarqué la proportionnalité qui existe entre le débit de la section absorbante et celle de l'épaisseur des parois, cette hypothèse a fait l'objet d'une vérification par

¹ [Enligne] <http://www.CSTB.fr,2004>.

Massari au palais Corsini où les deux murs parallèles d'un passage couvert humide contiennent des taux d'humidité proportionnels à leur épaisseur (fig.3.31 et fig.3.32). Par conséquent, d'une part, plus un mur est épais, plus le niveau de l'humidité sera élevé, d'autre part, plus le mur dispose d'une plus large surface d'évaporation pour compenser sa capacité d'absorption.

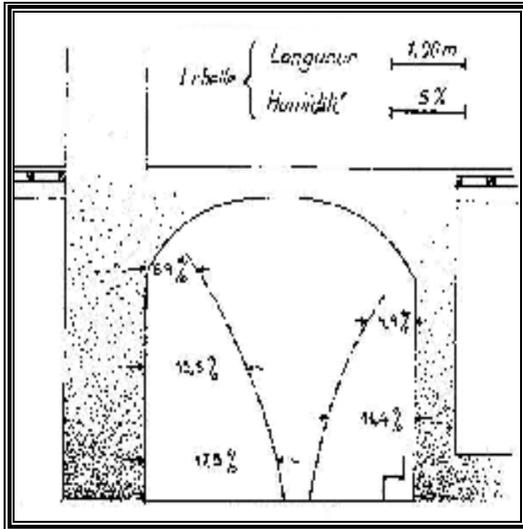


Fig. 3. 31 : proportionnalité de l'humidité aux épaisseurs des murs

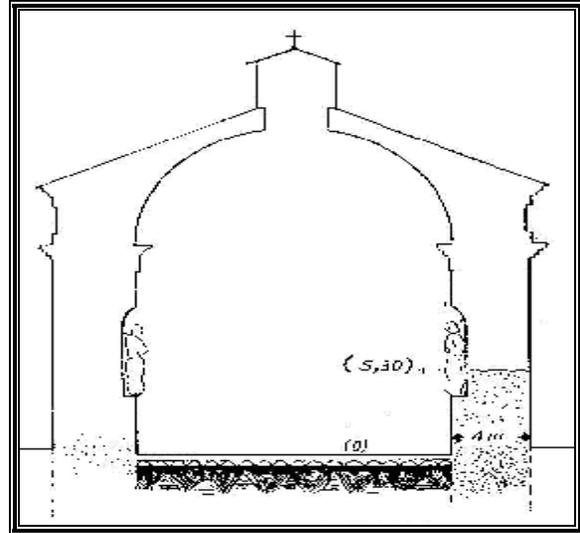


Fig. 3. 32 : Hauteur atteinte par l'humidité: 5,30m dû à l'épaisseur du mur
Source : Massari, 1970

Indice de progression ou de montée

Plusieurs études ont été effectuées sur les murs humides de certains édifices de Rome ont révélé que le rapport entre la surface évaporante et la section absorbante était en moyenne, comme suit

- Ø Dans les pilastres isolés surf.évap/surf.absor = de 2 à 3 ;
- Ø Dans des mur à parois extérieures « de 3 à 8 ;
- Ø Dans des murs d'angle « de 4 à 10.

Mais en pratique, il est plus commode de calculer le rapport entre la hauteur maximale de progression de l'humidité, soit « Ha », et « l'épaisseur du mur ».

Nous appellerons ce rapport de deux mesures linéaires : « l'indice de montée » $IM = Ha/S$.

Ainsi, la figure (fig.3.33) montre la relation qui existe entre l'humidité et l'épaisseur du mur :

- Ø dans des pilastres isolés, naturellement bien aérés, la hauteur de progression étant égale à l'épaisseur du pilastre, l'indice de montée est égal à 1 ;
- Ø dans des murs à parois extérieures, la hauteur de progression mesurant de 1,5 à 4 fois l'épaisseur du pilastre, l'indice varie entre 1,5 et 4.
- Ø dans des murs intérieurs (d'angle), où la hauteur de progression mesure entre 2 et 5 fois l'épaisseur du mur, l'indice varie entre 2 et 5.

La meilleure période pour observer la hauteur de progression de l'humidité est « l'hiver », dans les maçonneries ayant le plus grand pouvoir d'absorption et orientées au nord. La limite est atteinte quand l'air est saturé ou près de l'être. Sachant que, la constante de capillarité augmente avec la basse température et la quantité des sels minéraux dissous dans l'eau absorbée par affinité par les murs.

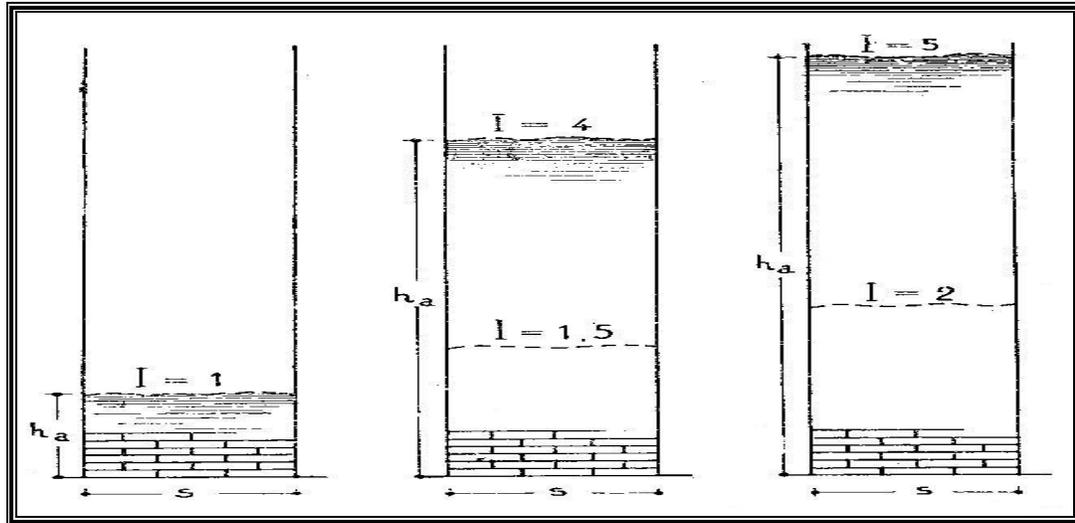


Fig. 3. 33 : La hauteur de l'humidité est fonction de l'épaisseur du mur et à la ventilation auquel est soumis
Source : Massari, 1971

Hypothèse de Kettenacker¹

L'évaporation superficielle des murs, provoquée par la ventilation et l'action du soleil, est une contrainte à la progression de l'humidité qui finit par l'arrêter. Les expériences ont montré aussi que la ventilation et le soleil ont pour action d'activer l'évaporation et qu'à toute augmentation de celle-ci correspond une égale augmentation de la quantité d'eau absorbée, par le bas, dans le réservoir.

En réalité Kettenacker voit autrement, et d'après lui le début de l'assèchement, commencerait par le haut du mur, tandis que la partie en dessous de la ligne de délimitation reste humide, et qui a uniquement pour cause : les pertes de charges dus à la résistance de l'eau lors de la traversée de son débit dans les vaisseaux capillaires et ce pour répondre à l'augmentation de l'évaporation. Le mur se comporte donc comme un conduit capillaire, ayant la même perte progressive de charge, à mesure que croit la vitesse du débit, phénomène similaire, que l'on retrouve généralement dans un réseau d'eau potable à cause des frottements avec les parois des conduits. Par conséquent la hauteur de progression de l'humidité tendrait à diminuer à mesure qu'augmente la vitesse d'évaporation superficielle.

Cette hauteur de montée capillaire dépend alors, seulement de la nature des matériaux qui constituent le mur, Plus les vaisseaux capillaires seront réguliers et fins, plus la progression de l'humidité sera élevée et elle atteint son point le plus haut, seulement si l'air est saturé ou presque, c'est à dire qu'il y ait impossibilité d'évaporation.

¹ KETTENACKER, L, *l'humidité des murs*, Gesundheit-Ingenieur, 1930. p721

3.5 L'humidité et ses nuisances

3.5.1 Effet de l'humidité sur les constructions

L'humidité est l'une des principales causes des désordres qui affectent les constructions. Elle peut menacer la bonne conservation des structures et des matériaux constitutifs du bâtiment. Elle se manifeste par un grand nombre de désordres : salissures, décollement de revêtements, effritement des enduits, gonflement et gauchissement des bois, etc (fig :3.34-35-36-37). Elle peut en cas de gel avoir des conséquences encore plus graves telles les fissurations et les éclatements de matériaux.



Fig. 3. 34 : immeuble dégradé, quartier Suika



Fig. 3. 35 : place, quartier Suika basse

Source : auteur, 2005

Par ailleurs, elle porte atteinte au confort :

- Ø Par le développement de moisissures et de champignons à l'intérieur des logements.
- Ø Par la diminution de l'isolation thermique lorsque les murs ne sont pas suffisamment secs.



Fig. 3. 36 : Détérioration des revêtements intérieurs



Fig. 3.37 : Champignons

Source : auteur, 2005

3.5.2 Effet de l'humidité sur la santé de l'homme

Un milieu de vie sain passe nécessairement par une bonne qualité de l'air au foyer. Un surcroît d'humidité dans l'air peut favoriser la croissance de moisissures, un phénomène qu'on associe toujours à des problèmes respiratoires pour les occupants. L'humidité est donc, l'un des plus graves facteurs de dégradation de la qualité de l'air intérieur des logements. Un air humide altère

l'atmosphère d'une maison de plusieurs façons. Dans les cas graves, il peut même affecter la santé.

De récentes études¹ ont sensibilisé le monde du bâtiment ; avec l'amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe des bâtiments (alors que les constructions traditionnelles étaient très perméables à l'air), le taux d'humidité à l'intérieur des logements a augmenté. Cette préoccupation se révèle particulièrement sensible dans les régions où les températures extérieures, basses en hiver, engendrent une condensation sur toutes les surfaces où la température est inférieure au point de rosée (niveau de saturation) de l'air ambiant.

L'humidité d'infiltration a pour conséquence le développement de moisissures et de bactéries au sein des matériaux, accompagné de l'émission de substances odorantes et irritantes (fig : 3.39).

L'humidité de condensation augmente le risque d'infestation par les acariens et favorise sur les surfaces qu'elle humidifie la prolifération fongique (moisissures) et bactérienne (fig : 3.38).

Les moisissures sont à l'origine d'un large éventail de pathologies² pour les personnes qui y sont exposées de façon prolongée, ce qui est le cas quand il s'agit de l'habitation : les plus fréquentes sont les allergies, avec en tête l'asthme, les enfants étant les plus exposés avec une respiration plus rapide et un développement respiratoire inachevé.

En effet, les allergies sont dues principalement aux spores que les moisissures diffusent dans l'air pour se reproduire. Mais elles produisent aussi de puissants agents inflammatoires qui sont à l'origine d'irritations des yeux, du nez, de la gorge, associés à de la fatigue et à des maux de tête. Enfin, plus exceptionnellement, elles produisent des mycotoxines qui peuvent avoir des conséquences dermatotoxiques, immunotoxiques et cancérigènes. Leur inhalation peut provoquer des maladies très graves. Les trichothécènes produites par *Stachybotrys atra* ont été incriminées, chez de très jeunes enfants, dans des hémorragies pulmonaires mortelles. Cette moisissure se développe particulièrement dans les bâtiments après des dégâts des eaux. Les spores mortes sont encore allergisantes et toxiques. L'espèce *Aspergillus versicolor*, la seconde espèce la plus fréquente, selon une étude réalisée sur cent trente maisons belges (76,1%), produit une toxine cancérigène appelée la sterigmatocystine...

En outre, l'humidité et en particulier celle de condensation produit des émissions toxiques par la dégradation chimique de certains matériaux de construction³ comme les revêtements de sol en PVC, le béton, les chapes de ragréage, etc



Fig. 3.38 : Acariens **Source** : www.travaux.com, 2005 **Fig.3.39** : Moisissures. **Source** : auteur

¹ DEOUX S et p, *le guide de l'habitat sain*, MEDICO, Andorre, 2002.pp181-197

² [Enligne. <http://www.sandrine.com>, 2005.

³ Couasnet Y : *les condensations dans les bâtiments : guide pratique et éléments d'analyse*. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 1990.

3.5.3 Effet de l'humidité sur les matériaux de constructions

a) pierres naturelles

Sous l'effet de l'humidité capillaire, certains matériaux subissent des dégradations énormes dont l'intensité dépend surtout de leurs positions et leurs orientations dans la structure (3.40). La plus part des grès, par exemple, s'ils se conservent bien en superstructure, se détériorent en infrastructure c'est-à-dire, là où règne l'humidité.

En général, il faut savoir que, parmi les substances qui entrent dans la composition des matériaux naturels, il existe ceux qui sont favorable à la lutte contre l'humidité et d'autres qui l'entravent. Comme la silice par exemple qui en résiste bien, alors que les substances carbonées ou bitumineuses ne le sont pas.

Certaines roches soumises à des actions chimiques comme la « kaolinisation¹ » se désagrègent très facilement par l'humidité, tel que le granit et le porphyre, considérés souvent comme des matériaux éternels (fig : 3.40 ; 3.41).

Comment s'explique alors, la réputation d'éternité de certains matériaux. La réponse est simple. D'après Massari², « l'éternité du granit est réelle à condition qu'on l'emploie de façon classique, dans les obélisques ou d'autres monuments extérieurs soumis à des climats très secs, tels que celui de l'Égypte. Mais si l'on employait ce même granit à Venise, dans des fondations soumises à une humidité intermittente, sa détérioration serait aussi inéluctable que son éternité dans un obélisque ».



Fig. 3. 40 : Mur en pierre et en brique



Fig. 3. 41 : Mur en pierre calcaire

Source : auteur, 2005

L'érosion des enduits ciments et des pierres calcaires causées par la salinité des bâtiments est aussi un autre type de dégradation chimique, provoqué par l'humidité de condensation provenant de l'air marin. Après réaction, il se forme un sel dangereux appelé : chlorure de calcium qui est délétère. Il attaque et détruit les pierres calcaires et les mortiers très rapidement.

b) le bois

Attaquée par l'humidité, le bois perd ses propriétés physiques tel que : la résistance à la pression en revanche, sa résistance à la traction reste la même. Le diagramme de Geiger, (fig.3.42), montre bien comment la charge maximum supporté par le pin, qui dans les conditions normales

¹ Kaolinisation : hydratation des silicates d'alumine, ce dernier se transforme par hydratation en kaolin tendre, c'est-à-dire en argile pure.

² MASSARI G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971

d'humidité (12%) est d'environ 470 kg/cm², tombe à 220-200 kg/cm² lorsque le bois approche de la saturation (2 - 40 %).

On peut conclure que le bois, et à cause de l'humidité, serait moins résistant en hiver et en automne qu'en été. Cette observation est d'une grande utilité vis-à-vis des surcharges saisonnières.

L'autre ennemi du bois est le champignon qui apparaît avec l'humidité, au moment où le taux de celle-ci dépasse 18% ou plus, d'autres conditions aussi qui favorisent l'apparition et la multiplication sont :

- Ø L'absence de l'aération ;
- Ø Un minimum constant de chaleur qui favorise le développement du mycélium.

Le champignon le plus répandu est le « *Merulius lacrimans* », appelé communément « pourriture rouge ». Il est le type le plus dangereux car il n'a besoin que de très peu d'humidité pour se développer, bien que dans la pénombre des greniers il apparaisse recouvert de gouttes d'eau.

Outre, l'odeur prenante qu'il dégage, ce champignon détériore le bois en détruisant soit la lignine, soit la cellulose, mais jamais les deux à la fois sauf que l'action successive de différentes espèces ne les ronge l'une après l'autre¹. On peut combattre ce champignon par le biais de la ventilation et une température élevée, car, il semble qu'il ne puisse vivre qu'à une température inférieure à 27° C (fig. 3.43).

c) matières organiques

En toutes périodes (été ou hiver), les matières organiques telles que : cuire, papier ...etc. sont endommagé par l'humidité et la chaleur qui favorisent le développement des bactéries, insectes, champignons et surtout les moisissures. L'humidité peut agir seule ou avec le concours d'agents biologiques sus-cités.

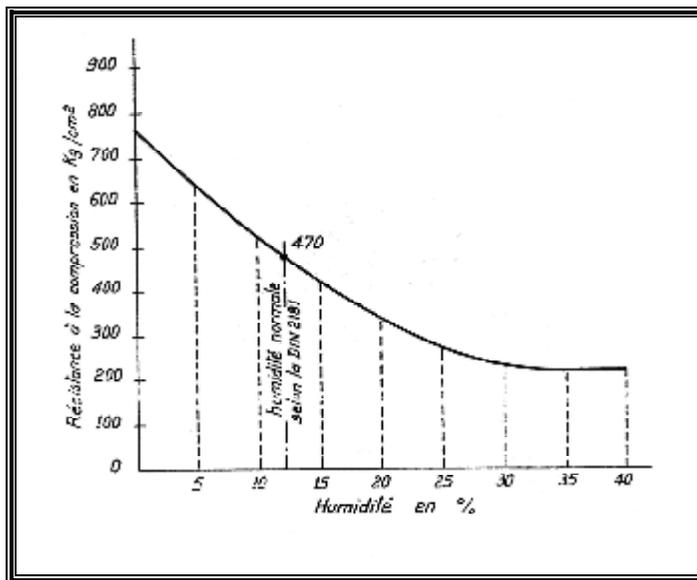


Fig.3.42 : Résistance du pin rouge à la force de compression en fonction de son taux d'humidité. **Source** : Collombet, 1985.



Fig.3.43 : Moisissure du bois
Source : auteur, 2005

¹ Collombet Raymond, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985 pp57-79

Lorsqu'elle agit seule, au cas où la température est basse, elle provoque le ramollissement progressif jusqu'à la véritable désagrégation du tissu, manuscrits et papier, sachant que ce dernier supporte bien une humidité relative de l'air variant entre 40 et 65 %. Mais lorsque le taux d'humidité se stabilise entre 80 et 90 %, il se détériore rapidement.

L'action des agents biologiques provoque toujours, une odeur de moisi qui révèle le développement des spores.

A Londres, le seuil du taux d'humidité relative a été fixé à 72 %, en dessous duquel, les spores ne se développent plus. En Italie, une disposition imposée aux bibliothèques publiques gouvernementales, sur le conseil de M. Alfonso Gallo, l'auteur éminent de la pathologia del libro a fixé le taux maximum d'humidité relative à 65 % et le minimum à 40 %, à condition que la température moyenne ne dépasse pas 18 ou 20°. Pour qu'un papier puisse être considéré comme sec, son taux d'humidité ne doit pas dépasser 12%.⁽¹⁾

La lumière du jour ou, à défaut, les rayons ultraviolets arrêtent la propagation des moisissures ; on obtient le même effet par une aération énergique des locaux.

3.5.4 Les efflorescences :

C'est la transformation en poudre par déshydratation des cristaux ou des minéraux. On trouve les sels solubles dans les mortiers, les pierrailles et les briques ou proviennent des nappes souterraines avec l'humidité ascensionnelle.

La cristallisation de certains sels dans les vaisseaux capillaires des matériaux, sous l'effet de l'alternance de l'humidification et de l'assèchement entraîne dans le cas des enduits des effritements. La partie endommagée de ce dernier se situe dans la zone sèche, juste au dessus de la zone humide. Quant à la zone de démarcation entre les deux, elle est recouverte d'efflorescence en large bande continue².

En revanche, sur les revêtements en brique, ces efflorescences sont discontinues et n'apparaissent que sur certaines briques isolées, laissant les autres intactes. Ce phénomène est dû à l'humidité, qui favorise la migration des sels solubles.

Les efflorescences continues, caractérisés par une couleur blanche, sont le résultat d'une concentration de sels migrateurs qui se produit presque toujours à l'endroit où l'humidité s'arrête.

Ces sels peuvent être : le sulfate de magnésium, sulfates de calcium et de sodium. Par contre les chlorures sont rares, sauf, là où souffle l'air marin.

Quant au salpêtre ou efflorescence de nitrate, il est presque inexistant, sauf dans le cas où un dépôt de déchets organiques (égouts, écuries...) se trouve très proche du mur. Il est à noter qu'autrefois, on utilisait le nitrate de potassium (insoluble dans l'eau) dans la fabrication de la poudre à canon.

On peut conclure que la cause des : efflorescences, effritements, et les gondolements est la migration des sels solubles selon deux possibilités³ :

Ø La capillarité: mouvement du liquide des parties humides vers les parties sèches ;

¹ MASSARI G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971.

² Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985

³ Couasnet Y : *Contribution à l'étude du transfert de vapeur d'eau en régime permanent et non stationnaire dans les matériaux poreux hygroscopiques*. Cahier du CSTB N°2349, Paris, 1989

Ø La diffusion: déplacement moléculaire des sels au sein du liquide, allant de la zone de solution la plus concentrée à la zone de solution la plus diluée c'est le phénomène de l'osmose (fig.3.44).

Il est à noter qu'il n'est pas aisé de distinguer l'effet de ces deux causes de migration des sels.

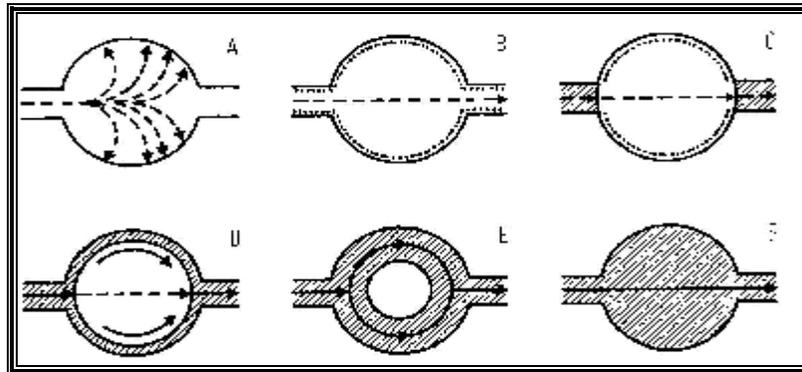


Fig.3.44 : Diffusion d'eau en milieu poreux. Source : Alain Roulet. C, 1987

3.5.5 effet de la capillarité

C'est un phénomène physique naturel, qui semble s'opposer à la loi de la pesanteur, d'après cette dernière, le liquide se trouvant dans deux vases communiquant doit être au même niveau. Le principe de la capillarité s'observe, lorsque l'un des vases soit réduit de manière à devenir un conduit capillaire, alors, le niveau du liquide monte d'autant plus que le conduit se réduit plus (fig.3.45)

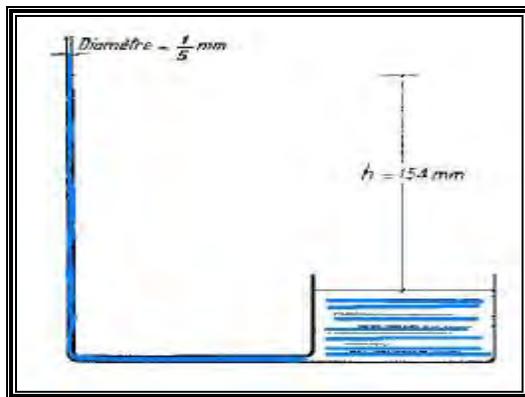


Fig.3.45 : expérience, principe de la capillarité.

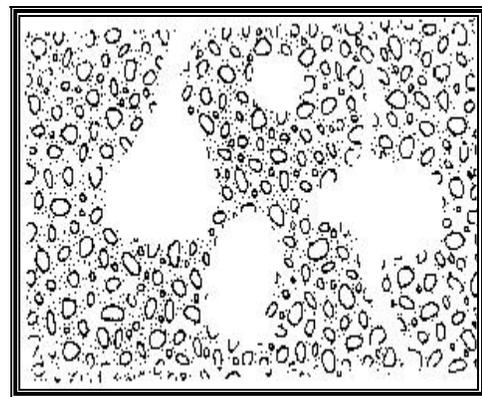


Fig.3.46 : Porométrie d'un béton

Source : Alain Roulet. C, 1987

L'expérience montre que dans un tube de 1mm de diamètre, l'eau monte de 31 mm ; si l'on réduit ce diamètre à un cinquième, elle monte de 154 mm, et ainsi de suite.

Il a été constaté que dans les vieux murs humides en brique, souvent le taux de 30 % de volume d'eau est dépassé c'est-à-dire pour un mètre cube de brique correspond 300 kg d'eau, véhiculé par la remontée capillaire.

Dans certains édifices anciens, il a été démontré que leurs murs contenaient, plus de 300 tonnes d'eau au dessus du niveau (0,00) du sol comme celui du palais Corsini, à Rome¹.

Les dommages provoqués par le phénomène de la capillarité sont les suivants :

- Ø Les décollements et les effritements de certaines pierres naturelles et des briques, dus à la pression exercée par les sels en cours de cristallisation ;
- Ø L'éclatement des matériaux au moment du gel ;
- Ø La formation d'efflorescences qui provoquent l'érosion des enduits et mortiers ;
- Ø Insalubrité des locaux causés par migration de vapeur d'eau.

On signale aussi que même les matériaux imperméables, anticapillaires et compacts finissent par être désagrégés par l'humidité (fig.3.46). Si on applique par exemple un enduit de ciment sur un mur en maçonnerie humide. Le résultat sera catastrophique, du moment qu'en bloquant la respiration ou l'évaporation l'enduit sera soumis, à cause des variations de températures, à des sollicitations vers l'extérieur qui provoqueront des boursouffures, des fissures qui permettent les infiltrations et ensuite le décollement. Ce décollement sera favorisé par de multitude de petits dépôts de sels solubles, expulsés de la maçonnerie, qui restent emprisonnés sous le nouvel enduit².

3.6 Insalubrité des locaux et conditions d'habitabilité

3.6.1 L'humidité et le comportement des matériaux de construction

Les normes techniques de constructions et d'hygiène traitent le rapport entre les matériaux et l'eau sur trois critères différents³ :

- la quantité d'eau absorbée;
- la vitesse ou la puissance d'absorption d'eau ;
- la vitesse d'évaporation ;

Ces trois critères ont fait l'objet d'expériences par plusieurs chercheurs dans le monde, et elles portent toutes sur des échantillons totalement immergés. En réalité ces expériences ne sont pas très utiles, du moment qu'un matériau posé dans une bâtisse n'est jamais entièrement immergé, accepté quelques cas particuliers, quant le niveau des fondations est inférieur à celui de la nappe phréatique ou les constructions sont implantées au bord d'une rivière ou au bord d'un étang.

Il est plutôt important, d'étudier le pouvoir d'absorption d'un matériau de construction usuel, partiellement immergé, autrement dit : la quantité d'eau absorbée par la partie du matériau qui émerge dans le liquide. De cette manière, les résultats obtenus seront similaires aux conditions réelles d'absorptions d'une construction au dessus du sol, dans lequel l'humidité s'infiltré par les fondations.

Quant aux roches alvéolaires comme le travertin par exemple, elles présentent un coefficient d'affinité nul.

En ce qui concerne le pouvoir d'évaporation et la vitesse de séchage, on ne trouve pas assez d'informations chez les hygiénistes.

¹MASSARI. G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971

² [Enligne] <http://www.travaux.com>. 2005.

³Grunau Edvard. B, *La lutte contre l'humidité dans les façades*, Éditions Eyrolles, Paris, 1970.

3.6.2 Classification des matériaux

a) Classification selon le taux d'imbibition

Le tableau ci-après (tab.3.3), nous renseigne sur le taux volumétrique d'humidité de certains matériaux lorsqu'ils sont soumis à une immersion totale.

Taux volumétrique d'humidité en (%)	Matériaux
De 0 % à 0,1 %	Les roches très compactes, le granit, le marbre de carrare et les calcaires saccharoïdes en général.
De 0,1 % à 5 %	Ces mêmes roches, mais moins compactes : le « macigno », le calcaire compact ordinaire, etc.
De 5 % à 20 %	Les grès, le calcaire demi-dur, le travertin, le mortier de ciment et de sable ; le mortier de chaux et de sable ; les briques dures et celle de parement.
De 20 % à 35 %	La molasse, le calcaire tendre, le tuf de bonne qualité, le mortier de chaux et de pouzzolane. Les briques ordinaires faites à la machine.
De 35 % à 55 %	Le tuf calcaire et le tuf volcanique, les briques faites à la main, les plâtres.

Tab.3.3 : Classification des matériaux selon le taux d'imbibition. **Source** : Grunau, 1970

L'analyse des données sus-citées, révèle que les matériaux dotés du plus haut coefficient d'imbibition, sont ceux qui possèdent une grande résistance thermique et un poids léger. Par conséquent c'est des matériaux qui conviennent le mieux dans le domaine de construction, malheureusement, ils présentent l'inconvénient de s'humidifier très rapidement.

L'humidité des matériaux peut être originelle, c'est à dire existante dans le matériau dès sa constitution dans les carrières et ce pendant des millénaires. Comme elle peut provenir lors de leur mise en œuvre.

Certaines roches conservent l'humidité pendant une longue durée lorsque les conditions lui sont favorables tels que : l'absence du soleil et le vent ou dans un climat humide.

Nous avons vu précédemment au paragraphe (§3.5.1), les dégâts que provoquent les maçonneries humides lors de leurs utilisation dans les constructions sans séchage préalable.

b) Classification selon le taux d'affinité

l'étude de l'humidité des murs doit prendre en considération, nécessairement, la capacité d'affinité c'est-à-dire la capacité que possède un matériau partiellement plongé dans l'eau de s'humidifier dans sa partie non immergée. Le tableau suivant (tab.3.4) indique le taux moyen d'humidité absorbée par la partie émergée du matériau.

Matériau	poids spécifique	pourcentages d'affinité	
		par rapport au poids de la partie émergée de l'échantillon	par rapport au volume de la partie émergée de l'échantillon
Mortier de pouzzolane.....	1,30	23,8	31
Tomette jaune sur mortier de pouzzolane adhésif.....	1,45	21,5	31,2%
Brique romaine jaune (fabriquée à la machine).....	1,55	19,6	30,4
Tuf volcanique.....	de 1,25 à 1,80	de 22 à 11,2 %	de 27,5 à 23,8%
Brique romaine rouge (fabriquée à la machine).....	1,60	15	24
Brique rouge	2	11,5	23
péperin.....	1,95	10,2	19,9
Mortier de sable siliceux.....	1,54	12,2	18,8
Mortier de ciment et de sable.....	1,75	8,4	14,7
Mortier de pouzzolane avec hydrofuge.....	1,10	13	14,3
Mortier de ciment et de sable avec hydrofuge	1,90	3,5	6,7
Travertin.....	2,55	1,1	2,8

Tab.3.4 : Taux moyens d'absorption d'eau (échantillons séchés au préalable à l'air libre et à température normale)

Source : Massari, 1971

On remarque dans le tableau précédent (3-4), les matériaux qui possèdent un important pouvoir d'affinité, sont ceux qui ont un poids spécifique plus léger comme la brique jaune, et le mortier de pouzzolane. Le mortier de ciment et de sable s'imbibe moins facilement que la brique rouge; les adjuvants hydrofuges mélangés au mortier ne lui enlèvent pas sa capacité d'affinité mais la réduire de moitié seulement.

Le tableau ci-dessous (tab.3.5) est le résultat d'expériences pratiquées sur les mêmes échantillons pour déterminer le coefficient d'affinité exprimé en gramme d'eau absorbée en moyenne en une heure par décimètre carré du matériau.

	Matériau	Poids (g)
1	Brique romaine jaune (à la machine)	29,5
2	Tomette jaune sur lit de mortier adhésif	19,7
3	Brique rouge de parement	16
4	Brique romaine rouge (à la machine)	14,5
5	Mortier de chaux et de pouzzolane	6,5
6	Mortier de chaux et de sable siliceux	7,9
7	Tuf romain volcanique dur	4,3
8	Tuf romain volcanique semi dur, rouge	3,2
9	Tuf romain volcanique tendre, jaune	5,7
10	Péperin	1
11	Mortier de ciment et de sable	0,64
12	Mortier de chaux et de pouzzolane avec hydrofuge	0,6
13	Mortier de ciment et de sable avec hydrofuge	0,1
14	Travertin	0,09

Tab.3.5 : coefficient d'affinité des matériaux. **Source** : Massari, 1970

On constate que les briques sont classées premières par rapports au mortier de ciment et de sable donc elles ont un potentiel d'absorption plus élevé. Quant au pouvoir d'absorption du mortier de chaux et de sable, il est plus rapide que celui du mortier de chaux et de pouzzolane mais moins importante. Il est à noter aussi : l'absorption dans le mortier de ciment et de sable est dix fois plus lente que dans les mortier de chaux, et de 60 à 70 fois plus lente s'il est hydrofugé.

Pour se rapprocher plus du comportement d'un mur d'immeuble face à l'humidité, il serait intéressant de combiner deux ou plusieurs matériaux et procéder à des expériences d'absorption, chose qui a été réalisée par Massari, il a choisi une brique jaune en terre cuite et un joint vertical de mortier (fig.3.47a). Il en résulte comme attendu, la différence entre les vitesses d'imbibition : la terre cuite s'imprègne beaucoup plus rapidement que le mortier, même si celui-ci adhère étroitement à la brique.

La hauteur d'affinité dans des matériaux diffère selon leur nature en raison de la structure des vaisseaux capillaires internes (diamètre). Ainsi, les matériaux tendres tel que les briques, se caractérisent par de la plus grande hauteur d'affinité, alors que, les matériaux durs comme les pierres (granit, basalte), considérés réfractaires, leurs hauteurs d'affinité est très limitées¹.

Dans sons expérience, Kettenacher², a remarqué que dans les matériaux en terre cuite, l'absorption de l'humidité se fait uniformément car tous les vaisseaux capillaires ont le même diamètre. Par contre, dans les pierres naturelles, ils ont des diamètres différents dont les plus étroits attireraient l'eau beaucoup plus haut que les autres (fig.3-47b). Ce qui explique que la couche supérieure contient moins d'eau que les couches inférieures. La quantité d'eau ainsi absorbée est inversement proportionnelle à la hauteur d'affinité

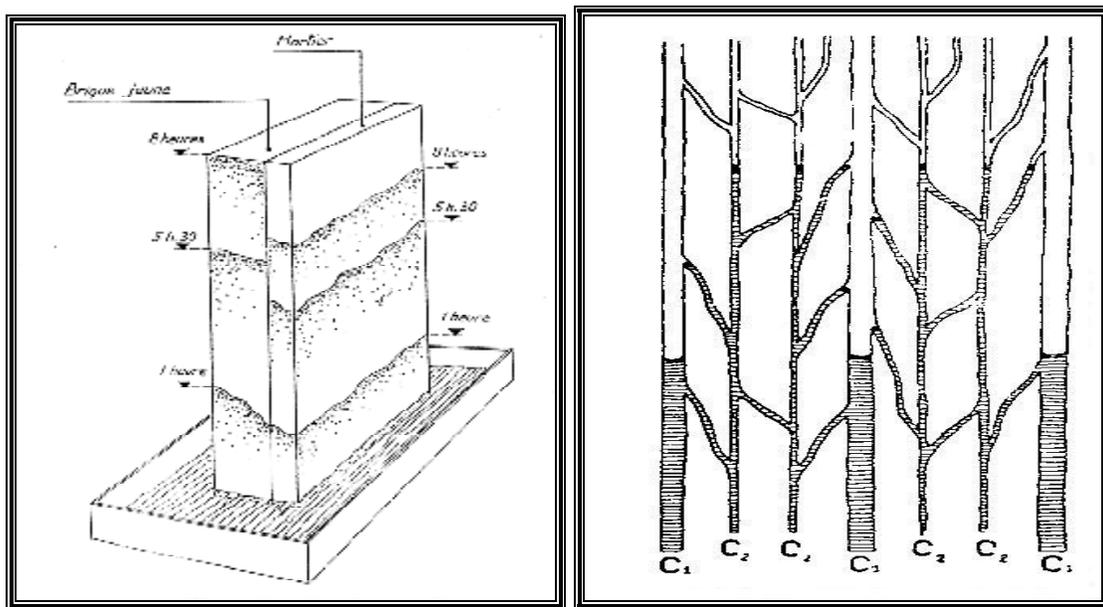


Fig. 3.47 : a) expérience d'absorption d'eau. b) hauteur d'affinité dans la pierre naturelle. **Source** : Massari, 1971.

L'uniformité des diamètres des vaisseaux capillaires, explique l'identique comportement des matériaux tendres que se soit en immersion qu'en émergence. Le contraire se produit dans les

¹ Claude-Alain Roulet, *Energétique du bâtiment I, Interactions entre le climat et le bâtiment*, presse polytechniques romandes, Lausanne, 1987. pp.51-56

² KETTENACKER, L, *l'humidité de murs*, Gesundheit-Ingenieur, 1930. p721

matériaux compacts. Cette déduction est confortée par l'expérience de J.S. Cammerer¹ (tab.3.6) qui a procédé ainsi : Il a pris plusieurs échantillons de divers matériaux, qu'il a immergé sur le un cinquième (1/5) de leur hauteur, les taux d'humidité absorbée par chaque cinquième sont les suivants :

Matériau	Poids spécifique				
	Dans l'eau (%)		Hors de l'eau (%)		
Brique normale	30,4	29,7	29,7	29,7	29,7
Grès léger	28,1	26,7	25,6	23,7	18
Brique de scories	13,9	12	9,1	5,8	5,5
Béton poreux	21,7	15,8	45,8	15	14,5

Tab.3.6 : taux humidité absorbé en émerison. Source : cammerer,

c) selon leurs taux d'humidité

Lorsque le local est atteint par l'humidité partielle, on ne doit pas prendre en considération seulement le taux maximum d'humidité dans les murs mais aussi leurs taux moyen.

Souvent, dans les constructions anciennes, on constate que, le taux le plus élevé, se situe très proche des planchers, puis diminuent progressivement vers le haut ; doit-on déclarer le local inhabitable à cause d'un taux élevé d'humidité partiel et non généralisé, même s'il est bien orienté (ensoleillé) ? Si l'on ne constate, aucune trace d'humidité, la réponse est non !

Dans ce cas, les experts admettent un taux moyen qui doit être inférieure ou égale à la limite maximale tolérée par les hygiénistes.

Comme nous allons le voir, chaque type de matériau possède une humidité résiduelle prouvée, scientifiquement et expérimentalement, qu'elle est inoffensive.

À cet effet, les hygiénistes ont mis une règle générale pour déterminer le taux hygiéniquement tolérable, dans n'importe qu'elle matériau en construction mis en œuvre, en ajoutant 2% à l'humidité spécifique du matériau en question, de dimension d'une brique, asséché à l'air libre mais à l'abris des intempéries. Le tableau suivant (tab.3.7), montre les taux d'humidité maxima pouvant être normalement contenues dans les murs de locaux habitables et les taux au-delà desquels les locaux deviennent véritablement insalubre et donc inhabitables.

Type de maçonnerie	Parfaitement sèche (hum. originelle)	Sèche du point de vue hygiénique	Humidité hygiéniquement tolérable dans certains cas	Humide	Très humide
En brique ordinaires.	1%	jusqu'à 3%	jusqu'à 4%	De 3 à 9%	Plus de 9%
En pierres légères et absorbante (p.s. < 1,9)	jusqu'à 4%	jusqu'à 6%	jusqu'à 7%	De 6 à 15%	Plus de 15%
En tout autre matériau naturel	L'humidité originelle se calcule d'après le séchage à l'air libre.	L'humidité originelle majorée d'une valeur pouvant atteindre 2%	L'humidité originelle majorée d'une valeur pouvant atteindre 3%		

Tab.3.7 : Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité calculé d'après le taux pondéral d'humidité. Source : Massari, 1971

¹ Cammerer I-S. Capacité d'évaporation des différents enduits, l'humidité des murs dans les immeubles d'habitation, les étables et les entrepôts frigorifiques, Gesundheits-Ingenieur, 1944.

d) Selon leurs résistances thermiques

Rappelons que, l'insuffisance de la résistance thermique peut provoquer l'apparition de l'humidité de condensation à cause du refroidissement de l'air, sans pour autant que le taux de l'eau contenu dans les murs extérieurs ne dépassent les limites requises.

Le tableau suivant (tab.3.8) montre une classification des murs, selon protection thermique qu'elle assure dans deux climats méditerranéens, où la température soit, elle est inférieure à quatre soit elle est supérieure à quatre. Les valeurs se rapportent aux trois surfaces susceptible de provoquer une perte de chaleur : le mur, le plancher et la couverture.

Remarque : on ne doit pas être toujours être transigeant, lors de notre jugement sur la protection, « suffisante » ou « insuffisante » surtout lorsque le local ne présente aucune trace d'humidité, en aucune saison, on doit considérer le local comme habitable, même si, d'après, le tableau, quelques partie de maçonnerie présente une protection thermique dite insuffisante. En revanche, si les signes d'humidité sont évidents, les indications du tableau deviennent décisives.

Type de maçonnerie	Epaisseur en m	Résistance thermique total R=1/K	Protection thermique	
			Température moyenne de janvier T < 4°	T > 4°
Mur en brique pleines ordinaires ($\lambda=0,67$).....	0,55	1	Suffisante toléré.	excellente
	0,50	0,90	Dans certain cas.	excellente
	0,45 0,42		insuffisante Insuffisante	suffisante suffisante
2. Mur en matériaux lourds (p.s.de 2,5 à 3) : gneiss, basalte, marbre, calcaire dur.....	0,75	0,46	mauvaise	mauvaise
3. Mur en grès calcaire tendre, pierres de taille (p.s. de 1,8 à 2,2)...	0,75 0,60	0,82 0,70	insuffisante insuffisante	suffisante insuffisante
4. Mur en tuf léger (p.s. 1,4 ou 1,6).	0,65	1,28	suffisante	excellente
	0,60	1,18	suffisante	excellente
	0,50	1	suffisante	excellente

Tab. 3.8 : Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité, calculé d'après leur résistance thermique.

L'inconvénient du béton armé malgré les progrès grandioses accomplis par sa technique, n'ont pas été suivis de progrès analogues dans le domaine de l'hygiène¹. En effet, les ouvrages de maçonnerie destinés à parachever l'armature sont loin d'assurer le minimum requis de protection thermique. Les éléments les plus exposés à la condensation dans les constructions en B.A sont :

- Ø les colonnes de béton, surtout les colonnes d'angles ;
- Ø les parois minces (excessivement) des cours intérieures et des structures en saillie ;
- Ø les couvertures ;
- Ø les parois en béton armé adossées au terrain ;

¹ Hernot.D et Porcher.G, *thermique appliquée aux bâtiment*, les éditions parisiennes CFP, Paris,1984,pp95- 117.

- Ø les caissons de stores ;
- Ø les appuis des fenêtres ;
- Ø les semelles de béton hautes et minces ;
- Ø les parois d'escaliers, coulées en béton par mesure de sécurité contre les incendies ;
- Ø le premier plancher des structures en saillie ;

3.6.3 Séchage des matériaux

Dans une atmosphère confinée où l'humidité relative est de 70 %, Cardières¹, a établie le temps nécessaire à la dessiccation de matériaux divers, voici, les valeurs de leurs coefficients dont-ils sont proportionnels :

Brique.....	0,28	Béton cellulaire.....	1,20
Pierre calcaire.....	1,20	Mortier de ciment.....	2,50
Béton de ciment (250 kg).....	1,60	Mortier de chaux.....	0,25
Béton bims.....	1,40	Liège.....	0,14

Si l'on veut savoir, sommairement et à titre indicatif, le nombre de jours nécessaire au séchage d'un matériau : on multiplie le coefficient correspondant par le carré de l'épaisseur du mur exprimé en centimètre. Ainsi, un mur en pierre de 80 cm d'épaisseur, pour qu'il soit parfaitement sec, il faut compter : $1,2 \times 80^2 = 7680$ jours ; soit : 256 mois ou 21 ans.

Un mur en brique de 30 cm :

$$0,28 \times 30^2 = 252,0 \text{ jours, soit : } \mathbf{7 \text{ mois.}}$$

D'où l'on constate que, la différence du temps de séchage est très importante entre les matériaux, ceci, est dû essentiellement à leur structure interne, et par conséquent leur capacité de conductibilité capillaire.

En général, on peut subdiviser les matériaux en deux catégories :

- ceux qui possèdent une bonne conductibilité capillaire comme la brique, liège, le mortier de chaux (sèchent rapidement)
- ceux, caractérisés par une mauvaise conductibilité capillaire, (sèchent en surface mais reste imbibé d'eau dans la masse pendant plusieurs années), comme la pierre calcaire, le béton de ciment...etc.

Les schémas suivants (fig.3.48), nous montrent, le comportement différent de deux catégories de matériaux :

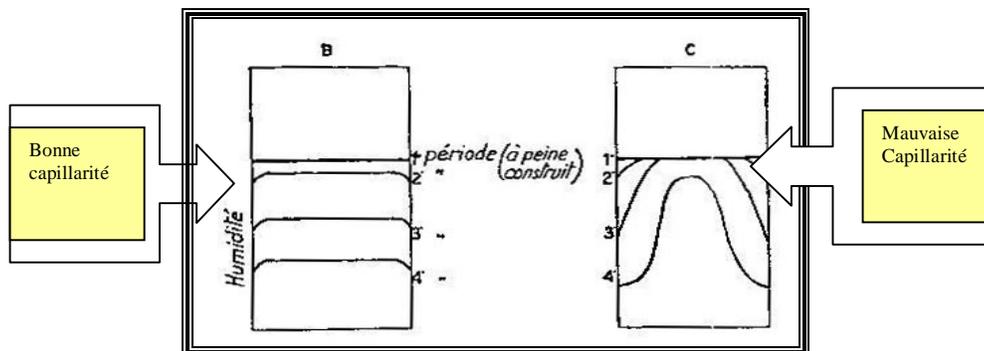


Fig. 3. 48 : Comportement différent dans le séchage des matériaux. Source : Grunau. E.B,1970.

¹ Cardières R, *isolation et protection des bâtiments*, Eyrolles, Paris, 1954.

On remarque donc que, les matériaux en quatrième phase, présentent des quantités d'eau très différentes :

Le mur en brique est en dernière phase de séchage, son taux d'humidité est illustré par une ligne horizontale et uniforme, donc, il est entièrement sec, alors que, le mur en pierre, seule sa surface est sec.

Dans les locaux construits par le second type de murs, il apparaît très tôt, des taches et des moisissures abondantes dues à la condensation, phénomène qui retardera d'avantage l'assèchement définitif.

Les murs intérieurs à grande inertie, récemment construits, sèchent beaucoup moins vite que les murs extérieurs, à cause de l'insuffisance d'aération. À cet effet, les hygiénistes doivent en tenir compte lors des expertises.

Dans la pratique et afin que le séchage arrive à terme, il faut :

- favoriser la ventilation
- ne pas utiliser l'anhydride carbonique pour accélérer la prise du mortier (inefficace) ;
- s'attarder pour plusieurs mois avant de poser l'enduit sur les parois ;
- le recours à l'utilisation du chauffage artificiel accentue le phénomène tels que les boursoufflures, les taches et les décollements affectant les peintures, les vernis ou les plastiques appliqué avant que l'assèchement des murs ne soit parfait. Ces inconvénients sont dus à la présence de petites efflorescence invisible qui se forment sous la peinture ou l'enduit décoratif (poussés aux quelles le mur continu à expulser aussi longtemps qu'il contient de l'eau pour les véhiculer).

3.6.4 Évaporation des matériaux humides

L'humidité de remontée capillaire qui envahit un bâtiment fini par se stabiliser à une certaine hauteur, sous l'effet de la ventilation, l'ensoleillement ou autre phénomène ; on dit alors qu'il se réalise un certain équilibre interne entre la quantité d'eau provenant du sous-sol et celle qui s'évapore des parois exposées à l'air.

Malheureusement, à ce jour on ne connaît pas les coefficients réels d'évaporation superficielle des différents matériaux de constructions pour déterminer l'aération suffisante afin d'abaisser le taux d'humidité et rétablir ainsi l'état de salubrité des locaux. À ce propos, tous les calculs sont imprécis parce qu'on ne pourrait pas tenir compte de l'extrême variabilité des conditions climatiques extérieures.

Néanmoins des expériences pratiques ont été effectuées sur des échantillons de la dimension d'une brique, dans le but de déterminer la quantité approximative de l'évaporation totale. La méthode est simple, il suffit de déposer le récipient qui contient l'échantillon sur une balance, et mesurer ensuite la perte de poids provoquée par l'évaporation superficielle du matériau, qui continue à absorber de l'eau par la base¹. Sachant que ces expériences sont passés sous les conditions climatiques suivantes :

- Températures : de 13 à 26 °C
- Humidité : de 63 à 85°C
- Vitesse de l'air : 2 m/s ; 0 m/s ; confiné
- Durée : plusieurs mois

Les résultats sont enregistrés sur le tableau (3.9) :

¹ Massari Gi, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles, Paris, 1971.

Matériau	Perte de poids dû à l'évaporation en (g/dm ² /h)		
	Quand l'air est confiné	Quand l'air est en mouvement (2 m/s)	Quand l'air est immobile, et en cas d'insolation
Brique romaine jaune	1	3,25	1,75
Brique romaine rouge	1,15	5,85	2,72
Tuf volcanique tendre, jaune	0,75	4,80	1,90
Mortier de chaux et de	0,90	3,20	2,85
Mortier de ciment et de	0,37	1,25	2,1

Tab.3.9 : perte de poids provoquée par l'évaporation superficielle des matériaux. **Source** : Massari, 1971.

La lecture du tableau précédent permet de révéler que l'évaporation totale augmente de 2 à 3 fois sous l'action du soleil alors qu'elle est de 3 à 5 fois sous l'action du vent.

Dans les conditions d'un air confiné, la différence du taux d'évaporation est presque négligeable entre les quatre premiers matériaux saturés (les différentes briques, le tuf et le mortier de chaux).

On remarque aussi que les valeurs trouvées sont beaucoup plus supérieures à ceux qu'on devrait trouver réellement dans un bâtiment existant. Par exemple le pouvoir d'évaporation d'une brique romaine jaune est de 1 g/dm² / h, soit 100g/m² /h, cependant, dans la pratique, les taux moyens d'évaporation de murs ou de planchers ordinaires humides varient entre 4 et 10g/m² /h. l'expertise de Massari, effectuée au dépôt provisoire de livres de l'Institut d'archéologie de la Lungara a montré que le pavement, produit en moyenne, une évaporation de 1g/m² /h environ dans des condition moyennes et normales d'humidité de l'air.

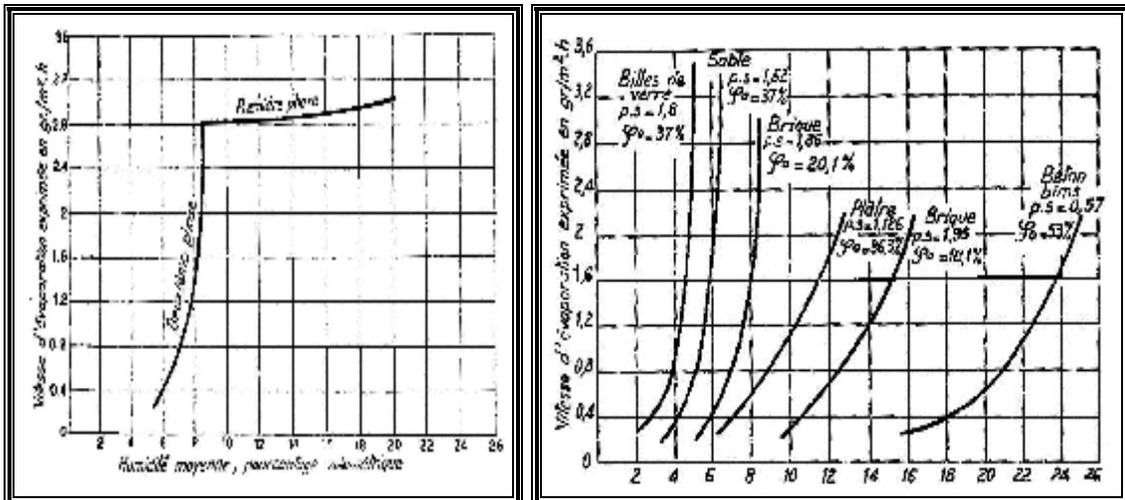
L'assèchement des matériaux reste un domaine non encore exploré à fond, parmi les chercheurs qui s'y intéressé, on peut citer : KrÖll, Krischer et GÖrling¹, leurs travaux ont contribuer à résoudre le problème de l'assainissement des constructions, voici, brièvement les conclusions de leurs recherches :

L'assèchement d'un matériau humide soumis à une forte évaporation se présente sous deux phases :

- une première phase d'évaporation quasi constante ;
- une deuxième phase où l'évaporation est en chute libre.

La première est accompagnée d'une diminution progressive de la masse d'eau qui imbibe le matériau, la seconde débute à un certain point appelé « point d'inflexion » au moment où le taux d'humidité devient inférieur à un certain niveau (fig.3.49a); pendant cette période, la dessiccation s'accomplit avec une grande rapidité.

¹ Krischer O et GÖrling P, *expérience de dessiccation des matériaux poreux et leur explication*, V.D.I, Zeitschrift, 1939.



a) les deux phases d'évaporation pour l'assèchement. b) comparaison de la deuxième phase des différents matériaux

Fig. 3.49 : diagramme de séchage des matériaux. **Source** : Massari, 1971

La lecture du diagramme, nous permet de constater que, la première phase est presque horizontale et que l'évaporation tourne autour de 2,9 g, alors que le taux d'humidité intérieure ne cesse de diminuer.

Cette nette distinction entre la première phase et la deuxième phase peut s'expliquer ainsi :

- Ø phase I : l'évaporation dépend du taux de saturation de l'air uniquement, ce phénomène est similaire à celui d'un étang dont la vitesse d'évaporation dépend seulement de la capacité d'absorption de l'air.
- Ø Phase II : au cours de cette phase, la zone du matériau non encore saturée, continue à être alimenté par l'humidité issue de masse du matériau lui-même, de façon très lente, parce que la quantité a déjà trop diminué lors de la première phase ; c'est alors qu'interviennent les propriétés de conductibilité capillaire de chaque matériau, facteur principal et déterminant de la vitesse d'évaporation.

Par conséquent, on peut se permettre de dire que, l'effet négatif de l'évaporation sur le comportement du mur ou sur le confort des usagers, est beaucoup plus prononcé pendant la première phase à cause du taux élevé et constant de l'évaporation superficielle.

En revanche, lors de la deuxième phase, l'évaporation diminue très rapidement. La figure (3.49b), montre les conclusions du travail consacré à la deuxième phase (séchage), établi par Krischer et GÖrling. On constate que la courbe est d'autant plus verticale que le matériau est plus homogène. Les plus verticales sont les billes de verre et le sable.

Il semble qu'on peut affirmer que, les matériaux dotés d'une structure grains fin et homogène, leur première phase sera plus longue par rapport aux matériaux hétérogène et incohérent. Tandis que, leur deuxième phase est beaucoup plus courte et brusque.

En d'autres terme, un mur en brique de première qualité et rejointoyé avec un mortier tamisé, continue à dégager une énorme quantité de vapeur d'eau, même si celle-ci diminue progressivement, jusqu'à arriver à un taux minimum (6 à 8%), à ce moment débutera la deuxième phase, pendant laquelle l'évaporation diminuera très rapidement et on arrivera à l'assèchement du matériau en un laps de temps très court.

Cependant, dans un matériau hétérogène comme le tuf, rejointoyé avec un mortier épais et non tamisé, la première phase d'évaporation est brève et constante. L'évaporation de la seconde est lente et débutera lorsque le taux est encore très élevé de l'ordre de 15 à 20 %.

De ce qui précède, et en ce qui concerne l'humidité des murs et ses dommages, il en ressort, que les murs en brique sont donc beaucoup plus insalubres que les murs en pierres en général, ceci est dû essentiellement à l'évaporation abondante de l'eau renfermée dans la masse du matériau même si son taux est faible ; alors que dans les pierres légères, l'humidité est gardée dans la masse du matériau.

Les expériences accomplies par Building research Board (1929) ont confirmé le fait, que les matériaux hétérogènes, dont la surface est saturée, produisent une évaporation totale identique.

Ce résultat, est très intéressant et très utile surtout lors de l'établissement d'un diagnostic. Il est impératif que ce dernier doit préciser la position de l'état de la phase d'évaporation, car s'il s'agit de la première, qui est la plus dangereuse d'ailleurs, l'intervenant saura de quelle solution adaptera-t-il ?

Prenons l'exemple, de la brique (matériau couramment utilisé), caractérisé par un point de flexion, de l'ordre de 8%, si l'intervenant réduit ce taux, seulement à 15%, l'évaporation superficielle, resterait à peu près la même, d'où l'utilité et l'obligation d'abaisser le taux jusqu'à 8%, pour constater réellement, la diminution de l'évaporation et puis arriver à son élimination c'est à dire la dessiccation.

D'après, les expériences de plusieurs chercheurs, dont Krischer et GÖrling, le passage de la phase I à la phase II, nécessite que le taux pondéral ne dépassera pas certains seuils, en voici, quelques exemples :

- Brique légère ordinaire5%
- Pierres – Tuf -14%
- Plâtre..... 9,5 %

En d'autres termes, sous l'effet du vent et de la chaleur, l'évaporation superficielle, ne commencera pas, si le taux d'humidité de chacun de ces matériaux, ne descendra pas en dessous des valeurs indiquées ci-dessus.

Ces valeurs, indiquent seulement, le taux d'humidité d'un seul matériau et non un ensemble. Par conséquent, un assainissement efficace des maçonneries humides, nécessite obligatoirement la connaissance du point de flexion de chaque type de mur, recouvert d'enduits intérieur et extérieur, qui marque le seuil, à partir duquel le travail déshumidification peut être entrepris.

3.6.5 Seuil d'insalubrité de l'humidité de l'air

Autrefois, dans les années soixante, lorsque la température effective, c'est-à-dire : la température que notre corps ressent vraiment et non celle que marque le thermomètre, on fixait le taux de l'humidité hygiéniquement tolérable à 70 % approximativement. Mais, depuis quelques années déjà, on critiquait ce seuil, qui semble être en inadéquation avec toutes les conditions de température et de chauffage.

D'après G. Massari (déjà cité), le seuil de l'humidité peut être fixé, après avoir procédé à une comparaison entre deux volumes d'air confinés de deux locaux, dont l'un est suspecté humide et l'autre considéré sec, appelé « local-témoin ».

Le local témoin peut être choisi parmi les étages supérieurs car, généralement, sont exempt d'humidité par rapport à ceux du rez-de-chaussée.

Dans le local considéré humide, à température égale, l'humidité relative de l'air qu'il contient dépasse d'au moins cinq points celle du « local-témoin ».

À ce sujet, on peut se permettre de conclure que l'examen de l'air n'est jamais suffisant pour émettre un verdict sur l'habitabilité d'un local, il faut en outre, vérifier si, la maçonnerie aussi est humide ou qu'elle est sujette à des déficiences en matière de protection thermique contre le refroidissement.

3.6.6 Taux maximum tolérable des murs

Les hygiénistes estiment qu'un mur doit être sec afin d'éviter le problème de l'évaporation et au même temps assurer une bonne résistance thermique.

La distribution de l'humidité dans un mur n'est jamais uniforme (fig.3.50), confirmé par des prélèvements, faites par des chercheurs italiens, qui ont constaté ce qui suit :

1. dans les murs à humidité élevée (25%), le matériau et le mortier de liaisonnement ont un taux d'humidité identique ;
2. dans les murs moyennement humides, ces taux sont légèrement différents.
3. dans les murs sans enduits, peu humides et soumis à une forte ventilation, la brique apparaît presque sèche, alors que le mortier contient encore une bonne quantité d'humidité.

Quant le mortier de liaisonnement est à base de sable et de chaux, la différence de comportement entre maçonnerie en brique et le mortier est insignifiante, à moins qu'il s'agisse d'une brique de parement à poids spécifique élevé.

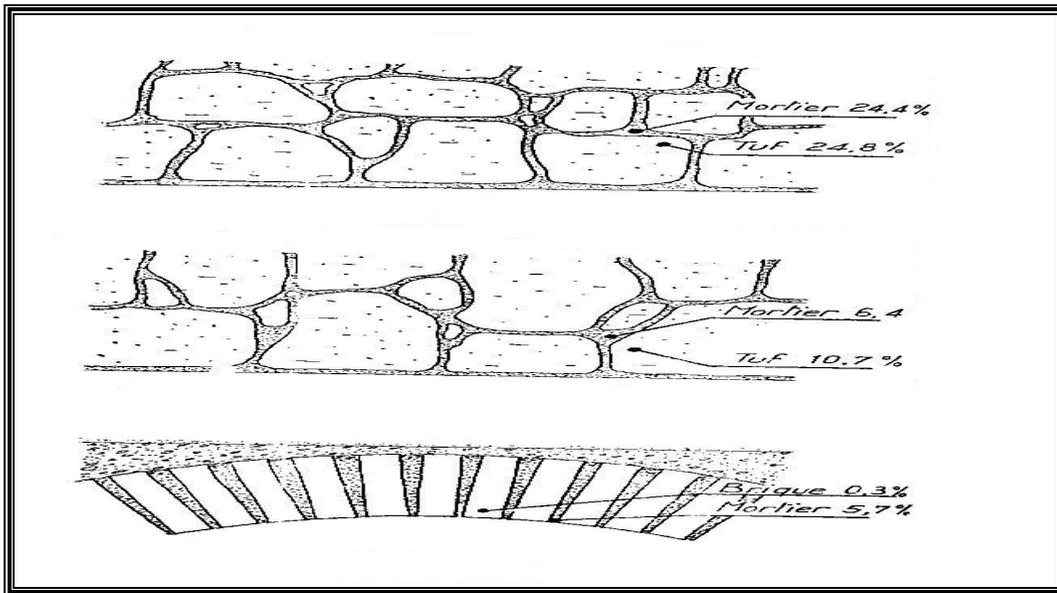


Fig.3.50 : Différence de taux d'humidité entre le matériau et son mortier de liaisonnement dans un mur humide

Source : Grunau, 1970

Par conséquent, la capacité d'absorption d'un mur est celle de la maçonnerie avec laquelle est construit et non celle du mortier de liaisonnement.

Ainsi, les experts en la matière recommandent, que l'échantillon, objet d'analyse, doit contenir une plus grande partie de la maçonnerie.

Tursini (1891), à Naples (Italie), a remarqué que les murs en tuf jaune de bâtiments anciens contenaient 7 à 8 %, sans qu'il y ait des traces d'humidité ni aucun dommages ; de même à pausilippe, le tuf blanc en contient 6,2%, et le tuf volcanique rougeâtre 5,98%.

Quant à cammerer¹, il a procédé à des analyses des matériaux après séchage, il a obtenu les résultats suivants relatives à l'humidité résiduelle par rapport au volume :

Brique.....de 0,1 à 0,7 % ;
Grès.....de 5 à 7 % ;
Brique de scorie.....environ 4 % ;
Ciment spongieux.....de 3 à 6 % .

Cette humidité résiduelle que contient les matériaux naturelles qui constituent les murs, ne présentent aucun danger, soit : puisqu'elle est prisonnière, soit : parce qu'elle s'évapore avec une lenteur extrême, seulement son inconvénient est de diminuer la résistance thermique du matériau².

Les recherches effectuées par Massari, dans divers villes en Italie, sur les maçonneries des locaux humides ou secs, de bâtiments nouveaux ou séculaires, affirment que les murs les plus sains même s'ils sont bien exposés au soleil et au vent, contiennent encore de 0,5 à 2 % d'humidité s'ils sont en briques et environ 3% s'ils sont en tuf et peuvent s'élever sans danger pour l'hygiène des habitants, respectivement jusqu'à 3 et 7%.

Il a été constaté aussi que, dans les constructions datant d'une dizaine d'années, maintiennent un taux élevé d'humidité (6 – 9 %) et ce même aux étages supérieurs, qui sont pourtant bien aérés.

En conclusion et au vue des hygiénistes, un mur en maçonnerie est considéré comme sain, lorsque son taux d'humidité maximale en fonction de son poids spécifique est estimé à :

- Ø 3 %, dans les briques ordinaires
- Ø 6 à 7 %, dans les tufs, grès, ou toute autre pierre légère très absorbante, ayant un poids spécifique inférieur à 1,9.

3.7 Jugement d'habitabilité

a) Impacte d'une paroi humide sur l'air ambiant intérieur

L'insalubrité d'un local peut provenir de trois facteurs physiques :

- Diffusion de la vapeur d'eau, de la paroi à l'air intérieur ;
- Refroidissement de la paroi sous l'action de l'évaporation superficielle;
- Chute de la résistance thermique des murs extérieurs, imbibés d'eau.

On peut trouver ces trois critères réunis, et au plus haut degré dans les murs en briques et de mortier de sable, qui sont très dangereux du point de vue de la salubrité. Par contre dans la maçonnerie en pierre, les deux premiers facteurs sont beaucoup moins prononcés, alors que le troisième, c'est-à-dire : la perte de chaleur à travers la paroi, reste considérable.

L'évaporation superficielle des maisons malsaines, affecte immédiatement les habitants, surtout durant l'hiver, parmi ses effets : les maladies pulmonaires et rhumatismales.

Kettenacker, a procédé à des expériences très intéressantes, relatives au passage de l'eau par évaporation, du mur à l'air renfermé du local. Son objectif, était d'arriver à savoir à quelle distance, se fait sentir l'action d'évaporation superficielle. Les résultats de ces expériences sont

¹ Cammerer I-S. Capacité d'évaporation des différents enduits, l'humidité des murs dans les immeubles d'habitation, les étables et les entrepôts frigorifiques, Gesundheits-Ingenieur, p.31, 1944.

² [Enligne] <http://www.irc.com>. 2005.

illustrés sur les deux graphes suivants (fig.3.51 & 3.52). Elles sont effectuées sur des échantillons d'humidité pondérale différentes, respectivement, 17 % (très humide) et 4,5 (humide).

La lecture des données des deux graphes (fig3.51 et 3.52), nous indique deux points très essentiels :

- L'air renfermé se sature dans la couche immédiatement en contact avec le mur, quelle que soit la quantité d'eau qu'il contient ;
- L'influence néfaste directe de la paroi sur l'air cesse à une distance de 6 à 8 centimètres.

La première leçon surprenante qu'on peut tirer, à première vue, c'est que : tous les murs en maçonnerie humides, sont dangereux du point de vue hygiénique, et ce, quelque soit leur nature ou leur taux d'humidité, parce que dans les conditions d'air confiné, l'évaporation superficielle engendre la saturation de la couche d'air en contact avec leurs surfaces intérieures.

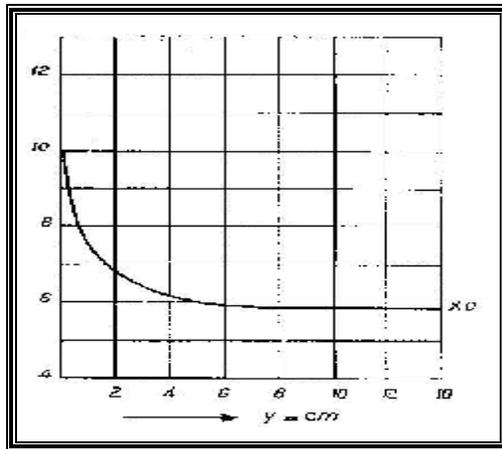


Fig. 3.51 : Paroi très humide : 17%.

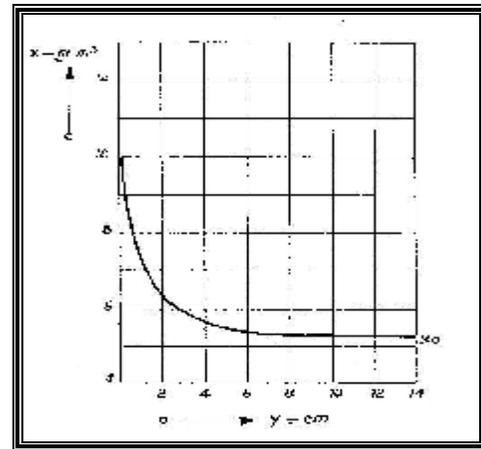


Fig. 3.52 : Paroi moins humide : 4,5 %.

Source : www.irc.com irc, 2004

Cette situation provoque en général, en absence de ventilation, l'apparition de moisissures dans les locaux, considérés comme secs, c'est-à-dire : là où l'on ne constate pas des traces d'humidité.

Il serait évident, de trouver des objets en matière organique (livres, valises, derrière un tableau ou à l'intérieur des armoires), recouverts de moisissures s'ils sont rangés à une distance inférieure à 8 cm des murs.

Donc, si le local n'est pas aéré, la moindre humidité contenue dans le mur produira, au bout d'un certain temps, des effets aussi néfaste qu'une quantité d'humidité considérable. À cet effet, et pour assainir un local, on doit veiller à ce que la ventilation doit affleurer continuellement la surface d'évaporation et qu'il n'y ait pas de stagnation dans les angles mort.

b) Ancienne formulation de Scala.

Bien que cette formulation aujourd'hui, est dépassée, ses recommandations méritent d'être citées en raison du haut sens des responsabilité dont elle témoignent : « on peut considérer qu'un local à habiter ou habité est humide lorsque l'humidité relative de l'air intérieur est supérieure à 70% ou constamment supérieure à l'humidité relative de l'air extérieur en contact avec le local, pour autant que la différence de température ne soit pas très grande, ou bien lorsque l'humidité des murs est supérieure à 3%. Les chercheurs sont, en effet, très loin d'être unanime en cette matière.

Son inconvénient est d'avoir, ignorer le phénomène de l'humidité de condensation, dû essentiellement à la déficience de la protection thermique à cause de l'insuffisance de l'épaisseur des maçonneries sèches. On rencontre fréquemment ce problème, dans les constructions en béton armé, pendant l'hiver, dans les pays froids comme l'Amérique et l'Europe, et ce même dans les maisons modernes bien chauffé, tant riche que pauvre.

c) Nouvelle formulation de Massari et Talenti

Cette nouvelle formulation du critère d'habitabilité consiste à vérifier les trois points suivants :

- le type et l'intensité des manifestations extérieures d'humidité : taches, moisissures, érosions, efflorescences, détériorations de meubles et de marchandises ;
- l'air : en observant si l'humidité relative de l'air confiné depuis six heures dans un local hermétiquement fermé dépasse ou non de cinq points au moins l'humidité relative de l'air du local-témoin ;
- le mur : en vérifiant, d'une part, si le taux d'humidité des échantillons dépasse ou non la limite toléré par l'hygiène, dans le cas du matériau employé dans le mur, et, d'autre part, dans l'éventualité d'un mur sec, si sa protection thermique est suffisante.
- Si, la paroi contient une proportion d'eau supérieure à la limite admise, dans ce cas, le local est inhabitable, par exemple : elle dépasse 3% dans les murs en brique ou 6% dans les tufs.
- Si, la paroi est sèche, mais quelques signes sont apparents tel que : moisissures, érosions, efflorescences, détériorations diverses, dans ce cas le local est habitable, à condition qu'il n'existe pas de défaut de constructions réduisant la protection thermique.
- Si, le mur est sec et présente des signes courants d'humidité ; en outre, en raison d'un défaut de constructions réduisant la protection thermique par rapport au climat de l'endroit : dans ce cas, le local est inhabitable.

Rappelons que, la valeur « R » de la résistance thermique totale, se calcule par « m2 » dans tous les murs du local selon la formule :

$$R=1/k \text{ [m2.h.}^\circ\text{C/cal]} \dots\dots\dots (1)$$

Avec, K: coefficient de déperdition thermique en cal/ m2.h. °C

Dans le cas de Constantine, où la température en janvier peut être inférieure à 4°C, il suffit que « R » d'un seul mur, soit inférieure à 1 pour que la protection doit être déclarée insuffisante. Cette valeur descend à 0,8 lorsque la température est supérieure à 4°C.

Les spécialistes admettent, à titre exceptionnel, un écart de 10% de la valeur de « R », dans les endroits ensoleillés et protégé du vent, c'est-à-dire : sont considérés comme suffisants, les résistances atteignant respectivement 0,9 et 0,72 [m2.h.°C/cal]

Ainsi, la déficience de la protection thermique, explique parfois, pourquoi l'humidité apparaisse –t-elle au printemps et l'été ; phénomène, souvent mal compris, du fait que les murs présentent les symptômes d'humidité, alors que leurs taux ne dépassent pas, à l'analyse, les limites maximales admises. Dans ce cas l'humidité ne parvient pas des murs, mais plutôt de l'air qui se refroidit en contact avec les parois, à cause de l'insuffisance de la protection thermique de celles-ci. Cette déficience a probablement pour cause :

- Ø Épaisseurs des murs insuffisantes ;
- Ø Poids spécifique des matériaux élevé ;
- Ø Infiltration d'eau dans les matériaux ;
- Ø Vétusté des immeubles, engendre les déperditions.

Et a pour conséquence, la condensation et souvent la saturation de l'air, source d'odeurs désagréables (moiteurs).

Tizzano¹ a dit : « dans un local à parois froides, la température de l'air peut être un critère de confort absolument faux. »

En effet, le confort est un état de sensation subjective, du chaud et du froid, il dépend de plusieurs facteurs :

- Ø Température de l'air ;
- Ø Humidité relative ;
- Ø Vitesse de l'air ;
- Ø Température surfacique des murs qui entour l'individu, si elle est différente de la température de l'air.

L'homme peut sentir physiquement, épidermiquement le froid des murs, même dans une atmosphère douce. L'importance d'un tel facteur de froid, pour déterminer la température résultante éprouvée par nous, est évidente, si l'on considère la manière dont se répartit la chaleur émise par le corps humain. Dans une ambiance moyenne :HR=50% et T= 17,5°C , les 2700 calories, un adulte légèrement vêtu dégage :

- Ø 30 % par conduction (en fonction de la température et de HR) ;
- Ø 21 % par évaporation (en fonction de HR et de la vitesse de la ventilation) ;
- Ø 43 % par radiation (phénomène dépendant uniquement de l'écart de température existant entre la peau et les surfaces environnantes : plancher, parois et plafond) ;

Cet échange thermique entre le corps humain et son environnement, révèle l'énorme influence des parois sur la sensation de confort ou d'inconfort des individus.

On peut conclure que, le jugement d'habitabilité doit être fondé sur l'examen des maçonneries, l'examen de l'air n'a qu'une importance tout à fait secondaire.

¹ Tizzano A, *Su alcune esigenze igieniche delle abitazioni*, Documenti di architettura e industria edilizia, n°6, Rome, 1951.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de montrer comment l'humidité peut avoir des effets négatives sur le confort de l'individu à l'intérieur de sa maison, et à quel point elle peut affecter sa santé, et puis les dommages qu'elle peut causer à la construction.

Ce faisant, nous avons dû nous rendre compte que l'humidité, quelque soit son origine a des effets sur :

- Ø la résistance thermique des murs engendrant ainsi le refroidissement de toute la pièce.
- Ø les variations dimensionnelle des matériaux qui se manifestent par : retrait, gonflement et dilatation causant ainsi des fissures.
- Ø la résistance mécanique des matériaux, tel : le fluage, éclatement des revêtements, action du gel, etc.
- Ø les interactions physico-chimiques des matériaux poreux comme la corrosion (acier), sels minéraux (terre cuite), hydrolyse
- Ø le développement biologique, tels que : moisissures, champignons, micro-organismes.
- Ø l'insalubrité des locaux, l'esthétique des parois et même les défauts de fonctionnement des équipements surtout les installations utilisant l'énergie électrique.
- Ø les maladies : allergies, rhumatisme, cancers.

Ces effets auront donc un impact sur l'économie : d'une part, des dépenses d'énergie supplémentaires en chauffage pour compenser les déperditions thermiques à travers les parois et les isolants affectés par l'humidité, d'autre parts, les dommages et la pathologie qui engendrent des coûts pour la réparation des ouvrages et les charges des missions d'expertises.

Par conséquent, La pathologie et les désordres liés à l'humidité sont important en nombre d'intervention et en coût, elle justifie ainsi l'intérêt qu'il y a lieu d'accorder aux recherches dans ce domaine.

La lutte contre l'humidité est l'un des principaux soucis des architectes, nous envisageons donc, de traiter certains cas, dans le chapitre suivant : réhabilitation où nous présenterons quelques remèdes efficaces contre toutes les formes de l'humidité.

CHAPITRE 4 : REHABILITATION

4.1 Introduction

La réhabilitation est une pratique architecturale apparue à la fin des années 1960, en réaction contre les démolitions volontaires et massives des quartiers dans le cadre des opérations de rénovation, effectuées en Europe et surtout en France, après la guerre mondiale.

En effet, la réhabilitation apparaît aujourd'hui, comme l'adversaire principal et l'ennemi de la rénovation. Elle vient désormais concurrencer avec acuité l'anéantissement des centres urbains et propose le retour vers l'essence du lieu et de la société.

La signification originelle du verbe « réhabiliter », d'après le nouveau petit robert (2005), est de rétablir dans un état, dans des droits, des privilèges perdus ». Il s'agit, donc d'un retour à un état initial, préjugé « meilleur » d'une personne ayant subi un dommage moral¹ (tel un détenu par exemple).

C'est ainsi que par métonymie, il a été parvenu à procéder de transférer cette appellation à la remise en état d'un patrimoine architectural et urbain longtemps délaissé, grâce à une revalorisation architecturale, sociale et économique, tout en apportant les commodités nécessaires pour une vie confortable. A.Bourdin (1988), note que la réhabilitation tente de restructurer l'ensemble du bâtiment pour en permettre une utilisation différente, en s'attachant au gros œuvre afin de le sauver ou de conforter son état général, en privilégiant le second œuvre pour améliorer l'habitabilité ou le confort, et en s'intéressant à l'environnement afin de réintégrer l'immeuble, la cité dans un ensemble plus vaste : rue, quartier, ville².

Bien que souvent, considérée comme l'équivalent de l'amélioration de l'habitat, la réhabilitation est à vrai dire beaucoup plus vaste et globale. Elle touche à la fois, le bâti et son environnement, les équipements collectifs et la vie sociale dans son ensemble.

Ce n'est que récemment (dans les années 70), que le terme, réhabilitation prend alors progressivement le sens que nous lui connaissons aujourd'hui et qui consiste à rendre apte l'habitat, le quartier, à remplir les fonctions qu'il avait à l'origine³. D'une autre manière, essayer de lui restituer ses caractéristiques urbanistiques, architecturales et sociologiques majeures initiales

L'amélioration des conditions de confort psychique, physiologique et thermique des usagers d'un bâtiment passe nécessairement par des transformations, pour en actualiser à la fois le programme et la construction. Cette façon d'intervenir, impose en quelque sorte un choix entre les exigences patrimoniales, sociales et économiques, qui nécessitent réellement un compromis, au moyen d'un acte architectural fortement imprégné de culture.

Comme l'opération de réhabilitation d'un immeuble englobe un large champ d'interventions, ce chapitre ne traite pas tous les sujets de la réhabilitation mais permet d'en avoir seulement une

¹. En grande Bretagne on utilise le terme **réhabilitation** dans un sens plus large. Il signifie aussi la rééducation ou la réadaptation d'un handicapé ou encore la désintoxication des drogués, des toxicomanes. Il s'agit bien à chaque fois d'une action en vu d'un retour à la situation initiale « normal » d'un individu « subissant une perte, une modification de son état ».

² A. Boudin, 1988, comment analyser la transformation de l'espace urbain . l'exemple de la réhabilitation de l'habitat, in *La réhabilitation de l'habitat social en France*, par Jean-Marc Stébé, PUF, Paris, 1995, pp 7-15,

³ .comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques, commissariat général du plan, *la réhabilitation de l'habitat social*, la documentation française, paris, 1993,.

idée sur l'approche d'une opération de réhabilitation et présente quelque technique de lutte contre les dommages causés par l'humidité. Cette dernière est l'une des facteurs les plus néfastes, aussi bien pour les éléments de structure du bâtiment que pour le bien être des habitants. De ce fait, il est utile, voir impératif, de prendre en considération les solutions à adopter afin d'éliminer ce facteur d'humidité lors des travaux de réhabilitation.

4.2 Objectifs de la réhabilitation

L'objectif de la réhabilitation est de restituer au logement, à l'immeuble, ou plus généralement au quartier, « une meilleure image sociale et une plus grande valeur économique¹ ».

Donc c'est une action de remise en valeur qui entreprend des actions concertées après un processus de dévalorisation dû à plusieurs causes. Ainsi, l'opération de réhabilitation touche certains secteurs, et a de ce fait de multiples effets :

- Ø Sur le plan architectural, elle assure non seulement la conservation des constructions et donc d'un patrimoine, mais sa réinsertion dans un cadre bâti agréable, avec des adaptations aux nécessités et usages contemporains.
- Ø Sur le plan urbanistique, elle permet l'amélioration des quartiers anciens insalubres et les ensembles immobiliers récents atteints par la dégradation, en cherchant l'homogénéité et l'équilibre entre ces quartiers.
- Ø Sur le plan économique, elle permet de prolonger la vie d'un bâtiment dévalorisé pour le « rétablir dans l'estime ». faire des économies d'énergie après une réhabilitation thermique, en améliorant l'étanchéité, la ventilation, l'isolation thermique et l'élimination de l'humidité. Possibilité de création de l'emploi et l'injection d'équipements et de petites activités.
- Ø Sur le plan social, elle renforce l'enracinement des habitants dans leur quartier, leur permet de s'approprier leur cadre de vie, de ne plus se sentir assistés dans un univers uniforme et dépersonnalisé. La réhabilitation permet donc de lutter contre l'exclusion sociale, atténuer les maux et crises sociaux par conséquent, consolide la cohésion sociale.

4.3 Enjeux de la réhabilitation

Bien que le concept de réhabilitation suppose un respect du caractère architectural du bâtiment ou du quartier, il s'oppose tout de même à la notion de la restauration qui, elle, tend à rétablir une image originelle, c'est-à-dire, la restitution intégrale de l'état initial avec un minimum de perte d'intégrité esthétique et historique. Cette dernière, touche seulement des édifices ou ensembles particulièrement prestigieux. Dans cette perspective de restauration, des questions se posent sur la manière d'intervenir. Est-il faisable de cacher les ajouts ? Le restaurateur, peut-il tromper en faisant « authentique » ? Pourrions-nous rendre visible les inscriptions actuelles ?

Toutes ces questions, certes fondamentales pour la préservation, néanmoins restent restreintes dans la sphère des spécialistes de la restauration et surtout ceux qu'on appelle les « puristes »

Ainsi, deux tendances de création architecturale s'y affrontent. Le projet de réhabilitation, se situe donc, dans cette démarche de concorde. « L'enjeu est d'éviter que, pour des raisons stylistiques ou idéologiques, l'une prenne le pas sur l'autre : soit qu'en survalorisant le passé on adopte un principe de neutralité, ce qui aboutit au pastiche ou à la muséification, et fige le

¹ Y. Grafmeyer, *Sociologie urbaine*, Paris, Nathan, 1994.

bâtiments dans un décor factice ; soit, au contraire, qu'on surestime le présent par « progressisme » naïf qui prétend faire forcément mieux que ce qui existe »¹.

Le respect de certaines formes de l'organisation traditionnelle des logements anciens va parfois dans le sens du plaisir d'habiter ailleurs que dans un logement de ce type. Le principe même de cette conservation pose le problème du respect des règles qui contribuent à intégrer les composantes du confort moderne : isolation thermique et phonique, ventilation et organisation spatiale du logement.

Par conséquent, respecter un édifice existant, c'est admettre qu'il doit évoluer et accepter les transformations positives. C'est aussi respecter les occupants en actualisant le niveau de confort optimum. C'est pourquoi les enjeux de la réhabilitation ne devraient jamais se situer sur le plan du style mais plutôt sur celui du besoin, Car habiter un lieu engage profondément les êtres qui font des investissements en vue d'une sédentarisation.

4.4 Reconsidérer une architecture existante

Depuis l'adoption de loi relative à la protection du patrimoine culturel², on s'aperçoit ces dernières années qu'il y a un léger intéressement de la part de nos responsables publics algériens, qui commencent à encourager l'évolution de la ville sur elle-même. La part du secteur de la réhabilitation trouve, maintenant, comme même, sa place dans la stratégie urbaine. On parle alors de « refaire la ville sur la ville », de « recyclage urbain » et d'amélioration du cadre bâti.

La réhabilitation est un acte de revalorisation qui s'applique sur des immeubles déjà existants : elle offre à un bâtiment ou un quartier l'occasion de renaître de nouveau, au moyen d'une expérience acquise. Cette seconde phase engendre une nouvelle perspective du projet, moins axée sur l'œuvre architecturale que la construction neuve : il s'agit, à partir d'un diagnostic (état du bâti, la mémoire qui s'y attache, fonction et conditions d'habitabilités), d'apporter les remèdes et pallier aux insuffisances, qui feront certainement rehausser le bâtiment ou le centre urbain à un niveau acceptable ou meilleur.

Cette opération est globale et au même temps méticuleuse, nécessite l'intervention d'experts spécialistes en plusieurs domaines de la construction et de l'urbanisme. Il ne s'agit pas de se contenter de l'observation des symptômes mais de chercher les origines du mal. Le champ de la réhabilitation exige de mettre en jeu plusieurs échelles d'interventions, vu la variété des travaux envisagés, et les contraintes rencontrées. Il s'agit aussi, de concilier les éléments de structure du bâti ancien et les matériaux de base avec les techniques actuelles.

4.5 Le projet de réhabilitation

Le projet de réhabilitation s'effectue évidemment sur un bâtiment déjà réalisé. Ce dernier possède une identité dont les caractéristiques architecturales et techniques vont ainsi, être prises en compte lors de l'étude de sa réhabilitation.

¹ P. Joffroy, *La réhabilitation des bâtiments : conserver, améliorer, restructurer les logement et les équipements*, Paris, 1999, pp :12-25

² Loi n° 98-04 du 20 Safar 1419 correspondant au 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel. J.O N°44.

Le processus de réhabilitation se déroule de façon très différente d'un projet de construction neuf. Il est nécessaire de faire des expertises sur la base d'un diagnostic préalable, où il sera déterminé toutes les composantes structurant le projet (architectural et technique), les conditions d'habitabilité, d'hygiène et de confort, ainsi que la faisabilité du projet. Ensuite une méthodologie d'intervention sera adoptée en concertation avec les habitants et les instances locales.

4.5.1 Le diagnostic préalable

Avant d'entamer tous travaux du projet de réhabilitation, il sera utile de clarifier certains points :

- la nature du programme et la faisabilité de sa réalisation ;
- le montant total des travaux selon un devis quantitatif et estimatif ;
- la ou les sources de financement.

Pour que le maître de l'ouvrage puisse se prononcer, le diagnostic préalable doit être achevé par l'architecte et doit comporter les conclusions de l'expertise du bâtiment et ses environs. À cet effet,

Cette analyse préalable et rapide doit concerner :

- les structures porteuses et tous les éléments portés
- tous les dommages : fissures, déformations, boursoflures, effritement et décollement des enduits et peintures...etc.
- étanchéité des toits et des descentes d'eau pluviale
- état des menuiseries et des canalisations
- mesures des taux d'humidité (de l'air et dans les maçonneries) et identifier son origine si elle existe.
- Évaluation détaillée des travaux à exécuter, le montant total doit s'approcher du réel (pas trop d'incertitudes).

L'expertise doit examiner aussi les bâtiments environnants, seulement de l'extérieur afin de pouvoir évaluer la stabilité de l'îlot, en d'autres termes s'assurer, d'une part que les désordres éventuels sont localisés. D'autre part, collecter les informations concernant l'origine historique et le caractère architectural à l'origine du bâtiment à réhabiliter ;

4.5.2 Les relevés

Le relevé architectural est indispensable pour tout projet de réhabilitation et de restauration. Car il précise les informations techniques nécessaires à la réussite du projet. Il est recommandé que le relevé soit effectué par le concepteur lui-même, ou du moins chapoté par lui. Ceci lui permettra une meilleure connaissance du projet et d'éviter les éventuelles erreurs. Néanmoins, le concepteur est souvent appelé à retourner sur les lieux pour vérifier ou confirmer certains détails et éventuellement s'assurer de la compatibilité de ses propositions avec l'état des lieux.

4.5.3 La conception d'un projet de réhabilitation

La réhabilitation ne permet pas aux architectes de s'exprimer librement comme dans un projet neuf. Évidemment, les premiers bâtisseurs se sont déjà fortement exprimés et ont revêtus leurs œuvres d'une empreinte architecturale qui reflète la culture de l'époque. Donc, Il semble plus judicieux de s'intégrer en douceur dans leur ouvrage plutôt que de lui faire violence.

Décider de réhabiliter un bâtiment ancien, c'est intervenir sur un patrimoine en opérant des choix. L'option adoptée est nourrie d'une profonde réflexion basée sur le diagnostic d'où résulte une méthodologie adéquate ; tout en veillant à ce que les objectifs du maître d'ouvrage soient atteints.

Il est à noter, l'existence de plusieurs tendances dans le champ de l'intervention sur le patrimoine, en voici quelques unes :

1. la réhabilitation à l'identique en vue d'une muséographie, Il s'agit là de transmettre un patrimoine bâti, témoignage d'une tradition ancestrale avec le moins de transformations possible, pour une génération future. Cette tendance est adoptée par les conservateurs.
2. une autre vision complètement contradictoire et purement utilitariste, consiste à chercher la valeur marchande du patrimoine, et l'utiliser en tant que telle. Ainsi toute modification ou démolition est permise.

Entre ces deux dispositions, plusieurs scénarios intermédiaires peuvent prendre place, où il serait important de favoriser l'esprit créatif tout en restant respectueux du patrimoine.

L'un des problèmes auquel se heurte la réhabilitation des bâtiments traditionnels est l'application des règles et réglementations venant du champ de la construction neuve moderne.

Cette interférence entre deux modes de constructions : moderne et traditionnel, suscite une réflexion approfondie, afin de diminuer la pression de la modernité, qui pèse lourdement sur le bilan de la réhabilitation sans pour autant que le résultat soit meilleur¹.

Certes, la réhabilitation a besoin d'un cadre législatif et réglementaire approprié mais qui doit puiser ses fondements des expérimentations qui ont prouvé leur fiabilité.

Les constructions anciennes souffrent de plusieurs désordres liés aux effets de la nature et du climat. L'une des préoccupations majeures de la réhabilitation des bâtiments traditionnels ou vernaculaires est l'élimination de l'humidité par la mise en œuvre de techniques simples et efficaces. Nous allons tenter dans les paragraphes suivants d'expliquer certains remèdes déjà appliqués dans des projets de réhabilitation.

4.6 Techniques de lutte contre l'humidité

Le plus important dans la lutte contre l'humidité est d'apporter les remèdes causales et non symptomatiques, ceci sous entend qu'il faut établir un bon diagnostic avant de décider sur la manière et les moyens appropriés à mettre en œuvre, car chaque type d'humidité nécessite une intervention particulière et différente pour son élimination. D'autant plus, qu'un bâtiment peut être envahi par un ou plusieurs types d'humidité dont les sources sont complètement distinctes.

Il existe de nombreux procédés de lutte contre l'humidité sous toutes ses formes : condensation superficielle et dans la masse, remonté capillaire, humidité accidentelle et celle provenant des pluies battantes. Nous rappelons que l'humidité cause des désordres d'ordre structurelle et pathologique pour les constructions et porte atteinte à la santé de l'homme ou du moins, elle est à l'origine d'une multitude de nuisances dont l'inconfort physiologique des individus. En voici quelques solutions adaptées à chaque type d'humidité:

¹ J-P Levy, *La réhabilitation des quartiers anciens et de l'habitat existant*, Toulouse, PUM, 1990.

4.6.1 Remède contre l'humidité de condensation

Dans le chapitre 03 (l'humidité), il a été étudié les causes de l'humidité de condensation, à savoir :

- la production de vapeur d'eau ;
- la stagnation de l'air ;
- protection thermique insuffisante des parois ;
- l'absence de chauffage (période froide).

Le phénomène est exclusivement thermique : La condensation se produit sur la surface la plus froide, appelé communément les ponts thermiques. Il existe quatre procédés d'assainissement qui sont les suivants :

1. La diminution de la production de vapeur d'eau à l'intérieur des locaux à assainir ;
2. l'aération naturelle d'air froid et sec afin d'évacuer la vapeur d'eau.
3. élimination des ponts thermiques au moyen d'isolants thermiques et d'enlever, si possible, les matériaux lourds, bons conducteurs de la chaleur : béton, marbres, céramiques vitrifiées ;
4. procéder au chauffage artificiel d'hiver et même en été dans certains cas, au lieu d'installer un système d'électro-ventilation, ce qui apparaît assez paradoxale et absurde compte tenu aux idées préconçues.

Il est à noter pour le quatrième point que, le chauffage d'hiver d'appoint doit être accompagné d'une ventilation naturelle modérée d'air froid et sec, agent efficace de l'évacuation de la vapeur, car le chauffage augmente l'évaporation des murs humides lorsque celles-ci sont affectées également d'humidité ascensionnelle

Le tableau (4.1) : présente une synthèse des remèdes applicables à partir de ces quatre Procédés généraux.

Saison	Origine déterminée de la vapeur d'eau	Remède
Humidité hivernale	Évaporation provenant des parois et du plancher	- éliminer l'évaporation ; -si c'est impossible, ventiler légèrement avec de l'air naturel de l'extérieur.
	Respiration	-ventiler comme ci-dessus -remplacer les enduits imperméables par des enduits poreux anticondensant -chauffer, de préférence avec des chaudières à bois, qui ont l'avantage d'accélérer la ventilation.
	Combustions de gaz, travaux humides, etc...	-Éliminer la vapeur d'eau au moyen de hottes et de cheminées effectivement adaptées à cet usage ou, si la production de vapeur est intense, au moyen de l'électro-ventilation ; employer des enduits poreux ; -si c'est possible, ventiler légèrement avec de l'air naturel de l'extérieur.
	Protection thermique insuffisante des maçonneries	-Enlever les matériaux lourds (marbres, béton, etc.) des murs et des planchers ou, au moins, les couvrir de revêtements de manière à ce qu'ils ne soient plus en contact avec l'air ; -employer des structures additionnelles pour augmenter la résistance thermique des murs périmétriques de la

		couverture ou du plancher ; aménagement de doubles fenêtres ; -si les remèdes 1) et 2) sont impossibles, intensifier le chauffage, pour autant que la résistance thermique de quelques structures ne soit pas inférieure à 0,35 ou 0,40
Humidité hivernale intermittente	Siroco ou vents chaud et humides de même sorte	-Recouvrir les parois d'enduits légers et assez épais (ponce, vermiculite au matériau semblable) ; revêtir les planchers de bois ; remplacer le marbre par du bois dans les décorations ; -il est plus efficace de réduire l'inertie thermique au moyen de radiers sous le plancher et de contre-mur ; de recouvrir ces contre-murs d'enduits léger et le nouveau plancher, de bois ; -si les remèdes 1) et 2) sont impossibles, chauffer légèrement, mais constamment durant tout l'hiver.
Humidité d'été	Parois et planchers envahis par l'humidité ascensionnelle dans des locaux non chauffés l'hiver (presque exclusivement dans les rez-de-chaussée et les sous-sol)	-supprimer, si possible, l'humidité ascensionnelle par des travaux appropriés ; éviter l'électro-ventilation ; -enlever le matériaux lourds (marbres, béton, etc.) ; augmenter, en tout cas, la protection thermique et intercepter l'humidité ascensionnelle par des radiers et de murs ; - si les remèdes 1) et 2) sont impossibles, appliquer sur les planchers, un revêtement de planches de bois et chauffer légèrement le local au moyen de chauffages électriques, même en plein été.
Humidité de printemps et d'été	Chauffage insuffisant en hiver dans des locaux à murs secs, sans humidité ascensionnelle (presque exclusivement dans les rez-de-chaussée et les sous-sol)	-éviter l'électro-ventilation qui peut être nocive ; -éliminer les surfaces condensantes, comme dans les cas précédent et augmenter la protection thermique par des radiers et des contre-murs ; -si le remède 2) est impossible appliquer sur les planchers, un revêtement de planches de bois et chauffer légèrement durant tout l'été. Ou chauffer intensément en hiver et prolonger le chauffage atténué jusqu'à avril ou mai.

Tab.4.1 : Remède adaptés aux cas simples d'humidité de condensation. Source : Massari, 1971

Note¹ : Il est préférable de chauffer directement les massifs de maçonnerie plutôt que l'air, soit par l'installation d'un thermosiphon à serpentins incorporés, soit par des résistances électriques enveloppées dans des gaines de silicone et murées sous l'enduit ou sous le plancher.

En fait, les remèdes énoncés au premier et quatrième point sont un peu difficiles à maîtriser car ils sont du ressort des occupants donc, de leurs comportements et leurs moeurs ainsi du budget familial. Le concepteur ne peut rien faire devant :

- le surpeuplement des logements
- l'économie d'énergie qui induit une mauvaise répartition de la chaleur dans les pièces, et à limiter la durée de la saison de chauffe et au-delà, si nécessaire, comme il a été préconisé dans le tableau (N° : 4-1), Ainsi, pour lutter contre l'humidité de condensation, nous ne disposons en réalité que de deux moyens : l'isolation thermique des parois et la ventilation des locaux.

¹ Collombet Raymond, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, pp.117-160, Paris, 1985

A) La protection thermique des parois

Les procédés de l'isolation thermique objet de cette étude, ne concerne que ceux ayant un effet sur l'humidité, à savoir :

- l'isolation des baies vitrées,
- l'isolation des murs,
- l'isolation des planchers,
- l'isolation des toitures.

a) L'isolation des baies vitrées

Les parois vitrées constituent l'endroit privilégié de la condensation à cause de la valeur élevée de leurs coefficients surfacique (K). La solution réside, en la diminution de la valeur de ce coefficient pour atténuer ou éliminer l'apparition de ce phénomène.

Actuellement, de nouveaux produits sont disponibles sur le marché, utilisant des technologies nouvelles (fig.4.1a) « TPS » : Thermo Plastic Spacer¹, ont pu améliorer les performances thermiques des fenêtres et résoudre le problème de condensation sur le vitrage. La déperdition énergétique d'un vitrage isolant est principalement concentrée sur la surface du verre mais aussi au niveau de l'intercalaire métallique et donc au niveau des bords du vitrage. C'est à ce niveau que le système d'étanchéité TPS s'applique : le TPS est un cordon thermoplastique mono composant, à la base de polyisobutylène, auquel est incorporé un tamis moléculaire qui se pose en périphérie du vitrage. Ses performances permettent de réduire les transferts thermiques en périphérie des vitrages isolants.

Le terme warmedge (bord chaud) est employé pour illustrer la solution apportée par le TPS : une solution qui offre un meilleur équilibre des températures sur l'ensemble de la surface du vitrage isolant. Ce système est arrivé à réduire le coefficient « K » du nouveau verre isolant à :1,1 w/m². °C

La figure (4.1b) montre une comparaison entre un vitrage isolant traditionnel et le nouveau vitrage Pilkington Insulight Warmedge

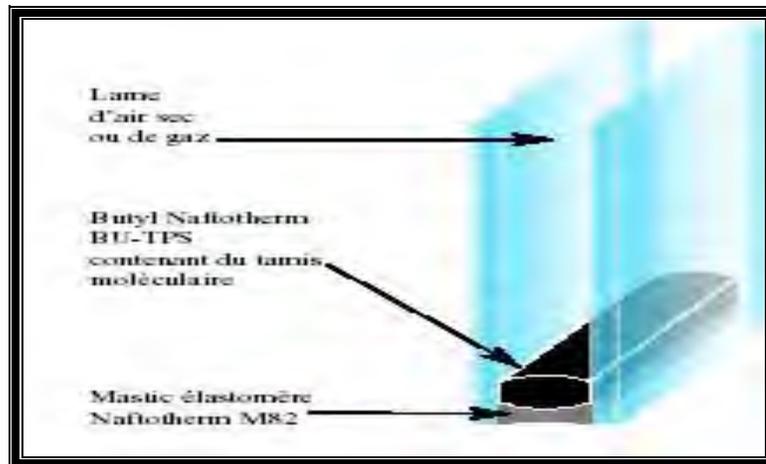


Fig. 4-1_a : vitrage isolant type TPS. Source : www.pilkington.com, 2005

¹[Enligne] <http://www.pilkington.com>, 2005

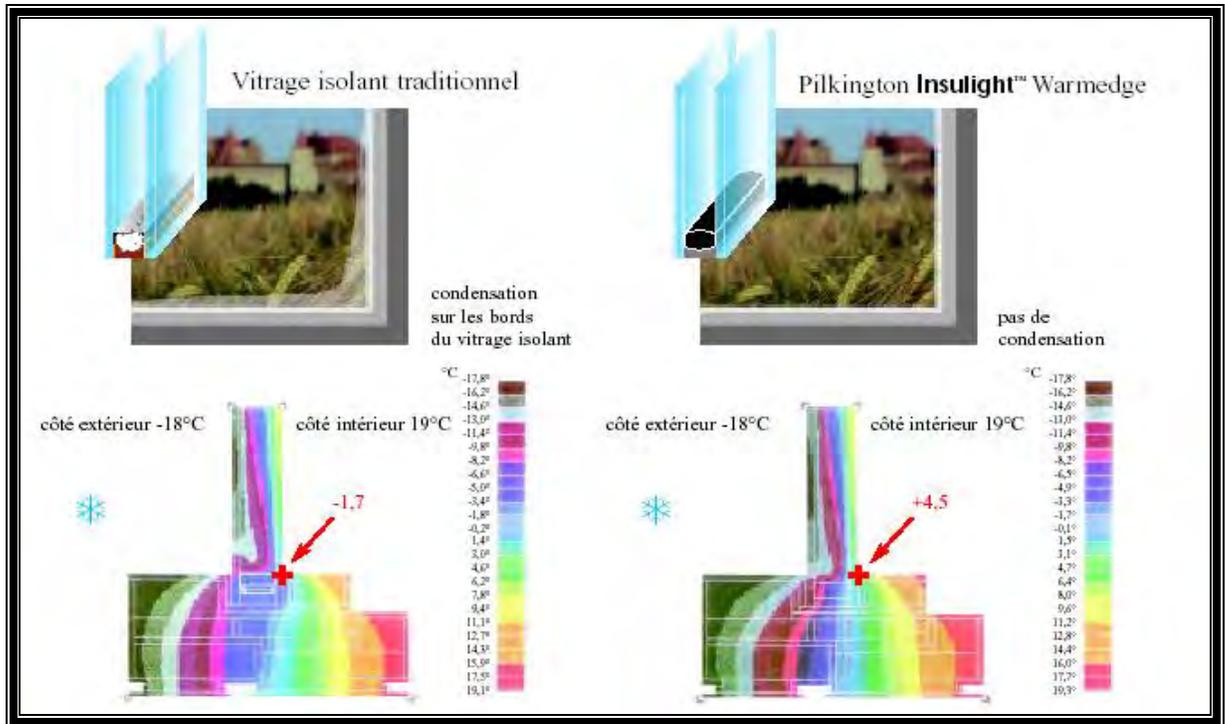


Fig. 4-1_b : comparaison entre le vitrage traditionnel et le type TPS, dans les mêmes conditions de températures
 Source : www.pilkington.com, 2005

b) L'isolation des murs

Dans les maisons d'habitation, les premières taches de condensation apparaissent dans les zones de moindre protection thermique : sur les appuis de fenêtres et les parties proches de la colonne d'angle. Dans les bâtiments en béton armé, cette colonne d'angle est le point thermique le plus faible. (fig.4.2).

En outre, les conditions d'usage anormal, susceptibles de rendre insuffisante, en hiver, la protection thermique des murs, même bien construits, sont : le surpeuplement et la combustion excessive de gaz.



Fig. 4-2 : condensation dans les bâtiments en béton armé,
 Pont thermique au niveau de la colonne d'angle.
 Source : www.travaux.com, 2005

La transpiration et la respiration humaines produisent, par adulte, de 50 à 80g de vapeur à l'heure. La combustion de 1m³ de gaz produit, de son côté, 800g de vapeur ; or, la consommation ordinaire d'une famille est de 4 m³ par jour¹.

Les productions moyennes de vapeur relevées en France, au cours de certaines expériences, sont les suivants¹ :

1. dans des logements surpeuplés8 g/m³. h
2. dans des logements populaires normalement peuplés5 g/m³. h
3. dans des logements de types bourgeois.....2 g/m³. h

Lorsque le milieu devient humide, la résistance thermique initiale du mur diminue rapidement et le cercle vicieux se forme : l'humidité du mur est cause du froid, lequel est cause de nouvelle humidité.

Afin d'éviter l'apparition éventuelle d'humidité de condensation dans les logements, les murs doivent assurer une protection thermique minimum contre le froid, en d'autres termes une résistance thermique minimum de : $R=1 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{cal}$ et ce dans les climats froids où la température moyenne de janvier est inférieure à 4°C, par contre, seulement : 0,8 dans le climat méditerranéen où la température moyenne de janvier est supérieure à 4°C. Ces minima ont été fixés en fonction d'un usage normal (hygiéniquement sain) des locaux².

C'est absurde de croire qu'il est toujours possible de compenser une insuffisance éventuelle de l'isolation thermique en intensifiant le chauffage. Ce remède, en dépit de son caractère général, n'est efficace que dans certaines conditions où il est associé à l'aération. Pour une bonne assimilation du phénomène, Examinons l'exemple suivant : si, nous avons une ambiance thermique intérieure d'un local dont l'humidité relative de l'air est de 65% et la température de l'air extérieure est de :-1°C, la condensation se produirait même si le chauffage était poussé jusqu'à 22°C.

Par ailleurs, il a été constaté que, dans les locaux froids, la condensation hivernal est souvent un phénomène nocturne qui apparaît après l'arrêt du chauffage, lorsque la paroi intérieure du mur extérieur commence à se refroidir et l'humidité relative de l'air augmente (en particulier dans les chambres à coucher ou dortoirs, où il y a production de la vapeur dû à la respiration et la transpiration. Dans ce cas, les moyens de défenses peuvent se résumer en³ :

- Retarder le refroidissement du mur, en augmentant l'inertie thermique des murs, ainsi la chaleur emmagasinée peut alimenter l'air intérieur, après l'arrêt du chauffage nocturne ou son intermittence;
- Augmenter suffisamment la résistance thermique du mur pour que l'air intérieur se conserve chaud pendant l'interruption du chauffage.

En cas d'impossibilité d'exécuter ces deux conditions, il faut éviter l'arrêt du chauffage pendant les heures du sommeil (la nuit).

Emplacement de l'isolant

On peut placer les isolants thermiques sur l'une des deux faces du mur considéré, que se soit de l'intérieur ou de l'extérieur, afin d'éviter que la température de la paroi atteigne le point de rosé et donc de prévenir toute condensation.

¹[Enligne] <http://www.Cerma>: archi.fr. 2006

²Massari Giovanni, *bâtiments humides et insalubres*, Editions Eyrolles, p253, Paris, 1971

³[Enligne] <http://www.IRC.com>, 2005

- Premier cas, isolant de l'extérieur :

Étant donné qu'il se produit une véritable migration de l'eau de la paroi intérieure vers la paroi extérieure, pour cela, il faut prendre des précautions et veiller à ne pas réduire le pouvoir respirant des murs. Il est indispensable de placer un isolant perméable, de préférence, sa perméabilité devra être supérieure à celle de la paroi pour qu'il n'y ait pas de risque de condensation à la jonction de l'isolant et de la paroi. Sachant que, l'humidité, en se déplaçant dans le mur vers la surface extérieure, réussit à s'évaporer à l'air libre (fig.4.3). « La règle qui est systématiquement examinée dans les avis techniques que délivre en la matière le C.S.T.B. est la suivante »¹:

$$\text{Perméance de la paroi} / \text{perméabilité de l'isolant} \geq 50 \text{ m}^{-1}$$

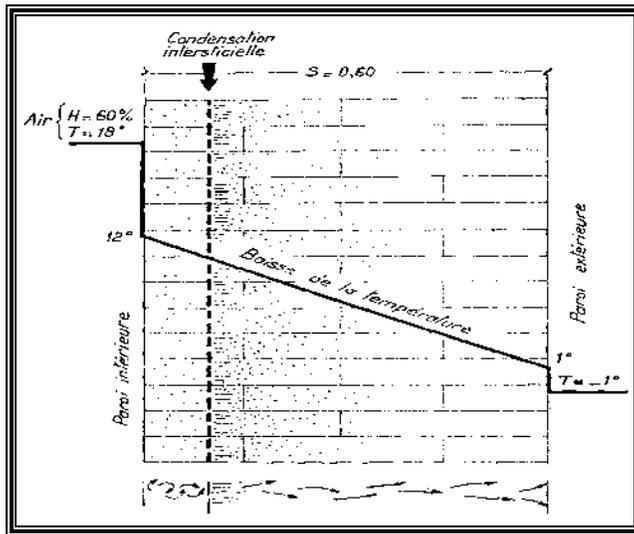


Fig. 4-3 : Condensation dans la masse

Source : Daniel Bernstein, 1997

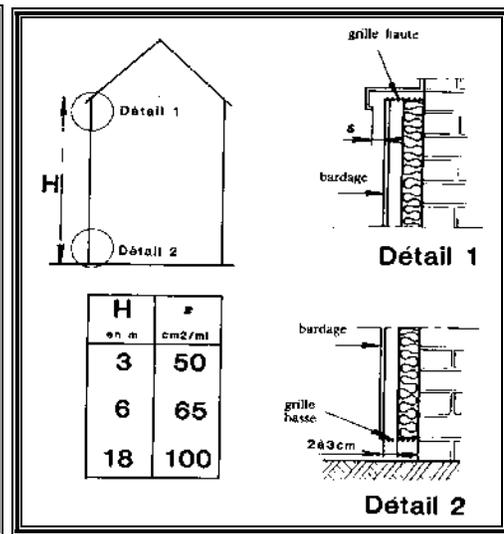


Fig. 4-4 : isolation par l'extérieur. Ventilation de la lame d'air

Source : Raymond Collombet, 1985

Dans le cas où, l'isolant est placé sous peau imperméable à la vapeur d'eau, alors deux solutions se présentent afin d'évacuer la formation de la condensation :

- Ø Prévoir une lame d'air, fortement ventilé, entre la paroi imperméable et l'isolant (fig.4.4)
- Ø Assurer le ruissellement, puis l'évacuation sans dommage des condensations qui se produisent sous la peau externe du complexe isolant. C'est la solution retenue pour certaines vêtements qui comportent des plots d'écartement entre isolant et parement et des orifices en rive basse de chaque élément. Ceux-ci rejettent les condensats sur la face externe de l'élément inférieur.

Importance du double mur « renforcé » dans les constructions en béton armée.

Il semble que le double mur renforcé assure une performance thermique très importante, lorsqu'on installe dans le vide d'air vertical (fig.4.5) :

- une feuille très mince en aluminium dont on couvre indifféremment l'une des deux faces.
- un isolant thermique à très haute résistance, comme la laine minérale (verre ou roche)

¹ Collombet Raymond, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, p152, Paris, 1985

La feuille d'aluminium possède un coefficient d'émission extraordinairement bas (0,35) par rapport à celui d'un mur de briques (4,6) si on en couvre un mur en brique, cette dernière émet la chaleur emmagasinée treize fois lentement que lorsqu'elle est nue¹. S'il s'agit de la paroi froide, la chaleur sera réfléchiée, mais dans le cas contraire, la chaleur sera conservée. Dans les deux cas, les radiations calorifiques ne pourront traverser le vide d'air, lequel verra sa résistance thermique augmentée d'environ une fois et demie.

Par conséquent, le double mur doit prévenir d'une part, la condensation dans les pièces orientées au nord, quant le froid nocturne est le plus intense, en raison de l'intermittence du chauffage; et d'autres part abaisser la température de la paroi intérieure du mur le plus directement ensoleillé (d'orientation sud-ouest) ne soit supérieure à celle des autres parois.

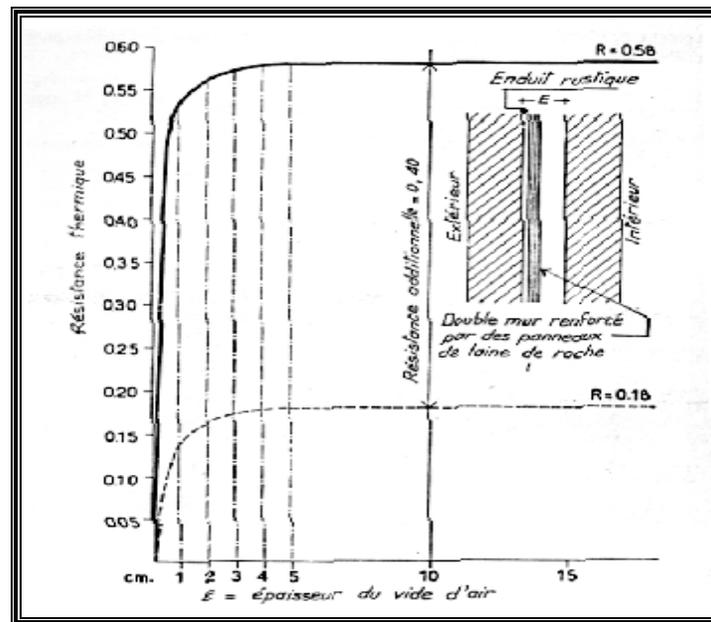


Fig. 4-5 : Résistance thermique de la lame d'air. Double mur renforcé, comprenant une feuille d'aluminium.

Source : Massari .G, 1971

c) L'isolation des planchers

L'isolation des planchers peut se faire selon le type et la disposition du plancher sur lequel nous intervenons, alors trois cas de figure se présentent :

- les planchers bas situés au-dessus de locaux non chauffés : le concepteur veillera à placer l'isolation thermique **par-dessous**. Bien que les échanges gazeux ne soient pas aussi importants que ceux à travers les planchers hauts, cependant il est nécessaire de ne pas les empêcher. Donc, il est souhaitable de choisir un isolant sans pare-vapeur.
- Les planchers sur terre-plein : dans ce cas, l'isolation thermique doit être suivi d'un système pour empêcher l'humidité ascensionnelle (fig.4.6).
- L'isolation thermique d'un plancher sous comble : la mise en œuvre de l'isolant doit se faire **par-dessus**, en le disposant sur le sol du comble, ou **par-dessous**, en faux-plafond

¹ Recknagel. Sprenger, Honman, *le manuel pratique du génie climatique*, 2ème édition, PYC, Paris, 1986.

dans le local lui-même. Quant au pare-vapeur, il est recommandé de le supprimer pour le premier cas afin de ne pas asphyxier le plancher et permettre ainsi les échanges gazeux dans le but d'éviter la condensation. Par contre pour le deuxième cas (faux-plafond), le pare-vapeur doit être disposé sous l'isolant de manière à limiter la quantité de vapeur d'eau traversant l'isolant et les matériaux du plancher.

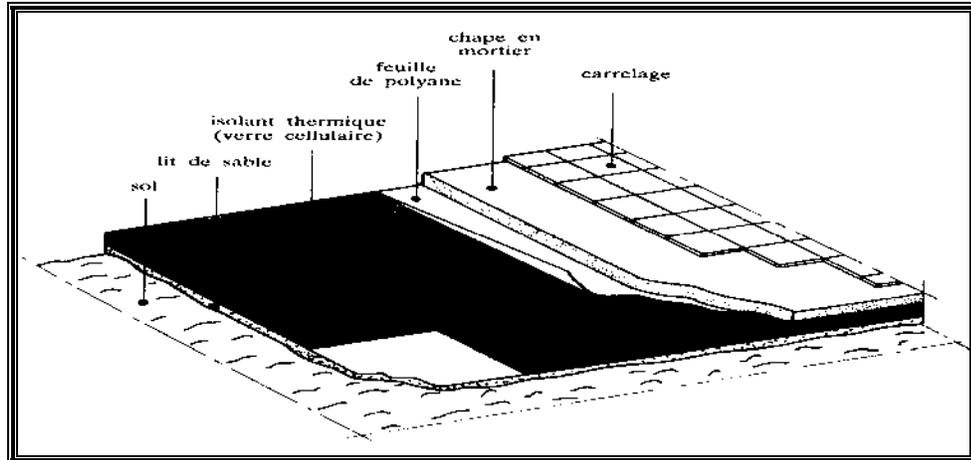


Fig. 4-6 : Protection d'un plancher sur terre-plein contre l'humidité ascensionnelle et de condensation
Source : COLOMBET. R, 1985

d) L'isolation des toitures

Rares sont les manifestations de condensations dans les combles des maisons traditionnelles, car ces derniers sont généralement bien aérés. Néanmoins, il est à rappeler quelques recommandations sur les sections des orifices de ventilation en partie haute et basse d'une toiture¹ :

- Ø 1/400 de la surface du comble, lorsque la couverture est étanche à l'air (feuille de zinc) ;
- Ø 1/3000 de la surface du comble, lorsque la couverture est en tuile ou en ardoise

B) La ventilation des locaux

La ventilation joue un rôle très important dans l'abaissement du taux hygrométrique de l'air ambiant, c'est donc un moyen de lutte contre la condensation, car une telle hausse provoque le déclenchement de ce phénomène.

Il est conseillé d'assurer, par heure, au moins deux renouvellements d'air effectifs dans tout le logement (alors que d'habitude le calcul du chauffage n'en prévoit qu'un seul), non pas en ouvrant les fenêtres par intermittence, car ce système n'est pas sans danger, mais au moyen de bouches d'aération ou d'autres systèmes (effet de cheminée...).

Assainir un logement qui est humide en hiver par une intensification combinée du chauffage et de la ventilation de façon proportionnel, est possible mais sujette d'un supplément de frais de consommation égal au tiers du coût normal du chauffage, au cas où l'on ne souhaiterait pas effectuer les travaux de renforcement de la protection thermique déficiente des murs périmétriques et de la couverture².

¹ Henri Duthu, *la technique du bâtiment, tous corps d'état*, le Moniteur, pp281-302, Paris, 1994

² Massari G, *bâtiments humides et insalubres*, éditions Eyrolles, pp315-342, Paris, 1971

a) lutte contre la condensation d'été

Ce phénomène se produit, en effet, au printemps et en été, dans des locaux secs, froids, orientés au nord ou privés de soleil, dotés d'une grande inertie thermique à cause de l'épaisseur de leurs murs ou de leur situation en sous-sol. L'eau contenue dans l'air à l'état liquide se communique aux murs et au plancher, en provoquant, par conséquent, une imbibition superficielle des maçonneries.

La ventilation accrue n'est pas le bon remède. En effet, si chaque masse d'air pénétrant dans le local a le temps de se refroidir, elle n'a d'autre effet que d'introduire une nouvelle quantité d'humidité. Il faudrait que l'air introduit dans le local fût suffisamment sec pour pouvoir supporter sans inconvénient l'abaissement de température provoqué par les parois froides et surtout par le plancher des sous-sols.

En règle générale, par des dispositifs capables d'empêcher que l'air chaud de renouvellement ne se refroidisse au fur et à mesure qu'il pénètre de l'extérieur vers le local à assainir. Deux solutions peuvent être proposées :

- Proposer une installation de dessiccation et de ventilation. Il existe plusieurs types. L'une d'entre elles est basée sur le pouvoir hygroscopique de la gélatine de silice. Chaque jour, pendant plusieurs heures, l'air humide des locaux est filtré, grâce à des ventilateurs électriques, à travers des tamis de gélatine, où il se libère d'une certaine quantité de son humidité. Ces installations sont à éviter dans les maisons et les locaux peu rentables. Se contenter de solutions simples.

- Faire rentrer l'air chaud dans un local déjà chaud, il suffit pour cela de prolonger le chauffage au-delà de l'hiver, durant presque tout le printemps, ou d'entretenir un léger chauffage électrique continu pendant la période de la condensation. « Contrairement à ce que l'on peut croire, le chauffage modéré des sous-sols humides, en été, est agréable à qui pénètre et séjourne dans ces locaux, d'autant plus agréable qu'à l'extérieur la température est plus élevée et le soleil plus ardent. Ceux qui en feront l'expérience en seront certainement étonnés »¹.

Les planchers ordinaires de carrelage, de briques dures ou vitrifiées, béton et marbre, ont un dangereux pouvoir de refroidissement beaucoup plus grave qu'on ne l'estime habituellement. D'où l'assainissement du local est conditionné par l'élimination du plancher en matériau lourd et tous les revêtements de marbre ou de céramique et les enduits de ciment, et puis aménager un plancher en bois (radier) et tous les revêtements en enduit anticondensant (s'il n'y a pas de remonté capillaire), l'amélioration sera certainement instantanée et efficace.

Dans le cas où il existe une humidité ascensionnelle, il est recommandé d'aménager un contre-mur appliqué aux murs portants.

b) Lutte contre l'humidité provenant de l'air souterrain

Ce type d'humidité est particulier aux souterrains et aux sous-sols, due selon certaines hypothèses comme celle de Knapen², à la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air chaud et saturé qui s'échappe du sous-sol à chaque dépression barométrique. Cette hypothèse n'est pas acceptée totalement par Massari, qui démontre que cette humidité est causée aussi par l'ascension de l'eau grâce au phénomène de capillarité des matériaux.

¹Massari G, *bâtiments humides et insalubres*, Editions Eyrolles, Paris, 1971

²KNAPEN.M.A, *le problème de la conservation des matériaux des habitations et des monuments*. «*Revue des entrepreneurs de maçonnerie, ciments et béton armé* », paris, avril-décembre 1925.

Contrairement à l'humidité de condensation courante provenant de l'air extérieur, elle tend à disparaître en été dans les climats tempérés, dans les zones très chaudes, elle augmente pendant la nuit.

En fait, Massari, ne refuse pas d'admettre l'existence d'une humidité de condensation provenant de l'air tellurique. Lorsque l'air, expulsé de la profondeur du sol par une dépression barométrique, débouche dans un local froid (fig.4.7).

La théorie de knapen permet d'expliquer la formation de l'humidité des constructions situées au sommet d'une colline, sur terrain sec (fig.4-8). Comme, elle peut convaincre, les opposants par le phénomène de l'alimentation des sources à la cime des montagnes



Fig. 4-7 : condensation provoquée par l'air tellurique

Source : www.travaux.com, 2005



Fig. 4-8 : les bâtisses situées sur les sommets des collines attaquée par l'humidité s'explique seulement par le phénomène de la condensation tellurique

Source : Elena Ippoliti, 1999

L'exemple d'un cas le plus illustrant de ce phénomène, se trouve au niveau de l'immense salle ouverte au-dessous de la nef centrale de saint-pierre (Italie) (fig.4.9), le phénomène présente deux aspects :

- Sur les parois, l'humidité de condensation n'est pas visible, car elle est absorbée de manière uniforme ;
- Par contre, elle se manifeste assez nettement sur les structures métalliques massifs. En hiver, lors de chaque dépression barométrique, ces poutres sont le point de départ d'une abondante stillation, qui ressemble à de la pluie. Ce cas est unique en raison de l'énorme surface d'évaporation et du volume d'air renfermé dans le souterrain.

Il est probable que, dans les bâtiments ordinaires, les dépressions barométriques influencent des volumes d'air tellement petits qu'il est permis de considérer comme négligeable l'humidité qui peut en résulter pour l'ossature de l'étage le plus bas. Pour éviter l'apparition de ce phénomène, il serait utile d'appliquer les remèdes contre les condensations intermittentes causées par le sirocco, énoncés dans le tableau (4-1).

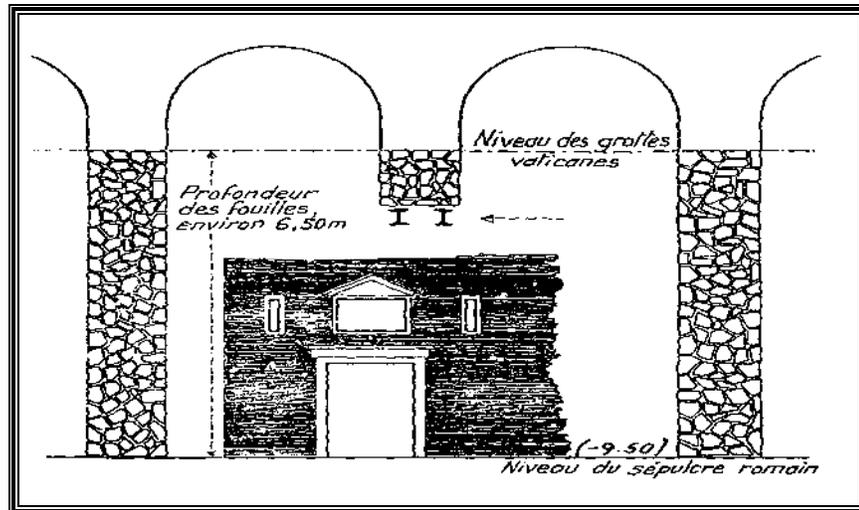


Fig. 4-9 : basilique Saint-Pierre à Rome. Un exemple de l'humidité tellurique par excellence
Source : Giovanni Massari, 1971

4.6.2 Remède contre l'humidité ascensionnelle

L'humidité en provenance du sol peut avoir trois sources d'alimentations¹ :

1. l'eau perdue en surface et d'origine identifiable ;
2. l'eau imbibant uniformément le terrain et d'origine inconnue ;
3. l'eau profonde et inépuisable (nappe phréatique).

Pour le premier cas le remède est claire : il faut intercepter ou supprimer la source d'eau : en asséchant tout le terrain entourant la construction, c'est-à-dire éloigner l'eau en procédant à un diagnostic rigoureux :

- effectuer des tranchées le long des murs humides, jusqu'à atteindre une zone sèche ;
- examiner l'étanchéité des puits, des citernes, des buses d'assainissement ;
- vérifier des descentes d'eau pluviales et les gouttières ;
- contrôler le réseau de l'alimentation d'eau potable.

Dans les deuxième et troisième cas la méthode à suivre est la même, puisqu'il est impossible d'éloigner l'eau et qu'il faut seulement protéger les murs et les planchers bas de la pénétration de l'eau ou de son évaporation à l'intérieur des locaux.

Ainsi, trois possibilités de remèdes contre l'humidité de remontée capillaire se dégagent (fig.4-10 et 4.11) :

- 1) travaux de maçonnerie qui empêchent l'eau d'entrer dans l'ossature du local à assainir
- 2) les travaux de maçonnerie qui empêchent l'eau de sortir des murs pour s'évaporer dans l'air du local ;
- 3) les travaux qui agissent sur l'air et non plus sur les maçonneries, et qui essaient d'y maintenir une température et un taux d'humidité hygiéniquement tolérables.

¹ [Enligne] <http://www.travaux.Com>, 2005

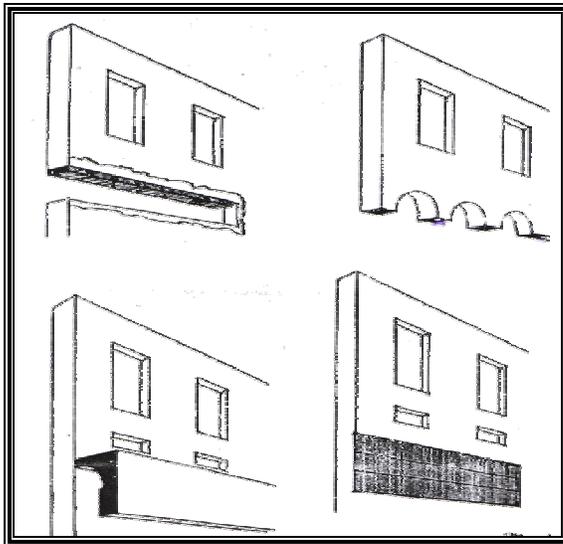


Fig. 4-10 : différentes méthodes pour entraver les remontés capillaires. Les deux premiers arrêtent la montée de l'humidité ; les deux derniers empêchent la pénétration latérale.

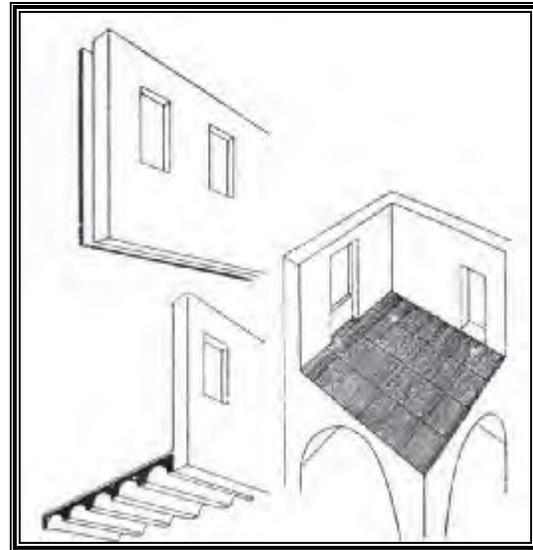


Fig. 4-11 : trois types de travaux pour empêcher l'humidité de sortir de la paroi sous forme de vapeur

Source : Giovanni Massari, 1971

Ces solutions sont illustrés et groupés dans le tableau (4.2) suivant :

Groupe 1 (fig.4.10)	Groupe 2 (fig.4.11)	Groupe 3
-Barrage dans l'épaisseur du mur ; -Réduction de la section absorbante ; -Revêtement isolant extérieur.	-Pour les parois : contre-mur intérieur ; -Pour le plancher : radier horizontal creux ; -Masques de matières isolantes.	-Renouvellement de l'air par ventilation ; -Chauffage.

Tab.4.2 : regroupant les trois (03) groupes de solutions. Source : Massari G, 1971

Le choix du remède adéquat peut faire l'objet d'une combinaison entre ces groupes de solutions selon le cas qui se présentera :

a) Réduction de la section absorbante (méthode de Koch)

Pour arrêter le passage de l'humidité ascensionnelle, Koch¹ a essayé de trouver une méthode qui consiste à pratiquer des vides sous forme d'arcs dans la partie inférieure des murs. Ce procédé permet de diminuer la section horizontale des murs à travers laquelle l'eau monte. De manière que le peu d'humidité qui peut encore passer, soit prise en charge par la ventilation. (fig.4.12) et (fig.4.13).

Quoi qu'elle soit intéressante, cette méthode présente des difficultés de réalisation, comme elle fragilise la structure faite en mur porteur (problème statique). Le champ d'application de cette technique est très limité à des cas bien spécifiques.

¹Koch, in, Massari G, *bâtiments humides et insalubres*, Eyrolles, p204, Paris, 1971

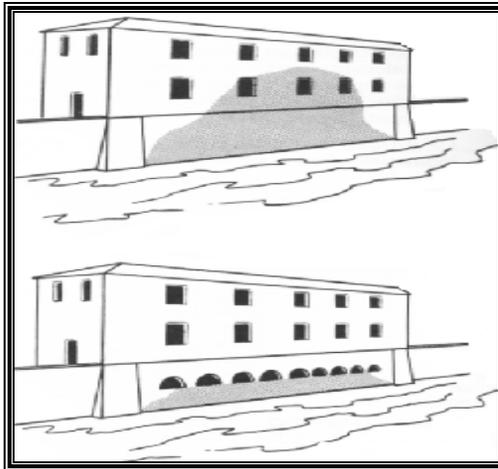


Fig. 4-12 : Réduction de la section absorbant
Source : Collombet R, 1985

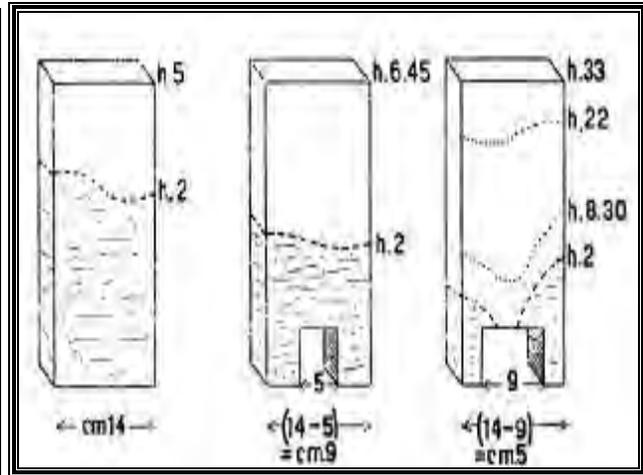


Fig. 4-13 : expérience sur le comportement des briques ordinaires à section absorbante réduite
Source : Massari G, 1971

Le tableau (4.3), montre les résultats des expériences faites sur des échantillons selon la méthode de Koch :

Echantillons	Section absorbante	Hauteur d'absorption après 2 h	Temps nécessaire à l'imbibition complète de l'échantillon	Vitesse relative de montée de l'eau
brique témoin	totale	18 cm	5 h	1
Brique à section réduite	0,74	14 cm	6,45 h	0,75
Brique à section réduite cal	0,36	8 cm	33 h	0,15

Tab. 4. 3 : expériences des briques à section absorbante réduite. **Source** : Massari G, 1971

Le troisième échantillon, présente une vitesse d'absorption par affinité réduite à 15 %, c'est-à-dire à environ sept fois moins que celle du premier échantillon (Tab.4-3).

Dans l'église de S.luigi dé francesi à Rome, l'architecte Koch a nettement amélioré sa technique de lutte contre le passage de l'humidité, cette dernière a endommagé gravement les fresques qui tombaient en ruine dans la dite église. Son intervention consiste à pratiquer trois arcades en brèche sous la fresque, et les quatre plinthes qui en résultent (fig.4-14), sont remplacés par un autre matériau très compact et parfaitement anticapillaire : le silex, ainsi le résultat était positif et l'humidité est arrêtée à jamais.

b) Mise en place d'une barrière étanche à la base des murs

Ce procédé a connu une grande réussite, il consiste à empêcher la migration capillaire de l'eau, en introduisant : une couche de matériau isolant qui peut être de l'asphalte coulé à chaud, du mastic bitumineux coulé à froid, ou encore des feuilles métalliques souples. Nous présenterons ci-après quelques techniques pratiques et efficaces :

§ Suppression d'une bande de l'ancienne maçonnerie et son remplacement par une maçonnerie anticapillaire.

Ce procédé consiste à démolir par petites parties une couche horizontale du mur à assécher, pour la reconstruire avec des matériaux anticapillaires (fig.4.15).

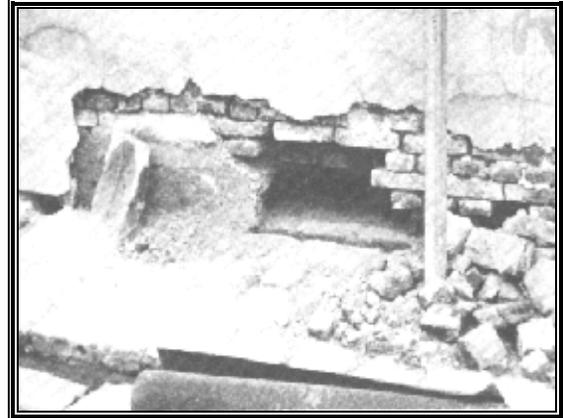
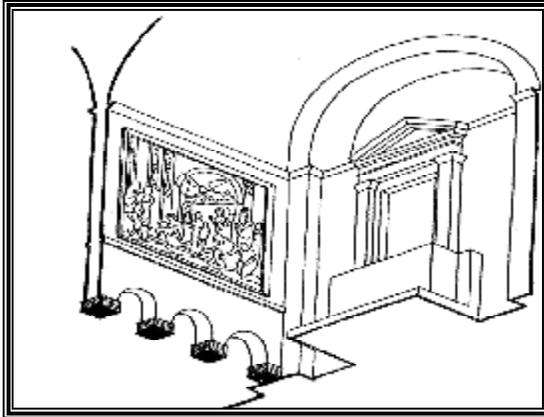


Fig. 4-14 : méthode appliquée par Koch pour sauver les fresques à St-Louis-des-Français
Source : Massari G, 1971

Fig. 4-15 : changement de la maçonnerie à la base d'un mur
Source : Collombet R, 1985

L'épaisseur de la bande de la maçonnerie à renouveler est d'une hauteur comprise entre 18 et 30 cm (fig.4.16). Cette nouvelle couche horizontale en raison des matériaux anticapillaires dont elle est faite, ou parce qu'elle repose sur une feuille isolante, constitue une barrière infranchissable pour l'humidité ascensionnelle.

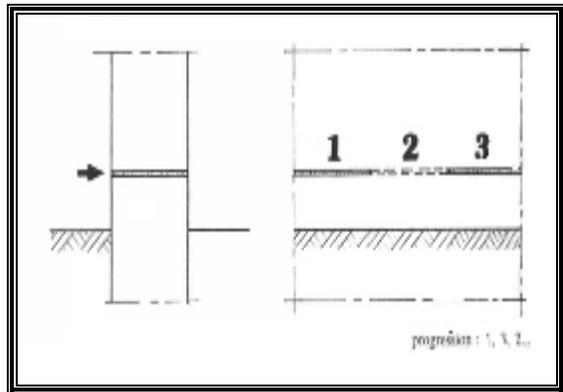
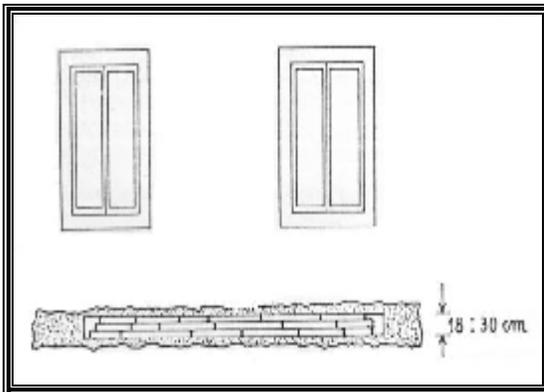


Fig. 4-16 : introduction d'une couche horizontale anticapillaire
Source : MASSARI G, 1971

Fig. 4-17 : sciage d'un mur par étape
Source : MUL, 1977

§ sciage de la maçonnerie et emplacement d'une étanchéité.

Cette opération s'exécute à l'aide d'une tronçonneuse à disque spéciale, au moyen de laquelle on réalise des saignées alternées successives d'environ 1 m de longueur (fig.4.17)

Après l'ouverture de la maçonnerie, on place une feuille imperméable et résistante à la compression, sur toute l'épaisseur du mur.

Selon Collombet (déjà cité), Les feuilles les plus utilisés sont : le plomb, cuivre, polyester, chlorure de polyvinyle, polyéthylène, roofing, asphalte, butyle...etc.

La saignée peut se faire d'un seul côté ou des deux côtés. Dans le cas où, il est possible de travailler des deux côtés, il est conseillé de faire les saignées inclinées à 30° qui sont ensuite remplies avec un mortier imperméable à base de résine (fig.4.18). Cette méthode est la plus « courante » mais elle est lente, onéreuse et limitée dans son application vis-à-vis des grandes épaisseurs des murs.

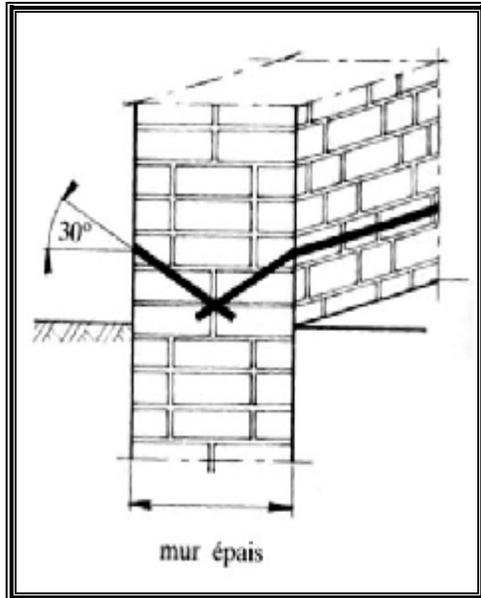


Fig. 4-18 : introduction d'une résine à la base d'un mur épais
Source : E.B Grunau, 1970

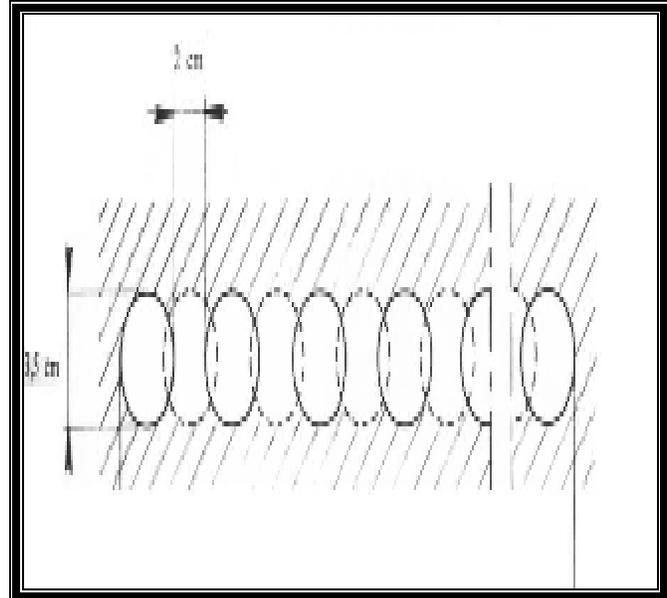


Fig. 4-19 : saignée réalisée au moyen d'un carottier.
Source : MUL, 1977

c) Méthode de Massari : Obstruction des vaisseaux capillaires au moyen de résine

Massari, utilise un petit carottier pour réaliser une fente régulière horizontale dans le mur à assainir. L'auteur propose de forer une première série de trous les uns à côté des autres, puis une seconde série intermédiaire pour extraire les parties restantes. (fig.4.19), la longueur de la saignée ainsi obtenue est de 42 cm sur 3,5 cm de hauteur qu'on remplit de mortier de résine polyester après emplacement d'une feuille de polyéthylène de 5/100 mm d'épaisseur, en guise d'isolant, dont les qualités sont précieuses du point de vue de la stabilité de l'édifice qui est taillé à la base.

Cette technique présente des avantages beaucoup plus importante que la méthode de sciage à savoir¹ :

- Fluidité suffisante pour remplir toutes les fentes jusqu'à une profondeur de 1,60 m ;
- Polymérisation complète en trois ou quatre heures ;
- Charge de rupture, après 24 h, non inférieure à 800 kg/cm² ;
- Absence totale d'ennuis.

Cette solution convient mieux du point de vue statique et pratique et a donné sans aucun doute de bons résultats.

¹ Grunau E.B, *La lutte contre l'humidité dans les façades*, Eyrolles, pp21-59, Paris, 1970

d) Emplacement dans les murs de plaques en acier inoxydable.

Cette technique consiste à introduire dans la maçonnerie à assécher des plaques en acier inoxydable en vue d'entraver l'ascension d'eau (fig.4.20). Les plaques peuvent être introduites selon le type et la nature de la maçonnerie, soit dans un des joints horizontaux ou bien après sciage en les plaçant en force dans les fentes. La pénétration s'effectue au moyen d'un marteau pneumatique de 20 à 40 kg. Ce procédé a été mis en œuvre sur des murs qui ne dépassent pas 60cm.

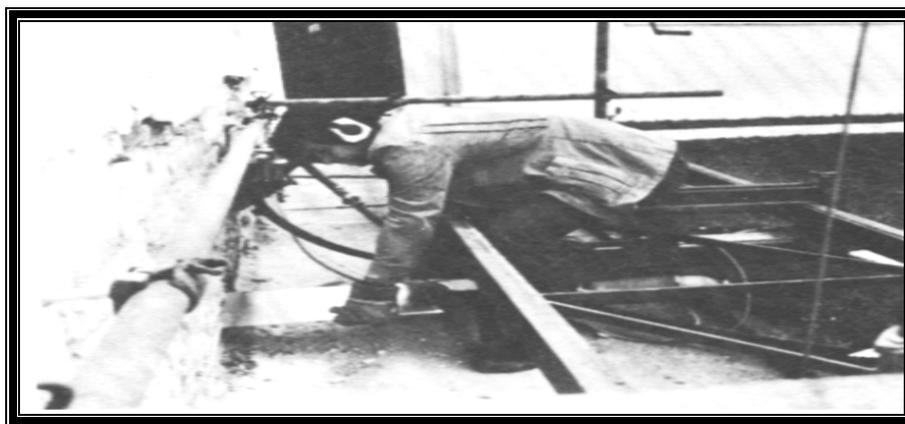


Fig. 4-20 : introduction d'une plaque inoxydable dans un mur à l'aide d'un marteau pneumatique.
Source : www. Rubson.com, 2005

e) Introduction dans la maçonnerie de produits imperméabilisants.

Cette méthode est plus facile à appliquer et rentable par rapport aux autres procédés : elle consiste à percer des trous espacés de 10 à 20 cm dans la maçonnerie à traiter. Ce travail peut se faire d'un seul côté ou des deux côtés selon l'épaisseur de la paroi (fig.4.21 ; 4.22a et 4.22b). Ensuite on introduit le produit imperméabilisant soit, par gravité, soit sous pression. (fig.4.23-4.24)

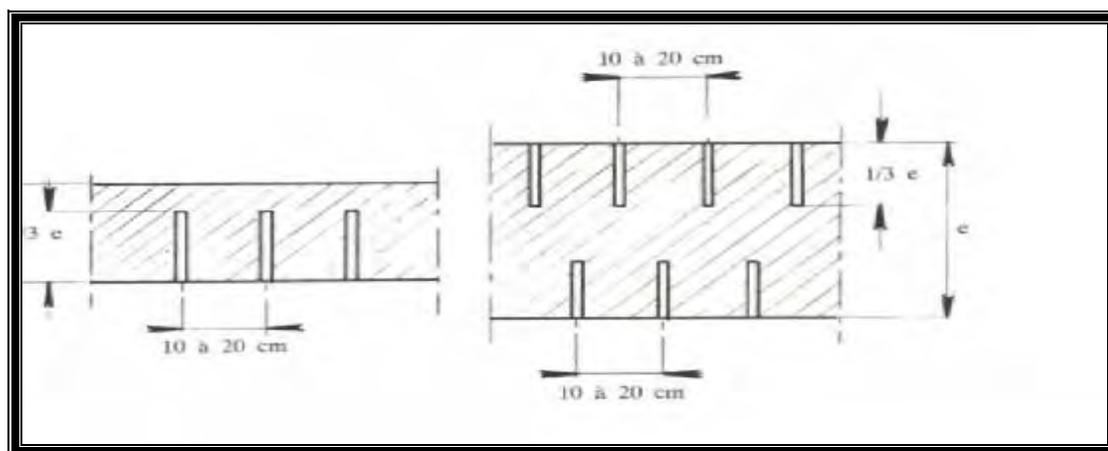


Fig. 4-21 : forage de trous dans la maçonnerie pour injection de produits imperméabilisants.
Source : Collombet. R, 1985



Fig. 4-22_a : percements de trous obliques



Fig. 4-22_b : percements de trous horizontaux

Source : www. Rubson.com, 2005

En principe, le produit progresse par capillarité dans le matériau (fig.4.23). Si l'introduction du produit se fait sous pression, alors chaque trou est relié par un tuyau à une pompe (fig.4.25), en prenant des précautions pour contrôler la pression qui ne doit pas dépasser les 4 bars pour éviter d'endommager le matériaux de construction.

Les produits utilisés par diffusion gravitaires sont en général les silicates et les siliconâtes¹. Mais ceux utilisés par injection sous pression sont surtout les résines acrylamides, les silicones, les méthylsiliconates et les stéarates d'aluminium.

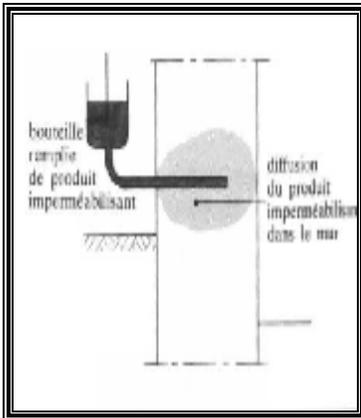


Fig. 4-23 : injection de produits imperméabilisants par gravité

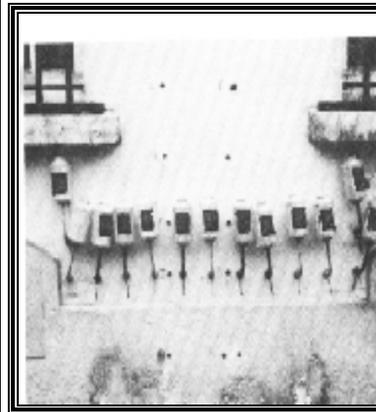


Fig. 4-24 : travaux d'imperméabilisation au niveau de la façade

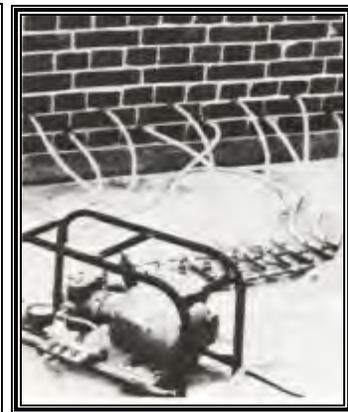


Fig. 4-25 : injection de produits imperméabilisants sous pression

Source : MUL, 1977

f) Travaux destinés à entraver l'eau sur son cheminement

Les procédures employés pour intercepter l'eau et l'empêcher d'atteindre la base des murs sont toujours les mêmes, soit :

¹ Rougeron Claude, *L'isolation Acoustique et Thermique dans le bâtiment*, Eyrolles, pp 68-103, paris, 1979

1) Tranchée périmétrique extérieure.

Il existe deux types de tranchées :

- Ø La verticale : creusée le long du périmètre extérieur d'un édifice (fig.4.26)
- Ø L'horizontale : aménagée intérieurement sous le plancher (appelée, soit plancher creux soit radier)

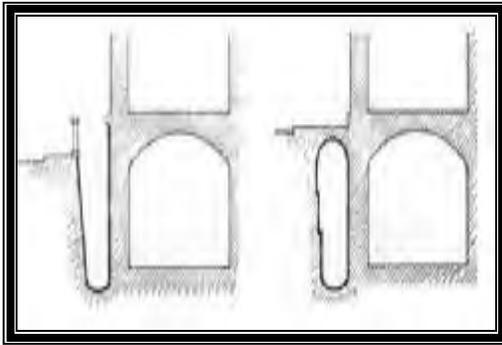


Fig. 4-26 : tranchée ouverte et tranchée fermée
Source : Sylvie Charbonnier, 1992

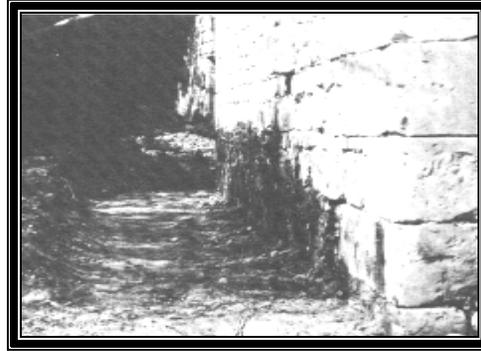


Fig. 4-27 : tranchée ouverte autour d'une bâtisse
Source : www.travaux.com, 2005

La tranchée verticale peut être ouverte ou couverte, une tranchée ouverte bien faite peut diminuer la hauteur d'absorption (fig.4.27), alors qu'une tranchée couverte est incapable d'arriver à ce résultat

La figure (4.28), montre, si l'humidité provient d'une source d'eau superficielle, elle pénètre latéralement, le remède sera : réaliser une tranchée conformément à la (fig.4.29), qui aura deux avantages :

- Empêcher la progression latérale en entravant la communication capillaire entre le terrain et le mur.
- Permettre l'évaporation de la paroi concernée, qui séparée de la source d'humidité, tend à sécher, à condition que la tranchée soit aérée (fig.4.30).

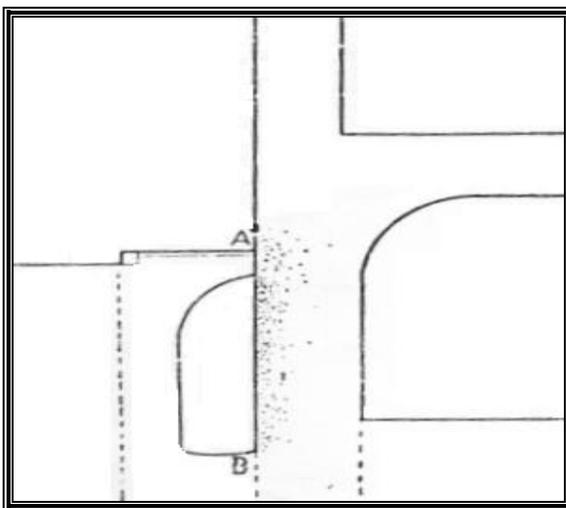


Fig. 4-28 : pénétration latérale d'eau superficielle

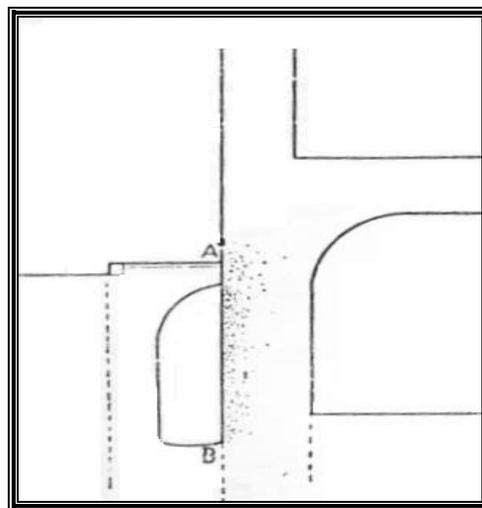


Fig. 4-29 : la tranchée peut intercepter l'eau perdue

Source: Massari G, 1971

Si dans le cas le plus dangereux : l'humidité pénètre latéralement et aussi par la base (fig.4.30), la tranchée ne peut couper la voie aux remontées capillaires, mais seulement contribuer à l'assainissement de la maçonnerie du premier niveau en permettant l'évaporation. La réussite de l'ouvrage est très relative et dépend exclusivement :

- § de la possibilité de le soumettre à une ventilation énergétique.
- § de la porosité de l'enduit (enduit perméable à la migration de la vapeur d'eau).

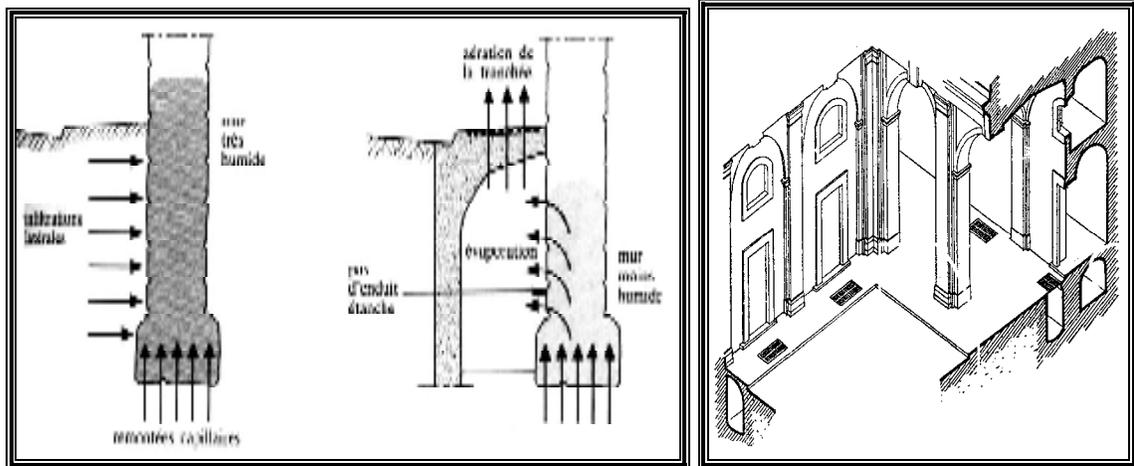


Fig. 4-30 : la tranchée n'arrête pas les remontées capillaires **Fig. 4-31** : la partie ensoleillée de la tranchée, reliée à la partie ombrée permet d'activer le tirage thermique
Source : Collombet. R, 1985 **Source** : Massari. G, 1971

D'excellents exemples de tranchées ouvertes vraiment efficaces se rencontrent à Rome, dans le cloître de l'école d'ingénieurs et dans l'abside de l'église S.Balbina.

Quant à la tranchée couverte, il faut activer l'aération et installer de véritables cheminées de tirage et éviter les minces canaux verticaux qui communiquent par le bas avec la tranchée, en voici quelques recommandations :

- Réaliser une tranchée continue, en reliant des tronçons diversement ensoleillés ou situés à des niveaux différents, de manière à ce que la différence de température active intérieurement le tirage (fig.4.31)
- Donner de large dimensions aux bouches d'aération ou aux lanterneaux, soit horizontalement dans le trottoir qui recouvre la tranchée, soit verticalement dans la plinthe du mur.(1m de grille, pour 4m de tranchée).

2) Tranchées horizontales ou les planchers creux

Les planchers traditionnels construits sur terre-plein (fig.4.32) sont également comme les murs, le siège de remontée capillaire et de condensation. La construction d'un plancher creux est la meilleure solution à appliquer dans les rez-de-chaussée ou les sous-sols. Le plancher creux du type « B » comme en construisait les Romains empiriquement, s'il constitue un remède contre les l'humidité ascensionnelle, il ne l'est guère contre l'humidité de condensation.

A cet effet de nouveaux radiers ont été proposés par des chercheurs, comme Massari, et qui ont pu arrêter les effets des deux types de condensations énoncés ci-dessus.

La figure (4.33), représente les modèles de radiers (du type Sanamuro) dont Massari a conçu et qu'il conseillait pour lutter contre l'humidité ascensionnelle provenant du sous-sol et contre l'humidité de condensation d'origine atmosphérique. Ce chercheur a donné quelques recommandations à suivre lors de la réalisation des planchers creux, à savoir :

- § n'employer que des matériaux de poids spécifique peu élevé et bien secs, en excluant de manière absolue : sable, gravier, tuf, grès et calcaires ;
- § placer l'asphalte non pas sous le plancher, mais sous le radier, de manière à ce que ce dernier demeure entièrement sec ;
- § éviter de poser directement le plancher sur des semelles et des structures en béton armé, même de courts tronçons, parce que toute assise de ce genre provoquera l'apparition de taches de condensation ; mais interposer un isolant, ne fût-ce qu'une brique perforée en panneresse, à défaut de mieux ;
- § veiller à ce que la résistance thermique totale du radier, calculée entre le niveau superficiel du plancher et celui du terrain, ne soit pas inférieure à $R=1\text{m}^2.\text{h}.\text{°C}/\text{cal}$
- § dans les endroits susceptible d'être plus froids (côtés non ensoleillés, lieux non chauffés en hiver, etc...), augmenter la résistance thermique au moins jusqu'à 1,5 au moyen d'un hourdis de remplissage en grains de ponce en vrac ou d'une couche de laine de roche, matériaux qui tous doivent être mis en œuvre très secs, puisqu'ils sont placés au-dessus de l'asphalte.

D'autres types de radiers répondant à des exigences particulières et plus complexes peuvent être adoptés selon le cas qui se présente

Notons que la ventilation des radiers ou du plancher creux de constructions récente et rationnelle, est déconseillé, vu que sous l'effet de l'évaporation engendre un refroidissement des dits radiers.

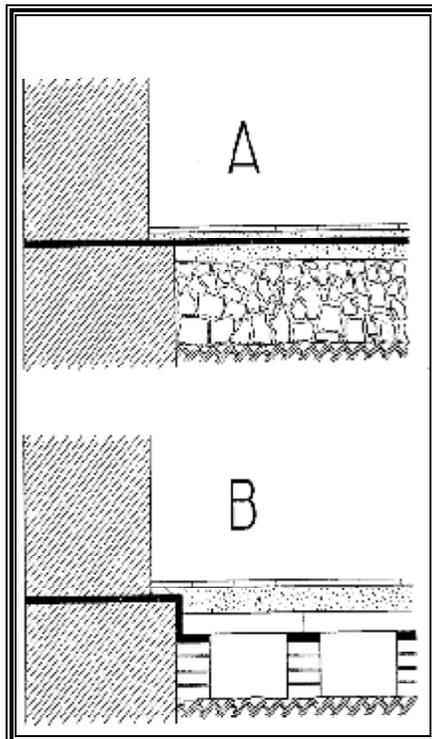


Fig. 4-32 : les deux types de radiers traditionnels :
Protègent contre les remontés capillaires
et non contre les condensations

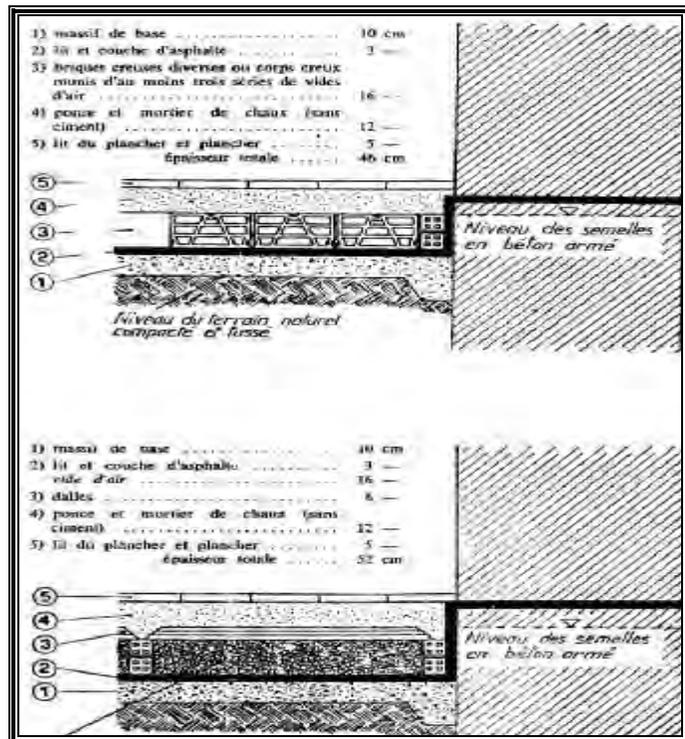


Fig. 4-33 : planchers efficaces contre les remontés capillaires et les condensations

Source: Massari. G, 1971

4.6.3 Assainissement des sous-sols. Méthodes des « trois maçonneries » et méthode « à sec »

a) Méthodes des « trois maçonneries »

Cette méthode consiste à une combinaison de plusieurs techniques en vue d'assainir le plancher et les parois, et ce dans le cas où l'humidité attaque le sous-sol de tous les côtés, soit :

1. la base de tous les murs porteurs ;
2. le plancher ;
3. parties latérales des murs périmétriques en contact avec le terrain.

Pour entraver l'humidité, trois travaux de maçonnerie sont nécessaires, appelés : **Méthode des trois maçonneries**, bien illustrées dans les figures (4.34 et 4.35) et décrites dans le tableau N° :04 où, il a été proposé deux combinaisons.

	Première combinaison	Seconde combinaison
1 ^{re} maçonnerie	Tranchée périmétrique extérieure.	Tranchée périmétrique extérieure.
2 ^e maçonnerie	Contre-mur sur la paroi intérieure.	Barrage dans l'épaisseur du mur
3 ^e maçonnerie	Plancher creux à vides d'air sur radier.	Couche isolante sur le plancher ou plancher creux à vides d'air.

Tab.4.4 : remède par la méthode des trois maçonneries. **Source** : Massari. G, 1971

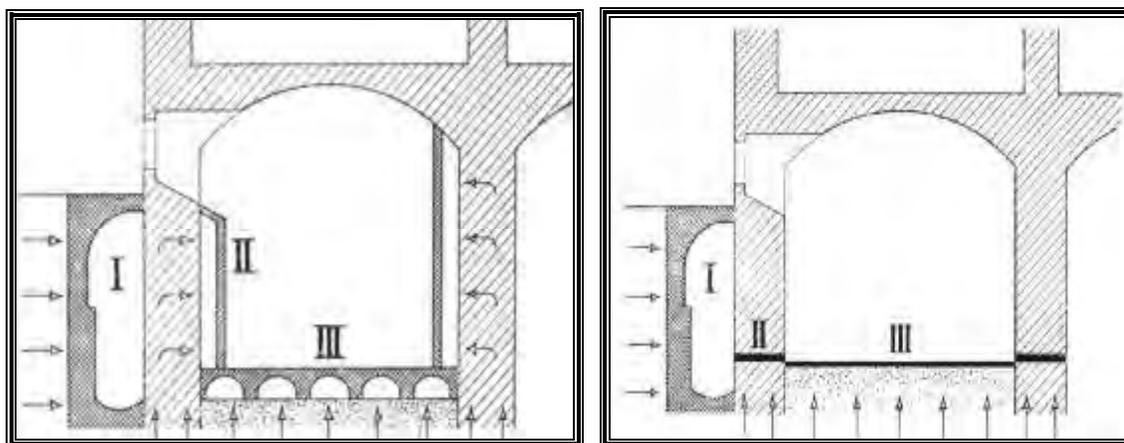


Fig. 4-34 : remède par la méthode des trois maçonneries
Première combinaison

Fig. 4-35 : remède par la méthode des trois
maçonneries deuxième combinaison

Source: Giovanni Massari, 1971

b) méthode « à sec »

Les conditions légales relatives au foncier ou d'ordres techniques vont parfois à l'encontre de l'application de la méthode des « trois maçonneries ». Alors, l'utilisation de la méthode à « sec » appartenant au groupe Sanamuro (fig.4.36) sera préférable et efficace puisqu'elle est rapide et n'exige aucun emploi d'eau, le seul inconvénient, c'est quelle rétréci l'espace.

La perte de place le long des parois intérieurs sera donc de 15 cm environ et la réduction de la hauteur du local d'environ 22 à 23 cm.

4.6.4 Techniques utilisés pour camoufler les effets de l'humidité de remonté capillaire sur les murs

Autrefois, dans l'antiquité, nos ancêtres n'avaient pas les moyens scientifiques et technologiques afin de lutter contre l'humidité. Probablement, la majorité devaient tous simplement s'en « accommoder », quant aux autres ont essayé d'en camoufler les effets comme le faisaient les romains en construisant le contre-mur, nous le verrons en détail plus loin.

Cette méthode de camouflage n'a pas disparu aujourd'hui et beaucoup d'entreprises continuent à l'utiliser sous différentes manières, à savoir :

a) Le revêtement imperméable :

Dans la lutte contre les remontés capillaires, nous assistons à des revêtements étanches inopportuns des murs surtout, au niveau des sous-sol humides. On utilise à cet effet toute sorte de matériaux et produits : asphalte, enduit hydrofuge, papier de plomb, feuille polyane, marbre, céramique, mosaïques, linoléum, caoutchouc, peinture et vernis étanches¹.

Ces pratiques entraînent l'emprisonnement de l'eau à l'intérieur des parois et empêchent leur évaporation. Ce qui provoque à long terme, le déplacement de cette humidité aux parties supérieures des ouvrages. Les figures (4.37_a et 4.37_b) présentent quelques cas parmi les plus courants de revêtement inopportuns.

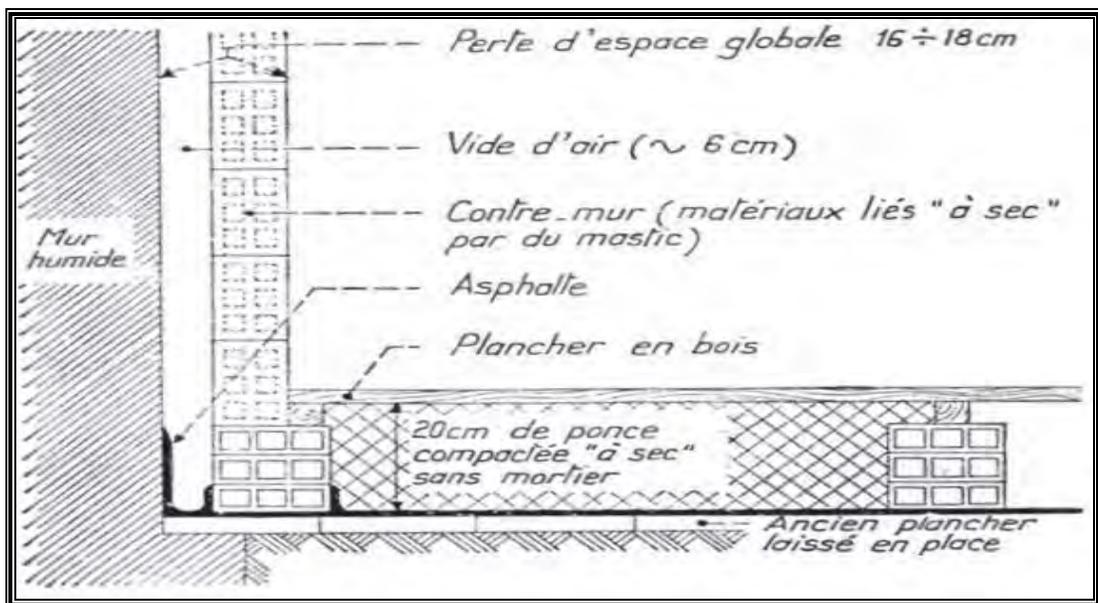


Fig. 4-36 : remède par la méthode « à sec » **Source:** Sylvie Charbonnier, 1992

¹ [Enligne] <http://www.travaux.Com>, 2005

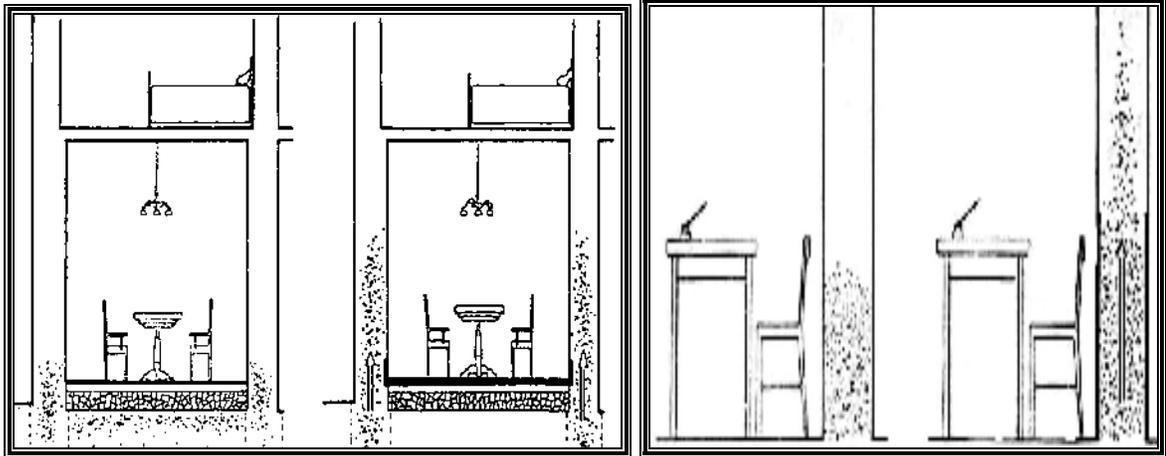


Fig. 4-37_a : application erronée d'un traitement
Imperméable « horizontal »

Fig. 4-37_b : application erronée d'un traitement
Imperméable « vertical »

Source : MUL, 1977

Donc, il est recommandé de proscrire ces types de revêtements imperméables, cependant, il serait judicieux de les utiliser soit,

- § en couche horizontale dans l'épaisseur du mur ;
- § en couche verticale sur la paroi extérieure dans les murs souterrains.

Ainsi, leur emploi sera efficace contre toute pénétration d'eau ascensionnelle ou latérale et leur effet est durable.

b) Le contre-mur intérieur

Le contre-mur intérieur est une technique qui consiste à édifier une paroi mince devant le mur porteur à masquer, en laissant un vide d'air d'une distance de 5 à 10 cm. Pour qu'il soit efficace, ce mur doit satisfaire à certaines règles, en voici quelques unes¹ :

- § aucun contact direct entre le contre-mur et le mur humide, sauf une connexion à base de bitume, de la même manière, entre la base du contre-mur et le plancher.
- § empêcher le passage de l'air humide au local à assainir ;
- § la ventilation du vide ménagé entre le mur et le contre-mur, n'est conseillé que dans le cas des remontés capillaires et conditionné aussi par l'ajout d'un isolant thermique pour éviter la condensation suite à l'éventuelle chute de température.
- § éviter le vide d'air fermé hermétiquement car il entrave l'évaporation de l'humidité et par conséquent provoque cette dernière à monter aux étages supérieurs par capillarité.

Il existe trois types de contre-murs utilisés (fig.4.38) à savoir :

- § le contre-mur à vide d'air communiquant avec l'extérieur par des orifices pratiquées dans le mur humide : type classique vitruvien ;
- § le contre-mur à vide d'air hermétique ;
- § le contre-mur à vide d'air communiquant par le haut avec l'intérieur et par le bas avec l'extérieur, entraînant de force l'évacuation de l'air humide.

¹ [Enligne] <http://www.irc.com>, 2005

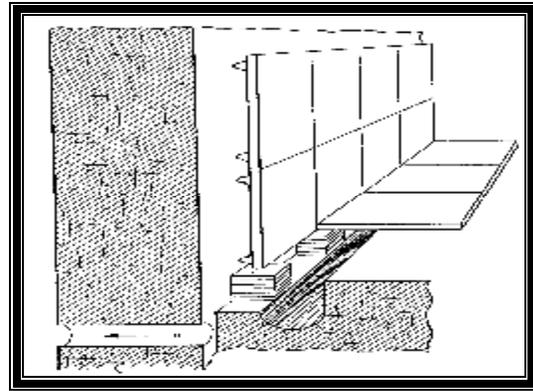
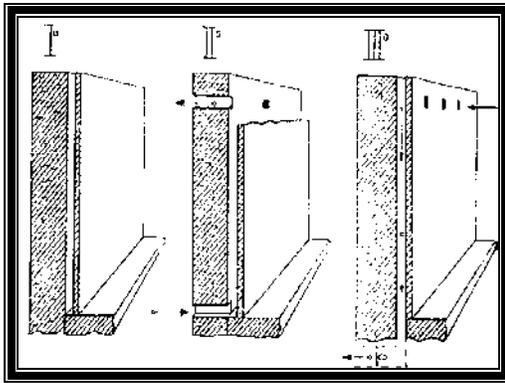


Fig. 4-38 : trois types de contre-murs corrects

Fig. 4-39 : contre-mur traditionnel, construit par les Romains

Source: Massari G, 1971

Le premier type

Cette solution a été recommandée par Vitruve (1er siècle avant J-C), dans son traité « De Architectura » (fig.4.38 et 4.39). Consiste à percer le mur humide de deux séries de trous en bas et en haut pour assurer un renouvellement d'air venant de l'extérieur ; construire une rigole sous le plancher pour évacuer l'eau recueillie vers le rejet à travers les barbacanes. Mais cette méthode risque d'abaisser la température de l'interstice, d'où refroidissement du contre-mur intérieur ce qui entraîne une condensation sur sa face intérieure. Donc, il faut isoler thermiquement le contre-mur.

Méthode de construction traditionnelle du contre-mur

Les Romains utilisaient une brique spéciale qu'ils appelaient « Tegula mammata »¹: Ce sont des dalles carrées de 58 cm. Ces derniers étaient posés sur tranche (fig.4.39) et fixés sur le mur humide au moyen de clous, après avoir été soigneusement enduites de poix sur la face exposée à l'humidité, de sorte que, par les mamelles, l'eau ne pouvait passer du mur humide au contre-mur. Un interstice de 5 cm, étant ainsi créé à l'aide des saillies entre le mur humide et le contre-mur, la connexion avec l'extérieur est déjà expliquée ci-dessus.

Le deuxième type

Le recours à ce système, se fait lorsque l'aération depuis l'extérieur est impossible. Cette solution présente l'inconvénient de faire monter l'humidité à l'étage supérieure (fig.4.38)

Le troisième type

Cette méthode préconise l'utilisation d'un système électromécanique pour aspirer l'air humide contenue entre le mur et le contre-mur et l'évacuer vers l'extérieur. Les orifices d'air ne peuvent être disposés que dans le haut, jamais dans le bas du contre-mur, pour éviter que, dans les moments d'arrêt de ce dispositif, l'air humide et froid du vide ne reflue dans le local à assainir (fig.4.40). C'est une solution assez complexe et onéreuse.

¹ [Enligne].<http://www.Guedelon.htm>, 2004.

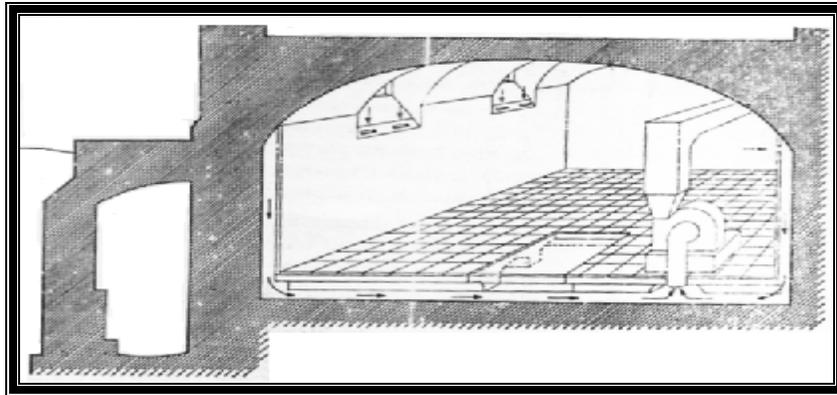


Fig. 4-40 : exemple de remède efficace appliqué à la Farnesina de Rome.
Source : Massari G, 1971

4.7 Remèdes contre l'humidité due à la pluie battante

Les infiltrations de la pluie pouvaient être dues à plusieurs causes : défaut d'étanchéité de certains ouvrages, fissures, joints dégradés, dégradation générale ou localisée des enduits ou épaisseurs insuffisantes de la maçonnerie...etc.

Avant d'intervenir afin d'apporter le remède adéquat, il est utile de procéder à un diagnostic d'abord. Lorsque la cause du mal est décelée, il faut la supprimer. Soit qu'il s'agit de réfection des joint ou d'un rejointoiement de maçonnerie ou de n'importe qu'elle autre dégradation. Seulement, il faut prendre des précautions lors du choix des produits qui doivent être compatibles avec la maçonnerie elle-même. Un bon exemple de réparation d'une fenêtre non étanche est illustré dans la figure (4.41).

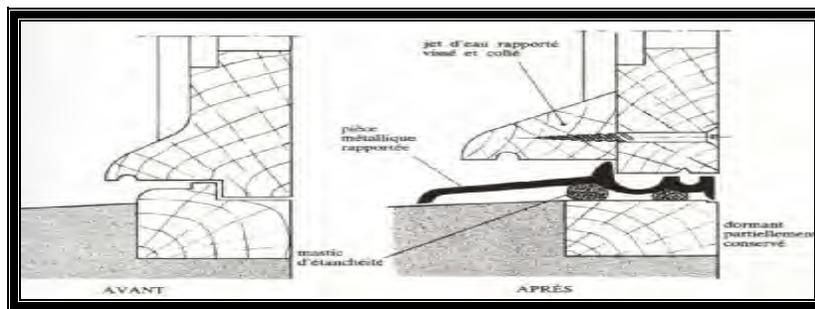


Fig. 4-41 : réparation d'une fenêtre non étanche à l'eau .**Source** : Collombet R, 1985

Les diagrammes de W.Schule (fig.4.42 et 4.43) permettent de montrer que :

- la pénétration de l'eau de pluie dans un mur en brique n'est pas profonde : ne dépasse pas les 7cm (enduit compris) ;
- L'évaporation à l'air libre peut assécher l'humidité causée par la pluie en quelques jours ;

Donc : il n' y a Pas d'infiltration de pluie de part en part du mur, La figure (4.44), porte la preuve originale que l'eau ne traverse pas le mur, après expériences faites par l'institut des logement populaires de la ville d'Avellino.

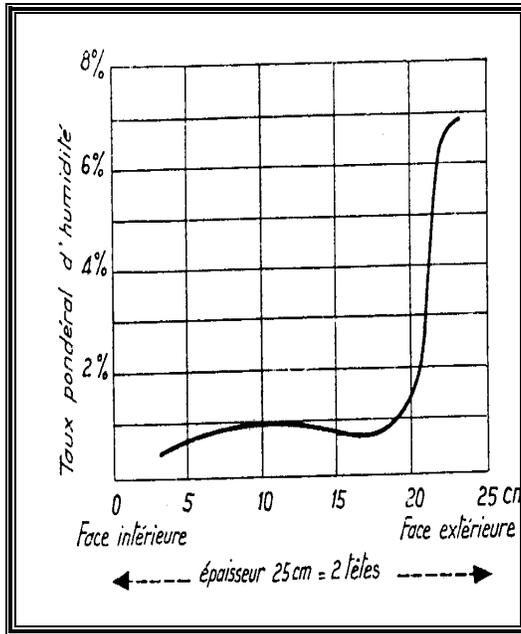


Fig. 4-42 : infiltration d'eau pluviale dans la maçonnerie
Ne dépasse pas 5 à 6 cm.

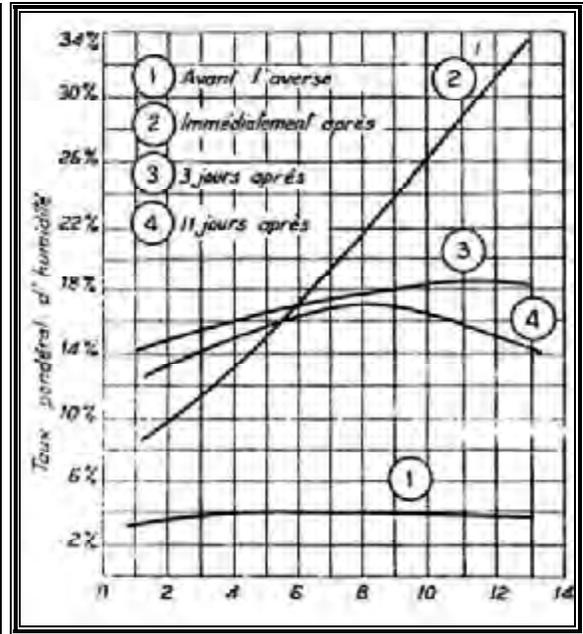


Fig. 4-43 : assèchement du mur après évaporation
De la pluie

Source : MASSARI G, 1971

La quantité d'eau retenue par le mur à la suite d'une infiltration latérale de pluie n'est jamais très élevée¹. D'où une humidité variable qui peut, néanmoins, devenir intense pendant certaines périodes d'averses très fréquentes, au cours desquelles l'évaporation n'est pas suffisante, entre deux absorptions, pour empêcher l'accumulation de l'eau. À cet effet la solution à ce problème et d'exclure de la paroi extérieure l'utilisation de tout matériau creux à canaux horizontaux.

Cependant, lors de mesures d'humidité dans un mur exposé à la pluie battante pour en déterminer la distribution, a révélé que la partie intérieure renferme le taux le plus important par rapport à celui de l'extérieur (fig.4-45). Du moment que, la pluie ne traverse jamais le mur, c'est donc un phénomène de condensation qui s'est produit suite au refroidissement de la paroi extérieure alternativement mouillée et asséchée. Sachant que, La diminution de la température de l'air sur le côté humide de la construction est évaluée en moyenne à 3°C

Le refroidissement de n'importe quel type de maçonnerie est réduit, si la surface en est défendue, contre l'absorption d'eau, soit par des parements de briques à « larmier » soit par des traitements périodiques aux silicones ou autres produits étanches. Le refroidissement est réduit, mais pas éliminé, c'est-à-dire, il faut compenser cette perte de chaleur par une isolation thermique convenable, et de chauffer les espaces intérieurs.

¹ Massari Giovanni, *bâtiments humides et insalubres*, Eyrolles, pp285-312, Paris, 1971

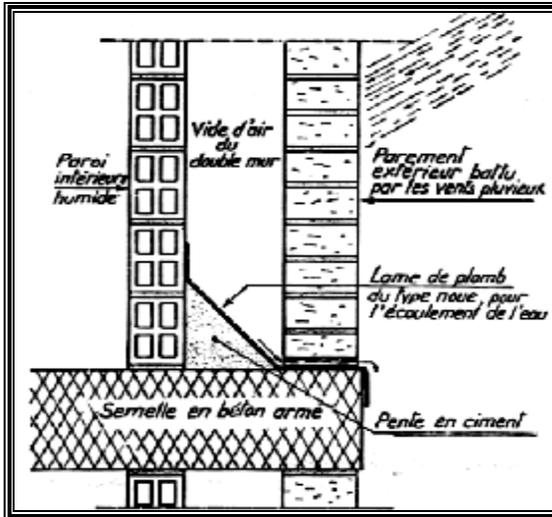


Fig. 4-44 : la lame de plomb introduite dans le vide d'air n'a apporté aucun effet : la condensation a persisté

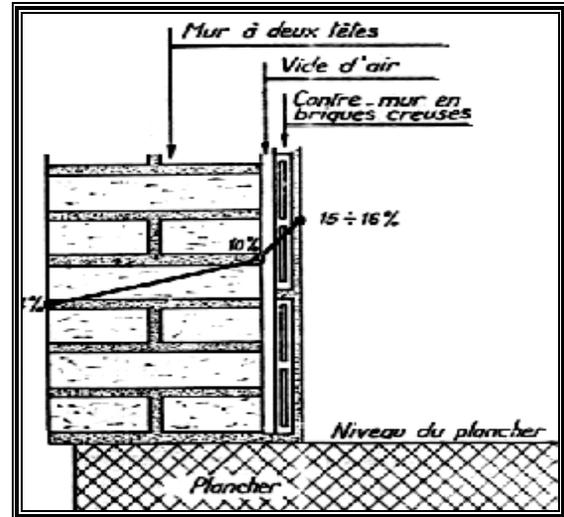


Fig. 4-45 : diagramme du taux d'humidité prouve que l'origine de l'humidité se trouve sur la paroi intérieure l'humidité se propage de l'intérieure vers l'extérieur par capillarité

Source : MASSARI G, 1971

4.7.1 Les revêtements de façades

Les façades sont périodiquement exposées aux intempéries auxquels elles doivent se défendre et assurer une bonne protection, pour ne pas permettre à la pluie battante d'y pénétrer. Le remède essentiel à préconiser est le revêtement étanche. Cette solution peut être efficace comme elle peut être défailante dans certains cas, où les recommandations techniques ne sont pas respectées, relatives au choix des matériaux adéquats et compatibles avec la nature des éléments constituant la façade¹. À cet effet, nous citons quelques types de revêtements existants et ensuite nous énumérons les critères de choix :

Quatre groupes de revêtement de façades peuvent être distingués à savoir (tab : 4.5):

Les enduits	<ul style="list-style-type: none"> - enduits traditionnels à base de chaux grasse et le plâtre ; - enduits traditionnels au mortier de liants hydraulique; - enduits non traditionnels (prêt à l'emploi) ; - les enduits de parement plastiques épais, constitué d'un liant synthétique (résine), de granulats, de charges inertes et éventuellement de pigment et d'adjuvants.
Les revêtements à base de liants plastiques	<ul style="list-style-type: none"> - les revêtements d'imperméabilisation (à base de résine) ; - les revêtements d'étanchéité comportant en plus des résines des revêtements précédents une armature en « non tissé » polyester ou en tissu de verre.
Les peintures	<ul style="list-style-type: none"> - les peintures ; - les revêtements à base décorative (carreau de grès cérame ou de pâte de verre).
Les bardages	<ul style="list-style-type: none"> - ardoise naturelle ; - amiante ciment ; - bois

Tab. 4. 5 : types de revêtements. Source : Massari G, 1971

¹ Grunau B. Edvard, *La lutte contre l'humidité dans les façades*, Éditions Eyrolles, Paris, 1970

Critères de choix

Le choix d'un revêtement de façade est primordial pour l'efficacité de son rôle et sa durabilité dans le temps. Pour cela, il faut vérifier la compatibilité du support avec son revêtement en matière de résistance chimique, mécanique et physique.

1. compatibilité chimique :

L'application du revêtement sur le support ne doit pas provoquer des réactions chimiques qui peuvent nuire à leur stabilité. Par exemple, la pose d'un mortier de ciment sur le plâtre, les sulfates solubles du plâtre produisent au contact des aluminates tricalciques du ciment du sulfoaluminate tricalcique « sel de candlot » dont l'effet gonflant détruit la texture du mortier qui perd alors toute cohésion.

2. compatibilité mécanique :

Le revêtement choisi doit posséder au moins les mêmes caractéristiques mécaniques (résistance à la compression et la traction) que celui du support afin d'éviter la formation des fissures. Prenons un exemple : L'enduit de ciment (rigide) appliqué sur le bois (souple), entraîne des fissures, à travers lesquelles l'eau de pluie passe. Cette eau stagnée entre eux provoque des pression et finie par détacher le revêtement de son support.

3. compatibilité physique :

Toute paroi est sujette aux échanges gazeux qui entraînent une migration de vapeur d'eau allant dans le sens de la pression partielle la plus forte vers la pression partielle la plus faible. Ces échanges ne doivent en aucun cas être empêché par le revêtement de façade. Dans le cas contraire, les revêtements et leurs supports seront détériorés.

Pour éviter ceci, le choix du revêtement sera fait sur la base de ses propriétés physiques tel que : le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau qui doit être au moins égale à celui du support.

4.8 Procèdes Destinees à évacuer l'eau qui imprègne les murs

Il n'existe, hélas ! Aucun procédé miraculeux pouvant assécher totalement les maçonneries humides, néanmoins le marché offre quelques moyens à la disposition des spécialistes en vue de les utiliser pour évacuer l'eau qui imbibe les parois à savoir :

- l'électro-osmose ;
- l'électro-osmose phorèse;
- les siphons atmosphériques.

4.8.1 l' électro-osmose

Ce procédé a été découvert depuis déjà un siècle, et ce n'est qu'en 1940 que P.Ernest obtint en suisse le brevet d'utilisation. Il s'agit de provoquer le passage d'un liquide à travers un corps poreux saturé d'eau en envoyant un courant électrique (fig.4.46 et 4.47). Certaines applications de ce procédé ont connu des succès comme au : château du Luxemburg et Hohenbrunn. Et parmi les échecs, l'assèchement du musée du jeu-de-paume à Paris. Donc, il semble que ce procédé n'est pas fiable à 100%. En outre l'humidité réapparaît dès que le système s'arrête.

4.8.2 l' électro-osmose phorèse

Cette méthode vient combler le déficit de l'électro-osmose cité ci-dessus. L'objectif est d'obstruer les vaisseaux capillaires du mur humide à l'aide de particules fines électrisées et portées par l'eau (fig. 4.48).

Le produit de phorèse le plus adapté, est la bentonite diluée dans de l'eau, que l'on introduit, dans la maçonnerie, par des saignées reliées au pôle positif. « Des particules colloïdales de bentonite, sous l'action d'un potentiel de 30 à 60 volts, tendent à passer dans les fondations et le terrain, et à bloquer ainsi le réseau capillaire et la montée ultérieure de l'eau »¹. Si l'opération réussie, le délai de fonctionnement de ce système ne dépasse guère deux années et les électrodes peuvent être enlevées. Par contre ses inconvénient : coût élevé par rapport à l'électro-osmose et le risque de non fonctionnement. En pratique, l'application de ce procédé est difficile et ses résultats sont aléatoires.

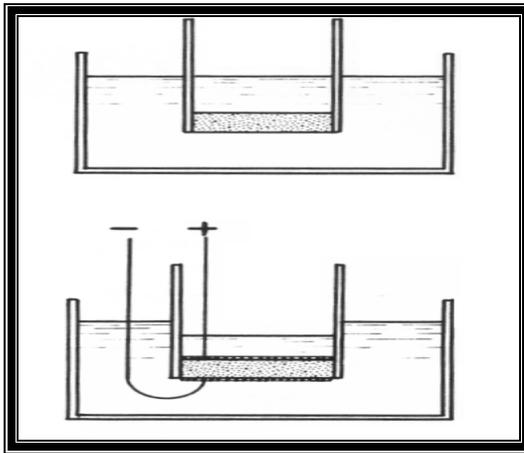


Fig. 4-46 : phénomène de l'électro-osmose terrain

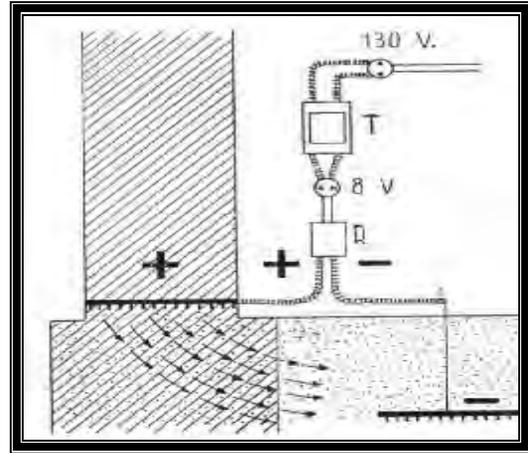


Fig. 4-47 : électro-osmose active par interposition d'une source de courant entre la maçonnerie et le terrain

Source : Collombet. R, 1985

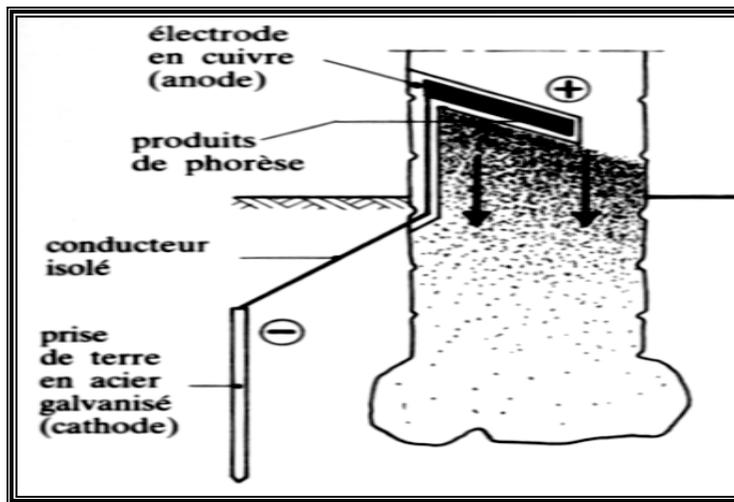


Fig. 4-48 : schéma d'une installation d'électro-osmose phorèse. Source: MUL, 1977

¹ Rougeron Claude, *L'isolation Acoustique et Thermique dans le bâtiment*, Eyrolles, pp 68-103, paris, 1979

4.8.3 Siphons atmosphériques de Knapen .

Cette méthode d'assèchement au moyen de siphons (fig : 4.49) est découverte par le belge A.Knapen. Elle consiste à extraire l'humidité des murs en effectuant des trous dans l'épaisseur de ces derniers (extérieurs ou intérieurs) sur environ les 2/3 de leurs profondeurs ; ensuite, on pose des tubes poreux d'une longueur de 30 cm et d'un diamètre de 3 cm environ, protégés par des grilles au niveau de leurs extrémités¹.

Le principe de fonctionnement théorique d'assainissement est basé sur l'expérience suivante (fig.4.50) : quand on plonge une éprouvette remplie d'eau dans un récipient contenant de l'huile tout en la maintenant penchée, l'huile monte et l'eau descend, car la densité du premier est plus lourde que la deuxième. Partant de cette expérience et par similitude, Knapen a imaginé que la même chose se produira entre l'air extérieur sec et l'air humide contenue dans le tube poreux (fig.4.51).

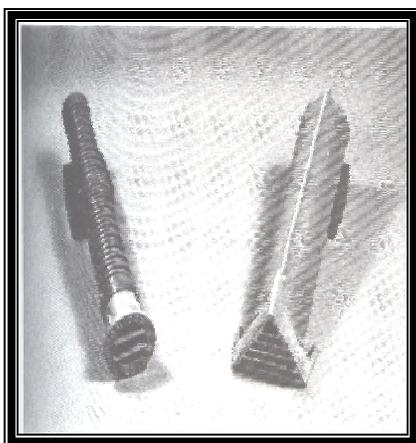


Fig. 4-49 : deux types de siphons atmosphériques

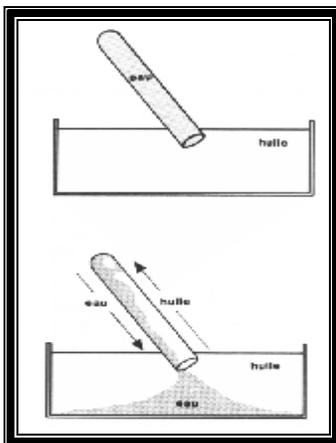


Fig. 4-50 : le principe sur lequel est basé le fonctionnement des siphons

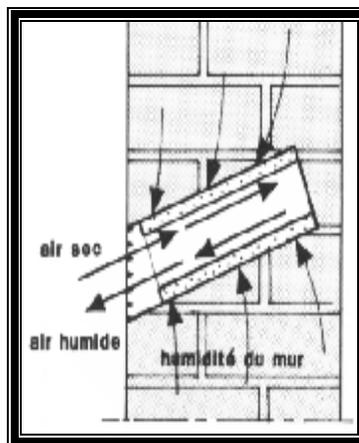


Fig. 4-51 : le principe de fonctionnement des siphons

Source : Raymond COLOMBET, 1985

Malheureusement, les bâtiments, où, il a été appliqué cette méthode, présentent encore, la plus part du temps, des manifestations importantes d'humidité, comme par exemple, dans la plinthe de la porta pia de Michel-ange, à Rome.

L'anglais A.Watson (1965), créateur d'un nouveau système de mesure de la variation d'humidité à l'intérieure d'un mur, par absorption de micro-ondes, a vérifié, au cours d'observations prolongées pendant deux ans, que dans les murs traités avec des tubes, aucune réduction du contenu d'eau initial ne se produit.

L'allemand Gunter Mall, dans Bauschaden (1968), avait démontré que les tubes sont non seulement inutiles, mais souvent nuisible, car, étant sujets à une condensation interne, ils peuvent faire monter le niveau de l'humidité dans le mur.

En conclusion : il n'est pas recommandé d'utiliser ce procédé et qu'il est à proscrire dans le cas d'une humidité ascensionnelle chargée en sels dissous. Parce que ces sels se déposent dans les

¹ Collombet Raymond, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985.p 135

siphons, et empêchent ainsi l'évaporation de l'air humide, puis attire cette dernière au cœur de la maçonnerie à cause de leur caractère hygroscopique.

4.9 Enduits spéciaux

Il existe dans le marché, plusieurs types d'enduits, ayant chacun un objectif précis dans la lutte contre l'humidité, à ce sujet on peut citer : les enduits hydrofuges, anticondensation ou évaporants. Les premiers étant mélangés au mortier de ciment, empêchent le passage de l'eau ; les seconds ne permettent pas à la vapeur contenue dans l'air de se déposer à l'état liquide, sur la surface du mur, et les derniers facilitent l'assèchement de l'ossature.

Les enduits les mieux connus, donc, les plus utilisés sont les enduits hydrofuges. Généralement utilisés sans aucune précaution sur n'importe quel support, et par conséquent, ils deviennent très dangereux pour le bâtiment. À cet effet, il est utile de passer en revue les règles suivantes.

4.9.1 L'enduit hydrofuge à base de ciment

- a) quelle que soit l'origine de l'humidité, l'application de ce type d'enduit sur les faces intérieures des parois est à proscrire.
- b) son utilisation est autorisée seulement sur la paroi extérieure d'un mur souterrain. Il est toujours préjudiciable sur les murs des étages supérieurs même s'ils sont aux intempéries.
- c) Il n'est opportun d'imperméabiliser la paroi intérieure que dans le seul cas où, dans un climat froid, la condensation interstitielle provoque le pourrissement du mur (fig.4.3) mais on applique, à cet effet, un dispositif absorbant et imperméable à la fois (fig.4.52), qui empêche l'eau de condensation de couler le long des parois. Excepté cela, aucun autre cas n'est toléré.

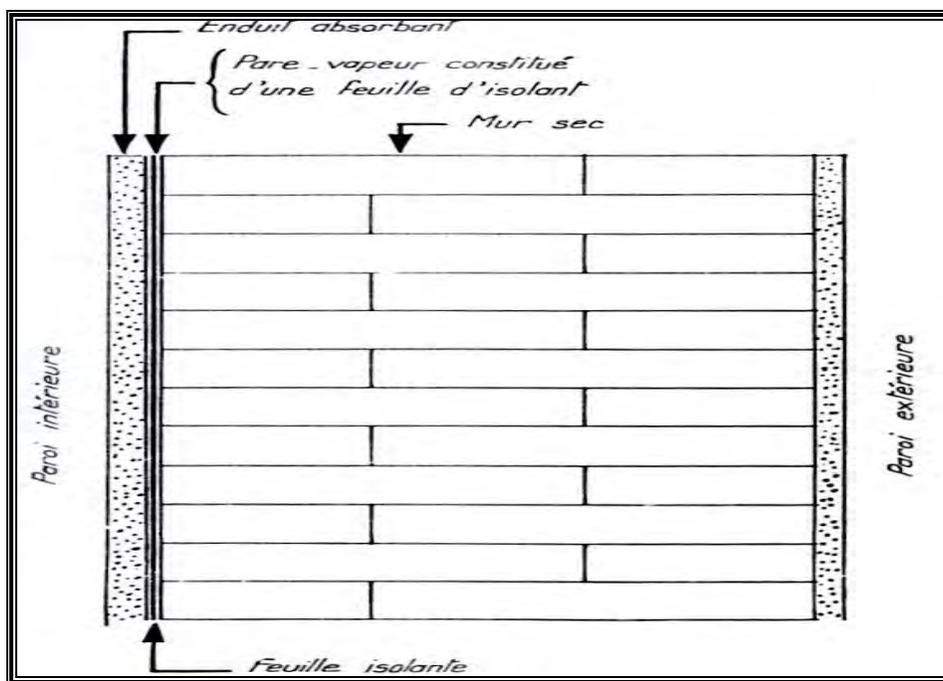


Fig. 4-52 : enduit absorbant appliqué sur un pare-vapeur : Remède efficace contre la condensation
Source : [Enligne].[http:// www.irc](http://www.irc), 2005.

4.9.2 L'enduit hydrofuge à base de chaux

Il est recommandé de l'utiliser sur les façades pour les protéger contre la pluie battante. Il permet les échanges gazeux à travers la paroi, donc faciliter l'évaporation de l'humidité¹.

4.9.3 L'enduit anticondensant

1. applicable seulement sur les surfaces intérieurs des murs car il est trop absorbant.
2. Est très efficace contre la condensation, à condition que l'ossature soit sèche ou peu humide, bien qu'il ne soit jamais nuisible sur la paroi intérieure même s'il y a erreur dans la détermination du type d'humidité.

Massari, recommande le mélange suivant d'un enduit absorbant et anticondensant :

1 volume de chaux

1 volume de pouzzolane tamisée bien mélangée au préalable.

2 volumes de perlite

Les qualités des différents enduits, pour ce qui concerne l'élimination de l'humidité produite à l'intérieur des locaux, ont été étudiés et jugée par Cammerer, mentionnées dans le tableau (4.6).

¹ Ministère de l'équipement, direction de la construction, *Amélioration thermique de l'habitat existant*, EYROLLES, Paris, 1977. pp84-89.

Composition de l'enduit	Tendance à l'absorption Quantité = Q Vitesse = V	Tendance à l'évaporation : quantité par unité de temps	Evaluation d'ensemble	
			Enduit intérieur	Enduit extérieur
Chaux et sable 1 : 3	Q normale V rapide	Très élevée	Très bon	Très bon
Ciment et sable 1 : 3	Q normale V lente	Mauvaise	A déconseiller	A déconseiller
Chaux ciment, sable 1 : 1 : 6	Q normale V médiocre	Modérée	Utilisable	Utilisable
Chaux ciment, sable 1 : 2 : 9	Q normale V rapide	Elevée	Bon	Très bon
Ciment ponce, sable 1 : 3	Q maximale V très rapide	Très élevée	Très bon	A déconseiller
Ciment et briques pilées 1 : 3...	Q grande V médiocre	Moyenne	Bon	A déconseiller
Ciment et farine de briques 1 : 3	Q grande V rapide Q normale V médiocre	Elevée	Bon	Très bon
		Elevée	Bon	Bon
Chaux hydraulique, 1 : 5.... ciment et sable 1 :	Q Très faible V très lente	Moyenne	A déconseiller	Bon
Idem, hydrofugée 1 : 1 : 5....	Q normale V lente	Très élevée	Bon	Très bon
Chaux, ciment, sable hydrofugé par de la céraïste 1 : 1 : 6	Q Faible V très lente	Mauvaise	Inutilisable	A déconseiller
Ciment et sable hydrofugé par de la céraïste 1 : 3	Q Faible V très lente	Mauvaise	Inutilisable	A déconseiller
Ciment et sable hydrofugé de tout type 1 : 3	Q grande V rapide	Moyenne	Très bon	Bon
Enduit terre-neuve				

Tab.4-6 : Capacité d'évaporation des enduits (d'après cammerer), in, Massari, 1971.

4.10 Conclusion

Le réemploi des bâtiments est une pratique aussi vieille que la construction elle-même, qui se justifie par l'intérêt économique ou culturel d'exploiter des parties d'ouvrages existants et de réinvestir des édifices pour leur situation et leur droit acquis du point de vue des règles et lois en matière d'urbanisme. La réhabilitation est un univers beaucoup moins normalisé que la construction neuve.

L'équilibre recherché entre confort visuel, confort thermique et coût global est devenu l'équation à résoudre pour tout projet contemporain. Cet équilibre doit être préservé lors d'une réhabilitation, et si possible avec plus d'enthousiasme quant les bâtiments sont menacés de pathologies graves.

L'étude de diagnostic est donc, le passage obligé de toute réhabilitation, afin de permettre au maître de l'ouvrage de décider s'il conserve ou non l'édifice, de hiérarchiser les priorités d'investissement, et de fixer le programme et l'échéancier des travaux.

Dans ce chapitre, il a été mis en exergue seulement le volet technique, où quelques techniques et procédures de lutte contre toutes les formes de l'humidité ont été étudiées. L'intervention doit viser l'élimination des causes d'apparition de l'humidité et de ne pas se contenter de traiter les symptômes.

Les remèdes existent et d'une grande variété, seulement, il faut savoir choisir la solution adéquate au type d'humidité déterminé par le diagnostic, d'autant plus que ce dernier peut déceler plusieurs sources.

Par ailleurs, si l'on observe les techniques traditionnelles, on découvre une véritable science dont l'efficacité est attestée par un nombre important de références. C'est évidemment une science traditionnelle, basée exclusivement sur l'expérimentation. Par conséquent, les solutions techniques, mises en œuvre dans une opération de réhabilitation doivent être compatibles avec la destination du bâtiment, l'aspect architectural, la nature des matériaux employés et le système constructif.

La mise à l'assèchement d'un bâtiment contribue efficacement à l'augmentation de la résistance thermique des parois ce qui influe directement et positivement, non seulement sur l'amélioration du confort thermique mais aussi sur l'économie des dépenses d'énergie. En outre, le bénéfice sur la consommation d'énergie permet aux occupants de compenser le coût des travaux de réhabilitation.

CHAPITRE 5 : VENTILATION

5.1 Introduction

En construction neuve, le problème d'aération ou de ventilation ne se pose pas, il existe des lois, des principes universels et des solutions techniques. Par contre en habitat déjà réalisé, il en va tout autrement : la réglementation reste à faire et chaque cas à traiter est un cas particulier.

La grande majorité des logements anciens, et beaucoup d'appartements récents, ne disposent pas d'un système de ventilation satisfaisant¹. Pourtant la ventilation est indispensable non seulement pour maintenir une température et un degré hygrométrique acceptable mais également pour limiter la pollution de l'air.

Ce chapitre traite tout d'abord, le « vent » à l'échelle urbaine, vu que son comportement est différent à celui en zone éparse. De l'impact des constructions sur l'écoulement du vent car, nous ne saurions envisager le confort et l'existence d'une ventilation à l'intérieur des bâtiments sans étudier ce phénomène à l'extérieur, puisqu'il a un effet directe sur les ambiances intérieures, « *Dehors est toujours un autre dedans* » dit le corbusier ; puis le rôle et les objectifs de la ventilation, les techniques et systèmes de la ventilation qui sont la source du flux d'air ainsi que le contrôle de cette dernière.

5.2 Le vent

5.2.1 - Définition

L'étude de la ventilation nécessite la compréhension du phénomène du « vent ». Le dictionnaire Larousse le définit comme étant, le mouvement de l'air qui se déplace d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. En d'autres termes, il peut être défini par le mouvement horizontal de l'air ambiant provoqué par la différence de pression entre certaines zones et qui tend à les équilibrer. Il faut qu'il y ait mouvement pour que les pertes de charges provoquées par celui-ci correspondent à la différence de pression provocatrice.

Le vent est donc de l'énergie qui correspond à l'énergie cinétique et qui est exprimée en unité de

pression par
$$E = p \frac{1}{2} v^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Il est considéré comme la donnée climatologique la plus variable, au cours d'une journée et d'une journée à l'autre. Ses variations ne concernent pas uniquement la direction mais aussi la vitesse ; celle-ci est en général plus faible la nuit que dans la journée.

La vitesse est une caractéristique essentielle du vent, elle provoque ses effets, et elle est proportionnelle à la hauteur au-dessus du sol suivant la formule² :

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{0,17} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Où, v1 et v2 représentent les vitesses du vent respectivement aux hauteurs H1 et H2 au dessus de ce qu'on appelle la couche de transition

Contrairement, à ce qui se passe aux hautes altitudes, près du sol (entre 0 et 500m), la vitesse du vent n'évolue pas de façon continue dans l'espace et le temps. Considéré comme laminaire aux

¹ Ministère de l'urbanisme, du logement, direction de la construction, *Guide pour l'amélioration des logements existants*, Eyrolles, Paris, 1977. P303.

²Dreyfus.Jacques, *Le confort dans l'habitat en pays tropical*, Eyrolles, Paris, 1960, pp155

hautes altitudes, l'écoulement de l'air près du sol est turbulent (agité): en un point donné la vitesse du vent fluctue en grandeur et en direction. La figure suivante (fig.5-1) montre la variation de la vitesse et son allure en fonction du temps. Elle peut s'exprimer sous la forme :

$$U_{(z)}(t) = U_{zm} + U'_z(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Où:

- U_{zm} : est la vitesse moyenne sur une période donnée
- $U'_z(t)$: est la fluctuation correspondante variable avec le temps.

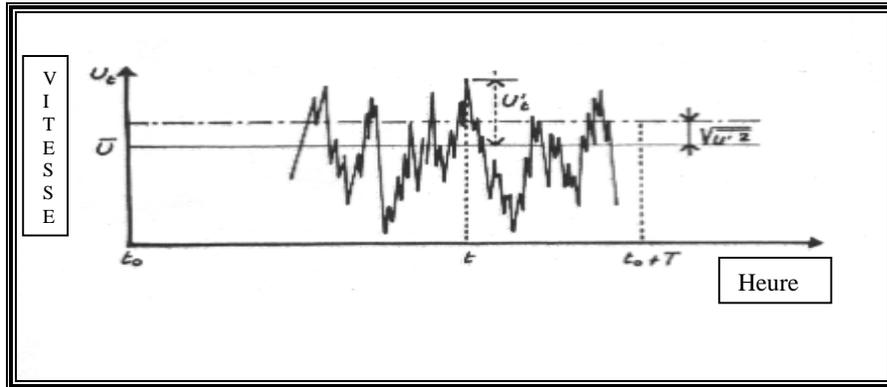


Fig. 5-1 : Vitesse du vent. **Source** : J.Gandemer, 1979, in T.A .N°325, p70

Pour toute localité, il est possible de dresser un diagramme appelé « Rose des vents » afin de déterminer les vents dominants pour chaque période de l'année.

Il est rare que la direction des vents dominants soit identique pour toutes les saisons.

Selon Dreyfus¹, dans une zone résidentielle où les obstacles au vent sont toujours nombreux, la répartition la plus probable des vitesses relatives aux différents étages d'un immeuble est la suivante :

- R.D.C..... 0,5 m/s
- 1^{er} et 2^{eme} étage 1 à 1.3 m/s
- 5^{eme} étage..... 1,5 m/s

De ce qui précède, on peut conclure que dans un tissu urbain, les occupants des logements situés aux étages supérieurs profitent mieux de la ventilation naturelle sous l'effet du vent ; il y a donc intérêt à surélever les constructions.

5.2.2 Le phénomène vent à l'échelle urbain

Les écoulements entre ensembles bâtis résultent des interactions entre le vent et les masses construites. La rugosité du site influe considérablement sur la vitesse du vent, notamment, au niveau du sol où elle est beaucoup plus faible qu'à une centaine de mètres plus haut (fig.5-2), ceci est dû aux frottements avec le sol et la présence des constructions.

Cette figure montre que la vitesse moyenne évolue en fonction de l'altitude et de la nature et la taille des aspérités du terrain, qui constituent au fait des rugosités variables².

¹ Dreyfus.Jacques, *Le confort dans l'habitat en pays tropical*, Eyrolles, Paris, 1960.

² Chatelet A, FERNANDEZ P, Lavigne P, *Architecture climatique : une contribution au développement durable.Tome2 : concepts et dispositifs*, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998. p45.

A cause de la rugosité, la vitesse moyenne du vent peut chuter de 30%, par rapport à ce qu'elle aurait été en rase campagne, le niveau de turbulence augmente et l'intensité peut doubler. Donc plus l'agglomération est dense plus la vitesse est faible. Toutefois, cette règle ne peut s'appliquer aux immeubles trop élevés, même s'ils sont situés dans un tissu ancien dense (fig.5-3), car des accidents aérodynamiques peuvent se produire aux pieds des éléments de grande hauteur (déviation du vent vers le bas).

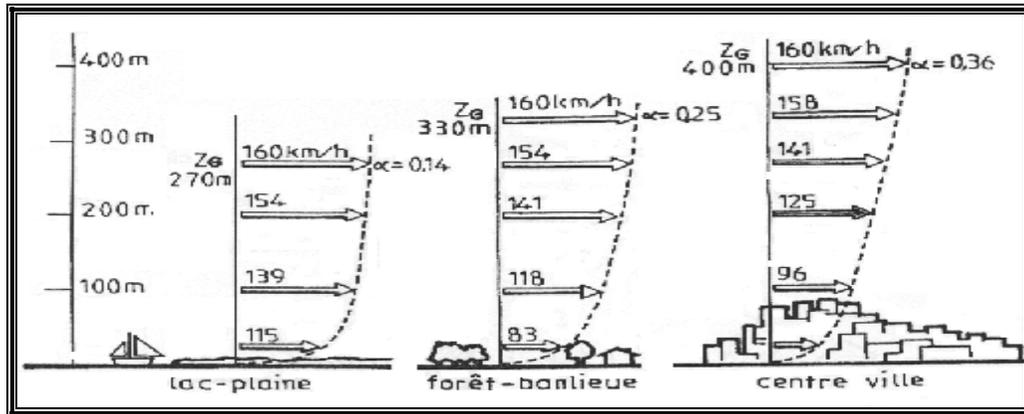


Fig. 5-2 : Variation de la vitesse du vent en fonction de la rugosité du site.
Source : A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

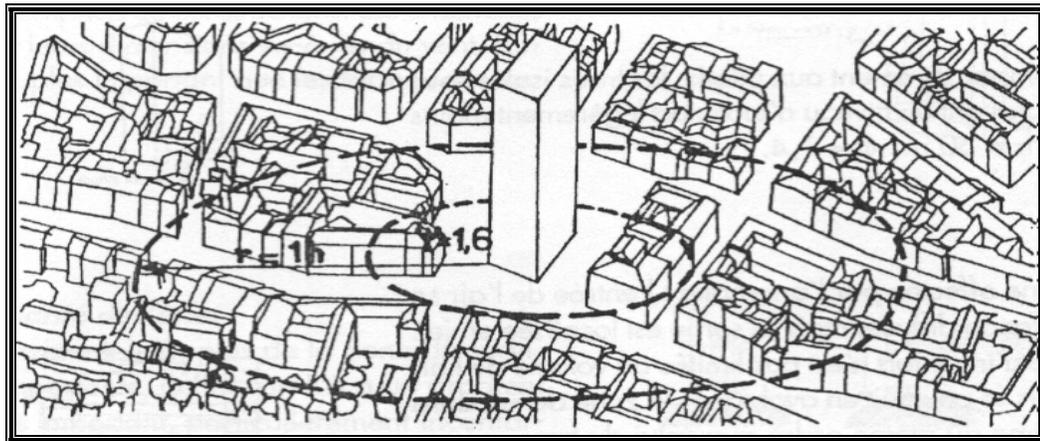


Fig. 5-3 : Densité élevé d'un tissu ancien /Accidents aérodynamiques au niveau bas de la tour
Source : A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

L'écoulement de l'air, au niveau des rues d'une ville dense (fig.5-16), suit le cheminement des rues et ruelles mais avec une vitesse de plus en plus faible, jusqu'à devenir presque nulle au niveau des rues perpendiculaires. Cependant, la vitesse du vent peut s'accélérer et la direction s'inverse au cas où il existe des gradients thermiques d'un endroit à l'autre (îlots ou quartiers).

Des échanges thermiques peuvent exister entre l'air frais venant de la campagne et l'air relativement chaud, dû à l'îlot de chaleur de la ville ; par conséquent, on obtient ce qu'on appelle la brise thermique. À l'échelle microclimatique, l'écoulement d'air frais ou brises

peuvent exister aussi, entre un espace bâti et un espace vert ou bien entre deux espaces bâtis différents. Mais leurs effets ne dépassent guère quelques centaines de mètres¹.

5.2.3 - Influence des constructions sur les écoulements d'air

Les bâtiments modèlent les écoulements par leur forme, leurs dimensions et leurs juxtapositions, en fixant la distribution des zones de pression différentes autour des obstacles (fig.5-4).

Le mouvement de l'air est affecté par la longueur, hauteur et type des toits des bâtiments qui influent sur les caractéristiques du vent et qui a un impact important sur le microclimat aux alentours des bâtiments. Le même effet peut être ressenti, ayant pour cause l'aménagement des îlots (morphologie urbaine), d'où : un mauvais agencement peut doubler la vitesse du vent et causer de terribles turbulences.

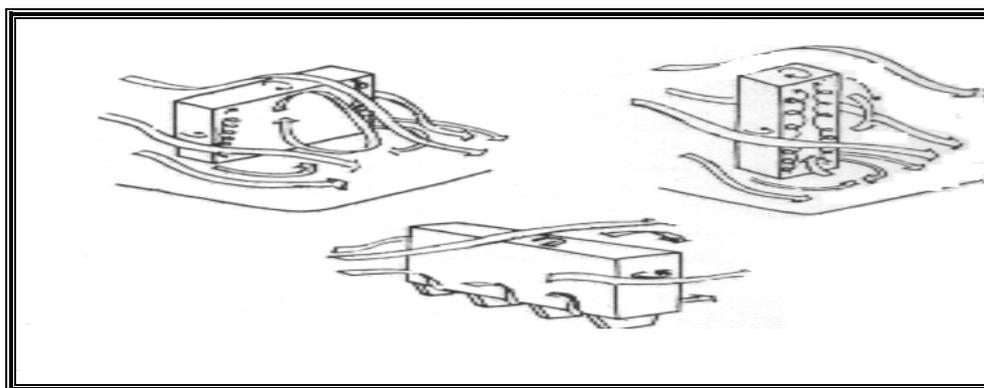


Fig. 5-4 : comportement du vent autour des constructions. Source : J.Gandemer, 1979

L'écoulement du vent au niveau du sol est conditionné par de nombreux facteurs, il dépend de l'interférence complexe qui se produit entre la turbulence du vent et les constructions existantes, qui constituent : soit un obstacle, soit un moyen pour diriger les flux d'air.

Lorsque le vent frappe un obstacle « parfaitement aérodynamique, le fluide s'écoule tout autour « parfaitement »². Par contre, les obstacles qu'on rencontre sont généralement de formes ordinaires ce qui engendre une multitude de phénomènes, voici, quelques cas courants :

a) **Obstacles bas :**

Dans le cas où les obstacles sont inférieurs à 15m, le vent a tendance de passer au dessus des masses avec peu de perturbations des filets d'air (fig. 5-5)

b) **Obstacles hauts :**

Les filets d'air sont perturbés par les obstacles dès le niveau des circulations¹. on constate des concentrations et des décollements des filets d'air. Dans le cas où il existe un seul bâtiment (fig.5-6), l'effet de coin se manifeste, c'est-à-dire : une accélération de la vitesse du vent aux coins.

¹Escourrou. G, *Le climat de la ville*, édition Nathan, géographie d'aujourd'hui, Paris, 1991.

² Chatelet Alain, Fernandez Pierre, Lavigne Pierre, *Architecture climatique : une contribution au développement durable. Tome2 : concepts et dispositifs*, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998.p46

Deux bâtiments peuvent créer un effet de venturi avec augmentation de la vitesse à l'étroiture (fig.5-7)

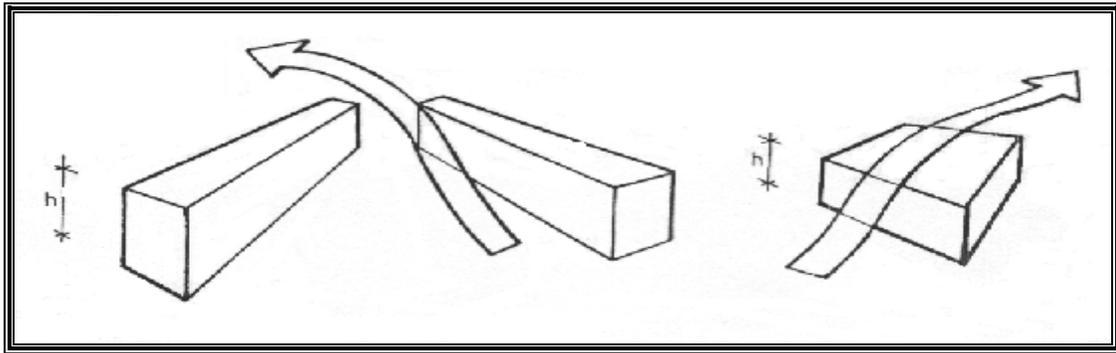


Fig. 5-5 : effet des obstacles bas (<15 m). Source : A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

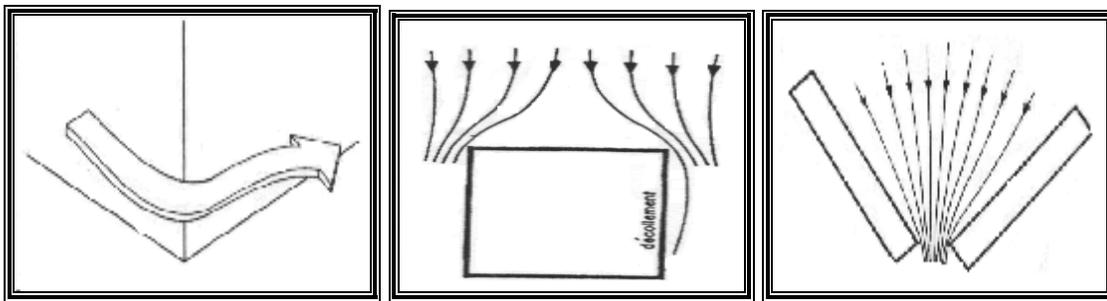


Fig.5-6 : Effet de coin
Source : J-L. Izard. A.Guyot, 1979

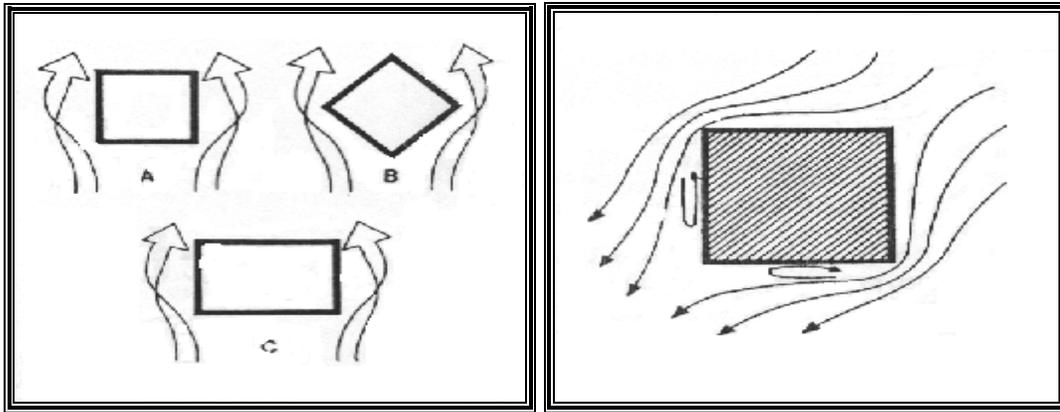
Fig. 5-7 : Effet de venturi
Source : A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

b) Obstacles à profils variants

L'idée d'implanter un bâtiment en angle, en supposant que l'arrête du coin favorisera l'écoulement du vent n'est pas recommandable : cette configuration accroît la largeur apparente exposée au vent et on observera des infiltrations supérieures à la configuration d'un bâtiment implanté dans le sens du vent (fig.5-8a).

En outre, on observera des décollements des filets d'air qui peuvent entraîner des tourbillons (fig.5-8b)

L'effet de rouleau peut se produire aussi sur la façade exposée au vent d'un immeuble, cet effet affecte la partie descendante du flux qui s'organise en rouleau tourbillonnaire à axe horizontal sur les deux façades du bâtiment (fig.5-9).



a)

b)

Fig. 5-8 : Effet de la forme du bâtiment sur l'écoulement d'air

Source : D.Watson & R.Camous, 1986

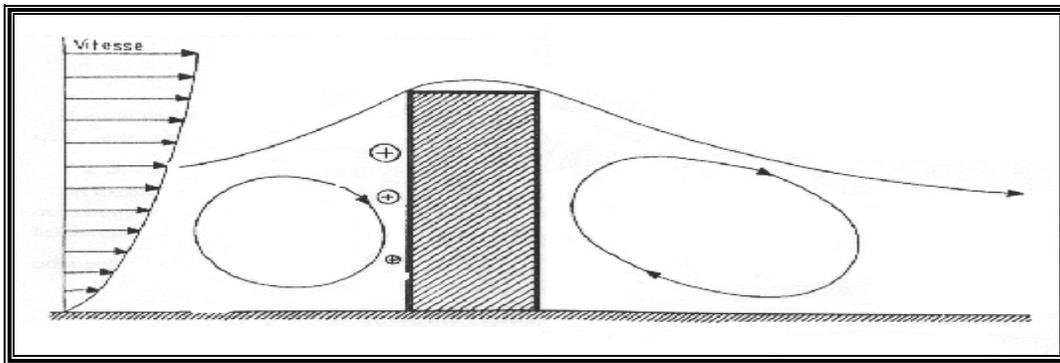


Fig. 5-9 : Effet de rouleau. **Source :** A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

Ce que l'on peut déduire de la figure (5.9), c'est que les surpressions sont d'autant plus importantes que l'altitude est élevée.

Les tourbillons de la façade sous le vent sont souvent plus complexes et peuvent se présenter sous forme de sillage (fig.2-10)

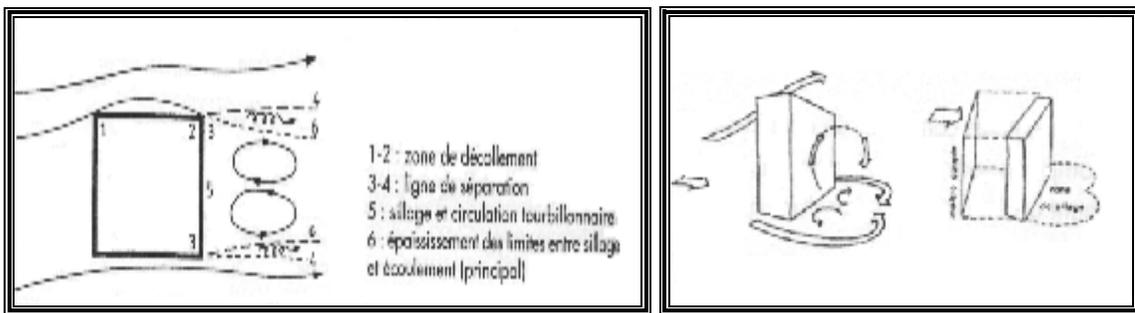


Fig. 5-10 : Effet de sillage

Source : A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

Source : J.Gandemer, 1979

c) **Obstacles combinés** :

Il n'existe pas un cas théorique type idéal, le concepteur peut localiser les zones de surpression au vent et les zones de dépression sous le vent, puis représenter les filets d'air qui passent à partir des pressions les plus élevées vers les plus basses. Dans la figure: 5-11, un courant d'air inattendu va naître dans une rue que personne n'attendait. Par conséquent, chaque cas de figure doit faire l'objet d'une étude spécifique, en prenant en compte les principes de base de l'écoulement de l'air.

Après avoir pris connaissance des notions sur le comportement du vent aux alentours des constructions, il serait indispensable de prévoir quelques systèmes ou méthodes pour lutter contre les méfaits des vitesses galopantes du vent, surtout au niveau du sol où le confort extérieur est à rechercher :

Prenons le cas des constructions à patio ou cour, le concepteur doit veiller à ce que le vent passe par-dessus et par côté tout en évitant les décollements des filets et les tourbillons (fig.5-12), au moyen de solutions architecturales.

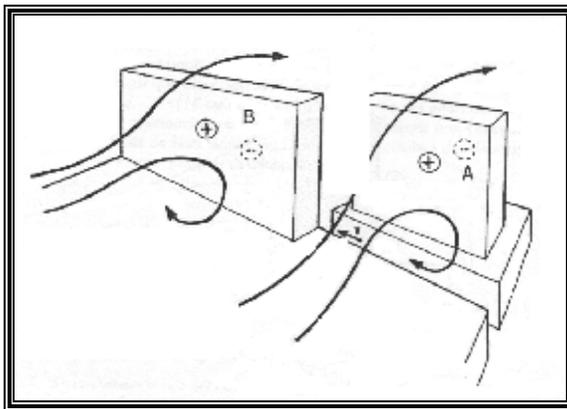


Fig. 5-11: Courant d'air créée par plusieurs obstacles

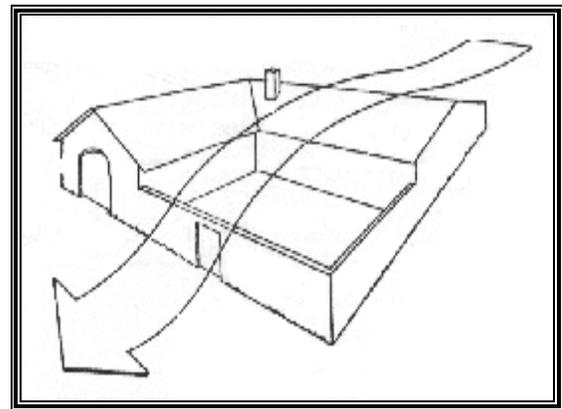


Fig. 5-12 : déviation du vent au dessus des cours ou patios

Source : A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

Augmenter la rugosité (éviter les surfaces lisses), installer des barrières à l'aide de la végétation ou par claustras selon la destination de l'espace, afin de diminuer la vitesse du vent par pertes de charges (fig.5-13).

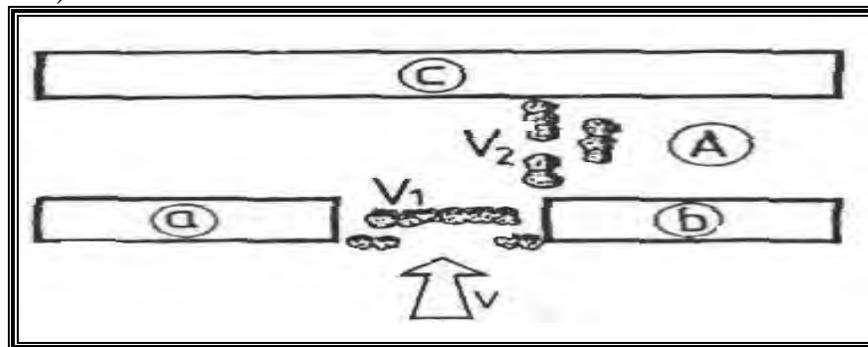


Fig. 5-13 : barrières végétales : Création des pertes de charges
Source : A.Chatelet, P.Fenandez, P.Lavigne, 1998

Cette figure(5.13) montre comment, nous pouvons palier aux grandes vitesses, en climat froid, par l'implantation de la végétation aux points V_1 et V_2 , situés entre les blocs a,b et c. pour créer une perte de charge, afin d'exploiter les espaces extérieurs pour des activités sportives, jeux, récréations...etc.

5.2.4 Les Zones calmes ou abritées

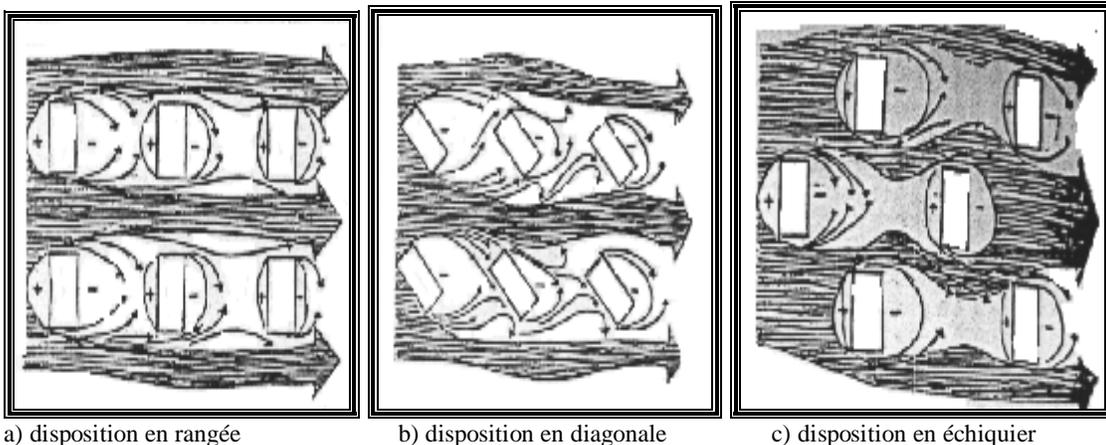
Les zones « sous le vent » sont généralement abritées des grandes vitesses des vents.

Depuis l'antiquité, les agriculteurs utilisaient la végétation comme moyen efficace de protection contre les vents forts. Ainsi le freinage de la vitesse du vent, générée par les obstacles quelques soient leurs natures (naturel ou artificiel), a un effet, qui se prolonge en arrière de l'obstacle, à une distance appréciable.

Les zones abritées sont influencées par, l'agencement, l'orientation et la géométrie des bâtiments :

a) L'agencement des immeubles

Une mauvaise disposition des blocs, peut entraîner une juxtaposition des zones calmes de part et d'autres des immeubles (fig.5-14), empêchant ainsi une fluidité de l'écoulement d'air, ceci peut se produire seulement si, la distance entre bâtiments est inférieure à 6 fois la hauteur de ces derniers. Par contre la (fig.5-14.c), présente une meilleure solution pour le déplacement d'air, donc : l'organisation en échiquier permet de diminuer les problèmes de confinement d'air.



a) disposition en rangée

b) disposition en diagonale

c) disposition en échiquier

Fig. 5-14 : zones calmes créées par l'agencement des bâtiments. **Source** : M. Evans, 1980.

b) la porosité urbaine :

Elle dépend de la géométrie des espaces extérieurs et de leurs densités, notamment le profil urbain qui détermine la nature du flux d'air (fig.5-15), c'est un facteur important, du contrôle du niveau de pénétration du vent dans les espaces urbains qui influe sur la ventilation des locaux intérieurs.

c) L'orientation des blocs

L'organisation et l'orientation des bâtiments et du réseau viaire doivent prendre en considération la nature du climat, ainsi la conception d'une ville côtière est différente à celle d'une ville du sahara. Tandis que la première doit s'ouvrir en orientant ses voies dans le même sens des vents de telle façon à récolter les brises de mer, La seconde doit faire obstacle aux vents chauds et poussiéreux du désert (fig.5-16).

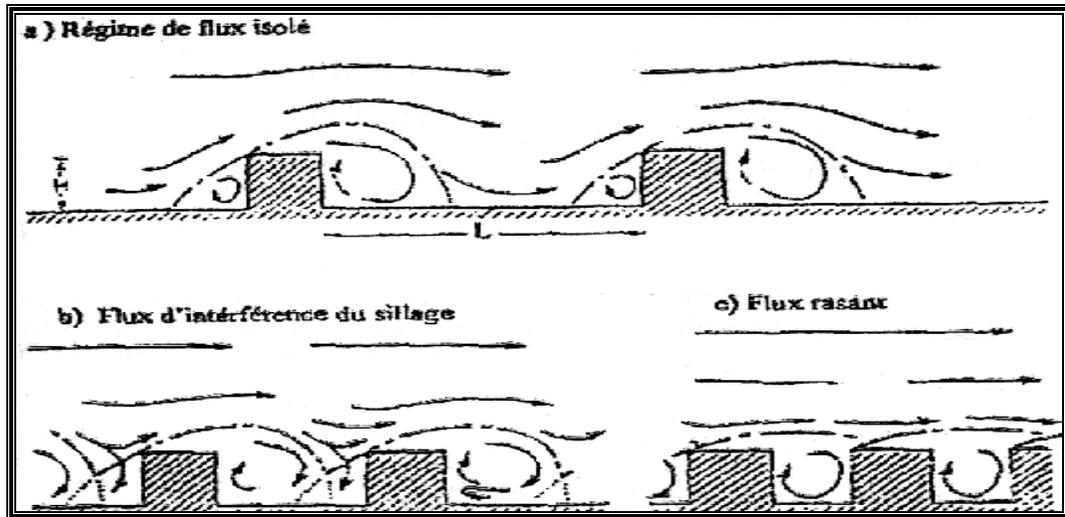


Fig. 5-15 : La porosité urbaine, dont dépend la ventilation à l'intérieure des locaux.
Source : Oke, 1988)

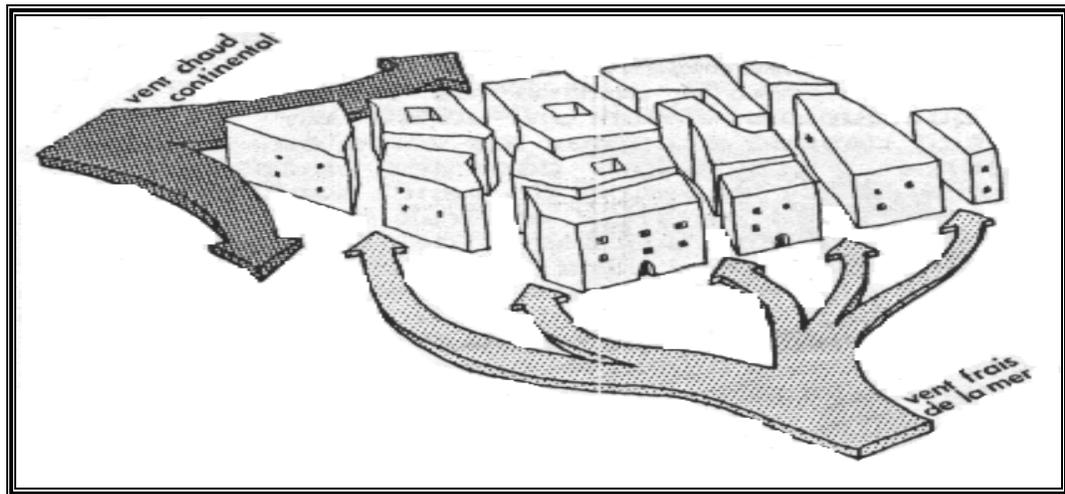


Fig. 5-16 : protection contre les vents chauds et canalisation des brises
Source : J-L. Izard. A.Guyot, 1979

d) La forme des constructions

Les dimensions des zones de protection générées par les constructions sont tributaires de la forme, taille et volumétrie de ces dernières (fig.5-17). Donnons quelques exemples :

- a) la forme en « I », dont la longueur : $2a$, sachant que la direction du vent est perpendiculaire au bâtiment, donne une zone de protection d'une largeur de : $3a$
- b) la forme en « arc », de même dimension et orientation, fournit une zone de protection d'une largeur de : $6a$

Lorsque la disposition des bâtiments est en biais par rapport à la direction des vents dominants, la zone de protection qui en résulte diminue énormément.

5.3 Rôle et objectifs de la ventilation

On entend par ventilation, le déplacement d'air à l'intérieur de la construction. C'est aussi le renouvellement de l'air dans le local, lequel se mesure en nombre de fois par heure. On distingue deux types : naturelle ou mécanique. La ventilation est naturelle lorsqu'elle est provoquée en absence de tout appareillage mécanique. Elle peut s'effectuer à l'aide de deux moteurs « naturels » qui sont : le tirage thermique et le vent :

Le principe de fonctionnement du tirage thermique est basé sur la différence de densité entre l'air froid et l'air chaud ; le premier tend à s'abaisser, tandis que le second s'élève. Le tirage thermique est accéléré quand la température intérieure s'élève.

L'autre moteur « naturel » : le vent, fonctionne suivant un principe différent : quand le vent frappe un bâtiment, il crée une pression sur la face exposée et une dépression sur les autres ; Pression et dépression étant proportionnelles au carré de la vitesse du vent selon la relation (4) ci-dessous¹ :

$$P = C \cdot V^2 / 1,63 \quad [\text{Pa}] \quad \dots\dots\dots (4)$$

Ces « moteurs naturels » dépendent des conditions météorologiques et leur efficacité est tributaire des conditions climatiques. Le tirage thermique fonctionne dans le bon sens en hiver, parfois en mi-saison, jamais en été. Le vent de son côté change de direction et de force, il provoque des mouvements d'air à l'intérieur du logement et son action est difficilement contrôlable. Toutefois, la ventilation dite « transversale » due au mouvement d'air qui traverse les pièces d'un bâtiment, de la façade antérieure vers la façade postérieure, reste la plus commode en usage.

Une bonne ventilation intérieure lors des périodes humides est considérée comme une exigence du confort. Si l'air intérieur a une vitesse élevée, la sensation d'inconfort, due à un excès d'humidité ou à une température trop élevée, se trouve atténuée. Par conséquent, si l'on se place au point de vue du confort, la ventilation a une influence directe sur ce dernier, d'où elle peut être considérée comme un facteur déterminant du confort physiologique de l'homme. Ainsi deux fonctions essentielles se dégagent :

- Ø Assurer l'hygiène de vie et le confort des occupants en cherchant à évacuer de chaque pièce les polluants de l'air tels que : humidité de l'air, odeurs, microbes et produits de combustion des appareils à gaz.
- Ø Protéger la construction des désordres dus à une aération insuffisante tels que : condensation et amplification de moisissures.

Le but de la ventilation, c'est aussi de procurer suffisamment d'air pur sous les conditions climatiques extrêmes : d'une façon efficace et agréable.

À cet effet, Le renouvellement de l'air apporte, d'une part, l'oxygène nécessaire à la vie humaine et d'autres parts assure l'évacuation des vapeurs d'eau et des gaz, produits par les occupants eux même et par leurs activités (tel que : cuisson, toilette et lessive). Ce changement d'air pollué par de l'air neuf permet d'éviter la formation de la condensation sur les parois. Si ce n'est pas le cas, le degré hygrométrique de l'air s'élève, ce qui engendre le développement de moisissures, d'où une sensation d'inconfort.

¹ Debomy. Pierre L, *l'amélioration des logements existants*, Eyrolles, paris, 1977, p67.

Dans certains cas, les condensations qui se sont produites dans la masse des parois ont affecté les structures, notamment les anciennes ossatures¹. Les conséquences d'une ventilation insuffisante peuvent donc être dramatique pour les occupants.

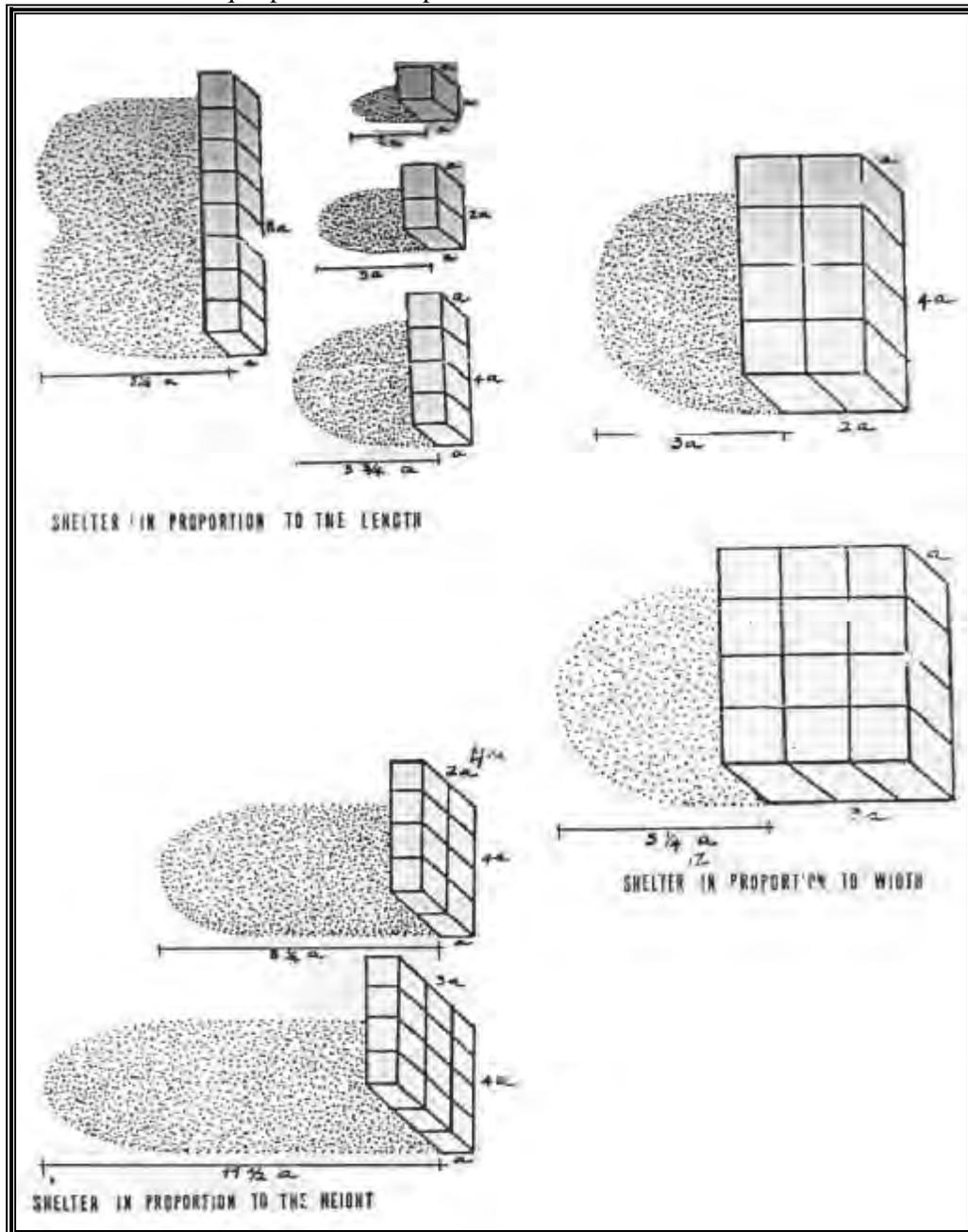


Fig. 5-17 : Longueurs des abris du vent, derrière les constructions, selon la volumétrie
Source : M.Laurie, 1975

¹ Ministère de l'urbanisme et du logement, direction de la construction, *Guide pour l'amélioration des logements existants*, Eyrolles, Paris, 1977 p303.

On admet qu'une personne au repos consomme 20 à 25 litres d'oxygène par heure et rejette 20 à 25 litres de gaz carbonique : la consommation d'un litre d'oxygène produit un litre de gaz carbonique¹.

Rappelons que l'air contient approximativement 21% d'oxygène, la vie peut être conservée pour une teneur minimale de 13% à condition que le corps soit au repos.

Dans un sous-marin, il a été relevé jusqu'à 5 % de gaz carbonique sans accident notable. Les accidents mortels surviennent pour une teneur de 20% (²).

En général, les sources de pollution de l'air sont donc, non seulement d'ordre humain (occupants) mais aussi proviennent de la combustion des gaz (cuisine). Par conséquent, le renouvellement d'air qui s'impose pour des mesures d'hygiène est proportionnel à l'utilisation du local; ainsi, quelques indications ordinaires sont mentionnées dans le tableau (5.1)

<i>Désignation de l'Espace</i>	<i>Fréquence de renouvellement Volumes / heures</i>
<i>Bureaux</i>	03
<i>Classes</i>	3 à
<i>Salle d'eau</i>	7
<i>Garages</i>	5
<i>Cuisines (appartement)</i>	2
<i>Salles de bains</i>	2 à 3
<i>cinémas</i>	15
<i>cafés</i>	10 à 20
<i>Cuisines (restaurant)</i>	20 à 30

Tab. 5-1 : débit de renouvellement d'air admis.

Source : Couillard. D et Bouige. R, 1981

Dans les pays tropicaux, un renouvellement d'air par heure semble satisfaisant du point de vue de l'hygiène³.

La ventilation influence aussi de façon indirecte, sur les éléments qui constituent le confort, comme la température intérieure et la température radiante. D'après, Dreyfus¹ : «... , d'une part, permet de maintenir l'air intérieur sensiblement à la même température que l'air extérieur ; d'autre part, accélère le refroidissement des parois intérieures des constructions et, simultanément, tend à diminuer la température radiante moyenne intérieure ». En zone froide, le problème de maintenir la température de l'air intérieur sensiblement égale à celle de l'air extérieur se posera, à la fois de nuit comme de jour, vu que l'air extérieur est très froid.

En zone chaude, le problème se pose autrement, sous l'influence du rayonnement solaire, l'air extérieur est très chaud le jour, si la ventilation est insuffisante dans une construction à inertie thermique faible, la température intérieure sera supérieure à celle de l'air extérieur.

5.4 Techniques et systèmes de la ventilation naturelle

Le déplacement de l'air à travers un immeuble peut être provoqué par la différence de pression qui est à l'origine de deux actions :

- action des vents ou force du vent
- gradient thermique ou force thermique

¹ . Couillard. D et Bouige.R, *chauffage ventilation, climatisation*, Eyrolles, Paris, 1981.p172

² DEOUX suzanne et pierre, *le guide de l'habitat sain*, MEDICO, Andorra, 2002.pp31-37

³ Dreyfus.Jacques, *le confort dans l'habitat en pays tropical*,Eyrolles, Paris, 1960, p149.

5.4.1 Ventilation provoquée par la force du vent

le vent agissant sur une battisse provoque des surpressions sur la face ventée et des dépressions sur la face opposée, il pousse l'air contre les ouvrants de la façade au vent, et l'aspire au contraire à travers la façade sous le vent. D'où l'existence d'une zone à haute pression et d'une zone à basse pression sous l'effet du vent (fig.5-18).

D'après READ (1953), le flux d'air ainsi créé est dévié sur les cotés et au-dessus du bâtiment et caractérisé par une surpression non uniforme qui diminue tout en s'éloignant du centre de la zone en surpression. Les variations de pressions sur le mur exposé à un vent perpendiculaire sont faibles, cependant, si le vent est oblique, on constate une chute brutale de pression en allant de l'arrête exposée au vent vers l'arrête sous le vent (fig.5-19).

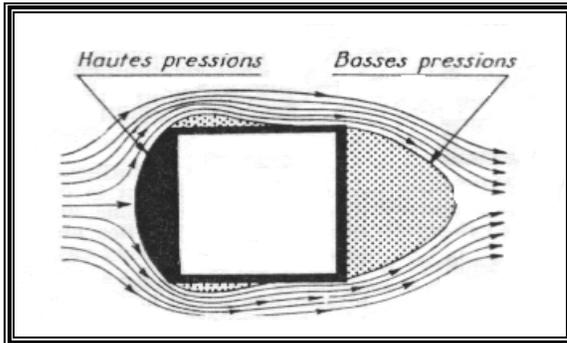


Fig. 5-18: Zone de haute pression en avant et basse pression en arrière
Source : Dreyfus, 1960

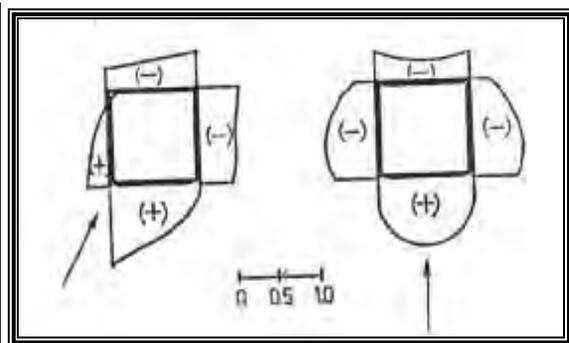


Fig. 5-19 : Distribution schématique des pressions autour d'un bâtiment
Source : B. Givoni, 1978

D'après Givoni.B¹ : « Lorsque l'angle d'incidence est voisin de 45°, la surpression sur les arrêtes dans la direction du vent disparaît pratiquement, et sous les angles inférieurs, c'est la dépression qui apparaît ».

On note aussi que, les variations de la pression de l'air dans les zones de dépressions sont moindres à celles des zones de surpression, la figure (2-19) montre que la dépression sur les parois sous un vent perpendiculaire est plus importante vers l'amont, et sur la paroi postérieure, elle diminue au fur et à mesure du centre vers la périphérie. Par contre, quand le vent est oblique, la dépression sur les deux faces non exposés et sur la toiture se réduit dans le sens du vent.

La pression dynamique pour des conditions de température normales est donnée par le rapport de pression suivant :

$$\Delta P(d) / \frac{1}{16} V^2 \dots\dots\dots (5)$$

Où :

- ΔP exprime la pression en mm d'eau.
- V : vitesse du vent en m/s.

Le gradient de pression, entre deux points quelconques de l'enveloppe d'un bâtiment permet de déterminer ce qu'on appelle : le potentiel de puissance génératrice de ventilation pour les ouvertures prévues en ces points.

Selon Givoni1, « le rapport de pression $\Delta P (d) / \frac{1}{16} V^2$ est un critère quantitatif grâce auquel il est possible d'évaluer les effets de nombreux facteurs parmi lesquels on trouve la direction du

¹ Givoni B, *Passive and low energy cooling of building*, John Wiley & Sons, INC, New York, 1994.

vent, la proximité d'objets formant des obstacles ou la présence d'arbres la forme du bâtiment et la position des ouvertures en vue de la ventilation. Dans l'autre sens, on peut utiliser certaines distributions schématiques de la pression de l'air sur l'enveloppe du bâtiment pour estimer le gradient entre divers points »

Des approches expérimentales ont été entreprises par Irminger, Nokkentved au Danemark, N.B.R.I de prétoiria et Bahadori¹, où des investigations ont été menées sur l'influence de la direction du vent, de la forme du bâtiment et des obstacles extérieurs sur le rapport de pressions. Les résultats obtenus par Irminger et Nokkentved sont résumés et illustrés dans la figure (5-19) La toiture dans ces expériences, reste soumise à une dépression, quelque soit la direction du vent, avec des fluctuations relativement de faible grandeur.

Quant au CSTB en France, il a essayé de développer une méthode simplifiée de calcul approximatif des gradients de pressions. Il a proposé deux distributions de pression schématique sur un bâtiment d'enveloppe rectangulaire pour un vent de direction normale et oblique. Lorsque le vent est perpendiculaire à l'un des murs, on admet que la pression sur la face exposée est égale à la pression dynamique (Δp), et la dépression sur les trois autres faces est égale à $-0,3 (\Delta p)$. Lorsque le vent est oblique de 45° , il est admis que la pression sur les deux murs exposés au vent sur l'arête amont est égale à la pression dynamique et quelle diminue de manière linéaire jusqu'à zéro vers les arêtes aval ; la dépression sur les deux murs abrités du vent est égale à $-0,5 \Delta P^2$.

En fin, on peut conclure que la distribution schématique des pressions peut être utilisée pour l'estimation du rapport de pression entre deux points quelconques. La notion de rapport de pression est utile pour l'estimation du taux de renouvellement d'air dans des espaces construits ou pour estimer les gains et les pertes de chaleur par infiltration.

la distribution des pressions sur les murs exposés au vent, peut être utilisé pour provoquer une ventilation transversale même dans les pièces n'ayant qu'une seule paroi extérieure. Lorsque l'on dispose des ouvertures sur des points soumis à des pressions différentes, il se déclenche un flux d'air entre elles.

La différence de pression est proportionnelle à la puissance des mouvements d'air, même lorsque les fenêtres sont fermées, le gradient de pression est responsable d'un flux d'air par infiltration. Plus le gradient est élevé plus le mouvement d'air est fort

5.4.2 Ventilation provoquée par la force thermique ou tirage thermique

Dans les conditions où il existe une différence entre la température de l'air à l'extérieur et l'intérieur, il se crée une différence dans les densités de l'air, les gradients de pressions verticaux sont alors différents à l'intérieur et à l'extérieur des pièces.

C'est ainsi que le principe de tirage thermique fonctionne, il est basé sur la mise en mouvement de l'air sous l'effet de la différence de masse volumique entre l'air extérieur (froid) et l'air intérieur (chaud). Le premier tend à s'abaisser, tandis que le second s'élève. Le tirage thermique est accéléré quand la température intérieure s'élève (fig.5-20). C'est ce que réalise une hotte. La dépression correspondante est proportionnelle à la différence de température entre intérieur et extérieur, et à la hauteur entre les niveaux d'entrée et de sortie de l'air.

¹BAHADORI M.N, *an improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling*, Solar Energy, 1985.

². Givoni.B, *l'homme, l'architecture et le climat*, Le Moniteur, Paris,1978.

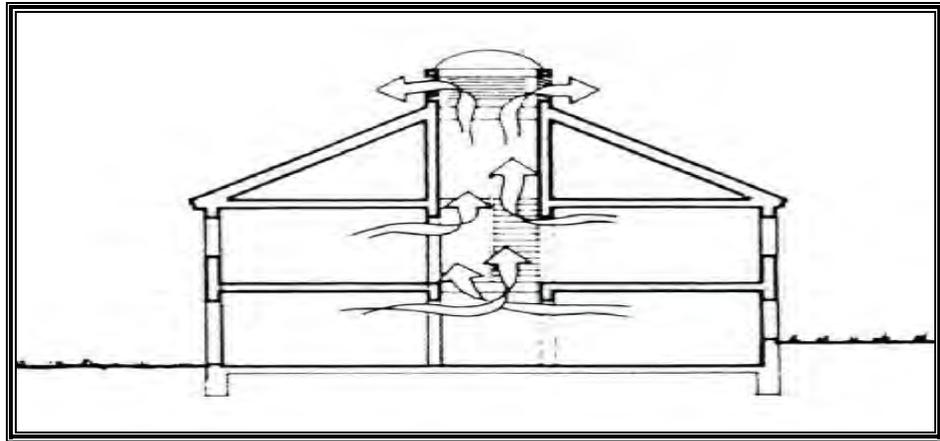


Fig. 5.20 : tirage thermique. Un excellent système central de ventilation naturelle, constitué par une cage d'escalier ouverte surmontée par un lanterneau et un dispositif d'aération.
Source : D.Watson & R.Camous, 1986

Prenons le cas d'une fenêtre située à un endroit quelconque d'un immeuble à étages, les pressions d'air de part et d'autre de la fenêtre sont égales, et aucun flux d'air ne se manifeste à travers l'ouverture, malgré la différence de température¹. Par contre la pression de l'air au-dessus et au-dessous de la fenêtre varie selon la hauteur.

Si l'air intérieur est plus chaud et donc léger, la différence verticale de pressions intérieur est plus faible que celui de l'extérieur. Cela signifie qu'à l'intérieur, il y a une **surpression** à tout étage situé au-dessus de la fenêtre, et au contraire une **dépression** au-dessous, et ces différences vont en s'accroissant en s'éloignant verticalement de l'ouverture. Cependant et dans ce cas précis, l'air intérieur ne peut s'échapper puisqu'il n'y a aucune ouverture là où règnent ces différences de pressions.

Dans le cas où, il existe deux ouvertures situées à différentes hauteurs et que la température intérieure est toujours plus élevée qu'à l'extérieur, il y aura une surpression sur toutes fenêtre haute d'où s'échappe l'air intérieur, surchauffé, chargé d'humidité : vicié, vers l'extérieur, et formation d'une dépression à toutes ouverture basse où pénètre l'air frais extérieur par aspiration (fig.5-21).

La zone neutre N (fig.5-21), qui correspond à l'égalité des pressions atmosphériques à l'intérieur et à l'extérieur, se trouve à des distances h_1 et h_2 des ouvertures inversement proportionnelles aux carrés des surfaces S_1 et S_2 de ces orifices.

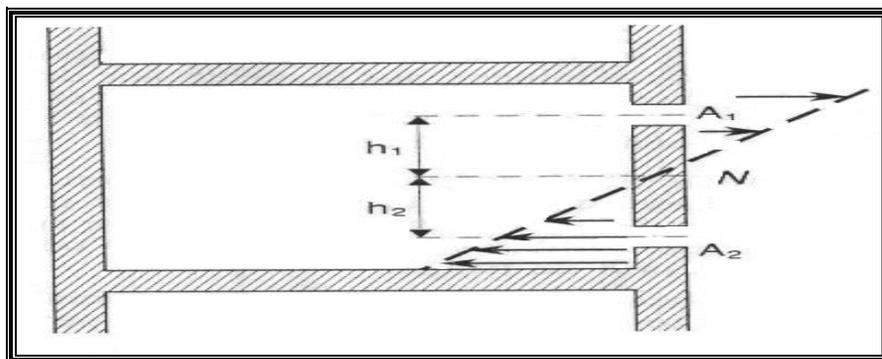


Fig. 5-21 : principe de la ventilation naturelle par prises basse et haute.
Source : H.Duthu,, 1994.

Pendant certaines périodes, la température intérieure est plus basse que celle de l'extérieur, le phénomène est inversé et les directions de flux sont opposées¹. C'est aussi le cas, lorsque la sortie de l'air ne s'effectue pas en toiture et à une hauteur appropriée. Dans les conditions de température et de pression normales, la différence totale de pression, ou la « chute » de pression (ΔP) est donnée par la formule :

$$\Delta P = \frac{h\Delta t}{8,5T} 5 \text{ (cm H}_2\text{O)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Le flux d'air (Q) induit par la force thermique est donné par la formule suivante :

$$Q = K. A \sqrt{h.\Delta t} \text{ (w/m}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Avec :

- k : coefficient de transmission surfacique ($\text{w/m}^2.\text{°C}$) ;
- A : section en (m^2) ;
- h : hauteur en (m) ;
- Δt : différence de température en (°C)

5.4.3 Effets combinés.

En pratique, les constructions dans leurs environnements sont soumises à l'action d'une multitude de facteurs climatiques, entre autres l'effet combiné de la force du vent et de la force thermique. Ces deux forces peuvent agir dans le même sens ou en sens inverse selon la direction du vent ou la valeur de la température intérieur ou extérieur.

Rappelons que, la force thermique dépend du gradient de température (intérieur et extérieur) et de la dénivelé de la ventilation (distance verticale séparant les ouvertures), son importance est donc tributaire de la grandeur e ces deux paramètres.

Cette condition peut être concrétisée pendant l'hiver dans les zones climatiques froides ou tempérées. Par contre, en été la force thermique est très faible, voir nulle dans certains climats chauds ; sauf dans certains locaux comme : les cuisines, w.c, et salles de bains, qui disposent de gaines de ventilation verticale, ayant des dénivelés de ventilation suffisantes (dans les immeubles collectifs, elle peut couvrir plusieurs étages). La force thermique qui en découle peut être utilisée efficacement pour assurer une ventilation naturelle.

Selon, Givoni.B¹ « la force thermique induit un flux d'air en vertu de la seule différence de pressions. La vitesse de l'air à l'ouverture d'entrée est généralement très faible, ce qui fait que la force d'inertie n'est pas suffisante pour diriger le régime du flux ». C'est-à-dire que le mouvement de la masse totale de l'air produit sera très faible. Cependant, la force du vent génère un flux d'air à travers toute la pièce et que la force d'inertie est largement suffisante pour entraîner le régime du flux. Un tel flux peut certainement influencer sur la vitesse de l'air en l'accroissant.

De toutes les manières, le concepteur peut recourir à des solutions architecturales pour le contrôle de la ventilation, surtout au niveau des ouvertures d'entrée.

¹ Ministère de l'urbanisme et du logement, direction de la construction, *Guide pour l'amélioration des logements existants*, Eyrolles, Paris, 1977 p305.

5.5 Ventilation transversale

La ventilation transversale utilise les variations des pressions sur les différentes façades d'un bâtiment exposé au vent¹ : lorsque des fenêtres sont ouvertes à la fois sur les parois exposées et opposées au vent, il se crée un flux d'air à travers le bâtiment allant des zones à haute pression vers celles de basse pression (fig.5-22).

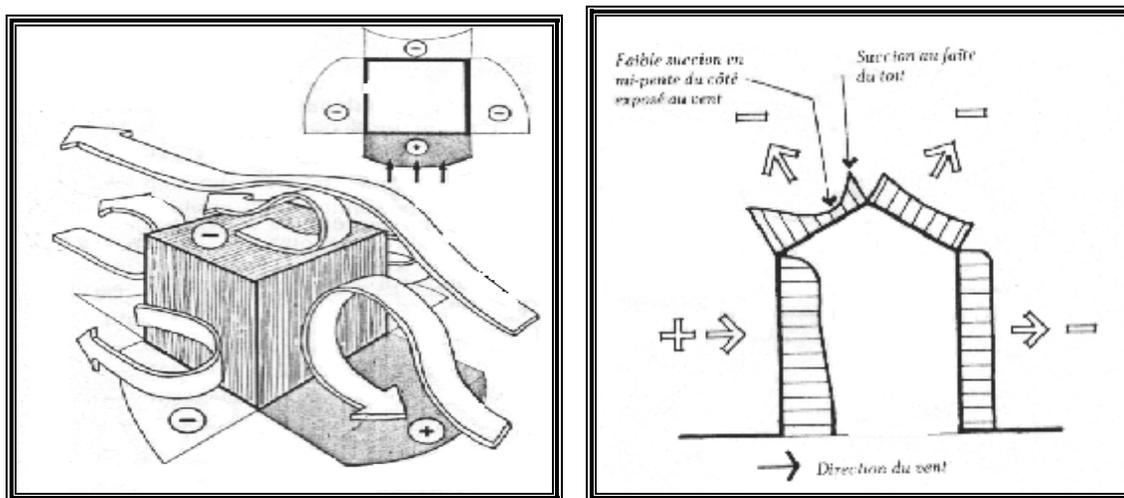


Fig. 5-22 : répartition du champ de pression autour d'un bâtiment sous l'effet du vent au niveau du sol.

Source : J-L. Izard, A.Guyot, 1979, p.25 et D.Watson & R.Camous, 1986

Plus le gradient de pression est élevé, plus les déplacements d'air à travers le bâtiment sont forts. Les flux d'air générés par la pression du vent peuvent être contrôlés par la conception des ouvrages d'entrée.

Le trajet des filets d'air à travers la construction dépend principalement de la direction initiale de la masse d'air pénétrant par l'ouverture. Lorsque celle-ci coïncide avec la ligne droite reliant les ouvertures d'entrée et de sortie, le flux d'air poursuit son chemin vers la sortie sans être dévié.

Dans le cas contraire, l'air poursuit son mouvement d'origine jusqu'à ce qu'il rencontre un mur ou jusqu'à ce que son élan soit perdu par frottement avec l'air de la pièce, et ce n'est qu'à ce moment qu'il est dévié vers l'ouverture de sortie, où règne la basse pression. Dans ce deuxième cas, on obtient donc de meilleures conditions de ventilation, car tout le volume de la pièce est largement balayé par le flux d'air².

Pour faciliter la ventilation transversale d'un locale, il y a lieu de placer l'entrée et la sortie de l'air sur deux façades opposées ou, à la rigueur adjacentes.

Le débit d'air pénétrant à travers un ouvrant de la façade au vent d'une pièce est à son efficacité maximum lorsque la direction du vent ne s'éloigne pas de plus de 30° de la normale au plan de cette ouverture³.

Les capteurs à vent, la végétation et le modèle de fenêtre peuvent servir à canaliser l'air vers les entrées à partir de n'importe quelle direction. Toutefois, le concepteur doit veiller à ce que les dimensions des ouvertures du côté sorti, sous le vent, soient plus grandes que celles du côté de

¹. Givoni.B, *l'homme, l'architecture et le climat*, le Moniteur, Paris, 1978.p295.

².Charbonnier.S, Parant.C, Pouget.A, *guide de la thermique dans l'habitat neuf*, Editions du Moniteur, Paris, 1992. pp273-277.

³.Wright.D, *Soleil,Nature,Architecture*, Parenthèses,Paris,1979. pp 188-199.

l'entrée, au vent. Car cette dissymétrie créerait ainsi la libre circulation de l'air à travers le local. En absence de vent, la ventilation transversale s'opère naturellement de la façade à l'ombre, en surpression, vers la façade ensoleillée en dépression puisque plus chaude¹.

5.6 Contrôle du vent ou de la ventilation

5.6.1 Influence des aménagements intérieurs sur l'écoulement d'air

Pour qu'une construction soit bien ventilée, il ne suffit pas seulement qu'elle soit exposée au vent mais il faut bien s'assurer que ce dernier puisse la traverser. Selon Dreyfus⁴: « *il ne peut y avoir ventilation efficace que si la construction ne comporte qu'une seule pièce d'épaisseur* » (fig.5-23).

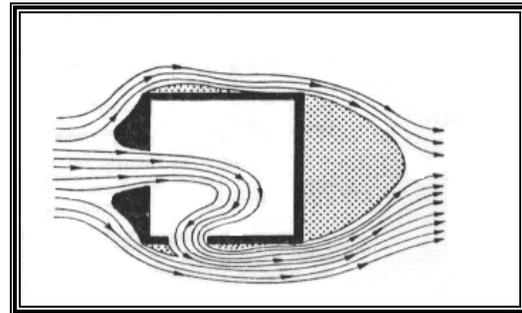
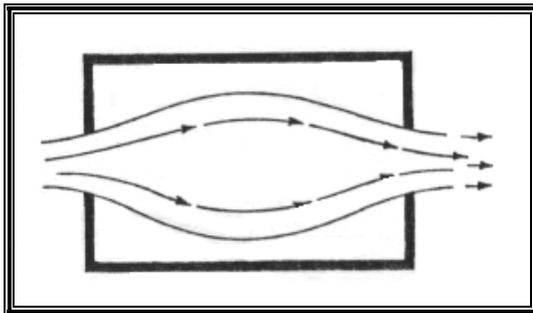


Fig. 5-23 : Ventilation transversale d'une construction à une seule pièce d'épaisseur.

Fig. 5-24 : Inertie des filets d'air entrant dans une construction

Source : Dreyfus, 1960

Les résultats d'essais sur modèles réduits réalisés au « Texas Engineering Experiment Station², montrent que :

- Ø l'air possède une certaine inertie, qui permet au flux entrant dans une construction, de garder la direction générée par la répartition des pressions en amont de la construction en question, et la forme des orifices d'entrée (fig.5-24).
- Ø La direction du flux d'air est tributaire de la répartition des pressions sur la façade antérieure et de la forme architecturale de l'ouverture d'entrée. (fig.5-25).

On peut déduire des schémas de la figure (5-25) qu'une dissymétrie sur la façade peut changer la répartition des pressions et par conséquent la direction du flux.

Dans le cas d'un auvent, installé pour des raisons climatiques entre autre l'ombrage peut avoir des conséquences négatives en ce qui concerne la ventilation naturelle. L'exemple suivant illustré dans la (fig.5-26) révèle qu'une très légère différence au niveau de la conception (un petit intervalle entre l'auvent et la façade) peut avoir des conséquences très importantes sur le confort des habitants.

¹ Guyot Alain et Gandemer jacque, *La protection contre le vent*, CSTB, 1981

² Dreyfus.Jacques, *le confort dans l'habitat en pays tropical*, Eyrolles, Paris, 1960, p157

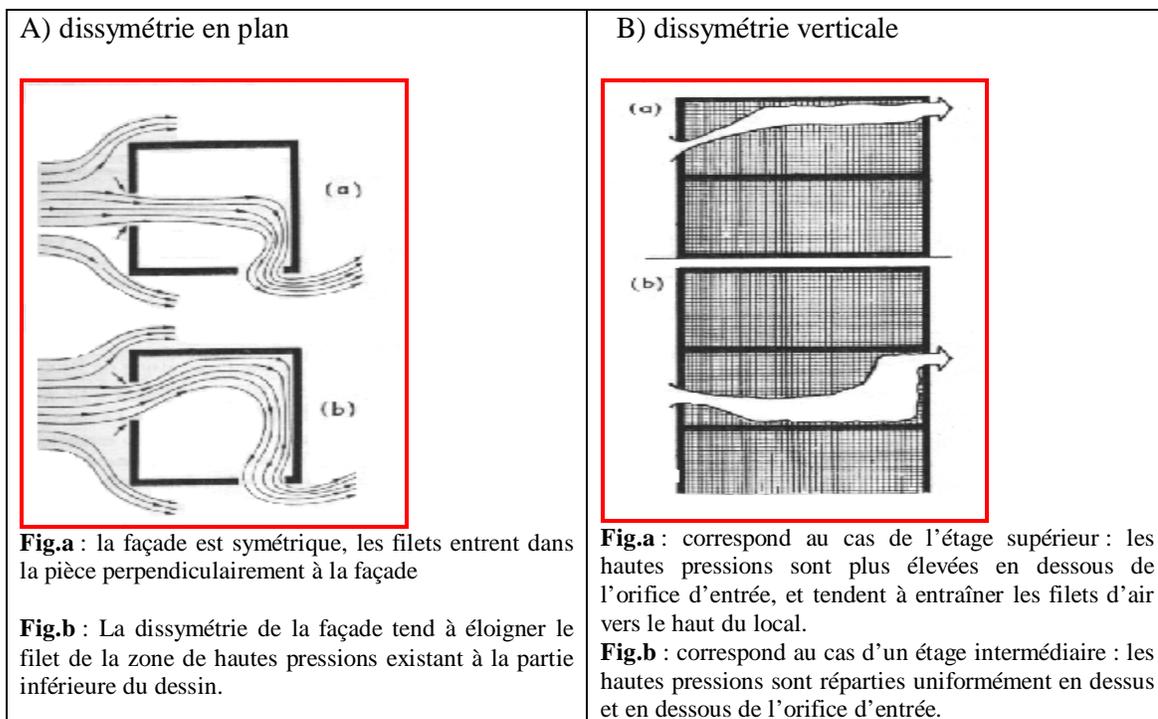


Fig.5-25 : influence d'une dissymétrie sur la direction des filets d'air entrant dans une construction
Source : Dreyfus, 1960

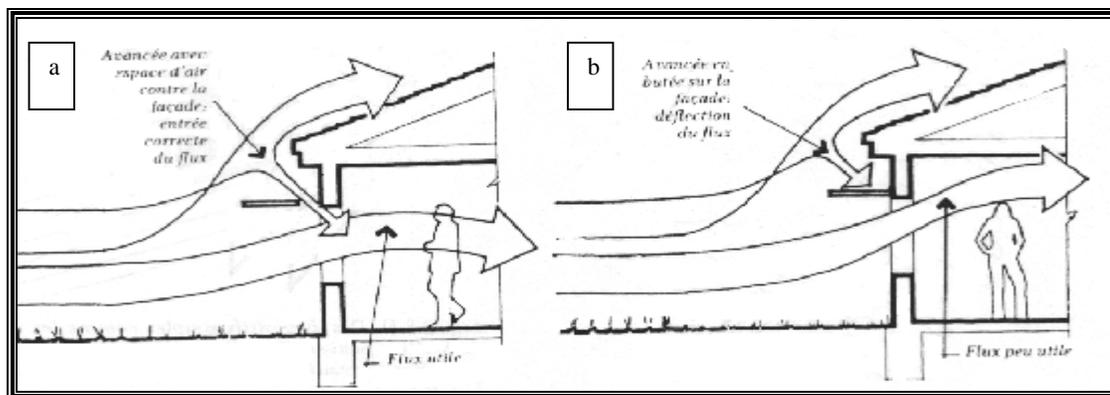


Fig. 5-26 : influence d'un auvent sur la direction des filets d'air entrant dans une construction
Source : D.Watson & R.Camous, 1986

La fente aménagée entre l'auvent et la façade, dans le cas de la (fig.5-26a), rétablit la symétrie des pressions. Les filets d'air sont horizontaux, alors que dans le cas de la (fig.2-26b), ils étaient déportés vers le plafond, l'auvent plein neutralise les hautes pressions existant à la partie supérieure de l'orifice d'entrée (Reed, 1953). L'influence des lames orientables sur la direction des filets d'air est d'une importance considérable pour le confort des occupants selon la fonction du locale, la déflexion de l'air peut être haute (fig5-27).
ou ramenée vers le bas du flux d'air qui aura tendance à passer trop haut. (fig5-27b)

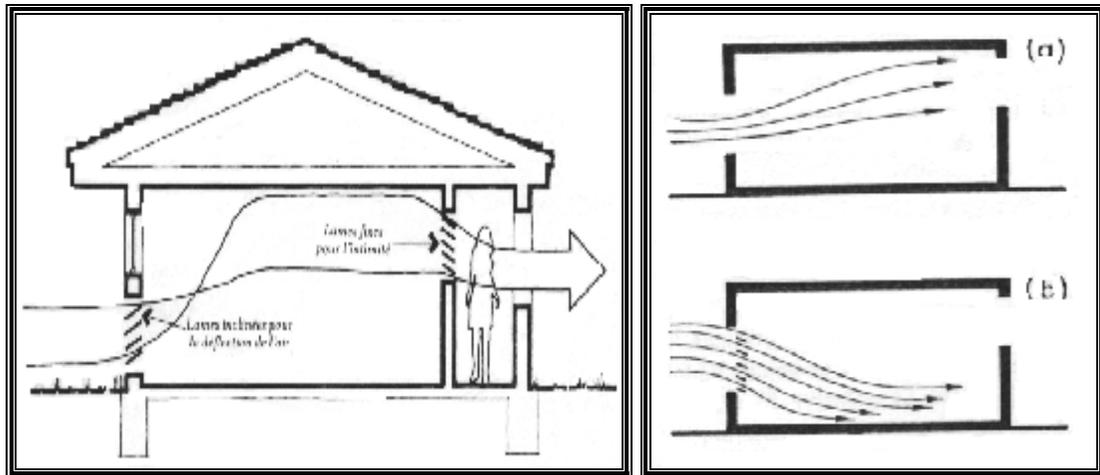


Fig. 5-27 : influence des lames orientables sur la direction des filets d'air
 Un store vénitien permet de ramener les filets d'air à un niveau correct
Source :D.Watson & R.Camous, 1986

La disposition des cloisons intérieures joue un rôle, en principe, néfaste pour le déplacement de l'air, néanmoins on peut en profiter, au moyen d'un agencement rationnel, pour canaliser l'air vers certaines zones qui, autrement, ne seraient point affectées par la ventilation naturelle. La figure (5-28) illustre l'effet du cloisonnement sur l'écoulement de l'air à l'intérieur de plans rectangulaires typiques (essai en soufflerie).

5.6.2 Les déflecteurs d'air

Les éléments constitutifs de l'enveloppe d'une bâtisse, peuvent être utilisés pour accroître le volume et la vitesse de l'air indépendamment de l'implantation du site. Ces dispositifs qui jouent le rôle de déflecteurs du vent peuvent être horizontaux ou verticaux, fixes ou mobiles. Les figures (5-29, A et B) révèlent que de tels éléments agissent sur le flux d'air par effet de barrage (Watson, 1986).

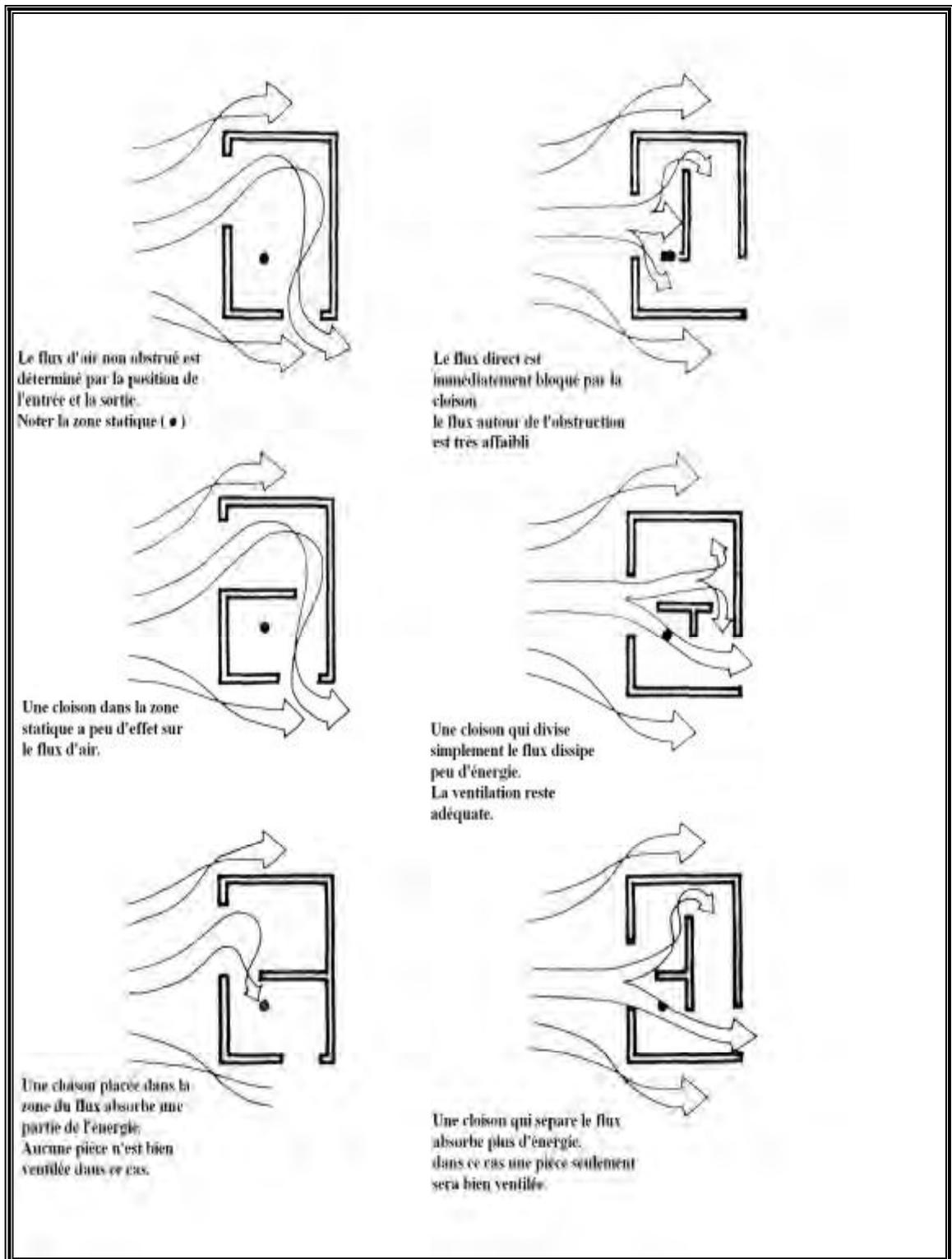


Fig. 5-28 : Résultats d'essais en soufflerie montrant comment le cloisonnement affecte l'écoulement de l'air dans un plan rectangulaire. La zone marquée par un point représente une position de référence pour fin de comparaison.

Source : D.Watson & R.Camous, 1986

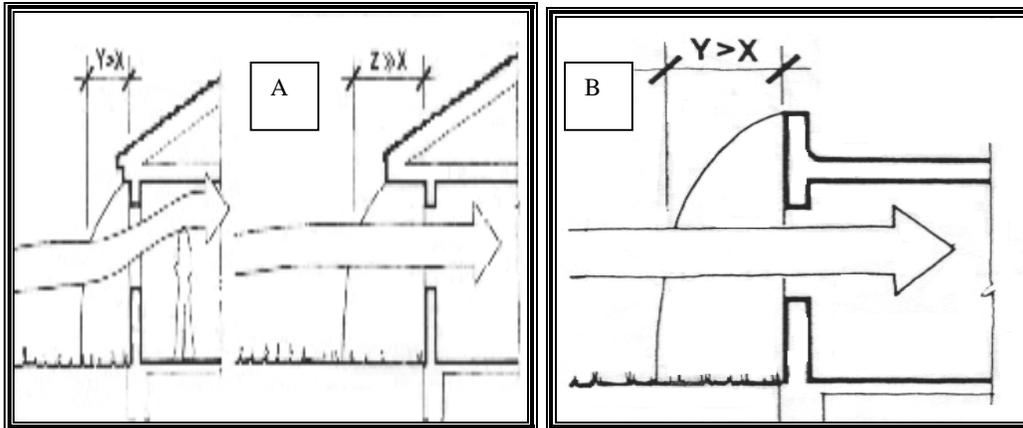


Fig. A : une avancée de toiture permet d'emprisonner une certaine quantité d'air, ce qui accroît la pression d'air sur la façade, donc la puissance de ventilation

Fig. B : les parapets en toiture augmentent l'effet de barrage d'air et favorisent un trajet du flux d'air vers le centre de l'espace habitable. Cela est dû à l'équilibre des pressions d'air au-dessus et au-dessous des fenêtres.

Fig. 5-29 : déflecteurs agissant par effet de barrage. Source :D.Watson & R.Camous, 1986

L'action des déflecteurs d'air peut être de quatre sortes :

a) accroissement des flux d'air perpendiculaires

Le flux peut être accrue, soit en augmentant la longueur de la façade ou bien en créant des poches d'air en suppression au moyen d'avancées de toiture (Fig.5-30) ou d'éléments déflecteurs.

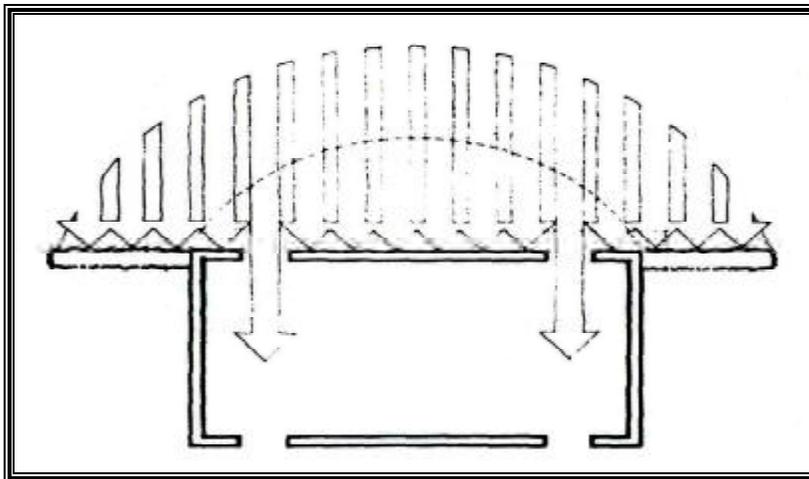


Fig. 5-30 : les saillis en façade augmentent la pression d'air
Source :D.Watson & R.Camous, 1986

b) interception et accroissement des flux d'air oblique

Dans le cas où la direction du vent est parallèle au plan de la façade, la ventilation intérieure est pratiquement nulle, surtout si les ouvertures sont étroites, cependant une amélioration d'aération est très possible, si l'on place une saillie verticale à l'extérieur de la fenêtre du côté opposé à l'arrivée du vent, correctement orienté, cet effet pourra être facilement réalisé à l'aide d'un simple volet comme l'indique la figure (5-31).

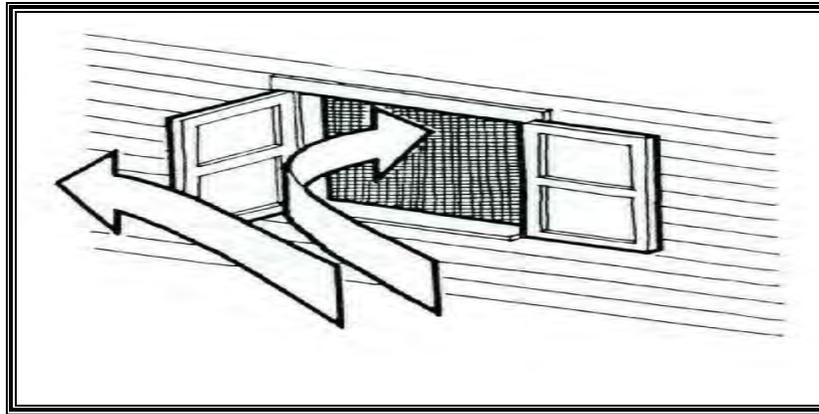


Fig. 5-31 : contrôle de la ventilation par un dispositif simple (courant)
Source : D. Watson & R. Camous, 1986

c) création d'une ventilation croisée

Une bonne ventilation exige que les entrées et les sorties d'air soient situées dans les zones de pressions différentes (suppression et dépression), la ventilation sera donc nulle, lorsque les ouvertures sont placées sur le même côté (fig.5-32.c1) ou très faible dans le cas illustré dans la figure (5-32.a). Ces cas sont cependant importants, on les retrouve souvent dans les petits appartements, dans les hôtels et dans les maisons à patio.

Si le vent est parallèle ou oblique par rapport à la façade, il sera possible de créer une ventilation croisée artificielle induite par des éléments verticaux opposés de deux fenêtres, par exemple (fig. 5-32.b et 5-32.c2)

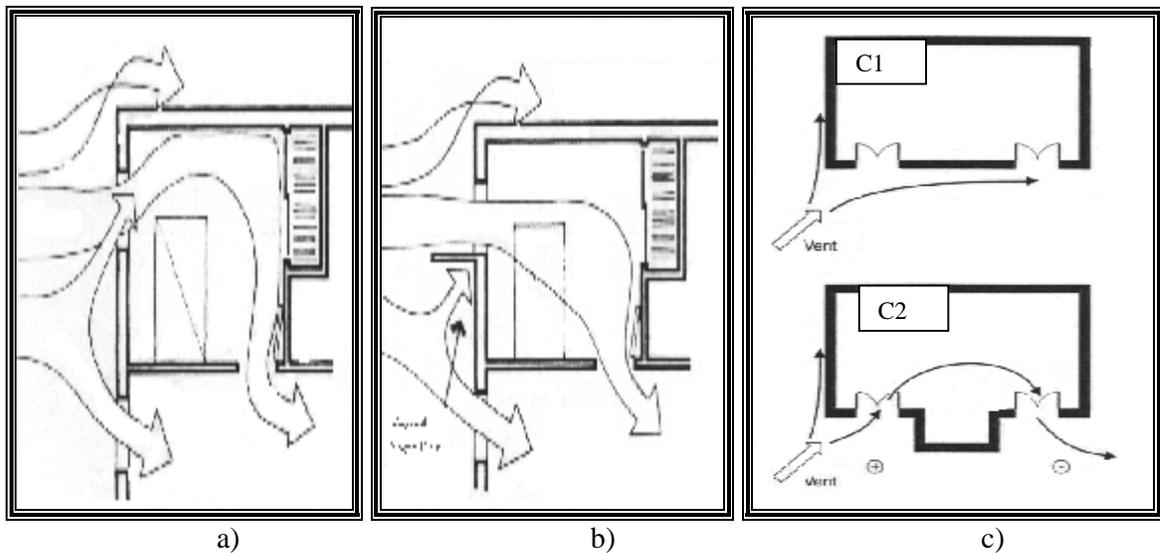


Fig. 5-32 : Dispositif architectural créant une ventilation naturelle.
Source :D.Watson & R.Camous, 1986

Source : S. Charbonnier, 1992, p.276

d) Canalisation des flux d'air entrant

Certains dispositifs architecturaux en façade peuvent permettre de créer une différence de pression entre deux fenêtres situées sur une même paroi exposée au vent, surtout lorsqu'il est oblique (fig. 5-32.c), on obtient alors un mouvement d'air à l'intérieur de la pièce. Toutefois, une bonne répartition du flux entrant est aussi importante que le débit de la ventilation. Si par exemple un flux d'air est dévié vers le haut à cause d'un auvent (Fig.5-26), la ventilation dans ce cas, est défavorable, (en période d'été), pour les occupants. Une légère différence au niveau de la conception (décalage de l'avancée de toiture) peut solutionner ce problème.

5.6.3 les Ouvertures : Emplacements et Usages

Les portes et les fenêtres sont les moyens habituels de ventiler les locaux d'habitation, la position, la taille et les types d'ouvrants régissent donc l'efficacité de ces ouvertures. Le choix du type d'ouvrants doit se faire en compatibilité avec la fonction de l'espace considéré.

a) orientation des ouvertures :

Habituellement, on admet que les meilleures conditions de ventilation sont celles réalisées à partir de la disposition des fenêtres d'entrée perpendiculairement à l'orientation des vents, toute déviation de cette direction entraînera une réduction de la vitesse de l'air intérieure. Toutefois, des études¹ ont montré le contraire, et que les meilleures conditions de ventilation sont réunies lorsque, le flux d'air doit changer de direction à l'intérieure de la pièce. L'étude en question a prouvé que dans une pièce dotée de deux ouvertures opposées, où l'entrée d'air fait face au vent extérieur, les filets d'air principaux se déplacent en ligne droite de l'entrée vers la sortie et, à part des turbulences locales sur les arrêtes du mur de sortie, le reste de la pièce n'est que légèrement touché (fig.5-23). Ainsi, l'air est confiné au niveau des angles du mur de la façade en amont (qui contient la fenêtre d'entrée), et que les murs latéraux sont légèrement concerné car le flux est très faible.

Quand, le vent frappe la même ouverture d'entrée sous un angle de 45°, la majorité du volume d'air s'anime d'un mouvement turbulent autour de la pièce, il se crée ainsi un flux d'air le long des murs et des angles (fig.5-32.a). Dans le cas où, les ouvertures de la pièce sont adjacentes, la vitesse de l'air est faible comparé à celle obtenue lorsque les baies sont opposées. Ce régime est illustré dans le tableau : (5.2)

Dimensions des baies		Baies sur murs opposés		Baies sur murs adjacents	
Entée	Sortie	Vent perpendiculaire	Vent oblique	Vent perpendiculaire	Vent oblique
1/3	1/3	35	42	45	37
1/3	2/3	39	40	39	40
2/3	1/3	34	43	51	36
2/3	2/3	37	51	-	-
1/3	3/3	44	44	51	45
3/3	1/3	32	41	50	37
2/3	3/3	35	59	-	-
3/3	2/3	36	62	-	-
3/3	3/3	47	65	-	-

Tab 5-2 : Effet de la position de la fenêtre et de la direction du vent sur les vitesses moyennes de l'air (En %) de la vitesse extérieure).

Source : Givoni. B, 1978

¹. Givoni.B, *Passive and low energy cooling of building*, John Wiley & Sons, INC, New York, 1994.

b) Taille des ouvertures

Les dimensions des fenêtres ne peuvent avoir d'effets que si la ventilation transversale existe. Une pièce d'habitation par exemple, dotée de deux fenêtres situées sur le même mur (fig5-32.c), les grandeurs de ces dimensions n'auront que peu d'influence sur la vitesse de l'air¹. Le tableau suivant (tab.2-3), montre que lorsque le vent est oblique sur la fenêtre, il y a un effet appréciable lorsqu'on augmente les dimensions de la fenêtre. Il se crée de grandes variations de la pression de l'air dans le sens de la largeur du mur, et ainsi l'air peut entrer par un coin de la fenêtre et sortir par un autre.

Quant le vent frappe perpendiculairement, les différences de pressions le long des murs sont trop faibles pour que l'augmentation des dimensions de la fenêtre ait un effet sensible.

L'effet des dimensions des fenêtres apparaît beaucoup plus, lorsque le locale dispose d'ouvertures inégales dont la sortie est beaucoup plus grande. Ceci est conforté par les résultats des expériences illustrés dans le tableau (5.3), suivant :

Direction du vent	Dimensions des fenêtres		
	1/3	2/3	3/3
Perpendiculaire	13	13	16
Oblique de face	12	15	23
Oblique derrière	14	17	17

Tab. 5-3 : Effet des dimensions de fenêtres dans des locaux sans ventilation transversale sur les vitesses d'air moyennes (en % de la vitesse du vent extérieur)

Source : Givoni. B, 1978

Ce qu'on peut déduire de ce tableau est que :

- l'effet le plus important du rapport d'ouvertures (d'entrée et de sortie) sont ressentis sur la vitesse maximale intérieure. Cette dernière augmente avec le dit rapport.
- la vitesse moyenne intérieure dépend des plus petites dimensions des ouvertures.

Par conséquent, la vitesse maximale est beaucoup plus importante lorsque la sortie est plus grande que l'entrée. Cependant, les vitesses dans les autres parties restent faibles, ce qui engendre une vitesse moyenne, globale, faible. La figure (5-33), illustre bien la distribution des vitesses d'air intérieurs dans des modèles où le rapport de dimensions pour l'entrée et la sortie est différent.

La formule suivante², montre la relation qui existe entre la vitesse moyenne et les dimensions des ouvertures.

$$V_{(i)} = 0,45 (1 - e^{-3,84 X}) V_{(0)} \quad [m/s] \quad \dots\dots\dots(8)$$

Où

- $V_{(i)}$ = vitesse moyenne intérieure en (m/s) ;
- X = rapport de la surface de la fenêtre sur celle du mur ;
- $V_{(0)}$ = vitesse du vent extérieur en (m/s).

¹. Charbonnier.S : *Guide de la thermique dans l'habitat neuf*. Éditions du Moniteur, Paris, 1992. pp274-276

² Givoni.B, *l'homme, l'architecture et le climat*, le Moniteur, Paris, 1978.pp306-313.

Remarque : cette relation s'applique à une pièce carrée dont les ouvertures d'entrée et de sortie sont situées sur des parois opposées.

En conclusion, la combinaison entre les différentes dimensions des ouvertures d'entrée et de sortie a induit un flux d'air concentré à une partie limitée de la pièce. Pour une ventilation optimum, le choix de distribution dépendra donc de la fonction de la pièce.

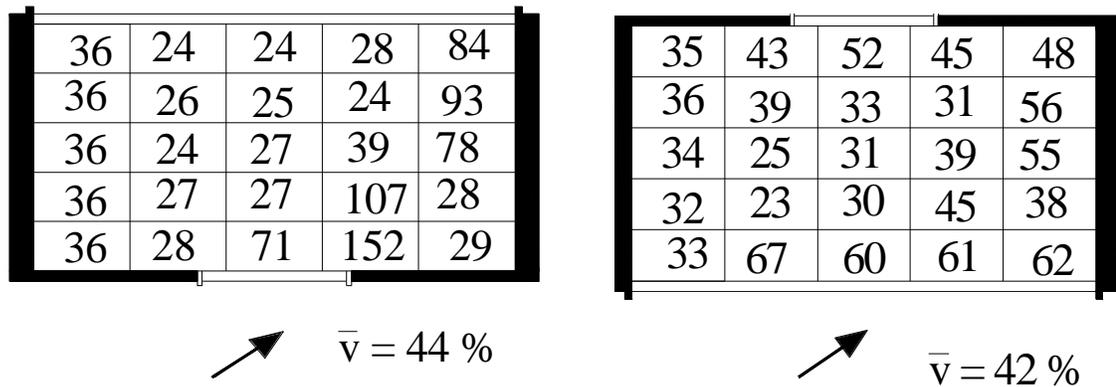


Fig.5-33 : Distribution des vitesses d'air intérieur (en % de la vitesse extérieure) dans des modèles où les rapports de dimensions pour l'entrée et la sortie de l'air sont différents.

Source : B. Givoni, 1978, p 307.

c) position verticale des fenêtres.

Étant donnée que les variations du vent sont souvent de direction horizontale et rarement verticale, La distribution verticale des vitesses d'air intérieure est beaucoup plus constante pour chaque position d'ouvertures sur façade, que la distribution horizontale.

La hauteur de la fenêtre de sortie n'exerce pas un effet sensible sur le régime et la vitesse du flux d'air, cependant la vitesse, à l'entrée, sous l'appui de fenêtre se réduit à moins de 25 % de la vitesse initiale¹. D'où l'importance de l'effet de la hauteur de l'allège sur le régime de la vitesse de l'air intérieur. Donnons un exemple : si l'allège d'une fenêtre est haut de tel façon qu'il dépasse le niveau des occupants du local, la ventilation sera peu fournie dans la majorité des endroits occupés, dans ce cas et si le climat est chaud, les usagers seront dans une situation d'inconfort surtout la nuit où l'on a besoin de grandes vitesses pour le rafraîchissement.

d) Fenêtres et usages

Il existe une grande variété de fenêtres, dont le type d'entrée influe énormément les régimes de flux d'air, ainsi le choix du modèle d'ouverture de la fenêtre est tributaire de l'usage de l'espace; aussi, il est à noter que la manière dont s'ouvre la fenêtre, influe considérablement sur le taux de ventilation des pièces habitables.

Des expériences ont été effectuées par Holeman (1951), qui a démontré que :

- Ø la fenêtre coulissante horizontale permet au flux d'air entrant de poursuivre sa course horizontalement
- Ø la fenêtre pivotante verticale permet de contrôler le débit et sa direction horizontale
- Ø la fenêtre croisée classique s'ouvrant vers l'intérieur (à la française), le contrôle du vent peut se faire en ouvrant les deux vantaux ensemble ou bien un seul vantail ouvert et l'autre opposé au vent.

- Ø la fenêtre basculante horizontale : avec ce type de fenêtre le vent peut être orienté vers le haut dès que l'angle de l'ouverture est différent de la position ouverte horizontale, équipée de jalousies, le flux d'air est dirigé soit vers le haut soit vers le bas selon l'inclinaison des lames (fig.5-34) .
- Ø la fenêtre à châssis horizontale pivotant en son centre : est la plus efficace pour le contrôle du vent entrant vers un niveau quelconque désiré dans la pièce, surtout lorsque le châssis peut s'ouvrir vers le bas de 10 °, en dessous de l'horizontal, ceci est conforté par des expériences faites en Afrique du sud par van straaten (1965). par contre les fenêtres à rabattement latérales sont jugées inefficace pour le contrôle de la ventilation.

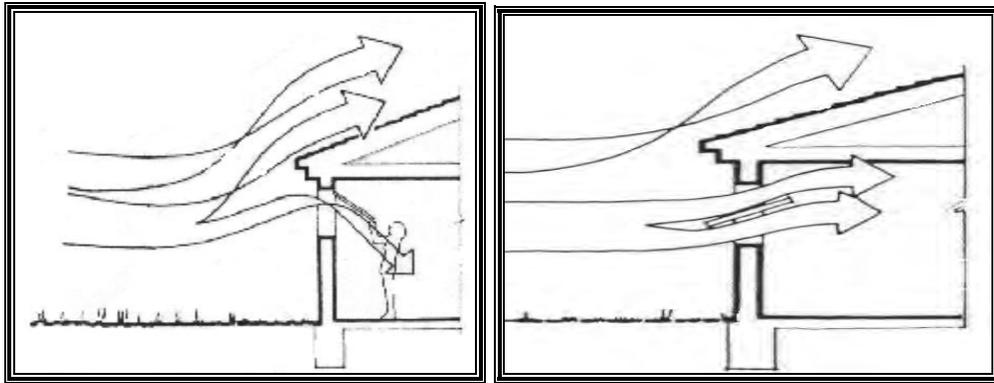


Fig. 5-34 : Effet du type de fenêtre sur le contrôle de la ventilation
 Source : D.Watson & R.Camous, 1986,

Selon Givoni.B (1978) « il est intéressant de noter que pour toutes les présentations de fenêtres testées, la vitesse de l'air à proximité des planchers était plus élevée que dans les couches supérieures au voisinage des fenêtres. Ceci provient de la formation de deux flux d'air principaux, un initial qui s'écoule par l'entrée, et un secondaire le long des surfaces de la pièce, le long des murs, du plancher et du plafond. L'air qui se trouve entre ces deux flux se déplace à des vitesses inférieures ».

Il serait utile de contrôler la ventilation et de diriger le flux aux fins d'un meilleur confort selon la destination des espaces intérieurs.

Pour un employé de bureau, il est souhaitable de diriger le flux d'air à une vitesse élevée, à hauteur de la tête soit 1,20 m (hauteur assise d'un homme) et une diminution marquée à la hauteur de la table (vers 0,70m).

- Ø les lanterneaux ouvrants (fig.5-35)., constituent d'excellents ventilateurs et procurent aussi un éclairage naturel zénithal, il existe plusieurs modèles : à crémaillère ou à ressort ; les lanterneaux à double ouvertures offrent de meilleur avantage ; indifférents à la direction du vent et permettent d'extraire l'air humide de salles de bains et des cuisines. le débit d'air qui passe à travers les ouvertures zénithales dépend essentiellement du gradient de température et de pression entre l'intérieur et l'extérieur ainsi que la direction du vent.

Généralement c'est l'air chaud montant qui emprunte le chemin des lanterneaux mais il arrive parfois que les brises extérieures descendent dans le local.

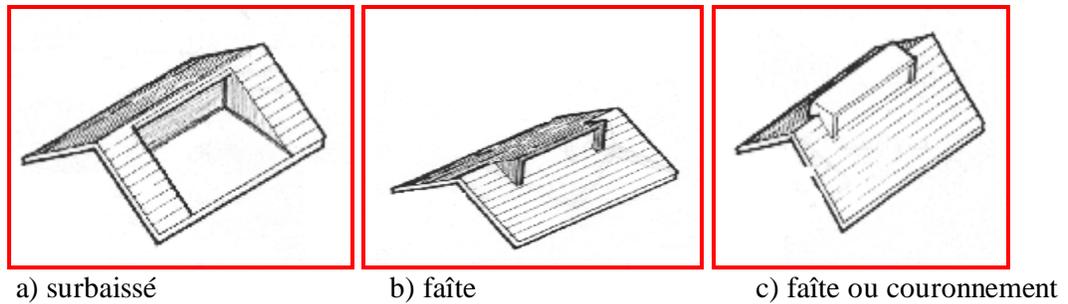


Fig. 5-35 : Dispositifs de ventilation intégrés qui exploitent la capacité de succion d'un toit à faible pente
Source : D.Watson & R.Camous, 1986

e) Pièces à une seule paroi extérieure

Les pièces qui n'ont qu'une seule façade, donnant sur l'extérieure, sont faiblement ventilées à cause de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieure qui est très faible lui aussi.

Il a été constaté que le gradient de pression intérieur s'améliore légèrement quand le vent souffle dans une direction oblique, alors, on obtient un flux d'air le long du mur et parallèle à lui. Ainsi, il serait intéressant de prévoir deux ouvertures latérales, situées en amont et en aval au vent, afin d'améliorer les conditions de ventilation créée par une seule ouverture de la même surface. Cependant, et comme les différences de pression sont faibles, les flux d'air résultants sont aussi très limités.

La figure (5-36), montre qu'il existe des possibilités d'amélioration des conditions de ventilation, des pièces disposant que d'une seule ouverture sur l'extérieure.

Ceci peut se faire à l'aide de détails de conception de l'ouverture : cela consiste à placer des éléments verticaux sur chacune des ouvertures. D'où, l'on parvient à créer des zones de surpression et de dépression « artificielles » le long du mur extérieur. De cette façon, il se crée une zone de surpression en amont de la première fenêtre à travers la quelle l'air entre, et une zone de dépression en avant de la seconde fenêtre du quelle l'air sorte ; par conséquent, il se crée une ventilation transversale.

De ce qui précède, on peut conclure qu'il est possible de trouver des solutions à ce type de cas de problèmes de ventilation, mais à condition que les critères suivants doivent exister, à savoir :

- Ø direction de vents dominants
- Ø orientation des vents soit oblique au mur extérieur
- Ø angle formé, entre le mur et la direction du vent doit être compris entre « 20° et 70° »
- Ø murs saillants verticaux sur les deux côtés des fenêtres.

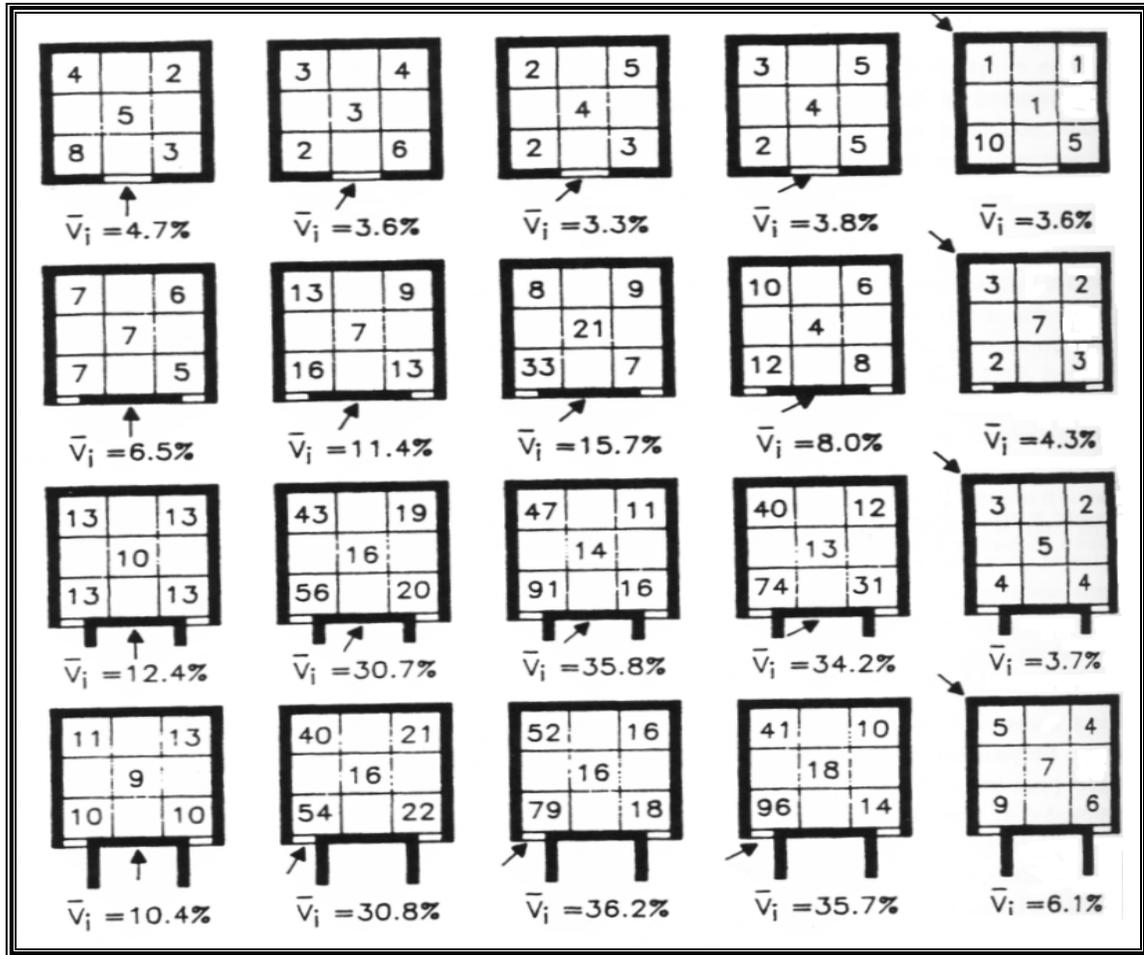


Fig. 5-36 : Vitesses d'air intérieure dans des modèles équipés de saillies verticales de différentes profondeurs. Comparées aux vitesses dans des modèles dépourvus de saillies. La largeur de la fenêtre est le tiers de celle du mur
Source : B. Givoni, 1994.

Le tableau (5-4), donne certaines observations relatives aux vitesses d'air moyennes intérieures :

rapport surface fenêtre mur	Nombre et type de fenêtres	Direction du vent				
		perpendiculaire	Oblique 22,°5 De face	Oblique 45° De face	Oblique 67,5° De face	Oblique De l'arrière
2/9	1 centrale	10,4	10,4	10,4	-	-
	2 latérales	11,8	16,8	17,5	8,9	5,4
	2 latérales+projection verticale	16	34,0	38,4	36,2	8,1
1/9	1 centrale	4,7	3,6	3,3	3,8	3,6
	2 latérales	6,5	11,4	15,7	8	3,4
	2 latérales+projection verticale	11,4	30,8	36	35	4,9
	2 latérales+balcons	17,3	-	20,8	-	-

Tab. 5-4 : Vitesses moyennes d'air intérieur (% de la vitesse du vent extérieur) dans les pièces à monoexposition
Source : B. Givoni, 1978.

5.7 L'impact de la vitesse de l'air sur le confort intérieur

La vitesse de l'air sera maximale si l'air peut traverser la construction sans déviation des filets d'air. Dans l'exemple de la figure (5-37),

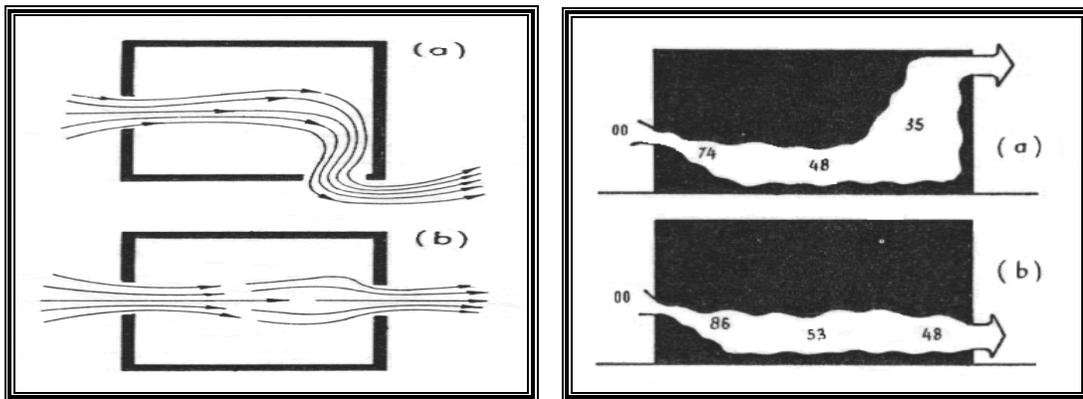


Fig. 5-37 : Influence d'un changement de direction, horizontal et vertical, des filets d'air sur la vitesse. Les vitesses sont plus faibles dans le cas des figures (a), que des figures (b).

Source : Dreyfus, 1960, p160

La disposition des ouvertures permet une ventilation efficace du point de vue de confort, cela coïncide avec le principe de la construction à une seule pièce d'épaisseur, où la vitesse sera élevée, par contre le changement de direction des filets d'air représenté dans la figure (5-37a), affaiblit de beaucoup la vitesse.

« la vitesse de l'air sera également plus élevée si les orifices de sortie ont une surface totale égale à **une fois et demie** celle des orifices d'entrée »¹.

Ce résultat est important et à l'opposé de ce qui est communément admis (fig.5-38), il s'explique facilement par des considérations de mécanique des fluides.

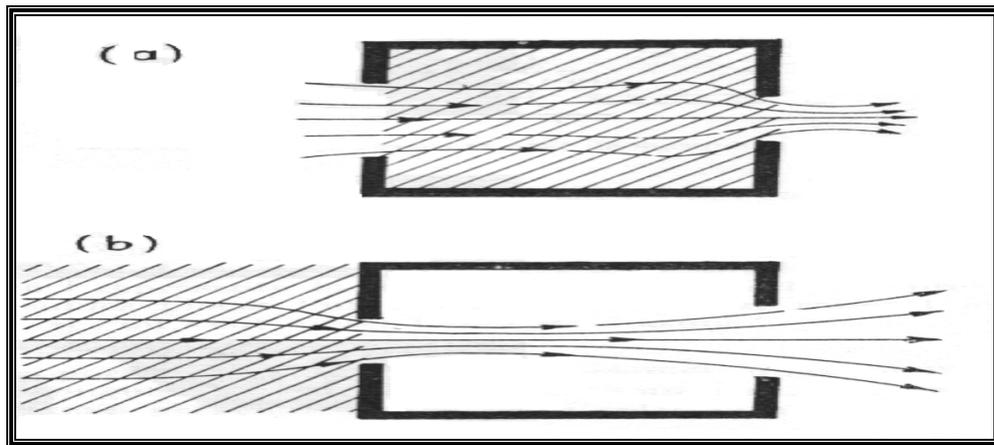


Fig. 5-38 : Schéma illustrant l'influence de la dimension des orifices de sortie sur la vitesse de l'air à l'intérieur d'un local. Dans le cas de la figure (b), l'étranglement des filets d'air au milieu du local correspond à un maximum de vitesse

Source : Dreyfus, 1960

¹ Dreyfus.Jacques, *le confort dans l'habitat en pays tropical*, Eyrolles, Paris, 1960.

L'écoulement du flux d'air à l'intérieur d'un local est soumis à un régime variable de répartition de vitesse¹ dû à plusieurs facteurs dont, à titre d'exemple : l'effet des dimensions des ouvertures et leurs positions. C'est ainsi que la ventilation de confort thermique se définit toujours en terme de « vitesse de l'air » et non « d'apport d'air neuf »², ou de « renouvellement d'air » car il n'y a pas de relation entre la quantité et la vitesse de l'air à l'intérieur des constructions.

La prévention de l'inconfort dû à la sensation de chaleur et de l'humidité de la peau passe par le contrôle de la vitesse de l'air, ce dernier est tributaire de l'échange de température entre le corps et son environnement. L'équilibre physiologique est atteint lorsque la température de l'air et de la peau est égale à 35 °C (température de la peau). Au-dessus de 35°C, une augmentation de l'air élève l'apport de chaleur convective, mais l'effet final dépend du taux d'humidité, de l'habillement et de métabolisme¹.

Quand l'individu est au repos et vêtu légèrement dans une ambiance où le taux d'humidité est faible, une vitesse d'aire faible est préférable.

Dans le cas où, le taux d'humidité et le métabolisme sont élevés et que l'individu est bien vêtu, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de l'air qui favorisera, à la fois, la prévention de : l'humidité de la peau et la diminution de l'effet de refroidissement de la sueur, et l'élévation du taux de sudation qui en résulte¹.

5.8 Effet de cheminée

L'effet de cheminée est dû à la différence de densité entre l'air chaud et l'air froid (fig.5.39). Il s'agit là de permettre à l'air le plus chaud, stratifié, de s'évacuer librement par un circuit privilégié, par convection naturelle.

Dans certaines conditions, notamment en période chaude, il peut être associé à un rafraîchissement adiabatique de l'air qui, consiste à faire canaliser l'air pour passer sur une masse d'eau ou un espace végétal qui, par évaporation permet le rafraîchissement de l'air (fig.5-40.a et b).

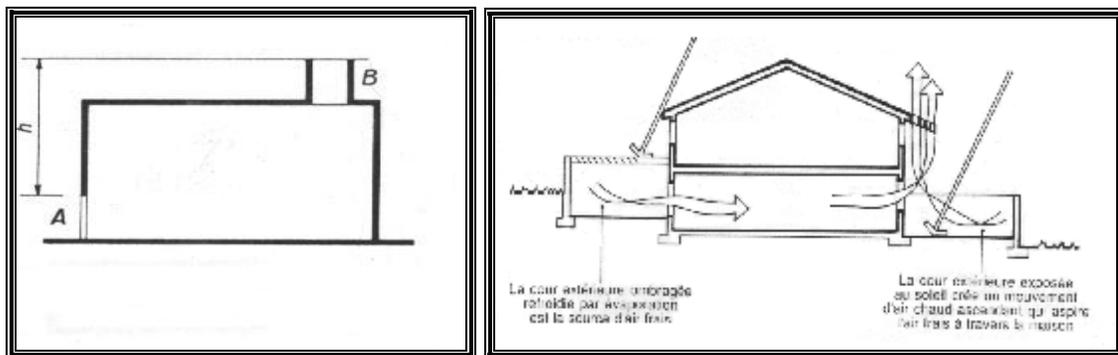


Fig. 5-39 : Effet de cheminée, schéma de principe. **Fig. 5-40. a** : principe de rafraîchissement deux réservoirs permettant de créer la ventilation transversale

Source : S. Charbonnier, 1992

Un bâtiment peut se comporter comme une cheminée d'extraction : il assure sa propre ventilation verticale par simple tirage thermique (fig.5-41)

¹Roussel. Michel, *Aération des logements*, Eyrolles, Paris, 1984

²Charbonnier.S, Parant.C, Pouget.A, *guide de la thermique dans l'habitat neuf*, Editions du Moniteur, Paris, 1992. pp276.

Pendant la période chaude, en été, on désire une forte ventilation pour évacuer l'air ambiant trop chaud, et pendant la période froide, nous avons besoin d'un renouvellement d'air pour évacuer l'air vicié et le surplus de vapeur d'eau afin d'éviter la condensation sur les murs froids ; certains locaux techniques réclament pareillement, l'extraction rapide des fumées et des odeurs. C'est ainsi que nous pouvons alors, faire profiter les espaces intérieurs du bâtiment pour favoriser la ventilation naturelle par effet de cheminée.

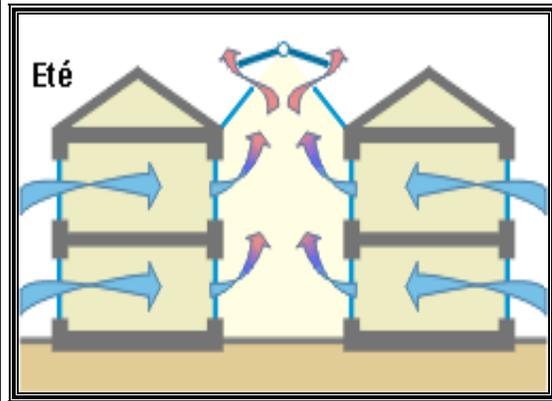
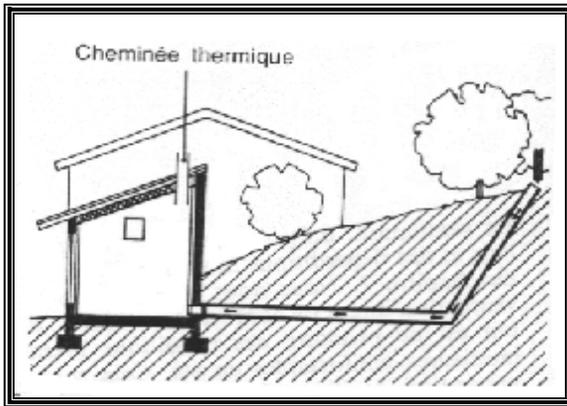


Fig. 5-40. b : Principe de rafraîchissement (Puit provençal et de la cheminée thermique)
Source : S. Charbonnier, 1992, p.274

Fig.5-41: ventilation verticale par effet de thermosiphon

Le locale représenté dans la figure (5-39), dispose d'une cheminée de ventilation et d'une ouverture en bas, si la température intérieure est supérieure à la température extérieure, il se produira un courant d'air de A vers B. C'est l'effet de cheminée. La différence de pression entre A et B est donnée par la formule suivante :

$$P = 4,2 \times 10^{-3} \times h (t_i - t_e) \text{ [mm d'eau]} \dots\dots\dots (9)$$

P : différence de pression en (mmhg);
 H : hauteur entre A et B en (m) ;
 t_i : température extérieure en (°C)
 t_e : température intérieure (°C)

C'est cette différence de pression qui constitue l'élément moteur.

Le volume d'air circulant de A à B pendant un temps donné sera proportionnel à \sqrt{P} .

Dans le cas du vent on peut définir, pour chaque vitesse, une pression équivalente qui joue le même rôle que la pression « P » ci-dessus ;

$$P = \frac{1}{16} V^2 \dots\dots\dots (10)$$

Où, V= vitesse du vent en m/s
 D'où l'on déduit, par exemple, les valeurs suivantes :

Vitesse du vent (m/s)	Pression équivalente (mm)
4	1
1	0,06
050	0,015

Tab. 5-5 : vitesses du vent et pressions équivalentes. **Source :** Dreyfus, 1960.

Ce tableau (5.5) montre que l'effet de cheminée est donc négligeable par vent fort. Dans le cas contraire, il peut contribuer efficacement au renouvellement d'air dans une construction.

Le débit d'air traversant la construction est donné par la formule suivante :

$$D = 400 S \times C \sqrt{h(t'-t)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

Où :

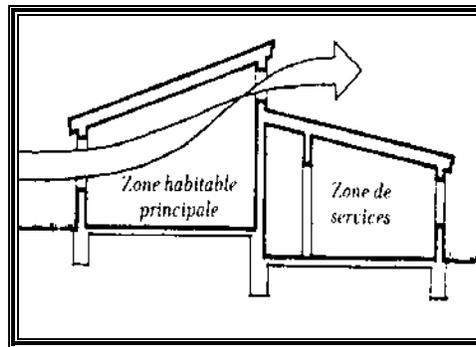
S= surface des orifices d'entrée en m²

C= coefficient dépendant du rapport des surfaces des orifices de sortie et d'entrée

h= dénivellation entre les orifices de sortie et les orifices d'entrée en (m).

Le tableau (tab.5.6) donne quelques valeurs du coefficient « c » pour différentes valeurs du rapport des surfaces des orifices :

Surface des orifices de sortie Surface des orifices d'entrée, soit : $\frac{S.o.s}{S.o.e}$	C
0,25	0,34
0,50	0,63
1	1
2	1,26



Tab.5-6 : coefficient « C »
Source : Dreyfus, 1960, p171

Fig. 5-42 : Effet de cheminée dans un local avec plafond incliné

Finalement, on peut dire que l'effet de cheminée tel qu'il est présenté dans la figure(5-39) est négligeable. Par contre dans le cas de la figure (5-42), on pourra avoir un débit plutôt appréciable. Donnons l'exemple d'une pièce ayant une surface de 25 m², avec une hauteur de 3m. Le volume de la pièce est donc : 75 m³. La surface des ouvertures hautes 2 m², celles des ouvertures basses 4 m², avec t' - t = 2 °C, on obtient :

$$D= 400 \times 4 \times 0,63 \sqrt{3 \times 2} = 2469,08 \text{ m}^3/\text{h}$$

Sous l'influence de l'effet de cheminée, l'air dans le local se renouvellera 33 fois par heure et favorisera le balayage régulier du plafonnage par de l'air frais.

La saison d'hiver est en conséquence favorable. Le reste de l'année, au printemps et en été en particulier, la température de l'air au voisinage de la toiture peut, du fait de l'ensoleillement, être supérieure à celle de l'intérieur des pièces. D'où le risque d'inversion de tirage. À ce phénomène d'inversion s'ajoutent les phénomènes tourbillonnaires du vent qui peuvent favoriser ou perturber le tirage.

5.9 La cheminée solaire

La cheminée solaire (fig.5-43) utilise la puissance solaire afin de renforcer l'ascendance thermique de l'air. Son principe est inspiré du capteur solaire, ce dernier dispose d'un absorbeur

qui capte le rayonnement solaire et devient très chaud (élévation de la température), l'air se trouvant à l'intérieur de la lame d'air s'échauffe, s'allège et monte vers la partie haute du capteur en tirant à son tour l'air intérieur vers le haut pour le laisser s'échapper à l'extérieur. L'avantage de la cheminée solaire est son pouvoir d'autorégulation¹: le tirage thermique est d'autant plus fort que la cheminée est plus chaude ou la journée est plus ensoleillée. Elle peut se présenter sous trois formes, simple, avec vitrage ou bien combinée : avec vitrage et stockage.

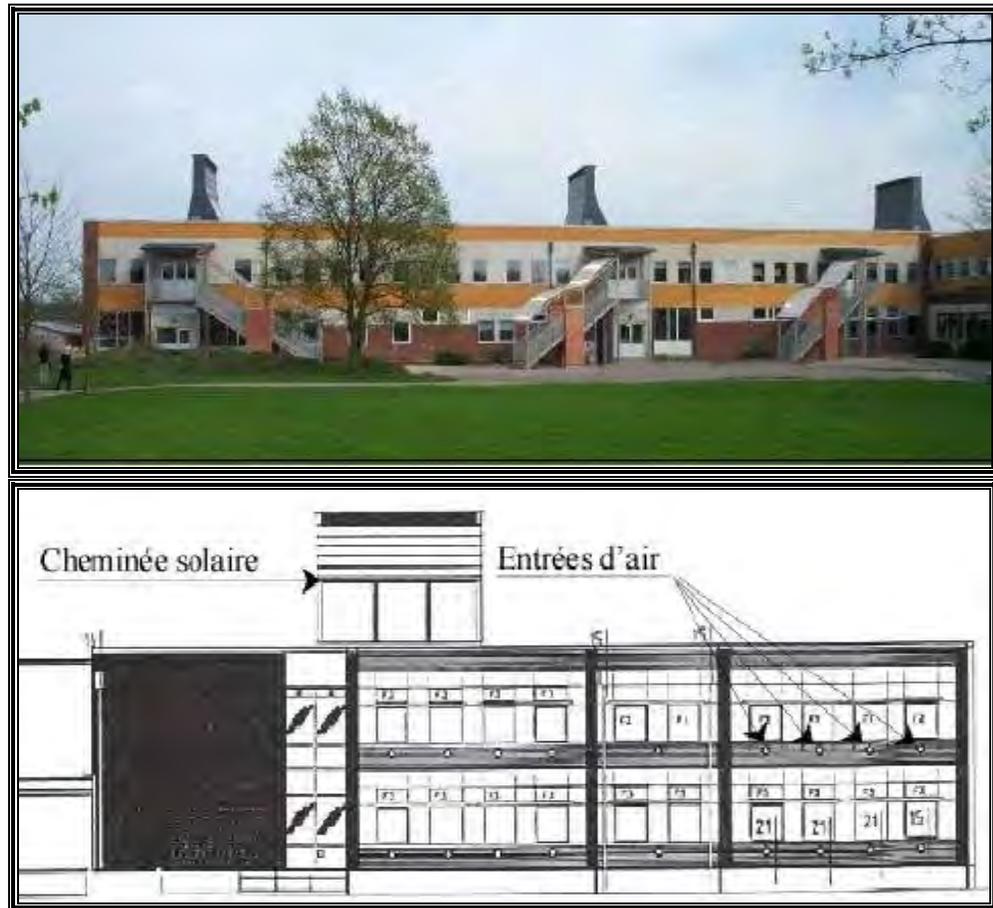


Fig. 5-43 : Cheminées solaires à l'école Tanga à Falkenberg (Sued). **Source** : Allard.F (2001)

La cheminée solaire est donc un capteur à air, constitué d'une tôle noire avec ou sans vitrage dont il est distant, s'il existe, de quelques centimètres, ouvert à ses deux extrémités. L'air tiède entre dans la cheminée à partir du local à rafraîchir au niveau du plafond (fig.5-43). La sortie du flux d'air débouche sur l'extérieur. La convection naturelle ainsi créée ajoutée au vent, aspire l'air intérieur pour le rejeter au-dehors.

L'orientation de la paroi vitrée vers l'ouest améliore son rendement pendant la période la plus chaude de l'après midi. Le tirage thermique peut se poursuivre la nuit à condition d'ajouter une masse de stockage derrière le vitrage. Dans ce cas la cheminée se comportera comme un ventilateur de nuit². D'où l'idée d'utiliser un capteur solaire à air comme cheminée, dans

¹ [Enligne] <http://www.outilssolaires.com>, 2006

² [Enligne] <http://www.gmc.ulval.com>, 2006

l'intention d'arriver à un débit d'air supérieur à celui d'une cheminée à tout moment (jour et nuit).

5.10 La ventilation et les solutions traditionnelles

5.10.1 Le capteur à vent

Les capteurs à vent sont des systèmes de refroidissements passifs très anciens, découverts en Egypte et qui datent de l'époque pharaonique (fig.5.44).

On rencontre souvent cet élément constitutionnel de l'habitat traditionnel en Iran, Irak, Pakistan, Arabie Saoudite, et l'Égypte. Donc, il semble que le capteur à vent forme un excellent moyen pour assurer un renouvellement d'air à une construction dans les régions à climat chaud et aride. Les capteurs à vent fixes, s'élèvent au dessus des toits afin de recueillir les vents dominants les plus frais, les moins poussiéreux, et les moins humides, situés généralement à une hauteur de 6 à 12 mètres¹. L'air frais ainsi capté est dirigé ensuite dans les pièces à ventiler.

Le capteur à vent est naturellement sélectif puisqu'il ne fonctionne pas uniquement grâce aux vents mais aussi grâce au gradient de température entre l'extérieur et l'intérieur².

En effet, si l'air intérieur est plus frais que l'air extérieur, il se crée une pression qui empêche l'air extérieure de pénétrer dans le conduit du capteur ; par contre si l'air extérieur est plus frais que l'air intérieur, ce dernier est chassé par l'air frais, plus dense, qui pénètre par le capteur pour descendre jusqu'au fond (rez-de-chaussée de la bâtisse).

L'air ainsi capté est acheminé dans un conduit, passant à l'abri du soleil (pour éviter l'échauffement de l'air), pour le distribuer aux différents niveaux de l'immeuble.

Afin qu'il y ait un renouvellement d'air efficace, les ouvertures de sortie doivent être placées convenablement et bien dimensionnées de façon à permettre une distribution homogène de l'air neuf aux différentes pièces de la construction.

La forme des capteurs à vent dépend essentiellement de la nature des vents : capteur directifs pour les vents monodirectionnels ou capteurs multidirectionnels pour les vents à directions variables.

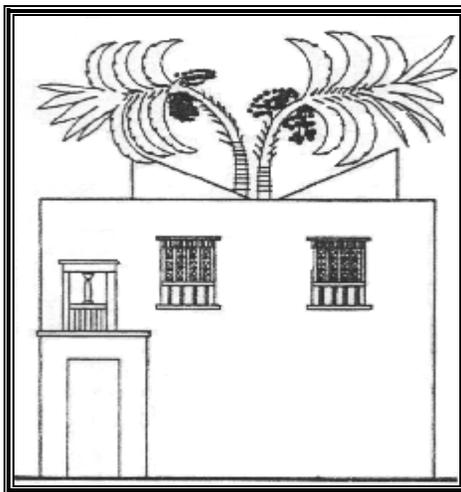


Fig.5-44 : malkaf sculpté sur les tombes Pharaoniques. **Source** : V.Olgay, 1962.

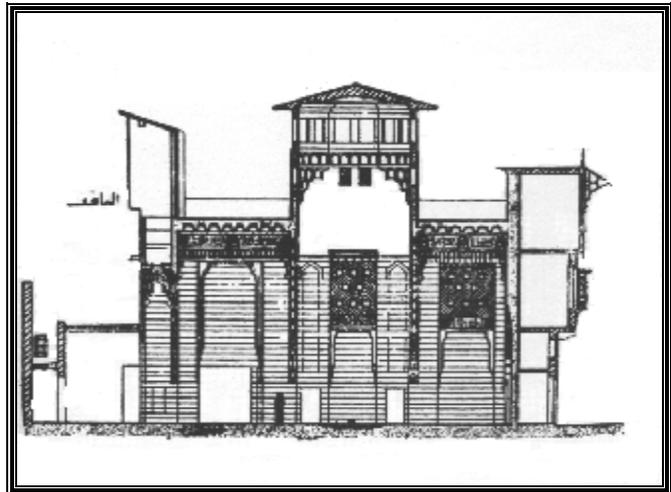


Fig.5-45 : malkaf traditionnel (nouvelle école de gourna) **Source** : H.Fathi, 1970.

¹ Wright. David, *Soleil, Nature, Architecture*, Parenthèses, Paris, 1979. p194.

² Izard. Jean-louis et Guyot Alain, *archibio*. Éditions Parenthèses, Roquevaire, 1979. p 103

a) Capteur à vent monodirectionnel

Ce genre de capteur est utilisé dans les régions où les vents dominants soufflent souvent dans une seule direction pendant toute l'année (fig.5-45), et sont placés le plus haut possible sur le toit d'une construction, afin d'être exposé à un flux d'air non turbulent, frais et propre.

Rappelons le phénomène qui se produit lorsque le vent frappe le bâtiment : en amont, il se crée une zone de surpression, en aval et sur le toit, une zone de dépression ; alors, si l'ouverture de sortie est placée dans la zone de dépression, l'air sera aspiré et évacué du bâtiment. Par exemple : dans la figure (fig.5-45), on remarque que la sortie d'air a été prévue au niveau du toit (peu incliné, soumis à une légère dépression permettant un appel d'air vers le haut), même si le pan de toit fait face au vent, ces surfaces conviennent bien aux sorties d'air.

Sachant que, l'air frais entrant à travers le capteur est dense, donc il a tendance à descendre, il se crée alors une ventilation verticale descendante « un courant d'air » qui dépendra de la vitesse du vent extérieur et de la répartition des pressions.

Certains plans de maisons traditionnelles étaient basés sur un corridor ventilé sur lequel donnent toutes les pièces et ce pour un meilleur écoulement d'air et homogénéité des pressions. Dans le même esprit on peut concevoir un hall central qui créera une véritable source de fraîcheur intérieure.

b) Capteur à vent multidirectionnel

Contrairement au capteur précédent monodirectionnel, le capteur à vent multidirectionnel offre de meilleures solutions quant aux vents de directions variables. On rencontre généralement, ce type dans la région du golfe persique et notamment en Iran, là où l'on appelle « Baudgeer Persia ». Dominants, imposants et richement décorés, ils se présentent sous différentes formes architecturales (fig.5.46), les ouvertures sont placées en tête de la tour à vent et tout au tour d'elles selon leurs aspects. Si l'on trace un profil horizontal de cette tour à vent, on constate qu'elle reprend la forme de la lettre « x » en général (fig.5-46), ainsi les ouvertures peuvent être en nombre de deux à huit.

Le fonctionnement du capteur à vent multidirectionnel (fig.5-47&48) est similaire à celui du capteur monodirectionnel, cependant le premier présente un inconvénient : une partie de l'air capté, peut être perdue par les autres ouvertures qui sont sous le vent, c'est-à-dire : en zone de dépression, alors que dans le second, muni d'une seule ouverture : l'air ne peut s'échapper.

En absence du vent et pendant la nuit, le capteur à vent fonctionne comme une cheminée, par effet de tirage thermique. La masse thermique des murs intérieurs et des murs de la tour restituent la chaleur emmagasinée pendant le jour par radiation et par convection, et comme la pression d'air au niveau haut de la tour est réduite, alors, il se crée un flux d'air ascendant, permettant ainsi à l'air chaud intérieur, de monter et de s'échapper par les ouvertures d'entrée situées au niveau haut du capteur.

Dans les mêmes conditions et pendant le jour, l'effet de cheminée s'inverse, les parois de la tour étant refroidies pendant la nuit, l'air chaud en contact des parois se rafraîchi et devient plus dense, par conséquent, il est appelé à descendre pour être dirigé vers les pièces intérieures, d'où la naissance d'un flux d'air descendant.

Dans les régions chaudes et arides, la performance thermique de la tour à vent traditionnelle peut être améliorée à l'aide d'un processus de refroidissement évaporatif (jarre d'eau, petit bassin, fontaine...etc.), permettant ainsi, d'abaisser la température de plusieurs degrés et d'augmenter le taux d'humidité, ce qui rend l'ambiance intérieure confortable, voire très agréable à vivre (fig.5-46).

5.10.2 Le malkaf traditionnel

Le malkaf traditionnel (fig.5-45) était largement utilisé en terre d’Egypte et d’Iraq. Il opère de la même façon que la tour à vent et utilise les mêmes principes :

- Ø un capteur d’air situé au sommet ;
- Ø une cheminée pour évacuer l’air chaud ; en général, c’est la « dorka’a »¹ qui laisse échapper l’air chaud au sommet.

Pour un rafraîchissement optimum des maisons, les occupants utilisaient jadis, des solutions traditionnelles : on plaçait des jarres d’eau dans le capteur d’air, Pour humidifier le flux d’air passant, La ventilation engendre donc une évaporation, et de cette manière, on obtient une baisse de température et un degré hygrométrique de l’air élevé.

Hassan Fathy¹ a obtenu ce résultat au niveau de l’école de son nouveau village « Gourná », où il a introduit le charbon humide comme système de rafraîchissement dans le malkaf traditionnel (fig.5-45), l’air s’humidifie en affleurant le charbon avant d’être dirigé vers les salles de classes. Il affirme que la température de l’air a chuté de 10°C. De même, les recherches de Bouchahm. Benamara. Y² ont abouti à des résultats qui se rapprochent à ceux de H.Fathi où une réduction de température a atteint 6°C en humidifiant les parois du capteur à vent amélioré.

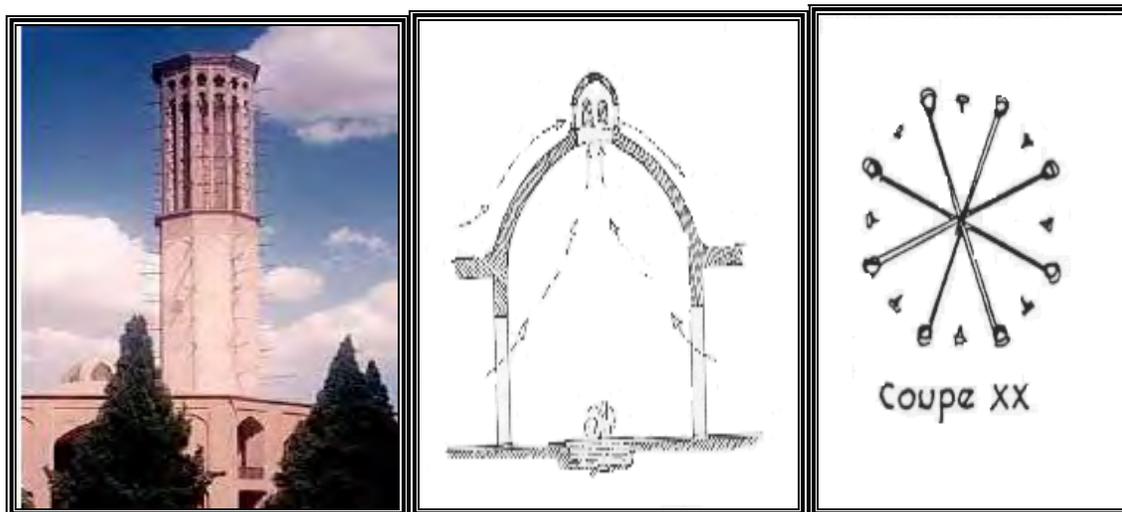


Fig.5-46 : tour à vent multidirectionnelle surmontant les constructions dans les jardins de Dawlat-Abad à Yazd en iran. Source : [http:// www. Yazd.com](http://www.Yazd.com), 2005.

¹ Fathi Hassan, *construire avec le peuple*, édition Sindbad, Paris, 1977.PP.90-306

²Benamara. (Bouchahm).Y² *la performance thermique du capteur à vent pour un rafraîchissement passif dans les régions chaudes et arides. Cas de ouargla*. Thèse de doctorat université de Constantine, 2004.

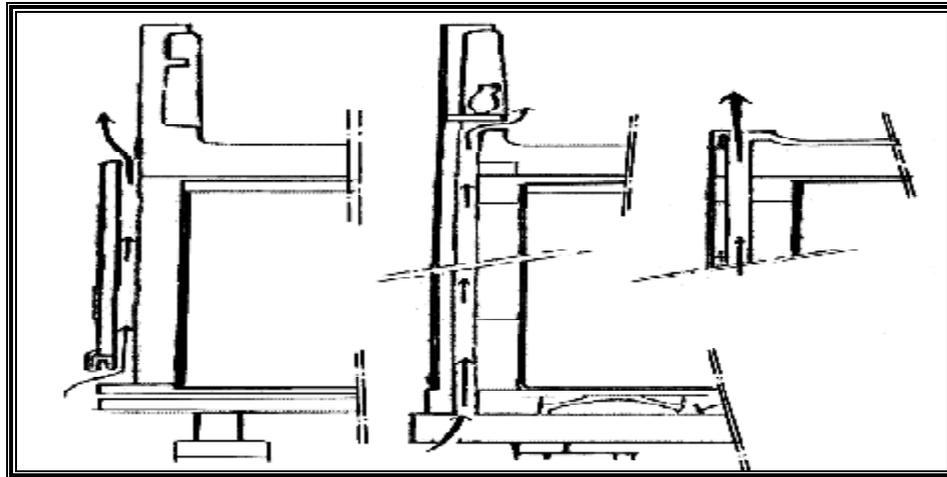


Fig. 5-49 : différents murs ventilés et masques. Variantes utilisées par A. Ravéreau au M^e Zab
Source : J-L.Izard, 1993.

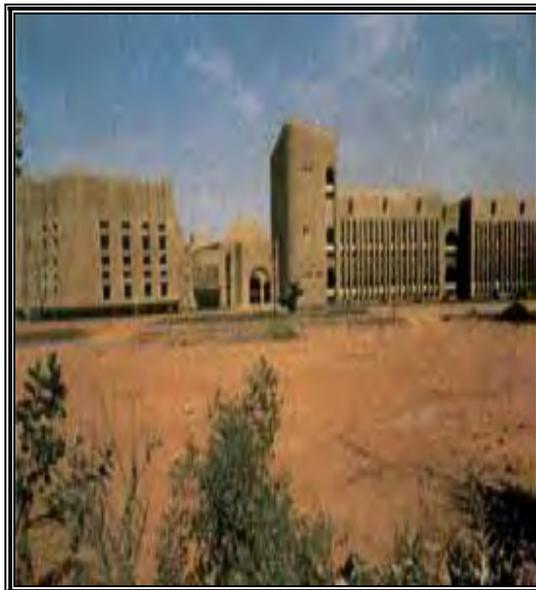


Fig. 5-50 : Murs cheminés, Façade de l'office ONERSOL au Niger. **Source** : <http://www.irisfmg.it>, 2006

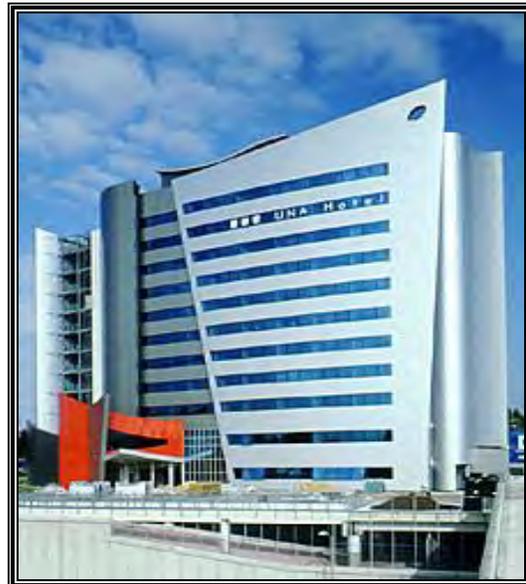


Fig. 5-51 : Murs cheminés d'un hôtel **Source** : <http://www.irisfmg.it>, 2006

5.11 Conclusion

Cette étude a mis en évidence, l'importance que revêt la ventilation naturelle dans l'amélioration du confort intérieur par:

- renouvellement d'air neuf, pour assurer une bonne qualité de l'air en évacuant l'excès d'humidité, les odeurs et également éviter les risques de condensations.
- refroidissement de la structure lorsque la température intérieure dépasse celle de l'extérieur.

- Assurer l'évaporation de la transpiration de la peau (moiteur de la peau) et rafraîchissement du corps

La ventilation "sanitaire" ou "hygiénique" doit être permanente: exigée en hiver comme en été et doit être assurée sous toutes les conditions climatiques. Par contre la ventilation pour le confort thermique, dépend des conditions d'ambiances climatiques intérieures et extérieures (température, degré hygrométrique et vitesse des vents) ainsi que l'agencement des espaces intérieures et la position des ouvertures.

Le mouvement d'air, provoqué par la puissance thermique par effet de gradient de température est, en général, trop faible pour avoir une application pratique notable en ventilation naturelle pendant les périodes chaudes. Et ce quant, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est insignifiante¹. La réalisation de conduits de ventilations à tirage thermique améliore le déplacement d'air. Toutefois, l'action des vents reste le meilleur moyen pour assurer une bonne ventilation.

Dans les pays désertiques comme : l'Iran, l'Irak et l'Égypte, des procédés techniques traditionnels (tours de vents, capteurs à vents) ont été employés pour diminuer la température et créer un mouvement d'air frais et humide à l'intérieure de leurs habitations. Ces solutions sont d'une importance capitale, utilisant les éléments naturels du climat ou sources renouvelables à savoir : le vent, le soleil et l'eau, sans recourir aux énergies d'appoint pour la climatisation ou le chauffage. Par conséquent, les autochtones arrivent à réduire leurs dépenses financières et énergétiques supplémentaires et évitent davantage, la pollution de l'environnement.

De même, il existe des solutions traditionnelles dans les pays tropicaux à climat chaud et humide : les habitants des maisons vernaculaires optent pour le plan libre en un seul ou deux niveaux superposés pour favoriser la circulation de l'air et dégager l'humidité tout en préservant leurs intimités².

Le renouvellement de l'air en vue d'une amélioration de sa qualité pendant l'hiver, nous impose certaines conditions paradoxales: éviter les mouvements de l'air froid et violent, maintenir l'ambiance thermique à l'intérieure des pièces, relativement «chaudes» et évacuer en même temps l'excès d'humidité. Car l'air extérieur est généralement fort et très humide pendant l'hiver, lorsqu'il pénètre à l'intérieur des logements, il provoque des sensations d'inconfort : la température chute et le taux de l'humidité relative de l'air intérieur ne diminue pas en deçà de la valeur de celui de l'air extérieur.

Par conséquent, il semble assez difficile de concrétiser un assainissement de la qualité de l'air au moyen d'une ventilation contrôlée dans les maisons individuelles, en raison du coût de revient de l'installation de dispositifs appropriés.

Ceci peut constituer un domaine qui, incite les chercheurs à innover des systèmes de ventilation plus sophistiqués répondant à ces exigences, surtout lorsqu'il s'agit d'une maison étanche aux déperditions d'air.

¹ [Enligne] <http://www.inrs.Com>. 2006

² Watson Donald & Camous Roger, *l'habita bioclimatique*, l'étincelle, Montréal, Québec, Canada, 1986.p157.

CHAPITRE 6 : INVESTIGATION

6.1 Introduction

Si les opérations de réhabilitation, dans les climats tempérés, doivent intégrer les facteurs climatiques capables de rendre les ambiances intérieures confortables en toutes saisons ; il serait donc, indispensable d'examiner profondément le comportement thermique des espaces intérieures. Pour cela, on procède à une analyse quantitative. Des campagnes de mesures de températures et d'humidité de l'air sont effectuées en deux périodes : hivernale et estivale.

L'étude porte sur les caractéristiques thermiques d'une maison traditionnelle à patio : les matériaux de construction, le pavement, l'étude d'ensoleillement à l'intérieur du patio et la projection d'ombre qui en découle. Le déplacement d'air à l'intérieure de l'immeuble et l'écoulement des vents dominants dans les ruelles par rapport à leurs orientations et finalement les tests de condensations superficielles et interstitielles.

6.2 Choix de la ville

Le choix est porté sur la médina de Constantine (fig.6-1 & 6-2) pour les motifs suivants :

- Ville millénaire caractérisée par des maisons vernaculaires ayant un intérêt historique, architecturale et culturel. Cette typologie de construction est un modèle qu'on retrouve dans plusieurs médinas algériennes et maghrébines.
- Un patrimoine bâti érigé en secteur sauvegardé¹, témoin d'une mémoire collective, est menacé actuellement par un risque réel de disparition, généré par plusieurs facteurs dont l'humidité est l'une des principales causes.
- Plusieurs constructions dont les monuments historiques, ont fait l'objet de travaux de réhabilitation et/ou de restauration.
- Constatation de la réapparition du phénomène de l'humidité après achèvement des travaux de réhabilitation.
- Disponibilité de quelques appareils de mesures nécessaires pour le diagnostic, vu l'existence d'une station météorologique au niveau de la ville de Constantine (Ain el-bey).
- Étant chef de la cellule chargée de la réhabilitation et de la sauvegarde de la médina de Constantine, ceci facilite l'accessibilité aux maisons et permet d'avoir une bonne collaboration avec les habitants pour effectuer les campagnes de mesures des facteurs climatiques.

6.3 Choix de la maison

6.3.1 Situation

La maison choisie est située au sein de la médina de Constantine (fig.6-1 & 6-2), dans le quartier Suika haute, îlot : « Batha » (fig.6-3), porte le N°15, est délimitée par:

- Ø Au nord : maisons en ruine n° 38 & 44
- Ø À l'ouest : impasse Bencheikh el-fegoune (ex : fontanilha)
- Ø À l'est : rue Said Benchikou et la maison n° 112
- Ø Au sud : maison traditionnelle N°17.

¹ Le conseil du gouvernement a adopté le périmètre du secteur à sauvegarder en juin 2005 de la médina de Constantine (non encore publié).

6.3.2 Typologie d'habitation

Il existe trois types d'habitations dans la médina de Constantine à savoir :

- a) Maison traditionnelle ou vernaculaire appelée communément « E'Dar » de grande gabarit (volume) et dispose d'un « wast E'Dar » ou patio ouvert sur le ciel, caractérisé par de grandes dimensions que lui sont proportionnelles (fig.6-4).
- b) Maison « El'Aâly » : est aussi une maison vernaculaire, de plus petit dimensions qui peut s'étaler sur plusieurs étages. Généralement, c'est une maison attenante à la maison mère « E'Dar », et qui peut avoir ou non un patio. (fig.6-5),
- c) Appartement de type colonial, issu de la démolition volontaire et planifiée, effectuée par les colons français, suite aux percées de type haussmanniennes, pratiquée au sein de la médina de Constantine, ces appartements modernes se regroupent dans des blocs d'immeubles qui bordent les rues et se rehaussent sur plusieurs étages (R+3), dépourvues, en général de patio sauf quelques exceptions.

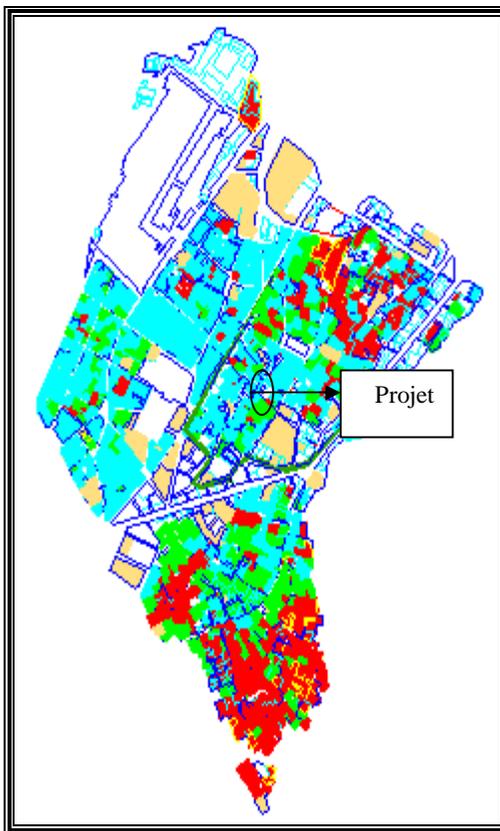


Fig.6-1 : plan de la médina de Constantine
Source : cellule v.v, 2005



Fig.6-2 : vue panoramique à partir du pont El-Kantara
Source : auteur (2005)

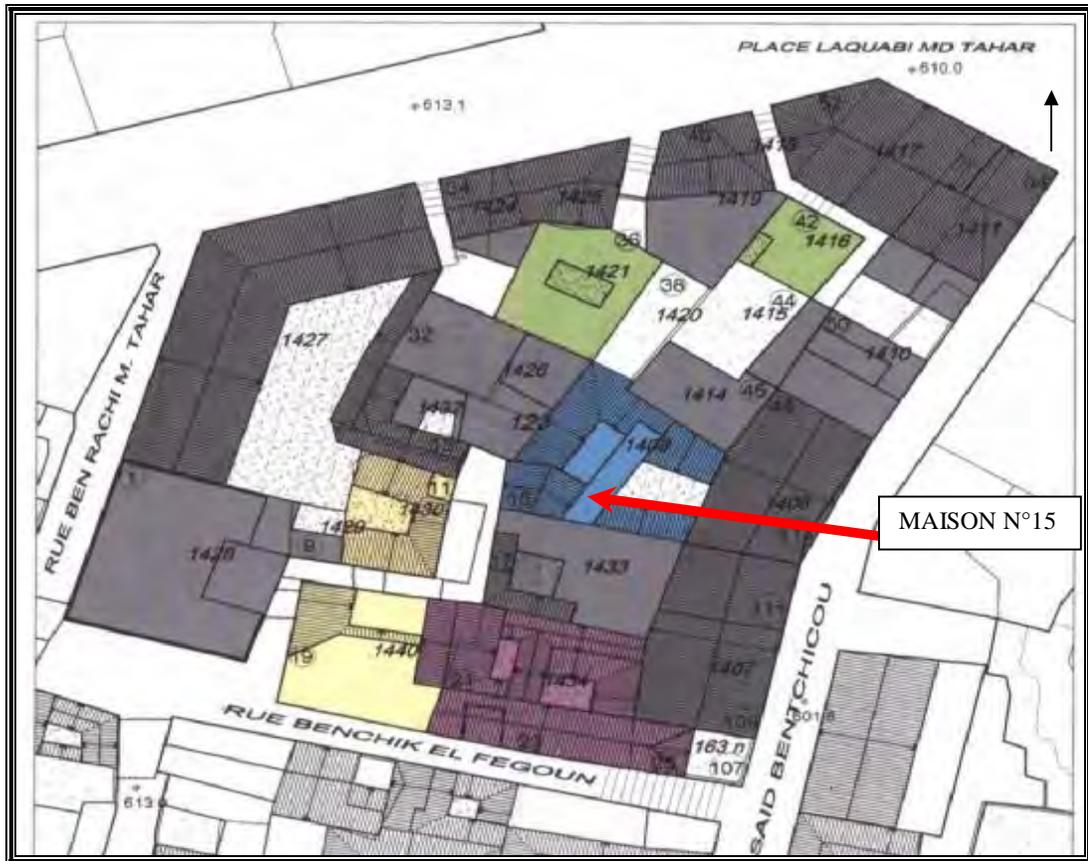


Fig.6-3 : plan de masse. Source : Master plan de Constantine (2005)



Fig.6-4 : grande maison « E'Dar », Source : auteur



Fig.6-5 : petite maison « El'Aâly » Source : auteur

Le choix est porté sur une maison traditionnelle ou vernaculaire, de type « E'Dar » (fig.6-6) ayant un « El'Aâly » (fig.6-7), y attenant, disposant d'un patio surélevé et recouvert d'une verrière.

La grande maison « E'Dar » est caractérisée par sa volumétrie imposante. Elle servait autrefois, comme internat aux étudiants de la medersa el-kettania, et par la suite au maahad Benbadis, raison pour la quelle est dénommée « Dar-Ediaf ».



Fig.6-6 : « Dar-Ediaf ». Source : auteur (2005)

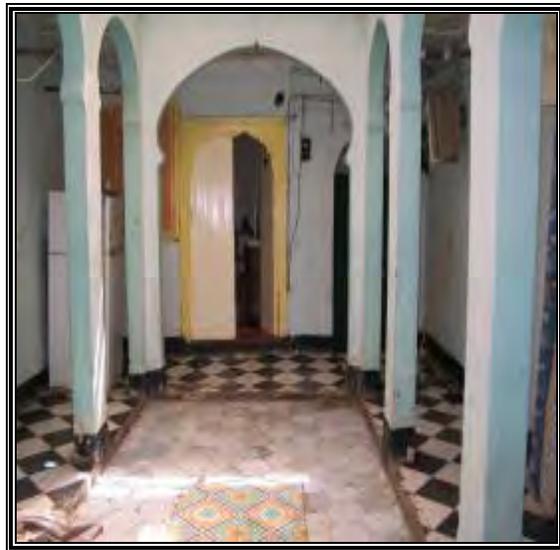


Fig.6-7 : « El'Aâly » de « Dar-Ediaf ». Source : auteur

Plusieurs personnalités Algériennes, qui étaient des élites de la guerre de libération sont passées par cette maison et au lendemain de l'indépendance, sont devenus des hauts responsables de l'état, parmi eux et à leurs têtes, l'ex président de la république, Houari Boumediene. En plus de son aspect historique et éducatif, cette bâtisse est dotée de toutes les qualités de l'architecture traditionnelle (Arabo-Musulmane) :

- Ø Maison introvertie, peu d'ouvertures sur l'extérieur,
- Ø organisation spatiale autour d'un patio, ouvert vers le ciel,
- Ø Les galeries à arcades bordent le patio,
- Ø Entrée principale en chicane (s'kifa)
- Ø Chambres : biyouttes avec « kbou » doukana et maksoura
- Ø Slam, un demi niveau, situé au premier étage, qui servait jadis comme entrepôt des céréales et quelques denrées alimentaires.
- Ø Ornement : zellige sur murs, colonnes en marbre avec chapiteaux richement décorés, revêtement en marbre (patio, galeries, marches d'escalier)

D'autres paramètres utiles au choix, à savoir :

- Ériger en secteur à sauvegarder, donc : elle est appelée à être réhabilitée pour être préservé en tant que patrimoine national et bientôt mondial.
- Maison, construite sur des vestiges romaines : existence d'une citerne romaine qui s'étend pratiquement sur tout le patio et une partie de la galerie, d'où son importance archéologique,
- Elle est choisie par la cellule de réhabilitation de la vieille ville pour servir comme chantier école.
- Maison habité, surtout par des locataires anciens (plus de quarante ans), dont la majorité souffrent des effets de l'humidité sur leurs santé et sur le bâti.

L'espace retenu pour l'investigation est une chambre située au RDC, utilisée par une famille pour dormir la nuit, faire la sieste l'après midi et de faire quelques activités domestiques pendant le jour.

6.4 Description de la maison « Dar E'diaf »

6.4.1 Organisation spatiale

L'organisation spatiale et fonctionnelle de cette maison est semblable à l'ensemble des maisons vernaculaires dans la médina de Constantine. Cette similitude qui se répète sans pour autant être un standard, reste l'une des principales et fortes qualités typo-morphologique urbaine qui caractérise le tissu de la médina de constantine. Chaque maison possède des spécificités architecturales et ornementales très riche qui varient dans l'unicité (fig.6-8).

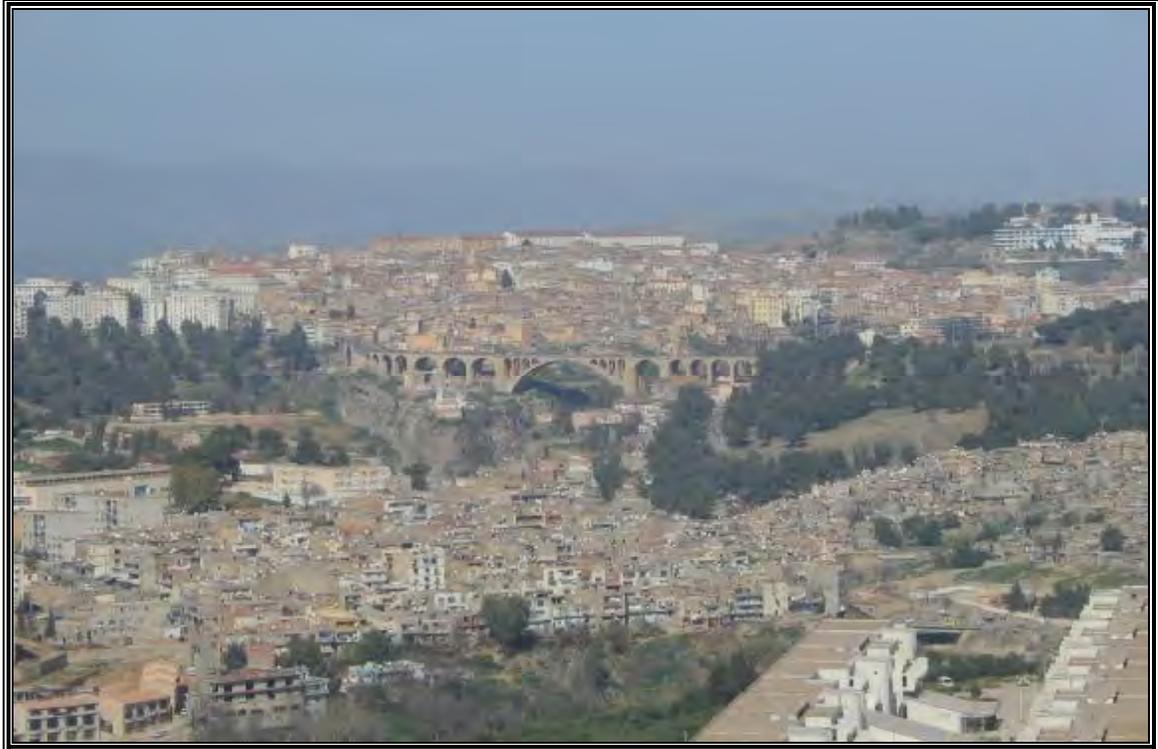


Fig.6-8 : homogénéité du tissu de la médina. Source : auteur

Dar E'diaf se compose de deux corps de bâtiments (fig.6-9 & 6-10) à savoir :

1. le premier, situé, à gauche (fig.6-9), en entrant, est divisé en trois logements distincts ouvrant par trois portes sur le corridor d'entrée et formant premier étage sur le second corps de bâtiment. Appelé : « El'Aâly »
2. le second corps de bâtiment, (fig.6-10) appelé la grande maison (E'dar) est en contrebas du précédent, comprend une maison mauresque, en contre-haut de la rue Benchikou et dont une partie seulement au niveau de la dite rue est à usage commercial. Cette maison consiste en un patio mauresque à ciel ouvert avec dalles, colonnes, et fontaine en marbre (fig.6-11 & 12), entourée sur les quatre faces des galeries et élevée sur rez-de-chaussée, d'un entresol : « Slam » (fig.6-13) et d'un premier étage.



Fig.6-9 : 1^{er} corps de bâtiment : la maison El-âaly, Surmontant E'dar. Source : auteur (2005)



Fig.6-10: 2^{eme} corps de bâtiment : la grande maison E'dar Source : auteur (2005)



Fig.6.11: fontaine dans le patio Source : auteur (2005)



Fig.6.12 : colonne en marbre (galerie) Source : auteur (2005)



Fig.6.13 : Slam au 2^e niveau Source : auteur (2005)

La lecture de l'agencement des espaces intérieurs de cette bâtisse fait ressortir trois niveaux de structurations successifs à savoir : le patio, la galerie et les biyouts.

La maison est introvertie, ses espaces s'organisent autour d'un noyau qui est le « patio », ou « wast E'dar », qui représente un point de départ de la composition spatiale, espace clos mais ouvert vers le ciel (fig.6-14), (il symbolise aussi chez les musulmans, la relation divine qui existe entre l'homme et son créateur).

La galerie à arcades (colonnade), est un espace semi-ouvert formant un nœud entre toutes les pièces environnantes (fig.6-14-15-16).



Fig.6-14 : différents vues en plans de la grande et la petite maison (a,b,c,d)
Source : auteur (2005)

Les chambres ou *biyouts*, sont des espaces fermés, dont l'aménagement se fait le long des galeries, perpendiculairement aux axes du patio (fig.6-14).

L'accès principal et unique, aussi bien pour E'dar que pour El'Aâly, se fait par une impasse (Rue Bencheikh el-fegoune (ex : impasse fontanilha) et mène directement à la skiffa (fig6-17). Cette dernière est composée de deux espaces disposés en chicane assurant l'intimité de la famille

(fig.6-14a & 6-18). La première permet l'accès à El' Aâly par l'intermédiaire d'une cage d'escalier indépendante, qui aboutit au petit patio rectangulaire situé au dernier niveau, et le second au patio de la grande maison, en empruntant quelques marches plus bas.



Fig.15: patio ouvert vers le ciel



Fig.16 : galerie à arcades et colonnades

Source : auteur (2005)



Fig.6-17: impasse Bencheikh el-fegoune, menant à Dar-ediaf



Fig.6-18 : différence de niveau marquant le seuil de la skiffa

Source : auteur (2005)

Ces différences de niveaux, marquent en quelque sorte des limites ou seuils à ne pas franchir pour un étranger (fig.6-18). La première et la seconde partie sont séparées par une porte, ils s'érigent sur une surface de 10m² chacune, ces espaces sont sombres à cause de l'inexistence des fenêtres. Les murs sont recouverts de carreaux de céramique (zellige) de différents motifs et couleurs, sur une hauteur de 1,30m ainsi que l'encadrement des portes. Le plancher est revêtu en marbre, par contre le plafond est en bois (Aâraâr) recouvert d'un sous plafond en lattis et roseaux, enduit au plâtre. À défaut d'entretien et sous l'influence de l'humidité, ils sont dans un état très dégradé (fig.6-19-20).



Fig.6-19: revêtement mural dégradé (Skifa)

Fig.6-20 : faux plafond dégradé (Skifa)

Source : auteur (2005)

L'accès au patio se fait donc, par une série de portes en nombre de quatre, dont la dernière s'ouvre sur la galerie dans une direction perpendiculaire aux trois premiers (chicane), (fig6-14a). Le patio ou wast E'dar, est de forme trapézoïdale, il est revêtu en marbre blanc et entouré de galeries ou « satha » à colonnades sur les quatre côtés. Les dalles des galeries sont aussi en marbre (fig.6-11-14-16).

Il existe au niveau du patio, un « madjene » : une citerne qui date de l'époque romaine, alimentée jadis par des eaux pluviales. Aujourd'hui, elle est fermée et non utilisée. La maison est alimentée par le réseau d'eau potable municipal.

Au rez-de-chaussée, les pièces, appelées madjelesse, sont réparties sur les quatre ailes de l'immeuble, doté chacune d'une porte et d'une fenêtre disposées linéairement. À l'exception du madjelesse situé à l'est, qui est menu d'une autre fenêtre opposée, donnant sur la rue benchikou, lui assurant une bonne ventilation. Les fenêtres sont de dimensions moyennes dont l'allège est à 0,80 m de hauteur environ (fig.6-14a-16).

Un demi niveau, appelé communément « Slam », de 1,60m de hauteur occupe le deuxième niveau, utilisé autrefois comme dépôt des denrées alimentaires, aujourd'hui, il sert de logement ! (Fig.6-13)

Les pièces du premier étage sont appelées biyouts, elles sont réparties tout autour des galeries et s'ouvrent de la même manière que les madjelesses. Leur forme est rectangulaire. Elles sont longues et étroites dont la largeur est de 3m environ, qui peut être dépassées au niveau du « k'bou » (fig.6-21-22-23-24).



Fig.6-21: bit utilisée comme salle de séjour



Fig.6-22: bit inoccupée (dégradée)

Source : auteur (2005)

Ce dernier est surélevé de 0.20m par rapport au sol, aménagé au centre de la pièce sur le même axe de la porte et il présente un plafond voûté richement décoré. De part et d'autre du k'bou, on trouve les « maqsûras » qui sont des espaces utilisés pour le rangement de divers objets (fig.6-25).

Les deux parties latérales de la pièce sont constituées de « doukanas », séparées par des arcs outrepassés ayant des profondeurs variables. L'une reçoit le lit conjugal et l'autre accueille les matelas des enfants en bas âges (fig.6-26).

Au dernier niveau, on trouve une terrasse accessible, au quelle se greffe une buanderie transformée en logement, une autre pièce précaire vient d'être construite dans son prolongement du côté nord (fig.6-27). Le revêtement de la terrasse est en carreau de céramique (terre cuite) rouge (fig6.28). La toiture de la buanderie et de son extension, sont en charpente en bois revêtus de tuile en terre cuite rouge (fig.6-28).



Fig.6-23: K'bou, avec coupole



Fig.6-24 : K'bou, sans coupole

Source : auteur (2005)



Fig.6-25 : Maqsura



Fig.6-26 : Doukana

Source : auteur (2005)



Fig.6-27 : construction précaire et illicite (habitée)



Fig.6-28: Buanderie, transformée en logement

Source : auteur (2005)

Depuis son édification, Cette maison a connu des transformations à travers le temps, en vue de l'adapter aux différents statuts d'occupation. Au départ, et pendant l'époque turc, elle était destinée à une seule famille élargie, puis devenue « Dar E'diaf » : lieu d'hébergement des étudiants algériens et ce, après l'occupation française. Après l'indépendance et à ce jour, elle devient un immeuble d'habitation à loyer pour plusieurs familles.

Le mode de vie et les mœurs des nouveaux occupants qui sont généralement des ruraux, venus suite à l'exode rural des années soixante, ont contribué négativement aux modifications des lieux, et ont changé l'usage des espaces de la maison urbaine constantinoise. Ceci, a influé même sur l'état physique de la bâtisse en provoquant des dégradations.

6.4.2. Matériaux utilisés dans la construction (types et dimensions)

a) types

Type d'ouvrage de la Maison dar E'diaf et son Laaly					
Mur (0,40 -0,80) [m]	Plancher (0,65-0,70) [m]	Terrasse accessible (0,65-0,70) [m]	Toiture (0,26-0,30) [m]	Colonnes Ø : 0,30 [m]	Ouverture 0,40x0,40 à 2,00x2,20
-Pierre, -brique pleine, -enduit plâtre, -mortier de chaux, -revêtement en céramique (hauteur variable)	-bois (aâraar ou thuya) utilisé comme poutres et poutrelles -remplissage : terre + sable+ gravat (TVN), -revêtement en carrelage (céramique) et marbre au niveau : *patio *galeries *cage d'escalier -faux plafond en roseaux et plâtre	-plancher en bois (aâraar ou thuya) utilisé comme poutres et poutrelles - remplissage : terre + sable+ gravats (TVN), - revêtement en tomettes rouge (céramique en terre cuite de forme hexagonale). -Faux-plafond en roseau + enduit plâtre	- charpente en bois - Tuile en terre cuite rouge -faux plafond en roseau + enduit plâtre.	En marbre, les Jointoiement en plomb	-Huisseries et ouvrants en bois dur (cèdre et chêne). -vitrage simple -vitrage mauresque - barreaudage en fer forgé

Tab.6-1 : matériaux utilisés dans la construction de la maison . « Dar-Ediaf ». Source : auteur (2005)



a) Mur en pierre



b) colonne et chapiteau en marbre



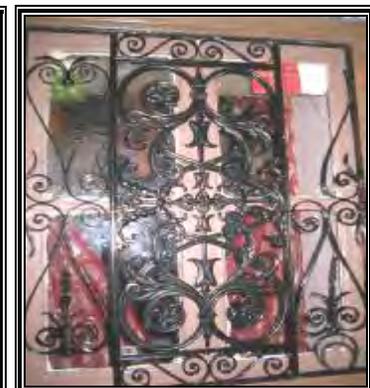
c) revêtement en marbre



d) plancher en rondin de bois (thuya)



c) revêtement mural en céramique

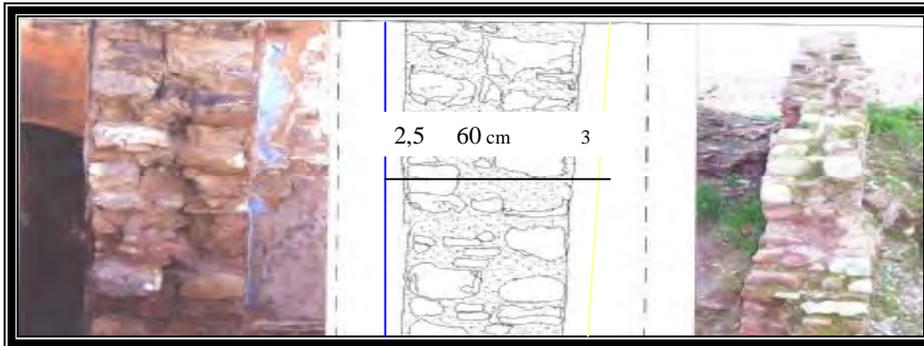


e) fer forgé et bois dur en cèdre

Fig.6-29 : quelques matériaux utilisés dans la maison « Dar-Ediaf ». Source : auteur (2005)

b) Dimensions de quelques ouvrages.

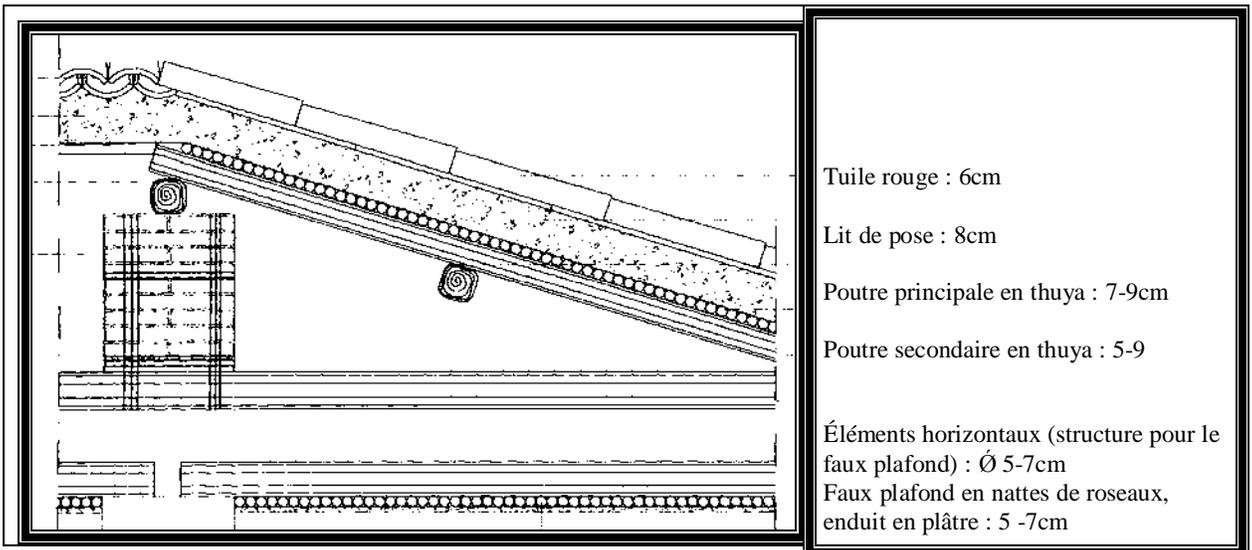
1. Murs



ECH : 1/10

Fig.6-30 : Murs en élévation : épaisseurs variables de 0,40 à 0,80 m (une moyenne de 0,60m). Source : auteur

2. Toiture et planchers



ECH : 1/10

Fig.6-31 : Toiture inclinée en tuile rouge, montée sur une charpente en bois « genévrier » (aâraâr), l'ensemble est porté par une structure en maçonnerie (pierre, brique...). Source : auteur (2005).



fig.6-32 : structure d'un comble en bois (genévrier)



fig.6.33 : structure d'un plancher en bois (genévrier)
Source : auteur (2005)

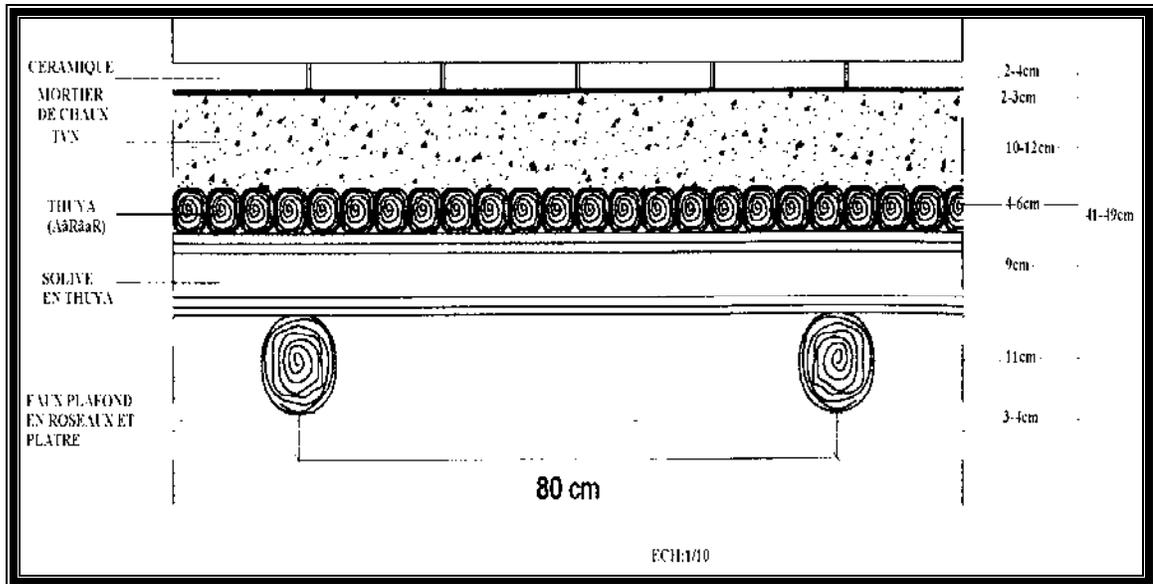


Fig.6-34 : Plancher (haut/bas et terrasse) en bois genévrier (aâraâr), revêtu de carreau de céramique l'ensemble est porté par une structure en maçonnerie (pierre, brique...). Source : auteur (2005)

3. Ouvertures



a) fenêtre ouvrant sur la rue de dim : (0,40/0.50)



b) fenêtre à 2 battants ouvrant sur l'impassé : (1,00/1.20)



c) fenêtres ouvrants sur l'extérieur de dim : (variable)

d) portes fenêtres de dim : (1,20x2,20 m)



e) fenêtre donnant sur le patio de dim : (1,00 x 1,00m)

f) portes à double vantaux des chambres de dim : (2,00 x 2,20 m)

Fig.6-35 : Dimensions des ouvertures : les grandeurs sont différentes et variables, allant de 0,40 à 2,20m
Source : auteur (2005)

6.4.3 Organisation fonctionnelle

L'hierarchisation des espaces qui structure la maison constantinoise, permet de comprendre certaines relations fonctionnelles entre ces espaces et leurs interdépendances. Tout le concept d'organisation s'inspire des moeurs arabo-islamique.

La skiffa (vestibule), espace de transition entre l'extérieur et l'intérieur, assure l'intimité des individus. Elle servait autrefois, comme lieu de rencontre masculines (amis, voisins...etc.), son rôle est toujours préservé, quoique ses portes sont toujours ouvertes (fig.6-14a).

Wast-eddar (patio), utilisé autrefois, comme lieu de rencontre familiale, où l'on effectue des activités (féminines) domestiques, culinaires et ménagères lors de la journée par contre le soir et à l'arrivé du chef de la famille ou bien des invités étrangers, son rôle change et devient un lieu de réception (fig.6-14a).

Maintenant que, le statut d'occupation a changé et que plusieurs familles occupent la maison, le rôle traditionnel du patio a complètement changé. Il devient le lieu de plusieurs pratiques sociales collectif et non unifamilial tout en conservant sa centralité en tant que cœur de la maison.

La galerie ou **satha**, est devenue un espace d'extension des biyouttes-logements. Elle assure plusieurs fonctions « polyvalence » : cuisiner, discuter avec les voisins, stocker les jerrycans d'eau, sécher le linge et aire de jeux des enfants. La galerie spacieuse est l'espace préféré des garçons qui l'utilisent pour dormir la nuit, pendant la période chaude de l'été (fig.6-14b).

Les **biyouts** (chambre) étaient, à l'origine, des chambres à coucher seulement. Elles ont subi des transformations spatiales et fonctionnelles dues au changement du statut de la maison. Actuellement, el-bit est un logement, c'est-à-dire une pièce polyvalente qui abrite toute les activités familiale nécessaire à la vie humaine quotidienne. La journée, la pièce devient un séjour bien orné et présentable, la nuit, elle se transforme en coin pour dormir. Souvent, la doukana se transforme en chambre à coucher pour un nouveau couple ; L'arc outrepassé est muré, une porte vient s'y greffer pour permettre la communication. On assiste alors à une subdivision de l'initial bit en plusieurs sous espaces pour "inventer" un appartement, vidé de son essence (fig.6-14b).

6.5 Analyse morphologique des éléments architecturaux structurant la maison

6.5.1 Le patio

Le patio présente une forme trapézoïdale, cette forme est conservée à travers tous les niveaux. Il s'érige sur une surface de 15 m². La largeur moyenne est de : 2,8 m et la hauteur moyenne est de : 10m, d'où on obtient un ratio = H/l, soit : 10/2,8 = 3,50. Ce résultat exprime le rapport de proportionnalité entre les différentes dimensions du patio. Dans ce cas, le ratio indique bien que le patio est assez profond. (fig : 6-6; 6-9; 614 & 6-39)

6.5.2 Les ailes du bâtiment

Les quatre ailes du bâtiment suivent la géométrie ou la forme du patio, du Rez-de-chaussée jusqu'au dernier étage. Ceci, est beaucoup plus perceptible au niveau des pièces. On remarque que la largeur des biyouts est étroite et ne dépasse guère 3m, en raison de la contrainte structurelle, par contre leur longueur est importante et peut atteindre 11,00m. Des rapports de similitudes géométriques peuvent s'établir ainsi, entre le patio et ces pièces. D'où quelques proportions modulaires peuvent être dégagés.

Malgré, cet ordre d'organisation dans une géométrie asymétrique, le patio reste toujours le centre de gravité et d'articulation par excellence. Toutes les pièces s'ouvrent et convergent vers lui ; au rez-de-chaussée, la relation spatiale est directe par contre, en étage elle se fait tangentiellement (tout au tour). (fig.6-14)

6.5.3 La galerie

C'est un espace semi couvert, permettant la vue directe sur le patio, et assure la fluidité de la circulation à l'abri des intempéries, tout en offrant de l'ombre lors des saisons chaudes.

Elle constitue l'espace intermédiaire entre le patio et les pièces (biyouts). Elle le borde et limite sa géométrie. D'où l'on peut déduire qu'il existe une certaine hiérarchisation dans la composition spatiale : on transite d'un espace ouvert (patio) à un espace semi ouvert (galerie) pour arriver à

un espace fermé (la chambre). Cette dernière se trouve privée d'ensoleillement (radiation directe) pendant l'hiver et protégé des vents fort en toutes saisons (fig.6-36; 6-39; 6-40).



Fig.6-36. Galerie étroite



Fig. 6-37 : escalier principal assurant la relation verticale entre galeries

Source : auteur (2005)

Ce mode relationnelle influe sur l'occupation des espaces, selon les saisons et on assiste alors, à un nomadisme horizontal et vertical, qui s'opère surtout en période d'été, où l'on constate un déplacement vertical vers la terrasse la nuit (fig.6-28) et un déplacement horizontal du patio vers la galerie pendant le jour, et ce à la recherche de la fraîcheur. Ainsi, on peut déduire que cette organisation spatiale, hiérarchique répond beaucoup plus à un mode de vie social qu'à un souci d'ordre climatique.

6.6 Etude de l'enveloppe de la maison

En général, l'enveloppe de cette bâtisse est constituée d'une toiture en tuile, terrasse accessible et parois verticales et horizontales épaisses (extérieures et mitoyens),

6.6.1 Texture extérieures

L'enveloppe extérieure de la grande maison est complètement aveugle, à l'exception d'une petite partie située à l'est. Elle est dotée d'une seule fenêtre qui donne sur la rue Benchikou said, et permet une bonne ventilation transversale (fig.6-14). Les trois autres côtés de l'immeuble forment une mitoyenneté avec les maisons avoisinantes. L'épaisseur des murs périphériques est importante, varie entre 0,50 et 0,65 mètres, constituée de pierre calcaire (fig.6-29 ; 6-30).

6.6.2 Texture intérieures

Les parois verticales intérieures donnant sur le patio présentent toutes, des ouvertures : porte et fenêtre qui sont disposés linéairement (juxtaposés) ne permettant pas une bonne ventilation (fig.6-14). Leurs épaisseurs sont variables (de 0,50m à 0,65m). Les autres parois opaques intérieures forment des cloisons de séparations entre les pièces principales et espaces annexes,

ainsi que les planchers. Ces parois constituées de briques pleines (argile cuite), de pierre calcaire et le bois (genévrier) (tab.6-1), permettent le stockage d'énergie¹.

6.6.3 Toiture

Le dernier niveau présente une combinaison entre terrasse accessible et toiture en pente (fig.6-28). L'étude des rapports de surfaces entre vide et plein permet de nous renseigner, sur le comportement thermique de l'immeuble, à cet effet, il serait intéressant de calculer l'indice, ou rapport (plein /vide) des parois horizontales et celles verticales.

- pour les parois verticales : l'indice des rapports entre surfaces transparentes et surfaces pleines est de 20 %.
- Quant aux parois horizontales, et considérant que, le patio est un « vide », l'indice des rapport de surfaces est de 10%.

À titre indicatif, ces résultats montrent que l'enveloppe de la maison présente une masse importante, qui permet, en principe, un important emmagasinement d'énergie, et ce, dans le cas où les parois ne sont pas humides. Le fait que les murs périphériques sont pratiquement tous mitoyens (sauf une petite partie), l'échange thermique se fait uniquement avec le patio et la terrasse.

6.7. Étude d'enseillement et de ventilation

L'examen des effets climatiques sur la bâtisse, objet de cette étude permet de comprendre le comportement thermique de cette dernière, et ce, dans le but de clarifier certaines causes de l'apparition du phénomène de l'humidité. L'enseillement et la ventilation participe pleinement dans la création des conditions d'existence ou non de l'humidité surtout celles des condensations ; aussi, elles jouent un rôle très important dans le séchage des matériaux et diminution du taux hygrométrique de l'air, comme, elles peuvent freiner, puis arrêter la prolifération de l'humidité ascensionnelle à un certain niveau selon les critères suivants²:

- Ø la vitesse et le débit de la ventilation.
- Ø l'intensité et la durée des radiations solaires,

6.7.1 Enseillement :

Étant donné que, cette maison est située à l'intérieure d'un tissu urbain dense, dont les hauteurs moyennes des constructions dépassent les 10,00m et que leurs murs extérieurs sont mitoyens (fig.6.1; 2; 3). D'autant plus qu'elle est du type « introvertie » (ouverte sur le patio), Ceci a engendré des effets intensifs d'occultation du soleil durant sa course apparente dans le ciel. La projection de l'ombre qui en résulte sur l'un ou l'autre des bâtisses ou bien sur les façades intérieures donnant sur le patio, nécessite une étude minutieuse car elle constitue, en combinaison avec d'autres facteurs, un microclimat qui peut être un milieu favorable à l'élévation du taux d'humidité et au développement des moisissures surtout sur les objets en matières organiques.

Dans notre cas, il s'agit de vérifier avec précision : à quel moment de la journée ? Et dans quel mois est-il occulté ? Et ce pour nous permettre d'atteindre nos objectifs qui se résument en : déterminer les causes réelles de l'humidité qui caractérisent cette maison et d'essayer de trouver les remèdes adéquats.

¹ Givoni B, L'homme, L'architecture et le climat, édition le Moniteur, paris, 1978

² Séminaire organisé par le collège international des sciences de la construction avec la collaboration de l'UNESCO, *L'humidité dans le bâtiment*, CILF, Saint-rémy-lès-chevreuse (France), du 23 au 25 Novembre 1982

A l'aide du diagramme solaire et du rapporteur d'occultation, il est aisé de tracer la courbe d'ensoleillement et la courbe d'ombres pour déterminer leurs influences tout au long des jours et des saisons.

Les résultats des occultations illustrés sur le diagramme solaire, les profils et vue en plan du rez-de-chaussée de la maison (fig.6-38 ; 39 ; 40 ;41 ;42 ;43 ;44), permettent de conclure ce qui suit :

- La chambre, objet d'investigation, donne sur la façade intérieure du patio orienté nord (tronçon CB) est ombrée pendant toutes les heures durant toute l'année (fig.6-38).
- le patio est ombré pendant les mois et heures suivantes :
 - **Le 22 juin** à 6h00mn (hs : 16°; azimut :-20°) : le patio est totalement ombré;
 - **Le 22 juin** à 10h00mn (hs : 61°; azimut : +20°), le patio est ombré à 90% : toutes les façades intérieures sont ombrées, sauf celle orientée « sud » est partiellement ombré (fig.6-42);
 - **Le 22 juin** à 12h00mn (hs : 76°), le patio est partiellement ombré : Les façades intérieures orientés nord et ouest sont totalement ombrés, par contre celles orientés sud et est sont partiellement ombré (fig.6-41);
 - **Le 22 juin** à 15h00mn (hs :- 48°; azimut :-6°) : le patio est totalement ombré,
 - **Le 30 juillet et le 15 mai** à 6h00mn et 10h00 (hs :59°; azimut : +25°) : le patio est totalement ombré,
 - **Le 30 juillet et le 15 mai** à12h00mn, le patio est partiellement ombré : Les façades intérieures orientés nord et ouest sont totalement ombrés, par contre celles orientés sud et « est » sont partiellement ombrés (fig.6-44),
 - **Le 30 juillet et le 15 mai** à15h00mn, le patio est totalement ombré.
 - **Le 28 janvier et le 15 novembre**, à 12h00mn (hs : 36°) : le patio est totalement ombré (fig.6-43) par conséquent, il est évident qu'il est ombré toute au long de la journée.

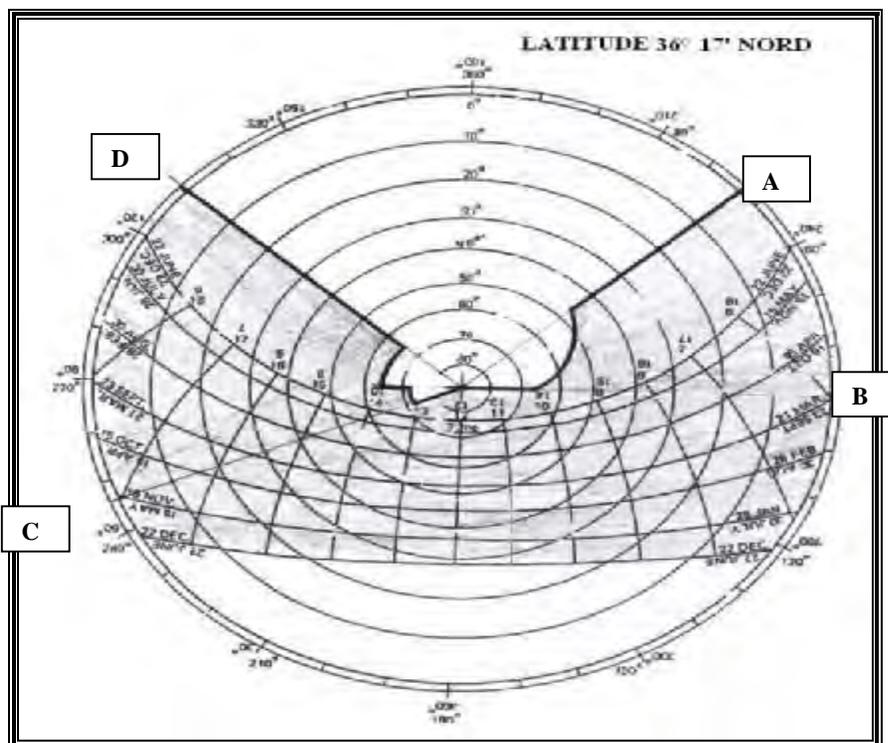


Fig.6-38: Représentations sur le diagramme solaire : Ombre projeté sur le mur nord de la chambre testée .Source : auteur (2005)

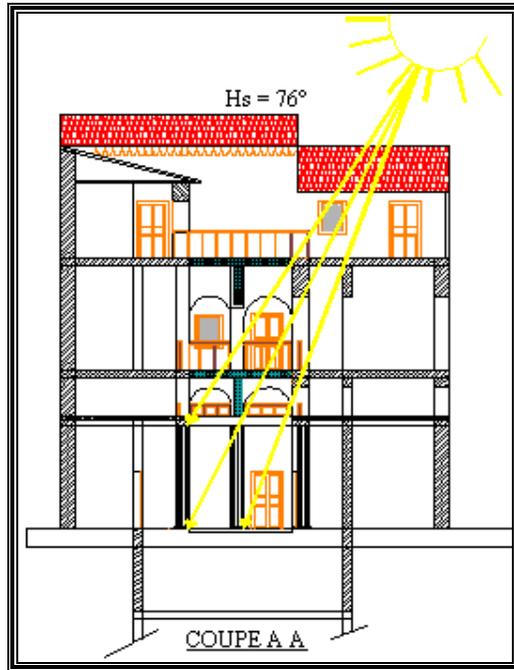


fig.6-39. : ensoleillement au mois de juin
hauteur solaire (hs) : 76°

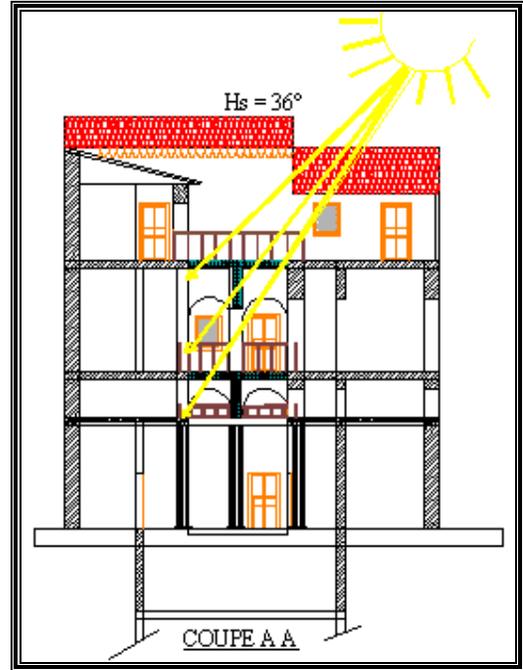


fig.6-40 : ensoleillement au mois de janvier
hauteur: solaire (hs) : 36°

Source : auteur (2005)

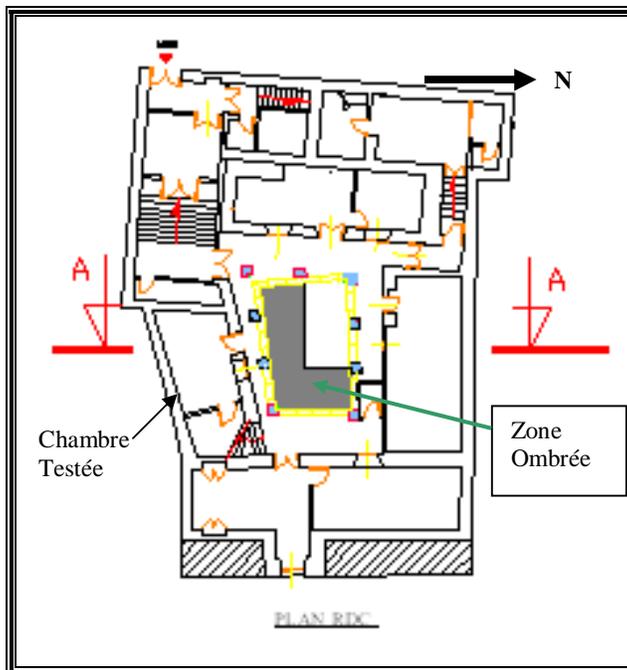


Fig.6-41 : ensoleillement du patio au mois de juin
à 12 :00h ; hs : 76°

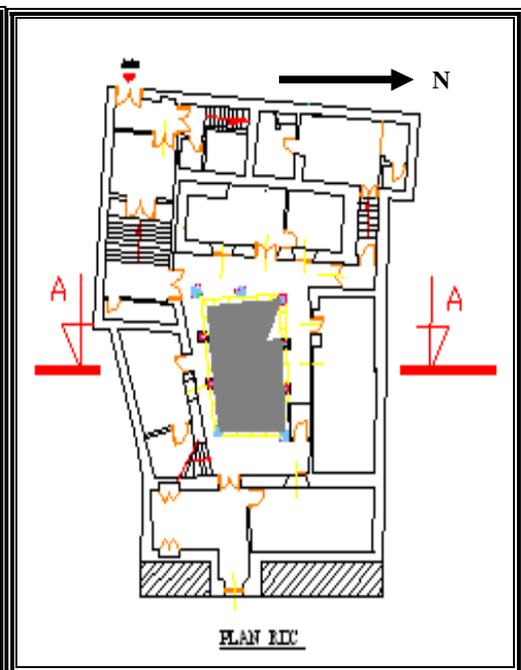


fig.6-42 : ensoleillement du patio au mois de
juin à 10 :00h ; ; hs : 61° ; azimut : 20°

Source : auteur (2005)

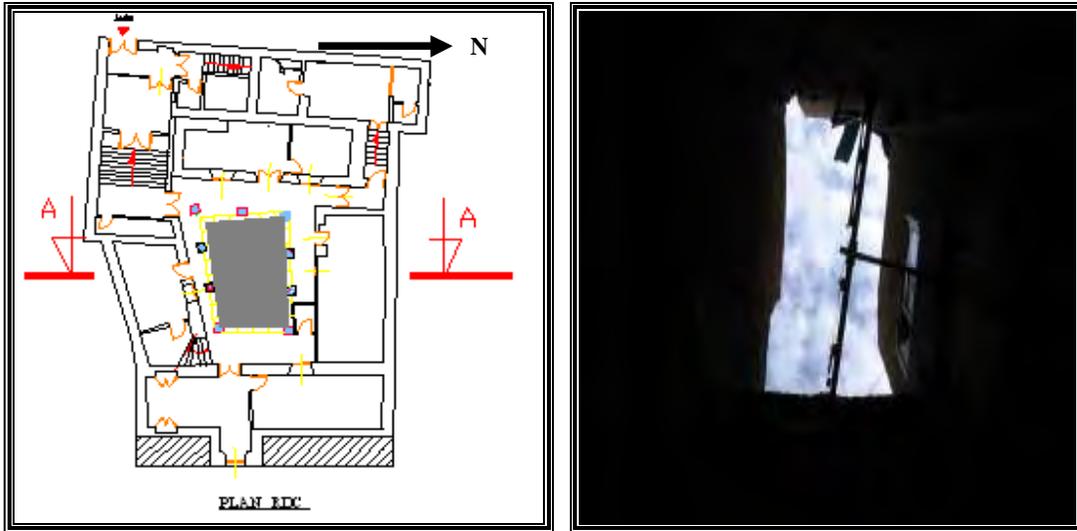


fig.6-43 : patio totalement ombré au mois de janvier ; hs : 36°. Source : auteur (2005)

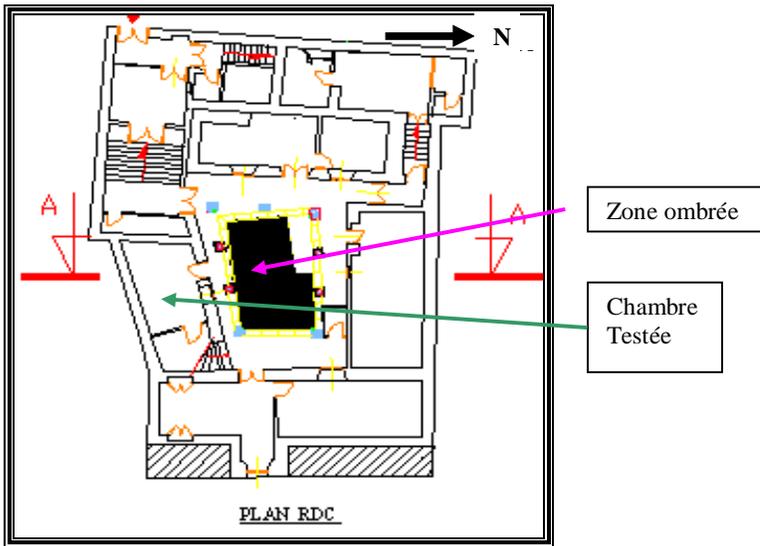


Fig.6-44 : ensoleillement du patio au mois de juillet à 12 :00h. Source : auteur (2005)

6.7.2 Étude de la ventilation :

Le tissu de la médina de Constantine est caractérisé par sa haute densité urbaine, qui se traduit par une rugosité élevée du site, par conséquent la vitesse du vent se trouve atténuée et affaibli tout en se propageant en profondeur dans les quartiers.

L'écoulement de l'air suit le cheminement des rues et ruelles qui sont en direction des vents dominants « Nord, Nord-ouest » (fig.6-45), se sont des vents forts et froids

Dans notre cas, le mouvement de l'air est conditionné par plusieurs facteurs, dont les constructions existantes, qui constituent soit un obstacle, soit un moyen pour diriger le flux.

Au premier plan, les vents dominants venants du bassin de Hamma Bouziane, pénètrent par les ruelles orientées Nord-ouest (fig.6-45; 46), qui les dirigent par effet de canalisation. Ce déplacement d'air rencontre en cours de route des obstacles constitués par des constructions. On constate des effets de tourbillons au niveau de la place si El-houas, des divisions du flux au niveau des carrefours, ainsi le vent prend de multiples directions ce qui diminue énormément sa vitesse. Les immeubles qui bordent de part et d'autre la rue Larbi ben M'hidi, constituent de véritables remparts contre les vents dominant froid de l'hiver. La maison objet de notre étude est située dans un îlot totalement protégé par ces bâtisses, d'autant plus que son accès se fait par l'intermédiaire d'une impasse en forme de « Z » qui affaiblit considérablement aussi bien, la vitesse que le débit de l'air (fig.6-3).

Étant donnée que, la hauteur moyenne des constructions de la vieille ville ne dépasse pas les quinze mètres, le vent a tendance de passer au dessus des bâtisses¹. En outre, il est à noter aussi que la majorité des constructions sont de type : maison traditionnelle à patio ouvert sur le ciel, par conséquent, le vent passe au dessus des patios, comme il a été énoncé au (chap.5.ventilation). D'où l'on peut déduire que l'air est très calme au niveau de la maison « Dar-eddiat » et de ses alentours.

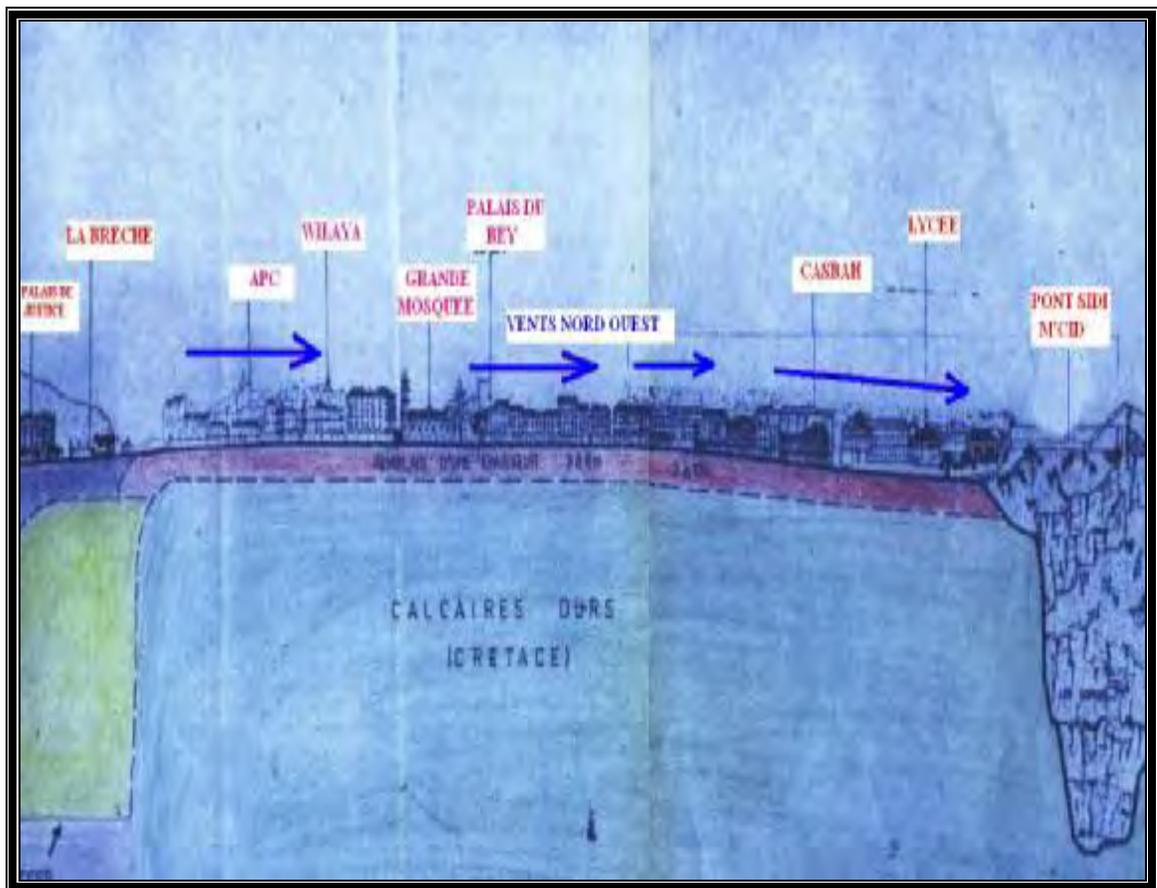


Fig.6-45 : écoulement de l'air sur la médina de Constantine.

Source : URBACO, modifié par l'auteur (2005).

¹. Chatelet Alain, Fernandez Pierre, Lavigne Pierre, Architecture climatique : une contribution au *développement durable*. Tome 2 : *concepts et dispositifs*, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998.p46

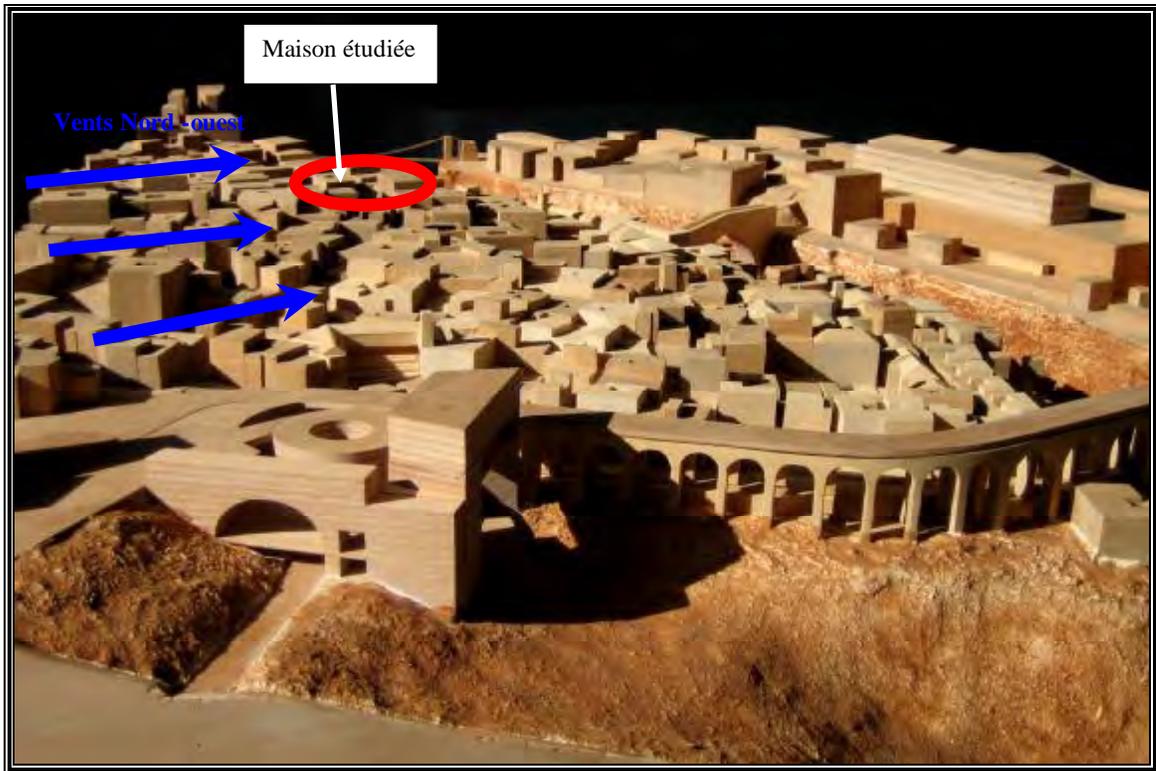


Fig.6-46 : écoulement de l'air sur le quartier Suika.

Source : maquette du master plan de la médina de Constantine, modifié par l'auteur (2005)

6.8. Diagnostic

L'humidité est un phénomène difficile à déceler. Quand on remarque son apparition dans un mur ou une ossature, il ne faut pas se précipiter de l'expliquer car à première vue, il se pourrait qu'on soit induit en erreur. Donc, il faut se méfier de l'évidence. par exemple : si l'on voit apparaître des taches sombres de moisissures sur un mur d'une pièce au dernier niveau d'un immeuble en béton armé, on croit tout de suite qu'elles sont provoquées par une infiltration d'eau venant du toit, ou par une pénétration de pluie battante.

Un diagnostic minutieux sans idées préconçues peut révéler le contraire, que la zone en question est protégée par une avancée extérieure, ou bien que son orientation ne permet pas à la pluie de frapper dans cette direction là. Ou encore l'inclinaison des pluies n'est pas assez suffisante pour lui permettre d'atteindre cette partie du mur.

Le spécialiste est obligé donc de procéder à des études de cas par cas afin d'éviter de tomber dans les erreurs, et ensuite ramener chaque cas à des normes standardisées et lui appliquer les critères établis sur la base d'examen expérimentaux. Un bon diagnostic est basé sur six études préalables :

- 1- mesure du taux d'humidité de l'air (l'intérieur / extérieur) de la pièce considérée ;
- 2- mesure des températures de l'air (intérieur / extérieur) de la pièce considérée ;
- 3- mesure de la teneur et détermination de la distribution de l'eau dans la maçonnerie ;
- 4- étude de la provenance de l'eau ;
- 5- détermination de la nature des matériaux constituant les murs et ossatures ;
- 6- contrôle de la résistance thermique des murs extérieurs.

L'objectif de cette étude est de préciser les origines et les types de l'humidité qui affecte le local objet du diagnostic. Auquel un remède adéquat, par la suite, sera choisit parmi les méthodes anciennes et nouvelles selon le cas.

Les mesures des taux d'humidité dans les locaux humides s'avèrent indispensable, cet acte est comparable à celui d'un médecin qui constate que son malade est fiévreux, mais ne se donne pas la peine de mesurer sa température. Ainsi, l'évaluation du taux d'humidité et de l'ampleur de sa gravité ne peut être subjective.

Il est nécessaire de mesurer donc, le taux de l'humidité de l'air et celui des maçonneries ainsi que les températures de l'air. Ceci se réalise facilement à l'aide d'instruments de mesure spéciaux (hygromètre ou psychomètre et thermomètre), mais en ce qui concerne la condensation dans la masse, s'effectue à l'aide d'une balance, la quantité d'eau contenue dans les échantillons prélevés par sondages, à des endroits différentes dans la masse interne du mur considéré.

Il est possible aussi de vérifier le risque de condensation dans la masse à partir des calculs des pressions partielles de vapeur d'eau et les pressions de saturations de chaque couche constituant les parois, en utilisant la méthode de Glaser¹.

Ces mesures, qui fournies des données chiffrées des taux d'humidité, permettent donc d'enlever à l'expression « **local humide** » ce qu'elle a de vague et parfois de controversé².

La plus délicate et importante humidité est celle de la condensation dans la masse parce que, le taux déterminé par un certain nombre de sondages à intervalles réguliers, il permet de déterminer avec précision la quantité d'eau, sa répartition et son point d'infiltration, éléments qu'il est indispensable de connaître pour procéder à un assainissement efficace.

La détermination de la nature des matériaux qui composent la maçonnerie ou l'ossature permet de connaître le degré d'affinité, de résistance et même le comportement vis-à-vis de l'eau ou de sa vapeur.

Le contrôle de la résistance thermique des murs extérieurs n'est utile que si l'on est sûr, par élimination des autres hypothèses, qu'il s'agit d'humidité de condensation : il se calcule simplement à partir de l'épaisseur des murs.

6.8.1 Méthodes de Mesures de l'humidité

a) Humidité de l'air

La mesure de l'état hygrométrique de l'air, appelé « Humidité relative », est une opération importante, à première vu, pour différentes raisons, entre autres, le jugement du degré de salubrité d'un local, taux auquel dépend la sensation de malaise que nous éprouvant, en entrant dans une pièce humide.

L'état hygrométrique de l'air se mesure sous trois formes :

Ø Humidité relative de l'air « H.R » :

Elle s'exprime en pourcentage, par exemple, on dit que H.R est à 70 %, c'est-à-dire : l'air ne contient que 70 % de vapeur d'eau qu'il pourrait absorber à une température ambiante, la différence entre ce pourcentage et 100% (taux de saturation à la même température) est 30%, représente la marge ou défaut de saturation.

¹ La méthode de Glaser permet de vérifier le risque de condensations, en comparant la progression des courbes des pressions partielles par rapport aux pressions saturantes.

² MASSARI. G, Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements, Éditions Eyrolles – Paris, 1971

L'humidité relative est définie par le rapport entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air et celle qui s'y trouverait si, à la même température, l'air était entièrement saturé ; ce rapport est égal à celui qui existe entre les deux tensions correspondantes de la vapeur d'eau¹. Par exemple, à une même température de 20°, l'air contient 5g/m³ de vapeur d'eau², cependant l'air saturé pourrait en contenir 17,11 g/m³ d'après le tableau (tab.6-2) : le rapport 5/17,11=29%.

Température.....	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
Tension max.en mm	4,57	6,51	9,14	12,67	17,36	23,52	31,51
Hum.abs.max.en g	4,85	7,61	9,32	12,71	17,11	22,79	30,03

Tab.6-2 : Comparaison entre tension de vapeur et humidité absolue : l'humidité absolue est presque égale à la tension de vapeur d'eau. Source : Massari, 1970.

C'est ainsi que, l'on peut déterminer le taux de « **H.R** », selon deux méthodes soit, à partir du rapport entre deux humidités absolues, l'une effectivement présente dans l'air et l'autre potentielle en cas de saturation, soit, le rapport entre deux tensions correspondantes de la vapeur d'eau

Ø Humidité absolue de l'air :

C'est la masse de la vapeur d'eau (en gramme) dans un volume d'air (m³), poids susceptible de varier entre 1 gr et 40 gr, à températures normales.

Ø Tension de la vapeur d'eau :

C'est-à-dire la force élastique de la vapeur d'eau qui détermine une pression sur la colonne barométrique, et que l'on exprime en bars ou en millimètres de mercure. Elle peut varier entre 1mm et 40mm de mercure à températures normales. Elle est directement proportionnelle à l'humidité absolue soit à la température.

Il existe toujours dans l'air une quantité d'eau sous forme de vapeur, que l'on peut mesurer à l'aide d'instruments tels que : l'hygromètre à cheveu, le psychomètre ou les hygromètres digitales...etc.

a1) Appareils de mesures de l'humidité de l'air

Ø L'hygromètre à cheveu :

comme son nom l'indique, il est doté de cheveux et de certaines fibres organiques (fig.6-47), qui ont la capacité de modifier leur longueurs en fonction du degré hygrométrique. Il a la particularité de donner des résultats assez approximatifs, tous les 20 mn, ce retard est dû à son inertie. Les Hygromètres doivent être contrôlés pour chaque début de campagne de mesures, selon un étalon car ils sont susceptibles de se dérégler sans raisons apparentes.

Ø le psychromètre :

Il se compose de deux thermomètres, dont l'un est sec et l'autre mouillé, le bulbe est entouré d'une petite pièce de toile qui, lorsqu'on procède à des mesures, doit toujours être imbibée d'eau (fig.6.49). Il est préférable d'utiliser l'eau distillé afin d'éviter les dépôts de sels causés par l'évaporation qui peuvent fausser la lecture des indications.

Son fonctionnement se fait de la manière suivante : on accélère l'évaporation de la pièce de toile du thermomètre mouillé en la ventilant légèrement (fig.6-50). Deux indications sont relevées : la différence de température entre les deux thermomètres et la température du thermomètre mouillé.

¹Belakhowsky.S, Chauffage & Climatisation, Technique & Vulgarisation, Paris, 1980 pp94-97

² Valeur obtenue à l'aide du diagramme de l'air humide (voir. p.192.fig. 6-79)

L'appareil est toujours muni d'un tableau qui donne l'humidité relative correspondante à chacun de ces couples de relevés. Le psychromètre donne des mesures assez exactes dans le cas où la température du thermomètre mouillé est supérieure à zéro, dans le cas contraire ($T < 0$), les indications deviennent peu sûre à cause de la formation de petites croûtes de glaces (mauvaise conduction de la chaleur).



Fig.6-47. L'hygromètre à cheveu



Fig.6-48 Hygromètre enregistreur (jules richard)

Source : auteur, 2004



Fig.6-49. Psychromètre traditionnelle

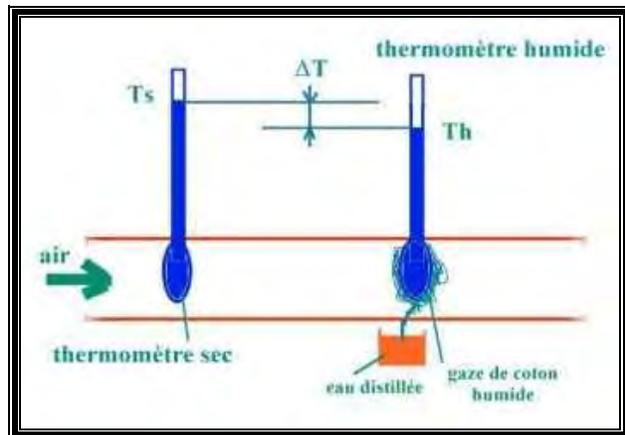


Fig.6-50 : principe du psychromètre

Source : Guyot

Ø l'hygromètre digital :

Appareil pourvu de piles électriques : en appliquant une petite différence de potentiel, on exploite la variation de la conductibilité électrolytique de la résine en fonction de l'humidité relative de l'air dont les mesures sont aussi approximatives. Certains de ces appareils peuvent être reliés à un micro-ordinateur(fig.6-51a).

Ø hygromètre à diffusion :

Cet appareil met à profit le phénomène de diffusion de la vapeur d'eau à travers une membrane, phénomène dont l'importance est directement proportionnelle à l'humidité relative de l'air. Cet appareil comprend un petit réservoir (fig.6-52) contenant de l'eau distillée, recouvert d'une membrane et directement relié à un tube manométrique dont la différence de pression se lit sur

une échelle graduée en millimètre. Un thermomètre à cadran (fig.6-52gauche) indique la température au moment de l'observation. Un petit tableau, joint à l'appareil, permet de connaître directement l'humidité relative correspondant à chaque indication combinée de température et de pression.



a)

b)

c)

Fig.6-51 : L'hygromètre digital, pour les mesures de l'humidité relative de l'air.

Source: <http://www.Domosystem.com>, 2004

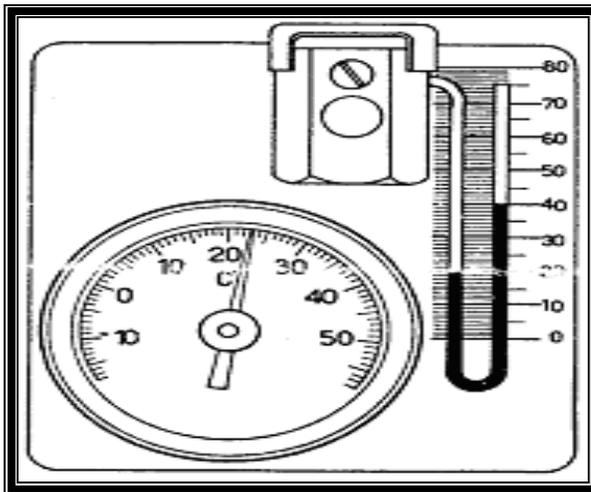


Fig.6-52 : Hygromètre à diffusion. Source : Massari, 1971

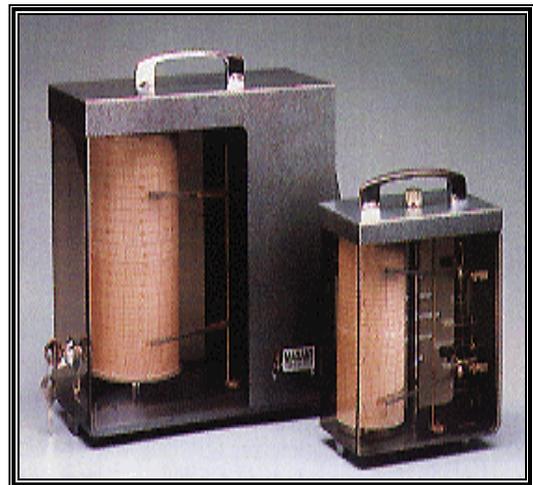


Fig.6-53 : Hygromètre enregistreur ..
Source, www.Domosystem.com, 2005

Ø Thermo-hygromètre enregistreur :

Ces appareils enregistreurs permettent d'observer sans interruption, de jours comme de nuits, les variations de l'humidité relative. C'est pour cette raison que notre choix est porté sur ce genre d'appareil, pour les utiliser dans les campagnes de mesures, d'autant plus qu'ils sont disponibles au niveau de la station météorologique de Constantine.

a2) Échelle de confort de l'humidité relative (HR)

Le taux de vapeur d'eau contenu dans l'air varie sur une échelle de 0 à 100% en fonction de la température. La plage de bien être¹ se situe entre 45 et 65% (fig.6-54), on estime alors que l'air est:

- Ø **humide**, lorsque : **HR > 65 %** ;
- Ø **confort**, lorsque : **45 < HR < 65 %** ;
- Ø **Très sec**, lorsque : **HR < 45 %**.

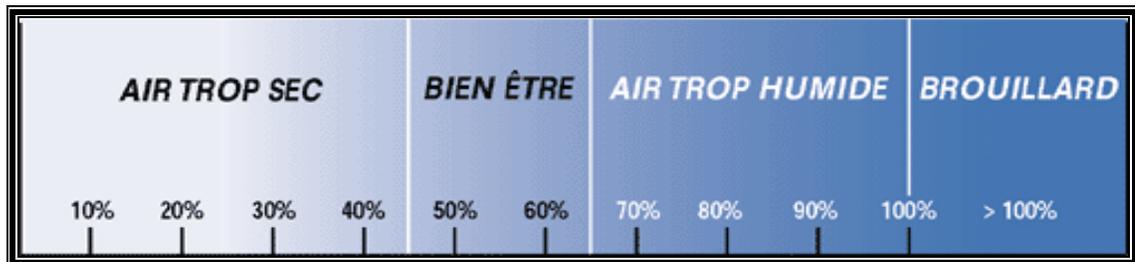


Fig.6-54 : échelle de confort. Source : <http://www.Rubson.com>. 2005

b) Humidité des parois

La mesure de la quantité d'eau contenue dans la masse des matériaux est indispensable voir décisive, pour juger de l'habitabilité d'un local. On peut l'effectuer de deux façons, selon le degré de précision souhaité : mesures superficielles et mesures profondes

b1) Mesures de l'humidité superficielle

Ce type de mesures concerne, généralement, les enduits et s'effectue à l'aide d'appareils électriques, basés sur la différence de résistance électrique déterminée par les différentes quantités d'eau présentes entre deux points.

Ces appareils fonctionnent au moyen d'électrodes à fiches, que l'on enfonce dans l'enduit (environ 3cm), ou à l'aide de plaques qu'il suffit d'appliquer contre la paroi (fig.6-55; 56).

Leur utilité est indiscutable pour les peintres, soucieux de connaître le degré d'assèchement de l'enduit neuf, avant de commencer les travaux de peintures. Leur but était d'empêcher la destruction des couleurs par les sels basique de calcium quand l'enduit est humide encore, vu que la prise n'est pas achevée.



Fig.6-55 : Appareil de Mesure superficielle: mur

Fig.6-56 : Appareil de Mesure superficielle : bois

Source : www.Domosytem.fr.2005

¹[Enligne] <http://www.Rubson.com>. 2005

b2) Mesures d'humidité dans la masse

Pour mesurer le taux d'humidité de la masse interne du mur, on doit procéder de la manière suivante : On extrait un échantillon manuellement à l'aide d'un tube dentelé (fig.6-57), que l'on enfonce dans le mur à une distance de 20 cm de profondeur. L'échantillon est ensuite déposé sans être touché dans un bocal en verre absolument sec que l'on ferme tout de suite hermétiquement.

D'après les recherches expérimentales de Bianchini¹, ce n'est qu'à environ 20 cm de profondeur que le taux d'humidité du mur n'est plus influencé par les variations de l'état hygrométrique de l'air ambiant.

L'utilisation des burins ordinaires est déconseillée car le matériau obtenu s'effrite trop facilement, par contre l'emploi de la foreuse électrique est autorisé mais avec précaution, le nombre de tours excessif entraîne un échauffement susceptible de provoquer l'évaporation d'une partie de l'humidité et par conséquent de fausser les résultats de l'analyse.

Dans les constructions anciennes, le choix des points de prélèvement doit être fait avec prudence, parce que la distribution de l'humidité dans les maçonneries est très irrégulière et diminue habituellement du plancher vers le plafond. Il faut extraire des échantillons un peu partout, même sous les planchers, s'ils sont posés à même le sol ou sur une voûte. L'examen d'un échantillon peut quelquefois donner des résultats très différents de celui des échantillons voisins, pour des raisons qui dépendent de quelques éléments perturbateurs, telles que les fissures.

Il est préférable, dans les constructions anciennes de tracer, sur le mur en cause, une verticale le long de laquelle s'effectuent les prélèvements d'au moins trois échantillons à 1 m de distance les uns des autres, par exemple : à 0,40m et 2,40m du sol. Le choix de ces hauteurs est recommandé pour des raisons pratiques. L'évaluation du taux d'humidité doit être confiée à un laboratoire de chimie, et se fera selon deux méthodes : la méthode pondérale ou bien la méthode à l'alcool.

La première, consiste à mesurer l'humidité de l'échantillon en calculant la différence de poids avant et après la dessiccation. La seconde, fondée sur l'avidité de l'alcool pour l'eau, consiste à faire absorber toute l'humidité de l'échantillon par l'alcool, puis évaluer, par différents systèmes la quantité d'eau ainsi absorbée.

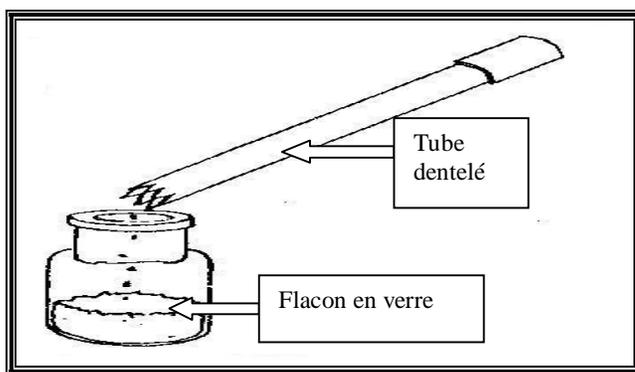


Fig.6-57 : dépôt des fragments du matériau (échantillon)

¹ Bianchini. R. « in » Massari. G, Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements, Éditions Eyrolles – Paris, 1971

b3) Le four traditionnel de Calvi

C'est l'un des plus simples et des plus courants procédés de dessiccation, qui permet de déterminer le taux pondéral d'humidité, dont le résultat n'est pas parfait mais satisfaisant.

On procède de la façon suivante : on retire du bocal une quantité d'environ 20 g d'échantillon, à structure de préférence homogène, que l'on pulvérise rapidement dans un mortier et que l'on pèse avec précision dans une capsule de porcelaine. On l'introduit ensuite dans le four de Calvi, (fig.6-58) où elle reste pendant sept heures environ, à une température de 100°C et sous ventilation. On la repèse enfin et l'on mesure, dans la différence de poids, la quantité d'eau évaporée, que l'on traduit en pourcentage. L'un des inconvénients de cette méthode, traditionnellement suivie jusqu'à nos jours, est la longueur du temps nécessaire pour pouvoir considérer comme acquis l'assèchement complet de l'échantillon : il faut normalement compter environ sept heures pour que le poids constant du matériau soit restitué, autrement dit pour que l'on puisse considérer l'échantillon comme complètement sec.

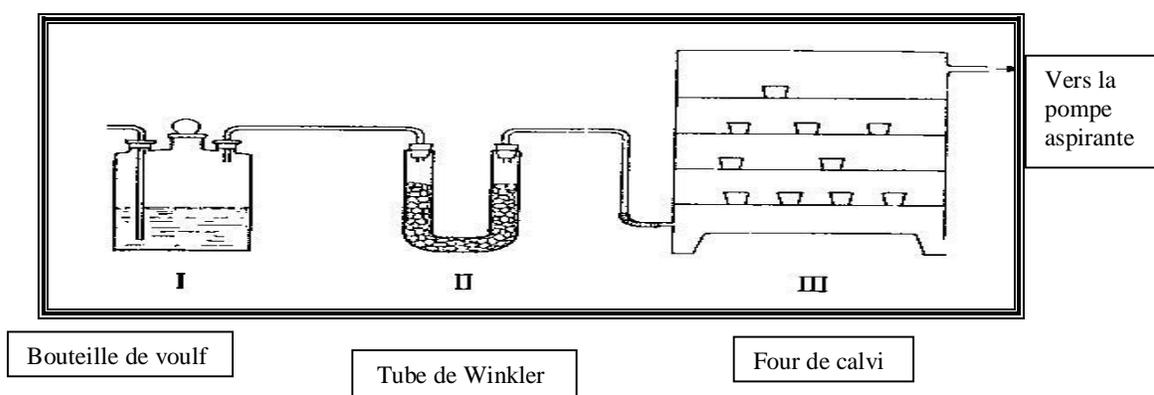


Fig.6.58. Procédé de dessiccation des échantillons par ventilation. Source : Massari

b4) Le four à haute fréquence

Ce four a été innové par un groupe de chercheurs : Massari, Talenti et Tizzano.

Il s'agit d'un appareil extrêmement simple (fig.6-59) dont le procédé physique assurant l'élimination de l'humidité de l'échantillon est différent du procédé employé par le four traditionnel de Calvi.

L'échantillon broyé est soumis à une température oscillant entre 100 et 115°C, le séchage s'effectue en 10 ou 15 mn, parce que la chaleur agit à l'intérieur de la masse sur toutes ses parties en même temps, à l'opposé de Calvi, qui utilise l'aération pour évacuer la vapeur d'eau. L'aération dans ce four est presque inutile pour évacuer la vapeur d'eau, parce que celle-ci se condense immédiatement sur la plaque métallique froide de l'électrode supérieure, d'où elle est absorbée par un buvard ou recueillie goutte à goutte dans un petit récipient spécial.

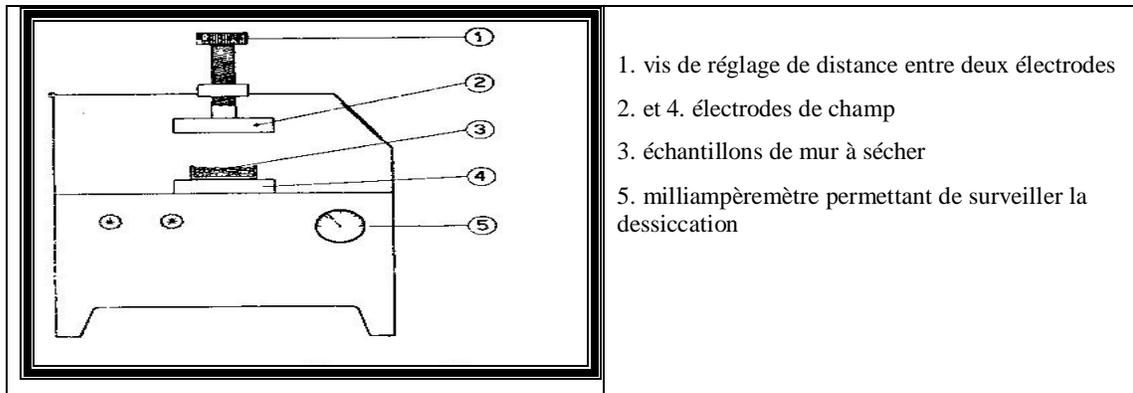


Fig.6-59 : Four de Massari, Tizzano et Talenti. Source : Massari, 1970

6.9 Objectif des campagnes de mesures

L'objectif de la campagne de mesures est de vérifier l'impact réel des effets négatifs du climat en particulier l'humidité, aussi bien sur les constructions que sur le confort des habitants afin de juger l'habitabilité de cette maison du point de vue confort, hygiène et salubrité.

Deux campagnes de mesures ont été effectuées, l'une en été (juillet.2004) et l'autre en hiver (janvier.2005).

6.9.1 Facteurs climatiques mesurés

Il s'agit de mesurer les facteurs climatiques ayant une incidence sur le confort thermique et qui sont nécessaire pour le procédé de vérification des condensations à savoir :

- Ø humidité relative de l'air (intérieure/extérieure);
- Ø température de l'air (intérieure/extérieure);

La vitesse de l'air étant négligeable¹ car l'air est calme à l'intérieur des maisons à patio situées dans un tissu dense, les vents forts passent en général, au dessus des constructions à patio dont la hauteur ne dépasse pas 15,00 m.

Les deux paramètres climatiques suscités, permettent de calculer :

- la température surfacique des parois, sur leurs faces internes, pour la comparer à la température de rosée², afin de vérifier la condensation superficielle.
- Les températures interstitielles relatives à chaque couche constituant les parois,
- Les pressions de saturation correspondantes et les pressions partielles dans le but de vérifier la condensation dans la masse avec la méthode de Glaser.

a) Humidité relative

C'est une mesure de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air par unité de volume ou de masse, exprimée en pourcentage de la quantité saturante de vapeur d'eau que l'air peut renfermer à la même température. Sa quantification permet d'expliquer les phénomènes de condensation qui se produisent, soit à l'intérieur, soit sur la surface des parois froides. Associée à la

¹ Chatelet Alain, Fernandez Pierre, Lavigne Pierre, Architecture climatique : une contribution au *développement durable.Tome2 : concepts et dispositifs*, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998.p46

² La température de rosée est déterminée à l'aide du diagramme de mollier, et elle correspond à l'ambiance thermique de la pièce testée (température sèche et humidité relative).

température, elle nous renseigne aussi, sur l'état de confort des ambiances thermiques intérieures.

b) Température de l'air

La température de l'air est celle qui est donnée par un thermomètre normal, dont le réservoir se trouve placé à l'abri du rayonnement solaire, en absence des échanges. On l'appelle encore température sèche par opposition à la température humide qui dépend de l'humidité de l'air. Cette mesure s'impose des deux côtés (intérieur et extérieur) de la paroi, afin de nous permettre de calculer les températures surfaciques et interstitielles des couches des matériaux constituant la paroi froide.

6.9.2 Appareils de mesures utilisés

Dans le cadre de cette étude, les appareils utilisés pour relever l'humidité de l'air et la température de l'air à l'intérieur de la pièce et le patio de la maison choisie, sont empruntés auprès de la station météorologique de constantine.

Il s'agit de deux thermographes enregistreurs de même type, Jules Richard et de deux hygromètres enregistreurs identiques, Jules Richard (fig.6-60). Ces appareils sont étalonnés par les services de maintenance de la direction de la météo et vérifiés quotidiennement par nos soins sur les lieux d'enquête, et ce durant les deux périodes de mesures :

- une semaine consécutive en été 2004 du 27 juillet au 04 août,
- une semaine consécutive en hiver 2005, du 02 au 08 janvier.

Ces instruments d'enregistrement sont placés sur des tabourets en bois à une hauteur de un (01) mètre, disposés en couples, de part et d'autre du mur « froid » extérieur. C'est-à-dire, un couple d'appareil à l'intérieur, au milieu de la pièce et l'autre couple à l'intérieure de la galerie qui longe le patio près de la pièce à tester, en face du mur (fig.6-60; 61).

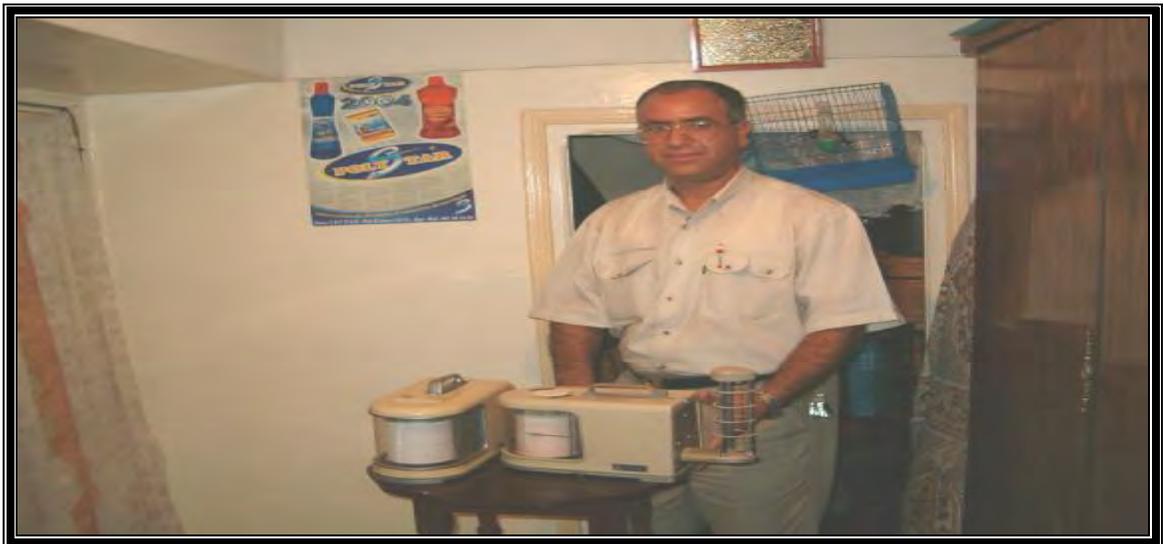


Fig.6-60 : emplacement des appareils de mesures à l'intérieure de la chambre, Thermographe et hygromètre (Jules Richards. Aluvac-20-124). Mesure de température de l'air et humidité relative, horaire, enregistrement des valeurs respectivement, (0°C – 50°C) et (0% - 100%). Source : auteur, 2004

Les occupants qui fréquentent cette pièce, sont tous des adultes, donc il n'y a pas de risque de manipulation ou de déplacement qui puisse affecter le bon fonctionnement de l'appareil.

Les mesures des quantités d'eau dans la masse interne du mur, n'ont pas été effectuées, à cause du manque d'outils d'extraction de l'échantillon, l'inexistence d'un four approprié, et l'indisponibilité d'un spécialiste en la matière. Cependant, l'utilisation de la méthode de Glaser, permet de procéder à la vérification du risque de condensation interstitielle et de déterminer le taux pondéral de la vapeur condensée.



Fig.6.61 : emplacement des appareils de mesures à l'extérieur de la chambre (galerie), Thermographe et hygromètre (Jules Richards. Aluvac-20-124). Mesure de température de l'air et humidité relative, horaire, enregistrement des valeurs respectivement, (0°C – 50°C) et (0% - 100%). Source : auteur, 2004

La vitesse de l'air est aussi, un autre paramètre essentiel pour évaluer le confort car elle influence directement les échanges de chaleur par convection, participe au séchage de l'humidité de condensation par évaporation, comme, elle augmente aussi l'évaporation à la surface de la peau. Les mesures de ce facteur n'ont pas eu lieu, étant donné que la vitesse de l'air à l'intérieur des maisons traditionnelles est très faible¹

6.10 Méthode de déroulement des campagnes de mesures

Le choix du lieu où se sont déroulées les mesures, est porté donc, sur une grande maison traditionnelle à patio, dont les motifs sont déjà annoncés dans le paragraphe (§.6.3.P.145). La pièce habitable, retenue pour l'investigation est située au rez-de-chaussée, ne disposant ni d'un chauffage d'appoint ni d'un climatiseur. Elle est de forme trapézoïdale dont les dimensions sont les suivantes :

- Ø largeur : 3,00m
- Ø longueur : 4,88m
- Ø hauteur : 3,00m

La chambre est munie d'une porte (2,10 x 0,94) et d'une seule fenêtre (0,75 x 1,00) protégée par un grillage métallique, disposées linéairement (juxtaposés) et donnant toutes les deux, sur le

¹ Akbari. H, et Dan M.Kurn, Bratz .S.E, Hanford J.W, *peak power and cooling energy savings of shade trees*, (1997)

patio (fig.6-14). Les appareils de mesures sont placés de part et d'autre du mur extérieur de la dite pièce qui délimite la coursive ceinturant le patio (fig.54-55).

a) Période d'été

Durant la nuit, la fenêtre reste ouverte, cependant la porte est fermée pour des raisons de sécurité et d'intimité. Le matin, la porte est rouverte jusqu'à 10h30mn, heure à laquelle les deux ouvertures se ferment afin d'éviter que la chaleur extérieure pénètre dans la chambre. Après la sieste de l'après midi et au moment où la température extérieure commence à s'atténuer, surtout aux environs de 17h ; les ouvertures s'ouvriront de nouveau à la recherche de la brise d'été et au même temps pour évacuer l'air confiné à l'intérieur.

Cet espace est utilisé par la famille, uniquement, pour dormir tardivement la nuit et lors de la sieste pendant l'après midi (de 13h à 16h30mn). La grande majorité du temps est passée entre la coursive et le medjlesse (fig.6-14); c'est au niveau de la coursive communément appelée « satha » que se passe plusieurs activités tels que : cuisiner, discuter avec les voisins et faire les lessives, cette dernière activité se prolonge au-delà, jusqu'au patio.

b) Période d'hiver

Les appareils d'enregistrement des températures et d'humidité sont placés de la même manière et dans les mêmes endroits que celle de la période estivale.

La porte et la fenêtre sont maintenues fermées de nuit comme de jour, excepté le matin de 8h à 10h, les occupants les ouvrent afin de permettre le renouvellement d'air.

Cette pièce qui sert de chambre à coucher n'est pas chauffée, elle n'est occupée que pendant la nuit pour dormir car les conditions de confort thermique et hygrométrique ne sont pas réunies comme nous allons les voir ultérieurement.

6.11 Interprétation des résultats des mesures

6.11.1 Etude comparative de la variation de l'humidité relative et de la température de l'air (Intérieure et extérieure). Période hivernale.

A) Variation de l'humidité relative

La figure (6-62), montre clairement que la variation des trois courbes de l'humidité relative (météo, galerie (patio) et intérieure de la pièce) évolue différemment, on constate que :

- **l'humidité relative de l'air extérieur (météo)** est très élevée pendant la nuit (96%), ce taux ne commence à diminuer d'une façon sensible qu'après 8h du matin, après le levé du soleil, pour atteindre sa valeur minimale (84 %) à 14 h, heure pendant laquelle l'ensoleillement est à son maximum. C'est aussi à ces moments que l'évaporation de la vapeur d'eau s'accélère sous l'intensité solaire, ce qui explique la diminution du taux hygrométrique de l'air. l'après midi, à partir de 16h, la courbe reprend son augmentation continue mais graduellement, jusqu'à arriver à la valeur maximale (96%) à 24 h. Ceci est dû, principalement au coucher du soleil, donc : absence des radiations solaires).
- **Quant à l'humidité relative de l'air mesurée au niveau de la galerie (patio)**, varie entre 85,5 % et 90 %, sont aussi des taux élevés. Dont le maximum est enregistré à 12h et le minimum à partir de 20h jusqu'à 24h. Si l'évolution des variations de l'humidité sur le premier tronçon de la courbe (0-8h du matin), ressemble à celle de l'humidité relative

de l'air extérieur (météo), par contre elle est tout à fait contradictoire et s'inversent pendant les tranches d'heure (8-24h). Ces résultats peuvent s'expliquer comme suit :

1) Le taux maximal enregistré est dû à :

Ø Apport de vapeur d'eau dû aux activités ménagères pratiquées dans le patio et les galeries tel que :

- la cuisson, vu que la cuisine est aménagée dans le corridor ouest (fig14a), située à 3m de la chambre testée
- les lessives du linge, devenues une pratique quotidienne, menée par l'ensemble des familles voisines, utilisant l'eau chaude qui dégage des quantités de vapeur d'eau considérables à quelques centimètres de la chambre testée
- existence d'une fontaine d'eau à 2,50m de la chambre testée.
- le Stockage d'eau dans des fûts et bassines ouvertes au niveaux des galeries (placés devant la chambre testée), provoque l'augmentation du taux hygrométrique de l'air par évaporation surtout pendant le jour notamment entre 10h et 14h quant les radiations sont à leurs maximum (rayonnement solaire).

Ø Évaporation de l'eau de condensations dans les murs humides suite à l'élévation relative de température pendant le jour notamment entre 10h et 14h.

Ø Migration de la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur, vu que les pressions intérieures sont supérieures à celles de l'extérieur (fig.6-76). sachant que la bonne capillarité des matériaux constituant les murs et les planchers (pierre calcaire, brique, toube et le bois « rondin de genévrier) permettent la diffusion de la vapeur d'eau, l'ascension de l'eau ou la propagation de la pluie battante qui s'évapore en surface des murs et des planchers bas. Ceci se manifeste par des mouillures, éclatement des enduits, des peintures et dégagement des mauvaises odeurs (moiteurs).

2) Le taux minimal enregistré est dû à :

Ø arrêt de toutes activités ménagères pendant la nuit, à partir du coucher du soleil, de 18h à 24h, ce qui engendre une diminution du taux d'humidité de l'air ambiant dans le patio et les galeries (85,5%)

Ø absence de radiations solaire à partir de 18heures, d'où une diminution de la température et par conséquent l'air sera proche de la saturation et il n'y aura pas d'évaporation, mais plutôt des condensations.

- l'humidité relative de l'air intérieur (chambre)

L'allure générale de la courbe de l'humidité relative de l'air intérieure est relativement stable comparativement aux deux courbes de l'humidité de la galerie et celle fournie par la météo. On constate un taux d'humidité très élevé à l'intérieur de la chambre qui varie entre 92 % et 95 % dépassant le seuil de confort qui est de l'ordre de 65% maximum¹. Le taux le plus élevé est enregistré à 0 :00h et le taux minimum à 14 :00h (après midi.).

Tandis que le **premier** (taux le plus élevé) est dû aux apports internes de vapeurs d'eau, à savoir :

¹[Enligne] <http://www.Rubson.com>. 2005.

- Ø Occupation de la chambre par un couple pendant la nuit pour dormir, chacun dégage 0,125 l/h ou 50 g de vapeur par heure¹.
- Ø Absence de renouvellement d'air (air confiné) à cause de la juxtaposition des deux seules ouvertures (fig. 14a), en plus, elles sont fermées pendant cette tranche d'heure (0-8h)
- Ø Refroidissement des parois (extérieures) engendre des condensations à cause de l'insuffisance de la résistance thermique.

Le **second** (taux de HR minimum) est dû à :

- Ø l'inoccupation de la chambre pendant cette tranche d'heure (pas d'apport interne en vapeur d'eau),
- Ø Ouverture de la fenêtre et quelques fois la porte qui permettent de dégager une certaine quantité très faible d'air confiné et chargé d'humidité même si elle est négligeable, vu la disposition linéaire des ouvertures qui s'ouvrent sur un espace : « le patio » qui est lui-même fermé et n'est ouvert que vers le ciel.
- Ø Migration de la vapeur d'eau, de l'intérieure de la pièce vers l'extérieur car les pressions partielles intérieures sont supérieures aux pressions extérieures (fig.6-76).
- Ø Élévation sensible de la température, pendant la journée, due essentiellement aux gains d'énergie solaires par rayonnement passant à travers le patio et reçus par les parois opaques et vitrés de la chambre en question.

En fin, ce que nous pouvons déduire de la comparaison des trois courbes d'humidité, c'est qu'il existe deux phases bien distinctes :

Phase 1 : pendant la tranche d'heure (0h-8h & 16h-24h), le taux hygrométrique est élevé dans les trois lieux (météo, galerie et chambre),

Phase 2 : pendant la tranche d'heure (8h-16h), le taux hygrométrique est bas dans les trois lieux (météo, galerie et chambre),

Les variations de HR représentées par la courbe (météo) sont caractérisées, relativement, par de grandes amplitudes (12%) car elles subissent les effets du climat directement, elles prennent les valeurs les plus basses sous l'effet du rayonnement solaire et des vents pendant la journée et diminuent rapidement en leurs absences pendant la nuit. Par contre, l'évolution des deux courbes de H.R (galerie et chambre), est influencée beaucoup plus par les apports internes de la vapeur d'eau, en plus des effets climatiques, qui ne sont pas très influents car ces espaces (patio, galerie et chambres) sont protégés de l'ensoleillement et des vents forts. Ce qui explique d'ailleurs que leurs courbes présentent de faibles amplitudes (5 % pour la galerie et 3 % pour la chambre). On remarque ici, que l'amplitude au niveau de la chambre est la plus faible puisque, c'est l'endroit le mieux protégé et le moins ventilé. Ces résultats se rapprochent de celles de Croiset M (1968), Couasnet Y (1990) et du CSTB (site Web : 2005).

¹ **Croiset. M** : *l'hygrométrie dans les bâtiments : confort thermique d'hiver et d'été : condensation*. EYROLLES, Paris, 1968.

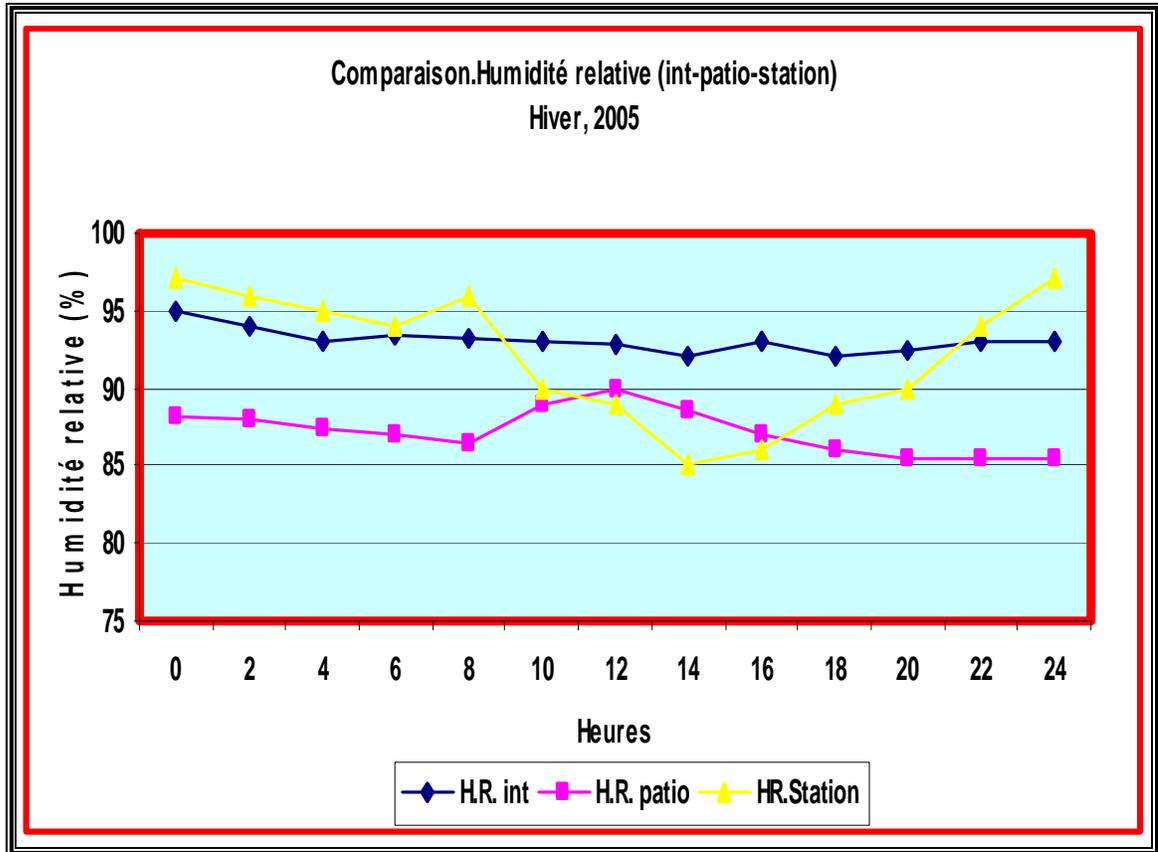


Fig.6.62 : Variation de l'humidité relative intérieure (chambre) et extérieure (patio et station météo).
Source : auteur, 2005

B) variation de la température de l'air

Quant aux variations de la température de l'air : la lecture des courbes représentés par la figure(6-63), permet de montrer que l'allure de la courbe de température de l'air intérieure est sinusoïdale et fluctue en sens inverse des courbes des températures de l'air extérieure (galerie et météo).

Les plus basses températures de l'air sont celles de l'extérieur (météo), soumises aux fluctuations du temps (sans aucune protection) dont les valeurs les plus élevés (9,5°C) sont enregistrés l'après midi à cause du rayonnement solaire et les plus basses (5,9°C) à 6h donc, en absence du rayonnement solaire.

Les hautes valeurs des températures de l'air sont celles notés à l'intérieure de la chambre, qui sont toujours supérieures à celles des températures mesurées au niveau de la galerie et la station météo. La température de l'air intérieure atteint sa valeur maximale de 15,7°C à 6 :00 heures et sa valeur minimal de 12,8°C à 20 : 00 heures, soit une amplitude de 2,9°C. Cette dernière reste sensiblement inférieure à celle de la température de l'air extérieure (météo / patio) qui est de l'ordre de 3,5°C. Cette stabilité de l'évolution de la courbe des températures à l'intérieure de la chambre peut s'expliquer par :

- une forte inertie qui réduit la variation de la température intérieure, dû aux propriétés thermo-physiques des matériaux constituant les murs ainsi que, leurs épaisseurs (0,80-0,50);
- mitoyenneté et compacité du plan de masse ce qui engendre une réduction des surfaces des parois exposées à l'extérieur d'où diminution des échanges thermiques.

La lecture des fluctuations de la température au niveau de la galerie permet de distinguer trois séquences :

- **1^{ère} étape** : la courbe décroît à partir de minuit, jusqu'à atteindre 8°C à 8 :00h, ceci est dû à la levée tardive du soleil qui débute à 7h : 30mn au mois de janvier pour la ville de Constantine, ainsi qu'aux conditions climatiques particulières « microclimat » qui caractérise la médina de Constantine (voir, chapitre 2 : climat et confort)

- **2^{ème} étape** : hausse continue de la température suite au levé du jour de 8 :00h à 16:00h jusqu'à atteindre 11,5°C où le rayonnement solaire est à son maximum.

- **3^{ème} étape** : entre 16 :00h et 24 :00h, on constate que la température diminue très légèrement, ceci est dû essentiellement au coucher du soleil (17h00), donc absence de rayonnement solaire d'où rafraîchissement de l'air ambiant.

Il est à noter que, tandis que, la température au niveau de la galerie et à l'extérieur (météo) augmentent continuellement pour atteindre leurs valeurs maximales dans l'après midi à 16h (respectivement : 10,5 ; 9,5°C), la température intérieure n'a pas été influencée instantanément, mais elle a connu une baisse progressive (13,5-13°C), en d'autres termes, il y a eu un déphasage qui a duré plusieurs heures (de 8h jusqu'à la fin de l'après midi à 18h).

Finalement, la comparaison des trois courbes révèle, l'effet du microclimat local caractérisé essentiellement par la compacité ou rugosité du tissu urbain et de la grande inertie des parois d'où la protection des espaces intérieurs et intermédiaires de l'effet du climat (vent, ensoleillement...). Ces résultats sont similaires à certains chercheurs comme : Givoni.B (1978), Sayigh.A (1998), Fardeheb.F (1987).

C) Ecart entre température intérieure et extérieure (galerie) ($\Delta t = t_i - t_e$)

La lecture du graphe (fig.6-64), montre que la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur est positive, c'est-à-dire que la température intérieure est toujours supérieure à la température extérieure ($t_i > t_e$), par conséquent, on peut déduire qu'il y a déperdition thermique successive. Cet effet est éprouvé pendant la nuit et le matin, vu que la température extérieure est très basse en ces moments.

L'écart de température, entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre, est beaucoup plus important la matinée que l'après midi. Cette différence est de l'ordre de 5,5° C en moyenne, pendant la tranche d'heure (0h-10h), et estimé en moyenne de 2,8°C durant la frange d'heure (12h-24h). Ceci, peut s'expliquer ainsi : l'écart de température diminue pendant la journée car, d'une part, la température extérieure augmente sous l'effet du rayonnement solaire (journées ensoleillées), et d'autre part la température intérieure est presque stable (faibles variations) à cause de l'effet de l'inertie des murs et la compacité du tissu urbain dans lequel se situe cette maison objet de la campagne de mesures. Ceci rend la maison beaucoup plus étanche aux échanges de chaleur par conduction, convection et rayonnement.

En effet, quoique la température intérieure soit supérieure à la température extérieure, l'ambiance thermique reste en deçà des limites de confort (fig.6- 65).

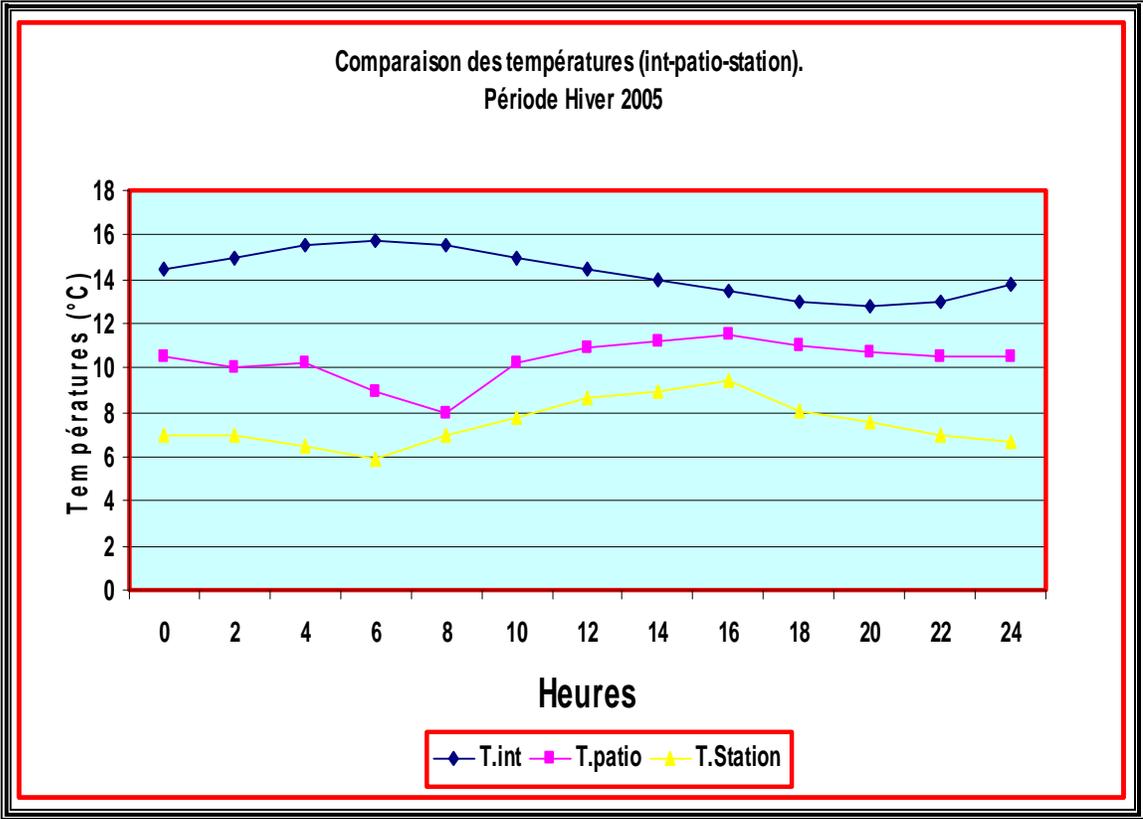


Fig.6-63 : Variation de la température de l'air intérieure (chambre) et les températures extérieure (Patio et station météo). Source : auteur, 2005.

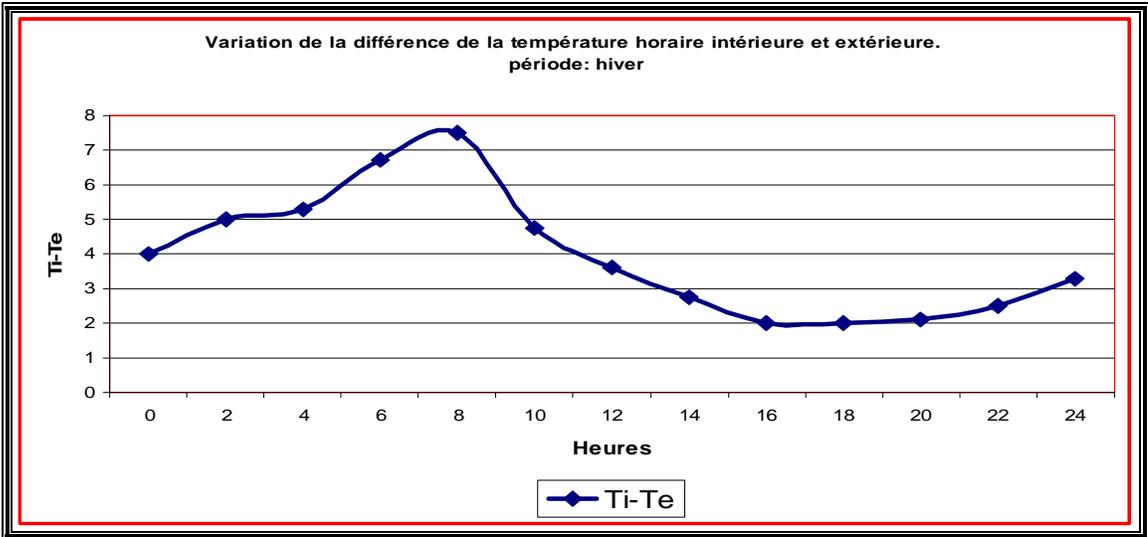


Fig.6-64 : écart de la température horaire (Te : température / patio). Source : auteur, 2005

D) Comparaison des températures et HR intérieures avec la zone de confort

La comparaison de l'évolution dans le temps des facteurs climatiques mesurés (température et humidité relative) à l'intérieur de la chambre avec la zone de confort défini par le diagramme de confort (fig.6-65). Permet de déterminer l'état ou le niveau de confort de l'espace en question, en utilisant deux paramètres : température et humidité relative.

Après avoir, représenté sur le dit diagramme¹, les points correspondants aux températures intérieures de l'air ambiant et humidités relatives intérieures horaires de la journée type, minutieusement choisie². On constate que la journée s'étend sur deux zones de confort distinctes à savoir :

- § la matinée pendant la tranche d'heure (2 :00h -14 :00h), l'ambiance thermique se situe dans la zone de confort admissible (zone 2. fig.6-65), ceci peut s'expliquer par l'inoccupation de la chambre pendant la matinée, ouverture de la porte et de la fenêtre et élévation de la température de l'air extérieur pendant la matinée (8à14h) à cause de l'ensoleillement d'où, une diminution des déperdition thermiques et arrêt de la production de la vapeur d'eau à l'intérieur, ce qui engendre une température de l'air relativement élevée et une HR moindre.
- § l'après midi et pendant la nuit, les conditions climatiques intérieures changent et on passe à la zone d'étouffement (zone : 4.fig.6.65), ceci est dû essentiellement aux déperditions de chaleur à travers les parois et la production de la vapeur d'eau par les occupants qui augmentent toutes les deux, pendant la nuit ce qui entraîne une diminution de la température et élévation du taux hygrométrique.

Étant donnée que, la fonction principale de cet espace pendant la période hivernale, est : dormir pendant la nuit et faire la sieste l'après midi, il convient de conclure que l'ambiance intérieure est inconfortable et hygiéniquement inacceptable. Ces résultats se rapprochent de ceux de Croiset. M (1968), Couasnet Y (1990).

E) Variation de HR extérieure et Température extérieure (hiver)

L'étude comparative de l'évolution des courbes de la température extérieure et de l'humidité extérieure (fig6-66), révèle que la température fluctue à l'inverse de la trajectoire de l'humidité relative, ceci, est constaté surtout pendant la frange d'heure « 10 :00h-16 :00h » : au moment où la température augmente sous l'effet du rayonnement solaire, le taux d'humidité diminue car l'air chauffé a une capacité plus grande à absorber l'humidité. « Lorsque l'atmosphère est chauffé, la pression de vapeur, invariable, est inférieure à la pression de saturation correspondant à la nouvelle température. L'atmosphère considérée pourrait absorber une plus grande quantité de vapeur. Ce qu'on traduit vulgairement en disant que le chauffage "désèche" l'atmosphère »³.

Cependant, lors de la soirée et le matin les deux courbes progressent presque parallèlement, cette stabilité est due principalement à l'absence des vents et l'atténuation des variations de la température.

¹ Perret Maximilien, *cours de climatisation*, tome 1, bases du calcul des installations de climatisation, 2^e édition, CFP.

² La journée type a été choisie sur la base de la représentativité de la période hivernale du point de vue thermique, et aussi de répétitivité.

³ Belakhowsky.S, *Chauffage & Climatisation, Technique & Vulgarisation*, Paris. p14

F) Variation de HR intérieure / Temp intérieure

La lecture des courbes comparatives (fig.6-67), de la température intérieure et de l'humidité intérieure, montre que leurs progressions dans le temps sont inversées. On remarque que, lorsque la température augmente, le taux d'humidité diminue et vis versa. Par exemple pendant la tranche d'heure (0-6h), la température augmente de 14,5°C jusqu'à 15,7°C, au même moment où l'humidité relative diminue de 95 % jusqu'à 93,5%. Donc, encore une fois, nous pouvons conclure que l'état hygrométrique de l'air est dépendant de la température ainsi, la diminution de cette dernière entraîne une faiblesse dans la capacité d'absorption d'où un accroissement du taux d'humidité qui s'approchera de la saturation (100%). « Si, l'air humide est refroidi, la pression de vapeur serait devenue supérieure à la nouvelle pression de saturation, d'où condensation immédiate »¹. Ce phénomène est souvent observé, en hiver, dans les pièces mal chauffées.

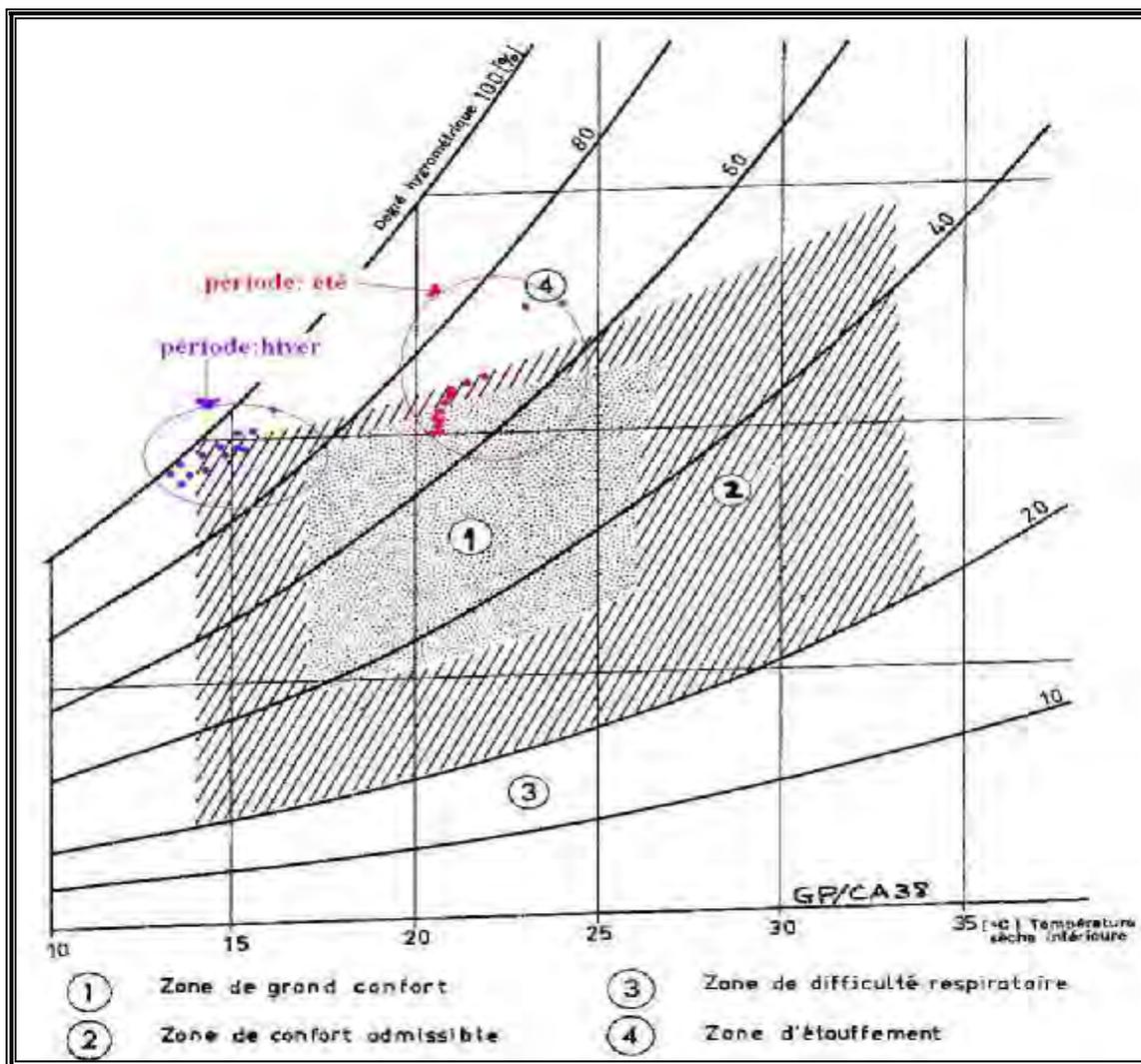


Fig.6-65 : diagramme de confort. Source : Maximilien Perret

¹ Couasnet Y : *les condensations dans les bâtiments : guide pratique et éléments d'analyse*. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 1990.

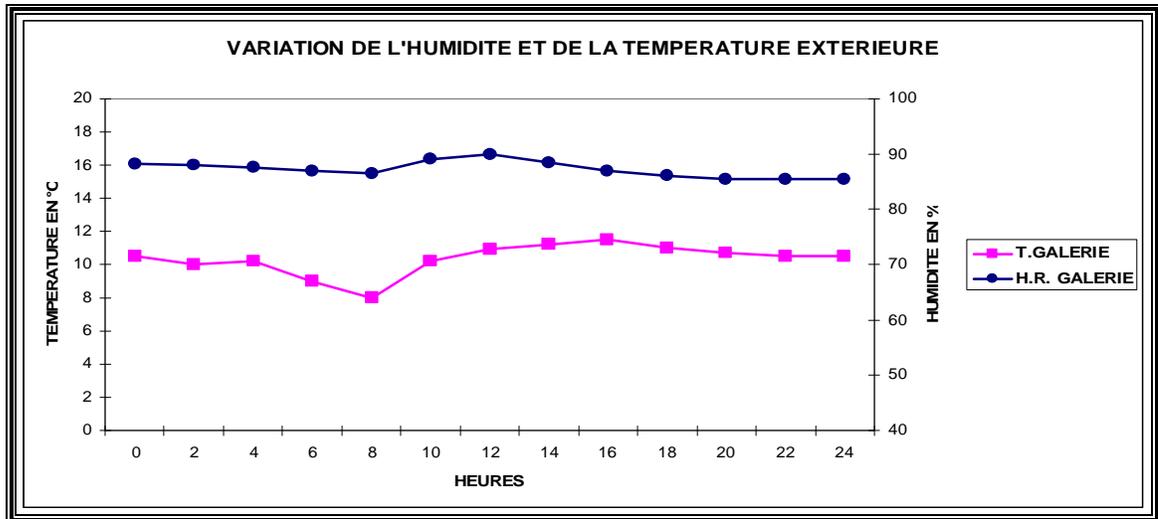


Fig.6-66 : courbe des variations de la température (patio) et humidité relative (patio). Période hiver
 Source : auteur, 2005.

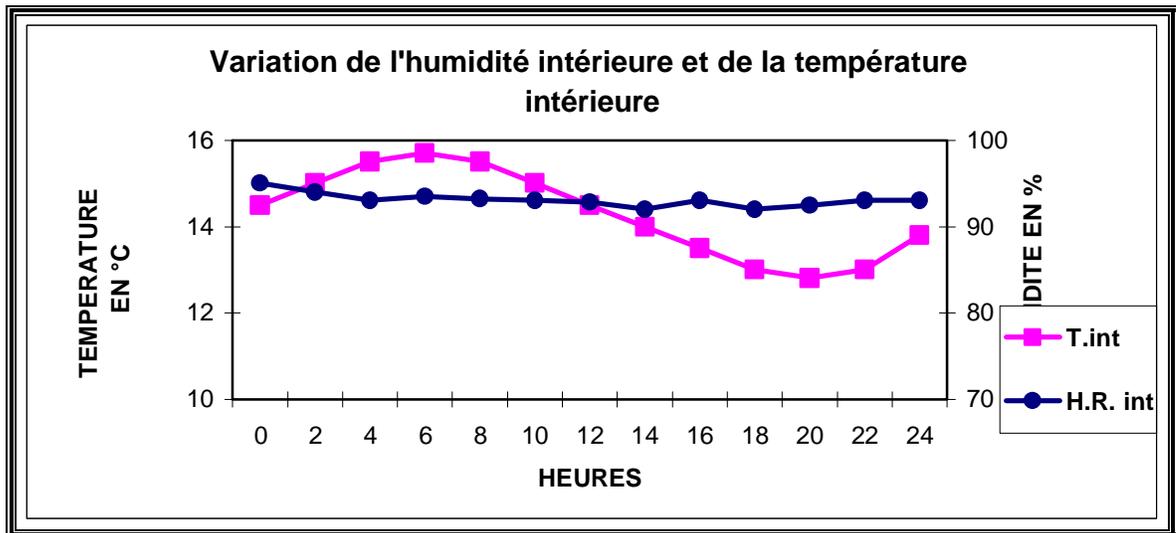


Fig.6-67 : courbes des variations de la température intérieure et humidité relative intérieure. Période hiver
 Source : auteur, 2005

6.11.2 Etude comparative de la variation de l'humidité relative et de la température de l'air (intérieure et extérieure). Période estivale

A) Température

La lecture des fluctuations des températures de l'air illustrées sur la figure (6-68), révèle que :

- la température extérieure (météo) fluctue selon une allure sinusoïdale. Les plus basses températures sont enregistrées le matin (17°C) à 4h : 00', vu l'absence du rayonnement solaire. Elles se rehaussent l'après midi pour atteindre sa valeur maximale (31°C) entre 14h et 16h : 00' au moment où l'ensoleillement est à son maximum, puis le degré de température commence à diminuer jusqu'à arriver à sa valeur minimale (21°C) à 24h, soit une amplitude de 14°C.

- La température au niveau de la galerie évolue selon une allure presque sinusoïdale : Tandis que la matinée, elle décroît, jusqu'à atteindre son minimum de 20,2°C à 6 :00 heures ; elle commence à croître sensiblement à partir de 6 :00 heures pour atteindre son maximum de 24,7°C à 16h. Soit une amplitude de 4,5°C.
- Quant à la température de l'air intérieure, elle est beaucoup plus stable, elle évolue selon une allure presque linéaire pendant le jour, qui tourne autour de 22 °C. Le thermomètre a enregistré une valeur maximale de 24 °C à 22 :00 heures et une valeur minimale de 21,2°C à 8 :00heures. Soit une amplitude de 2,8°C

Une simple comparaison de l'évolution de ces trois courbes suscitées fait apparaître l'effet du microclimat locale, qui est bien lisible d'ailleurs, vu que la température de l'air au niveau de la galerie et à l'intérieure de la chambre est moins élevée que celle de la station météo pendant la tranche d'heure la plus chaude (8h : 00-18h : 00) et elle est plus élevée au cours de la nuit et tôt le matin. Ceci est dû, entre autres, à l'effet de l'inertie qui caractérise les maisons traditionnelles ainsi qu'à la protection solaire (fig.6-38-39-41-42).

Donc on peut déduire que l'évolution de la température est beaucoup plus stable à l'intérieure de la pièce qu'à l'extérieure. Ceci revient principalement à la forte inertie qui caractérise les murs et les planchers constitués par : la pierre, la brique et le bois (Aârâr). D'autres facteurs jouent aussi un rôle prépondérant qui influent sur la diminution de la température tel que :

- la compacité du tissu urbain qui réduit les surfaces des parois exposées aux radiations solaires, d'où diminution des gains d'énergie solaires pendant la journée.
- Importantes surfaces d'absorption et d'accumulation de l'énergie¹ des parois de la chambre et les sous- espaces qui la composent. Cette capacité de stockage d'énergie, ne se restitue qu'à partir de 18h : 00mn. Ce déphasage explique une fois de plus l'effet de l'inertie de la masse.
- Le patio joue un rôle déterminant dans la régulation de la température de l'air, son ouverture totale vers le ciel permet à l'air chaud de s'évacuer le soir et à l'air frais de pénétrer le matin (brise). Et comme le patio de cette maison, est si profond, dont le ratio « h/l » vaut : 3,5, l'étude de l'ensoleillement au niveau du patio et plus précisément à l'endroit où les appareils effectuaient les mesures, montre que les rayons solaires ne touchent pratiquement pas cette zone, orienté Nord (fig. 6-38-39-41-42)
- L'ouverture de la porte et la fenêtre de 8h à 10 h du matin, influe aussi sur le rafraîchissement de l'air, mais d'une façon insignifiante, vu leurs dispositions linéaire (fig.6-14a) , qui ne permet pas un bon renouvellement d'air.
- L'humidité présente dans les murs, influe sur le rafraîchissement de l'air par convection et rayonnement (les mesures montrent que le taux hygrométrique dépasse 70% dans les chambres).

Ces résultats rejoignent celles de Givoni (1994), Fardeheb (1987) qui trouvent que les parois épaisses sont performantes pendant le jour lorsque la température extérieure est supérieure à celle de l'intérieure. L'énergie emmagasinée pendant le jour se restitue lentement la nuit, au moment où la température extérieure diminue au fur et à mesure du fait de la forte inertie. Ce phénomène est clairement illustré dans la (fig6-68.), et ce à partir de 18 :00h, et plus précisément, après le coucher du soleil.

¹ Cette énergie se propage essentiellement par rayonnement solaire du patio vers les parois des chambres.

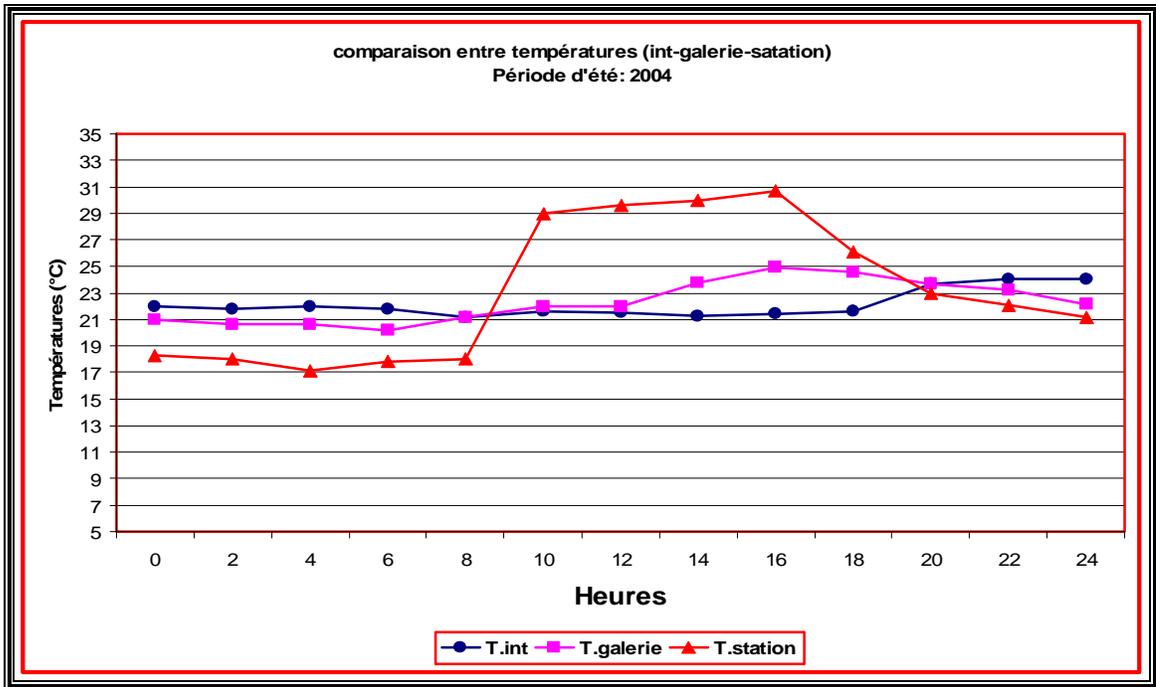


Fig.6-68 : courbes des variation de la température de l'air (intérieure, patio et station météo)
Source : auteur, 2005

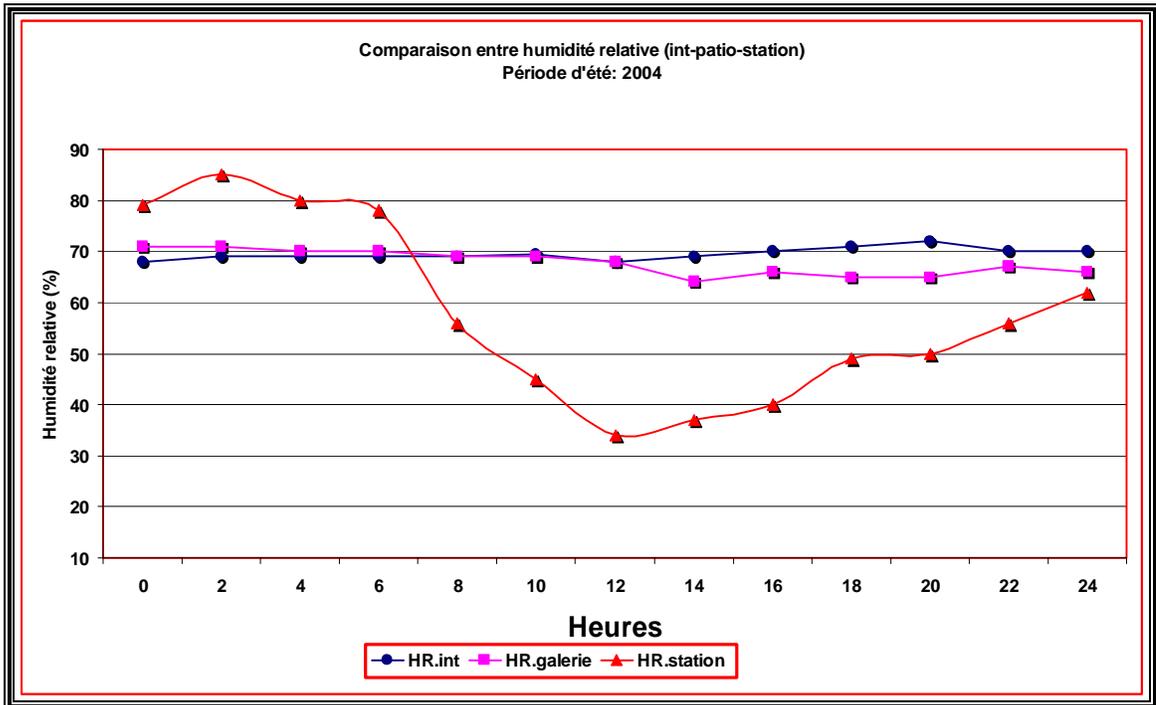


Fig.6-69 : Courbes des variation de l'humidité relative de l'air (intérieure, patio et station météo)
Source : auteur, 2005.

B) Humidité

La lecture des graphes de l'humidité relative intérieure (chambre), et extérieure (galerie/météo) de la figure (6-69), permet de nous renseigner sur les variations de l'humidité relative sur une période de 24 heures. On constate que les trois courbes évoluent différemment selon trois séquences :

1. La première étape de 2h : 00 à 8h : 00 du matin, l'H.R intérieure est stable avec un taux de (69 %). Alors que l'H.R de la galerie décroît légèrement de 71 à 69 %, alors que l'H.R de la météo décroît aussi mais d'une façon beaucoup plus prononcée. cette dernière peut s'expliquer par la variation de la température suite à la levée du jour (radiations solaires), alors que la stabilité du degré hygrométrique intérieur revient à la stabilité de la température comme nous l'avons vu, précédemment au (§A, p 187: température).
2. la deuxième étape de 8h : 00 à 12h : 00, l'écart entre les deux courbes (intérieur et galerie) est très réduit, il est de l'ordre de 0,5 %, de plus elles se croisent sur deux points (8h : 00 et 12h : 00). Ceci est dû à l'élévation de la température extérieure (météo) qui influe directement sur l'H.R extérieure en la réduisant jusqu' à atteindre le taux hygrométrique le plus faible (34%). Ce qui influe directement sur l'état hygrométrique de l'air dans la galerie. On remarque que ce dernier s'abaisse de 3%, soit de 71 à 68%. L'ouverture de la porte et la fenêtre de la chambre contribuent aussi à la migration de la vapeur d'eau ou bien, mélange de l'air intérieure avec l'air de la galerie ce qui égalise en quelque sorte le degré hygrométrique entre l'extérieure et l'intérieure.
3. la troisième étape, de 14h : 00 à 24h :00, la courbe de l'humidité extérieure (météo) augmente au fur et à mesure que la température extérieure (météo) régresse (fig.6.69.), soit de 34% à 62% qui s'accélère surtout après le coucher du soleil. Au moment où, les deux courbes de l'humidité (galerie et intérieure) se dissocient et s'inversent en s'écartant l'une de l'autre. l'H.R intérieure croît de 68 à 72% et ce de 14h à 20h, alors que, l'H.R extérieure (galerie) décroît de 68 à 64 % pendant deux heures de 12 à 14h, puis remonte légèrement pour osciller autour de 66 % dans la soirée. Ceci, revient en premier lieu à l'accroissement de la température au maximum pendant l'après midi, l'humidité intérieure s'élève en raison de l'accélération de la diffusion de la vapeur d'eau du mur extérieur vers l'intérieure de la pièce : un phénomène d'évaporation se déclenche, suite à une migration de la vapeur d'eau existante dans les murs humides dont le sens de migration est de la plus haute pression de vapeur vers la plus basse (fig.6-81) et en second lieu, est dû à la présence des occupants (déjeuner et puis faire la sieste) donc c'est des apports internes ou production de vapeurs d'eau. Cependant, dans la soirée (à partir de 20h), la température à l'extérieur diminue, les ouvertures s'ouvrent, les occupants quittent la chambre à la recherche de la fraîcheur, ce qui fait que les deux courbes tendent à se converger , après un mélange d'air intérieure avec l'extérieure.

Ce que l'on peut retenir de cette comparaison entre les trois courbes, c'est que l'humidité relative enregistrée à la station de la météo, présente donc, des fluctuations très importantes : de 0 :00h à 7 :00h (85%-70%), ce taux de HR est supérieure à ceux de l'intérieure et de la galerie, cependant, après la levée du soleil, le taux diminue considérablement jusqu'à atteindre 34% à midi, au moment où l'humidité intérieure et celle de la galerie enregistrent une stabilité (68%).

Par conséquent on peut conclure une fois de plus qu'il y a un effet de microclimat local. Ces résultats rejoignent celles du CSTB (2005), Croiset (1968) et Givoni (1978)

C) Etude de l'écart de température horaire.

L'écart de température horaire, enregistré par les deux thermographes, l'un placé dans la galerie du patio et l'autre à l'intérieur de la chambre testée, permet d'estimer la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur afin d'apprécier le confort thermique intérieur.

La lecture du graphe de la (fig.6-70), révèle que, l'écart est négatif de (8h : 00 à 20h : 00). Ce qui sous-entend que l'ambiance thermique intérieure est plus fraîche que l'ambiance thermique extérieure pendant cette tranche d'heures. Ceci est dû, aussi à l'effet de l'inertie de la masse, qui permet le stockage d'énergie et par la suite une restitution de la chaleur, après un déphasage de plusieurs heures.

Cependant l'écart est positif entre 20 :00 et 8 :00 heures, donc : l'ambiance thermique intérieure est plus chaude que l'ambiance thermique extérieure ceci peut être expliqué par :

- La restitution de la chaleur accumulée pendant le jour dans la masse des matériaux qui commence à rayonner juste après le coucher du soleil,
- Manque ou insuffisance de ventilation transversale malgré que la fenêtre reste grande ouverte pendant la nuit. Ceci est dû à la disposition linéaire des ouvertures (fig.6-14a).

Ces résultats se rapprochent de celles de Recknagel (1986). Bernstein (1997).

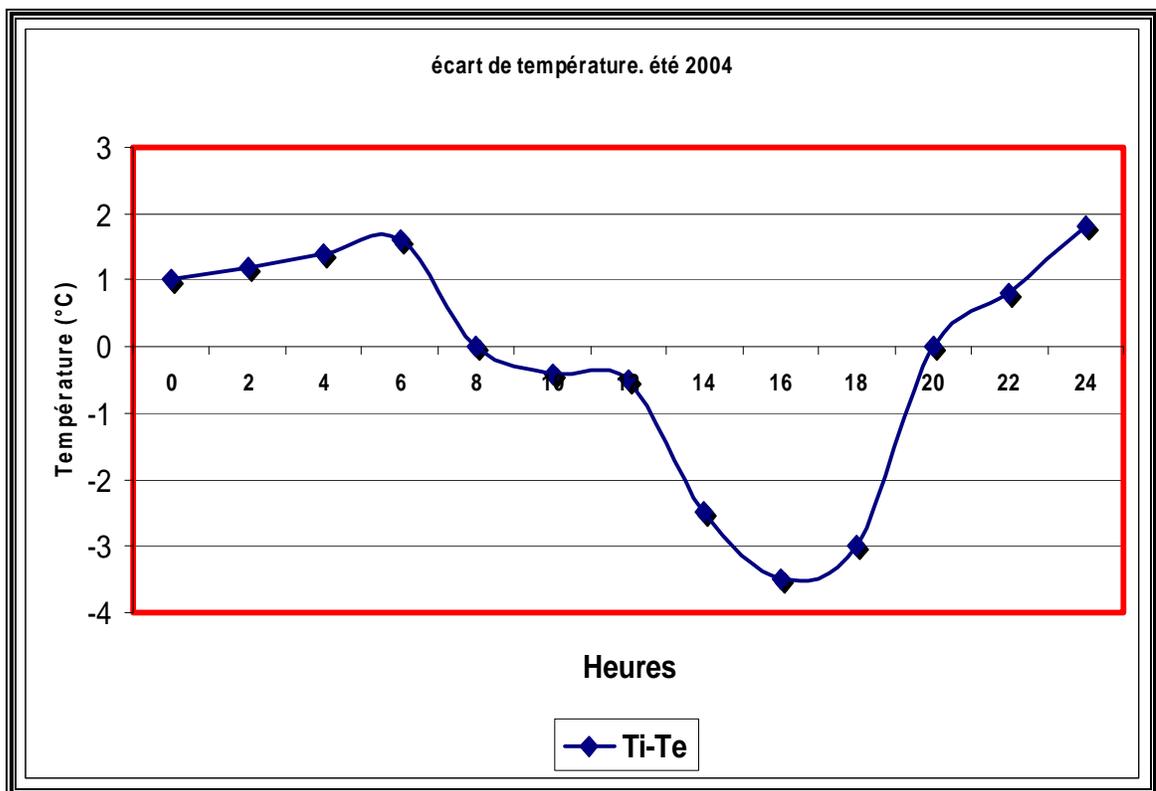


Fig.6-70 : Courbe des variations de la différence de température de l'air (intérieure et patio)
Source : auteur, 2005.

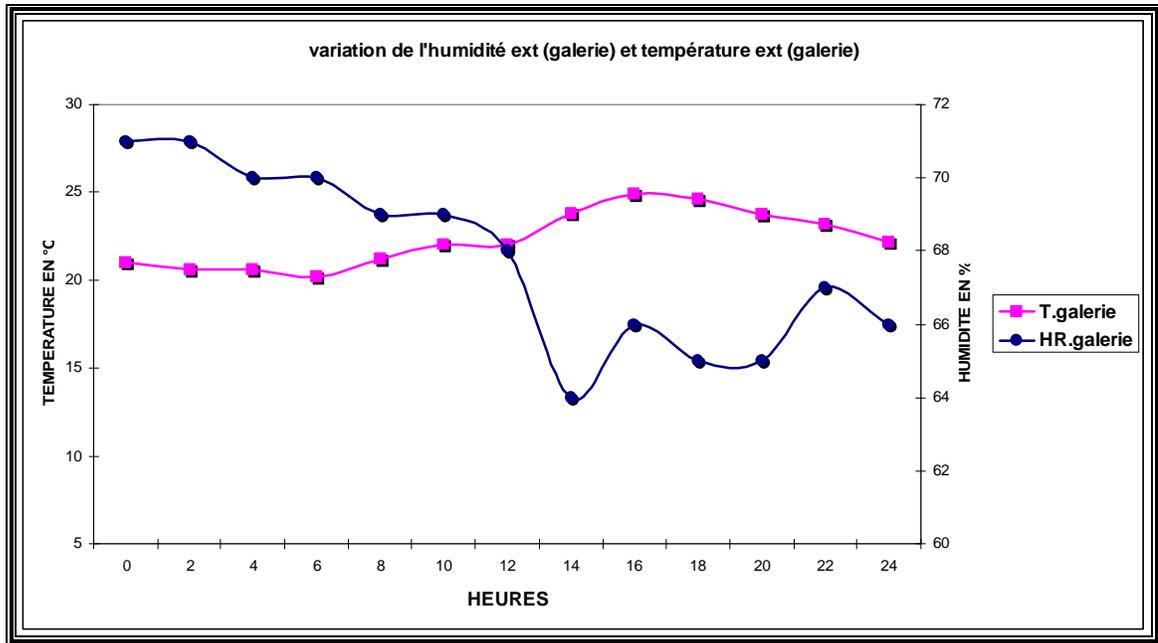


Fig.6-71 : Courbes des variations de la température extérieure et humidité relative extérieure. Période été
Source : auteur, 2005.

D) variation de HR ext + Temp ext (galerie) (été)

La variation des deux courbes (fig.6-71), relative à l'humidité et la température extérieures (galerie) est en générale contradictoire, ceci est bien lisible, surtout pendant la tranche d'heure comprise entre 6h :00 du matin et 22h : 00. On constate que, lorsque la température augmente le taux de l'humidité décroît instantanément et vice versa. Ce phénomène est déjà expliqué au (§6.11.1), Qui indique que lorsque l'atmosphère est chauffé, la capacité de l'air à absorber la vapeur d'eau augmente ce qui engendre une diminution du taux hygrométrique et l'inverse est vrai.

Quant à la tranche d'heure (0-6h :00') est caractérisée par une stabilité de la température qui tourne autour de 20, 6°C, on remarque que l'humidité est presque stable et que ses variations ne dépassent guère 1%. Ceci est dû à l'absence de l'influence des radiations solaires. D'où, nous pouvons conclure que l'effet de la température sur la variation de l'humidité est prépondérant.

E) variation de HR int et Temp int (chambre)(été)

La lecture des deux courbes comparatives (fig.6-72), de la température intérieure et de l'humidité intérieure (chambre), de la période d'été, montre que leurs progressions dans le temps ne sont pas inversées en tout point. On remarque que, la tranche d'heure (0h-18h : 00'), est caractérisée par une stabilité de la température qui tourne autour de 21,50°C, et que les fluctuations de l'humidité ne dépassent pas 2%. Le premier point (température) peut s'expliquer par :

- grande inertie de la masse de cette maison, qui permet un déphasage pour restituer la chaleur ;
- compacité du site
- protection de la maison contre les radiations solaires

Quant au second point (humidité), de (0h-12h : 00'), l'allure de la courbe est stable car la maison est inoccupée pendant cette période, mais à partir de midi, le taux d'humidité change en

augmentation puisque il y a apport interne de vapeur d'eau, produit par les occupants entre (12h-18h : 00'), car la chambre est occupée en ces moments (§.6.10).

On peut déduire donc que, le taux d'humidité dans la chambre n'est pas influencé seulement par la température mais aussi par les apports internes de production de vapeur d'eau. Ceci se confirme par ce qui suit : Si nous observons, l'évolution des deux courbes entre 20h : 00' et 24h : 00', nous constatons que les deux tronçons de courbes s'inversent : la température augmente et l'humidité régresse, pour les raisons suivantes :

- les occupants quittent la chambre en ces moments (§.611.1) donc pas d'apports internes en vapeur d'eau ;
- restitution de la chaleur emmagasinée dans les parois, fait augmenter la température intérieure¹.

Ces résultats se rapprochent des travaux de plusieurs chercheurs dont : Givoni (1994), Fardeheb (1987).

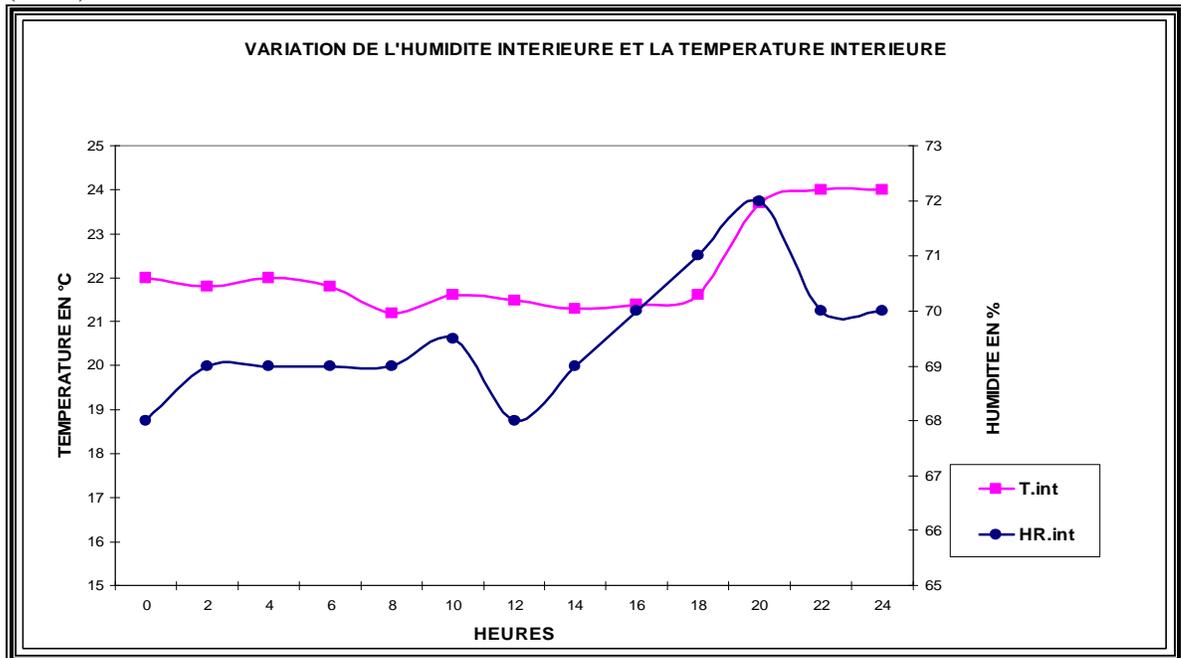


Fig.6-72 : courbes des variations de la température intérieure et humidité relative intérieure. Période d'été
Source : auteur, 2005.

F) Comparaison des températures et HR intérieures avec la zone de confort (période : été)

L'utilisation du diagramme de confort (fig.6-65), permet d'établir la comparaison de l'évolution dans le temps des facteurs climatiques mesurés (température et humidité relative) à l'intérieur de la chambre testée avec la zone de confort définie par le dit diagramme. En vue d'évaluer le niveau de confort de l'espace étudié, en utilisant deux paramètres : température et humidité relative.

Après avoir, représenté sur le diagramme de confort, les points correspondants aux températures intérieures de l'air ambiant et humidités relatives intérieures horaires de la journée type. On constate que, la journée s'étale sur trois zones de confort distinctes (fig.6-65) à savoir :

- le matin l'ambiance thermique est localisée dans la zone numéro deux « N° : 02 », qui est la

¹Givoni B, *Passive and low energy cooling of building*, John Wiley & Sons, INC, New York, 1994

zone de confort admissible ;

- En milieu de journée de (8 :00h-14 :00h), on passe à la zone de grand confort (zone N° : 01) ;
- L'après midi et la nuit (de 16 :00à 24 :00h), l'ambiance climatique intérieure deviennent étouffante, (zone N° : 04).

Et comme cet espace est utilisé pour dormir et faire la sieste l'après midi, donc on peut conclure que cette chambre est inconfortable, et d'un point de vue hygiénique, elle est insalubre.

Ces résultats se rapprochent aussi des travaux de plusieurs chercheurs dont : Fardeheb (1989), Givoni (1994) et le CSTB (site Web 2005).

6.12. Vérification du risque de la condensation

Les tests de condensations seront effectués sur les parois suivantes de la chambre étudiée, pour les conditions climatiques d'hiver et d'été (mesurés) (fig.14a) :

- Mur Nord « extérieur » situé dans la galerie (du côté du patio);
- Mur Ouest « intérieur », il sépare la chambre de la salle d'eau;
- Plancher haut de la même chambre;
- Plancher bas de la même chambre.

La méthode de calcul sera expliquée ou démontrée uniquement pour le mur nord. Quant aux autres ouvrages, leurs résultats de tests seront illustrés sur des graphiques seulement.

6.12.1 Méthode de calculs

A) Mur nord « extérieur » du côté du patio de dimension: 0,64m

a) Condensation superficielle (période d'hiver)

Pour vérifier le risque de la condensation superficielle, il faut procéder à la comparaison de la température surfacique (T_{pi}) de la face interne du mur avec la température de rosée (Tr), correspondante à l'état thermique et hygrométrique de la chambre. Dans le cas où, T_{pi} est inférieure à Tr, il y a risque de condensation superficielle¹.

o Calcul de la température surfacique

$$T_{pi} = t_i - (K / \alpha_i) (t_i - t_e) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

Avec,

- t_i = 13 °C, (²)
- t_e = 8 °C, (²)
- α_i = 9,09 [w/m2. °c]

o Détermination du coefficient de transmission surfacique « K »

N°	Désignation	e (m)	λ (w/m. °c)	R = e/ λ (m ² . °c/w)
1	Enduit plâtre	0,02	0,35	0,057
2	Pierre naturelle : calcaire	0,60	2	0,30
3	Mortier de chaux (enduit)	0,02	0,87	0,023
Total :				0,38

Tab.6-3 : calcul des résistances thermiques de chaque couche constituant la paroi. **Source** : auteur, 2005.

¹.Bernstein D; Champetier. J-P ; Vidal. T, *Anatomie de l'enveloppe des bâtiments*, le Moniteur, Paris, 1997. pp59-73

² Valeurs des températures de l'air mesurées sur les lieux par l'auteur en janvier 2005.

$$K = \frac{1}{1/a_i + 1/a_e + \sum R} = 1,82 \text{ [w/m2. } ^\circ\text{C]} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Avec :

- Ø a_i : coefficient d'échange superficiel intérieur [w/m2. °c]
- Ø a_e : coefficient d'échange superficiel extérieur [w/m2. °c],
- Ø R : résistance du matériau composant la paroi [m2. °c/w],

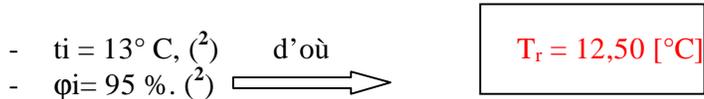
Sachant que : $1/a_i + 1/a_e = 0,11 + 0,06 = 0,17^{(1)}$ [w/m². °c],

D'où,

$$T_{p_i} = 11,99 \text{ [} ^\circ\text{C]} \quad \text{}$$

○ **Détermination de la température de rosée [T_r]**

D'après le diagramme de Mollier (Fig.6-73) et étant donnée que l'ambiance thermique intérieure de la chambre est définie par une température et une humidité relative mesurées, soient :



Donc, la température surfacique (T_{p_i}) est inférieure à la température de rosée (T_r), par conséquent :

Il y a risque de condensation superficielle.

Cette condensation se manifeste sur la face intérieure des parois sous forme de gouttelettes (buée, ruissellement,... etc.).

b) Condensation interstitielle (période d'hiver)

La condensation dans la masse existe lorsque la pression partielle en un point de la paroi est supérieure à la pression de saturation, cette dernière correspond à une température calculée par la formule n° 2

Les paramètres nécessaires pour l'application de la méthode de vérification de la condensation interstitielle, sont² :

- $t_i = 13^\circ\text{C}$, (température de l'air à l'intérieure de la chambre) ;
- $\phi_i = 95\%$, (taux de l'humidité relative à l'intérieure de la chambre) ;
- $t_e = 8^\circ\text{C}$, (température de l'air au niveau de galerie) ;
- $\phi_e = 90\%$, (taux de l'humidité relative au niveau de galerie) ;
- $K = 1,82 \text{ [w/m2. } ^\circ\text{c]}$ (coefficient de transmission calorifique)

¹ . Ministère de l'habitat, CNERIB, Réglementation thermique des bâtiments d'habitation, Règles de calcul des *Déperditions calorifiques*, Fascicule1. PAO-CNERIB, Alger, 1998.

² Les valeurs des températures de l'air et de l'humidité relative sont mesurées sur les lieux par l'auteur en janvier 2005

○ **Détermination de la température de chaque couche composant le mur**

$$T_{pn} = T_{pn-1} - K (t_i - t_e) R_n \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

Où:

T_{pn} : Température de la couche considérée (n), [$^{\circ}\text{C}$],

T_{pn-1} : Température de la couche antérieure (n-1), [$^{\circ}\text{C}$],

K : coefficient de déperdition calorifique [$\text{w/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$]

R_n : résistance thermique de la couche considérée [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/w}$].

Soient :

$t_i = 13^{\circ}\text{C}$.

$T_{pi} = 12^{\circ}\text{C}$.

$T_{p1} = T_{pi} - K (t_i - t_e) R_1 = 12 - [1,82 \times 5 \times 0,057] = 11,48^{\circ}\text{C}$

$T_{p2} = T_{p1} - K (t_i - t_e) R_2 = 11,48 - [1,82 \times 5 \times 0,30] = 8,75^{\circ}\text{C}$

$T_{p3} = T_{p2} - K (t_i - t_e) R_3 = 8,75 - [1,82 \times 5 \times 0,023] = 8,54^{\circ}\text{C}$

$t_e = T_{p3} - k / \alpha e (t_i - t_e) = 8,54 - [1,82 / 16,66 \times 5] = 7,99 \approx 8^{\circ}\text{C}$

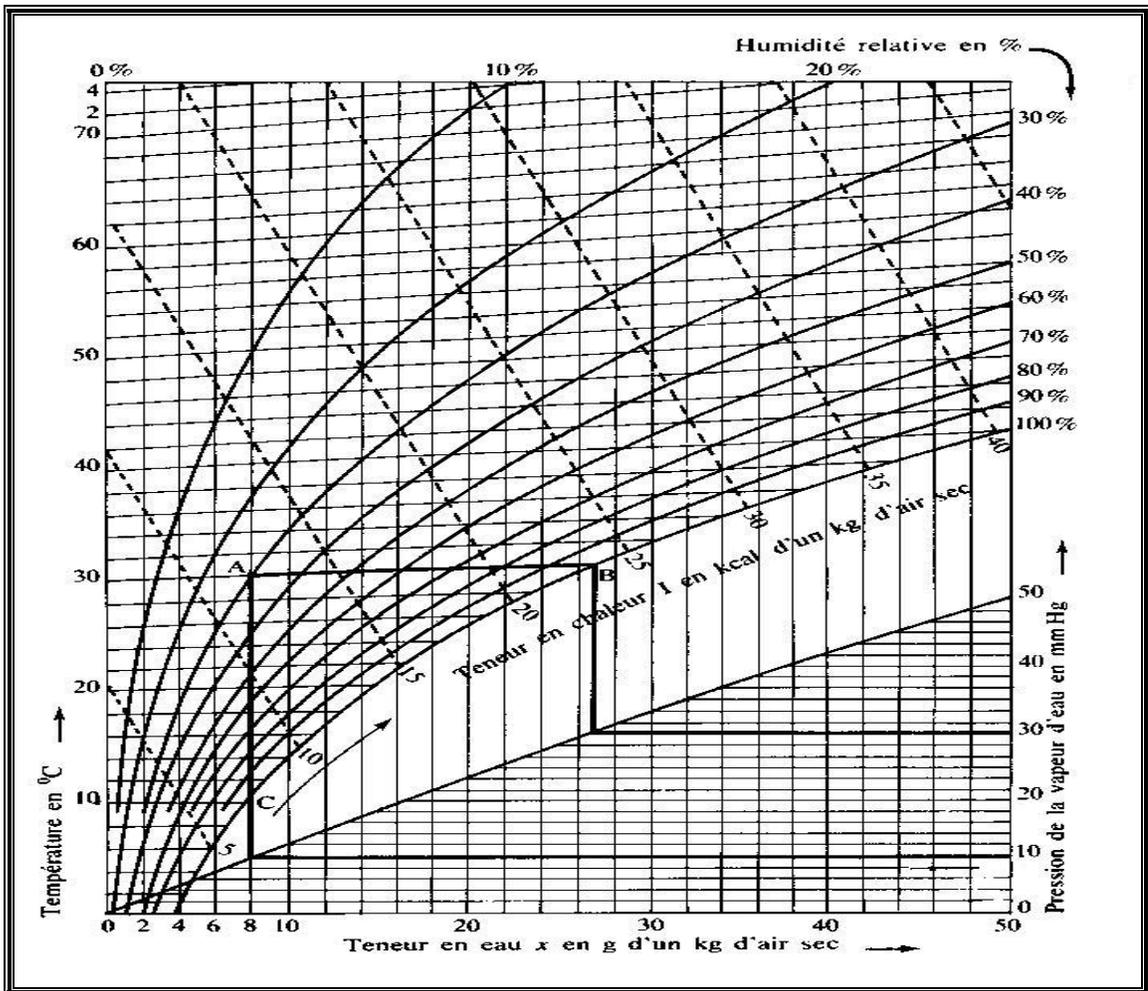


Fig.6-73 : Diagramme de mollier ou de l'air humide : permet de déterminer les points de rosées et les pressions Saturantes. Source : S. Belakhowky, 1980

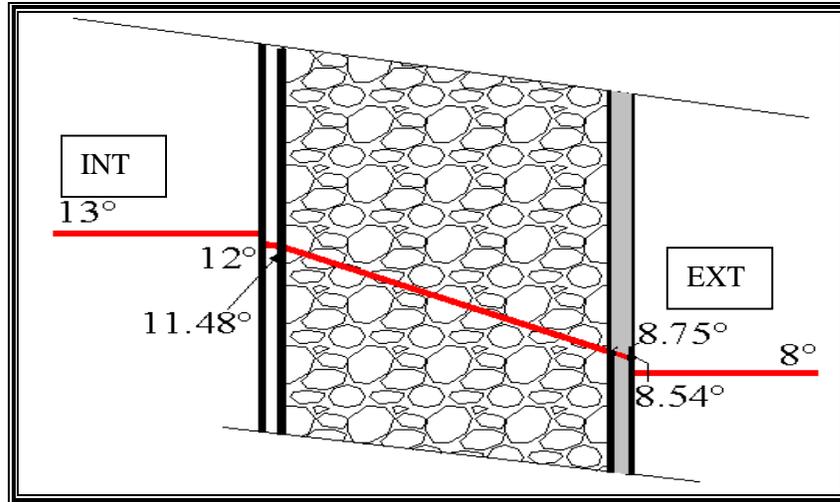


Fig. 6-74 : Gradient de températures. Source : auteur, 2005

○ **Détermination des pressions de saturation de chaque couche composant le mur**

Le diagramme de l'air humide (fig.6-73), permet de déterminer les pressions de saturation de chaque couche constituant le mur en fonction de la température correspondante.

Température [°C]	13	12	11,48	8,75	8,54	8
Pression de saturation [mmHg]	11	10,5	10	8,5	8,2	8

○ **Détermination des pressions partielles de chaque couche composant le mur**

$$P_{pn} = P_{pn-1} - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/\pi] \cdot e_n/\pi_n \quad [\text{mmHg}] \dots\dots (4)$$

Avec, $P_{pi} = \frac{P_{sij} i}{100}$ et $P_{pe} = \frac{P_{sej} e}{100} \dots\dots\dots (5)$

Où,

- P_{pn} : pression de la couche considérée (n), [mmHg],
- P_{pn-1} : pression de la couche antérieure (n-1), [mmHg],
- P_{pi} et P_{pe} : pressions partielles, respectivement, intérieure (chambre) et extérieure (galerie),
- e : épaisseur du matériau de la couche « n », [m]
- π : perméabilité à la vapeur du matériau de la couche « n ». [g/ m.h.mmHg].
- e/π : résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. [m².h.mmHg/g]

○ **Calcul des résistances à la diffusion de la vapeur : $R_d = e/p$**

N°	Désignation	e (m)	p (g/ m.h.mmHg)	$R_d (e/p)$ (m ² .h.mmHg/g)
1	Enduit plâtre	0,02	0.013	1,54
2	Pierre naturelle : calcaire	0,60	0,0045	133,33
3	Mortier de chaux (enduit)	0,02	0,008	2,5
Total				137,37

Tab.6-4: calcul des résistances à la diffusion de la vapeur d'eau de chaque couche constituant la paroi. Source : auteur, 2005.

○ **Calcul des pressions intérieure (chambre) et extérieure (galerie),**

- $P_{pi} = \frac{P_{sij}}{100} = \frac{11 \times 95}{100} = 10,45 \text{ mmHg}$

- $P_{pe} = \frac{P_{sej}}{100} = \frac{8 \times 90}{100} = 7,20 \text{ mmHg}$

Étant donnée que :

- $\sum \frac{e}{p} = 137,37 \text{ [m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg/g]}$

- $[(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/p] = 10,45 - 7,20 / 137,37 = 0,0236 \approx 0,024 \text{ [g/m}^2 \cdot \text{h]}$

Alors, on aura :

- $P_1 = P_i - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/p] \cdot e_1 / \pi_1 = 10,45 - (0,024 \times 1,54) = 10,41 \text{ (mmHg)}$

- $P_2 = P_1 - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/p] \cdot e_2 / \pi_2 = 10,41 - (0,024 \times 133,33) = 7,21 \text{ (mmHg)}$

- $P_3 = P_2 - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/p] \cdot e_3 / \pi_3 = 7,21 - (0,024 \times 2,5) = 7,15 \approx 7,20 \text{ (mmHg)}$

Résumé des résultats :

Température	13	12	11,48	8,75	8,54	8
Pression partielle	10,45	10,45	10,41	7,21	7,20	7,20
Pression de saturation	11	10,5	10	8,5	8,2	8

Tab.6-5 : résumé des résultats de calculs (températures, pressions partielles et pressions saturantes)

Source : auteur, 2005.

En superposant les courbes des pressions partielles et des pressions saturantes : On constate que les deux courbes se croisent à l'intérieur de la paroi en deux points (fig.6-75), par conséquent, nous pouvons conclure qu'il y a effectivement : **un risque de condensation dans la masse.**

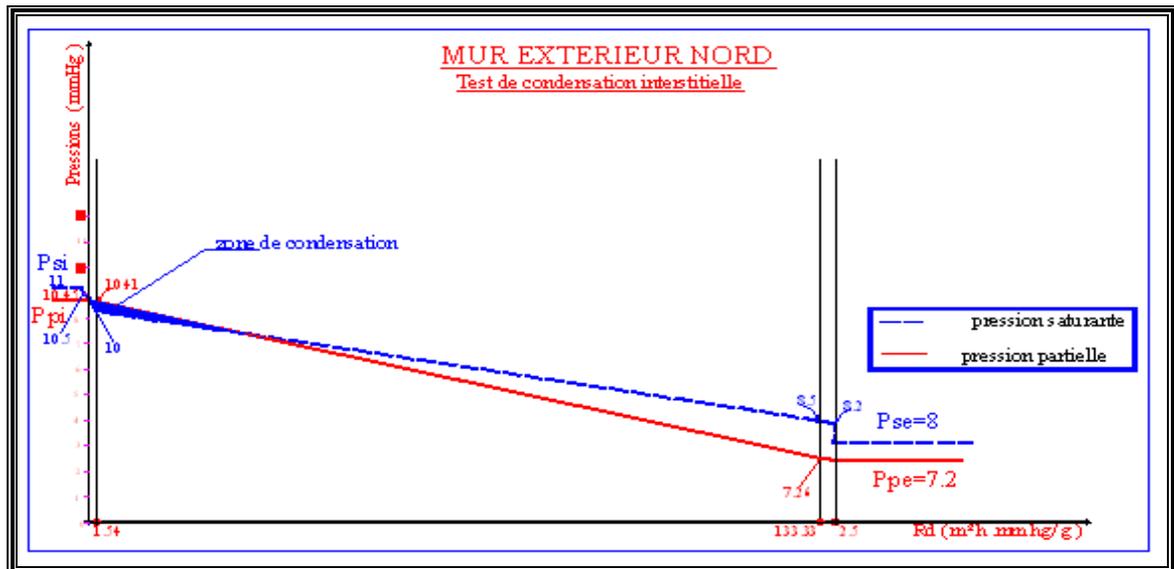


Fig.6-75 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005. Source : auteur, 2005.

Sens de migration de la vapeur d'eau

Le sens de migration de la vapeur d'eau, pendant l'hiver, s'effectue de l'intérieur vers l'extérieur, donc : des pressions les plus hautes vers les pressions les plus basses (fig.6-76).

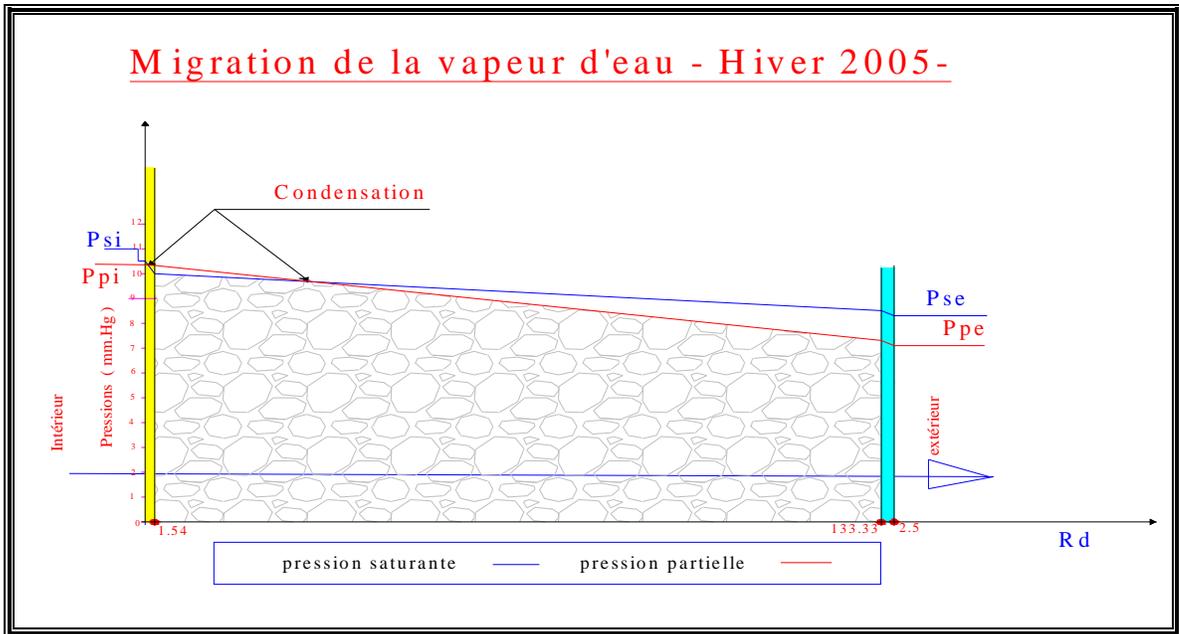


Fig.6-76 : sens de migration de vapeur d'eau : de l'intérieur vers l'extérieur. Période hivernale. **Source** : auteur

Mur ouest « intérieur » de dimension: 0,64m

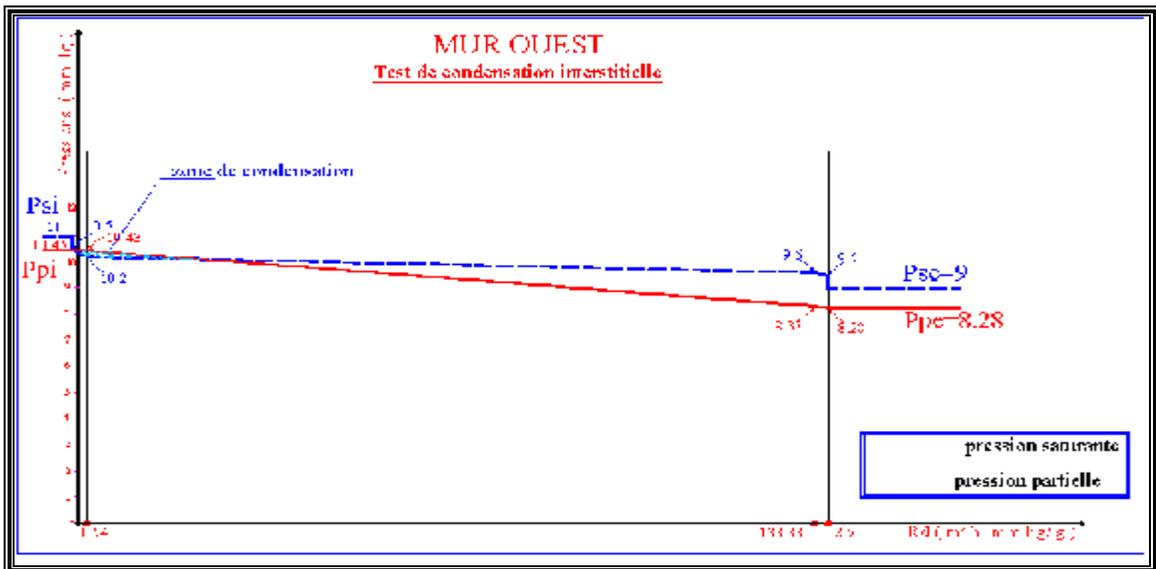


Fig.6-77 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005. Le risque de condensation dans la masse existe au niveau du mur ouest

Source : auteur, 2005.

B) **Plancher « haut » de dimension: 0,49 m**

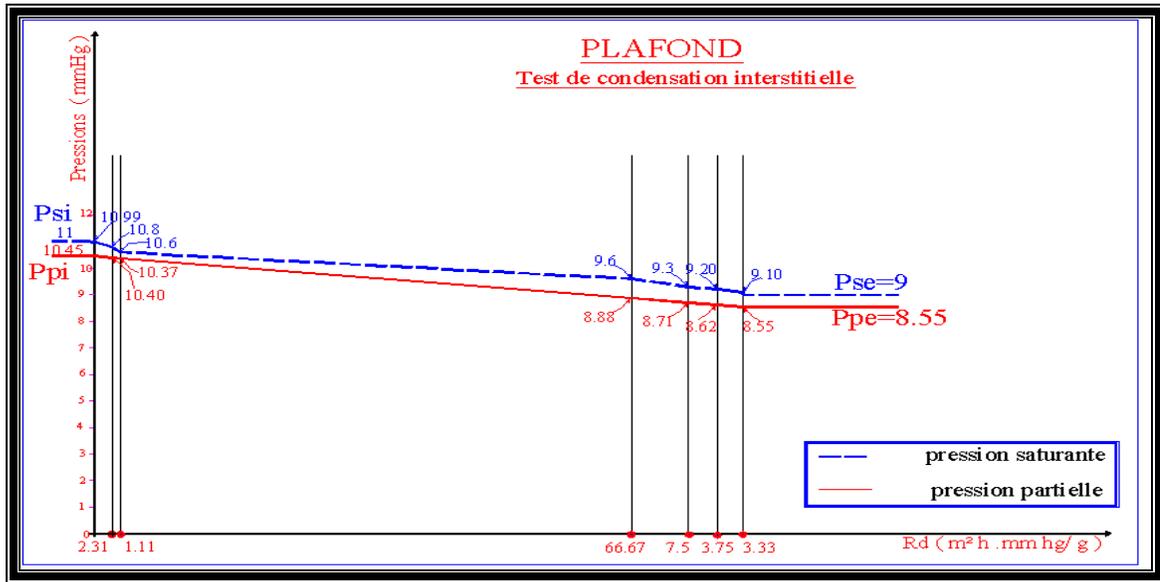


Fig.6-78 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005. Il n' y a pas de risque de Condensation dans la masse, au niveau du plancher haut. Source : auteur, 2005.

C) **Plancher « bas » de dimension: 0,49 m**

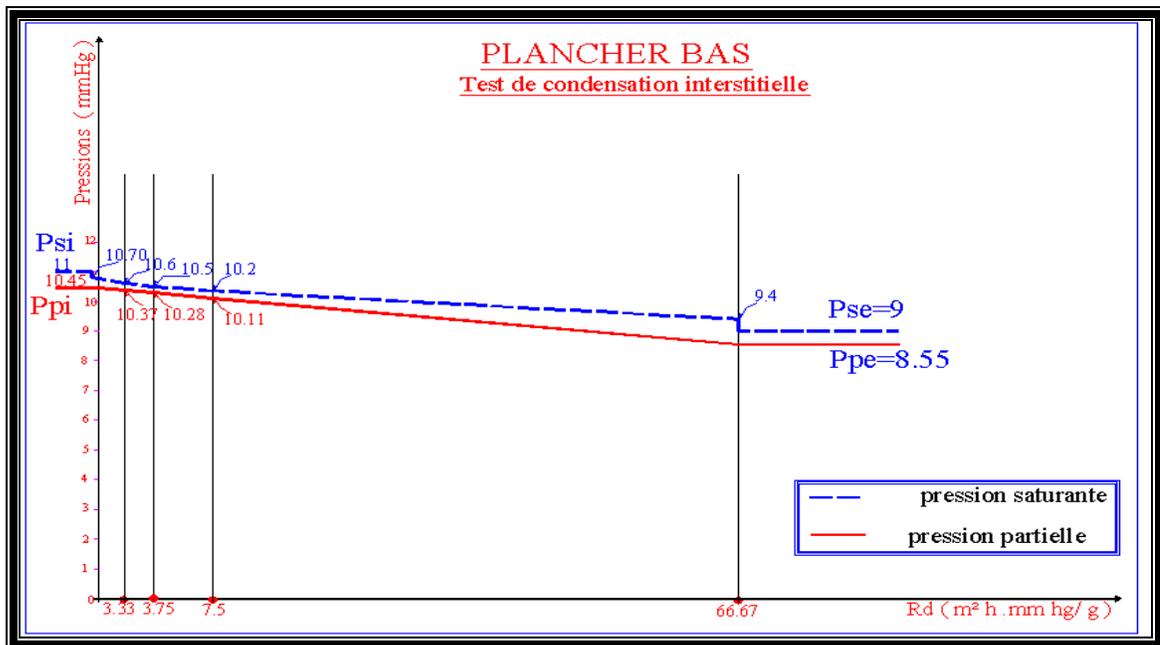


Fig.6-79 : Test de condensation interstitielle. Période : hiver, 2005. Il n' y a pas de risque de Condensation dans la Masse, au niveau du plancher bas. Source : auteur, 2005.

Vérification du risque de la condensation, Période d'été

A) Mur Nord «extérieur» de 0,64m

a') condensation superficielle (période d'été)

○ Détermination du coefficient de transmission surfacique « K »

N°	Désignation	e (m)	λ (w/m. °c)	R = e/ λ (m ² . °c/w)
1	Enduit plâtre	0,02	0,35	0,057
2	Pierre naturelle : calcaire	0,60	2	0,30
3	Mortier de chaux (enduit)	0,02	0,87	0,023
Total :				0,38

Tab.6-6 : calcul de la résistance thermique de chaque couche constituant la paroi. Source : auteur, 2005.

$$K = \frac{1}{1/\alpha_i + 1/\alpha_e + \sum R} \quad [\text{w/m}^2 \cdot \text{°c}]$$

Avec :

$$\emptyset \quad 1/\alpha_i + 1/\alpha_e = 0,11 + 0,06 = 0,17 \quad [\text{w/m}^2 \cdot \text{°c}],$$

$$\emptyset \quad \sum R = 0,38 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{°c/w}],$$

$$K = 1,82 \quad [\text{w/m}^2 \cdot \text{°c}]$$

○ Détermination de la température surfacique intérieure

$$T_{pi} = t_i - (K / \alpha_i) (t_i - t_e) \quad [^\circ\text{C}]$$

Avec,

$$- t_i^1 = 22 \text{ °C},$$

$$- t_e^1 = 24,6 \text{ °C},$$

$$- \alpha_i = 9,09$$

$$\text{D' où : } T_{pi} = 22,52 \quad [^\circ\text{C}]$$

A3. Détermination de la température de rosée [Tr]

Avec le diagramme de Mollier, Figure (6-73), nous pouvons déterminer la température de rosée, correspondante aux conditions climatiques suivantes :

$$- t_i^1 = 22 \text{ °C},$$

d'où

$$- \phi_i^1 = 70 \%. \quad \longrightarrow \quad T_r = 17 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Comme, la température surfacique (Tpi) est supérieure à la température de rosée (Tr), par conséquent :

Il n' y a pas risque de condensation superficielle.

¹ Valeurs des températures de l'air et humidités relatives, mesurées sur les lieux par l'auteur en juillet 2004.

b') Condensation interstitielle (période d'été)

Les paramètres nécessaires pour l'application de la méthode de vérification de la condensation interstitielle, sont :

- $t_i = 22 \text{ °C}$, (température de l'air à l'intérieure de la chambre) ;
- $\phi_i = 70 \%$, (taux de l'humidité relative à l'intérieure de la chambre)
- $t_e = 24,6 \text{ °C}$, (température de l'air au niveau de galerie)
- $\phi_e^1 = 65 \%$, (taux de l'humidité relative au niveau de galerie)
- $K = 1,82 \text{ [w/m2. °c]}$

o **Détermination de la température de chaque couche composant le mur**

$$T_{pn} = T_{pn-1} - K (t_i - t_e) R_n \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Où:

T_{pn} : Température de la couche considérée (n), [$^{\circ}\text{C}$],

T_{pn-1} : Température de la couche antérieure (n-1), [$^{\circ}\text{C}$],

K : coefficient de déperdition calorifique [$\text{w/m2. }^{\circ}\text{C}$]

R_n : résistance thermique de la couche considérée [$\text{m}^2. \text{ }^{\circ}\text{C/w}$].

$$T_i = 22^{\circ} \text{ C.}$$

$$T_{p1} = 22,52 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

$$T_{p1} = T_{pi} - K (T_i - T_e) R_1 = 22,52 - [1,82 \times (-2,6) \times 0,057] = 22,78 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{p2} = T_{p1} - K (T_i - T_e) R_2 = 22,78 - [1,82 \times (-2,6) \times 0,30] = 24,20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{p3} = T_{p2} - K (T_i - T_e) R_3 = 24,20 - [1,82 \times (-2,6) \times 0,023] = 24,30 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_e = T_{p3} - k / \alpha_e (T_i - T_e) = 24,30 - [1,82 / 16,66 \times (-2,6)] = 24,58 \approx 24,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

o **Détermination des pressions de saturation de chaque couche composant le mur**

Le diagramme de l'air humide (fig.6-73), permet de déterminer les pressions de saturation de chaque couche constituant le mur en fonction de la température correspondante.

Température [$^{\circ}\text{C}$]	22	22,52	22,78	24,20	24,30	24,60
Pression de saturation [mmHg]	19	19,2	19,7	22,5	23	24

B3. Détermination des pressions partielles de chaque couche composant le mur

$$P_{pn} = P_{pn-1} - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e / \mu] \cdot e_n / \mu_n \quad [\text{mmHg}]$$

Avec,
$$P_{pi} = \frac{P_{sij} i}{100} \quad \text{et} \quad P_{pe} = \frac{P_{sej} e}{100}$$

Où,

- P_{pn} : pression de la couche considérée (n), [mmHg],
- P_{pn-1} : pression de la couche antérieure (n-1), [mmHg],
- P_{pi} et P_{pe} : pressions partielles, respectivement, intérieure et extérieure,
- e : épaisseur du matériau de la couche « n », [m]
- p : perméabilité à la vapeur du matériau de la couche « n ». [g/ m.h.mmHg].

- Calcul des résistances à la diffusion de la vapeur : $R_d = e/p$

N°	Désignation	e (m)	p (g/ m.h.mmHg)	$R_d (e/p)$ (m ² .h.mmHg/g)
1	Enduit plâtre	0,02	0.013	1,54
2	Pierre naturelle : calcaire	0,60	0,0045	133,33
3	Mortier de chaux (enduit)	0,02	0,008	2,5
Total				137,37

Tab.6-7 : calcul des résistances à la diffusion de la vapeur d'eau de chaque couche constituant la paroi.
Source : auteur, 2005.

- calcul des pressions

$$- P_{pi} = \frac{P_{sij}}{100} = \frac{19 \times 70}{100} = 13,30 \text{ mmHg}$$

$$- P_{pe} = \frac{P_{sej}}{100} = \frac{24 \times 65}{100} = 15,60 \text{ mmHg}$$

Étant donnée que :

$$- \sum \frac{e}{p} = 137,37 \text{ [m}^2\text{.h.mmHg/g]}$$

$$- [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/\pi] = 13,3 - 15,60 / 137,37 = -0,017 \text{ [g/m}^2\text{.h]}$$

Alors,

$$- P_1 = P_i - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/\pi] \cdot e_1/\pi_1 = 13,30 - (-0,017 \times 1,54) = 13,32 \text{ (mmHg)}$$

$$- P_2 = P_1 - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/\pi] \cdot e_2/\pi_2 = 13,32 - (-0,017 \times 133,33) = 15,58 \text{ (mmHg)}$$

$$- P_3 = P_2 - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/\pi] \cdot e_3/\pi_3 = 15,58 - (-0,017 \times 2,5) = 15,62 \approx 15,60 \text{ (mmHg)}$$

Résumé des résultats :

Température en °C	22	22,52	22,78	24,20	24,30	24,60
Pression partielle en [mmHg]	13,30	13,30	13,32	15,58	15,60	15,60
Pression de saturation en [mmHg]	19	19,2	19,7	22,5	23	24

Tab.6-8 : résumé des résultats de calculs (températures, pressions partielles et pressions saturantes)
Source : auteur, 2005.

En superposant les courbes des pressions partielles et les pressions saturantes (fig.6-8). On constate que les deux courbes ne se croisent pas, c'est-à-dire que les pressions de saturation sont toujours supérieures aux pressions partielles, par conséquent, nous pouvons conclure qu'il n'y a pas de condensation dans la masse.

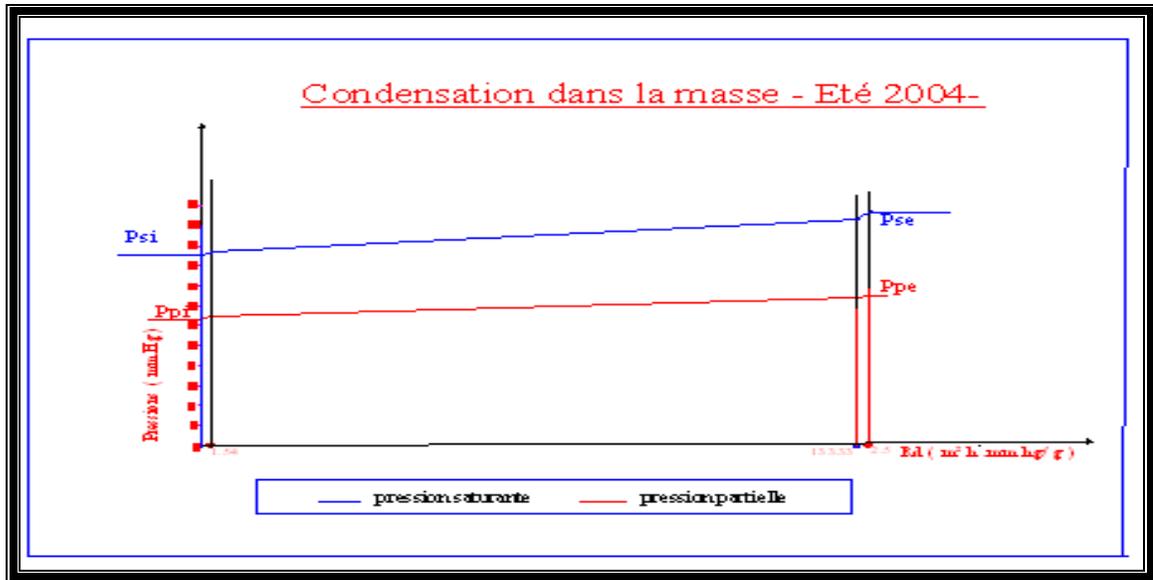


Fig.6-80 : Test de condensation interstitielle. Période : été 2004. Il n'y a pas de risque de condensation dans La masse. Source : auteur, 2005.

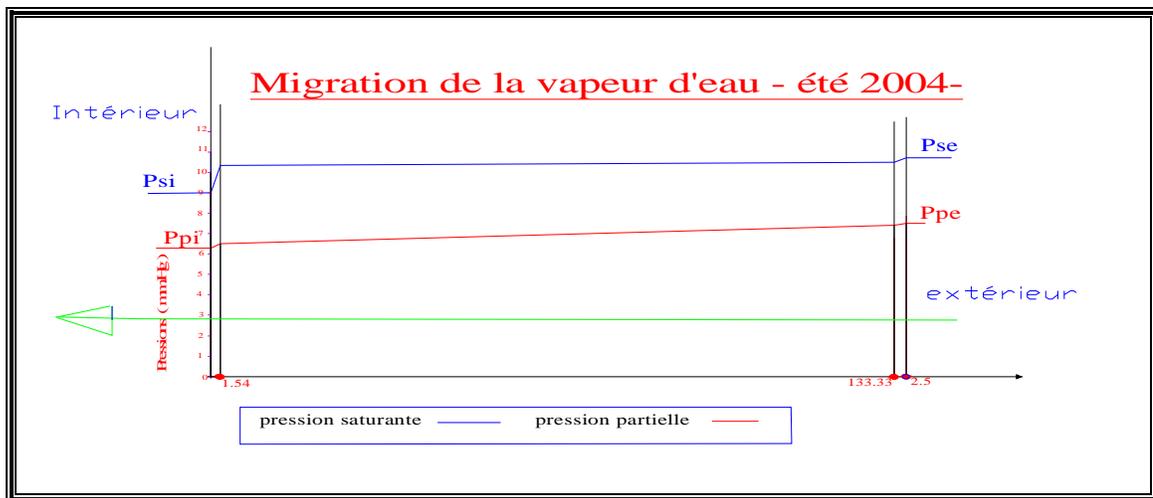


Fig.6-81 : sens de migration de vapeur d'eau. Période estivale : de l'extérieur vers l'intérieur. Source : auteur, 2005.

6.13 Illustration des effets de l'humidité

Le diagnostic établi dans la maison « Dar'ediaf », permet d'identifier les différents types d'humidité (fig.6-82 & 83), qui ont causé les dégradations à savoir :

6.13.1 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité de condensations



Érosion de l'enduit

Mouillure du plafond (taches sombres)

Écaillage de la peinture



Forte dégradation de l'enduit (skiffa) Effet de la vapeur de la cuisine

Mouillures dans les espaces sombres

fig.6-82 : effet de l'humidité de condensations. Source : auteur, 2005.

6.13.2 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité de ascensionnelle



Remonté capillaire (chambre),

poussées du talus humide (fissure et érosion),

ascension d'eau souterraine



Érosion profonde de l'enduit (Mur mitoyen des ruines) dégradation superficielle de l'enduit Apparition d'efflorescences
 fig.6-83 : effet de l'humidité ascensionnelle. Source : auteur, 2005.

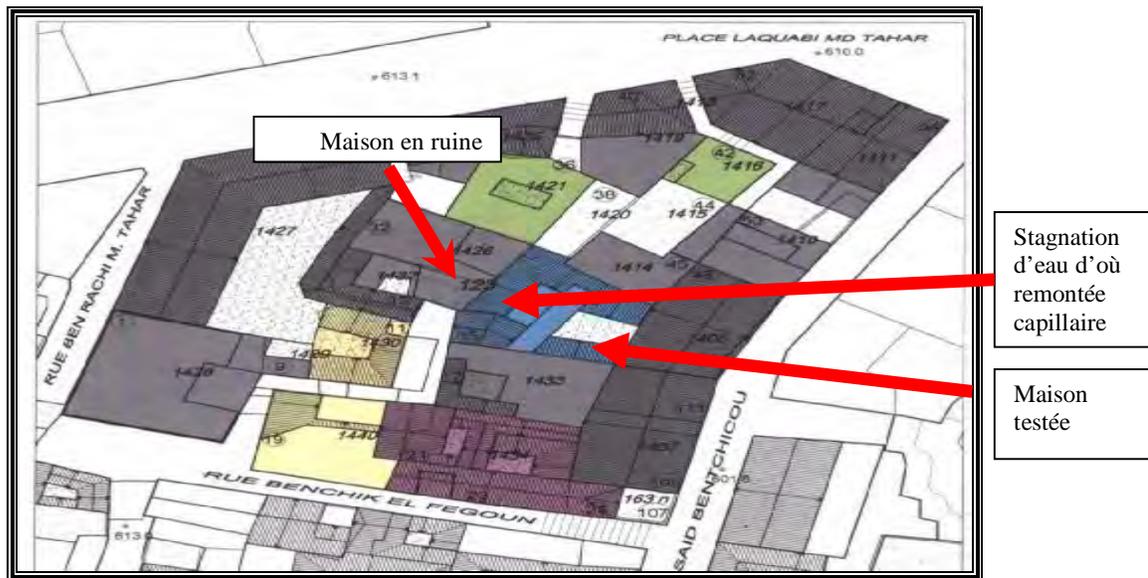


Fig.6-84 : plan de masse, origine des sources d'eau souterraine. Stagnation des eaux pluviales au niveau des ruines provoquant des remontées capillaires. Source : auteur, 2004

6.13.3 Illustrations des dégâts apparents de l'humidité d'origine accidentelle



Dégradation du faux plafond causée par la détérioration de la tuile Effet des pluies battantes sur la façade d'accès (N-O) Détérioration provoquée par une mauvaise étanchéité du carrelage

Fig.6-85 : Effet de l'humidité d'origine accidentelle. Source : auteur, 2005.

6.13.4 Moisissures



Moisissures sur mur extérieur de l'impasse
(Preuve d'un manque de ventilation et d'ensoleillement)

bois attaqué par le champignon: merulius lacrimans
(Nécessite peu d'humidité pour se développer)

Fig.6-86 : Effet de l'humidité sur les matières organiques et minérales. Source : auteur, 2005.

6.14 Conclusion

L'efficacité d'un traitement contre l'humidité est subordonné aux causes du mal, par l'identification de ces origines, l'investigation établie pendant les deux périodes : été 2004 et hiver 2005 a révélé qu'il existe effectivement, des risques de condensation superficielle et dans la masse des murs extérieurs donnant sur le patio et quelques murs intérieurs comme le mur ouest par exemple, et ce, pendant l'hiver seulement. Alors que les planchers bas et hauts ne présentent aucun risque de condensation, d'autant plus, qu'ils constituent de très bons isolants thermiques. Les mesures hygrométriques ont confirmé aussi, que le taux d'humidité de l'air à l'intérieur de la chambre testée est trop élevé, ceci est dû à plusieurs facteurs tels que :

- mauvaise ou absence de ventilation,
- différence de température importante entre l'intérieure et l'extérieure,
- protection thermique insuffisante des murs,
- manque d'ensoleillement de deux façades intérieures orientées Nord et Ouest pendant l'été et absence total d'ensoleillement pendant l'hiver surtout au niveau du rez-de-chaussée.
- Apport interne en vapeur d'eau, produit par les occupants, fontaine,...etc.

Par ailleurs, le taux hygrométrique est influencé par les variations de la température, ainsi, le grand écart de cette dernière entre l'intérieur et l'extérieur provoque des condensations de la vapeur d'eau. Dans le cas où la température de l'air augmente, l'air aura une capacité meilleure à absorber l'humidité d'où diminution du taux hygrométrique. Cependant et dans le cas inverse, l'air aura une capacité d'absorption faible et se rapproche de la saturation ou carrément, il se sature c'est-à-dire que la vapeur d'eau contenue dans l'air peut se condenser à une température moindre¹.

Dans le cas de cette étude, l'analyse des éléments du confort physiologique, ont révélé que ce dernier est tributaire de deux paramètres interdépendants, seulement : la température et l'humidité, vu que la vitesse de l'air est calme (voir: chapitre investigation :§.6.7.2).

¹ Bernstein D; Champetier. J-P ; Vidal. T, *Anatomie de l'enveloppe des bâtiments*, le Moniteur, Paris, 1997. pp59-73

Lorsqu'il se produit une différence dans la concentration de la vapeur d'eau entre deux points, il en résulte une différence des pressions partielles respectives, qui entraîne un écoulement de ce gaz particulier du point de forte concentration vers le point de faible concentration. Cette diffusion se poursuit jusqu'à ce que l'égalisation des pressions partielles de cette vapeur soit réalisée. La vitesse de diffusion dépendra de la différence des pressions partielles, de la longueur de la voie suivie par l'écoulement de ce gaz et de la perméabilité des matériaux traversés par ce dernier¹.

D'après le diagnostic, et l'interprétation des résultats des campagnes de mesures, on peut conclure que cette maison objet de cette étude est insalubre du point de vue hygiénique. Car le taux de l'humidité relative dépasse le seuil d'insalubrité² qui est de l'ordre de 65 % à la température intérieure de 13°C, ceci est bien illustré sur le diagramme de confort (fig.6-65.p186).

Bien que la maison traditionnelle réponde à certaines conditions de vie sociale (chapitre investigation: §.6.4.3), elle reste inconfortable pendant la période d'hiver, malgré l'importante inertie qui caractérise ses parois, par contre, elle offre une assez bonne performance thermique pendant l'été malgré que le taux d'humidité de l'air est un peu élevé. Ce qui est, en principe, avantageux pendant l'été, car il participe à l'adoucissement de l'air, chaud et sec, de cette période.

La réhabilitation de ces maisons vernaculaires ne doit pas se limiter à la consolidation des structures et à la réfection de l'enveloppe seulement, mais doit prendre en charge aussi l'effet négatif du climat sur l'ambiance thermique intérieure qui affecte la sensation de confort des occupants. Une ventilation de toutes les pièces ainsi qu'une amélioration de la résistance thermique et/ou hygrométrique des parois s'avère indispensable pour éliminer l'humidité de condensation³.

Quant aux autres formes de l'humidité (ascensionnelle, accidentelle...etc.), Les moyens à employer varient selon les cas, Donc il faut procéder à des études de cas par cas afin d'éviter de tomber dans les erreurs, et ensuite ramener chaque cas à des normes standardisées et lui appliquer les critères établis sur la base d'examen expérimentaux.

¹ LATA J.K et BEACH R.K, *Diffusion de la vapeur et condensation*, <http://irc.com>, 2006.

²[Enligne] <http://www.Rubson.com>. 2005

³ - CROISSET.Maurice, *l'hygrométrie dans le bâtiment*, EYROLLES, 1968.pp100-145.

- Couasnet Y : *les condensations dans les bâtiments : guide pratique et éléments d'analyse*. Presse de l'école Nationale des ponts et chaussées. Paris, 1990.

Simulation et interprétation des résultats

7.1 Introduction

L'assèchement des bâtiments humides et insalubres selon des méthodes scientifiques est une pratique assez récente (début du 20ème siècle), qui s'est développée après la découverte de nouveaux dispositifs (électro-osmose, siphons...) et de nouveaux matériaux (résines, feuilles étanches,...). Cette nouvelle technologie des matériaux permet de mettre à la disposition des architectes et thermiciens une gamme de matières susceptibles de renforcer les qualités physiques, mécaniques et chimiques des matériaux de constructions. En général, les matériaux caractérisés par une grande résistance à la diffusion de la vapeur d'eau ou une bonne résistance thermique sont fortement recommandés.

La simulation numérique porte sur la modification du comportement thermique et hygrométrique des parois envahis par l'humidité de condensations. L'objectif à atteindre est d'éliminer le risque de condensation superficielle et dans la masse. Pour cela, nous essayerons d'introduire de nouvelles couches de matériaux additifs, qui seront placés successivement sur la partie intérieure du mur Nord et du mur Ouest, touchés par la condensation comme il a été prouvé dans le chapitre investigation (§.6-12). Le test consiste à établir plusieurs scénarios :

Soit de fixer les matériaux additifs et faire varier uniquement leurs épaisseurs, soit de changer les couches des matériaux (isolants thermiques, matériaux perméables ou résistants à la diffusion de la vapeur d'eau) et faire varier leurs épaisseurs¹.

La ventilation naturelle est une stratégie utilisée en vue d'assurer un bon renouvellement de l'air intérieur par de l'air frais. Cette amélioration de la qualité de l'air peut être obtenue par des procédés passifs qui ne nécessitent pas d'énergies supplémentaires, autres que celles existantes dans la nature, utiles à leurs fonctionnements.

La cheminée à tirage naturelle constitue un système passif, non coûteux, dépendant uniquement de la différence des températures et éventuellement de la vitesse du vent. Son pouvoir asséchant remplace en quelques sortes les appareils déshumidificateurs électriques, très onéreuses.

Le déplacement de l'air, ainsi créé, agit non seulement sur le degré hygrométrique, en faisant abaisser son taux d'humidité mais aussi sur les parois afin d'empêcher la formation des condensations superficielles².

7.2 Programme de calcul informatique

Le test ou l'évaluation du comportement thermique et hygrométrique d'un bâtiment par simulation informatique à l'aide d'un programme de calcul informatique ou d'un logiciel offre un avantage par sa flexibilité et les moyens économiques qu'il prévoit. Le chercheur trouvera une liberté de faire varier les différents paramètres relatifs à la construction (propriétés thermo-physiques des matériaux, orientations...etc.), ainsi que les données climatiques du site dans lequel se trouve le projet considéré.

Les modèles de simulation thermiques et hygrométriques doivent répondre aux besoins de l'investigation. Les résultats obtenus, sous forme de graphes ou tableaux, matérialisent les

¹ Daniel.B ; Champetier. J-P ; Vidal. T, Anatomie de l'enveloppe des bâtiments, le Moniteur, Paris, 1997

² Latta J.K et Beach R.K, *Diffusion de la vapeur et condensation*, <http://irc.com>, 2006

effets conjugués des phénomènes thermiques et hygrométriques. Par conséquent, la lecture ou l'appréciation du confort est largement simplifiée au moyen de ce procédé. L'objectif de cette investigation est d'essayer de chercher à trouver les conditions appropriées, afin d'arriver à éliminer les risques de condensations dans la maison testée.

Cette recherche envisage, donc, à analyser théoriquement les modifications apportées aux parois et évaluer leurs performances thermiques et hygrométriques sous diverses conditions climatiques. Pour cela, un modeste programme de calcul informatique a été mis au point par nos soins en vue de prendre en charge un des aspects de lutte contre l'humidité, en l'occurrence : les condensations superficielles et interstitielles. C'est un outil de prédiction au moyen duquel, l'utilisateur pourra améliorer la performance thermique et hygrométrique des parois d'une construction, quelque soit sa typologie ou nature de ses matériaux constitutifs. Ce programme procède à un calcul en deux étapes :

7.2.1 Première étape :

Il calcul d'abord, le coefficient de transmission surfacique «k» (tab.7-1), puis détermine la température surfacique intérieure des parois, pour la comparer ensuite à la température de rosée, correspondante au degré hygrométrique et la température intérieure de l'air ambiant¹. Le résultat qui s'affiche sur un tableau, indique l'existence ou non d'un éventuel risque de condensation superficielle (tab.7-2).

Calcul du coefficient de déperdition calorifique "K" [w/m2 ° C]									
Parois	Orientat	Couche	Epaisseur	Conductivité	Résistance	$\sum R$	1/hi+1/he	1/K	K
			(m ²)	λ (W/m.°C)	(m ² .°C/W)				
		placoplâtre + par vapeur	0,03	0,3	0,10				
		polystyrène, expansé	0,04	0,042	0,95				
Mur 1	Nord	Pierre calcaire	0,6	2	0,30				
		enduit chaux	0,02	0,87	0,02				
						1,38	0,17	1,55	0,65
		plaq,plâtre+parvap	0,05	0,3	0,17				
		laine minérale	0,05	0,04	1,25				
Mur 4	ouest	Pierre calcaire	0,6	2	0,30				
		enduit chaux	0,02	0,87	0,02				
						1,74	0,22	1,96	0,51

Tab.7.1 : détermination du coefficient « K », après amélioration de la résistance thermique. Source : auteur, 2005

Parois	ti	te	Δt	K	1/hi	t _{pi}	t _r	comparaison	conclusion
Mur extérieur Nord	13	8	5	0,65	0,11	12,64	12,5	t _{pi} > t _r	Pas de Condensation

Tab.7.2 : détermination de la température surfacique en °C, et comparaison avec la température de rosée
Source : auteur, 2005

¹ Ministère de l'habitat, CNERIB, *Réglementation thermique des bâtiments d'habitation, Règles de calcul des déperditions calorifiques, (DTR), Fascicule 1 et 2*. PAO-CNERIB, Alger, 1998.

7.2.2 Deuxième étape :

En premier lieu, l'outil calcul la température de chaque couche constituant la paroi considérée (tab.7-3), pour pouvoir déterminer les pressions de saturations y afférentes et ce, à partir d'un diagramme de l'air humide (fig.6-73). Ensuite, et en second lieu, il calcul les résistances à la diffusion de la vapeur d'eau de chaque couche qui permettront de déterminer les pressions partielles de toutes les couches de matériaux composant la paroi en question (tab.7-4).

Cette fois-ci, les résultats s'affichent sous forme de graphes. Une simple lecture de l'évolution des deux courbes des pressions de saturation et celle des pressions partielles peut affirmer ou infirmer le risque de condensation dans la masse selon la méthode de Glaser¹ (fig.7-3).

Les résultats de l'analyse, formulées dans les deux étapes suscitées, aident les concepteurs, lors d'une opération de réhabilitation d'opter pour une méthode précise d'intervention et d'utiliser des moyens et matériaux adéquats. Ils peuvent, ainsi sélectionner les matériaux nécessaires et efficaces avec des dimensions appropriés afin d'éviter toutes les formes de condensations.

Formule : $T_{pn} = T_{pn-1} - K (t_i - t_e) R_n$

Mur Nord corrigé

N° Couche	T _{pn-1}	t _i	t _e	Δt	K	R _n	p	T _{pn}
Ti								13
Tpi								12,64
Tp1	12,64	13	8	5	0,65	0,10	0,32	12,32
Tp2	12,32	13	8	5	0,65	0,95	3,08	9,24
Tp3	9,24	13	8	5	0,65	0,30	0,97	8,27
Tpe	8,27	13	8	5	0,65	0,02	0,07	8,19
Te								8,00

Tab.7.3 : détermination des températures interstitielles en °C de chaque couche composant la paroi
Source : auteur, 2005

formule $P_{pn} = P_{pn-1} - [(P_{pi} - P_{pe}) / (\sum e/p) \times e_n / p_n]$

Mur Nord corrigé

pression partielle	P _{pn-1}	P _{pi}	P _{pe}	Σ e/p	A	R _{dn}	P _{pn}
Ppi							10,45
Pp1	10,45	10,45	7,2	1151,83	0,002822	1000	7,63
Pp2	7,63	10,45	7,2	1151,83	0,002822	16,00	7,58
Pp3	7,58	10,45	7,2	1151,83	0,002822	133,33	7,21
Ppe	7,21	10,45	7,2	1151,83	0,002822	2,50	7,20
Pe							7,20

Tab.7.4 : détermination des pressions partielles en [mmHg] de chaque couche composant la paroi
Source : auteur, 2005

¹ Roulet Claude-Alain, *Energétique du bâtiment I, Interactions entre le climat et le bâtiment*, presse polytechniques romandes, Lausanne, 1987. p57.

Mur Nord corrigé

Température	13	12,64	12,32	9,24	8,27	8,19	8,00
Pression de saturation	11	10,70	10,40	8,92	8,20	8,16	8,00
Pression partielle	10,45	10,45	7,63	7,58	7,21	7,20	7,20

Tab.7.5 : synthèse des résultats, nécessaires pour tracer les courbes indiquant l'existence ou non du risque de condensation. Source : auteur, 2005

a) intervention :

Comme, il a été expliqué précédemment (les deux étapes), l'intervention consiste à pallier aux défaillances des parois, vis-à-vis du phénomène d'apparition de l'humidité, en vue d'éliminer les causes de la formation de cette dernière. En d'autres termes : améliorer les performances thermiques de la maison vernaculaire dans le but de l'adapter au climat froid et humide en hiver. À cet effet, le présent programme traite les points suivants :

1. augmentation de la résistance thermique des parois en ajoutant des isolants thermiques sur la face intérieure des murs. le choix des isolants est basé sur les meilleures qualités ou propriétés thermo-physiques des matériaux. Ceci pourra augmenter sensiblement la température surfacique (intérieure) et par conséquent, éviter les méfaits de la paroi froide qui causent les condensations superficielles ;
2. augmenter le pouvoir d'absorption d'eau de la première couche intérieure des matériaux constituant les parois afin de mieux lutter contre les condensations superficielles;
3. dans le cas où, il existe une condensation dans la masse, le remède consiste à augmenter la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, pour cela, une interposition d'une barrière étanche « pare-vapeur » est indispensable. L'efficacité de ce remède, est conditionnée par son emplacement, qui doit être sur la face cachée de la première couche absorbante du côté intérieur (fig.7-1_a et 7-1_b).
4. réduire le taux du degré hygrométrique de l'air intérieur très élevé (chapitre 7), au moyen d'une ventilation naturel. Ceci peut être obtenue par la mise en place d'une cheminée de ventilation à tirage naturel (fig.7-16). Son fonctionnement est tributaire de certaines conditions tels que: gradient de température, pressions, section et hauteur du conduit, vitesse de l'air à l'intérieur du conduit, débit,...etc.

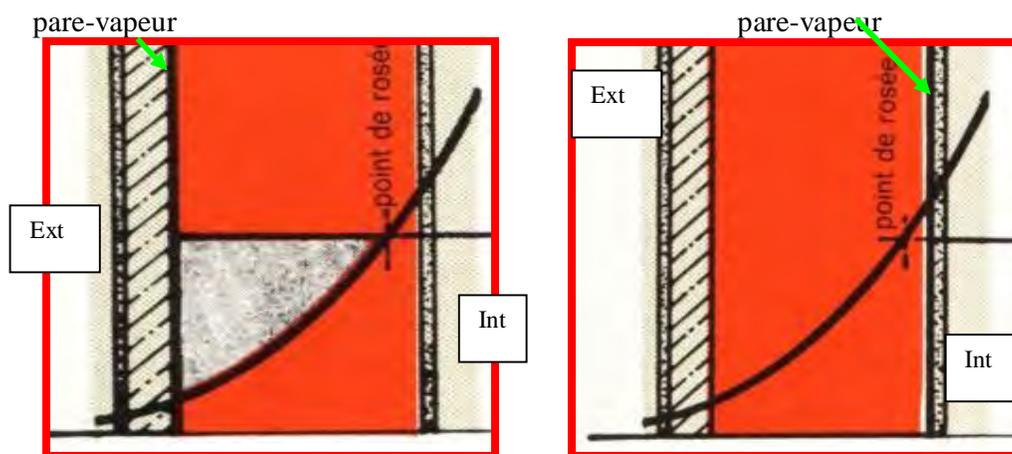


Fig. 7-1_a : position incorrecte de l'écran pare-vapeur

Fig : 7-1_b : position correcte de l'écran pare-vapeur

Source : Ernest Neufert, 1971

b) résistance thermique

Les tests des parois extérieures de la maison traditionnelle étudiée ont révélé que le coefficient de transmission calorifique global « $k = \frac{1}{R}$ »¹, est assez élevé². Pour diminuer la valeur de ce dernier,

c'est-à-dire : réduire les échanges thermiques ou transferts de chaleur, entre les ambiances extérieures et intérieures. Il est utile d'améliorer la résistance thermique des parois, car, plus la résistance thermique du mur est grande et plus la densité du flux sera faible. Ceci est vérifié par

la relation suivante³ :

$$Q = \frac{t_i - t_e}{R}, \dots\dots\dots (1)$$

Où :

Q : Densité du flux, [w/m²]

R : résistance thermique globale de la paroi, [m² °C / W]

t_i:température intérieure, [°C]

t_e: température extérieure. [°C]

Le matériau isolant doit avoir une conductivité thermique « λ » faible de telle manière à assurer une bonne isolation thermique et éviter au même temps⁴ :

- a) la condensation d'eau sur la surface interne des éléments de construction (entraînant la formation de moisissures, des traînées sombres et des locaux insalubres),
- b) la condensation d'eau dans l'élément de construction (entraînant l'humidification et la destruction de la construction)
- c) les contraintes thermiques, (provoquant la formation des fissures)
- d) les désordres résultant du froid (gel de canalisation, bistrage de cheminées, etc.),
- e) des déperditions thermiques importantes (entraînant des dépenses élevées pour l'installation de chauffage et le combustible).

c) résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

La transmission calorifique entre deux corps humides à températures différentes peut être augmentée par rapport à celle obtenue entre des corps secs ; quand de l'eau s'évapore sur le corps chaud, la vapeur d'eau formée diffuse vers le corps froid et s'y condense. La vapeur transporte ainsi de la chaleur latente du corps chaud vers le corps froid⁵. À ce cheminement appelé « diffusion », les couches de l'élément de construction opposent leur « résistance à la diffusion ». La quantité de vapeur pouvant diffuser à travers l'élément de construction est d'autant plus faible que cette résistance est plus élevée.

Les tests de condensations interstitielles de la maison étudiée ont prouvé l'existence de ce type d'humidité, à cause d'une mauvaise résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (chap.7).

L'outil de simulation utilisé dans le cas de cette recherche, permet de traiter ce phénomène de diffusion. Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux constituant les différentes couches des murs sont choisies selon leurs coefficients à la perméabilité « π » les plus faibles

¹ Ministère de l'habitat, CNERIB, Réglementation thermique des bâtiments d'habitation, Règles de calcul des *déperditions calorifiques*, Fascicule1 et 2. PAO-CNERIB, Alger, 1998.

² Voir : chapitre.7 : investigation, §. 6-11. pp.175-178

³ Rougeron Claude, *l'isolation acoustique et thermique dans le bâtiment*, Eyrolles, paris, 1971, pp227

⁴ DTU 27.2, « *Réalisation de revêtements par projection de produits pâteux* » éd. Du CSTB, Paris, 1997.

⁵ Delcelier. P : *Transfert de vapeur*, Cahier du CSTB N°2322, Paris, 1989.

possible. Le gradient de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur se répartit entre les diverses couches proportionnellement à leur contribution à la résistance totale à la diffusion « $\sum m.e$ » de l'élément de construction, de la même façon que pour le gradient de la température.

Ce gradient doit être tel que la pression probable (partielle) de vapeur ne doit en aucun point atteindre la pression de vapeur saturée. Il est toutefois nécessaire de déterminer et de comparer la pression de vapeur maximale possible et la pression de vapeur probable (partielle).

d) La ventilation

L'échange d'air fréquent entre le volume de la pièce testée et l'extérieur est assuré par la réalisation d'une cheminée à tirage thermique. L'écoulement du flux d'air est conditionné par la hauteur du conduit, les différences de charges et le gradient de températures entre l'intérieur et l'extérieur. La texture et la forme des surfaces internes des parois du conduit jouent un rôle très important dans la performance de ce procédé, car elles influent directement sur les pertes de charges lors des déplacements des masses d'air. Une attention particulière ainsi que des compromis peuvent être proposés afin d'arriver à déterminer une section convenable de la cheminée. Cette technique de renouvellement de l'air, permet à la fois de réduire le taux de l'humidité relative de l'air ambiant et de prévenir la condensation superficielle de la vapeur d'eau¹.

e) La couche absorbante.

Dans le cas de cette étude, où les mesures ont montré que le taux d'humidité de l'air à l'intérieure de la pièce testée est très important (chap.7), la disposition de la couche absorbante est d'une nécessité capitale. Et ce, pour deux raisons : d'une part le risque d'une condensation superficielle « visible » est inévitable, et d'autres parts, l'interposition d'un pare-vapeur intérieur l'exige pour des raisons constructives. Donc, pour éviter une condensation d'eau qui s'égoutterai par la suite, il faut prévoir sur la face chaude, une couche absorbante, qui absorbe l'eau condensée et permet son évaporation ultérieur, grâce à une ventilation naturelle². Ce programme de simulation permet au chercheur de choisir parmi les matériaux, ceux caractérisés par une importante capacité d'absorption d'eau.

7.3 Méthodologie de simulation

L'objectif de la simulation est d'évaluer quantitativement les potentialités thermiques et hygrométriques d'une maison traditionnelle dans la médina de Constantine à climat semi aride (mais caractérisé par un hiver froid et humide). Pour ce faire l'utilisation d'un programme informatique offre la possibilité de varier autant que nous voulons, les paramètres climatiques et les propriétés thermo physiques des matériaux dans un délais très court. C'est une méthode très avantageuse par rapport aux autres méthodes expérimentales.

La création d'un espace « virtuel » donne plus de liberté à l'investigation et le contrôle des effets combinés, à la fois les éléments physiques et les conditions climatiques, où il est indispensable de maîtriser les potentialités du programme.

¹ COHAS Michel, *ventilation et qualité de l'air dans l'habitat*, édition parisiennes, paris 1996.pp.94-96.

² DANIEL.B ; CHAMPETIER. J-P ; VIDAL. T, *Anatomie de l'enveloppe des bâtiments*, le Moniteur, Paris, 1997

L'objectivité des résultats est tributaire de plusieurs facteurs dont, les dimension, les propriétés thermo physiques des matériaux, les données climatiques du lieu étudié, l'orientation,..., bref, une modélisation exacte de la construction.

L'utilisateur de ce programme doit s'assurer que les tests effectués devront prendre en charge simultanément, l'interaction des phénomènes thermiques, dans le but d'arriver à des résultats qui se rapprochent du réel.

7.4 Méthode mathématique de calcul

7.4.1 Test de condensation superficielle

- Détermination du coefficient de transmission calorifique « K » de la paroi testée

$$K = \frac{1}{1/\alpha_i + 1/\alpha_e + \sum R} \quad [\text{w/m}^2 \cdot \text{°C}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

Avec :

Ø α_i : coefficient d'échange superficiel intérieur [w/m2. °c]

Ø α_e : coefficient d'échange superficiel extérieur [w/m2. °c],

Ø R : résistance du matériau composant la paroi [m2. °c/w],

- Détermination de la température surfacique « T_{pi} » de la face interne de la paroi

$$T_{pi} = t_i - (K / \alpha_i) (t_i - t_e) \quad [°C] \quad \dots\dots\dots(3)$$

Avec,

- t_i : température de l'air intérieur [°C]

- t_e : température de l'air extérieur [°C]

- α_i : coefficient d'échange superficiel intérieur [w/m2. °c]

- Détermination de la température de rosée [T_r]

Cette température est obtenue à l'aide du diagramme de Mollier (Fig.6-73), selon les données de l'ambiance thermique et hygrométrique de l'air intérieure de la pièce testée, à savoir :

- t_i : température de l'air intérieur en [°C]

- ϕ_i : humidité relative de l'air intérieur en [%]

D'où T_r : température de rosée en [°C]

- Comparaison entre la température de rosée et la température surfacique

- Si, $T_{pi} < T_r$, par conséquent, il y a risque de condensation superficielle

- Si, $T_{pi} > T_r$, par conséquent, il n'y a pas de risque de condensation superficielle

7.4.2 Test de condensation dans la masse (méthode de Glaser)

§ Détermination de la température de chaque couche composant la paroi

$$T_{pn} = T_{pn-1} - K (t_i - t_e) R_n \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \dots\dots\dots (4)$$

Où:

- T_{pn} : Température de la couche considérée (n), en [$^{\circ}\text{C}$],
- T_{pn-1} : Température de la couche antérieure (n-1), en [$^{\circ}\text{C}$],
- K : coefficient de déperdition calorifique, en [$\text{w}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$]
- R_n : résistance thermique de la couche considérée, en [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{w}$].
- t_i : température de l'air intérieur en [$^{\circ}\text{C}$]
- t_e : température de l'air extérieur en [$^{\circ}\text{C}$]

§ Détermination des pressions de saturation de chaque couche composant la paroi

Le diagramme de l'air humide (fig.6-73), permet de déterminer les pressions de saturation de chaque couche constituant la paroi en fonction de la température correspondante.

Pour une température donnée : T_{pn} (correspond) \Rightarrow P_s (pression de saturation correspondante)

§ Détermination des pressions partielles de chaque couche composant la paroi

$$P_{pn} = P_{pn-1} - [(P_{pi} - P_{pe}) / \sum e/\mu] \cdot e_n / \mu_n \quad [\text{mmHg}] \dots\dots\dots (5)$$

Avec,
$$P_{pi} = \frac{P_{si} j_i}{100} \quad \text{et} \quad P_{pe} = \frac{P_{se} j_e}{100} \dots\dots\dots (6)$$

Où,

- P_{pn} : pression partielle de la couche considérée (n), en [mmHg],
- P_{pn-1} : pression partielle de la couche antérieure (n-1), en [mmHg],
- P_{pi} : pression partielle intérieure en [mmHg],
- P_{pe} : pression partielle extérieure en [mmHg],
- P_{si} : pression saturante intérieure en [mmHg],
- P_{se} : pression saturante extérieure en [mmHg],
- j_i : humidité relative de l'air intérieur en [%],
- j_e : humidité relative de l'air extérieur en [%],
- e : épaisseur du matériau de la couche « n », en [m]
- μ : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de la couche « n ». [$\text{g}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$],
- e_n/μ_n : résistance à la perméabilité de la vapeur d'eau de la couche « n », en [$\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}/\text{g}$]

§ Comparaison entre les variations des pressions de saturations et celles des pressions partielles

La méthode de détermination du risque de la condensation d'eau dans la masse nécessite la représentation graphique des deux courbes des pressions de vapeur saturantes et celle des pressions de vapeur partielles afin de les comparer (fig. .7-3), pour cela, il est utile de :

- représenter l'élément de construction à l'échelle de sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (en abscisse),
- sur l'axe des ordonnées: représenter, les valeurs de pressions et les résistances à la diffusion de la vapeur d'eau en abscisse, l'outil trace les deux courbes des pressions suscitées afin de comparer leurs progressions.

Il y a risque de condensation dans la masse, là où la courbe de pression partielle de vapeur d'eau croise, puis, surpasse la courbe de vapeur saturée (fig.7-3).

7.5 Paramètres de calcul

Pour évaluer l'effet des combinaisons simultanées des paramètres génériques, sur le comportement hygrométrique de la maison étudiée. Les tests ont été effectués sur la base de plusieurs hypothèses, où à chaque cas, nous procédons à la variation des paramètres de calcul, à savoir :

- Ø Paramètres géométriques de la pièce testée : longueurs, largeur, hauteur, épaisseurs des parois, etc...
- Ø Paramètres ou propriétés thermo-physiques des matériaux : conductivité thermiques, perméabilité à la vapeur d'eau, masse volumique, poids spécifique...
- Ø Paramètres relatifs au calcul convectif : coefficient de transfert de chaleur superficiel au niveau des parois,
- Ø Paramètres relatifs au calcul de transfert de chaleur : coefficient de transmission calorifique.
- Ø Paramètres climatiques :
 - température extérieure,
 - humidité relative extérieure,
 - température intérieure,
 - humidité relative intérieure,
 - pressions saturantes et partielles de la vapeur d'eau

Les données climatiques sont indispensables pour l'analyse thermique et hygrométrique par simulation, en permettant l'évaluation du comportement thermo-hygrométrique de la maison testée pendant toutes les périodes de l'année.

Vu que le phénomène de l'humidité n'apparaît qu'en période hivernal dans notre cas d'études, et pour des raison d'objectivité, la simulation est faite uniquement pour une journée du mois de janvier 2005, la plus défavorable : froide et très humide.

À titre de comparaison et de vérification, nous avons procédé aussi à des simulations avec des températures extérieures de base de la ville de Constantine¹.

Dans les conditions climatiques spécifiques à la région d'étude, la stratégie de l'inertie thermique occupe une place importante dans l'analyse bioclimatique de la ville de Constantine. Les approches passives se basent énormément sur cet aspect qui touche directement, les couches de matériaux qui constituent les parois. À cet effet, l'influence de l'épaisseur des isolants thermiques est très importante pour augmenter la capacité calorifique et au même temps prévenir de la condensation superficielle. D'où la nécessité de faire varier la conductivité thermique des matériaux (λ).

La lutte contre la condensation dans la masse nécessite aussi l'interposition de couches étanches, pour cela, il est utile de faire des simulations en faisant varier le coefficient de perméabilité des matériaux (π).

¹. Ministère de l'habitat, *réglementation thermique des bâtiment d'habitation*, (D.T.R. C 3-2), Alger, 1998,p18

7.6 Interprétation des résultats de simulation

7.6.1 Tests de condensations effectués sur le mur nord (après modification ou amélioration)

Au regard des tests de condensations appliqués au mur nord, donnant sur le patio, (fig. 7-2), nous constatons que la condensation superficielle peut être éliminée en ajoutant des couches de matériaux isolants, ayant de faibles conductivités thermiques « λ », et un grand pouvoir d'absorption de la vapeur d'eau, ce qui induit la réduction du coefficient surfacique de transmission calorifique « K » jusqu'à 40 % de sa valeur initiale (tab.7-1).

Cette amélioration dans la résistance thermique permet d'augmenter sensiblement la température surfacique du mur nord de l'ordre de : 0,64°C ; malgré que cette élévation est faible, elle est pourtant assez suffisante pour être supérieure à la valeur de la température de rosée correspondante à l'état hygrométrique mesuré à l'intérieure de la chambre Testée ($T_i = 13\text{ °C}$; HR = 95 %), soit $T_r = 11,99\text{ °C}$, et par conséquent le résultat est positif, c'est-à-dire que le phénomène de la condensation superficielle est éradiqué.

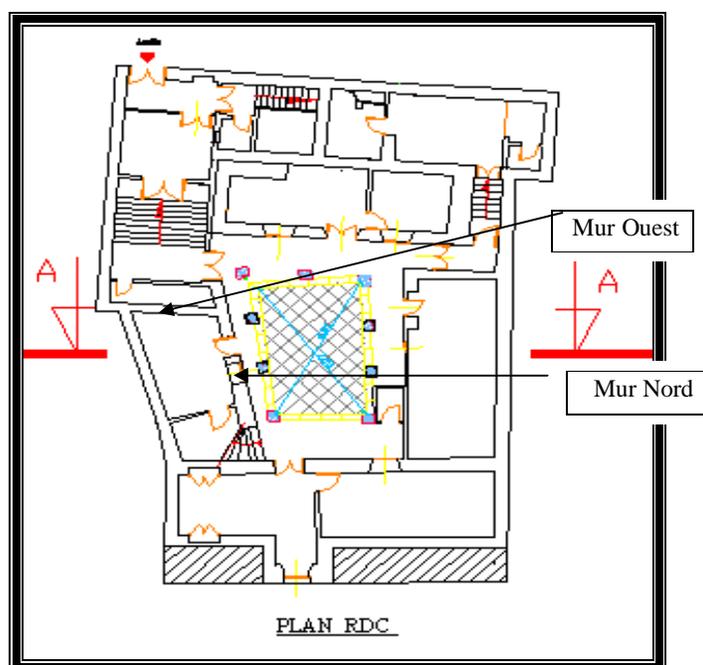


Fig. 7-2 : plan R.D.C, maison testée. Source : auteur, 2005

Par ailleurs cette amélioration de la résistance thermique par l'addition de couches absorbantes et isolantes ne résout pas le problème de la condensation dans la masse. On remarque que les différents scénarios illustrés sur les figures (7-3 ; 4 ; 5 ; 6), montrent que le risque de la condensation interstitielle est d'autant plus grave et plus important que le matériau ajouté est plus absorbant et ayant une résistance à la perméabilité plus faible. Ceci nous a conduit à essayer d'utiliser une couche étanche (imperméable), le résultat était très satisfaisant, surtout avec un pare-vapeur en aluminium de 0,040mm ayant une résistance à la diffusion de vapeur d'eau égale à 1000 [m².h.mmHg/g]. Ce pare-vapeur placé du côté intérieur de la paroi, sur la face cachée de la première couche absorbante a donné immédiatement un très bon résultat, et le risque de condensation interstitielle est absolument épargné (fig.7-7 ; 8 & 9). Ces résultats rejoignent ceux de : DANIEL.B ; CHAMPETIER. J-P ; VIDAL. T (1997) ; Collombet. R (1985) ; C.S.T.B (2005) ...etc.

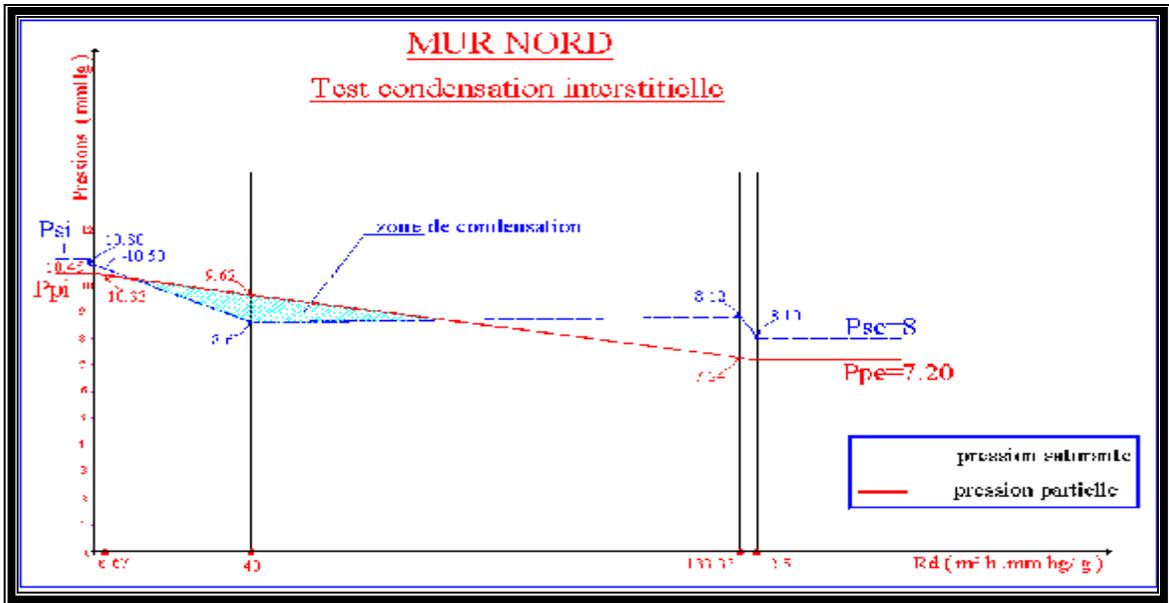


Fig.7-3 : test de condensation après ajout brique 8cm, polystyrène : 10cm. Résultat : apparition de condensation
Source : auteur, 2005

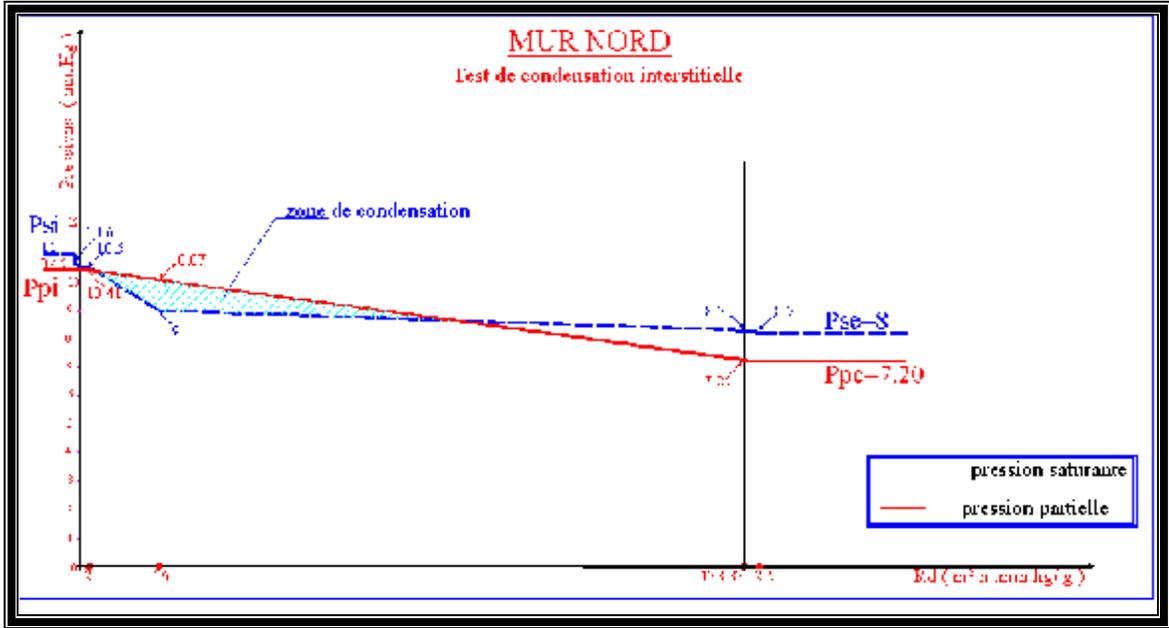


Fig.7-4 : test de condensation après ajout placoplâtre 2cm, polystyrène : 4 cm. Résultat : apparition de condensation
Source : auteur, 2005

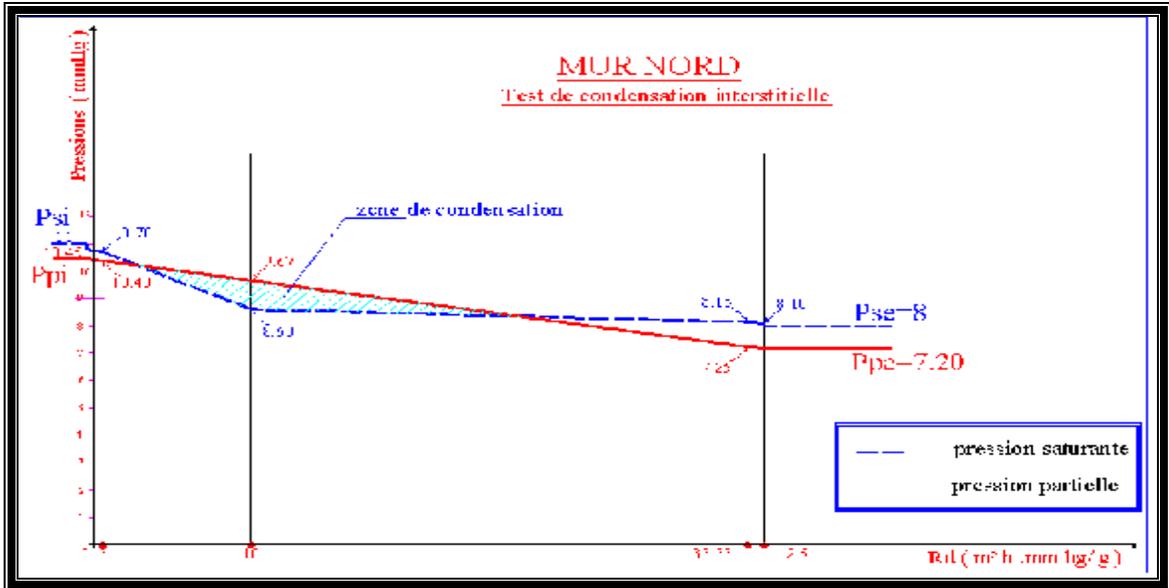


Fig.7-5 : test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, polystyrène : 10cm. Résultat : apparition de condensation
Source : auteur, 2005

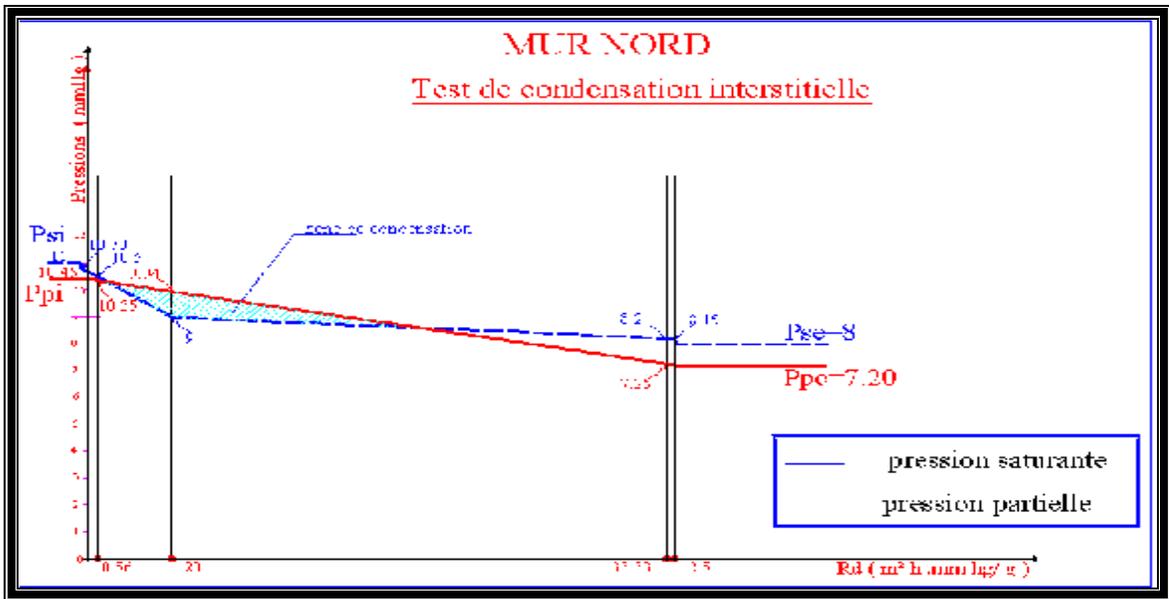


Fig.7-6 : test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, polystyrène : 5cm. Résultat : apparition de condensation
Source : auteur, 2005

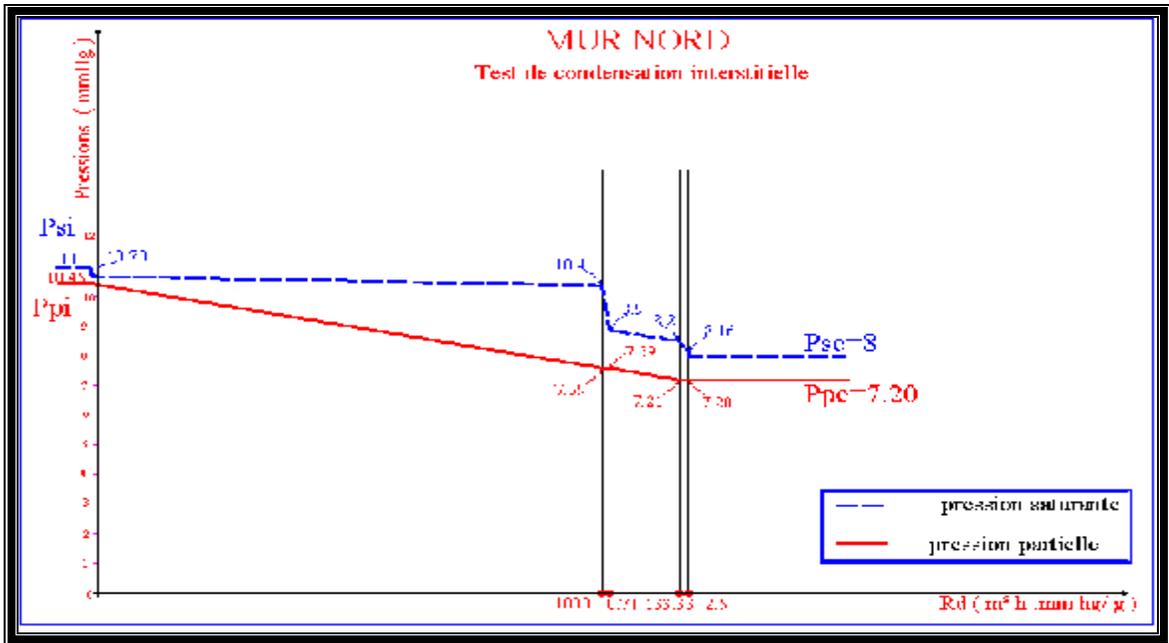


Fig.7-7 : test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, laine minérale :5cm
 Résultat : Pas de risque de condensation. Source : auteur, 2005

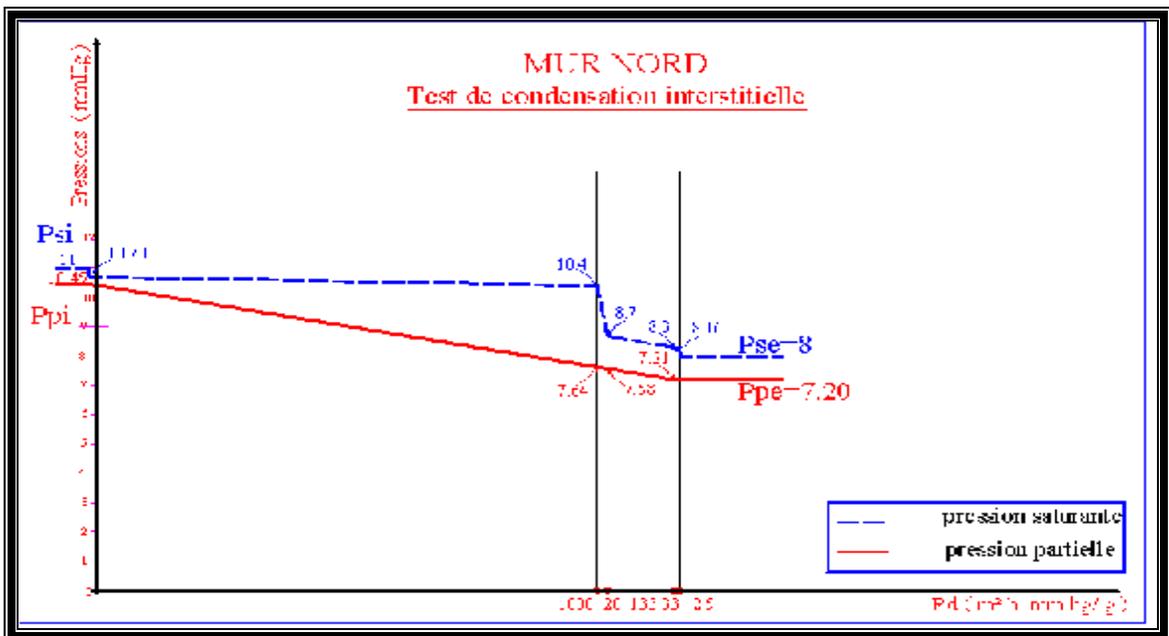


Fig.7-8 : test de condensation après ajout : placoplâtre 5cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 5cm
 Résultat : Pas de risque de condensation. Source : auteur, 2005

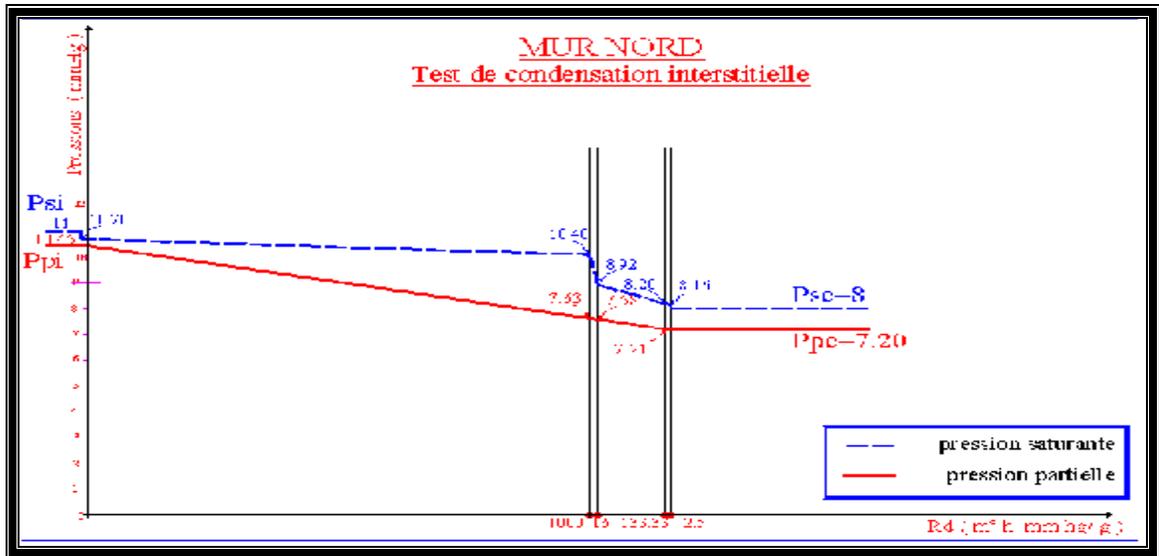


Fig.7-9 : test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 4cm
 Résultat : Pas de risque de condensation. Source : auteur, 2005

Les figures (7.10a & 7-10b), montrent que si les conditions climatiques en hiver passent aux extrêmes, c'est-à-dire que la température extérieure diminue jusqu'à atteindre la valeur de base¹: +1°C, la condensation interstitielle, non seulement elle persiste, mais devient beaucoup plus importante et menace d'une façon très dangereuse la stabilité de la paroi, surtout en cas de gel.

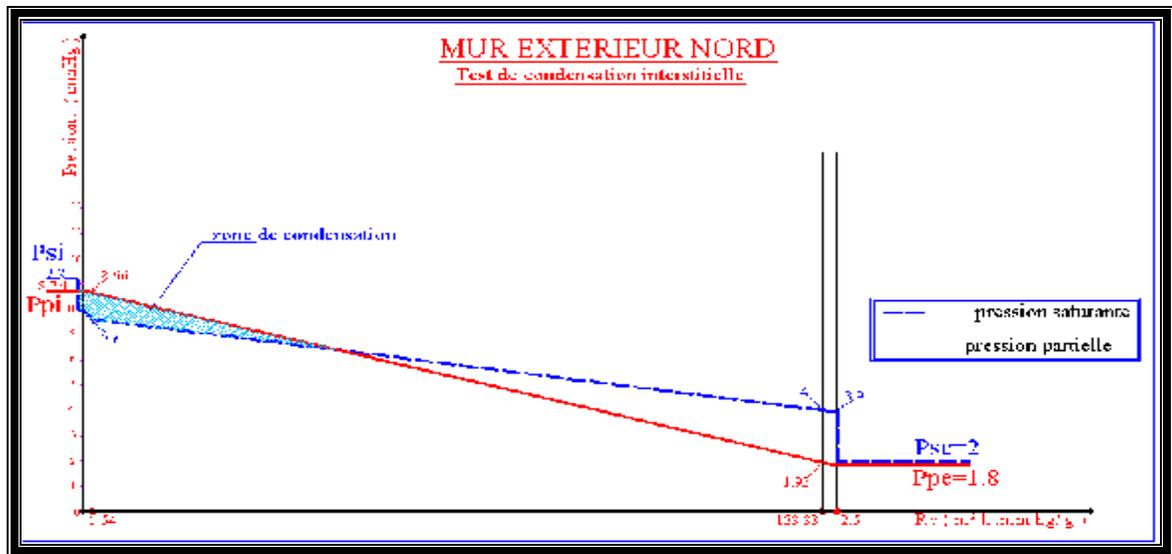


Fig.7-10a : test de condensation interstitielle du mur nord, avant correction (t.base ext=+1°C et ti=10°C).
 Résultat : Apparition du phénomène de Condensation. Source : auteur, 2005

¹. Ministère de l'habitat, CNERIB, Réglementation thermique des bâtiments d'habitation, Règles de calcul des déperditions calorifiques, Fascicule1. PAO-CNERIB, Alger, 1998.

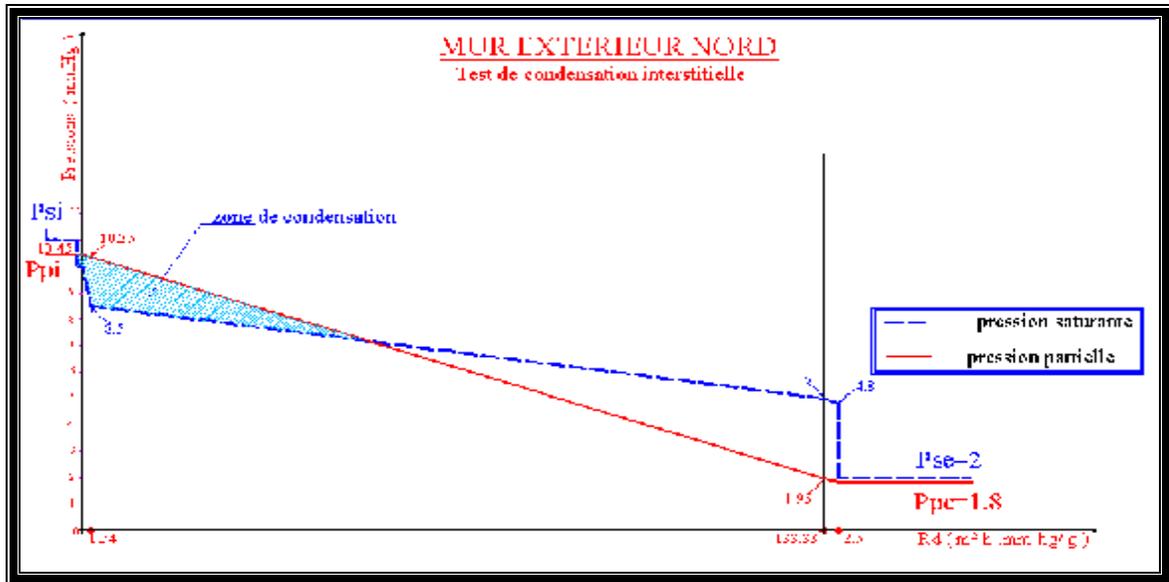


Fig.7-10b: test de condensation interstitielle du mur nord, avant correction (temp.base ext =+1°C et ti=13°C).
 Résultat : Apparition du phénomène de Condensation. Source : auteur, 2005.

7.6.2 Tests de condensations effectués sur le mur ouest (après correction)

Vu que le mur ouest ne donne pas sur l'extérieur, il sépare seulement, la chambre testée de la salle d'eau humide et froide (fig7-2). Vu que la différence de température (Δt) est faible et ne dépasse guère 3°C (tab.7-6). Il arrive que la condensation superficielle, puisse être éliminé en améliorant uniquement la résistance thermique par l'addition d'une couche de matériau absorbante et un isolant thermique, même s'ils sont de faibles épaisseurs (tab.7-7). Ainsi, nous constatons que, la température surfacique, sur la face interne, du mur ouest du côté de la chambre testée (tab.7-6), s'élève et sa valeur dépasse la température de rosée correspondante à l'état hygrométrique de la pièce testée.

Parois	ti	te	Δt	K	1/hi	t _{pi}	t _r	comparaison	conclusion
Mur ouest	13	10	3	0,65	0,11	12,78	12,5	t _{pi} > t _r	Pas de Condensation

Tab.7-6 : détermination de la température surfacique en °C, et comparaison avec la température de rosée
 Source : Auteur, 2005.

Parois	Couche	Epaisseur (m ²)	Conductivité (W/m.°C)	Résistance (m ² .°C/W)	$\sum R$	1/hi+1/he	1/K (m ² .°c/w)	K (w/m ² .°c)
Mur ouest	placoplâtre	0,02	0,6	0,03				
	polystyrène expansés	0,04	0,042	0,95				
	Pierre calcaire	0,6	2	0,30				
	enduit chaux	0,02	0,87	0,02				
					1,31	0,22	1,53	0,65

Tab.7-7. détermination du coefficient « K », après amélioration de la résistance thermique. Source : auteur

Contrairement au mur nord, les tests de condensation dans la masse effectués sur le mur ouest, après avoir amélioré sa résistance thermique, simplement, par addition de couches d'isolants thermiques, ont révélé qu'il est possible d'éviter le risque de condensation interstitielle. Ce résultat est obtenu sans le recours à l'utilisation d'un pare-vapeur (fig.7-13), à condition que les épaisseurs des isolants soient épais (suffisants), sinon nous ne parviendrons pas à éliminer la condensation dans la masse (fig. 7-11 et 7-12).

Finalement, on peut déduire que le risque de la condensation est d'autant plus important et plus grave si la différence de température entre l'ambiance thermique intérieure et extérieure est plus importante. Ce qui nécessite parfois le recours à la mise en œuvre d'un pare-vapeur pour éviter la condensation dans la masse (fig.7-14 & 7-15). Ces résultats rejoignent, entre autres, ceux de LATTI J.K et BEACH R.K (site Web, 2005) et Giovanni M (1971).

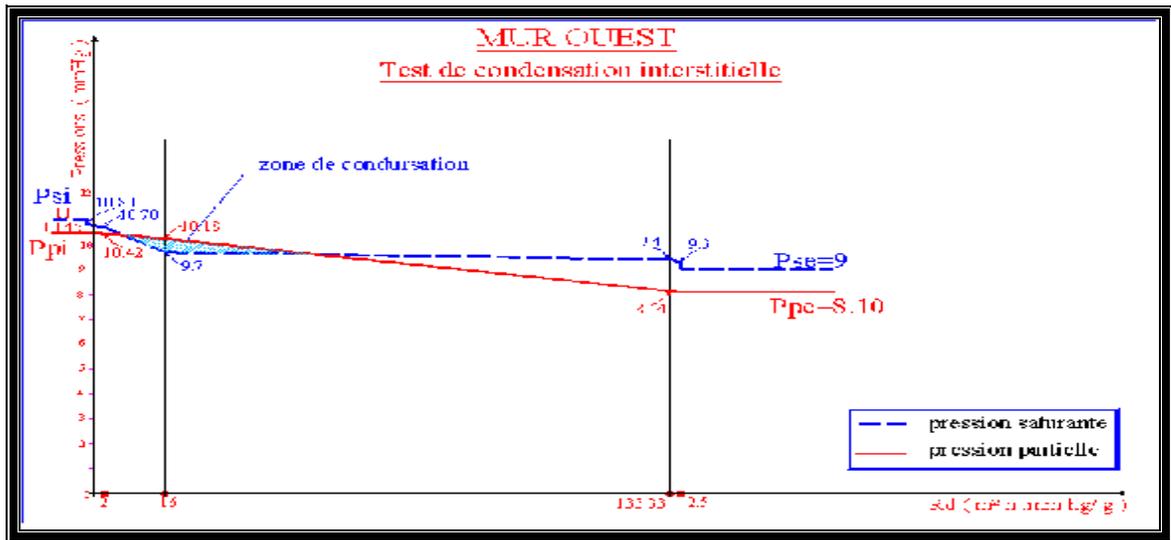


Fig.7-11 : test de condensation après ajout placoplâtre 2cm, polystyrène: 4cm.

Résultat : apparition de condensation. **Source** : auteur, 2005

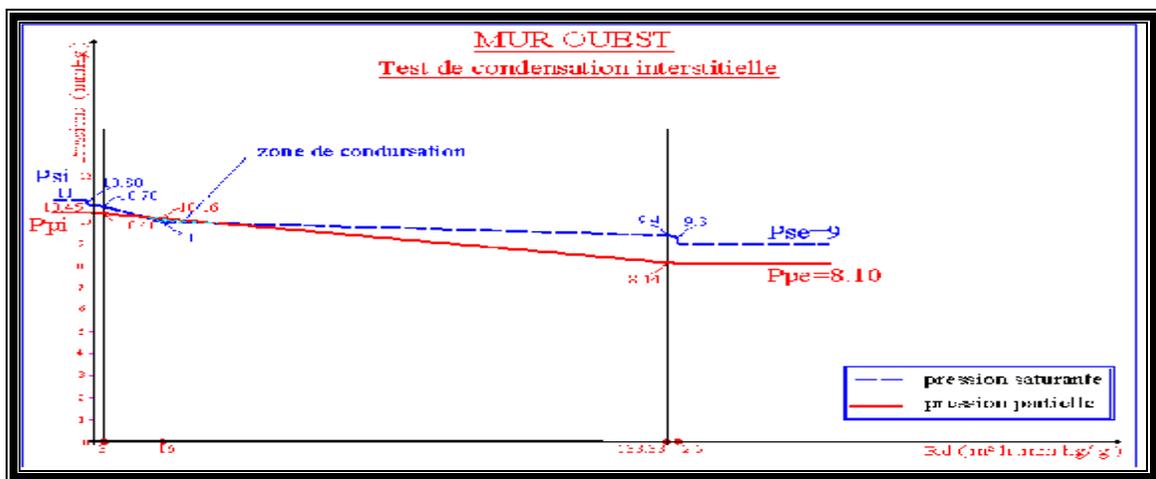


Fig.7-12 : test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, polystyrène : 4cm.

Résultat : apparition de condensation. **Source** : auteur, 2005

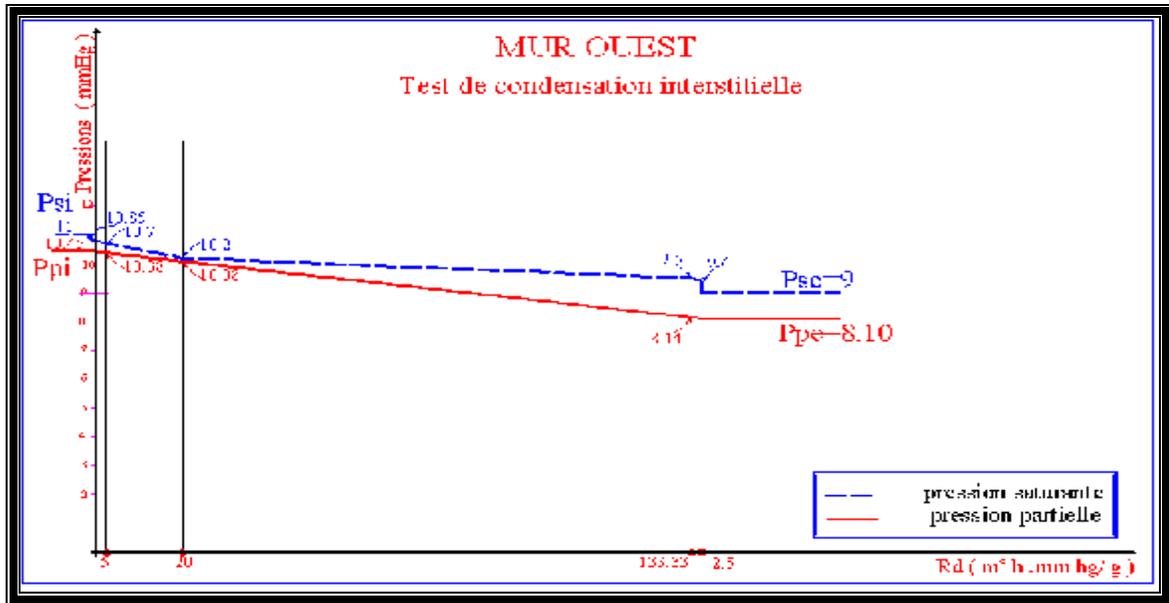


Fig.7-13 : test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, polystyrène : 5cm. Sans pare-vapeur.
Résultat : Pas de risque de condensation. **Source** : auteur, 2005

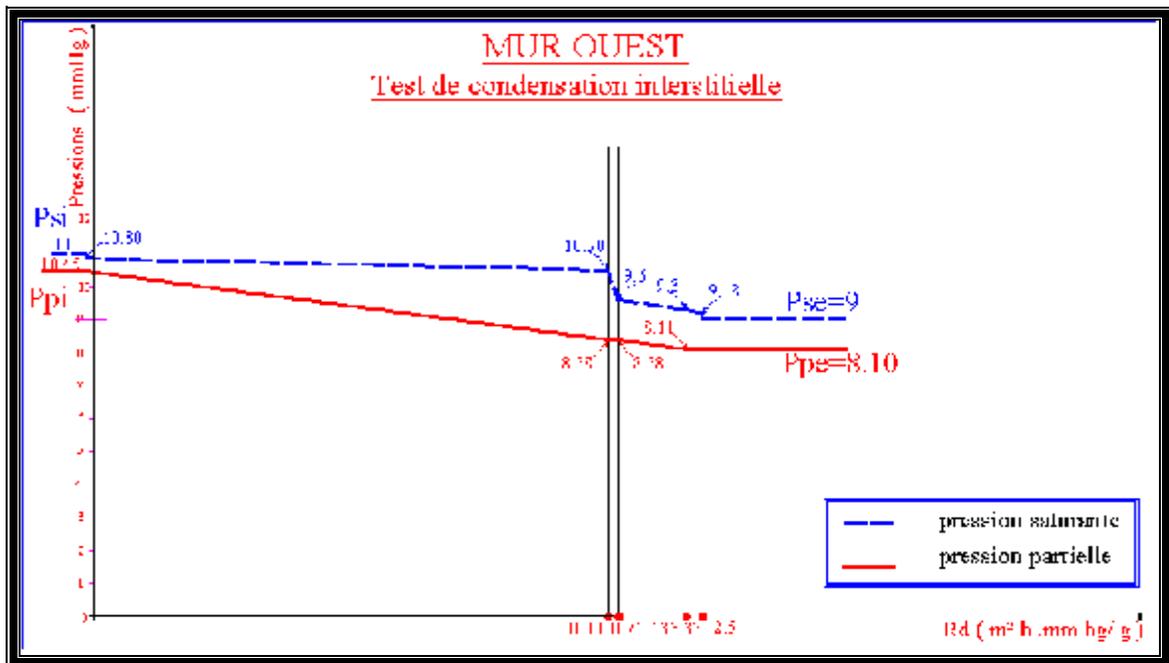


Fig.7-14 : test de condensation après ajout placoplâtre 5cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, laine minérale 5cm.
Résultat : Pas de risque de condensation. **Source** : auteur, 2005.

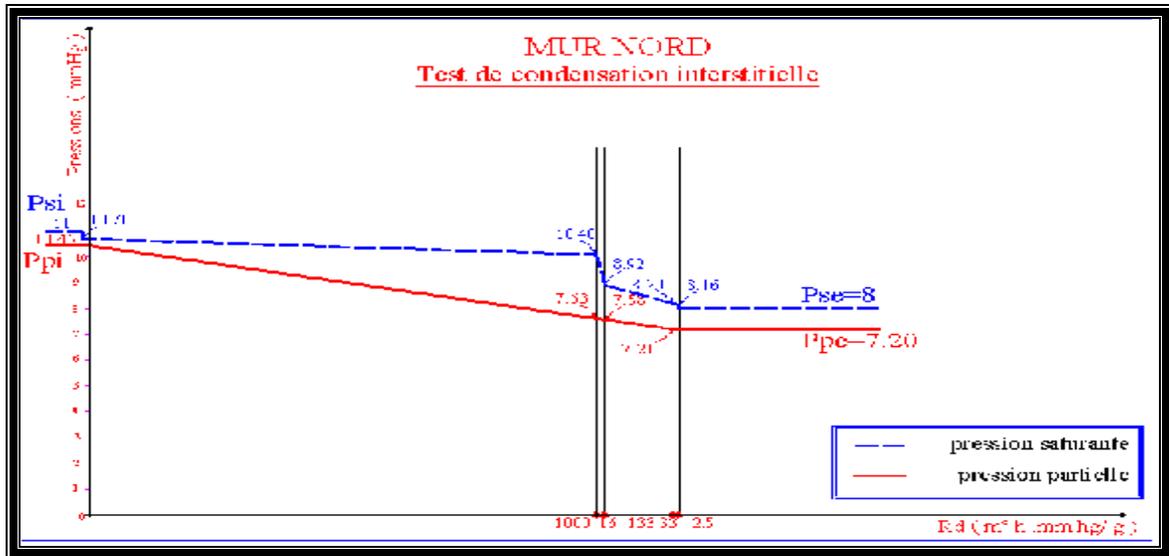


Fig. 7-15 : test de condensation après ajout placoplâtre 3cm, pare-vapeur en aluminium 0,04, polystyrène : 4cm
Résultat : Pas de risque de condensation. **Source** : auteur, 2005

7.7 Diminution du taux hygrométrique de l'air

7.7.1 Renouvellement de l'air humide et vicié

Si, nous sommes parvenus à éliminer le risque de la condensation sur les murs par de simples procédés techniques et qui consistent à mettre en œuvre des couches additionnelles de matériaux ou isolants bien sélectionnés, en fonction de leurs caractéristiques thermo-physiques, selon quelques scénarios évoqués en haut (§.7.6.1) ; il reste maintenant à évacuer l'air intérieur chargé d'humidité et de gaz (CO_2). En d'autres termes renouveler l'air pollué ambiant (intérieur) par de l'air frais, ayant un taux hygrométrique moindre, venant de l'extérieur. Car la chambre testée ne dispose pas d'ouvertures opposées qui permettent une ventilation transversale efficace et qu'il n'y a pas de possibilités d'en créer à cause de la mitoyenneté (fig.6-3).

Pour cela, nous avons pensé à utiliser un procédé passif : simple, économique, non contraignant, efficace, et surtout, facile à intégrer dans ce genre d'habitation (vernaculaire), située à l'intérieur du périmètre du secteur à sauvegarder.

La solution envisagée porte essentiellement sur l'installation d'une cheminée de ventilation à tirage thermique. Ce choix est basé principalement sur certains critères à savoir :

- économie dans l'espace (petites dimensions),
- facilement réalisable avec des matériaux locaux (maçonnerie en brique pleine),
- fonctionnement maîtrisable et assuré pendant les deux rudes saisons : l'hiver et l'été, dû notamment à la différence de température entre l'extérieure et l'intérieur. Ce phénomène peut s'accélérer à condition que le vent souffle avec une vitesse appropriée. Si, l'air renouvelé de la pièce passe de la partie basse de la cheminée pour monter vers le haut de la gaine, lors de l'hiver, il prendra le cheminement inverse en été : l'air frais sera capté en hauteur pour être véhiculé vers la chambre en descendant vers le bas. Dans les deux cas, on obtiendra un renouvellement d'air frais.
- La forme et les dimensions de cette cheminée s'intègre parfaitement avec la silhouette et l'aspect extérieur général de la médina. (sachant que sa hauteur ne dépasse que de un (01) mètre, le point le plus haut de la construction).

Il est nécessaire maintenant de dimensionner cette cheminée de ventilation à tirage thermique et de vérifier sa faisabilité et surtout son fonctionnement pendant l'hiver pour chasser l'air humide, confiné et vicié.

7.7.2 Dimensionnement de la cheminée de ventilation à tirage thermique

Comme, nous avons vu dans le chapitre ventilation (p123-162), la hauteur de la cheminée doit être la plus grande possible. Elle ne peut être, en aucun cas, inférieure¹ à 7 m. Par hauteur de la cheminée, on entend la différence effective de niveau entre la prise d'air au sol et la bouche de sortie de la cheminée.

Les données de départ sont les deux suivantes :

1. **la pression**, qui dépend de la hauteur maximale de la cheminée et de la différence moyenne de température entre l'intérieur et l'extérieur, enregistrée dans la localité.
2. **le débit**, qui dépend du volume d'air à renouveler et du nombre de renouvellements que l'on désire effectuer en une heure : un ou deux, habituellement².

Pour évacuer l'air humide emprisonné au niveau de la chambre testée, nous allons donc, essayer de construire une cheminée de ventilation. La hauteur de cette dernière ne peut être élevée à plus de 13 m pour le cas de cette étude, en raison des difficultés architecturales.

La charge disponible, c'est-à-dire la pression ou la dépression créée par la cheminée de 13 m, est calculée sur la base d'une différence moyenne de température entre l'extérieur et l'intérieur, évaluée en hiver à 8° C seulement³, et d'une absence totale de vent (cas le plus défavorable).

Cherchons d'abord, la masse volumique de l'air humide⁴ des ambiances thermiques intérieures et extérieures :

	Température (°C)	Humidité relative (%)	Masse volumique (Kg/m ³)
Air extérieur froid (mesuré au-dessus du toit de la maison)	5	90	1,265
Air intérieur tiède (mesuré à l'intérieur de la pièce)	13	95	1,227

Tab.7-8 : détermination de la masse volumique de l'air humide.

Source : auteur & <http://www.Thermexcel.Com>. 2005

À partir des données de ce tableau (7-8), on peut déduire que la différence de poids utilisable est de : 0,038 kg. Cette différence de poids provoque, en hiver, un mouvement ascensionnel de l'air avec tirage direct, alors qu'au cœur de l'été une différence de poids analogue, mais inverse, provoque un mouvement en sens inverse : l'air entre par la tête de cheminée et sort par la grille installée au sol.

¹ . Massari G, Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements, Eyrolles, Paris, 1971.

² . COHAS Michel, *ventilation et qualité de l'air dans l'habitat*, Édition parisiennes, Paris 1996.

³ . Les températures sont mesurées par l'auteur ; la différence moyenne de température entre l'extérieur et l'intérieur, est évaluée dans le cas le plus défavorable.

⁴ . [Enligné] <http://www.Thermexcel.Com/french/tables/massair.htm>

La charge utile pour une hauteur utile de cheminée de 13 m, si nous l'exprimons en colonne d'eau, prend la valeur :

$$H = 13 \times 0,038 = 0,50 \text{ mm d'eau} \dots\dots\dots (7)$$

Voilà la première des deux données de départ du calcul. La seconde, le débit, est calculée en fonction de deux (02) renouvellements du volume d'air par heure de la chambre. Comme le volume de la chambre, $V = 42 \text{ m}^3$, le débit sera donc de : $84 \text{ m}^3 / \text{h}$.

Ces deux données permettent, alors, de calculer la section de la cheminée.

La charge disponible pour assurer le mouvement de l'air dans le circuit doit être supérieure à la résistance au frottement que l'air rencontré tout le long de son parcours, ainsi qu'aux différentes résistances dues aux brusques changements de direction, aux étranglements, à la grille d'admission, etc. si l'on désigne par R la perte de charge par frottement et par Z la somme des autres pertes (particulières), on obtient :

$$H (=0,50 \text{ mm d'eau})^3 = Pf + Z.$$

Nous supposons sur la base de données expérimentales, que la charge disponible se répartie de manière à compenser¹ :

- Ø de 20 % les pertes dues au frottements; Pf
- Ø de 80 % les autres pertes (particulières) Z ;

Il apparaît, dès lors, que l'on peut compenser :

- Ø par une charge de : $0,50 \times 0,20 = 0,10$ mm d'eau, les pertes Pf ;
- Ø par une charge de : $0,50 \times 0,80 = 0,40$ mm d'eau, les pertes Z ;

Voyons comment utiliser la charge de 0,40 mm d'eau pour compenser les pertes diverses et quelle peut être la vitesse de l'air dans la cheminée.

La formule :

$$Z = \sum r \frac{v^2}{2g} \cdot \rho, \dots\dots\dots (8)$$

Où $\sum r$, est la somme connue des coefficients dépendant des pertes particulières (0,5 pour la grille, 1 pour le coude de sortie, 1 pour le passage d'une pièce à l'autre, etc), qui correspond dans notre cas à $\sum r = 5,5$

- ρ est le poids spécifique moyen de l'air ;
- g , est la pesanteur,

$$\text{Soit, } \rho / 2g = 0,061$$

L'équation sera donc :

$$0,4 = 5,5 \cdot v^2 \cdot 0,061$$

d'où

$$V = 1,09 \text{ m/s}$$

¹. Massari G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Eyrolles. Paris, 1971.

Telle sera la vitesse présumée de l'air dans la cheminée.

Pareille vitesse, relativement basse, convient à ce type de conduite. Au cas où l'on désire deux (02) renouvellements d'air par heure, afin de bien évacuer l'air stagnant dans la chambre, dont le volume est de 42 m³, le débit de la conduite devrait être, par seconde, de : $\frac{42 \times 2}{3600} = 0,024 \text{ m}^3 / \text{s}$

Par conséquent, la section minimum devrait mesurer :

$$S = \frac{0,024}{1,09} = 0,022 \text{ m}^2$$

Voilà donc établies les dimensions de la cheminée, qui peuvent être : 0,15 x 0,15 m. Et comme on ne peut construire des cheminées dont la section est inférieure à 0,1 m² et dont les côtés ayants des dimensions inférieures à 0,30 m chacune, d'où l'on propose, une section de 0,30 x 0,35 m

Vérifions maintenant, la valeur de la vitesse de l'air correspondante à cette section :

$$V = \frac{0,024}{0,105} = 0,23 \text{ m/s}$$

Comme toutes les pertes par frottement, la résistance totale « Pf » correspond au produit de la longueur de la cheminée par la perte globale par mètre r_a, laquelle se calcule par la formule :

$$r_a = 13,22 (V \cdot 1,924 / d_m^{1,281}) \dots \dots \dots (9)$$

Où, d_m est le diamètre de la section :

$$d_m = \frac{2ab}{a+b} \text{ (mm), a et b étant le côté de la section) } \dots \dots \dots (10).$$

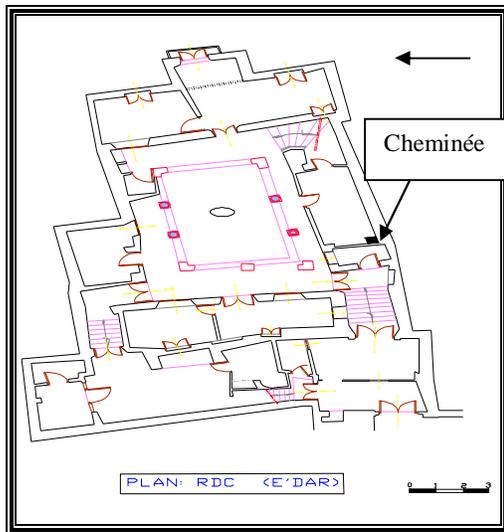
$$d_m = 327,07 \text{ mm}$$

$$r_a = 0,00047 \text{ mm/ml,}$$

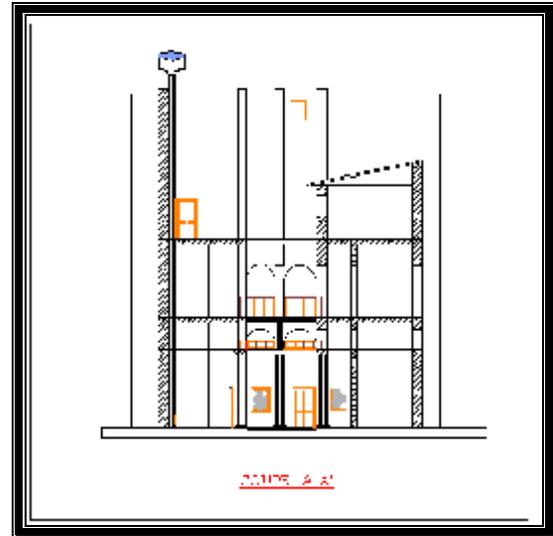
Qui, multipliée par la longueur de 13 m, longueur totale de la cheminée, a produit une perte totale de charge par frottement de :

$$R = r_a \cdot h = 0,00047 \cdot 13 = 0,006 \text{ mm d'eau. } \dots \dots \dots (11)$$

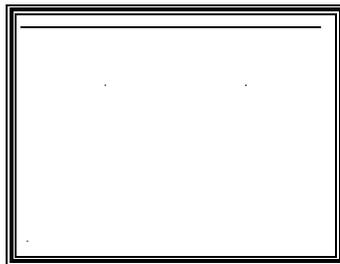
Cette perte était inférieure au 0,10 mm d'eau encore disponible pour le frottement et, par conséquent, la section de 0,30 x 0,35, choisie pour la cheminée, convenait non seulement par son débit, mais aussi en raison du frottement modéré qu'elle exerce sur l'air en mouvement. Ces résultats sont semblables à celles de Massari. M (1971), Cohas M (1996), Couasnet (1990), CSTB (2005).



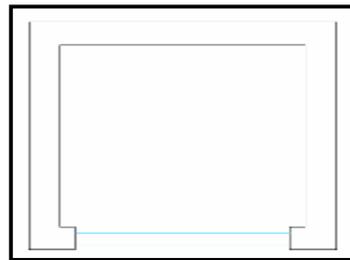
a) Emplacement de la cheminée de ventilation



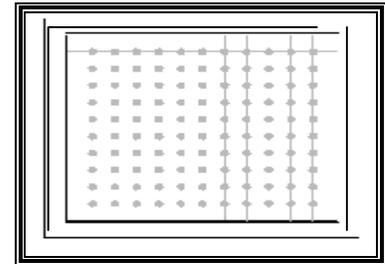
b) Coupe de la cheminée de ventilation



c) tête de la cheminée

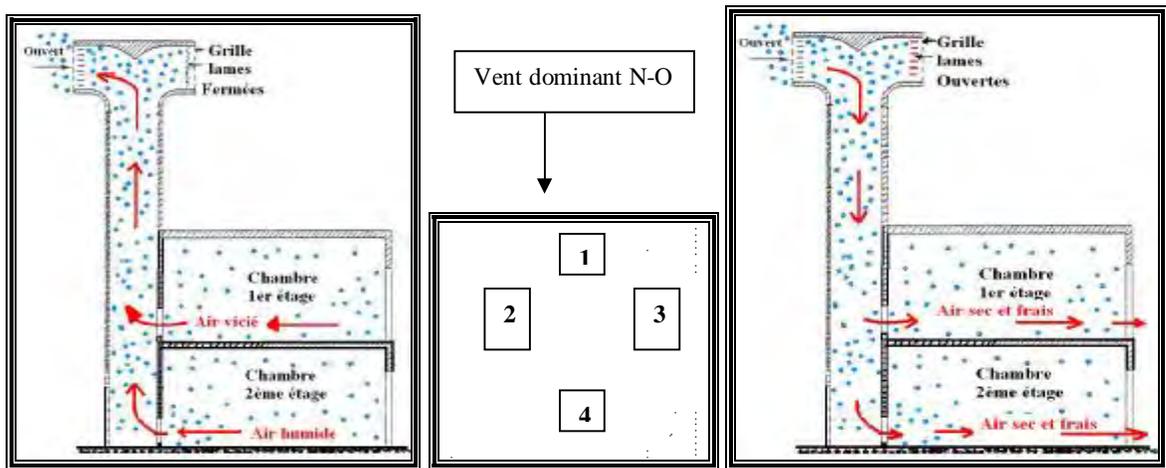


d) Vue en plan de la gaine de ventilation



e) grille d'entrée ou de sortie de l'air

Fig.7-16 : proposition d'une cheminée de ventilation, à tirage thermique. Source : auteur, 2005.



a) Schéma de fonctionnement en hiver b) Ouvertures: tête de la cheminée c) Schéma de fonctionnement en été

Fig.7-16 : Circulation d'air et position des ouvertures de la tête de la cheminée de ventilation à tirage thermique. En hiver : l'air est ascendant, de l'intérieur vers l'extérieur. Les ouvertures (1; 2 ;3) sont fermées. Seule l'ouverture N° 4 est ouverte. En été : l'air est descendant, de l'extérieur vers l'intérieur. Toutes les ouvertures sont ouvertes
Source : auteur, 2005

7. 8 Conclusion

La lutte contre l'humidité de condensation dans les maisons vernaculaires ne nécessite guère de grands moyens ni une technologie sophistiquée. L'assainissement des parois par des procédés très simple, peut se réaliser aisément par l'addition de couches de matériaux, sélectionnées selon leurs caractéristiques thermo-physiques :

- conductivité thermique « λ » ;
- résistance à la diffusion de la vapeur d'eau « e/π ».

Les résultats des simulations ont révélé qu'il existe une relation entre la condensation superficielle et l'insuffisance de la résistance thermique des murs. D'où la possibilité d'éviter le risque de condensation en renforçant ces derniers. Un isolant caractérisé par une très faible conductivité thermique, placé derrière une couche en matériau absorbant (plaque de plâtre par exemple) est un remède efficace contre ce type d'humidité.

Cette amélioration de la résistance thermique des parois influe directement sur la température surfacique de la face interne de la paroi modifiée. Nous constatons que cette température augmente pour atteindre une valeur supérieure à la température de rosée correspondante à l'état thermique et hygrométrique de l'air ambiant de la pièce testée.

Dans le cas de l'humidité de condensation interstitielle, si nous ne parviendrons pas à éliminer cette dernière par l'augmentation de la résistance thermique, l'interposition d'une feuille imperméable à la vapeur d'eau devient indispensable. Les tests appliqués aux murs envahis par ce type d'humidité, où il a été utilisé un pare-vapeur, ont prouvés leur efficacité : les résultats étaient très satisfaisants. et coïncident avec plusieurs recherches dont : Massari (1971), Couasnet (1990), Daniel.B ; Champetier. J-P ; Vidal. T (1997) et CSTB (2005).

Ses solutions sont valables uniquement, quand le diagnostic prouve l'absence de l'humidité ascensionnelle. Sinon, l'expert, doit chercher d'abord, un remède adéquat et définitif aux remontés capillaires de même pour l'humidité accidentelle ou celle provenant des pluies battantes.

La ventilation naturelle au moyen de procédés passifs est une stratégie très efficace pour diminuer le taux d'humidité de l'air ambiant. Le déplacement du flux d'air ainsi créé permet d'évacuer l'air confiné et vicié à l'extérieur des pièces d'habitation et fait rentrer l'air frais nécessaire pour la vie et le confort de l'homme¹.

L'option de réaliser une cheminée à tirage naturel est avantageuse dans la mesure où elle est fonctionnelle en hiver et en été. Pendant l'hiver, elle chasse l'excès d'humidité de l'air et prévient de la formation des condensations superficielles : le déplacement du flux d'air se fait de l'intérieur vers l'extérieur ; alors que pendant l'été, le sens de déplacement de l'air s'inverse (de l'extérieur vers l'intérieur), et elle jouera le rôle d'un capteur de vent : l'air frais est capté en hauteur au dessus des cimes des maisons, pour qu'il soit véhiculé vers le bas, afin de rafraîchir ainsi toutes les pièces en contact avec le conduit². Pour assurer ce double fonctionnement de cette cheminée, il faut procéder ainsi :

- En hiver : la tête de la cheminée doit s'ouvrir uniquement à l'opposé de la direction des vents dominants (nord-ouest) (fig.7.16b), soit : une tête monodirectionnelle s'ouvrant vers le sud-est.
- En été, la tête de la cheminée doit s'ouvrir sur toutes les directions afin de capter les vents quelques soient leurs orientations (fig.7.16b).

¹ COHAS Michel, *ventilation et qualité de l'air dans l'habitat, édition parisiennes*, paris 1996.

² Duthu Henri, *La technique du Bâtiment tous corps d'état*, Le Moniteur, Paris, 1994.p 490.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion et Recommandations

8.1 Introduction

La présente, modeste, recherche a pour objectif d'étudier le phénomène d'apparition de l'humidité dans les habitations et plus particulièrement dans les maisons vernaculaires. Ceci nous a conduit en premier lieu à chercher de comprendre les causes de ses manifestations. Et par la suite de trouver les moyens de lutte adéquat pour chaque type d'humidité, afin d'améliorer les conditions d'habitabilité et de confort intérieur.

Une recherche bibliographique a permis de mieux assimiler ce phénomène et de pouvoir le définir et puis de classifier ses types. Aussi d'évaluer les dangers qu'elle constitue, aussi bien pour la santé de l'homme que pour les constructions.

Une opération de réhabilitation doit viser, entre autres, l'élimination des causes d'apparition de l'humidité et de ne pas se contenter de traiter les symptômes.

L'analyse statistique et quantitative du climat de la ville de Constantine est d'une importance primordiale, qui a permis de déterminer le climat de la ville et de définir la saison humide et froide qui influe directement sur l'ambiance thermique et hygrométrique intérieure des maisons traditionnelles à constantine. Car, en plus de la production de la vapeur d'eau par les occupants, la teneur en eau de l'air ambiant intérieur dépend aussi et en grande partie de la teneur en eau de l'air extérieur.

À l'aide de l'étude bioclimatique, nous avons pu déterminer les zones de confort et par la suite en tirer des recommandations d'aides à la conception d'un projet architectural. Toutefois, nous soulignons les difficultés d'intervenir par une conception bioclimatique dans les régions à climat contrasté comme celui de la ville de Constantine.

Le diagnostic a révélé que la maison vernaculaire à Constantine est envahie par tous les types d'humidité.

Les remèdes existent en grande variété, seulement, il faut savoir choisir la solution adéquate au type d'humidité déterminé par **le diagnostic**, d'autant plus que ce dernier peut déceler plusieurs sources affectant le même bâtiment et éventuellement au même endroit d'où les précautions que le chercheur doit entreprendre avant toute intervention.

Le présent chapitre est une synthèse générale des différentes étapes de l'étude, qui a abouti à des résultats. Sur la base de ces conclusions, des recommandations vont être dégagées dans le but d'être exploité par des maîtres d'œuvres (architectes, thermiciens...etc.), maîtres d'ouvrages, entreprises spécialisées, chercheurs, habitants des zones à climat (tempéré, semi-aride, contrasté ou littorale) ; en d'autres termes, à ceux qui veulent améliorer les conditions d'habitabilité dans les maisons vernaculaires, en apportant le minimum de confort hygrométrique et thermique intérieur, pour pallier aux conditions climatiques sévères engendrés par la fluctuation de ses facteurs.

À la fin, nous proposons aussi des suggestions à ceux qui veulent entreprendre des études complémentaires.

8.2 étendue de l'étude

À travers l'élaboration de la problématique de la présente étude, nous avons essayé de formuler quelques hypothèses en réponse à des questionnements précis, posés sur les manifestations des symptômes d'humidité dans les maisons vernaculaires. Certaines hypothèses ont été confirmées après l'établissement d'un diagnostic détaillé, ce qui a permis d'orienter et de limiter l'étude à certains niveaux, ainsi l'étude s'intéresse essentiellement au confort d'hiver, ce qui nous a amené à évaluer le comportement thermique et hygrométrique des maisons traditionnelles ouvertes seulement sur le patio, lors des périodes les plus froides.

Des campagnes de mesures d'humidité et de températures ont été effectuées pendant une semaine consécutive, en hiver au mois le plus froid « janvier » et de même en été pendant le mois le plus chaud « juillet ».

Les principaux résultats, ainsi obtenus de l'évaluation quantitative de la performance thermo hygrométrique des espaces intérieures d'une maison vernaculaire, ainsi que les tests de condensation, ont pour référence les mesures faites in situ et les données climatiques de la ville de Constantine. Par conséquent, les résultats ne sont fiables que pour les régions caractérisées par un climat similaire ou très proche à celui de Constantine, ceci n'empêche pas que les résultats obtenus de l'analyse quantitative soient généralisés à travers les régions à climat semi-aride ou contrasté.

En absence d'un logiciel qui traite le phénomène des condensations et de la teneur en eau dans les murs en vue de leur assèchement, nous avons essayé de mettre au point un programme sous Microsoft Excel, qui permet d'étudier et vérifier l'apparition de la condensation à travers des simulations. Ces dernières ont donné des résultats satisfaisants aux moyens de plusieurs scénarios proposés.

8.3 Conclusion et aboutissement aux objectifs

En réponse à la question pertinente qui se posait au début de la présente recherche, est de savoir, comment luttait-on contre l'humidité autrefois, avant la découverte des différents remèdes ?

Il est probable que la plupart de nos prédécesseurs, faute de moyens, devaient tout simplement s'en « accommoder », parfois, on se contentait de traiter les symptômes du mal ... quant aux autres, à défaut de pouvoir s'attaquer à ses causes, ils essayaient d'en camoufler les effets. Ils le faisaient en revêtant les murs agressés, ce qui nous conduit à penser que les lambris des demeures anciennes ont sans doute eu pour première utilité de masquer l'humidité des murs sur lesquels ils étaient appliqués.

En générale, les résultats de l'étude montre que le facteur climat est déterminant dans toute conception architecturale, néanmoins la réalité de l'acte à bâtir n'est autre que, le fruit de combinaison d'une multitude de paramètres d'ordre : socio-culturel, culturel, historique, militaire, environnementale, technologique...etc.

L'analyse qualitative a révélé la relation forte qui existe entre la construction vernaculaire et le climat d'une part, les mœurs et pratiques socioculturels d'autre part. cette approche a permis de mettre en évidence certaines contraintes climatiques, eu égard aux caractéristiques morphologiques, spatiales et organisationnelles. Ce qui s'est traduit par une certaine logique, innée, dans le comportement des occupants, qui se présente en, le nomadisme journalier et

saisonnier : déplacement horizontal ou vertical à la recherche du confort. Certainement, ce nomadisme obéit à des règles naturelles selon une hiérarchisation spatiale convenant aux us et coutumes arabo-musulmanes, qui se caractérisent en premier lieu par la préservation de l'intimité.

Les espaces structurants et hiérarchisés de la maison traditionnelle : skiffa, corridor, patio et biyouts jouent un rôle très important dans la régulation thermique, en combinaison avec les matériaux de construction et certains éléments architectoniques en élévation, comme les petites ouvertures donnant sur l'extérieur. Ces derniers permettent, si elles existent une ventilation transversale au niveau des biyouts, qui se terminent par un déplacement d'air par effet de cheminée à travers le patio central. Ceci entraîne une atténuation de la température pendant les périodes chaudes ainsi qu'une réduction du taux hygrométrique de l'air ambiant, lors des périodes froides.

Déjà, nous percevons que l'interaction entre le bâti et le climat est assez complexe. Cette dernière s'accroît de plus en plus, surtout, lorsqu'il s'agit de construire ou de réhabiliter pour améliorer le confort thermique et hygrométrique dans un climat semi aride et aussi **contrasté** comme celui de Constantine, porté aux extrêmes : froid et humide en hiver, chaud et sec en été.

Si, les conditions climatiques de l'été sont maîtrisables où les occupants trouvent leurs solutions dans les espaces intermédiaires (galeries, terrasses...) et ce pendant la nuit seulement, au moment de la restitution de chaleur par les parois. Au contraire, celles de l'hiver exigent un apport d'énergie d'appoint, surtout pendant les périodes critiques comme, il a été démontré au moyen de l'analyse bioclimatique.

L'analyse quantitative a décelé, qu'il y a effectivement un risque de condensation superficielle et dans la masse des murs extérieurs donnant sur le patio, ainsi que certains murs intérieurs pendant l'hiver. Alors que, les planchers haut et bas sont parfaitement secs et ne présentent aucun risque de condensation.

Les mesures hygrométriques in-situ ont confirmé aussi, que le taux d'humidité de l'air à l'intérieur des chambres est trop élevé (95 %) et dépasse le seuil de tolérance, ceci est dû à plusieurs facteurs tels que :

- mauvaise ou absence de ventilation, dans le cas où il n'existe pas d'ouvertures opposées permettant une ventilation transversale
- différence de température importante entre l'intérieure et l'extérieure dû essentiellement à la grande inertie des murs. Puisque, le grand écart de la température entre l'intérieur et l'extérieur provoque des condensations de la vapeur d'eau.
- manque d'ensoleillement de certaines parties des façades intérieures (donnant sur le patio) à cause de leurs orientations, occultation par les corridors et surtout des proportions du patio (rapport entre profondeur et largeur) dont le ratio (h/l) est important et dépassera facilement la valeur : « 4 ». et comme le patio est de forme (O), ses quatre côtés forment des obstacles aux rayonnements solaires, d'où la projection de l'ombre sur les façades, les unes sur les autres.
- remonté capillaire provenant des stagnations d'eau pluviale, formée, après la tombée en ruine des maisons contiguës.

Bien que la maison traditionnelle réponde, donc, à certaines conditions de vie sociale par son organisation spatiale et fonctionnelle, elle reste inconfortable pendant la période d'hiver, malgré l'importante inertie qui caractérise ses parois, par contre, elle offre une assez bonne performance

thermique pendant l'été malgré que le taux d'humidité de l'air ambiant intérieure est un peu élevé. Cependant ce dernier est jugé acceptable, voir avantageux car il adoucit l'air chaud et sec venant de l'extérieur. Par conséquent, il participe à la sensation du confort intérieure, surtout pendant la journée, au moment où la grande inertie de l'enveloppe emmagasine le flux de chaleur qui ne le restituera que plus tard.

L'objectif de l'adaptation des maisons vernaculaires à Constantine aux conditions climatiques rigoureuses d'hiver, passe impérativement par une opération de réhabilitation en vue d'une régulation thermique et hygrométrique en respectant son aspect historique et patrimonial. L'équilibre recherché entre le confort et le coût global est devenu l'équation à résoudre pour tout nouveau projet. Cet équilibre doit être préservé lors d'une réhabilitation, et si possible avec plus d'enthousiasme quant les bâtiments sont menacés de pathologies graves.

La mise à l'assèchement d'un bâtiment contribue efficacement à l'augmentation de la résistance thermique des parois ce qui influe directement et positivement, non seulement sur l'amélioration du confort thermique mais aussi sur l'économie des dépenses d'énergie. En outre, le bénéfice sur la consommation d'énergie permet aux occupants de compenser le coût des travaux de réhabilitation.

Au chapitre sept, il a été procédé à des simulations, qui ont permis d'envisager des solutions aux diverses condensations. Ainsi, des scénarios ont été mis au point, et qui consistaient à ajouter des couches de matériaux en vue d'augmenter la résistance thermique des murs envahis par la condensation.

Au regard des tests de condensations appliqués aux murs, nous constatons que la condensation superficielle peut être éliminée en ajoutant des couches de matériaux isolants, ayant de faibles conductivités thermiques « λ », et un grand pouvoir d'absorption de la vapeur d'eau, ce qui induit, d'une part, la réduction du coefficient surfacique de transmission calorifique « K », d'où : une limitation des déperditions calorifiques. Et d'autre part, elle permet une augmentation sensible de la température surfacique du mur pour qu'elle soit supérieure à la valeur de la température de rosée¹ correspondante à l'état hygrométrique du local considéré.

Par ailleurs cette amélioration de la résistance thermique par l'addition de couches absorbantes ne résoud pas, automatiquement, le problème de la condensation dans la masse.

Les tests ont révélé que, le risque de la condensation interstitielle est d'autant plus grave et plus important que le matériau ajouté est plus absorbant et ayant une résistance à la perméabilité plus faible.. Ceci nous a obligé d'ajouter un pare-vapeur en aluminium de 0,040mm ayant une résistance à la diffusion de vapeur d'eau égale à 1000 [m².h.mmHg/g].

Ce pare-vapeur placé du côté intérieur de la paroi, sur la face caché de la première couche absorbante a donné immédiatement un très bon résultat, et le risque de **condensation interstitielle est absolument épargné.**

En outre, il est à signaler aussi que, le risque de la condensation est d'autant plus important et plus grave si la différence de température entre l'ambiance thermique intérieure et extérieure est

¹. Température au-dessous de laquelle, il y a formation de la condensation superficielle. Ce type d'humidité est apparent (mouillures) et parfois intermittent.

plus importante. Ce qui nécessite l'emplacement d'un pare-vapeur pour éviter la condensation dans la masse.

Il en ressort que, la lutte contre la condensation est absolument maîtrisable. Par contre, la diminution du taux hygrométrique de l'air intérieur est tributaire non seulement d'une bonne ventilation et d'une augmentation de la température résultante, mais aussi du comportement humain. Ce qui sous entend, à dire, que l'action à mener est assez complexe et nécessite, l'utilisation de systèmes passifs et une sensibilisation des occupants pour changer leurs comportement face à ce phénomène, afin de diminuer, au maximum possible, la production de vapeur d'eau.

Le renouvellement de l'air, humide et vicié, est l'une des solutions qui a été adopté dans la maison testée (étude de cas). Vu que le diagnostic (chapitre 6.), a révélé une mauvaise ventilation à cause de l'inexistence d'ouvertures opposées (fig.6-14). Et d'après, les campagnes de mesures in situ, le taux de l'humidité relative est très élevé pouvant atteindre « 95 % », valeur très proche de la saturation de l'air. Cette valeur dépasse de loin les seuils d'insalubrité du point de vue hygiénique et de confort physiologique. Donc la maison est hygiéniquement inconfortable.

La ventilation "sanitaire" ou "hygiénique" doit être permanente: exigée en hiver comme en été et doit être assurée sous toutes les conditions climatiques. Par contre la ventilation pour le confort thermique, dépend des conditions d'ambiances climatiques intérieures et extérieures (température, degré hygrométrique et vitesse des vents) ainsi que l'agencement des espaces intérieures et la position des ouvertures.

En hiver, et en contradiction de ce que l'on pourrait croire, l'air extérieur conserve son pouvoir asséchant, même si son taux d'humidité est de 90%¹ à condition que la différence entre la température de l'air à l'extérieur et celle qu'il acquiert à l'intérieur soit moins de 6°C.

En ce qui concerne la solution envisagée pour l'étude du cas, objet de la présente recherche, porte essentiellement sur l'établissement d'une cheminée de ventilation à tirage thermique. Cette dernière permet donc, au flux d'air de passer du patio vers la cheminée thermique, à travers les ouvertures linéaires, qui donnent sur le patio (fig.7-16).

Le dimensionnement de la section de ce conduit est calculé sur la base de deux renouvellements d'air par heure et des données de températures et d'humidités relatives mesurées. Les résultats obtenus montrent qu'une section minimale de : 0,022 m² est suffisante relativement au débit calculé² pour une bonne évacuation de l'air confiné dans la pièce. Et comme, on ne peut construire des cheminées dont la section est inférieure à 0,1 m² et dont les côtés ayant des dimensions inférieures à 0.30 m chacune, d'où, nous avons proposé, une section de 0,30 x 0,35 m, et une hauteur de 13 m, cette dernière ne dépasse la maison que de un (01) mètre. Cette hauteur de 1,00m au dessus de la cime des toitures est suffisante pour capter l'air frais en été car il n'y a aucun obstacle aux alentours qui gêne le déplacement des flux d'air.

L'adoption de ce procédé passif a été arrêtée pour ses multiples caractéristiques avantageuses, nous citons entre autres :

- **stratégie d'hiver** : renouvellement d'air neuf, pour assurer une bonne qualité de l'air en évacuant l'excès d'humidité, les odeurs et également éviter les risques de condensations.

¹ . Massari G, *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Eyrolles, Paris, 1971.

² . Le débit calculé pour le volume désiré à être assaini est de : 0,024 m³ / s

- **stratégie d'été** : refroidissement de la structure et rafraîchissement du corps tout en assurant l'évaporation de la transpiration de la peau (moiteur de la peau). Ceci s'obtient, lorsque la température intérieure dépasse celle de l'extérieur (fonctionnement inverse par rapport à l'hiver), ainsi la cheminée jouera le rôle d'un capteur à vent.
- Économie dans l'espace et dans le coût.
- Techniques traditionnelles qui, permettent une intégration totale dans le site et utilisent les éléments naturels du climat ou sources renouvelables à savoir : le vent et le soleil. sans recourir aux énergies d'appoint pour la climatisation ou le chauffage (système passif).

Enfin, l'adaptation des constructions vernaculaires à Constantine au climat est tout à fait possible à condition qu'elle passe par une opération de réhabilitation qui prend en charge tous les facteurs climatiques et surtout l'humidité. « Le problème du confort a des solutions accessibles aux architectes, avec des moyens qui leur sont familiers »¹.

8.4 Recommandations

Les conclusions citées précédemment, nous permettent de suggérer plusieurs recommandations, dans le but d'arriver, d'une part, à éliminer les risques de condensations superficielles et interstitielles, et d'autre part à diminuer le taux hygrométrique de l'air à l'intérieure des maisons vernaculaire, pour atteindre un confort physiologique optimum sous les climats froids et humides. Les conditions climatiques d'été comme celles de Constantine (chaud et sec) ne posent aucun risque de condensations comme nous l'avons démontré au chapitre investigation (fig.6-80).

D'après les résultats obtenus, il s'avère qu'une opération de réhabilitation est nécessaire pour adapter les maisons vernaculaires au climat à condition de prendre en considération les paramètres climatiques influent sur le confort intérieur.

Les conclusions de cette étude ont montré l'efficacité d'une intervention au niveau des murs envahi par l'humidité de condensation en vue d'éliminer complètement la formation de cette dernière. La lutte contre l'humidité de condensation exige l'amélioration de la résistance thermique des murs et/ou l'augmentation de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau par l'addition de nouvelles couches, les remèdes diffèrent selon le type de l'humidité :

- Pour la condensation superficielle :

Trois conditions sine qua non doivent être satisfaites pour aboutir à son élimination selon les conclusions de la présente recherche :

- o augmentation de la température surfacique de la face intérieure du local considéré, jusqu'à ce qu'elle soit supérieure à la température de rosée correspondante à l'état hygrométrique de l'air ambiant intérieure. On atteint ce résultat en réduisant le coefficient surfacique de transmission calorifique « K ». Ceci s'obtient par l'addition de couches de matériaux isolants ayant de faibles conductivités thermiques « λ ». Ces couches doivent être placées sur la face intérieure des murs.
- o le matériau à placer en première couche additionnelle (face intérieure du mur) doit posséder un grand pouvoir d'absorption de la vapeur d'eau.
- o absence totale de l'humidité ascensionnelle à travers le mur à traiter ainsi que le risque de condensation dans la masse.

¹ Izard Jean-louis, *Architecture d'été*, la calade, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1993

- **Pour la condensation interstitielle :**

L'emplacement d'un pare-vapeur, ayant une grande résistance à la diffusion de la vapeur d'eau est un remède très efficace contre la condensation dans la masse à condition qu'il soit placé du côté intérieur sur la face cachée de la première couche absorbante.

Dans le cas où le gradient de température est faible : de l'ordre de 3°C par exemple, une amélioration de la résistance thermique par des isolants, suffit largement pour éviter ce type de condensation.

Quant aux autres types d'humidités : ascensionnelle, accidentelle et celle due aux pluies battantes, l'étude préconise les recommandations suivantes.

- **Pour l'humidité ascensionnelle :**

Il existe plusieurs méthodes pour entraver les remontés capillaires : celles qui empêchent la montée de l'humidité et celles qui empêchent la pénétration latérale. L'intervention doit d'abord commencer par assainir l'environnement : éliminer toutes les sources d'eau provenant des fuites des différentes canalisations (AEP ou assainissement). Reconstruire les maisons limitrophes pour empêcher les stagnations d'eau pluviale ou drainer toutes les eaux superficielles et souterraines par des aménagements adéquats.

Dans le cas d'une source souterraine permanente : « nappe phréatique », il est préférable de mettre en place une barrière étanche à la base des murs. Cette barrière peut être réalisée de différentes manières :

1. Suppression d'une bande de l'ancienne maçonnerie et son remplacement par une maçonnerie anticapillaire.
2. Sciage de la maçonnerie et remplacement d'une étanchéité.
3. Obstruction des vaisseaux capillaires au moyen de résine.
4. Remplacement dans les murs de plaques en acier inoxydable.
5. Introduction dans la maçonnerie de produits imperméabilisants.

Pour entraver l'eau qui pénètre latéralement, il y a lieu de réaliser des tranchées périmétriques extérieures à condition qu'elles soient ventilées, car la ventilation accélère l'assèchement des murs humides.

Si l'humidité attaque le sous-sol de tous les côtés, nous recommandons l'application de l'une des méthodes suivantes : la méthode des trois maçonneries (fig.4-34), ou la méthode à sec (fig.4-36)

- **Pour l'humidité accidentelle :**

la rénovation de l'étanchéité, la réparation des défaillances de l'enveloppe de l'immeuble (toitures, murs, planchers), ainsi que la réparation des fuites des différentes canalisations, assure aisément la protection de ce type d'humidité.

- **Pour l'humidité due aux pluies battantes.**

Nous rappelons que les infiltrations de la pluie pouvaient être dues à plusieurs causes : défaut d'étanchéité de certains ouvrages, fissures, joints dégradés, dégradation des enduits ou épaisseurs insuffisantes de la maçonnerie. Il est recommandé d'établir un diagnostic avant toute

intervention. Lorsque la cause du mal est décelée, il faut la supprimer. Soit qu'il s'agisse d'une réfection des fissures, des enduits ou rejointoiement de maçonnerie, il faut prendre les précautions nécessaires, lors du choix des produits qui doivent être compatibles avec la maçonnerie elle-même. Pour cela, il faut vérifier la compatibilité du support avec son revêtement en matière de résistance chimique, mécanique et physique.

1. **compatibilité chimique** : éviter tout revêtement susceptible de provoquer des réactions chimiques qui peuvent nuire à la stabilité entre l'enduit et le support.

2. **compatibilité mécanique** : le revêtement choisi doit posséder au moins les mêmes caractéristiques mécaniques : résistance à la compression et à la traction, que celui du support afin d'éviter la formation des fissures, à travers des quelles la pluie passe. Cette eau provoque des pressions et finie par détacher le revêtement de son support.

3. **compatibilité physique** : le choix du revêtement sera fait sur la base de ses propriétés physiques tel que : le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau qui doit être au moins égale à celui du support afin de permettre aux échanges gazeux qui entraîne une migration de la vapeur d'eau, allant dans le sens de la pression partielle la plus forte vers la pression partielle la plus faible.

Par ailleurs, la ventilation est désirable pour toutes les périodes de l'année. Le renouvellement de l'air neuf assure une bonne qualité de l'air en évacuant l'excès d'humidité, les odeurs et également empêche les condensations superficielles de se former. Pour cela, il est indispensable de prévoir des procédés passifs (capteurs de vents, cheminées à tirage thermiques,..) afin de permettre le déplacement de l'air dans les espaces qui ne disposent pas d'ouvertures opposées. Une cheminée à tirage naturel s'adapte mieux aux climats contrastés comme celui de Constantine, d'autant plus qu'elle s'intègre parfaitement dans la silhouette générale des constructions vernaculaires, seulement, il faut respecter certaines conditions à savoir :

1. la hauteur du conduit doit être supérieure à 7,00 m ;
2. la section du conduit doit être supérieure à 0,1 m² ;
3. le volume de l'air des locaux doit être inférieure à 200 m³ ;
4. l'ouverture libre de la grille de la prise d'air doit être égale au double de la section de la cheminée.
5. les parois intérieures du conduit doivent être parfaitement lisses
6. les angles de tout le parcours du conduit, depuis l'entrée jusqu'à la sortie de l'air, ne soient pas plus de cinq et soient tous bien raccordés.

En hiver pour améliorer le tirage, on peut introduire dans la cheminée un élément chauffant. Cet élément doit être placé à la base de la cheminée, sans opposer de résistance au passage de l'air. D'autres solutions passives peuvent être utilisées comme le réchauffement de l'air avant son introduction à l'aide d'une cheminée solaires par exemple.

8.5 Suggestions pour des recherches futures

Les conclusions retenues ont permis d'élaborer certaines recommandations, mais cela n'empêche pas que l'étude soit assez limitée. Par conséquent, il sera très utile à ce qu'elle soit complétée par des travaux de recherches futures :

- Au niveau du diagnostic, il reste à vérifier le taux d'humidité à l'intérieure des matériaux envahis par l'humidité, afin d'arriver à l'assèchement total. Ce genre de mesures nécessite un matériel adéquat d'un laboratoire spécialisé en chimie, disposant d'un four approprié.
- L'analyse quantitative a été abordée sur la base d'une investigation de la performance thermique d'un seule type de maison à patio dont le ratio (h/l) de ce dernier dépasse la valeur

« 3 », de ce fait, une investigation future sur des maisons à patio, dont les ratios sont différents sera appréciable car le comportement thermique du patio en dépend.

- L'objectif de proposer une cheminée de ventilation à tirage naturelle est de renouveler l'air stagné, humide et pollué des chambres, par de l'air neuf venant de l'extérieur. Ce dernier est supposé capable de diminuer le taux de l'humidité relative de l'air intérieur à une valeur au moins égale à celle de l'air extérieur. Si le taux de l'humidité relative intérieur reste toujours supérieur au seuil de salubrité à une température donnée. Une étude de réhabilitation thermique, future, s'impose en vue d'intervenir sur le patio par des procédés passifs afin d'améliorer ses performances thermiques et hygrométriques. L'augmentation de la température à l'intérieur du patio par effet de serre au moyen d'une verrière par exemple, pendant l'hiver et démontable l'été sera souhaitable car le taux hygrométrique de l'air diminuera considérablement. Par conséquent, ce résultat influera directement sur l'ambiance thermique et hygrométrique des chambres et améliorera considérablement les conditions de vie quotidienne dans le patio.
- le programme mis au point par nos soins pour effectuer des simulations ou tests dans le cadre de cette étude est très limité, les chercheurs peuvent investir dans ce créneau pour concevoir un logiciel qui prendra en charge tous les paramètres climatiques déterminants. Ce logiciel permettra, ainsi, l'évaluation d'un confort thermique et hygrométrique en fonction des composantes architecturales spécifiques d'une maison vernaculaire et d'une éventuelle réhabilitation thermique au moyen de procédés passifs.

En fin, l'étude ci présente a traité le phénomène de l'humidité à l'intérieure de la maison traditionnelle, pour approfondir les connaissances et apporter de meilleurs remèdes, une recherche axée sur la performance thermique et hygrométrique de la bâtisse, en relation avec les espaces extérieurs s'avère très pertinente.

La lutte contre l'humidité, en vue d'une amélioration du confort, dans les espaces intérieures est tout à fait possible, avec des moyens accessibles aux architectes ou thermiciens, soit qu'il s'agisse d'une intervention sur la structure et les parois en vue d'améliorer la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau et de renforcer la résistance thermique ou d'arrêter la remontée des eaux souterraines. Soit, d'intervenir sur les espaces en les modifiant de telle sorte, à augmenter la température de l'air ambiant, pendant l'hiver (par effet de serre par exemple) et activer la ventilation par des procédés passifs.

Plusieurs scénarios peuvent ainsi être proposés dans le but d'éliminer le risque de condensation superficielle et dans la masse et surtout réduire le taux de l'humidité relative de l'air intérieure à une valeur hygiéniquement acceptable en vue d'atteindre un confort optimum. Un champ de recherche, vaste et prometteur, se présente donc, aux futures chercheurs : notamment, les architectes bioclimaticiens qui y trouveront des opportunités pour l'innovation.

NOMENCLATURE

Symboles	Significations	Unité
A	section en.....	(m ²)
C	coefficient (constante).....	-
dm	diamètre moyen	mm
e	épaisseur du matériau de la couche « n ».....	m
g	la pesanteur	m ²
H, H1 et H2 ou h	hauteurs	m
HR	humidité relative	%
I _{DM}	indice d'aridité.....	-
k	coefficient de transmission calorifique	w/m ² .°C
M	le métabolisme.....	W
P	Précipitation de l'année	mm
Ppe	pressions partielles extérieures.....	mmHg
Ppi	pressions partielles intérieures.....	mmHg
Ppn	pression de la couche considérée (n).....	mmHg
Ppn-1	pression de la couche antérieure (n-1).....	mmHg
Psi	pression saturante intérieure	mmHg
Pse	pression saturante extérieure.....	mmHg
Pv	pression du vent	N/m ²
ΔPv	exprime la différence de pression.....	mm d'eau
Q	Densité du flux thermique.....	w/m ²
r	coefficient des pertes particulières	-
ra	perte globale par mètre linéaire.....	mm d'eau/m
Rth	résistance thermique du matériau composant la paroi	
Rf	les pertes dues aux frottements.....	m ² . °c/w
R, C, E	respectivement, échanges de chaleur par rayonnement, convection et évaporation.....	-
S	surface des orifices d'entrée	m ²
T	température moyenne annuelle.....	°C
ta	température de l'air ambiant.....	°C
te	température extérieure.....	°C
tg	température radiante relevée sur thermomètre globe.....	°C
ti	température intérieure.....	°C
T _m	température moyenne extérieure pour la période de calcul.....	°C
T _n	température neutre.....	°C
Tpi	température surfacique de la face intérieure de la paroi	°C
Tpn	température surfacique de la face « n » de la paroi considérée...	°C
Trad	température radiante.....	°C
Δt	différence de température.....	°C
U _{zm}	vitesse moyenne du vent sur une période donnée.....	m/s
U' _z (t)	fluctuation du vent correspondante variable avec le temps...	m/s
V	vitesse de l'air	m/s
V (i)	vitesse moyenne intérieure	m/s

V1	vitesse du vent correspondant à la hauteur H1	m/s
V2	vitesse du vent correspondant à la hauteur H2	m/s
X	rapport de la surface de la fenêtre sur celle du mur.....	-
Z	les pertes particulières (coudes, rétrécissement...etc.).....	-

Symboles grecques :

	coefficient intérieur d'échanges superficiels.....	w/m ² . °C
α _i	coefficient extérieur d'échanges superficiels.....	w/m ² . °C
α _e	humidité relative intérieure.....	%
φ _i	humidité relative extérieure	%
φ _e	conductivité thermique.....	w/m°C
λ	perméabilité à la vapeur d'eau du matériau de la couche « n »...	g/m.h.mmHg
π	résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.....	m ² .h.mmHg/g
e/π ou Rd	poids spécifique moyen de l'air en.....	N/kg
Υ		

REFERENCES :

Abd El-Mawgoud. M : A comparative analysis of the thermal comfort of the vernacular and the contemporary Egypt's houses : case studies in Cairo. Technical university of Budapest, Hungary, 1996.

Aboulnaga.MM, Abdrabboh. S.N : *Improving night ventilation into low-rise buildings in hot-arid climates exploring a combined wall-roof solar chimney*. Elsevier science ltd. U.A.E, 2000.

Alexandroff G et J.M. *Architecture et climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*. Collection Architectures, ED, BERGER , Levault, Paris, 1982.

Akbari. H, et Dan M.Kurn, Bratz .S.E, Hanford J.W, *peak power and cooling energy savings of shade trees*, 1997

ANAH (agence nationale pour l'amélioration de l'habitat), *Réhabiliter et entretenir un immeuble ancien point par point*, deuxième édition, Le Moniteur, Paris, 1993.

Badran A, *performance of cool towers under various climate in Jordan*. Elsevier, 2003.

Bahadori. M.N, *an improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling*, Solar Energy, 1985.

Belakhowsky.S, *Chauffage & Climatisation, Technique & Vulgarisation*, Paris, 1980

Belmont J, *les quatre fondements de l'architecture*, « le Moniteur, Paris, 1987

Bennadji A : *Adaptation climatique ou culturelle en zone aride. Cas du sud Algérien*. Thèse de doctorat université de Aix Marseille. 1999.

Benamara .Y : *la performance thermique du capteur à vent pour un rafraîchissement passif dans les régions chaudes et arides. Cas de ouargla*. Thèse de doctorat université de Constantine, 2004.

Bernstein. D; Champetier. J-P ; Vidal. T, *Anatomie de l'enveloppe des bâtiments*, le Moniteur, Paris, 1997.

Bertier. J, *Diffusion de vapeur à travers des parois-Condensation*, CSTB-REEF, Paris, 1980

Bonhomme. A. *l'isolation thermique des bâtiments*, le Moniteur, Paris, 1986.

Bouyahia M : *Étude de la performance thermique du patio dans les milieux arides*. Mémoire de Magistère, université de Biskra, 2004.

Brenda. P : *Bâtiments en maçonnerie, analyse des déséquilibres statiques et techniques de consolidation*. Édition du centro analisi sociale progetti, Rome, 1993.

Cadrou M : *Atlas solaire de l'algérie, tome :1,2,3*. OPU, 1986

Cammerer I-S. *Capacité d'évaporation des différents enduits, l'humidité des murs dans les immeubles d'habitation, les étables et les entrepôts frigorifiques*, Gesundheits-Ingenieur, 1944.

Cardiegues, R. *Isolation et protection des bâtiments*, Eyrolles, Paris, 1954.

Charbonnier.S : *Guide de la thermique dans l'habitat neuf*. Éditions du Moniteur, Paris, 1992.

Chatelet Al, Fernandez P, Lavigne P, *Architecture climatique : une contribution au développement durable.Tome2 : concepts et dispositifs*, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998.

Chandèze A : *Guide Vertas du bâtiment, réhabilitation, maintenance*, Le Moniteur, Paris, 1989.

Chaupp. B W : *le mur extérieur : revêtement- isolation...protection contre l'humidité*, Eyrolles, Paris,1966.

Chemillier. P , *Sciences et bâtiments*, éd. du CSTB, Paris, 1986

Centre de recherche en architecture et urbanisme (CRAU), *village solaire intégré*, OPU, Alger, 1983

Croiset. M : *l'hygrométrie dans les bâtiments : confort thermique d'hiver et d'été : condensation*. EYROLLES, 1968.

Cohas M : *ventilation et qualité de l'air dans l'habitat*, Edition parisiennes, paris 1996.

Coignet J : *Réhabilitation : art de bâtir traditionnels : connaissances et techniques de réhabilitation*, Edusud, Aix-en-provence, 1987

Collège international des sciences de la construction avec la collaboration de l'UNESCO, *L'humidité dans le bâtiment*, Saint-rémy-lès-chevreuse (France): CILF, du 23 au 25 Novembre 1982.

Collombet R, *l'humidité des bâtiments anciens*, Editions du Moniteur, Paris, 1985

Couasnet Y : *les condensations dans les bâtiments : guide pratique et éléments d'analyse*. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 1990.

Couasnet Y : *Contribution à l'étude du transfert de vapeur d'eau en régime permanent et non stationnaire dans les matériaux poreux hygroscopiques*. Cahier du CSTB N°2349, Paris, 1989

Couillard. D et Bouige.R, *chauffage ventilation, climatisation*, Eyrolles, Paris, 1981

Dard. P : *le confort ente la norme et le caprice*, Bâtiment et énergie, N° 60, janv-fev, 1990
Dangles, Saint-jean-de-Braye, 1986.

Debomy. P L : *l'amélioration des logements existants*, Eyrolles, paris, 1977

De Cesaris F: *La restauration statique*, centre analisi sociale progetti, Roma1996

- Delcelier. P et Couasnet. Y :** *contribution à l'étude des phénomènes de condensations dans les parois des bâtiments.* Cahier du CSTB N°2013, Paris, 1985
- Delcelier. P :** *Transfert de vapeur,* Cahier du CSTB N°2322, Paris, 1989.
- Déoux S et P :** *le guide de l'habitat saint,* Medieco Editions, Andorran, 2002
- Dethier.J :** *Architectures de terre, atouts et enjeux d'un matériau de construction méconnu,* Europe-tiers monde-états unis, Editions du centre ponpidou, Paris, 1986.
- Donnadieu C et p. Didillon H et J-M :** *habiter le désert, les maisons mozabites, pierre mardaga,* éditeur, 1986.
- Dreyfus. J :** *le confort dans l'habitat en pays tropical.* Eyrolles, Paris, 1960.
- Durant H.** *Architecture solaire (réhabilitation thermique),* Lavoisier, Paris, 1982.
- Duthu H :** *La technique du Bâtiment tous corps d'état,* Le Moniteur, Paris, 1994.
- Evans M:** *housing, climate and Comfort,* the architectural pres. London, 1980
- Elmas Can:** *natural ventilation as a passive cooling strategy in the hot-humid region of turkey.* University of Oregon, USA, 1991.
- Emile O :** *Technologie des matériaux de construction,* T.02, Entreprise Moderne D'édition, Paris, 1976
- Escourrou. G,** *Le climat de la ville,* édition Nathan, géographie d'aujourd'hui, Paris, 1991
- Fathi .H :** *construire avec le peuple,* édition Sindbad, Paris, 1977
- Fanger P.-O.** *Thermal confort analysis and applications in environmental engineering.* New York, Mc-Grew hill, 1972
- Florian R :** *Médecin des murs,* Bio-Espace éditions, collection Science et Conscience, Saverne, France, 1999.
- Fardeheb .F:** *Examination and classification of passive solar cooling strategies in middle eastern vernacular architecture.* UCLA, Los Angeles, California, 1987.
- Fardeheb .F :** *Classification des techniques de rafraîchissement naturelles dans l'architecture vernaculaire des pays du moyen orient.* UCLA, Los Angeles, California, 1989.
- Gandemer. J :** « les effets aérodynamiques du vent dans les ensembles bâtis » *les 4 éléments,* techniques & architecture N° 325, paris, (jun-juillet1979).
- Geros. V & al :** *on the cooling efficiency of ventilation technique,* university of Athens, Athens Greece, 1998.

- Givoni B**, *Passive and low energy cooling of building*, John Wiley & Sons, INC, New York, 1994.
- Givoni B**, *L'homme, L'architecture et le climat*, édition le Moniteur, paris, 1978
- Grunau B. Edvard** : *La lutte contre l'humidité dans les façades*, Éditions Eyrolles, Paris, 1970.
- Guindani S et Doepper U** : *architecture vernaculaire*, presses polytechniques et universitaires romandes, suisse, 1990
- Guyot A et Gandemer J** : *La protection contre le vent*, CSTB, 1981
- Guyot G** : *climatologie de l'environnement*, 2è édition, DUNOD, Paris, 1999.
- Grangaud Isabel** : *la ville imprenable*, Éditions Média-Plus, 2004.
- Ghrab-Morcos.N.** *Climatisation Naturelle, tour à vent et malkaf solaire*, ENIT, Tunis, 1985.
- Grafmeyer Y.**, *Sociologie urbaine*, Paris, Nathan, 1994.
- Harkness E.L. and Mehta M.L.**: *Solar radiation control in buildings*, Applied Science Publishers LTD, London, 1978
- Hernot.D et Porcher.G** : *thermique appliquée aux bâtiment*, les éditions parisiennes CFP, paris, 1984
- Hrabosky J** : *la réglementation thermique de la construction neuve : bâtiment d'habitation bâtiments et autres que d'habitation*, Eyrolles, Paris, 1990
- Heschong Lisa**, *Architecture et volupté thermique*, Éditions Parenthèses. 1981
- Izard. J-L** : *Architecture d'été*, la calade, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1993
- Izard J-L et Guyot A** : *Archibio. Concepts et dispositifs*, EDISUD, Parenthèses. 1979
- Jennet J, Pignal B et Scarato p** : *le bâti ancien : analyse, pathologie, remède, pisé terre d'avenir*, Auvergne, 1996.
- Joffroy P.** *La réhabilitation des bâtiments : conserver, améliorer, restructurer les logements et les équipements*. Collection techniques de conception, le Moniteur, Paris, 1999.
- Kant K, Mullick S.C.**, *Thermal comfort in a room with exposed roof using evaporative cooling in Delhi*, centre for energy studies, New Delhi, 2001.
- Kettenacker, L** : *l'humidité de murs*, Gesundheit-Ingenieur, 1930.
- Knapen.M.A** : *le problème de la conservation des matériaux des habitations et des monuments*. «*Revue des entrepreneurs de maçonnerie, ciments et béton armé* », paris, avril-décembre 1925.
- Konya. A.** *Design primer for hot climates*. The architectural press, London, 1980

Kur F : *L'habita écologique : quel matériaux choisir?* Terre vivante, Mens, France, 2000

Keith. L : *notre planète la terre*, Hatier, Fribourg (Suisse), 1985

Lavigne J-C : *La réhabilitation des bidonvilles de Kânpur (Inde), plan construction et habitat*. Économie et Humanisme, Lyon, 1984.

Lavigne P : *architecture climatique*, ÉDUSUD, Aix-en-Provence, 1994.

Latta J.K et Beach R.K, *Diffusion de la vapeur et condensation*, <http://www.irc.com>, 2006.

Latta J.K., walls, windows and roofs for the canadian climate, a summary of the current basis for selection and design. Special Technical Publication N° 1 of the division of building research, national research council of Canada, Ottawa, 1973.

Lesbet D: *La casbah d'Alger, gestion urbaine et vide social*, O.P.U, 1985.

Levy . J-P : *La réhabilitation des quartiers anciens et de l'habitat existant : acteurs, procédures, effet et conséquences sociales*. Presse universitaire du Mirail. Toulouse, 1990.

Lebens. R M: *Passive Solar Heating Design*, Applied Science Publishers, London, 1980

Lhomme J-C : *les énergies renouvelables*, Delachaux et Niestlé, Paris, 2003.

Loubes Jean-paul, *archi troglo*, Parenthèses, 1984.

Mazria Edward : *le guide de l'énergie solaire passive*, Éditions Parenthèses, 1978

Massari G : *Bâtiments humides et insalubres, pratique de leurs assainissements*, Éditions Eyrolles – Paris, 1971.

Ministère de l'habitat, CNERIB, D.T.R. (C3-2), *Réglementation thermique des bâtiments d'habitation, Règles de calcul des déperditions calorifiques*, Fascicule1. PAO-CNERIB, Alger, 1998.

Ministère de l'habitat, CNERIB, D.T.R. (C3-4), *Climatisation, Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments*. PAO-CNERIB, Alger, 1998.

Ministère de l'équipement, des transports et du logement, *Intervenir en quartier anciens*, Enjeux-Démarches-Outils. Le Moniteur, Paris, 1999.

Ministère de l'habitat, *Recommandations architecturale*, ENAG EDITIONS, Alger 1993.

Mazouz S : *Éléments de conception architecturale*, O.P.U , 2004.

Mieczyslaw T : *Soleil et architecture*, Dunod editeur, Paris, 1960

Ministère de l'équipement, direction de la construction, *Amélioration thermique de l'habitat existant*, Eyrolles , Paris, 1977

Ministère de l'urbanisme et du logement : *Guide pour l'amélioration des logements existants*, Eyrolles, Paris, 1977

Nardin H et Rouvière R : « Réhabiliter des logements occupés », *Urbanisme* , N° 162/163, 46e année, revue de l'urbanisme, Paris, 1977. pp102-106

Neufert E : *L'architecture et l'isolation, à base de mousses rigides de Styropor*. DUNOD, Paris, 1971,

Olgay. V: *Design with climate*, Princeton University Press, New jersey, 1963.

Outas S : *investigation sur l'intégration climatique dans l'habitation traditionnelle en régions arides et semi-arides d'algérie. Cas du Ksar de Ouargla et de la Médina de Constantine*. Thèse de doctorat université de Constantine, 2004.

Perret M : *cours de climatisation*, tome 1 – bases du calcul des installations de climatisation, 2^e édition, CFP. Paris

Quénard D. et Sallée. H. *le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment*. Cahier du CSTB N°2525, Paris, 1991.

Ralph M. Lebens, passive solar heating design, Applied science publishers LTD, London

Rougeron C : *L'isolation Acoustique et Thermique dans le bâtiment*, Eyrolles, Paris, 1979

Roussel M : *Aération des logements*, coll. Des dossiers de la construction. Eyrolles, Paris 1984.

Roulet Claude-Alain, *Energétique du bâtiment I, Interactions entre le climat et le bâtiment*, presse polytechniques romandes, Lausanne, 1987.

Raverau. A : *Le M'Zab une leçon d'architecture*, Sindbad, 1981.

Recknagel. Sprenger, Honman, *le manuel pratique du génie climatique*, 2ème édition, PYC, Paris, 1986.

Rapoport A : *pour une anthropologie de la maison*, Bordas, Paris, 1972.

Raffestin Y : *Réhabiliter en site occupé*, le Moniteur, Paris, 1996.

Sayigh. A, Marafia. A.H : *Vernacular and contemporary buildings in Qatar*. Renewable & sustainable energy review. Elsevier science Ltd. London, 1998.

Schaupp W : *Le mur extérieur : revêtement, isolation thermique, protection contre l'humidité*. Eyrolles, Paris, 1966.

Sealy A , *introduction to building climatology*, published by the CAA, 1979

Sorre. M : *les fondements de la géographie humaine, 1943*

Soucy C : « De la mise aux normes des logements à la réhabilitation des quartiers anciens », *Urbanisme* , N° 147/148, 1975- 44e année, revue de l'urbanisme, Paris, 1975. pp102-108.

Stebe J-M : *La Réhabilitation de l'habitat sociale en France*, coll. « que sais-je » ? Presse Universitaire de France, Paris, 1995.

Szokolay. S. V, *Environmental science handbook*, the construction press, Lancaster, England, 1980

Tabeaud M : *la climatologie*, Armand Colin, , Paris. 2000.

Toulier B : *Architecture et patrimoine du XXè siècle en France*, Paris,1999.

Université de Biskra, *L'architecture et la ville dans le contexte algérien*, Biskra : Séminaire national en architecture, Institut d'architecture de Biskra, 1997.

Watson Donald&Camous Roger, *l'habitat bioclimatique, l'étincelle*, Montréal, Québec, Canada, 1986

Wright. D, *Soleil, Nature, Architecture*, Parenthèses, Paris, 1979.

Sites Web :

[Enligne] [http:// www.travaux.fr](http://www.travaux.fr).

[Enligne] [http:// www.irc.com](http://www.irc.com)

[Enligne] [http:// www.cstb.fr](http://www.cstb.fr).

[Enligne] [http:// www.thermexcel.com](http://www.thermexcel.com).

[Enligne] [http:// www.rubson.com](http://www.rubson.com).

[Enligne] [http:// www.outilssolaires.com](http://www.outilssolaires.com).

[Enligne] [http:// www.gmc.ulvac.com](http://www.gmc.ulvac.com).

[Enligne] [http:// www.irisfmg.it](http://www.irisfmg.it).

[Enligne] [http:// www.yazd.com](http://www.yazd.com).

[Enligne] [http:// www.inrs.com](http://www.inrs.com).

[Enligne] [http:// www.pilkington.com](http://www.pilkington.com).

[Enligne] [http:// www.cerma:archi.fr](http://www.cerma:archi.fr).

[Enligne] [http:// www.guedelon.com](http://www.guedelon.com).

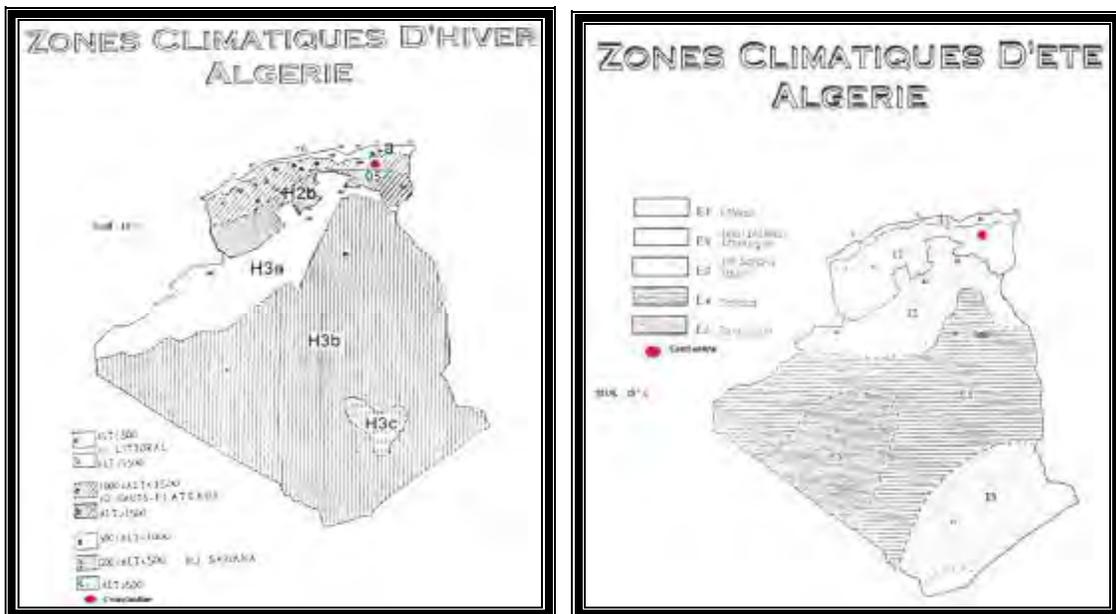
[Enligne] [http:// www.métérologie.com](http://www.métérologie.com).

ANNEXE – I -

La Figure1 (a et b) montre les zones climatiques d'été et d'hiver en Algérie

a) **Zone climatique d'hiver** : Trois grandes zones climatiques d'hivers H1, H2, et H3 sont déterminées selon l'influence de l'altitude. Chaque zone comprend des sous zones comme suit :

- H1a** : littoral.....Altitude < 500m
- H1b** : Arrière littoral – montagne..... Altitude > 500m
- H2a** : Atlas tellien montagne1000m<Altitude<1500m
- H2b** : Atlas saharien montagne Altitude > 1500m
- H3a** : pré Sahara.....500m<Altitude<1000m
- H3b** : Sahara.....200m<Altitude<500m
- H3c** : Hoggar..... Altitude > 500m



a) zone climatique d'été

b) zones climatique d'hiver

Fig.1 : les zones climatiques en Algérie. Source : Ministère de l'habitat, 1993.

b) **Zones climatiques d'été** : elles sont au nombre de cinq :

- la zone **E1** subit l'influence de la mer ;
- la zone **E2** subit l'influence de l'altitude ;
- les zones **E3, E4 et E5** subissent l'influence de la latitude.

Chaque zone a les caractéristiques suivantes :

- § la zone E1 a des étés chauds et humides, l'écart des températures diurne est faible ;
- § la zone E2 a des étés plus chauds et moins humides, l'écart des températures diurne est important
- § la zone E3 a des étés très chauds et secs mais moins pénibles qu'en zone E4;
- § la zone E4 a des étés secs mais plus chauds et plus secs qu'en zone E3;
- § la zone E5 a des étés chauds et secs et extrêmement pénibles par rapport à E3et E4. c'est la zone la plus chaude en Algérie.

L'amplitude thermique est importante pour le zone E3, E4 et E5.

Application de la méthode de Mahoney sur la ville de Constantine

(Tableaux de 1 à 4)

ANNEXE – II -

1- Exemples typiques de diagnostics et d'assainissements

Nous présentons, trois maisons différentes situées dans des régions climatiques différentes, chacune est affecté par un type d'humidité différent de l'autre :

- A- Maisons traditionnelles en tuf à Pontinia
(Humidité ascensionnelle)
- B- Maisons forteresses, à Agri en Calabre
(Humidité de condensation)
- C- Maisons à Palerme
(Refroidissement dû à la pluie battante).

A - Maisons traditionnelles en tuf à Pontinia (humidité ascensionnelle)

Données climatiques et géologiques

- Précipitations non abondantes
- Plaine : stagnation d'eau ;
- Terrain argileux
- Le niveau de la nappe phréatique est superficiel ;
- RDC : niveau à 0,47 m du niveau du sol.

Manifestation de l'humidité et mesures d'assainissement

- seules les pièces du RDC sont humides
- On constate que le taux d'humidité est plus élevé au-dessus de la couche d'asphalte (14 à 18%) qu'au-dessous (8 à 10%). Cela est dû à l'application de l'enduit de ciment hydrofuge, sur la plinthe extérieure, qui a entravé le processus d'évaporation de l'eau et, de ce fait, a diminué la résistance thermique du mur. Par conséquent, au refroidissement du mur et à l'humidité ascensionnelle, s'est ajoutée, sur la paroi intérieure de la chambre à coucher, l'humidité de condensation qui, ne pouvant s'échapper, mouille progressivement le mur.
- la couche de mortier qui se trouve sous le plancher renferme : (15%) d'humidité,
- La distance qui sépare la nappe phréatique de la surface du sol, mesurée en creusant deux puits, l'un à l'extérieur et l'autre à l'intérieur du local humide, a été évaluée à 1,44m. les fondations étaient donc sous l'eau.

Travaux d'assainissement conseillés

Ces travaux, illustrés à la figure (1), sont les suivants :

- Travaux I et II : construction de tranchée pour éloigner le plus possible la nappe d'eau souterraine des fondations.
- Travaux III : reconstruction d'un trottoir afin d'éloigner les nappes superficielles d'eau de pluie du pourtour de l'édifice.
- Travail IV : reconstruire le plancher sur des poutres en béton précontraint ; les protéger contre l'humidité ascensionnelle en ne les mettant pas en contact avec le sol, et contre l'humidité de condensation, en aménageant un radier de 10 cm d'épaisseur en couches de ponce maigre

Structure hétérogène des constructions.

Les maisons sont construites en maçonnerie de pierre locale très dure : « granit » possédant un poids spécifique très élevé, absolument étanche à l'eau et doté d'une haute conductibilité thermique. Ce qui entraîne une résistance thermique faible ($R=0,47 \frac{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C}{cal}$ pour un mur de 0,60 m) des murs.

Travaux d'assainissement proposés

Citons les causes de la condensation qui ont provoqués les dommages :

- protection thermique insuffisante des murs périmétriques, en particulier au troisième et dernier étage, où leur épaisseur se réduit à 45 cm ;
- orientation au nord
- action refroidissant (sans infiltration) de la pluie battante, aggravée, au troisième étage, par le fait que les pans du toit sont dépourvus de saillie.

Le remède consiste simplement à augmenter la protection thermique des murs périmétriques, dans une proportion plus grande au troisième étage et un peu moindre aux deux étage inférieurs. Ce qui a ramené le concepteur à construire un contre-mur intérieur ordinaire (fig.3), en briques creuses de 8 cm, en laissant un vide d'air d'au moins 4 cm.

Au troisième étage, l'architecte a augmenté la résistance thermique en élargissant le mur de 8 cm et en le remplissant, au fur et à mesure que s'élevait le contre mur, de grains de ponce tamisés, très secs, d'un calibre non inférieur à 2 cm. A défaut de ponce, il employait comme isolant du charbon de bois végétal, très sec, débarrassé de la terre et des détritrus.

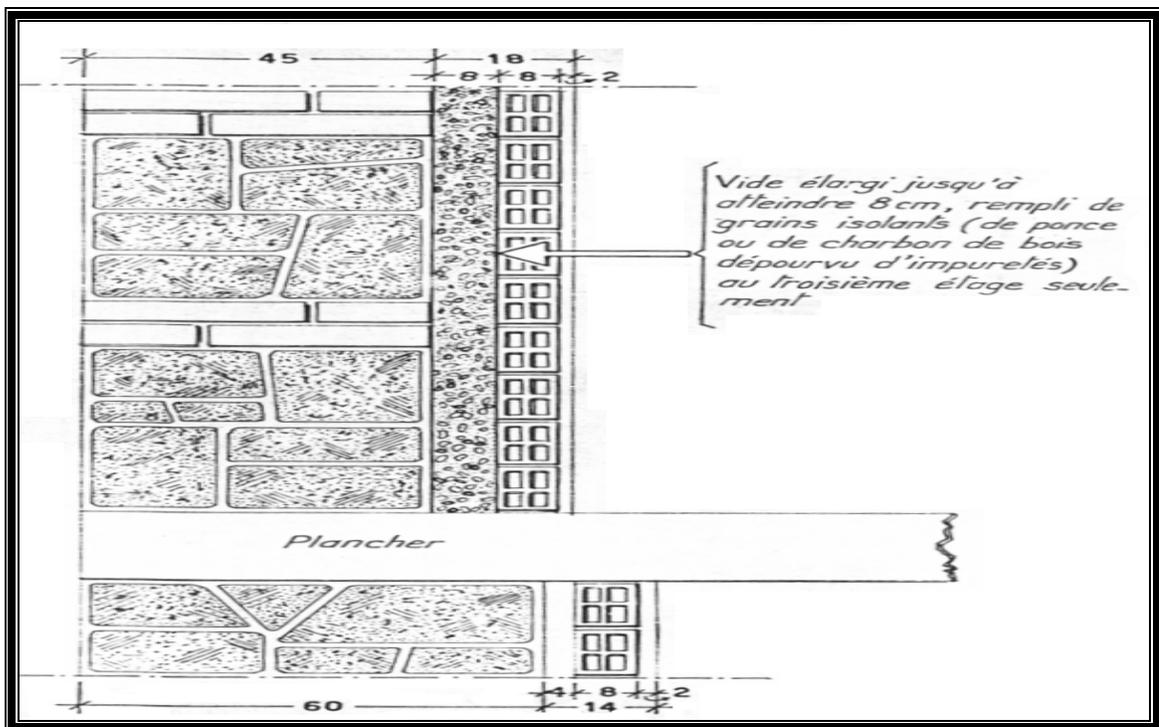


Fig. 3 : Profil d'un mur en granite, à Agri, doté d'un contre-mur de protection contre la condensation

C. Pluie battante et blocs de granules de calcaire à Palerme

(Refroidissement dû à la pluie battante)

Les maisons du quartier de S.Rosalia, à Palerme, s'élèvent sur deux, ou trois étages. Les murs porteurs sont formés de blocs creux de calcaire.

Le diagnostic a révélé que les manifestations de l'humidité apparaissent de la manière suivante :

- exclusivement du côté nord-ouest et touche tous les étages ;
- prédominant aux extrémités des édifices, et accentuées aux angles ;
- sont particulièrement prononcées du mois de janvier au mois d'avril, prenant la forme d'une stillation qui descend des murs sur le plancher.

Le premier et le dernier point s'expliquent par le fait qu'à Palerme la pluie battante provient du nord-ouest et que sa période annuelle de fréquence normale s'étend de janvier à avril. L'humidité est donc causée par une dualité :

- effets climatiques : vents froid et pluvieux
- matériaux de construction : blocs creux de calcaire

Il est à rappeler que, l'humidité **ne dépend pas d'une infiltration d'eau de pluie**, mais d'un refroidissement des murs exposés aux vents pluvieux. L'examen des échantillons en laboratoire a montré que la composition des blocs est très variable et que leur poids spécifique réel varie autour de 2.

La valeur correspondante de λ est de 1,1. Le calcul de résistance thermique des deux types de blocs examinés a donné les résultats suivants :

- Pour un bloc à 13 cavités, $R = 0,68 \frac{m^2.h.^{\circ}c}{cal}$;
- Pour un bloc à 12 cavités, $R = 0,70 \frac{m^2.h.^{\circ}c}{cal}$ (fig.IV); d'où on peut dire que se sont des Valeur plutôt basses.

Remède

La solution sera basée sur deux axes, le premier sera consacré à combattre le refroidissement du mur, le second, contre l'excès de vapeur d'eau. Alors voici, les quatre propositions¹ :

1. augmenter la protection thermique des murs Nord-ouest, sur toute leur hauteur, et des murs ouest, mais uniquement à la hauteur de la chambre d'angle ;
2. protéger les appuis de fenêtres;
3. installer des ventilateurs électriques dans toutes les cuisines, pour éliminer la vapeur d'eau qui tend à envahir tout l'appartement ;
4. dans les maisons couvertes d'un toit, dont le contre-plafond est envahi de mouillures, réduire éventuellement la ventilation des combles en hiver et étendre sur le dit contre-plafond des panneaux de polystyrolène lourd expansé de 2 cm d'épaisseur, retenus par des briques posées çà et là.

La meilleure solution pour augmenter la résistance thermique des murs nord-ouest des immeubles de trois et quatre étages est d'appliquer sur le paros intérieur taché un revêtement de 2 cm de polystyrolène expansé de 2 cm et un contre-mur adhérent, sans vide d'air, en briques de

¹ Massari Giovanni, *bâtiments humides et insalubres*, Editions Eyrolles, p 450, Paris, 1971

3 à 3,5 cm (fig.4). Une solution moins efficace, mais suffisante et d'exécution plus facile, dans les immeubles de deux étages, est le revêtement extérieur en briques pleines. Dans les constructions à deux étages, étant donné que les pièces d'angle sont très petites, il vaut mieux éviter le contre-mur intérieur qui réduirait encore l'espace, et opter pour le revêtement extérieur.

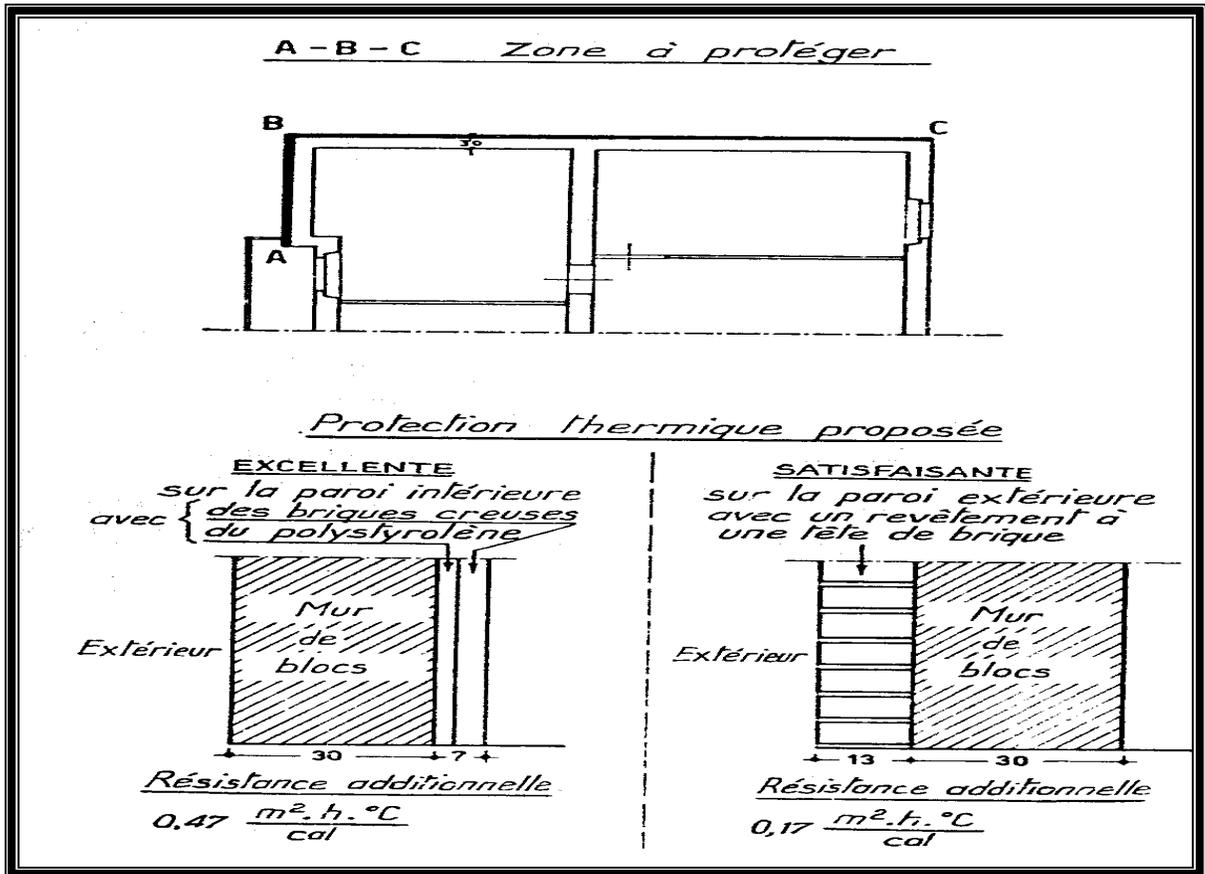


Fig. 4 : deux solutions différentes pour augmenter la protection thermique des maisons humides de S.Rosalia à Palerme.

2- Protection d'œuvres d'arts, envahis par l'humidité

Monument	Taux d'humidité et distribution	Diagnostic	Assainissement proposé
-Réfectoire des grâces à Milan -Détrempe de la « cène » de Léonard de Vinci (sur un mur en briques)	-Répandue dans le plancher et tous les murs périmétriques sur 2m de haut. max : 10,9 %. -la peinture endommagée se trouve au-dessus de la partie humide.	Hum de remonté provenant du sous-sol. Action, sur la peinture, d'une hum. De condensation intermittente. Il n'y a pas action directe de l'hum. Ascendante à l'envers de la pellicule chromatique, contrairement à ce qu'on avait d'abord cru par erreur.	Interception de l'hum. Ascendante par trois travaux de maçonnerie : radier, tranchée, barrage dans l'épaisseur du mur.
Palais ducal de Mantoue- fresques de Mantegna dans la salle des époux (sur un mur en briques)	Absente Max : 1,01%	Hum. De condensation résultant d'un refroidissement hivernal du mur très épais, (1,40m) orienté au nord. La pénétration de la pluie battante est exclue, contrairement à ce qu'on avait cru d'abord, par erreur.	Léger chauffage permanent du local, au printemps et en hiver (n'excédant pas 15°). Il vaut mieux, si possible, chauffer toute la masse du plancher.
Eglise de la Minerva à Rome- fresques de F.Lippi dans la chapelle de saint-thomas (maçonnerie mixte)	-Répandue dans les parois sur 1,80 m de haut. Max : 12% dans la plinthe.	Analogue à celui de la « cène »	Interception de l'hum. Ascendante par des travaux de maçonnerie : radier, tranchée, barrage éventuel dans l'épaisseur du mur.
Église de l'Aracoeli à Rome- chapelle de Pinturicchio.....	Murs presque secs.	Hum. Surtout de condensation	Fermeture de la chapelle : de grandes baies vitrées, pour éviter les écarts de température. Léger conditionnement de l'air.
Saint -Marie-de - Castel-Seprio (Varese) -fresques byzantines...	Faible quantité d'eau dans les murs périmétriques (6% jusqu'à 80 cm de hauteur). Grande quantité dans le sous-plancher (de 14 à 22%)	Hum. De condensation	Construction d'un radier sec, chauffage du seul plancher au moyen de résistances électriques incorporées, (revêtement de silicone). émission conseillée : 2,8kw.

ANNEXE – III -

**Classification des maçonneries selon leur degré de salubrité,
Calculé d'après leur résistance thermique :**

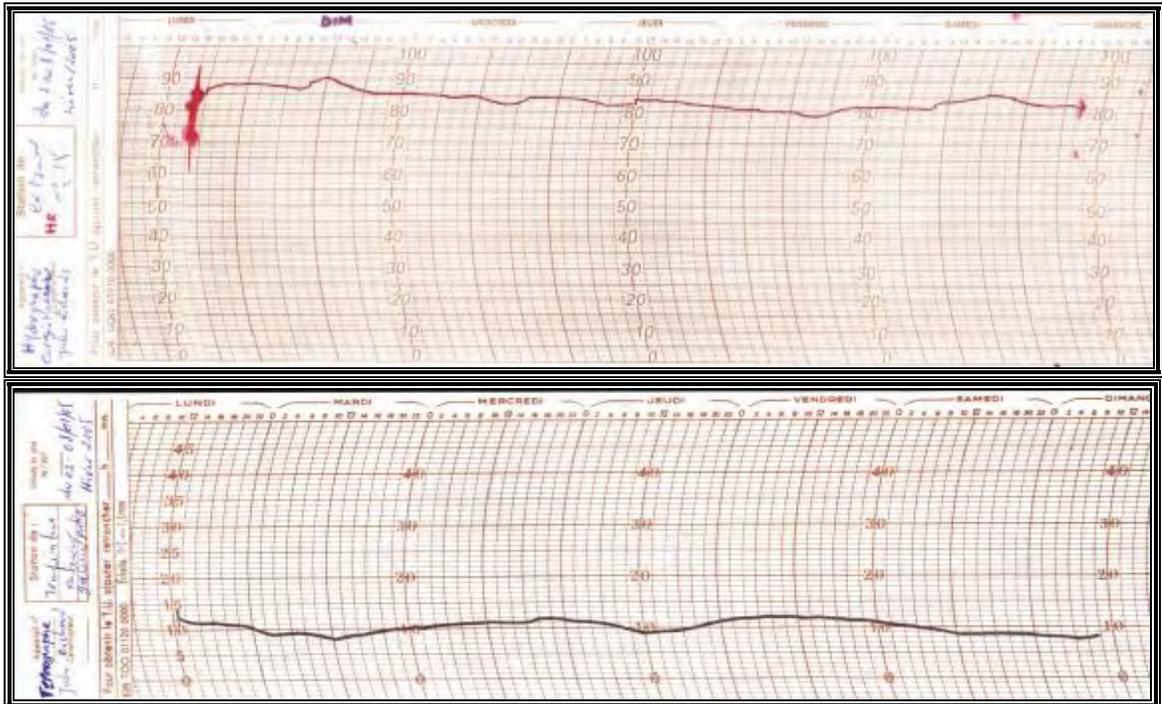
Type de maçonnerie	Épaisseur en m	Résistance thermique total R=1/K	Protection thermique Température moyenne de janvier	
			T < 4 °C	T > 4 °C
Mur en brique pleines ordinaires ($\lambda=0,67$)	0,55	1	Suffisante	excellente
	0,50	0,90	toléré. Dans certain cas.	excellente
	0,45	0,83	insuffisante	suffisante
	0,42	0,80	insuffisante	suffisante
Mur en matériaux lourds (p.s.de 2,5 à 3) : gneiss, basalte, marbre, calcaire dur	0,75	0,46	mauvaise	mauvaise
Mur en grès calcaire tendre, pierres de taille (p.s. de 1,8 à 2,2)...	0,75	0,82	insuffisante	suffisante
	0,60	0,70	insuffisante	insuffisante
Mur en tuf léger (p.s. 1,4 ou 1,6).	0,65	1,28	suffisante	excellente
	0,60	1,18	suffisante	excellente
	0,50	1	suffisante	excellente
Mur en briques creuses ordinaires (avec vides d'air parallèles aux parois)	0,40	1	suffisante	excellente
	0,30	0,80	insuffisante	suffisante
Mur double : paroi extérieure en brique pleine (15 cm) et paroi intérieure en brique creuse. vide d'air intermédiaire de 10cm isolé hermétiquement.	0,40	1	suffisante	excellente
Idem : paroi ext. En briques creuses 0,15 ; contre mur intérieur en briques creuses sur tranche (0,08) ; vide d'air intermédiaire d'environ 0,10m. Isolé hermétiquement	0,3 ou 0,33	0,8	insuffisante	suffisante
semelle ou colonnes en béton ordinaire de ciment armé ; cas typique de l'ossature ordinaire	0,40	0,50	mauvaise	mauvaise
Idem : colonnes de 0,40 m revêtue, à une distance de 1 cm, de brique creuses posées sur tranche (8 cm)	0,50	0,80	insuffisante	suffisante
Idem : colonnes de 0,30 cm d'épaisseur. En béton. Avec un contre-mur en briques creuses en panneresse (15 cm) et un vide d'air de 5 cm, isolé hermétiquement.	0,50	1	suffisante	excellente
11. Mur en béton bims ou de scories (p.s.≤1), de 30 cm d'épaisseur	0,30	1	suffisante	excellente
12. Idem : béton bims ou de scories d'une épaisseur de 20cm, avec contre-mur en briques creuses en boutisse(10cm) et vide d'air intermédiaire de 5 ou 6cm, isolé hermétiquement	0,35	1,09	suffisante	excellente

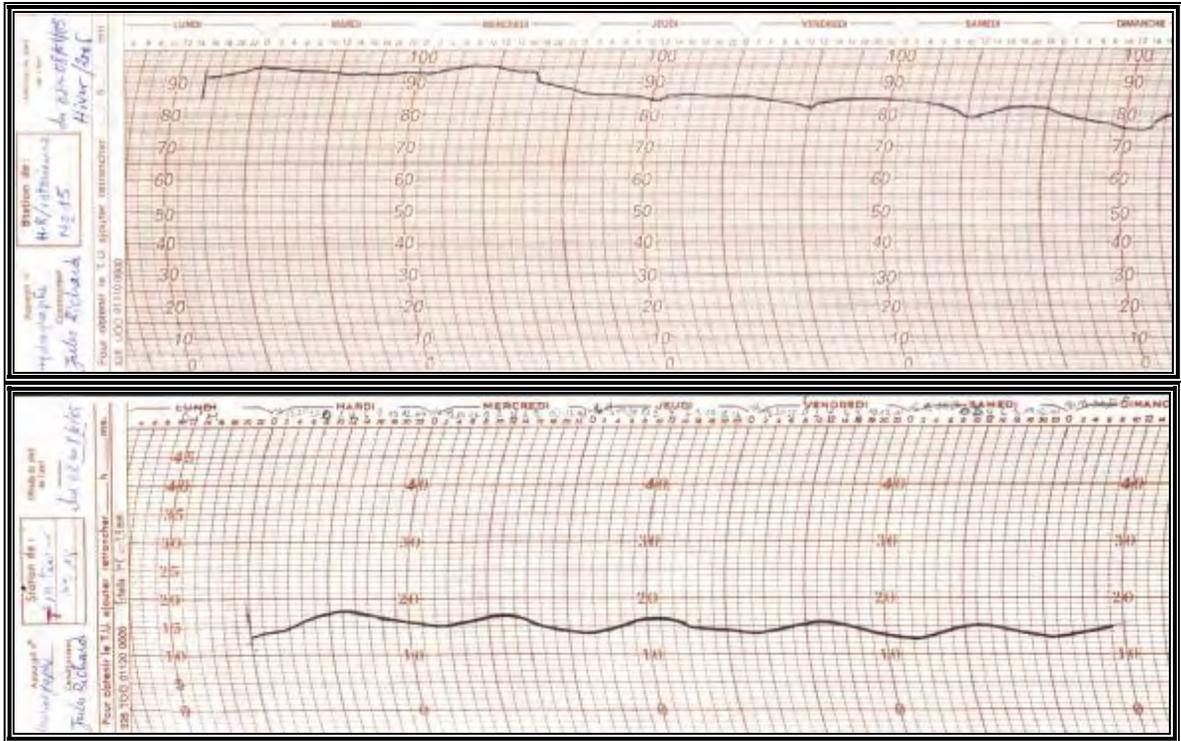
Planchers de locaux situés au-dessus de sous-sols froids :				
plancher en béton armé et brique dont l'épaisseur portante est de 10,15 ou 20cm ; carreaux de marbre ou à la vénitienne ; enduit. Epaisseur totale :				
10cm + 7cm	0,17	0,58	Mauvaise	insuffisante
15cm + 7cm	0,22	0,62	Mauvaise	insuffisante
20cm + 7cm	0,27	0,65	Mauvaise	insuffisante
Idem : avec linoléum deb 3 mm d'épaisseur au lieu des carreaux ; même résistance thermique que dans le cas précédent	0,15 0,20 0,25	0,58 0,58 0,65	Mauvaise mauvaise mauvaise	insuffisante insuffisante insuffisante
Idem : avec parquet sur une armature formant vide d'air	0,17 0,22 0,27	1,08 1,12 1,15	excellente excellente excellente	excellente excellente excellente
16. voûte en briques d'une épaisseur d'une demi brique (12 cm), avec remplissage ; plancher de carreaux ou de linoléum ou à la vénitienne.	0,19 ou 0,26	0,72	insuffisante	Tolérable dans certains cas
Planchers posés à même le sol et murs adossés à des terre-pleins.				
Asphalte sur béton à base de ciment maigre, faisant masse avec le terrain.	0,10	0,50	mauvaise	Mauvaise
Pavement formé de couches de briques sur asphalte, posé à son tour, sur un lit de ciment maigre, faisant masse avec le terrain	0,15	0,60	mauvaise	insuffisante
Idem avec des briques posées de champ.	0,22	0,70	insuffisante	Protection incertaine Contre la Condensation en été
Plancher ou parquet sur lattes de bois formant vide d'air, posé sur structure en béton maigre faisant masse avec le terrain	0,15	1,10	excellente	excellente
Plancher en ciment, carreaux de marbre factice, ou linoléum ou à la vénitienne, sur une structure portante à voûte ou en brique creuses sur un vide d'air.	-	0,83	insuffisante	Protection incertain contre l'humidité de condensation de l'été
Idem : sur un petit massif de matériau léger ordinaire au-dessus d'un radier en gravier, en pierrailles ou en tuf	0,40	0,72	insuffisante	Protection incertaine contre l'humidité de condensation de l'été
Couvertures :				
plancher de terrasse en ciment armé et briques, dont l'épaisseur portante est de 10,15 ou 20 cm, avec une couche de matériau léger ordinaire d'une épaisseur moyenne de 8 cm, en raison de la pente ; asphalte et pavement de briques ou de dalles de ciment ; épaisseur totale moyenne	0,27 0,32 0,37	0,60 0,66 0,70	mauvaise mauvaise insuffisante	mauvaise insuffisante tolérable dans certains cas
Idem : et contre plafond en plâtre sur armature de linteaux formant vide d'air sous le plancher. Épaisseur totale moyenne (outre le vide d'air).	0,27 0,32 0,37	0,82 0,88 0,92	insuffisante tolérable dans certains cas tolérable dans certains cas	suffisante excellente excellente
Plancher en béton armé et brique, avec couche de ponce et de scories de 8 cm d'épaisseur moyenne	0,27	0,74	insuffisante	Admise dans Certain cas

	0,32 0,37	0,80 0,84	insuffisante insuffisante	// //
Idem : mais avec un contre plafond en plâtre ; épaisseur moyenne (outr le vide d'air)	0,27 0,32 0,37	0,94 1 1,06	Admise dans Certain cas suffisante suffisante	Excellente excellente excellente
plancher en béton armé et briques ; couche de liège goudronné, d'une épaisseur de 5 cm, insérée entre le plancher et le matériau ordinaire.	0,25 ou 0,35	1,20 ou 1,30	excellente	excellente
Idem : avec une couche de liège de 3 cm.	0,25 ou 0,35	1	suffisante	excellente
Plancher à poutrelles de fer avec maçonneries habituelles pour les pentes, asphalte et sol ; en dessous se trouve un vide d'air avec contre- plafond à armature métallique et plâtre.	-	0,90	Tolérable dans certains cas	suffisante
pan de toit simple à poutrelles et soliveaux couverts de tuiles, d'ardoises, d'éternit ou de tôle, avec des joints scellés ou soudés, étanche à l'air, mais sans radier	-	0,20	mauvaise	mauvaise
Idem : avec doublage en planches fixées ; sous les poutres du toit.	-	0,58	insuffisante	insuffisante
Idem : avec plancher horizontal en planches jointes légères.	-	1,10	excellente	excellente

ANNEXE – IV -

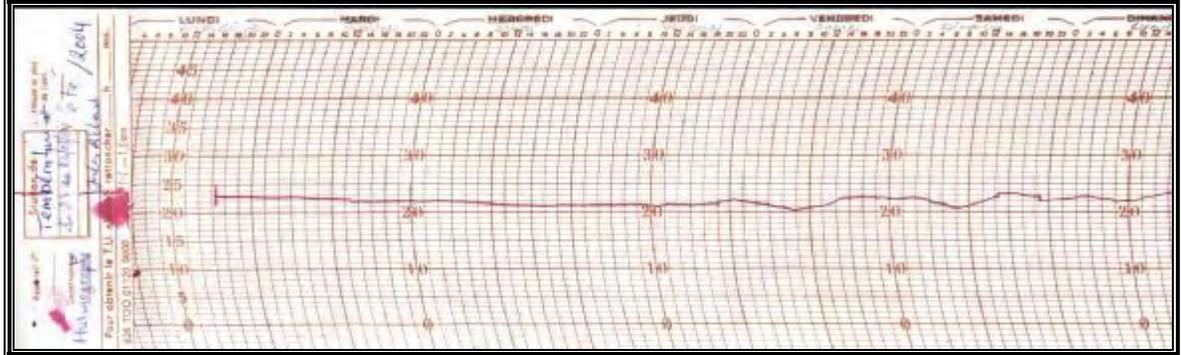
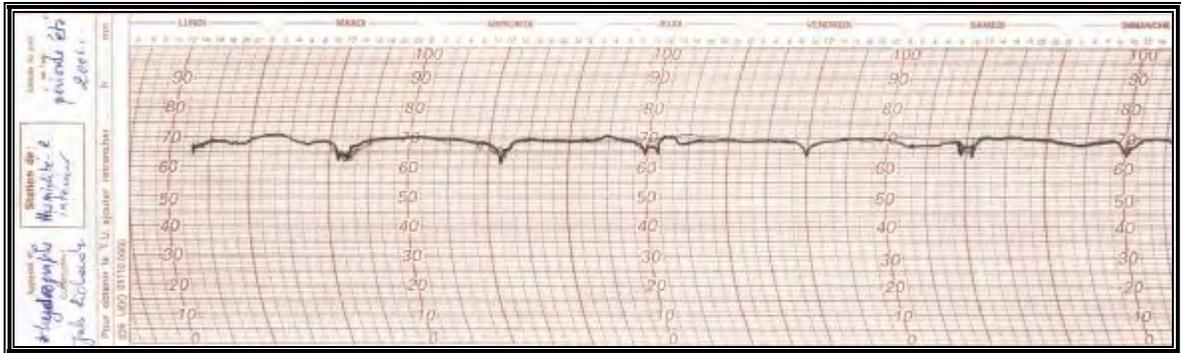
Mesures de températures et d'humidités relatives à l'intérieur de la chambre et à l'extérieur (Galerie/patio) d'une maison vernaculaire. Médina de Constantine, période : 01 au 08 janvier 2005





Mesures de températures et d'humidités relatives à l'intérieur de la chambre et à l'extérieur (Galerie/patio)d'une maison vernaculaire. Médina de Constantine, période: 27juillet au 03août 2004





ABSTRACT

Balance sought between thermal comfort, visual comfort and total cost became the equation to be solved for any contemporary project. This balance must be preserved during rehabilitation, and if possible with more enthusiasm as far as an inheritance, which suffers of serious pathologies, is concerned. The examination of vernacular architecture enables us to draw some lessons: we discover knowledge to make, a style, a methodology of approach, harmony which reigns between the man, nature and its culture. It seems that the major concern of some designers who had restored the old buildings, already undertaken within the framework of the rehabilitation operations in the town of Constantine is devoted towards the consolidation of the bearing structure and the sealing of the envelope, whereas the problems of upward condensations and moisture were never tackled.

The present study is interested on the phenomenon of the moisture which appears in the vernacular dwelling in Constantine. The objective is to integrate, this important climatic parameter in the project of rehabilitation of the old buildings. Being considered, on one hand, like the enemy number one of construction and in addition, it constitutes a determining factor of human comfort. The statistical, quantitative and bioclimatic analysis of Constantine climate allowed to determine the climatic characteristics of the city and to define the wet and cold season which influences directly on thermal and hydrometrical indoor environment conditions, besides evaluating the needs for physiological comfort. The analysis results showed that the climate of Constantine is "semi-arid" and contrasted at the same time. It is characterized by cold and wet winter where the summer is hot and dry. The qualitative analysis revealed the strong relationship which exists between vernacular construction and the climate, as well as the manners and social-cultural practices.

Investigation campaigns established for the two periods: summer 2004 and winter 2005 revealed that there exists indeed, risks of surface and interstitial condensation of both external and some interior walls. The relative humidity measurements confirmed also that the water content of the air inside the room tested is too high and reach 95 %. These results are perceptible only in winter period.

The cleansing of the walls invaded by the moisture of condensations can be resolved by simple processes. They consist of the addition of layers of materials, selected according to their characteristics thermo-physics, in order to improve thermal and/or hydrometrical resistance of the walls. A simulation was carried out using a modest data-processing program, conceived by the author. This one contributed positively in the search of a better thermal and hydrometrical performance of the walls to fight against the forms of condensations.

Natural ventilation in particular cross ventilation presents an efficient potential on improving direct human and indoor comfort by providing fresh new air, in order to ensure a good quality of the air, by evacuating the excess of moisture, the smell and also to avoid the risks of condensations.

Cross ventilation is defined as the situation in which outdoor air can flow from openings on one side of the building (the inlet openings, or pressure zones around the building) through the building and via openings on suction sections of the building. This kind of ventilation is required for both seasons in the present study. As in some case it may be impossible or quite complicated to provide effective cross ventilation, special design can be provided to solve the problem. This can be concretized using passive process; the study suggests a wind catcher which acts as a chimney in winter and as wind catcher in summer in order to provide effective natural ventilation.

ملخص

إن التوازن الذي يتم البحث عنه بين الرفاهية الحرارية، الرفاهية البصرية والكلفة الإجمالية، أضحي المعادلة الموضوعية للحل بالنسبة لكل مشروع معاصر. هذا التوازن يجب المحافظة عليه أيضا في عملية إعادة التأهيل، وان أمكن، بكل حزم وحماس لما يخص تراث مبنى مهدد بتصدعات وأعراض (مرضية) خطيرة.

إن الإطلاع على الهندسة المعمارية لمباني المدن العتيقة "الأصلية"، تساعدنا على استنباط دروس: حيث تكتشف، تقنيات، طراز، منهجية عمل، باختصار: انسجام تام يسود بين الإنسان، الطبيعة والثقافة.

يبدو أن الاهتمام الأكبر لبعض المصممين لمشاريع التدخل على المباني القديمة، والتي أنجزت في إطار عمليات الترميم وإعادة التأهيل في مدينة قسنطينة، كرس فقط في تدعيم الهيكل الحامل وكتيمية الغلاف الخارجي للمباني، بينما لم يأخذ بعين الاعتبار مشاكل الرطوبة، النداءة والمياه التصاعدية.

هذه الدراسة تهتم إذن بظاهرة الرطوبة التي تبرز في السكنات العتيقة بقسنطينة. الهدف من ذلك هو إقحام هذا العنصر المناخي المهم في مشاريع إعادة تأهيل المباني القديمة. حيث يعتبر من جهة العدو رقم واحد للمباني ومن ناحية أخرى عنصر حاسم بالنسبة لرفاهية الإنسان.

إن التحليل الإحصائي، الكمي والبيوكليماتيكي لمناخ مدينة قسنطينة سمح بتحديد خصوصيات مناخ هذه الأخيرة وكذا التعريف على الفصل البارد والرطب، المؤثر مباشرة على الجو الداخلي من حيث الحرارة والرطوبة. كما أمكن تقييم احتياجات الرفاهية الفزيولوجية.

لقد أثبتت الدراسة أن مناخ قسنطينة "نصف جاف" وفي نفس الوقت متناقض يمتاز بشتاء بارد ورطب وصيف حار وجاف.

إن التحليل النوعي (الكيفي) بين العلاقة القوية الموجودة بين البناية العتيقة والمناخ من ناحية، والعادات والتقاليد (الاجتماعية والثقافية) من ناحية أخرى. هذا التقارب سمح بإبراز العوائق المناخية بالنسبة للخصوصيات المرفولوجية، الفضائية والوظيفية.

إن نتائج البحوث الميدانية التي أنجزت خلال فترتين: صيف 2004 وشتاء 2005، بينت وجود خطر حقيقي للرطوبة السطحية والباطنية للجدران الخارجية وبعض الجدران الداخلية.

كما أكدت نتائج قياس رطوبة الهواء داخل البيت المخصص للدراسة على أن النسبة عالية جدا تقدر ب: 95 % . مع العلم ان هذه النتائج مقتصرة على فصل الشتاء فقط.

إن تجفيف الجدران المكتسحة بالرطوبة نتيجة يمكن الحصول عليها بطرق سهلة. و تتمثل في إضافة طبقات من مواد البناء (عازل) تختار حسب الخصوصيات الفيزيائية والحرارية من اجل تحسين المقاومة الحرارية ومنع تنقل بخار الماء داخلها.

لذلك أجريت "صورية" عن طريق برنامج معلوماتي بسيط حضر من طرف المؤلف بهدف الوصول إلى أحسن نتائج ممكنة لتفادي كل أنواع تكثف بخار المياه.

إن التهوية الطبيعية وخاصة العرضية منها، تلعب دورا أساسية في تحسين الرفاهية الداخلية، حيث يتجدد الهواء فتزال الكمية الزائدة من الرطوبة، الروائح الكريهة وتجنب حدوث النداوة السطحية. يجب أن تكون التهوية الصحية دائمة، مطلوبة سواء في الصيف أو في الشتاء، وتحت كل أنواع المناخ. و في حالة ما إذا أستحال الحصول على تهوية عرضية يمكن تحقيق ذلك بطرق أخرى غير مكلفة كالتقنية التي استعملت في هذه الدراسة والمتمثلة في قناة تهوية ذات إجتناب طبيعي أو حراري.

Résumé :

L'équilibre recherché entre confort thermique, confort visuel et coût global est devenu l'équation à résoudre pour tout projet contemporain. Cet équilibre doit être préservé lors d'une réhabilitation, et si possible avec plus d'enthousiasme quant il s'agit d'un patrimoine menacé de pathologies graves.

L'examen de l'architecture vernaculaire, nous permet d'en tirer des leçons : nous découvrons un savoir faire, un style, une méthodologie d'approche, bref. Une harmonie qui règne entre l'homme, la nature et sa culture.

Il semble que la préoccupation majeure de certains concepteurs de projets d'interventions sur le bâti ancien, déjà entrepris dans le cadre des opérations de réhabilitations dans la ville de Constantine est consacrée vers la consolidation de la structure portante et l'étanchéité de l'enveloppe, alors que les problèmes de condensations et d'humidité ascensionnelles n'ont jamais été abordés.

La présente étude s'intéresse au phénomène de l'humidité qui apparaît dans l'habitation vernaculaire à Constantine. L'objectif est d'intégrer, cet important paramètre climatique dans le projet de réhabilitation des bâtiments anciens. Étant considéré, d'une part, comme l'ennemi numéro un (01) de la construction. Et d'autre part, il constitue un facteur déterminant du confort humain.

L'analyse statistique, quantitative et bioclimatique du climat de la ville de Constantine a permis de déterminer les caractéristiques climatiques de la ville et de définir la saison humide et froide qui influe directement sur l'ambiance thermique et hygrométrique intérieure. Et puis d'évaluer les besoins de confort physiologique. Il s'avère que le climat de Constantine est « semi-aride » et au même temps contrasté, caractérisé par un hiver froid et humide et un été chaud et sec.

L'analyse qualitative a révélé d'une part, la relation forte qui existe entre la construction vernaculaire et le climat, et d'autre part les mœurs et pratiques socioculturels. cette approche a permis de mettre en évidence certaines contraintes climatiques, eu égard aux caractéristiques morphologiques, spatiales et organisationnelles

Les campagnes d'investigations établies pendant les deux périodes : été 2004 et hiver 2005 ont révélé qu'il existe effectivement, des risques de condensation superficielle et interstitielle des murs extérieurs et quelques murs intérieurs. Les mesures hygrométriques ont confirmé aussi, que le taux d'humidité de l'air à l'intérieur de la chambre testée est trop élevé et qui peuvent atteindre 95 %. Ces résultats sont perceptibles uniquement en période hivernale.

L'assainissement des parois envahis par l'humidité de condensations peut s'opérer par des procédés très simple. Ils consistent en l'addition de couches de matériaux, sélectionnées selon leurs caractéristiques thermo-physiques, en vue d'améliorer la résistance thermique et/ou hygrométrique des parois. Une simulation a été effectuée à l'aide d'un modeste programme informatique, conçu par l'auteur. Celle-ci a contribué positivement à la recherche d'une meilleure performance thermique et hygrométrique des parois pour lutter contre les formes de condensations.

La ventilation naturelle notamment la «ventilation transversale» revêt une importance capitale dans l'amélioration du confort intérieur par le renouvellement d'air neuf, afin d'assurer une bonne qualité de l'air, en évacuant l'excès d'humidité, les odeurs et également éviter les risques de condensations. La ventilation "sanitaire" ou "hygiénique" doit être permanente: exigée en hiver comme en été et doit être assurée sous toutes les conditions climatiques. Dans le cas où il est difficile de l'obtenir au moyen d'une ventilation transversale. Ceci peut être concrétisé à l'aide de procédés passifs, comme celui adopté dans le cas de cette étude : Il s'agit d'une cheminée à tirage naturelle ou thermique.

