

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mentouri de Constantine

Faculté des Sciences de la Terre de Géographie et de l'Aménagement de Territoire

Département d'Architecture et d'Urbanisme

Memoire

Pour l'obtention du diplôme de Magistère

Option: ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

Présenté par

Mr DJOUIMAA Ahmed

THEME

REALISATION ET VERIFICATION DE LA PERFORMANCE
THERMIQUE D'UNE TOUR A VENT POUR UN
RAFRAICHISSEMENT PASSIF DANS LES REGIONS CHAUDES
ET ARIDES. CAS DE HASSI MESSAOUD

Jury d'examen :

Président : Pr ; A. Belhamri Université Mentouri – Constantine.

Encadreur: Dr. Y. Bouchahm Université Mentouri – Constantine

Examineur : Pr ; F. Bourbia université Mentouri – Constantine

Examineur : Dr. S. Abdou Université Mentouri – Constantine

Juin 2008

Introduction générale

La question du changement climatique s'est installée durablement au premier plan de l'actualité et des préoccupations des opinions publiques. Longtemps confinée aux milieux scientifiques et aux groupes écologiques, elle a émergé depuis quelques années au niveau gouvernemental avec notamment la signature du Protocole de Kyoto. Mais ce sont surtout les dérèglements météorologiques récents (canicules à répétition, cyclones dévastateurs...) qui en ont fait, depuis peu, un sujet d'actualité quasi permanent, bien que leurs liens avec le changement climatique ne soient pas, à ce jour, établis de façon certaine. Parallèlement, les progrès de la connaissance scientifique ont transformé peu à peu ce qui était au départ une simple hypothèse « un réchauffement climatique causé par l'homme » en une quasi-certitude, même si beaucoup d'inconnues subsistent encore quant à l'ampleur exacte et au rythme du phénomène (M. J. Dermagne, 2006).

Par son actualité, par les incertitudes mêmes qui l'entourent encore, par l'ampleur et la diversité des conséquences possibles pour l'humanité, ce sujet paraît donc constituer un thème tout à fait pertinent pour nourrir un dialogue renouvelé entre la communauté scientifique et les citoyens.

Ces derniers ont le souhait et sont en droit d'être pleinement informés de ce que la science sait et de ce qu'elle ne sait pas (ou pas encore) du phénomène, des conséquences qu'il est susceptible d'entraîner sur les activités humaines, ainsi que des voies, pour partie encore hypothétiques aujourd'hui, qui permettent d'en limiter les effets ou de s'y adapter (M. P. Rouvillois, 2006).

Ce dernier aspect est d'ailleurs capital. Rien ne serait pire que de tomber dans une vision apocalyptique des choses. Tout au long de leur histoire, les hommes ont fait la preuve de leur exceptionnelle capacité d'adaptation à des situations nouvelles. Sans aucun doute, l'humanité est-elle confrontée à un nouveau défi, d'une ampleur inhabituelle et avec des échéances de temps qui, peuvent sembler extrêmement courtes. Cependant, débattre du sujet, n'est-ce pas déjà se préparer à relever le défi ? (groupe de réflexion académies et conseil économique et social, 2006).

Le défi est international. En effet, les émissions des gaz à effet de serre, objet du protocole de Kyoto, notamment les émissions du plus important d'entre eux, le CO₂, intéressent l'ensemble de la planète.

Il revient donc à la communauté internationale de décider des moyens permettant de réduire ces émissions. Tel est l'objet des conférences internationales successives initiées par le sommet de Rio

(Conseil économique et social, Académie des sciences, Académie des technologies, Académie des sciences morales et politiques, 2006).

Ces changements climatiques sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observé au cours de périodes comparables. La concentration humaine sous forme de ville participe aussi à ce changement climatique.

Une ville est principalement faite de ciment, de goudron, de briques et de pierre. La température d'un endroit donné étant très dépendante des caractéristiques de sa surface, on observe qu'une ville est souvent plus chaude qu'une zone rurale. Cet « îlot de chaleur » est aussi dû au nombre élevé d'habitants et à l'émission de chaleur causée par les activités humaines. Ce phénomène, connu des chercheurs du climat depuis le XIX^e siècle, est baptisé "îlot de chaleur urbain" (Oke 1976, 1982).

Cette intensification de l'urbanisation a apporté dans son sillage beaucoup de changements jusqu'ici inconnus non seulement sur les humains (maladies liées aux encombrements), mais également sur d'autres formes de vie en générant des changements physiologiques de la flore urbaine et de la faune relatifs à leur croissance et leur diversité. (<http://www.freefoto.com>) L'ensemble des paramètres sus indiqués se rassemble en un phénomène majeur spécifique aux milieux urbains qui est « l'îlot de chaleur urbain (ICU) » qui ne cesse d'attirer l'attention des chercheurs : urbanistes, architectes et météorologues vu qu'il constitue un véritable danger qui menace la survie des populations et la durabilité des villes.

Aujourd'hui, où le projet urbain est devenu d'actualité, des questions se posent à nouveau et les réponses doivent être traitées à partir des connaissances acquises en matière de « microclimatique urbaine », qui devient par conséquent un sujet de recherche.

Afin de sauvegarder notre planète, le changement humain en matière d'utilisation des ressources énergétiques est urgent. Grâce à certaines applications, la minimisation des émissions de gaz fluoré pour les estimations; la moitié de ces réductions d'émissions potentielles peuvent être réalisées avec des avantages directs supérieurs aux coûts directs. Parmi les problèmes d'intensification de l'urbanisation, l'utilisation massive de la climatisation, sous forme de centrale, split, cassette ou monobloc, la mise en marche de ces machines à froid dépend directement de gaz très nocif au climat qui est le CFC. Ce gaz participe au réchauffement de la planète.

Le recours aux énergies renouvelables est plus que nécessaire, cette énergie inépuisable est propre et se trouve solution pour la diminution de l'utilisation de l'énergie fossile dans le domaine du bâtiment, le soleil, le vent, l'eau et la terre sont des ressources d'énergie nous permettant de chauffer ou de rafraîchir nos constructions sans nuire à la planète. Nos ancêtres ont pu s'acclimater et utiliser le climat, en réalisant des constructions qui s'adaptent aux conditions climatique et l'environnement ou ils se trouvent. Le retour aux concepts anciens dans le domaine du bâtiment diminuera l'utilisation abusive de l'énergie fossile.

Vu sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un potentiel en énergies renouvelables et non polluantes considérables (soleil, vent...). Pour cela, il est nécessaire de réfléchir sur les moyens d'exploitation de ces ressources.

L'exploitation de ces énergies au profit des populations est recommandée et l'investissement dans le sud serait justifié.

1.1 Problématique

Les nouveaux modèles architecturaux produits durant ces dernières décennies en Algérie, qu'on appelle « constructions modernes » sont de plus en plus inadaptées et gros consommateurs d'énergie.

Très souvent, ces constructions négligent les aspects climatiques, dont l'importance ne paraît pas aux yeux du propriétaire ni même du concepteur dans les premières étapes du projet. Ceci engendre des sensations d'inconfort des occupants une fois les constructions réalisées.

Pour pallier à ce problème d'inconfort, on a souvent recours à des dépenses supplémentaires de chauffage et de climatisation.

Ces dernières années une utilisation massive de climatiseurs au Sud et même au Nord est enregistrée en Algérie, ayant comme objectif la réduction de la surchauffe et l'obtention du confort d'été.

Alors que dans les climats chauds, il est possible de remédier à ce problème, simplement par des dispositions et procédés passifs adéquats ainsi que par un bon choix de matériaux, (A. Ould-henia, 2003).

Il y a une grande variabilité de facteur qui contribuent au changement climatique. Notre présente recherche vise d'une manière générale à contribuer à la recherche de solutions passives pour diminuer de l'utilisation massive des énergies fossiles et réduire l'utilisation des gaz à effet de serre qui augmente la pollution atmosphérique, abaissent la qualité environnementale et climatique. L'objectif général de ce travail vise à promouvoir un habitat et des techniques passives adaptés aux régions du sud à climat chaud et aride. Comment réduire la consommation énergétique dans les nouveaux projets ainsi que l'utilisation abusive de la climatisation artificielle et surtout les gaz (CFC) est l'objectif essentiel de ce travail. Ce travail propose une tentative d'approche architecturale bioclimatique. Cette approche a pour but d'améliorer la qualité du cadre bâti en développant un modèle conceptuel nouveau ou actualisé, d'une part en valorisant les ressources naturelles locales, et d'autre part en traitant l'information par des outils scientifiques. Cet objectif est réalisable grâce à l'utilisation d'un système de rafraîchissement évaporatif passif (Tour à vent) dans les climats chauds et arides.

Bien que cette méthode soit liée à une zone d'étude, elle est applicable aux régions à climats similaires (Maghreb, Afrique subsaharienne, Moyen orient, une partie de l'Asie, une partie de l'Amérique) (A. Ould-henia, 2003).

Constituant la plus grande région climatique de notre pays, le sud au climat chaud avec une amplitude minimum de 16°C, une température entre 42°C et 47°C durant les périodes les plus chaudes et une humidité très faible arrivant à moins de 10%, constitue un handicap à la fixation des populations dû à une situation d'inconfort climatique (Y. BOUCHAHM 2003).

Alors que ces régions hostiles possèdent une architecture ingénieuse ; les villes traditionnelles, Ksours et médinas sont des exemples vivants où l'équilibre et l'harmonie avec le climat sont les éléments essentiels de sa composition.

Les villes traditionnelles des zones arides offrent des espaces intérieurs et extérieurs réputés « Pratique » en toute saison, en particulier pendant la période estivale, cet effet est obtenu grâce à un filtrage subtil des facteurs climatiques, vent rayonnement solaire et température (A. Bennadji, 2000).

La ventilation naturelle est un des moyens déjà utilisés auparavant dans l'architecture des KSOURS au sud de l'Algérie. Exploitée sous plusieurs formes et sur plusieurs plans passant de la conception globale de la ville jusqu'à la conception de la maison ou une technique de rafraichissement au niveau de la maison, cette ventilation permet de créer un confort appréciable.

La ventilation naturelle à été utilisée sous plusieurs formes. La tour à vent est l'un des systèmes de rafraichissement passif rendant possible la ventilation naturelle diurne. L'utilisation de la ventilation naturelle à démontré son effet positif sur le refroidissement et le maintien du confort grâce à l'intégration du capteur à vent (tour à vent avec humidification en IRAN ou Malkaf en IRAQ et EGYPTE).

On peut obtenir une réduction de la température et ainsi faire circuler de l'air frais dans la construction en pleine canicule, et cela sans faire appel à l'utilisation d'autres sources d'énergie que le développement technologique contemporain et la croissance dynamique, ont imposés aux constructions dans la conception et la réalisation du cadre bâti.

Plusieurs constructions équipées de tour à vent ont été réalisées dans le monde, le monde ARABE et en IRAN par des chercheurs de réputation mondiale, a titre d'exemple on peut citer les réalisations de Hassen Fathy à GOURNA (1986), les travaux de N.Chalfoune (2000), le nouveau concept de tour à vent de N.Bahadori (1985) dont l'objectif était de surmonter un nombre d'inconvénients rencontrés dans les anciens modèles, les travaux et recherches de : Y. Etzion, D. Pearlmutter, E. Erell, I. A. Meir, 1997 dans le bâtiment du centre international pour les études du désert, Alvarez et Al, 1991 dans l'exposition universelle de Séville, 1992, N. V. Chalfoun dans le projet du Momra Rowdah environnemental. Les travaux de E. Erell, D. Pearlmutter, Y. Etzion, 2007 illustrent le rôle des tour à vent et l'eau dans la réduction des températures de l'air et l'augmentation du taux d'humidité dans les climats chaud et aride.

En Algérie, à Ouargla une cité de 60 logements moderne dans le quartier de sidi amrane a été réalisée par les frères Al manyaoui dans les années 80, cette cité évoque une conscience et une réponse inspirée de l'architecture traditionnelle, l'adoption du « MALKAF » ou « Capteur à

vent » qui a fait l'objet d'une dominance remarquable dans l'ensemble de ce projet, élément nouveau pour notre architecture, ayant pour but de modifier l'ambiance intérieure.

Malheureusement la majorité de ses capteurs à vent ont été fermés par les occupants de cette cité. Cela est dû à l'ignorance de l'utilité du capteur à vent et par peur de pénétration de poussière et insecte à l'intérieur des constructions.

Une recherche dans ce cadre a été lancée par Y. Bouchahm, 2003. L'intérêt de cette recherche était de :

- Etablir une étude analytique sur des différents paramètres agissant sur la performance du capteur à vent.
- Mise en place des simulations pour observer et corriger le comportement du système capteur à vents humidifié afin de déterminer les paramètres influant directement sur sa bonne performance thermique.

1.2 Objectifs de l'étude et Hypothèses :

Les techniques de refroidissement passives offrent une solution potentielle pour réduire l'utilisation de l'électricité des dispositifs de climatisation et l'utilisation des CFC qui participent au réchauffement de la planète.

De l'air peut être livré en attrapant le vent dans une tour (Capteur) à vent. Le refroidissement peut être réalisé en pulvérisant des gouttelettes microscopiques dans le courant d'air. Les objectifs de cette étude sont :

- L'exploration de l'applicabilité des modèles détaillés de simulation et de l'exactitude de leurs prévisions pour les bâtiments,
- L'évaluation des conditions locales de confort thermique dans des bâtiments avec ce système de refroidissement passif.
- L'établissement de la praticabilité technique et financière de ce système de refroidissement évaporatif passif,
- L'illustration de l'application des matériaux des systèmes de refroidissement passif,
- La mise en pratique du procédé pour ouvrir la porte à l'industrialisation de ces concepts,
- L'illustration de l'énergie et l'avantage environnementaux des conceptions des systèmes de refroidissement évaporatif passif pour les régions chaudes et arides,

La validation et la mise en épreuve des tours à vents et leurs potentiels afin de promouvoir une ventilation naturelle dans le but de refroidir passivement les constructions situées dans un

climat chaud et aride en l'occurrence la ville de Hassi Messaoud est l'objectif principal de ce travail.

La réalisation d'une tour à vents dans une construction déjà existante qui se développe sur deux niveaux à Hassi Messaoud permet de mettre en exergue le potentiel de cette tour.

Ces paramètres sont définis après comparaison entre les mesures prises à l'intérieur et celles prises à l'extérieur de la construction ou sera réalisée la tour à vent. Afin de déterminer le pouvoir de rafraichissement passif de la tour à vent, la série de tests sera faite sans l'utilisation du système d'humidification en première étape pour mesurer cet effet de rafraichissement par transfert de chaleur entre l'air et les matériaux de construction de la tour, puis en second lieu, mesurer cet effet en associant de l'eau en mettant en service le système d'humidification (rafraichissement évaporatif de la tour à vent). Dans cette comparaison, il sera tenu compte des éléments de base suivants :

Dimensions, forme, matériaux, composition, système d'humidification, système de protection contre les vents de sable, rapport entre les dimensions de la tour et celles de l'espace à refroidir, afin de mettre en évidence et valider son pouvoir pertinent dans la réponse thermique vis-à-vis du climat de la région. Ces éléments ont été déjà déterminés par le travail de recherche de Y. Bouchahm, 2003 (La Performance Thermique du capteur à Vent pour un Rafraichissement passif dans les régions Chaudes et Arides Cas de OUARGLA). Ce travail consiste à confirmer ou infirmer les résultats du travail qui a été fait à Ouargla.

La série de mesures des paramètres qui s'étalera sur la période entre le mois de Mai à Août sera la plate-forme du travail, et l'interprétation exacte de ces paramètres sera la réponse et la confirmation de ce qui a été démontré par simulation.

Ce travail permettra aussi d'évaluer le comportement de la tour à vent adapté à la construction et son effet sur l'intérieur soumis à des sollicitations climatiques, et d'examiner son rendement et ses résultats dans la régulation thermo - hygrométrique dans les deux cas, avec et sans utilisation du système d'humidification.

En général tout projet de construction doit tenir compte du climat et prendre soin d'examiner les possibilités d'introduire le système de refroidissement évaporatif passif qui induit une ventilation naturelle, pour concevoir des bâtiments bénéficiant du confort moderne et ne consommant qu'un minimum d'énergie.

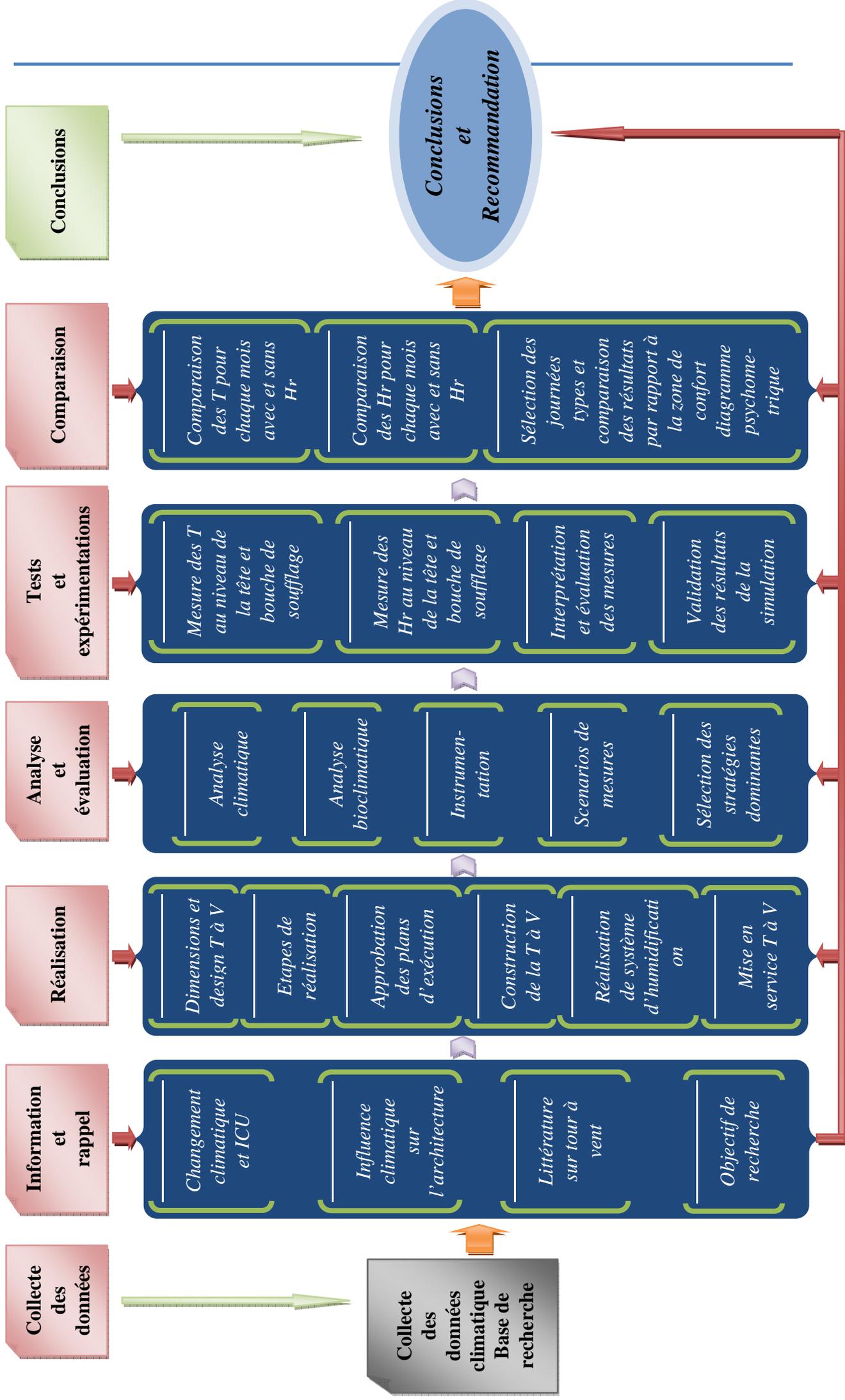
1.3 Méthodologie de Recherche :

Pour arriver à un résultat et concrétiser les objectifs de ce travail de recherche, la procédure utilisée s'organise en trois grandes parties : Une partie théorique issue d'une recherche bibliographique répartie en deux chapitres à travers laquelle l'objectif sera de préciser le domaine de recherche par rapport aux objectifs visés. Cerner et comprendre les éléments théoriques de base qui contribuent à la canalisation de la présente recherche vers les objectifs ciblés. Elle donnera des notions sur le changement climatique et les risques liés au réchauffement de la planète ainsi que des définitions et rappel du sujet en se basant sur les études précédents dans le domaine. Une deuxième partie qui concerne le volet pratique et qui consiste en la réalisation d'une tour à vent à Hassi Messaoud, faisant l'objet du quatrième chapitre. Cette partie de la recherche se basera sur les résultats de la simulation faite par Y. Bouchahm en 2003 pour la détermination de la forme, les dimensions et les caractéristiques techniques et développement de procédés servant à la réalisation de la tour à vent. Il sera expliqué dans ce chapitre les différentes étapes et contraintes rencontrées lors de la réalisation.

Et enfin une troisième partie intégrant quatre chapitre et qui consiste en une phase d'expérimentation, une campagne de mesure effectuée sur terrain (températures et humidités relatives de l'air mesurées au niveau de la tête de la tour et la bouche de soufflage) durant la période de mesure établi du début du mois de Mai à la fin d'Août. La deuxième phase est une interprétation et comparaison des résultats, dont le but est d'évaluer l'effet de rafraichissement évaporatif passif de la tour à vent à travers, une comparaison entre les mesures et une évaluation de l'efficacité de cette stratégie concernant la conception des constructions avec capteur à vent pour un confort thermique d'été et enfin la démonstration de l'importance de la tour à vent dans le refroidissement passive en se basant sur l'effet de masse (transfert de chaleur entre l'air et les matériaux de construction), et le refroidissement passif évaporatif en se basant sur l'effet de rafraichissement par évaporation d'eau.

Les recommandations seront établies afin de répandre l'utilisation de la tour à vent dans les nouvelles constructions déjà existantes.

Figure 1.1.: Organigramme de la méthodologie de recherche



Changement climatique

En un siècle, les concentrations de gaz à effet de serre ont augmenté de 50%. Principale conséquence : les températures augmentent. Ce phénomène est directement lié à l'activité humaine. La combustion de pétrole, de charbon et de gaz, le méthane produit par l'agriculture, les gaz fluorés issus de la climatisation des bâtiments et des voitures : toutes ces émissions modifient la composition de l'atmosphère et provoquent des perturbations climatiques.

Les Etats se sont entendus sur des objectifs de réduction de ces gaz à effet de serre. Cela demandera beaucoup d'efforts. Il faudra faire des choix ambitieux, mener des politiques volontaristes conduisant par exemple à investir dans le rail plutôt que la route. Cela signifie aussi la recherche de progrès dans l'isolation des bâtiments et recourir à l'introduction des facteurs climatique dans la construction, tandis que les industriels devront encore mieux maîtriser leurs consommations d'énergie.

Nos comportements devront évoluer car la lutte contre l'effet de serre passe par des changements d'habitudes de consommation, de modes de vie ; il faudra choisir des équipements sobres en énergie (habitat, climatisation, électroménager...) et les utiliser efficacement. Politiques nationales et gestes quotidiens doivent se conjuguer si l'on veut effectivement gagner un des défis majeurs du XXIème siècle.

2.1 Historique

Le climat se définit comme une description des moyennes et des extrêmes météorologiques en un endroit limité. Le climat est naturellement variable comme en témoigne l'irrégularité des saisons d'une année sur l'autre. [Cette variabilité est normale](#), et tient aux fluctuations des courants océaniques, aux éruptions volcaniques, au rayonnement solaire et à d'autres composantes du système climatique encore partiellement incomprises. De plus, notre climat aussi a ses extrêmes (comme les inondations, sécheresses, grêle, tornades et ouragans), qui peuvent devenir dévastateurs.

Cependant, depuis quelques décennies, un certain nombre d'indicateurs et d'études montrent que le climat se réchauffe à l'échelle du globe. Un phénomène inquiétant qui nous interpelle sur nos activités massivement émettrices en gaz à effet de serre.

- En 1824, Joseph FOURIER, physicien français, surnomme "effet de serre" le phénomène démontré par Horace Bénédicte DE SAUSSURE à la fin du 18ème siècle : la température sur Terre est accrue par l'atmosphère qui piège une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre.

-
- Svante ARRHENIUS annonçait dès 1896, qu'en brûlant le charbon, les hommes allaient réchauffer la planète via un effet de serre renforcé et fût donc le premier à mettre en évidence le risque de réchauffement climatique.
 - En 1958, Charles David KEELING commence à mesurer les concentrations de CO₂ sur le volcan Mauna Loa à Hawaï : elles sont alors de 315 ppm puis de 330 ppm en 1974 : preuve locale d'une augmentation de la concentration en CO₂.
 - En 1979, l'Académie nationale des sciences américaine lance la première étude rigoureuse sur le réchauffement de la planète. Le comité Charney qui en eu la charge concluait déjà que *"si les émissions de dioxyde de carbone continuent d'augmenter, le groupe d'étude ne voit aucune raison de douter que des changements climatiques en résulteront, et aucune raison de penser que ces changements seront négligeables"*.
 - Au début des années 80, le glaciologue grenoblois Claude LORIUS entreprit une coopération avec ses collègues soviétiques de la station Vostok, installée au cœur de l'Antarctique. En 1985, les foreurs russes parviennent à extraire des carottes de glace jusqu'à un kilomètre de profondeur. Publiées en 1987, leur analyse réalisée à Grenoble et à Saclay par les équipes de Dominique RAYNAUD et Jean JOUZEL, démontre que, depuis cent mille ans, il existe une corrélation étroite entre températures moyennes et teneurs en gaz à effet de serre. En 1999, la démonstration s'est étendue aux 400 000 dernières années. Sur cette période, jamais la teneur en gaz à effet de serre n'a atteint les valeurs actuelles. Enfin, en 2005 confirmation a été apportée sur une période de 650 000 ans.
 - En 1988, plusieurs milliers de chercheurs internationaux se sont réunis sous l'égide des Nations Unies pour constituer le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ou IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) afin de travailler sur ce bouleversement global et rapide.

Au cours du 20^{ème} siècle, un nombre croissant d'observations indique que la planète s'est réchauffée :

La température moyenne à la surface de la planète a augmenté d'environ 0,6°C (à 0,2°C près) au cours du 20ème siècle.

Cette augmentation s'est produite essentiellement de 1910 à 1945 et de 1976 à 2000. Elle a été plus importante la nuit et à l'intérieur des terres.

Dans l'hémisphère Nord, il est probable que, durant les 1000 dernières années:

- le réchauffement observé au 20ème siècle ait été sans précédent,
- les années 1990 aient été la décennie la plus chaude et 1998 l'année la plus chaude.

Les températures ont augmenté ces 40 dernières années dans les 8 premiers kilomètres de l'atmosphère. La couverture neigeuse et les étendues glaciaires se sont réduites. Le niveau de la mer s'est élevé de 10 à 20 cm au cours du 20ème siècle. La charge thermique des océans s'est accrue depuis la fin des années 50 (figure 2.1).

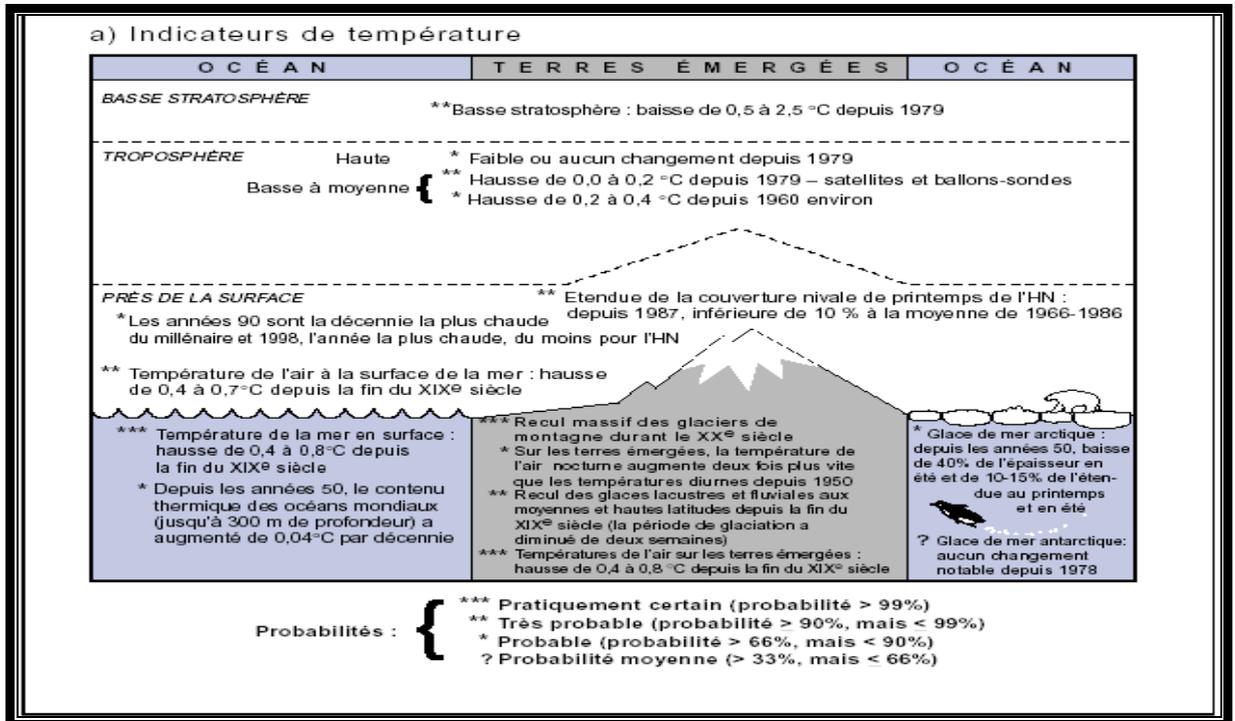


Figure 2.2 : Schéma d'observation sur les variations des indicateurs de température
Source : Rapport d'évaluation du GIEC, 2007

2.2 Définitions

Un changement climatique correspond à une modification durable (de la décennie au million d'années) des paramètres statistiques (paramètres moyens, variabilité) du climat global de la Terre ou de ses divers climats régionaux. Ces changements peuvent être dus à des processus intrinsèques à la Terre, à des forces extérieures ou, plus récemment, aux activités humaines. Dans le contexte récent de la politique écologique, le terme "changement climatique" ne correspond qu'aux changements du climat actuel, apparus au long du XXe siècle et attendus pour le XXIe siècle. (4^{ème} rapport du GIEC 2007).

Prenant acte de la réalité du réchauffement climatique dans la décennie 90, et de la responsabilité humaine dans ces dérèglements, les dirigeants politiques ont initié une politique de lutte contre le réchauffement de la planète. Le Protocole de Kyoto, qui est entré en vigueur en février 2005, est l'exemple le plus actuel d'une stratégie de réduction des gaz à effet de serre. Cette politique n'est toutefois pas sans diviser les pays industrialisés, peu enclins à

remettre en cause leur modèle de croissance, et les pays du Sud inquiets pour leurs projets de développement (GIEC 2007).

Le réchauffement climatique, également appelé *réchauffement planétaire* ou, par anglicisme, *réchauffement global* (de l'anglais *global warming*), est un phénomène d'augmentation, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années, de la température moyenne des océans et de l'atmosphère. Ce terme est appliqué au changement climatique observé depuis environ vingt-cinq ans, c'est-à-dire depuis la fin du XX^e siècle. La communauté scientifique attribue à ce réchauffement global une origine humaine. C'est le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) qui détermine ce consensus scientifique. Le Quatrième rapport du GIEC est le dernier en date (S. Joussaume, D. Armond, P. Delecluse, 2007).

Le recul des glaciers de montagne, notamment à l'Ouest de l'Amérique du Nord, en Asie, dans les Alpes, en Indonésie, en Afrique (dont le Kilimandjaro), et dans des régions tropicales et subtropicales d'Amérique du Sud, a été utilisé comme preuve qualitative de l'élévation des températures globales depuis la fin du XIX^e siècle par le GIEC. Pour le Kilimandjaro (figure 2.2), la première photo est prise le 17 Février 1993, la deuxième est prise le 21 Février 2000. Ce fait est contesté par plusieurs scientifiques. Ce cas est un bon exemple de la complexité du réchauffement climatique.



Figure 2.3 : Changement de l'accumulation des neiges au sommet du Kilimandjaro

Source : WWW. Wikipédia, l'encyclopédie libre (changement climatique)

Changement de l'accumulation des neiges au sommet du Kilimandjaro, première photo prise le 17 février 1993, la seconde le 21 février 2000. Le Kilimandjaro a perdu 82% de son glacier durant le XXème siècle et celui-ci devrait disparaître en 2020.

Un deuxième exemple en Europe (village des bois dans la vallée de Chamonix) illustre le phénomène du changement climatique (figure 2.3), sur la première photo, à la fin du petit âge de glace (1600-1820), le front de la mer de glace s'avancait jusqu'au village des Bois en formant un lobe impressionnant dans la vallée de Chamonix « Aquarelle de Samuel Btlhnmann : village des Praz, 1823. Musée de Bâle », (L. Reynaud, LGGE-CNRS).

La deuxième photo prise en 1995, montre que le glacier a perdu environ 1,5 Km de longueur et son front n'est plus visible du fond de la vallée ; seule les grandes moraines frontales couvertes de forêt témoignent encore de son état passé, (Photo Luis Raymond, LGGE-CNRS, 1995).



*Figure 2.4 : Fonte de front de la mer de glace 1820-1995
Source : L. Reynaud, LGGE-CNRS, 1995*

2.3 Cycle climatiques

Les carottages de glace permettent aujourd'hui de descendre, en Antarctique, jusqu'à plus de 3500 mètres de profondeur. Ces précieuses archives contiennent, dans les bulles d'air, des indications sur la teneur en gaz de l'atmosphère d'autrefois. Elles nous aident à comprendre le climat de la terre depuis une période qui remonte jusqu'à 750 000 ans. Les climatologues s'accordent sur le fait que la terre a traversé plusieurs cycles de réchauffement et de refroidissement planétaire durant les 400 000 dernières années.

Selon eux, un cycle de 100 000 ans environ s'est répété au cours de cette période. Ce cycle commence par un réchauffement brutal suivi d'une période chaude de 10 000 à 20 000 ans environ, appelée période interglaciaire. Cette période est suivie par un refroidissement progressif et l'installation d'une ère glaciaire (ou glaciation). À la fin de la glaciation, un réchauffement brutal amorce un nouveau cycle. La dernière période interglaciaire correspond au temps présent et dure depuis plus de 10 000 ans.

Les variations du climat sont corrélées avec celles de l'insolation, des paramètres de Milankovic, de l'albédo, des cycles solaires et des concentrations dans l'atmosphère des gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et des aérosols.

À l'intérieur des grandes fluctuations climatiques qu'a connu la terre, on trouve des variations plus brèves et plus limitées en intensité. Ainsi, au cours du dernier millénaire, on a pu voir apparaître une période chaude aux X^e et XI^e siècles appelée « optimum médiéval » : c'est l'époque où les navigateurs vikings découvrent et baptisent le Groenland (littéralement « pays vert ») et fondent des colonies à l'extrême sud de l'île. De même, l'époque des Temps Modernes (1550-1850) connut une période de refroidissement que les historiens appellent le « petit âge glaciaire ». C'est au cours de cette période plus froide que l'on retrouve les hivers les plus rigoureux, notamment le terrible hiver 1708-1709. Selon les reconstitutions de températures réalisées par les climatologues, la dernière décennie du XX^e siècle et le début du XXI^e constituent la période la plus chaude des deux derniers millénaires (figure 2.4). Notre époque serait en effet plus chaude de quelques dixièmes de degrés par rapport à l'optimum médiéval

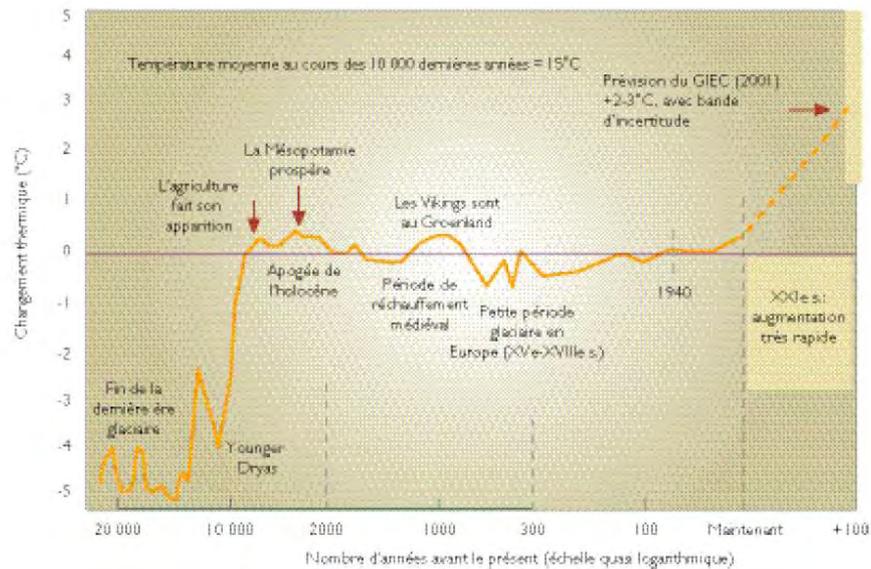


Figure 2.5 : Changement de la température au cours des 20000 dernières années
 Source : Organisation mondiale de la santé, 2004

Les mesures terrestres de température réalisées au cours du XX^e siècle montrent une élévation de la température moyenne. Ce réchauffement se serait déroulé en deux phases, la première de 1910 à 1945, la seconde de 1976 à aujourd'hui. Ces deux phases semblent séparées par une période de léger refroidissement. Ce réchauffement planétaire semble de plus corrélé avec une forte augmentation dans l'atmosphère de la concentration de plusieurs gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote.

L'élévation de la température moyenne du globe au cours du XX^e siècle aurait donc été de 0,6°C.

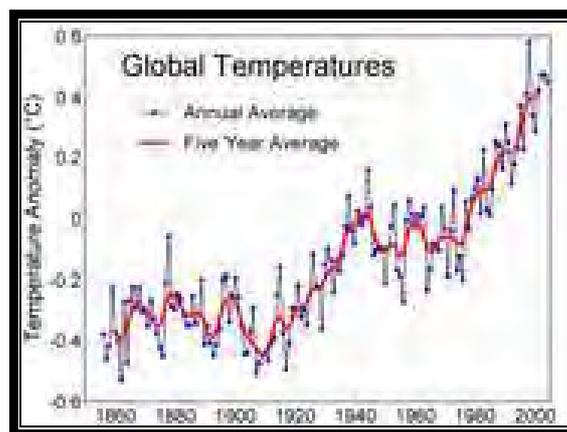


Figure 2.6 : Température moyenne de surface entre 1856 et 2005
 Source : WWW. Wikipédia, l'encyclopédie libre (changement climatique)

2.3.1 Poursuite du réchauffement climatique

Pour les climatologues regroupés au sein du GIEC (IPCC en Anglais), l'augmentation des températures va se poursuivre au cours du XXI^e siècle. L'ampleur du réchauffement attendu le plus probable est de 1,8 à 3,4 degrés Celsius.

Les incertitudes quant à l'ampleur du réchauffement attendu ont deux sources :

- les incertitudes liées aux modèles;
- les incertitudes sur le comportement de l'humanité au cours du XXI^e siècle.

Les incertitudes liées au fonctionnement des modèles sont mesurées en comparant les résultats de plusieurs modèles pour un même scénario, et en comparant les effets de petites modifications des scénarios d'émission dans chaque modèle.

Les variations observées dans les simulations climatiques sont à l'origine d'un éparpillement des prévisions de l'ordre de 1,3 à 2,4 degrés, pour un scénario (démographique, de croissance, etc.) donné. Le type de scénario envisagé a un effet de l'ordre de 2,6 degrés sur le réchauffement climatique simulé par ces modèles et explique une bonne partie de la marge d'incertitude existant quant à l'ampleur du réchauffement à venir.

Les prévisions d'augmentation de température pour l'horizon 2100 données par le GIEC (SPM du AR4 2007) s'échelonnent de 1,1 à 6,3 °C. Les experts du GIEC affinent leurs prévisions en donnant des valeurs considérées comme « les meilleures estimations », ce qui permet de réduire la fourchette de 1,8 à 4,0 °C. Et en éliminant le scénario A1F1, considéré comme irréaliste, l'augmentation de température serait comprise entre 1,8 et 3,4 °C.

2.4 Conséquences physiques du réchauffement climatique

Les modèles utilisés pour prédire le réchauffement planétaire futur peuvent aussi être utilisés pour simuler les conséquences de ce réchauffement sur les autres paramètres physiques de la terre, comme les calottes de glace, les précipitations ou le niveau des mers. Dans ce domaine, un certain nombre de conséquences du réchauffement climatique sont l'objet d'un consensus parmi les climatologues.

2.4.1 La montée des eaux

Une des conséquences du réchauffement planétaire sur lesquelles s'accordent les scientifiques est une montée du niveau de la mer. Deux phénomènes peuvent engendrer cette élévation :

-
- L'augmentation du volume de l'eau due à son réchauffement, augmentation substantielle du fait de la grande profondeur des océans,
 - L'ajout d'eau supplémentaire provenant de la fonte des calottes glaciaires continentales.

Selon le troisième rapport du GIEC, le niveau de la mer s'est élevé de 0,1 à 0,2 m au XX^e siècle. Selon ce même rapport, la montée du niveau de l'élévation prévue serait due principalement au réchauffement des eaux océaniques, l'effet de la fonte des glaces ne se faisant sentir éventuellement qu'à beaucoup plus long terme. De même que pour les températures, les incertitudes concernant le niveau de la mer sont liées aux modèles, d'une part, et aux émissions futures de gaz à effet de serre, d'autre part. Cependant, les incertitudes dues aux modèles sont plus fortes. Ainsi, l'élévation prévue du niveau de la mer est de 18 cm à 59 cm (4^{ème} rapport du GIEC, 2007).

2.4.2 L'humidité absolue

Selon toutes évidences l'humidité absolue moyenne de l'air va augmenter (ce paramètre s'exprime en grammes d'eau par mètres cubes d'air; les météorologistes mesurent plutôt l'humidité relative qui s'exprime en % sachant que 100% est le point de rosée). Sachant que l'eau est le principal vecteur de la thermodynamique atmosphérique (l'évaporation absorbe de l'énergie et la condensation la restitue) la puissance des précipitations devrait aussi augmenter.

Il est probable qu'au cours du 20^{ème} siècle les précipitations aient augmenté sur certains continents et diminué sur d'autres.

Il est probable qu'il y ait eu une augmentation de la nébulosité.

Il est très probable qu'il y ait eu moins de températures extrêmement basses et légèrement plus de températures extrêmement élevées.

Les épisodes de réchauffement du phénomène « El Niño » ont été plus fréquents depuis le milieu des années 70.

Au niveau global, on a constaté une augmentation relativement faible des fortes sécheresses ou des fortes précipitations au cours du 21^{ème} siècle. Cependant, les dernières décennies ont été marquées par une fréquence accrue des sécheresses dans certaines régions.

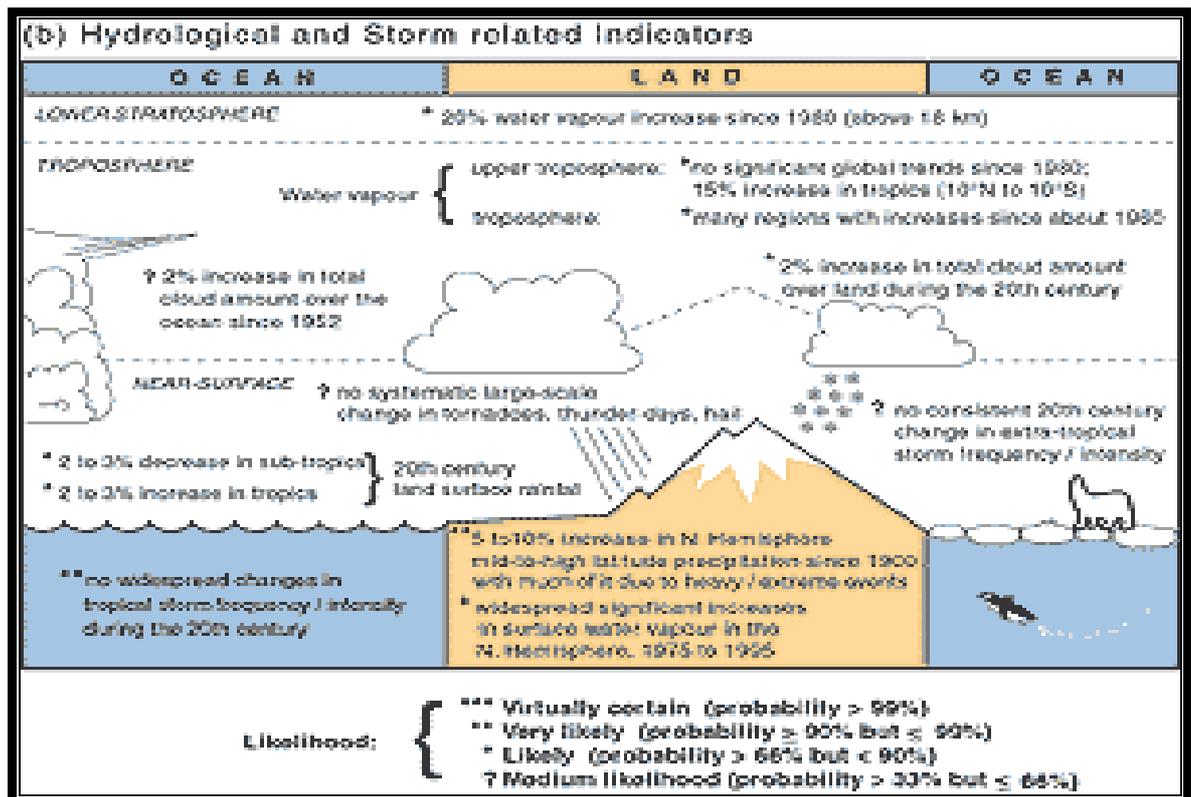


Figure 2.7 : Schéma d'observation sur les variations des indicateurs de température
 Source : WWW. Wikipédia, l'encyclopédie libre (changement climatique)

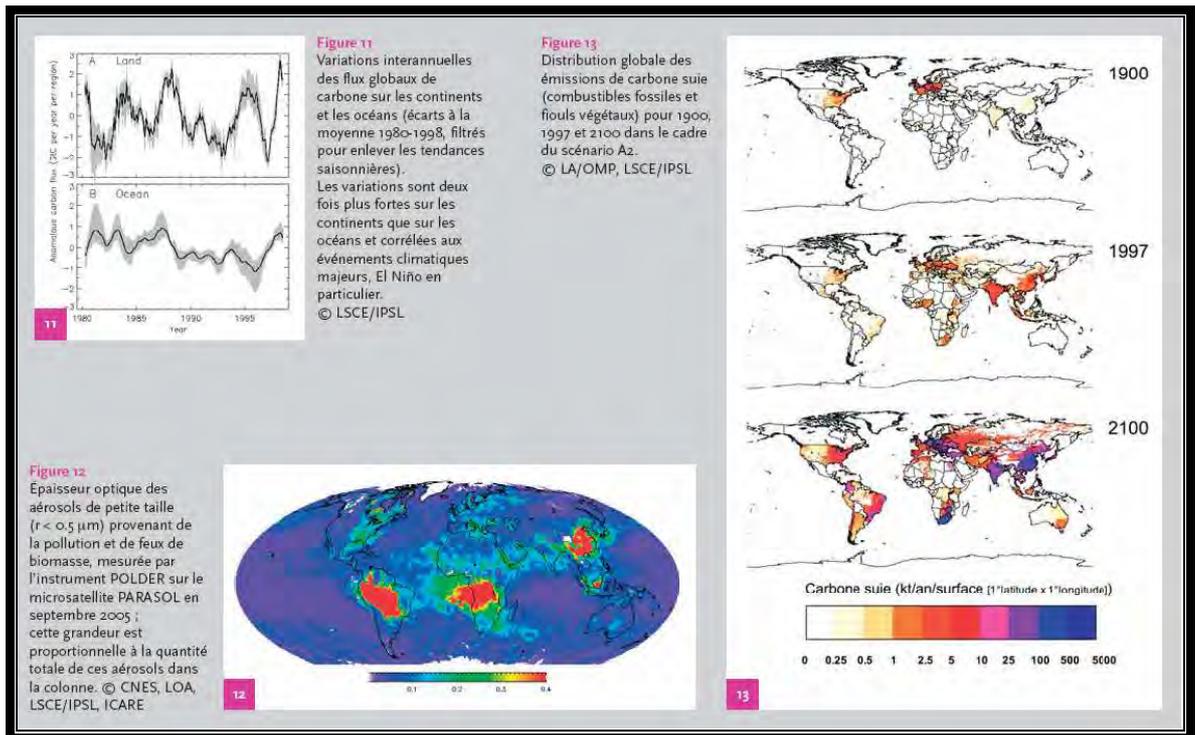
2.5 Pourquoi ce changement climatique ?

Le changement climatique est dû à la fois à la variabilité interne du système climatique et à des facteurs externes naturels et d'origine humaine.

2.5.1 Les activités humaines modifient-elles l'atmosphère ?

Le changement climatique est le résultat combiné de la variabilité interne du système climatique et de facteurs externes (naturels et anthropiques). Les émissions anthropiques modifient de façon considérable les concentrations de certains gaz dans l'atmosphère. Certains de ces gaz pourraient avoir des effets sur le climat en modifiant l'équilibre radiatif de la terre mesuré en termes de forçage radiatif (figure 2.7).

- Les gaz à effet de serre, aux répercussions planétaires, ont tendance à réchauffer la surface terrestre en absorbant certains des rayons infrarouges qu'elle émet.
- Les aérosols anthropiques, aux répercussions régionales, ont une durée de vie courte dans l'atmosphère et ont tendance à refroidir la planète.
- Il est estimé que les facteurs naturels comme la variabilité du rayonnement solaire et des éruptions volcaniques n'ont que peu contribué au forçage radiatif au cours du siècle dernier.



*Figure 2.8 : Distribution globale des émissions de carbone suie pour 1900, 1997 et 2100
Source : Les recherches Françaises sur le changement climatique, 2007*

2.6 Quels changements climatiques prévoit-on à l'avenir ?

L'influence des activités humaines continuera à modifier la composition atmosphérique tout au long du 21^{ème} siècle.

Le GIEC a élaboré plusieurs scénarios d'émissions, tenant compte de plusieurs hypothèses sur les évolutions démographique, technique, du revenu par habitant, des différences de richesse selon les régions. Ces scénarios ont été intégrés dans des modèles climatiques afin de prévoir l'évolution des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et d'aérosols, et, par conséquent, l'évolution future du climat.

Selon tous les scénarios du GIEC, la température moyenne globale et le niveau de la mer devraient s'élever au cours du 21^{ème} siècle.

On prévoit une hausse de la température moyenne à la surface de la planète variant de 1,4 à 5,8°C entre 1990 et 2100 (figure 2.8).

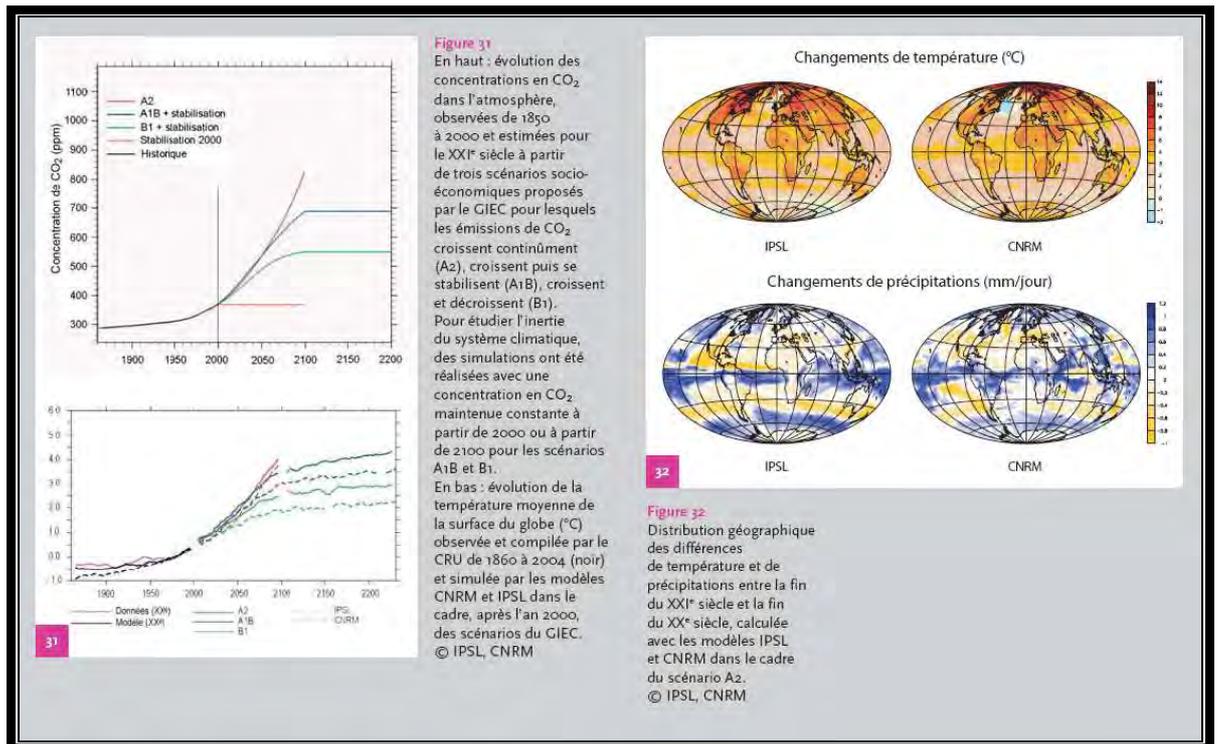


Figure 2.9 : Distribution géographique des différences de température et de précipitations entre la fin du XXI^e siècle et la fin du XX^e siècle

Source : Les recherches Françaises sur le changement climatique, 2007

Cette large fourchette est due aux :

- Différentes concentrations d'émissions de gaz à effet de serre envisagées par chaque scénario
- Différentes réponses des modèles climatiques utilisés (voir figure 2.9).

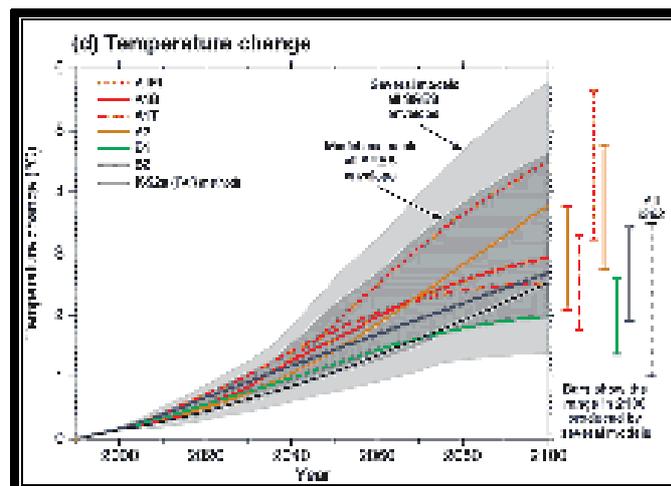


Figure 2.10 : Différentes réponses des modèles climatiques utilisés

Source : Les recherches Françaises sur le changement climatique, 2007

Il est très probable que le rythme du réchauffement prévu soit le plus rapide depuis au moins 10 000 ans.

Il est très probable que la quasi-totalité des territoires se réchauffent plus rapidement que la moyenne globale, surtout celles situées au nord sous les latitudes élevées, pendant la saison froide.

Les précipitations devraient augmenter, avec de plus importantes variations d'une année sur l'autre, surtout en hiver sous les latitudes moyennes et élevées des régions septentrionales et dans l'Antarctique.

L'intensité de certains phénomènes extrêmes devrait augmenter. En ce qui concerne d'autres phénomènes extrêmes, l'information est insuffisante pour permettre des projections fiables.

La plupart des modèles indiquent un affaiblissement de la circulation thermo haline dans les océans, ce qui réduirait la hausse des températures sous les latitudes élevées de l'hémisphère Nord.

Dans l'hémisphère Nord, l'étendue de la couverture neigeuse et de la glace de mer devrait encore diminuer. Les glaciers et calottes glaciaires devraient également poursuivre leur retrait. Il est probable que l'on assiste à une augmentation de la nappe glaciaire de l'Antarctique, tandis que celle du Groenland devrait probablement se rétracter. Il est très peu probable que l'on assiste à une réduction de la glace de fond dans l'ouest de l'Antarctique, susceptible de provoquer une hausse substantielle du niveau de la mer.

Le niveau de la mer devrait augmenter de 9 à 88 cm entre 1990 et 2100. Cette élévation sera principalement due à la dilatation thermique et à la fonte des glaces. Cette fourchette assez large est essentiellement due aux incertitudes liées aux modèles climatiques.

Si l'adaptation peut atténuer les effets néfastes du changement climatique et renforcer les effets bénéfiques, elle aura cependant un certain coût et n'empêchera pas tous les dommages. L'adaptation doit compléter les efforts d'atténuation du changement climatique.

Selon quelques estimations publiées, un réchauffement climatique de quelques degrés entraînerait :

- Des pertes économiques nettes dans de nombreux pays en développement; l'ampleur de ces pertes sera fonction de celle du réchauffement.
- Une combinaison de gains et de pertes dans les pays développés, et uniquement des pertes si la température devait s'élever davantage.
- Une diminution du produit intérieur brut (PIB) mondial de quelques pourcents, et des pertes nettes plus importantes dans le cas d'une hausse des températures plus grande.

Les politiques destinées à atténuer les pressions sur les ressources, à faciliter la gestion des risques environnementaux et à améliorer les conditions de vie des plus pauvres, peuvent également contribuer au développement durable et à l'équité, renforcer la capacité d'adaptation et réduire la vulnérabilité au climat et à d'autres contraintes.

Pour les pays développés, l'évaluation du coût de la mise en application du Protocole de Kyoto varie selon les études et les régions et dépend largement des hypothèses concernant l'emploi des mécanismes du Protocole de Kyoto. La plupart des études prévoient des réductions du PIB jusqu'en 2010 d'environ 0,2% à 2% sans échange de droits d'émissions, et d'environ 0,1% à 1,1% avec de tels échanges.

Il est probable que les mesures de réduction des gaz à effet de serre nuisent à certaines industries, comme celles du charbon ou éventuellement du pétrole et du gaz, et à certains secteurs grands consommateurs d'énergie tels que la production d'acier. En revanche, d'autres industries pourraient en bénéficier, comme les industries et les services faisant appel à des systèmes d'énergie renouvelable.

Les pays en développement seraient eux aussi touchés par la mise en œuvre du Protocole de Kyoto:

Pour mettre en œuvre avec succès les mesures d'atténuation des gaz à effet de serre, il faut surmonter de nombreux obstacles d'ordre technique, économique, politique, culturel, social, comportemental et/ou institutionnel qui empêchent d'exploiter pleinement les possibilités techniques, économiques et sociales qu'offrent ces mesures.

L'éventail d'instruments à la disposition des gouvernements pour atténuer le changement climatique peut comprendre: des taxes sur les émissions/ le carbone /l'énergie, des permis d'émissions négociables ou non, l'octroi ou la suppression de subventions, des systèmes de consigne, des normes techniques ou de rendement, l'obligation d'utiliser plusieurs sources d'énergie, l'interdiction de certains produits, des accords volontaires, des dépenses et investissements publics, et l'aide à la recherche et au développement.

Le réchauffement présente des risques réels pour la planète. Toutefois, la nature exacte de ces risques demeure incertaine. Nous devons donc recourir à notre meilleure capacité de jugement « orienté par l'état actuel de la science » pour trouver les réponses les plus appropriées.

2.7 L'effet de serre

Les scientifiques s'accordent aujourd'hui pour affirmer la prépondérance du rôle des activités humaines dans le changement climatique et pour voir dans l'effet de serre le principal mécanisme conduisant au réchauffement de la planète.

2.7.1 Qu'est-ce que l'effet de serre?

La température moyenne de notre planète résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace.

La répartition de la température au niveau du sol dépend de la quantité de gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère. Sans eux, la température moyenne serait de -18°C et la terre serait inhabitable. Leur présence amène cette température à 15°C .

Les gaz responsables de l'effet de serre d'origine anthropique sont le gaz carbonique (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), l'ozone troposphérique (O_3), les CFC et les HCFC, gaz de synthèse responsables de l'attaque de la couche d'ozone, ainsi que les substituts des CFC : HFC, PFC et SF_6 .

Les gaz à effet de serre sont naturellement très peu abondants. Mais du fait de l'activité humaine, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère s'est sensiblement modifiée : ainsi, la concentration en CO_2 , principal GES, a augmenté de 30% depuis l'ère préindustrielle.

Les effets combinés de tous les GES équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% de CO_2 depuis cette période.

2.7.2 Rayonnement solaire et effet de serre

Le rayonnement solaire (ultra-violet, visible, infrarouge), représenté par les flèches jaunes, est la principale source d'énergie sur terre. Un équilibre s'établit entre l'énergie solaire qui arrive et le rayonnement tellurique (infrarouge), représenté par les flèches noires continues, émis par la terre. La température à la surface de la terre s'ajuste de manière à maintenir cet équilibre entre énergie absorbée et énergie perdue. Différents mécanismes interviennent dans l'établissement de cet équilibre (en italique sur la figure 2.10). (Centre national de la recherche scientifique « CNRS »).

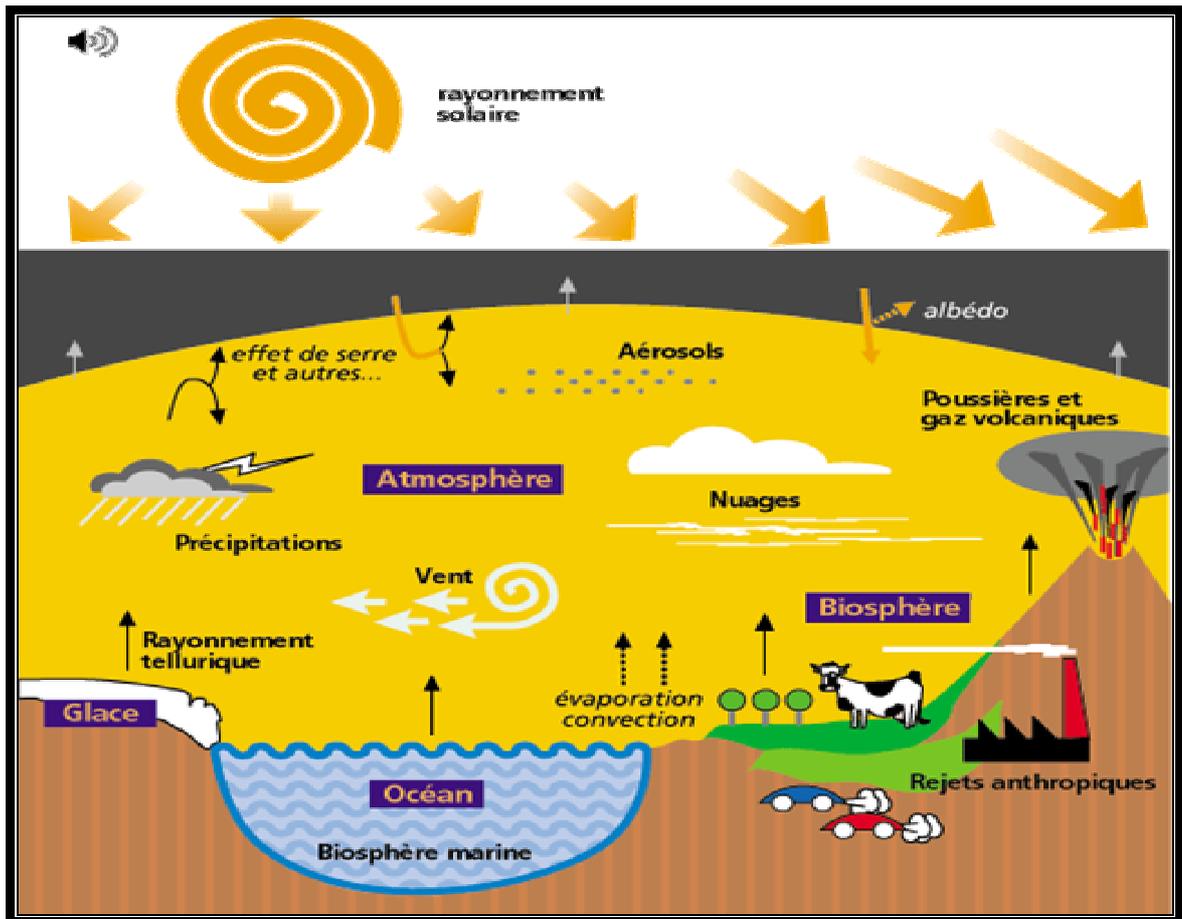


Figure 2.11 : Effet de serre
 Source : WWW. La documentation francaise.com

2.7.3 Les principales sources de gaz à effet de serre ?

Lorsque nous utilisons des énergies fossiles, telles que le charbon, le pétrole ou le gaz, nous brûlons du carbone, ajoutant ainsi du CO₂ à l'air : environ 20 milliards de tonnes par an dans le monde. Les Océans et les forêts et, dans une bien moindre mesure, les autres plantes, éliminent à peu près la moitié de cet excédent de gaz carbonique. Cependant, sa concentration ne cesse de croître : de l'ordre de 0,028% il y a cent cinquante ans, elle est aujourd'hui de 0,0365%.

Un autre gaz à effet de serre est le méthane (CH₄), dont la concentration a doublé depuis la révolution industrielle. Les sources "humaines" sont les rizières, les décharges d'ordures, les élevages bovins, les fuites sur les réseaux de gaz et l'exploitation charbonnière. L'oxyde nitreux, ou protoxyde d'azote (N₂O) est un autre gaz à effet de serre, qui provient de certaines industries et des excès d'épandages d'engrais.

Il faut compter également avec l'ozone de la basse atmosphère, qui se forme à la suite des émissions de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes d'azote (N₂O) et de composés organiques

volatils (COV). Il y a enfin les gaz fluorés : CFC, HCFC, HFC, PFC et HF6 (Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire français, 2007).

Les deux principaux gaz à effet de serre sont le gaz carbonique, qui contribue à l'effet de serre à une hauteur de 60 % et le méthane. Cependant, tandis que le méthane n'a qu'une faible durée de vie dans l'atmosphère, le gaz carbonique y demeure pendant plus d'un siècle.

2.7.4 Comprendre l'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel, indispensable à la vie sur terre et qui assure une température moyenne de +15°C environ au lieu de -18 °C. En fait, une température de -18°C ferait geler les océans, ce qui augmenterait considérablement leur albédo (pouvoir réflecteur) faisant chuter les températures autour de -100°C.

La terre reçoit la majeure partie de son énergie du soleil (principalement sous forme de lumière visible), une partie est directement réfléchi, une autre absorbée et une dernière rayonnée sous forme d'infrarouges par notre planète. Le rayonnement infrarouge émis par la terre est en partie intercepté par les gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre tandis que le reste est diffusé vers l'espace.

Ainsi, la vapeur d'eau, le méthane, le dioxyde de carbone et le protoxyde d'azote, qui sont les principaux gaz à effet de serre (GES) contribuent à piéger l'énergie renvoyée, augmentant la température moyenne de la terre. En effet, ce sont les gaz à structure poly atomique (au moins 3 atomes) qui retiennent le rayonnement infrarouge au contraire des molécules diatomiques (99% de l'atmosphère) qui ont une structure trop simple.

Notons le double rôle des nuages dans l'effet de serre : vis-à-vis du rayonnement solaire, les nuages agissent principalement comme un parasol qui renvoie vers l'espace une grande partie des rayons du soleil. Le pouvoir réfléchissant, ou albédo, des nuages épais à basse altitude, est ainsi très élevé, de l'ordre de 80%. Par contre, les cirrus qui sont des nuages d'altitude constitués de cristaux de glace, ont un effet parasol très faible puisqu'ils sont transparents mais participent fortement à l'effet de serre (figure 2.11).

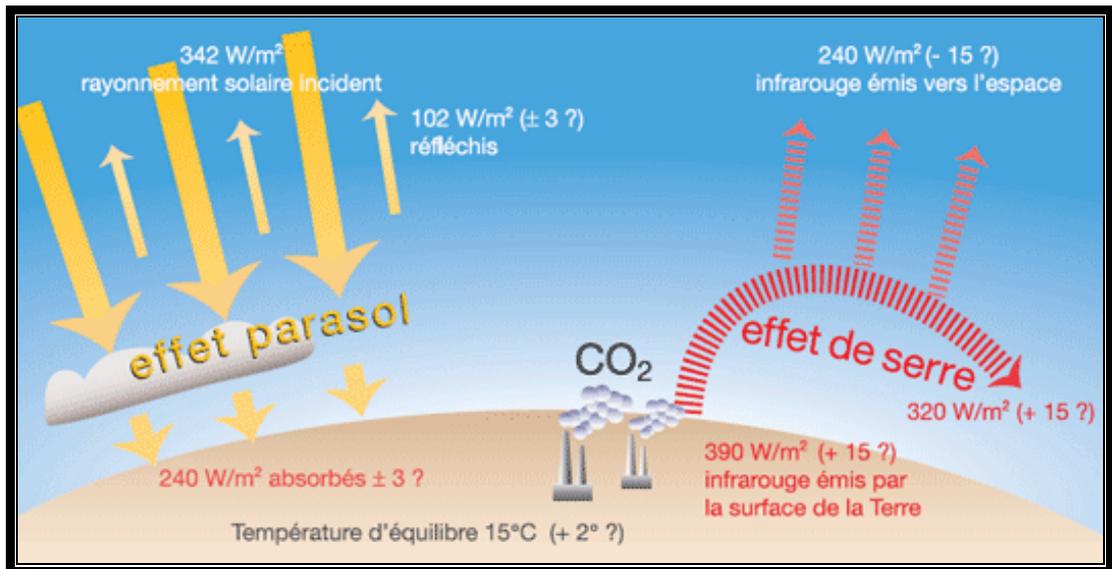


Figure 2.12 : Le bilan radiatif et sa perturbation anthropique : estimation de l'impact de l'effet de serre et de l'effet parasol sur le bilan énergétique de la terre.

Source : CNES 2006

Les températures moyennes du globe (mesurées à 2 m au-dessus du sol sous abri) sont de : +15,1 °C en moyenne (régions polaires : -20°C, tempérées +11°C, équatoriales : +26°C). Sur Mars où l'atmosphère est tenue et donc l'effet de serre absent, la température moyenne est de -50°C. Sur Vénus, où l'atmosphère est très chargée en gaz carbonique, la température moyenne est de +420°C. Nous comprenons donc que les concentrations en gaz à effet de serre sur terre ont permis l'apparition des formes de vie que nous connaissons qui sont sensibles aux températures (Laboratoire de météorologie dynamique (L.M.D.) du C.N.R.S. et Secrétaire du Programme mondial de recherche sur le climat, 2005).

2.7.5 Quelles options permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre ?

Depuis 1995, d'importants progrès techniques ont été réalisés plus rapidement que prévu afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les options des 20 prochaines années devraient comprendre l'amélioration du rendement énergétique dans les bâtiments, les transports et les industries manufacturières, la conversion au gaz naturel pour l'approvisionnement énergétique ainsi que des systèmes d'approvisionnement énergétique à faible teneur en carbone comme la biomasse, l'énergie éolienne, nucléaire ou hydroélectrique, la réduction des émissions de méthane et d'oxyde nitreux dans l'agriculture et, grâce à certaines applications, la minimisation des émissions de gaz fluoré pour les estimations; la moitié de ces réductions d'émissions potentielles peuvent être réalisées avec des avantages directs supérieurs aux coûts directs.

Les forêts et terres agricoles offrent un potentiel élevé d'atténuation des émissions de carbone, qui, bien qu'il ne soit pas nécessairement permanent, laisse le temps d'élaborer et de mettre en

œuvre d'autres stratégies. Le potentiel mondial pourrait être de l'ordre de 100 GtC jusqu'en 2050, l'équivalent d'environ 10 à 20% des émissions de combustibles fossiles pendant cette période.

La formation et l'innovation sociales, ainsi que l'évolution des structures institutionnelles pourraient contribuer à atténuer le changement climatique. Les modifications des règles collectives et des comportements individuels pourraient avoir des effets importants sur les émissions de gaz à effet de serre, mais auraient lieu dans un cadre institutionnel, réglementaire et juridique complexe. Cette révolution industrielle à provoquer un changement radicale dans notre façon de vivre et a modifier notre comportement. La création de nouvelle ville et des mégapoles à travers le monde avec tous ce que rapporter ces villes comme avantage économique et industrielle et surtout comme inconvenant sur le confort de l'homme et la planète. La température des villes est largement supérieure à la température à l'extérieur de celles-ci. Ce phénomène est appelé (Ilot de chaleur)

2.7.6 Les limites d'une réaction humaine

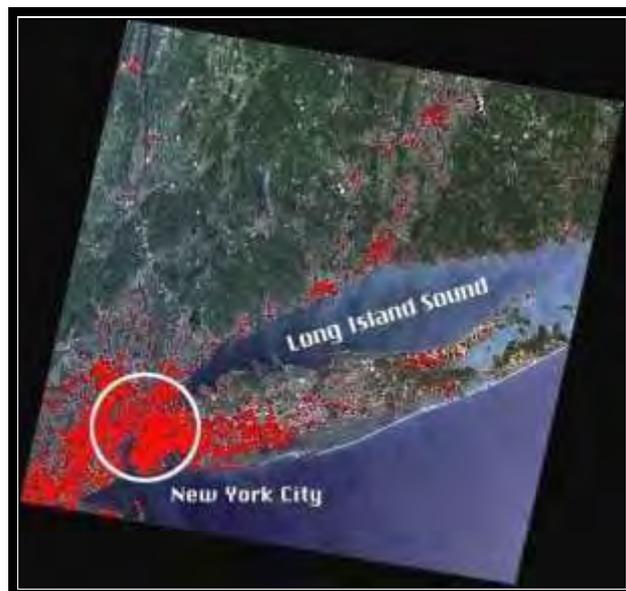
Si l'action humaine depuis cent cinquante ans a pu modifier la composition de l'atmosphère terrestre jusqu'à provoquer un réchauffement planétaire dont les conséquences peuvent être dommageables pour l'homme, suffit-il d'une nouvelle intervention humaine, en sens opposé, pour que les choses rentrent dans l'ordre ?

Cela conduit à poser la question de la réversibilité des modifications d'origine anthropique et de la volonté de l'homme à agir dans une direction différente de celle suivie spontanément par lui jusqu'ici et dont il a retiré beaucoup d'agréments (Deneux, Marcel. Rapport sur l'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2050, 2050 et 2100, Paris, Sénat, Rapport d'information n° 224, 2002 / 625 p).

2.8 Ilot de chaleur urbain

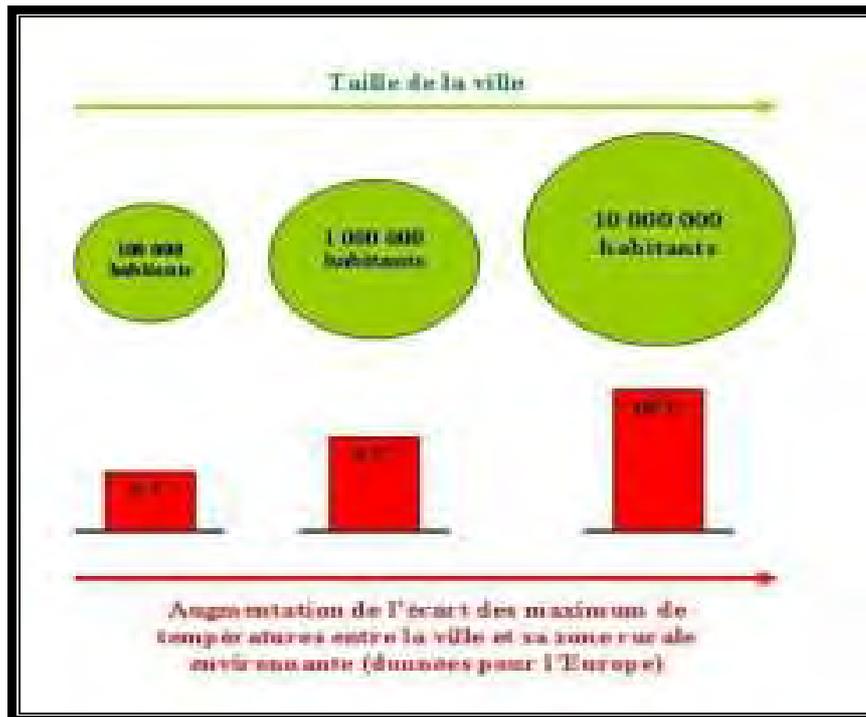
Une ville est principalement faite de ciment, de goudron, de briques et de pierre. La température d'un endroit donné étant très dépendante des caractéristiques de sa surface, on observe qu'une ville est souvent plus chaude qu'une zone rurale. Cet « îlot de chaleur » est aussi dû au nombre élevé d'habitants et à l'émission de chaleur causée par les activités humaines Ce phénomène, connu des chercheurs du climat depuis le XIXe siècle, est baptisé "îlot de chaleur urbain" (Oke 1976, 1982).

Dans beaucoup de villes, la température de l'air est en moyenne supérieure de 0,5 à 0,8°C à la zone rurale qui l'environne; cet écart peut même atteindre 1,1 à 1,6°C en hiver! Ce phénomène est appelé « l'îlot de chaleur urbain ». Lorsqu'on trace sur une carte les isothermes d'une ville, on voit qu'elles ont des formes circulaires, les valeurs décroissant en s'éloignant du centre. Cet îlot de chaleur n'est pas homogène, mais consiste plutôt en plusieurs « tâches » réparties autour du centre-ville, des grosses usines, des centrales électriques...Etc. Sa taille et son intensité sont variables (figure 2.12). L'influence des îlots de chaleur urbains est aussi réelle que complexe (Jin 2005) et certains chercheurs comme Roger A. Pielke considèrent qu'elle peut surpasser celle des émissions de gaz à effet de serre (Pielke 2002).



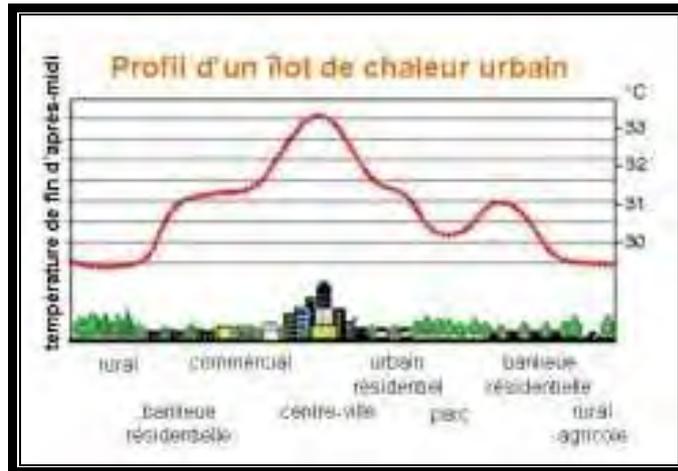
*Figure 2.13 : L'îlot de chaleur de New York, Les zones les plus chaudes sont en rouge.
System for World Surveillance, Inc.
Source : WWW. Ilot de chaleur.com*

Le nombre d'habitants est un paramètre essentiel de l'existence d'un îlot de chaleur. Dans les villes dont la population atteint 500 000 à un million d'habitants, la température de l'air est généralement supérieure de 1,1 à 1,2 °C par rapport à la zone rurale environnante. Dans les villes de plus d'1 million d'habitants cet écart passe à 1,2 voire 1,5°C. Cependant, ce sont des valeurs moyennes et les écarts maximaux peuvent être plus importants (figure 2.13). Selon l'ONU, les populations urbaines représentaient 29,1% de la population mondiale en 1950, mais 48,3% en 2003. Le phénomène est plus marqué encore dans les pays développés, où se situe la majeure partie des données sur le réchauffement : l'urbanisation concerne ici 74,5 % de l'occupation humaine en 2003 (52,5% en 1950) (ONU, World urbanization Prospects, 2003).



*Figure 2.14 : Relation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur et le nombre d'habitants d'une ville
Anita Bokwa, Pawel Jezioro, 2002.
Source : WWW. Ilot de chaleur.com*

La taille et la structure spatiale d'une ville sont aussi des paramètres importants, car les villes avec de petits immeubles répartis au milieu de nombreux espaces verts ne présentent pas ces îlots de chaleur typiques. Ce phénomène est aussi relié aux autres paramètres (l'émission de chaleur anthropique, la pollution de l'air et les changements de la couverture du sol naturelle). Tous ces paramètres contribuent à l'augmentation de la température dans les zones urbaines. De plus, l'intensité de l'îlot de chaleur (c'est à dire l'écart entre la température de l'air dans la ville et celle de la zone environnante) est fonction de paramètres météorologiques tels que la vitesse du vent, la couverture nuageuse, l'évapotranspiration. L'augmentation de la vitesse du vent et de la couverture nuageuse peuvent limiter l'intensité de l'îlot de chaleur (figure 2.14).



*Figure 2.15 : Allure d'un profil d'îlot de chaleur
Heat Island Group
Source : WWW. Ilot de chaleur.com*

L'intensité d'un îlot change d'une année à l'autre et d'un jour à l'autre. Son intensité peut être deux fois plus grande en hiver qu'en été, à cause de toute la chaleur dégagée par les immeubles chauffés. Elle est aussi plus importante durant la nuit, quand la surface réchauffée pendant la journée réémet sa chaleur à l'atmosphère. On a aussi observé à Tokyo que l'intensité de l'îlot de chaleur diminue pendant les vacances et les week-ends (Figure 2.15).



*Figure 2.16 : Emission de chaleur anthropique- voitures photo: Sebastian Wypych
Source : WWW. Ilot de chaleur.com*

L'îlot de chaleur ne varie pas uniquement dans le temps et du point de vue horizontal, mais aussi verticalement. Il atteint une hauteur de 200 à 300 mètres, soit 3 à 5 fois plus que la hauteur des immeubles. Lorsque le ciel est nuageux il peut même monter jusqu'à 500 m. On peut distinguer deux strates:

1. la canopée urbaine, où la chaleur provient des cheminées de maisons (appelées émissions basses) et des bâtiments en eux-mêmes (car ils absorbent beaucoup les rayons du soleil et les réémettent sous forme de chaleur), mais aussi des moyens de transport.

2. la couche où se trouvent les cheminées, au dessus de la couche de la canopée, où la chaleur est émise par des sources hautes, comme par exemple les cheminées des centrales électriques (figure 2.16).



Figure 2.17 : Emission de chaleur anthropique- tours de refroidissement
Source : www.freefoto.com

La présence de ces îlots de chaleur modifie le climat urbain. Il y a dans les villes davantage de jours chauds et moins de jours de gel que dans les zones rurales. On y observe que la période de développement de la végétation y est plus longue, qu'il y pleut plus et que les nuages de type cumulus y sont plus nombreux.

Ce phénomène d'îlot n'est pas idéal pour la santé humaine, en particulier en été où les citoyens peuvent souffrir des températures élevées. Pour limiter ce problème, il faudrait augmenter le nombre d'espaces verts et de points d'eau dans les villes. La température des zones urbaines et périurbaines est supérieure à celle des zones rurales environnantes. Cette différence peut atteindre une amplitude de 10°C dans les cas extrêmes. Elle est particulièrement marquée en hiver et la nuit, ce qui correspond à la tendance observée du réchauffement global (hausse des températures minimales plus que maximales). Le GIEC a écarté d'un revers de la main l'importance de ces « îlots de chaleur urbains » (ICU), en estimant leur éventuelle contribution à la hausse séculaire des températures à 0,05°C seulement (le rapport 2001 du GIEC). Or, de nombreuses études récentes ont montré que l'amplitude des ICU n'a fait que croître, que bon nombre de zones considérées comme "rurales" dans les enregistrements sont en fait périurbaines, que l'essentiel du réchauffement global moyen s'est concentré sur une part limitée du globe, la plus industrialisée. L'ensemble de ces travaux récents conduit à deux hypothèses:

-
- le réchauffement de $0,6^{\circ}\text{C}$ peut être dû à une surestimation de la température urbaine dans la température globale;
 - quelle que soit la valeur du réchauffement réel du globe, la responsabilité des gaz à effet de serre est sans doute moindre que prévu. Ce qui invalide du même coup la plupart des modèles attribuant aux seuls GES un effet majeur sur la hausse des températures.

Le réchauffement planétaire récent n'a pas été uniforme dans le temps ni l'espace. Une réévaluation récente de Jones et Moberg montre deux phases de réchauffement, 1920-1945 et 1975-2000. La seconde est plus forte en amplitude et généralement considérée comme la « marque » distinctive du réchauffement dû au forçage anthropique, particulièrement à l'émission de gaz à effet de serre. Mais cette phase récente n'est statistiquement significative que dans 10 à 20% des grilles utilisées par les modèles en climatologie. Et ces grilles où le réchauffement est marqué concernent principalement des régions très peuplées connaissant un développement industriel (Jones 2003).

Bon nombre d'études ont établi la réalité et l'ampleur des ICU. Et pas seulement en Occident.

2.8.1 Des études partout à Travers le monde

- a) En Chine, Zhou et al ont examiné l'évolution récente du climat (1978-2000), dans une période où la population urbaine est passée de 18 à 39 % et où la croissance économique annuelle moyenne a été de 9,5%. A partir des données hivernales de 194 stations réparties dans 13 provinces, ils ont conclu que l'effet des ICU est de $0,05^{\circ}\text{C}$ par décennie (dix fois plus que le chiffre retenu par le GIEC). Les auteurs reconnaissent que les données hivernales provoquent une distorsion positive (c'est là que l'ICU est le plus sensible), mais soulignent néanmoins l'étonnante disparité entre leurs résultats et les évaluations précédentes (Zhou 2004).
- b) Au Japon, Fumiaki Fujibe a pu utiliser des données sur des séries longues (plus de 100 ans, 1891-1992, dans 60 stations). Il a constaté une hausse des températures minimales dans les grandes villes de l'ordre de 2 à 5°C par siècle alors que dans le même temps, l'augmentation des températures dans les petites villes était limitée à 1°C . (Fujibe 1995; cf. aussi pour le Japon Ichinose in Mastumo, Kida 2001).
- c) En Inde, L.S. Hingare a observé l'évolution de la température, des précipitations et de la composition de la troposphère dans une vaste ceinture urbaine à haute densité de population, incluant Bombay et Calcutta, en comparaison des régions rurales adjacentes du sous-continent. Il en ressort que la température de l'air a subi une importante

-
- augmentation au cours du siècle passé (0,84°C pour Bombay, 1,39°C pour Calcutta) alors que la tendance n'est pas observée dans les zones rurales. Il en va de même pour les précipitations et pour la composition de la troposphère, où les concentrations en méthane, dioxyde de carbone et ozone sont plus importantes au-dessus des grandes cités que dans les campagnes (Hingare 1996).
- d) En Amérique latine, l'équipe de Jorge E. Gonzalez s'est récemment penchée sur la cité de San Juan (Porto Rico), une ville en zone côtière et tropicale de 2 millions d'habitants. Cette étude est particulièrement intéressante car les villes côtières sont habituellement considérées comme exemptes de l'effet ICU en raison de l'importance des brises marines dans leur microclimat. Or, les auteurs ont constaté que les températures enregistrées ont augmenté de 0,06°C par an depuis trente ans, sans que le phénomène soit documenté dans les zones adjacentes bénéficiant encore d'une forte couverture végétale. Ils remarquent : « C'est une tendance qui peut être comparée à celle des changements climatiques induits par le réchauffement global » (Gonzalez 2005).
- e) Aux Etats-Unis, Eugenia Calnay and Ming Cai ont réanalysé 50 années de données brutes (1950-1999) dans 1982 stations terrestres, situées à moins de 500 mètres d'altitude, dans 48 Etats. Ils ont constaté que l'urbanisation et la modification du sol ont provoqué à elle seule une hausse des températures de 0,27 °C, dont 0,18°C pour les deux dernières décennies. Leur travail a également montré que la seule prise en compte de l'urbanisation est insuffisante, car les pratiques agricoles des zones rurales ont elles aussi un effet à la hausse sur les températures (Calnay 2003). Cette étude confirme une différence moyenne de 0,45°C constatée entre les stations rurales et les stations urbaines du réseau climatologique historique des Etats-Unis (USHCN) trouvée quelques années plus tôt, sur la base de 1121 stations analysées entre 1950 et 1990 (Hansen 1999).

Dans une étude souvent citée, David R. Streutker a analysé en détail l'évolution de l'ICU de Houston entre 1985-1987 et 1999-2001. Cette analyse est particulièrement intéressante à trois titres. D'abord, elle a utilisé des mesures satellitaires par radiométrie à haute résolution plutôt que des mesures de surface par station (ou des mesures satellite à basse résolution, comme c'est le plus souvent le cas pour l'étude des ICU). Ensuite, elle enregistre l'effet de la « décennie la plus chaude du XXe siècle », qui inclut "l'année record des 100 (voire de 1000) dernières années", à savoir 1998. Enfin, elle analyse en détail la dynamique d'une ville sur dix ans. Houston est une cité de 1,95 million d'habitants située dans le Texas. Dans la période étudiée par Streutker, elle a connu une augmentation de 20% de sa population. C'est une cité

peuplée, mais assez peu dense puisqu'elle s'étale sur 1400 km². L'agglomération de Houston inclut quant à elle 4,2 millions de personnes. 82 enregistrements ont été utilisés entre 1985 et 1987, 125 autres entre 1999 et 2001, dans des conditions météorologiques comparables. Les températures moyennes nocturnes ont augmenté en moyenne de 0,82°C entre 1987 et 1999, dans une proportion comparable à l'accroissement de la population constatée, sur une aire comprise entre 170 et 650 km² selon la méthode d'évaluation retenue (Streutker 2003). Cette augmentation de presque 1 °C par décennie est sans commune mesure avec le réchauffement global moyen constaté sur cette période (de l'ordre de 0,06°C entre l'année 1999 et l'année 1987).

Une autre méthode pour évaluer l'impact des activités humaines consiste à comparer des indicateurs du développement économique (revenus, PNB, taux de croissance, consommation d'énergie, etc.) avec l'évolution des températures locales. P. Michaels et R. McKittrick se sont consacrés à cet exercice en analysant 200 stations météorologiques de 93 pays, sur la période 1979-2000. Il en ressort que la magnitude du développement économique permet de prédire la magnitude de l'évolution des températures de chacune de ces stations.

On constate donc que de nombreuses données relevées à travers le monde confirment l'importance des ICU sur l'évolution des températures locales. Et donc globales dans la mesure où bon nombre de stations terrestres sont situées dans ou à la périphérie des villes. Car ce serait une erreur de penser que l'ICU ne concerne que de très grandes agglomérations de centaines de milliers ou de millions d'habitants.

2.9. Utilisation des ressources énergétique et ICU

Les perspectives d'épuisement des gisements de pétrole et de gaz, ainsi que l'instabilité internationale font monter les prix de l'énergie et rendent probable le maintien de cette tendance dans le futur. Par ailleurs, que ce soit en milieu urbain ou en milieu rural, les effets de la pollution se font de plus en plus sentir. Ces considérations doivent conduire à des comportements plus économes en énergies, afin de réduire tant la consommation en énergies marchandes que les rejets des polluants.

Si les ménages comme les industriels sont sensibles aux économies directes, l'effet « portefeuille » est moins efficace dans les secteurs des transports et du tertiaire. Dans ce dernier cas, les économies d'énergie peuvent pourtant s'avérer très importantes. Un bâtiment comprend un ensemble complexe de composants, comme l'éclairage, le chauffage, parfois la climatisation ou encore les consommations d'eau. Les déperditions thermiques d'un bâtiment mal isolé sont importantes et impliquent des consommations d'énergie considérables pour le

chauffage des pièces. L'éclairage représente aussi une source de consommation importante. On sait aujourd'hui construire et rénover des bâtiments pour les rendre économes en énergies. Alors qu'en France, un logement ou un bureau consomme en moyenne 200 KWh par m² et par an, on sait ramener ces besoins à 15KWh/m²/an selon la technique des bâtiments dits passifs (A. Dehedre 2005).

L'utilisation rationnelle de l'énergie couvre toutes les actions qui permettent d'obtenir le confort nécessaire à l'habitat et au travail en utilisant au mieux les ressources énergétiques. Bien utiliser ces ressources, implique de prendre en compte la consommation d'énergie et son coût, les processus organisationnels, le comportement des individus, les nuisances et les effets polluants.

Le secteur de l'énergie représente, à lui seul, 46% de la consommation finale d'énergie et 25% des émissions de gaz à effet de serre. National et pluriannuel, le programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment (PREBAT) a pour axes stratégiques la modernisation durable des bâtiments existants, la préfiguration des bâtiments neufs de demain et, enfin, l'émergence des bâtiments à énergie positive.

Pour pallier une partie de ces problèmes, les énergies renouvelables constituent, avec l'utilisation rationnelle de l'énergie, un élément important d'une politique énergétique durable qui vise la réduction des émissions de CO₂

Les émissions de CO₂ du secteur bâtiment proviennent principalement de l'énergie utilisée pour le chauffage des locaux, de la production d'eau chaude et de la climatisation. Cette dernière contribue également aux émissions de composés fluorés.

Pour les bâtiments neufs, la nouvelle réglementation thermique permettra d'améliorer leur bilan énergétique.

Les enveloppes des bâtiments, notamment les vitrages, capables de réagir en fonction des apports solaires vont pouvoir bientôt passer à une phase d'industrialisation.

Quant aux bâtiments existants, qui constituent un gisement considérable pour la réduction des émissions de CO₂, il s'agit d'inciter à la réalisation de travaux contribuant à économiser l'énergie : aides au diagnostic énergétique, opérations exemplaires, aides aux travaux de rénovation...

La sensibilisation et l'information seront également déterminantes: étiquetage des appareils électroménagers, affichage des consommations d'énergie des logements, lampes fluo compactes... Des actions ayant trait à la récupération des gaz frigorigènes sont à renforcer, tant pour les réfrigérateurs domestiques que pour la chaîne du froid dans la grande distribution.

Enfin, le recours aux énergies renouvelables est plus que nécessaire, les systèmes de chauffage et de refroidissement passif tels que : les serres, les cheminées solaires, l'éolien, les puits canadiens, l'isolation des parois et les Tour à vent ne feront que diminuer de l'utilisation des énergies fossile pour subvenir aux besoins de confort dans le bâtiment. L'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude, l'utilisation du bois comme source de chauffage doivent être renforcées.

Conclusion

Le climat de la terre a évolué au cours du siècle dernier. Il y a de nouvelles preuves plus solides que l'essentiel du réchauffement observé au cours des 50 dernières années est imputable aux activités humaines. Selon les prévisions actuelles des modèles climatiques, la hausse des températures devrait se poursuivre au cours du 21ème siècle à cause des gaz à effet de serre et devrait avoir des répercussions aussi bien négatives que positives sur la nature et l'homme.

Les impacts devraient varier selon les régions sans que l'on puisse déterminer pour l'instant leur nature exacte, surtout à petite échelle. Cependant, on prévoit que:

1. Plus on émettra de gaz à effet de serre, plus la planète se réchauffera.
2. Plus le réchauffement sera important et rapide, plus les répercussions seront néfastes,
3. plus forte sera la probabilité, bien que faible, d'avoir des répercussions à grande échelle, qui pourront être irréversibles.

Par conséquent, bien qu'un niveau acceptable pour les gaz à effet de serre n'ait pas encore été déterminé, on s'attend à ce qu'une réduction des émissions diminue le risque de répercussions néfastes. De nombreuses options sont disponibles afin de réduire ces émissions; leur coût doit être comparé aux risques pour les générations futures.

Il est très probable que l'importance accordée aux ICU par le rapport du GIEC « 0,05°C par siècle » a été largement sous-estimée.

Les ICU sont documentés sur tous les continents. Ils concernent aussi bien les villes côtières ou les villages de 1000 habitants (ce qui est peu ou pas pris en compte dans leur évaluation), de sorte que la plupart des enregistrements de température à la surface du sol sont « contaminés » par ces réchauffements locaux.

Le rôle des ICU est conforme à la distribution du réchauffement réellement constaté depuis un siècle, qui n'est statistiquement significatif que dans 10 à 20% des grilles quadrillant le globe.

Les modèles climatiques de projection pour le XXI^e siècle, fondés sur cette sous-évaluation originelle des ICU, sont eux aussi faussés. Les ICU représentent à leur manière un forçage anthropique du climat. Mais leur part dans l'augmentation de la température globale enregistrée doit être déduite de celle des autres forçages, notamment des fameux gaz à effet de serre qui retiennent l'essentiel de l'attention médiatique et motivent l'essentiel des décisions politiques.

Cette intensification de l'urbanisation a apporté dans son sillage beaucoup de changements jusqu'ici inconnus non seulement sur les humains (maladies liées aux encombrements), mais

également sur d'autres formes de vie en générant des changements physiologiques de la flore urbaine et de la faune relatifs à leur croissance et leur diversité.(<http://www.freefoto.com>) L'ensemble des paramètres sus indiqués se rassemble en un phénomène majeur spécifique aux milieux urbains qui est « l'îlot de chaleur urbain (ICU) » qui ne cesse d'attirer l'attention des chercheurs : urbanistes, architectes et météorologues vu qu'il constitue un véritable danger qui menace la survie des populations et la durabilité des villes.

Donc, le climat spécifique aux villes dit : « climat urbain » résulte de ce processus rapide d'urbanisation d'où l'intérêt de bien le comprendre afin de l'intégrer dans le cadre de la planification urbaine en tant que concept nouveau.

Aujourd'hui, où le projet urbain est devenu d'actualité, des questions se posent à nouveau et les réponses doivent être traitées à partir des connaissances acquises en matière de « microclimatique urbaine », qui devient par conséquent un sujet de recherche.

Afin de sauvegarder notre planète, le changement humain en matière d'utilisation des ressources énergétiques est urgent. Grâce à certaines applications, la minimisation des émissions de gaz fluoré pour les estimations; la moitié de ces réductions d'émissions potentielles peuvent être réalisées avec des avantages directs supérieurs aux coûts directs.

Le recours aux énergies renouvelables est plus que nécessaire, le retour aux concepts anciens dans le domaine du bâtiment diminuera l'utilisation abusive de l'énergie fossile.

Le changement climatique et l'ICU modifient notre consommation énergétique, l'utilisation abusive de la climatisation artificielle, sous ses différentes formes accentue encore plus le problème d'utilisation des gaz à effet de serre (CFC).

Le recours à l'utilisation de systèmes passifs contribuera forcément à la réduction de ce phénomène et préservera par conséquent cette énergie fossile pour les générations future. La tour à vent est l'une des solutions qui peuvent être utilisées dans ce domaine.

La maîtrise et la modernisation du système changera forcément notre façon de concevoir la climatisation. La réalisation du model simulé par outil informatique nous donnera la certitude concernant son pouvoir de rafraichissement évaporatif passif en premier lieu ainsi que sont rôle dans l'économie de l'utilisation de la climatisation artificielle dans les bâtiments et la réduction des coûts de l'utilisation de l'énergie électrique.

Tour à vent, moyen de rafraîchissement passif

La plupart des régions du monde ont des vents dominants dont les caractéristiques varient au cours des saisons. Ces vents dominants sont la conséquence de l'ensoleillement différent entre les pôles et l'équateur de la planète, ainsi que de la rotation de la terre (force de Coriolis). Les conditions locales définissent, pour beaucoup, les caractéristiques du vent en un lieu (vitesse, fréquence, direction, température). Ainsi, la nature du sol et la végétation (capacité d'absorber le rayonnement solaire), la topographie (proximité des montagnes induisant des mouvements ascendants et descendants), la présence d'étendue d'eau (brise de mer et brise de terre), l'altitude (le vent étant plus rapide en altitude) contribueront à définir les caractéristiques du vent en un lieu. (Richard Tolouie, 2006)

Dans des zones arides et chaudes, une difficulté est rencontrée en combinant les trois fonctions de la fenêtre ordinaire : lumière, ventilation, et vue. Si des fenêtres sont employées pour créer le mouvement d'air à l'intérieur, elles doivent être très petites, ce qui réduit l'éclairage de la pièce. L'augmentation de la taille de cette fenêtre, pour permettre un éclairage et une vue extérieure suffisants, laisse passer un air chaud aussi bien qu'une lueur blessante forte. Par conséquent, il est nécessaire de satisfaire les trois fonctions attribuées à la fenêtre séparément.

Pour satisfaire au besoin seul de la ventilation, la tour à vent (ou le malqaf) a été inventée.

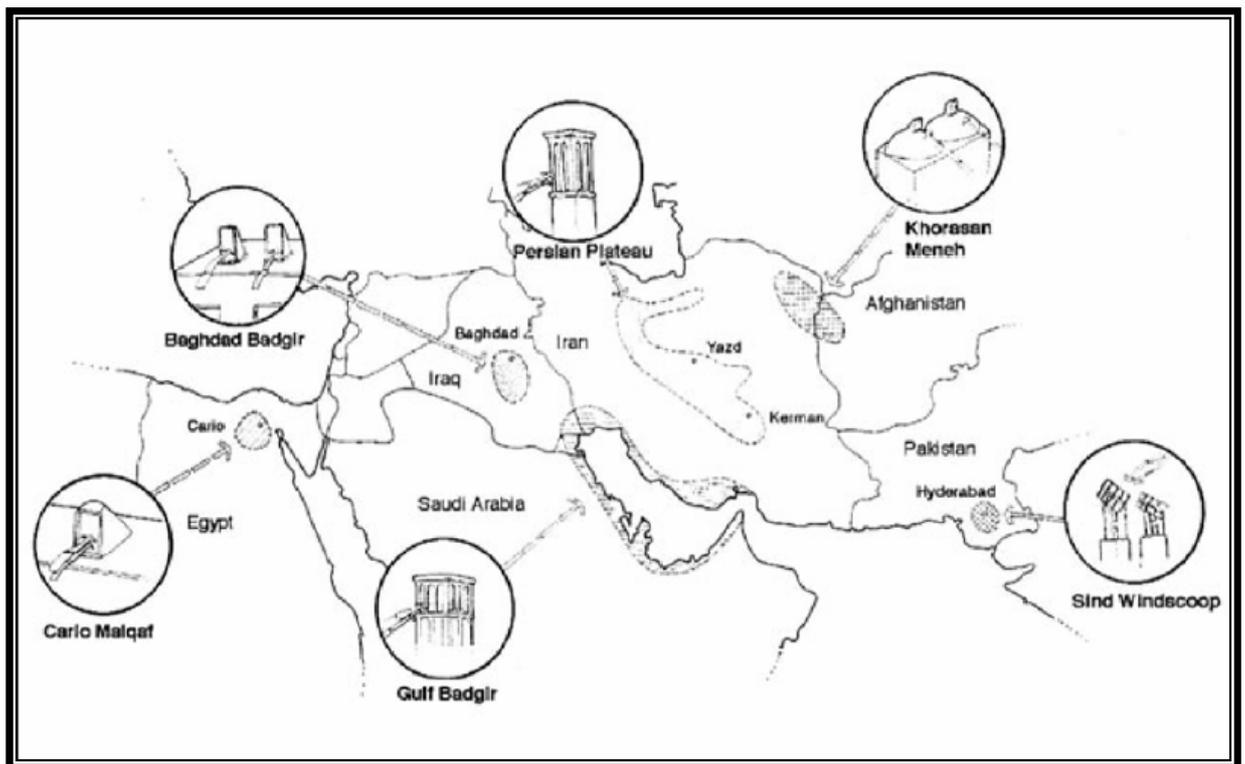
Ce dispositif est une gaine montant haut au-dessus du bâtiment avec une ouverture faisant face au vent dominant. Elle emprisonne le vent à l'intérieur de la tête de la tour au-dessus du bâtiment où il est plus frais et plus fort, et le véhicule grâce à des rigoles (conduits) vers le bas à l'intérieur du bâtiment. La tour à vent peut remplacer ainsi les fenêtres ordinaires et assurer la ventilation et le mouvement d'air. (Hassen Fathy, 1988)

3.1 Historique

Le vent est un élément climatique important. L'une de ses importantes utilisations est de fournir le confort dans les régions chaudes. Ceci parce que le vent crée une différence de pression sur les murs extérieurs ce qui a un effet sur la ventilation naturelle et la température de l'air intérieur d'un bâtiment. Pour les architectes, le vent est un facteur majeur dans la conception d'un bâtiment. Ils considèrent son effet sur le confort thermique par la convection, la ventilation et la pénétration d'air dans les espaces intérieurs très important. Le vent a attiré beaucoup d'attention en conception urbaine, et en particulier dans les villes chaudes comme Yazd, en Iran. Il est clairement visible dans les images de la ville. L'effet du vent sur les formes de bâtiment est identifié à travers l'utilisation des dispositifs formels tels que la tour à vent qui prévoit la meilleure utilisation du vent pour le confort de l'occupant. Ainsi, tout au long des rives septentrionales du golfe Persique et de la mer d'Oman, les architectes ont su utiliser la brise de mer. Ils ont réalisé cela en concevant la tour à vent avec une ouverture vers la brise pour une utilisation maximale de ventilation naturelle. La tour à vent telle que son nom l'indique, est un outil de ventilation utilisé pour obtenir un refroidissement naturel. Elle a

été employée pendant des siècles dans les pays à climat chaud et aride, en particulier en Iran. Les tours à vent dans les villes centrales de l'Iran sont connues en tant que « badgir » voulant dire capteurs à vent.

Des tours à vents se trouvent dans l'ensemble du moyen orient, de l'Égypte au Pakistan leurs formes s'adaptant aux caractéristiques du vent ainsi qu'au mode de construction. Les tours à vent s'appellent malqaf en Égypte, Mangh au Pakistan et Badgir (ou Barajil ou Barjeel, littéralement « attrape vent ») au Emirats Arabes Unis et en Iran comme indiqué sur la figure 3.1 (P.S. Ghaemmaghmi / M. Mahmoudi, 2005).

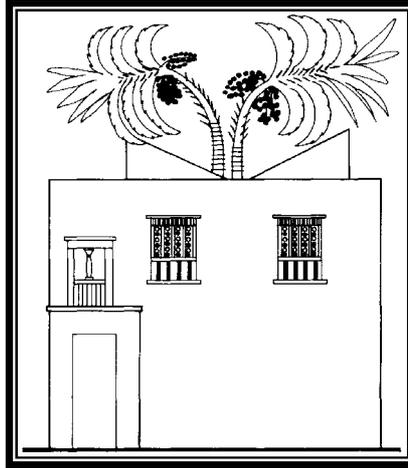


*Figure 3.18 : Les tours à vent dans le moyen orient
Source P.S. Ghaemmaghmi / M. Mahmoudi , Mai 2005*

Les tours à vent apparaissent non seulement sur les toits des maisons ordinaires mais également peuvent être vues sur les toits des réservoirs d'eau et des mosquées.

L'origine et la date exacte de l'utilisation de la première tour à vent n'est pas définie et convenue par les historiens et chercheurs. Nous pouvons citer les plus fréquentes, à savoir :

- L'idée du malqaf ou la tour à vent remonte aux périodes historiques très lointaines. Elle a été employée par les Égyptiens antiques dans les maisons d'Al-Amarna de Tal et est représentée dans des peintures de mur des tombeaux de Thèbes. Un exemple, représenté (figure 3.2) ci dessous, est la maison pharaonique du Bout-Amun représentée sur son tombeau, qui date de la dix-neuvième dynastie (1300 avant J.C.).



*Figure 3.19 : Tour à vent dans la maison pharaonique du Bout-Amun en Egypte
Source Hassen Fathy, 1988*

Il a deux ouvertures, un côté faisant face au vent et l'autre côté sous le vent, pour évacuer l'air par aspiration. (Hassen Fathy, 1988).

- - La première évidence historique des tours à vent remonte au quatrième siècle avant Jésus Christ. Un exemple d'une tour à vent simple a été trouvé en Iran par une expédition japonaise dans une maison à l'emplacement du chackmaq de Tappeh environ huit kilomètres au nord de Shahrood et les pentes méridionales des montagnes d'Alborz au nord-est de l'Iran. (P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005).



*Figure 3.20 : Tour à vent à YAZD, IRAN
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi , 2005*

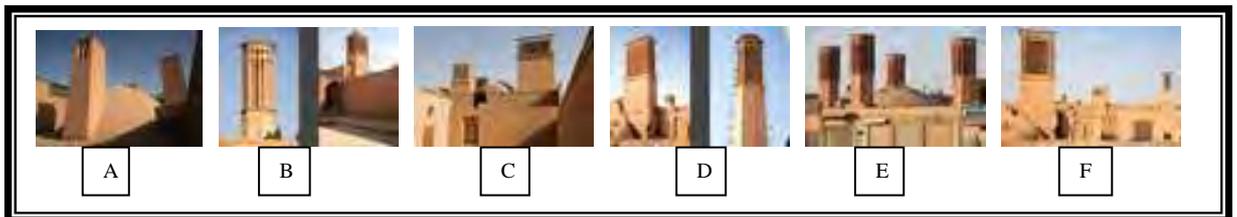
3.2 Définition des Tours à Vent

Les tours à vent sont des dispositifs destinés à capter les vents en hauteur afin de les diriger vers l'intérieur du logement à ventilé. La tour à vent fonctionne par la différence de température entre le vent et l'air ambiant intérieur. Le vent, plus frais, moins poussiéreux et moins humide, de part la hauteur à laquelle il est capté, pénètre par le capteur pour descendre au rez-de-chaussée de l'habitation. L'air neuf ainsi introduit chasse l'air intérieur plus chaud

et plus vicié. Si, par contre, l'air ambiant est plus frais que le vent en hauteur, une pression empêche la pénétration du vent dans la tour à vent. Il est préférable de prévoir, pour les saisons froides, des dispositifs qui permettent d'obstruer les bouches. (Alain Leibard ; André De Hedre, 2005).

La tour à vent se compose d'un conduit à deux extrémités dont la partie basse s'ouvre sur le séjour estival de la maison et la partie haute s'élève dépassant la toiture. La tour à vent est divisée en plusieurs passages d'air verticaux par des cloisons internes. La limite supérieure des cloisons internes se termine dans les ouvertures, sur les côtés de la tête de la tour. L'écoulement de l'air à l'intérieur de la tour à vent va dans deux directions, de haut en bas et de bas en haut. Cela veut dire que quand le vent souffle d'une direction, l'ouverture au vent sera l'admission et l'ouverture sous le vent sera la sortie et vice versa. (P.S. Ghaemmaghami ; M. Mahmoudi, 2005).

Un badgir / tour à vent / capteur à vent / بادگیر est un élément traditionnel d'architecture perse utilisé depuis des siècles afin de créer une ventilation naturelle dans les bâtiments. On ne sait pas qui a inventé le capteur à vent, mais il peut, encore aujourd'hui, être vu dans de nombreux pays voir figures 3.4 à 3.7 ci dessous.



*Figure 3.21 : Différentes formes de capteurs à vent à Yazd
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi , Mai 2005*

Les badgirs peuvent avoir plusieurs formes, comme l'unidirectionnel, le bidirectionnel ou le multidirectionnel. La différence de hauteur crée une faible différence de pression entre la base et le sommet de la colonne interne du badgir à chaque fois qu'un vent souffle, il passe à travers le sommet du badgir.



Figure 3.22 : Tour à vent dans une maison à YAZD



Figure 3.23 : Tour à vent dans une mosquée

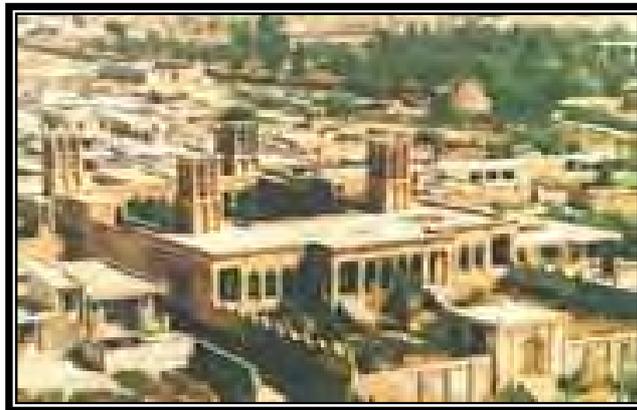


Figure 3.24 : Tour à vent dans une résidence en IRAN

Le badgir a été si efficace dans l'architecture iranienne qu'il a été utilisé depuis très longtemps comme élément réfrigérant. De nombreux réservoirs d'eau traditionnels ont été bâtis couplés à des capteurs à vent, permettant ainsi de stocker l'eau à des températures extrêmement fraîches pendant les mois d'été. (Wikipedia).

3.3 Fonctionnement de la Tour à Vent

Dans de nombreuses architectures traditionnelles, l'air est conduit par l'intermédiaire de gaines intérieures ou intégrées au mur mitoyen. Les écopés (conduits) des tours à vent sont généralement en forme d'entonnoir, pour créer un effet venturi, et orientées face aux vents dominants. Lorsque le vent se dirige selon un secteur étroit, l'écope se constitue d'une large section verticale qui va en se rétrécissant légèrement jusqu'à celle du conduit intérieur. Dans les climats à forte amplitude thermique, la forte inertie des matériaux du conduit peut rafraîchir l'air efficacement. (A. Leibard ; A. De Hedre, 2005).

Une tour à vent est employée pour acheminer le flux d'air aux espaces intérieurs des bâtiments afin d'assurer un confort de vie pour les occupants. Dans l'architecture iranienne, une tour à vent est une combinaison d'ouvertures d'admission et de sortie d'air. Le tunnel

procure de l'air frais pour le bâtiment, tout en servant de conduite d'air. A BAM il existait des tours à vent qui ont été détruites par des tremblements de terre ; ces dernières n'étaient pas directement reliées à l'espace vital.

En ce qui concerne le fonctionnement des tours à vent, deux catégories sont connues.

3.3.1 Tour à Vent Face aux vents dominants

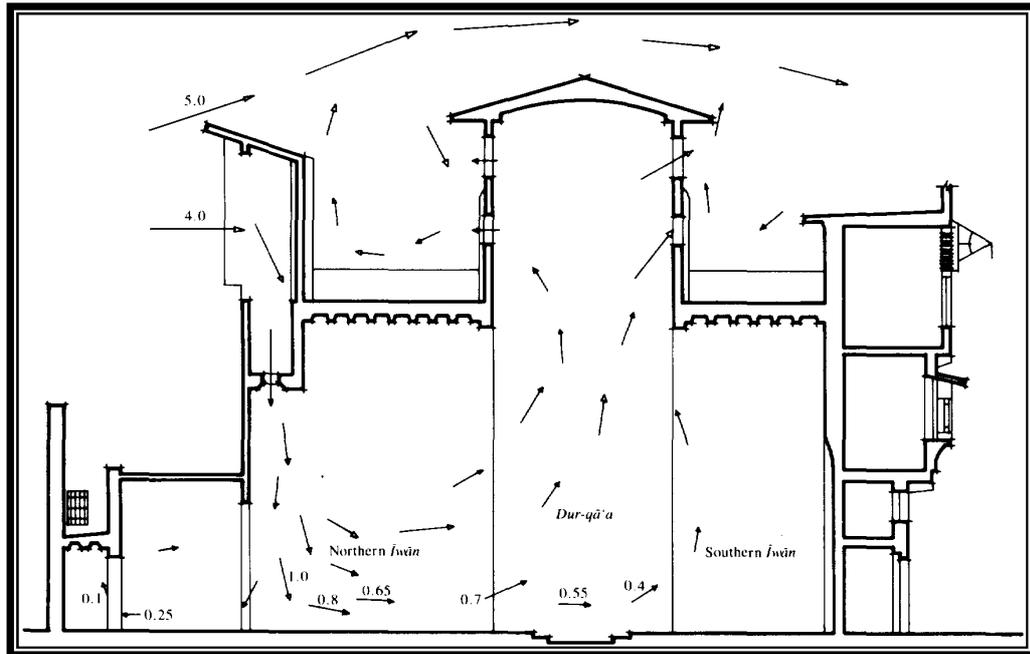
Cette catégorie peut être subdivisée en deux types :

- a) Dans les régions où les vents dominants sont unidirectionnels ; la tête de la tour aura une seule ouverture faisant face à cette direction.
- b) Dans les régions où les vents proviennent de toutes directions quand ils seront disponibles ; tête de la tour à vent aura plusieurs ouvertures et sera multidirectionnel.

Les tours à vent unidirectionnelles opèrent là où les vents saisonniers et journaliers sont pratiquement fixes vers une seule direction. La tour à vent unidirectionnelle consiste à un seul passage ou conduit, habituellement construit dans l'épaisseur du mur extérieur, montant haut au-dessus des toits. En présence du vent, l'air est forcé de circuler à travers les ouvertures en amont aspiré vers le bas traversant le passage de la tour.

La tour à vent modifie à la fois la température et la densité de l'air qu'elle contient ainsi que celle de l'air qui l'entoure (Y. Benamara, 1987). Cette différence de densité dans la tour crée un courant d'air, tantôt ascendant, tantôt descendant. Dans la partie inférieure de la tour, des portes s'ouvrent au sous-sol et au hall central de l'étage principal de la construction. La circulation d'air dans les différentes parties du bâtiment est commandée par l'ouverture et la fermeture des portes de la tour à vent et des portes des pièces donnant sur la partie centrale.

Lorsque les entrées du capteur à vent sont le plus haut possible par rapport au sol, elles permettent d'obtenir de l'air frais et plus sain. Ceci est d'une grande importance dans les zones urbaines denses où les brises sont très réduites au niveau du sol et où l'air est chaud chargé de poussière. La tour à vent doit être suffisamment plus haute que les toits environnants pour capter les flux d'air à une hauteur où ils ne sont pas ralentis. Elle est habituellement orientée de façon à capter les brises favorables. (Y. Bouchahm 2003).



*Figure 3.25 : Capteur à vent unidirectionnel au Caire, les flèches montrent l'état de l'air au niveau du capteur.
Source Izard 1993*

3.3.1.a Tour à vent unidirectionnelle

La conception de la tour/capteur à vent n'est pas la seule considération. La sortie de l'air est aussi très importante lorsque le vent souffle d'une seule direction, il exerce une pression positive sur la façade du bâtiment qui lui fait face, mais il crée également une dépression sur le toit et sur la façade opposée du bâtiment. Si les ouvertures de sortie sont placées dans ces zones, l'air est aspiré et évacué du bâtiment. La coupe sur la maison du Caire (Figure 1.8) montre que la partie supérieure du toit est utilisée comme sortie d'air. Le toit est constitué de matériaux légers qui s'échauffent rapidement, chauffant ainsi l'air qui se trouve en contact immédiat en bas, l'air s'élève et s'échappe créant une dépression dans la zone située au-dessus, ce qui accélère le mouvement de l'air vers le haut et vers l'extérieur.

Quand l'air pénètre dans la tour, voyageant à travers les passages, refroidi en contact des parois de la tour. Sachant que l'air frais est plus dense que l'air chaud, donc il a tendance à descendre créant un courant d'air. La nuit, les parois chaudes de la tour/capteur, perdent leur chaleur accumulée durant le jour par radiation au contact de l'air frais. La circulation de l'air refroidi dépend essentiellement des arrangements des ouvertures dans la tour de la construction. (Y. Bouchahm 2003).

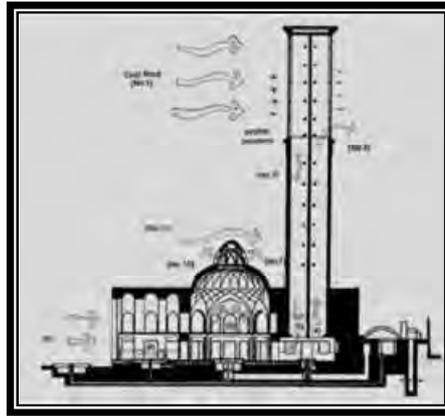


Figure 3.26 : Circuit du mouvement d'air à travers la tour à vent
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

3.3.1.b Tour à vent multidirectionnelle

C'est la solution la plus simple et plus répandue pour les vents changeants ou variables, la tête de la tour peut varier en forme, en arrangement et en nombre de 2 à 8 et même plus. Les vents de n'importe quelle direction sont ainsi admis à l'intérieur de la construction. Les passages internes de la tour se prolongent verticalement jusqu'au bas niveau où l'air capté par la tête est entraîné par la différence de température. La tour à vent multidirectionnelle fonctionne de la même manière que l'unidirectionnelle avec la seule différence est qu'une partie de l'air capté peut être perdu par les autres ouvertures qui auront une pression négative. Alors que l'unidirectionnelle tour à vent du fait qu'elle ne possède qu'une seule ouverture d'entrée, l'air capté ne pourra s'échapper.

Ce genre de tours se trouve en général sur la côte où les brises de mer et de terre se succèdent. Pendant le jour le capteur à vent introduit l'air frais de la mer, alors que la nuit la brise souffle de la terre.

Le fonctionnement du capteur à vent ne dépend pas seulement du microclimat régnant à l'intérieur et l'extérieur du bâtiment mais aussi du régime des vents dominants saisonnier. Il peut fonctionner différemment selon le jour et la nuit. (Y. Bouchahm 2003).

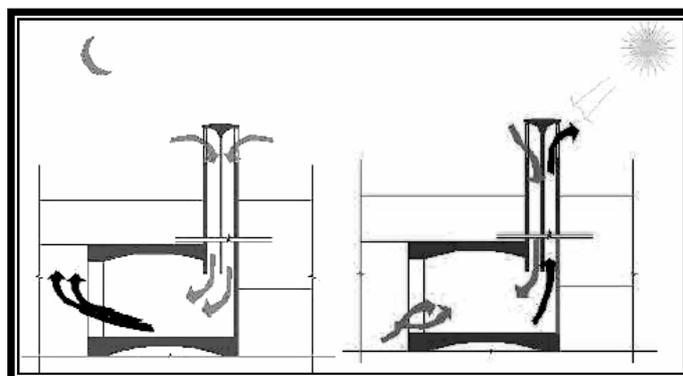


Figure 3.27 : fonctionnement de la tour à vent le jour et la nuit
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

A. La nuit sans vent

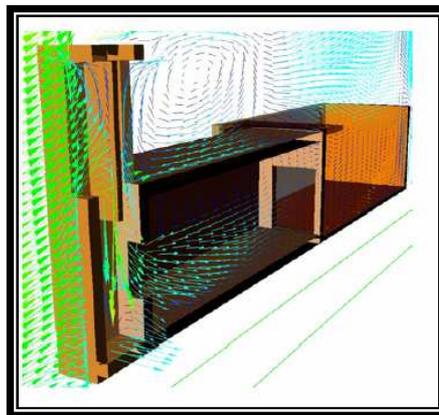
En absence du vent, et pendant la nuit, la tour/capteur à vent opère dans ce cas comme une cheminée, en activant le mouvement de l'air et l'obligeant à monter et à sortir de l'ouverture d'entrée au niveau haut du toit.

La masse thermique de la tour, ainsi que celle des murs intérieurs des passages d'air ou tunnel ont absorbé une quantité de chaleur, durant le jour vont perdre cette chaleur accumulée par radiation au contact de l'air frais la nuit. Sachant que l'air est plus léger, la pression d'air au niveau haut de la tour est réduite, créant un courant d'air ascendant. L'air dans la maison est chassé vers le haut, direction ouvertures (fenêtres, portes). Le processus continue durant la nuit, alors l'air continue à circuler à travers la maison. (Y. Bouchahm 2003).

B. La nuit avec vent

Quant il s'agit d'une nuit ventée, l'air est forcé de circuler dans la direction opposée. Les pièces sont refroidies par l'air de la nuit venant de haut en bas de la tour contrairement à celui venant des portes et des fenêtres malgré que l'air pendant la nuit soit chauffé par le contact des parois de la tour avant d'entrer dans la maison.

Le refroidissement reste toujours suffisamment efficace afin de ramener la température dans la maison proche à celle de l'air ambiant. Cependant, les parois de la tour perdent leur chaleur accumulée durant le jour par les radiations solaires. (Y. Bouchahm 2003).



*Figure 3.28 : l'effet d'aspiration dans une tour multidirectionnelle mise avec vent
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005*

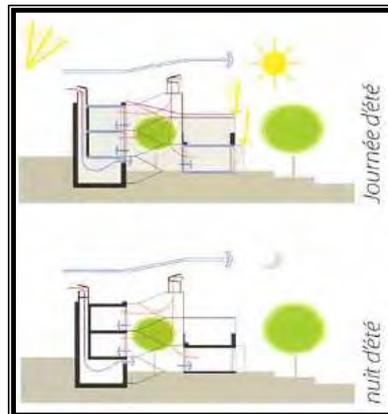
C. Jour sans vent

Le fonctionnement de la tour à vent c'est l'inverse de la cheminée. Les parois de la partie supérieure de la tour ont été refroidies durant la nuit précédente. L'air chaud en contact de ces dernières sera refroidi. L'air rafraîchi descendra à travers la tour, créant un courant d'air descendant, et l'air est poussé vers les ouvertures en bas de la tour pour entrer dans la pièce. (Y. Bouchahm 2003).

D. Jour avec vent

En présence du vent, le flux d'air est augmenté considérablement. L'air frais peut donc circuler dans toutes les pièces de la maison par un arrangement rigoureux des portes ou ouvertures dans la tour à vent et dans les pièces elles-mêmes pour créer une ventilation transversale. Cependant la tour à vent opère constamment durant le jour. L'effet de refroidissement et la durée de chaque phase de fonctionnement de la tour à vent change en accord avec la fluctuation de la température de l'air, de l'intensité des radiations solaires et de la vitesse de vent. (Y. Bouchahm 2003).

La conception d'un capteur à vent ne dépend pas seulement de la considération du vent dominant, mais aussi du microclimat régnant à l'intérieur du bâtiment (Alain Caïn et Al., 1975).



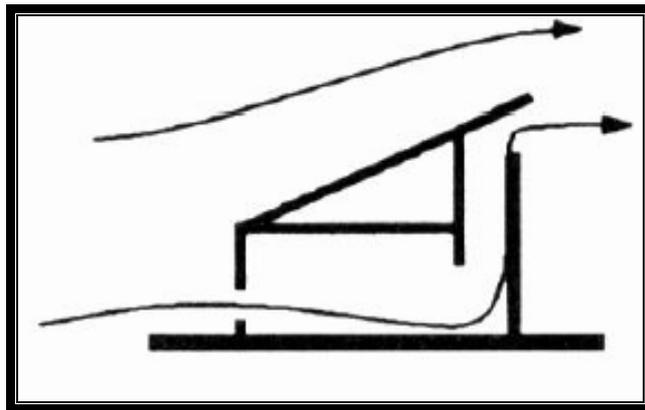
*Figure 3.29 : fonctionnement de la tour à vent le jour et la nuit avec vent
Source Richard-Tolouie 2006.*

3.3.2 Tour à Vent Contre les vents dominants

Ce deuxième type de tour à vent est utilisé où les vents dominants sont favorables. L'effet de succession/aspiration causée par la pression négative au côté aval du vent, cause un courant d'air ascendant à travers l'écoulement intérieur et à travers les ouvertures. Ce type

de tour à vent peut être utilisé comme une cheminée pour aspirer la fumée des cuisines à travers la tour vers le haut pour s'échapper de l'ouverture d'entrée au niveau du toit.

En effet, la quantité de fraîcheur accumulée dans la masse de la tour est généralement limitée à cause de la petitesse de la masse et la capacité spécifique de chaleur basse du matériau d'emmagasinage d'énergie, et peut suffire pour répondre aux besoins de refroidissement de la construction durant les jours chauds d'été. Aussi la surface d'exposition du matériau d'emmagasinage n'est pas suffisante pour permettre un taux élevé de transfert calorifique de chaleur. (Y. Bouchahm 2003).



*Figure 3.30 : tour à vent contre le vent
Source Azami 2005.*

Cependant le refroidissement évaporatif est un processus très efficace pour l'amélioration de la performance thermique de la tour à vent traditionnelle. Le refroidissement sensible se produit quand il y a un changement de la température mais il n'y a pas de changement de l'humidité, par contre le refroidissement évaporatif justement se produit quand il y a un changement de la température ainsi que celui de l'humidité.

Ainsi, il joue un rôle très important dans le fonctionnement de la tour à vent. Ce fonctionnement de la tour dépend de la température et de l'hygrométrie de l'air. Ce type de refroidissement joue également un rôle important. Par exemple, si le mur du sous-sol de la tour est humide, comme c'est souvent le cas, l'air descendant est refroidi à la fois par ventilation et par évaporation. Autrement dit, l'eau sur les murs absorbe suffisamment de chaleur pour se vaporiser. Puis cette vaporisation exige une grande quantité de chaleur, « chaleur latente de vaporisation » les tours à vent qui comportent un système de refroidissement par évaporation peuvent refroidir l'air de manière assez efficace. De plus, l'humidification qui accompagne le refroidissement de l'air par évaporation d'eau rend cet air agréable à respirer, on peut encore exploiter le refroidissement par évaporation d'eau en plaçant un petit bassin avec fontaine au bas de la tour à vent. (Y. Bouchahm 2003).

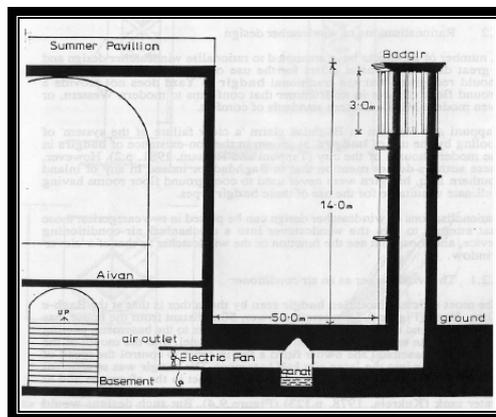
Le vent / air qui descend dans la tour, est refroidie par ventilation et par évaporation, puis de nouveau par évaporation de l'eau du bassin et de la fontaine, avant de pénétrer dans les pièces du bâtiment. Ce type est très répandu à Yazd en IRAN



*Figure 3.31 : utilisation de l'humidification dans les tours à vent
Source Richard-Tolouie 2006.*

La convection naturelle et la ventilation captée peuvent être améliorées par l'adjonction d'un dispositif destiné à laisser évaporer de l'eau afin que la température de l'air baisse sous l'effet de la perte de chaleur latente consommée par évaporation.

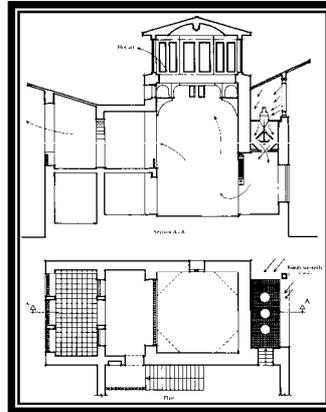
Dans la ville de Bam, une tour à vent est utilisée différemment elle se trouve à environ 50 mètres du bâtiment qu'elle dessert et un tunnel souterrain relie son extrémité inférieure au sous-sol du bâtiment.



*Figure 3.32 : tour à vent avec souterrain pour un refroidissement évaporatif
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005*

On a planté des arbres, des arbustes et du gazon sur le sol qui recouvre le tunnel. Quand on arrose le sol, l'eau s'infiltré dans la terre et humidifie les murs du tunnel, de sorte que l'air descend de la tour et qui passe dans le tunnel est refroidie par ventilation et par évaporation, un bassin et une fontaine, placés à l'endroit où l'air refroidi entre dans le bâtiment, apporte un refroidissement supplémentaire.

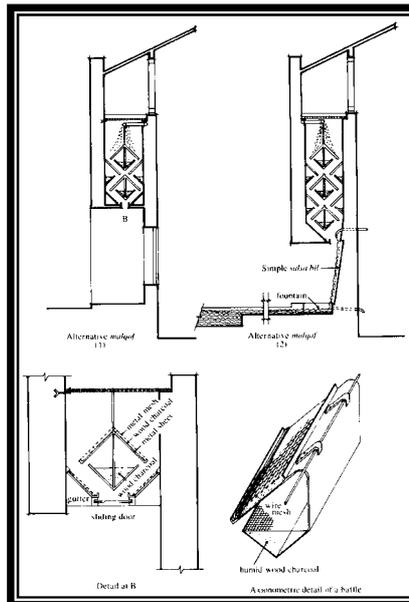
Une autre technique développée en Egypte. Hassan Fathy. 1979, lors de la conception d'un capteur à vent pour une école dans son village de Gournah, utilise des lits de charbon de bois humide sur lequel l'air devait passer avant d'entrer dans les salles, et il affirme avoir mesuré une chute de la température de l'air de 10°C.



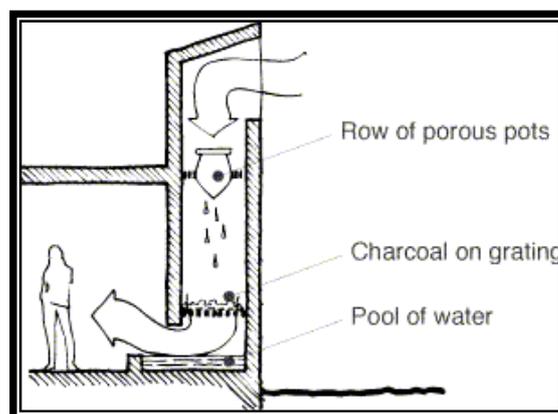
*Figure 3.33 : capteur à vent dans une école à Gournah
Source Hassan Fathy 1979*

L'utilisation du charbon est un autre procédé qui utilise l'eau et le charbon. Ce système apparaît en Iran et en Egypte (A.V.Alp. 1987). Ce procédé permet un triple rafraîchissement de l'air avant d'arriver à l'espace intérieur. Dans l'axe vertical de la tour (le conduit), un récipient ou une jarre en argile est suspendue. Au dessous de ce récipient du charbon de bois est posé sur une grille. Enfin, à la base inférieure du conduit, un plan d'eau réceptionne en dernière étape l'air qui pénètre directement dans l'espace.

L'air extérieur pénètre dans la tour et traverse la jarre d'eau poreuse, se refroidit et s'humidifie. Des gouttes d'eau qui tombent sur le charbon s'évaporent, et à la leur tour, elles refroidissent encore l'air déjà rafraîchi par sa traversé de la jarre. Avant de pénétrer dans les espaces de vie, il reçoit un refroidissement supplémentaire par évaporation d'eau à l'extrémité du conduit de la tour.



*Figure 3.34 : Efficacité du capteur à vent (humidification par arrosage)
Source J.L. Izard1993*



*Figure 3.35 : Effet de refroidissement par évaporation (jarre plus charbon)
Source J.L. Izard1993*

Une autre solution qui permet de profiter au maximum du potentiel d’humidification et d’évaporation. Il s’agit de la combinaison d’une rivière souterraine et d’une tour à vent. Dans ce système une conduite relie la rivière au sous-sol du bâtiment à refroidir. L’air sec et chaud pénètre dans le tunnel de la rivière, par une conduite qui débouche à l’intérieur du bâtiment et refroidi à la fois par ventilation et par évaporation en passant au dessus de l’eau. (Y.Bouchahm 2003).



*Figure 3.36 : pavillon de Bagh-e khan rafraichissement par ventilation et évaporation rivière sous-terrine
Source S. Roaf 2005*

Le résultat de cette recherche prouve que l'architecture traditionnelle est une leçon afin d'enrichir l'architecture moderne. Dans l'architecture traditionnelle de L'Iran, le climat, les matériaux locaux et les ressources énergétiques renouvelables ont été employés. La tour à vent montre l'harmonie établie entre l'environnement humain et la nature. Les techniques traditionnelles en bâtiment étaient normalement bien adaptées au climat. Cependant, le mode de vie moderne et les technologies occidentales empruntées ont souvent remplacé les traditions établies dans la conception des bâtiments. Là, plusieurs exemples reflètent la manière dont les gens organisent leur environnement sous diverses formes. Ce travail montre les différents types de tours à vent adoptées par des personnes dans différentes situations. Elles sont décrites en termes de leur fonction, structure, détails, composition, ornements et forme.

3.4 Classification des tours à vent

Les tours / Capteur à vent peuvent être classées suivant plusieurs critères, nous pouvons les classées selon la fonction, la forme du plan et le nombre d'ouverture.

3.4.1 Classification basée sur la fonction

La tête de la tour peut avoir des ouvertures ou passages d'air sur un, deux ou quatre côtés qui font face à la direction prédominante pour s'adapter au vent dans des directions appropriées. Des tours à vent sont souvent décrites par le nombre de directions auxquelles elles font face, comme les unidirectionnelles (yek-tarafe), bidirectionnelles (dotarafe), quadri directionnelles (carboniser-tarafe), et octodirectionnel (parasites-tarafe).

De différentes fonctions et formes des tours à vent ont été conçues pour les différents climats existants (figures. 3.20 et 3.21). La fonction principale c'est le rafraichissement et la ventilation naturelle basée sur l'effet de tirage thermique.

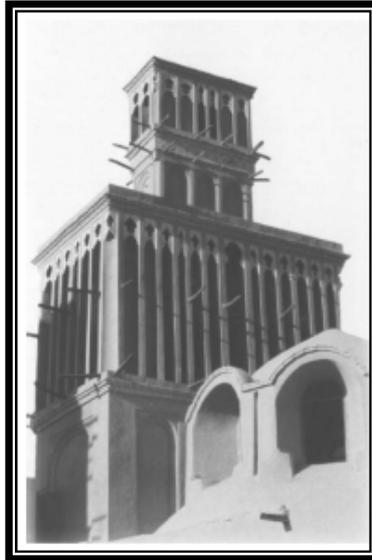


Figure 3.37 : Tour à vent à BARGHOO
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

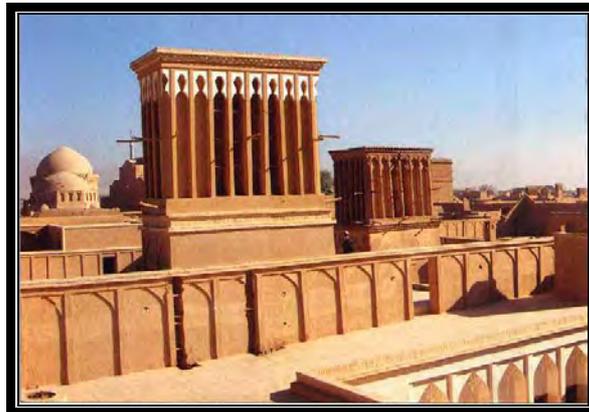


Figure 3.38 : Tour à vent à Yazd
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

3.4.1.a Les tours unidirectionnelles (yek-tarafe)

Elles sont orientées Nord-ouest ou nord (sens des vents dominants) à Yazd. Elles ont un toit en pente et une ou deux ouvertures seulement (passages d'air). Autrement elles sont généralement décrites par la direction à laquelle elles font face telle que « shomali ». L'étude des tours à vent (Roaf 1988) indique que 3% d'entre elles étaient unidirectionnelles à Yazd (figure 3.22). C'est le type le moins utilisé à Yazd, car elles ne profitent pas des vents venant d'autres sens que celui des vents dominants

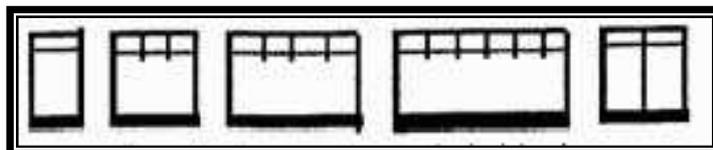


Figure 3.39 : Plan type d'une tour à vent unidirectionnelle
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

3.4.1.b Les tours bidirectionnelles (do-tarafe)

La tour est un exemple simple divisée en deux compartiments verticaux de brique. Elle a seulement deux ouvertures. Elle est souvent nommée par la direction, telle que les tours au nord-sud. L'enquête de Roaf indique que 17% des tours sont de ce type et sont toutes construites sur des maisons ordinaires (figure 3.23).

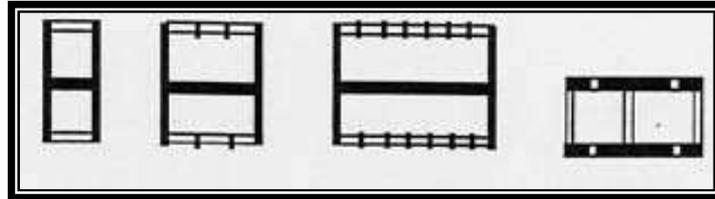


Figure 3.40 : Plan type d'une tour à vent bidirectionnelle
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

3.4.1.c Les tours quadri-directionnelles (tarafe de chahar)

Ce sont notamment les tours à vent les plus populaires. Elles sont divisées en quatre principaux compartiments (figure 3.24). Plus de la moitié des tours à vent dans les régions chaudes et arides et la totalité des tours à vent dans les régions chaudes et humides sont de type quadri-directionnel.

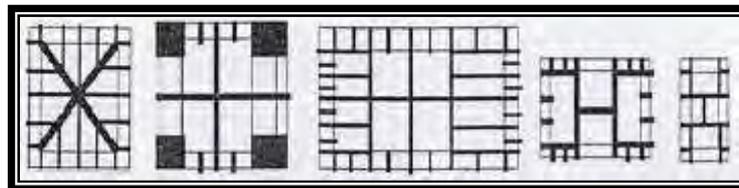


Figure 3.41 : Plan type d'une tour à vent quadri-directionnelle
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

3.4.1.d Les tours octo-directionnelles (tarafe de hasht)

Selon l'enquête de Roaf (1988) seulement 2% des tours à vent de Yazd sont de ce type. Elles sont le plus souvent placées sur les réservoirs d'eau. La tour à vent au sommet de Bagh-e Dolatabad a une forme octogonale.

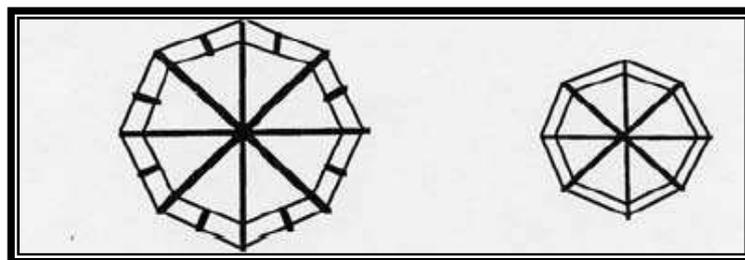


Figure 3.42 : Plan type d'une tour à vent octo-directionnelle
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

3.4.2 Classification basée sur la forme du plan

Plusieurs formes de plan ont été rapportées : carrée, rectangulaire et octogonale. La forme carrée est le type utilisé dans les tours à vent quadri-directionnelles à Yazd, (Figures 3.21 à 3.23). Les formes rectangulaires se composent de tours à vent: uni, bi et quadri directionnelles. Les tours octo-directionnelles sont celles dont le plan est octogonal, et donc peuvent recevoir le vent par leurs huit côtés. Dans ce cas le vent est imprévisible et peut venir de n'importe quelle direction donc on prévoit ce genre de tour.

Il existe une large gamme de tailles et de dimensions de 0,40 x 0,80 m² à 5 x 2,5 m² de sections dont le rapport largeur/longueur est de 1:2. La dimension de la tour dépend des dimensions de l'espace à refroidir.

Les compartiments sont des éléments à l'intérieur des gaines (conduits) des tours à vent et divisent cette dernière en plusieurs conduits. Elles sont construites en brique de terre. Ces compartiments forment une grille plate d'ouvertures finissant par un toit lourd de maçonnerie sur la tour. Ces dernières peuvent être classées en deux groupes: compartiments principaux et compartiments secondaires.

Les compartiments principaux s'étalent au centre de la tour, formant un compartiment séparé derrière les ouvertures. Leur base est souvent comprise entre 1,5 à 2,5 m au-dessus du niveau de rez-de-chaussée. Les modèles de cloisons changent d'une tour à une autre, mais la plupart des formes connues sont en formes de I, de H, et de X. Les compartiments secondaires restent aussi larges que le mur externe, environ 20 à 25 centimètres. Un conduit d'air peut être subdivisé en des cloisons additionnelles ayant un rôle structural ou thermique. Celles-ci peuvent séparer la tour, respectivement en deux ou quatre conduits.

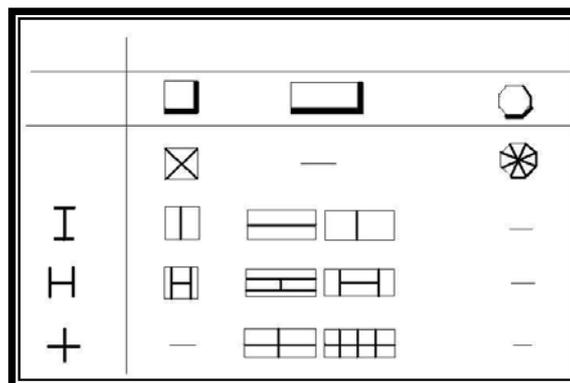


Figure 3.43 : Classification basée sur la forme du plan
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

Des tours à vent ont pu être classées par catégorie selon leurs formes de plan et de modèles de compartiments (figure 3.26). Les compartiments divisent la tour en de petits conduits pour augmenter le mouvement d'air selon «l'effet de venturi». La vitesse du vent sera augmentée dans le conduit ayant une section étroite. Un tel arrangement fournit plus de surfaces en contact avec l'air entrant, de sorte que l'air puisse entrer en contact avec la chaleur qui est stockée dans la masse de ces cloisons. Elles agissent climatiquement tout en ayant un aspect esthétique. Ils fonctionnent comme des ailettes de climatiseurs ou des radiateurs parce que les cloisons de brique de terre restituent la chaleur pendant la nuit et elles sont préparées pour absorber la chaleur pendant la journée. Le contact de l'air chaud avec les cloisons de brique de terre permet le transfert thermique aux cloisons, les vents frais pénètrent ensuite à l'intérieur de l'espace.

3.4.3 Classification basée sur le nombre d'ouvertures

Plusieurs formes de plan ont été rapportées : carrée, rectangulaire et octogonale. Le nombre d'ouvertures ou compartiments varie aussi de deux à huit compartiments, on peut trouver :

3.4.3.a Les tours à deux ouvertures

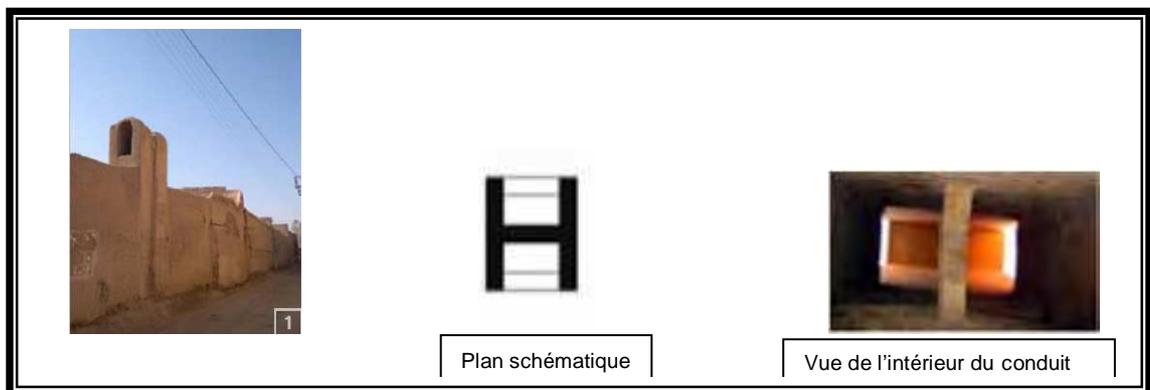


Figure 3.44 : Tour à vent à deux ouvertures

Source Richard-Tolouie 2006.

3.4.3.b Les tours à quatre ouvertures

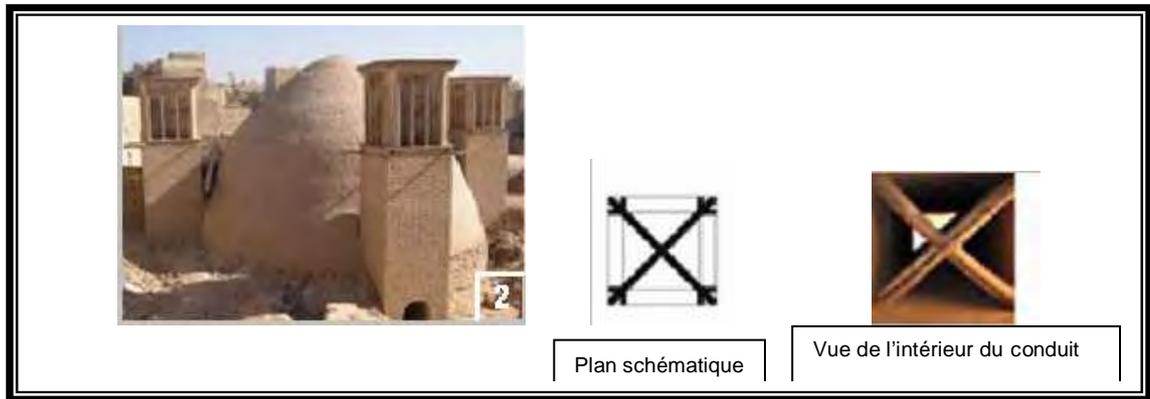


Figure 3.45 : Tour à vent à quatre ouvertures
Source Richard-Tolouie 2006.

3.4.3.c Les tours à six ouvertures

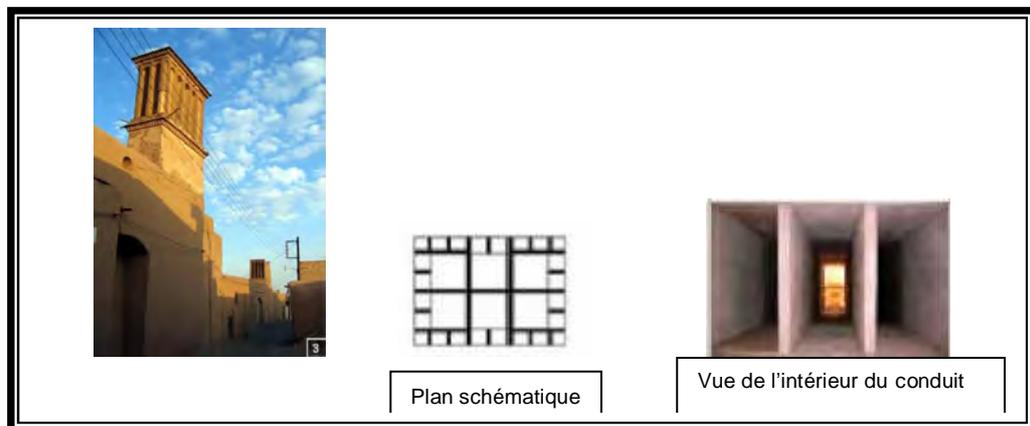


Figure 3.46 : Tour à vent à six ouvertures
Source Richard-Tolouie 2006.

3.4.3.d Les tours à huit ouvertures

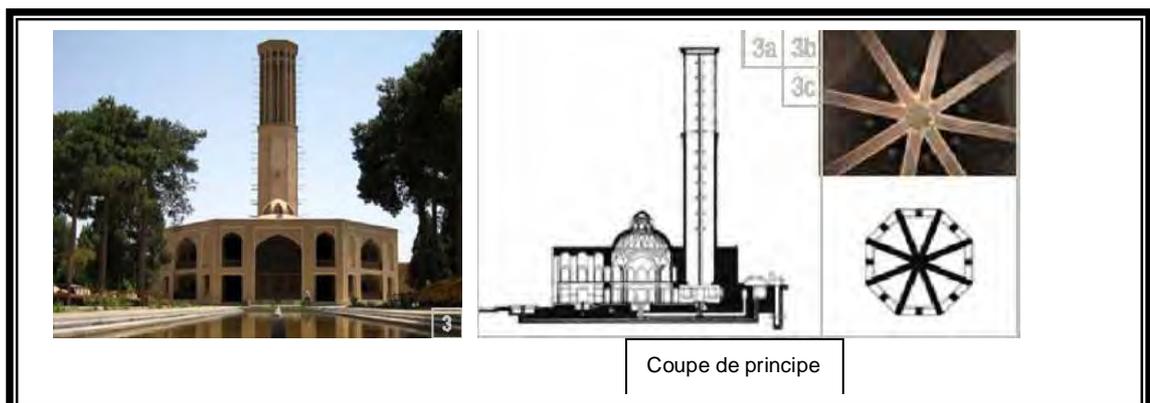


Figure 3.47 : Tour à vent à huit ouvertures
Source Richard-Tolouie 2006.

3.5 Orientation de la tour à vent

L'orientation de la tour à vent signifie l'adaptation d'une position de son flanc par rapport à l'une des quatre directions géographiques principales. Elle est déterminée en raison de la fonction de la tour, l'utilisation de la puissance du vent et la direction désirée dans laquelle le vent souffle. Il existe des tours à vent unidirectionnelles à Meibod, qui font face au vent désiré. Et dans certains cas, les tours à vent unidirectionnelles agissent en tant qu'aspirateur d'air dont l'écoulement s'oppose au vent pour se localiser dans une région à pression négative engendrant de l'air chaud à l'intérieur de la maison et puis l'évacue à l'extérieur. A YAZD le vent souffle couramment du nord-ouest (figure 3.31). Le sens longitudinal des tours à vent est donc orienté vers le nord-ouest et cela dans le but de capter le maximum de vent afin d'assurer un refroidissement à l'intérieur des bâtiments. Dans les régions côtières telles que Bandar Lengeh (figure 3.32), les bâtiments ont une orientation est-ouest. La brise de mer souffle nuit et jour mais le vent le plus favorable souffle de l'est à l'ouest. Les tours à vent sont donc construites avec une orientation quadri-directionnelle afin d'utiliser tous les vents souhaitables du nord au sud et de l'est à l'ouest

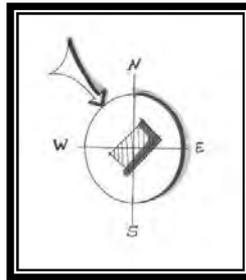


Figure 3.48 : Orientation des tours à vent à Yazd
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

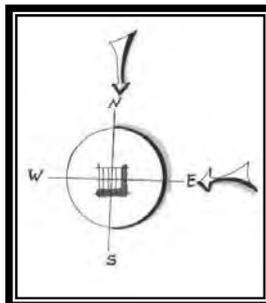
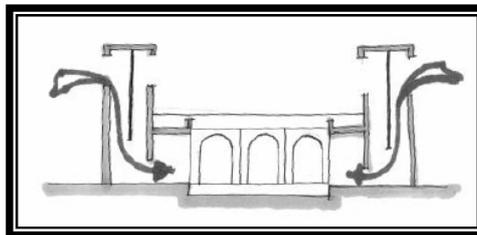


Figure 3.49 : Orientation des tours à vent à Bandar Lengeh
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

Dans les régions chaudes et humides, la température sur la surface du sol est basse. Le vent et la brise désirés sont à un niveau bas. Ainsi les tours dans de tels secteurs ne montent pas très haut, elles s'élèvent seulement à un niveau minimum au-dessus du toit. Dans le plateau central de l'Iran les tours sont également au-dessous du niveau du sol. Elles sont conçues pour

entretenir les espaces intérieurs dans différents niveaux : le sous-sol et le hall de réception au niveau du rez-de-chaussée utilisés en été. L'humidité dans Bandar Lengeh est plus élevée en raison de la proximité de la mer. Ainsi il n'y a aucun sous-sol dans les bâtiments dans cette région (Figure 3.33). Ici la réduction de la température pendant le transport des courants d'air est un objectif de conception important pour les tours à vent. L'enquête montre que plus de 60% de toutes les tours à vent ont moins de 3 mètres de haut au-dessus du toit et d'une élévation seulement de 15% au-dessus de 5 mètres de haut. Les tours plus hautes augmentent le potentiel de refroidissement, mais provoquent une défaillance de structure, en particulier dans la tête des tours, qui sont affaiblies par la fréquence et la force des vents. Les conduits de la tour à vent dans les régions arides et chaudes sont plus longs que les conduits dans les régions chaudes et humides. Premièrement, parce que les tours à vent jouent le même rôle qu'un sous-sol dans les régions arides et chaudes, mais ce sous-sol n'est pas nécessaire dans des régions humides et chaudes. Deuxièmement, la hauteur à laquelle se trouve le vent par rapport au sol a également un rôle dans la détermination de la taille des tours. Si le courant d'air désiré est à un niveau bas, la tour doit le recevoir à une distance basse. Un conduit plus long augmenterait la vitesse du vent dans le conduit.



*Figure 3.50 : Tour à vent dans un climat chaud et humide
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005*

Deux principes sont en jeu et prévalent l'un ou l'autre en fonction de la force du vent et des différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur, qui varient au cours des heures de la journée.

- Effet « attrape vent » : Le vent plus rapide en hauteur et moins chargé de sable est capté par les ouvertures hautes de la tour situées du côté du vent. Le vent descend par les canalisations verticales reliées à ces ouvertures situées sous le vent. Dans la pièce ce courant d'air peut alors selon les cas passer au dessus d'un bassin, son évaporation créant de la fraîcheur, ou bien aspirer (effet venturi) l'air frais des sous sols pour rafraîchir les pièces d'été.

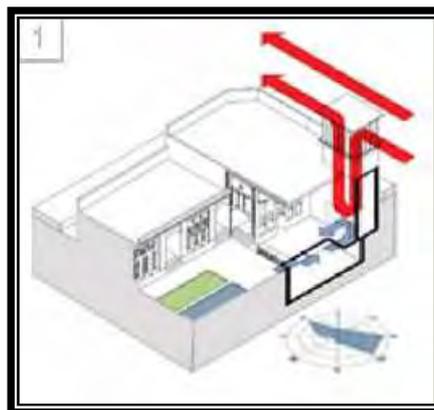
-
- Effet « cheminée » : La tour chauffée par le soleil, réchauffe l'air contenu dans ses conduits. Mettant en œuvre le principe de convection, l'air chaud monte créant une aspiration en bas de la tour, ventilant la pièce. En l'absence de vent ce principe prédomine.

Dans les maisons, les tours à vents se déclinent selon deux types :

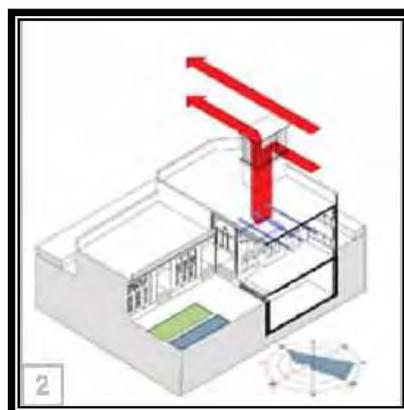
- Tour à vent ou Badgir centré
- Tour à vent ou Badgir déporté latéralement.

La sensation de confort thermique d'été met en jeu la température de l'air, son humidité et son mouvement.

En augmentant la vitesse de l'air, la zone de confort thermique se déplace vers des températures plus hautes. Ainsi les tours à vents contribuent au confort des occupants en favorisant les courants d'air (principe du ventilateur), en évacuant l'air chaud au profit de l'air frais venant du jardin ou des sous-sols et en créant de la fraîcheur par évaporation.



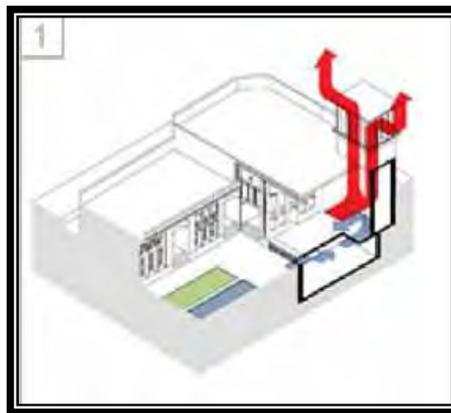
*Figure 3.51 : Tour à vent centré effet attrape vent
Source Richard-Tolouie 2006.*



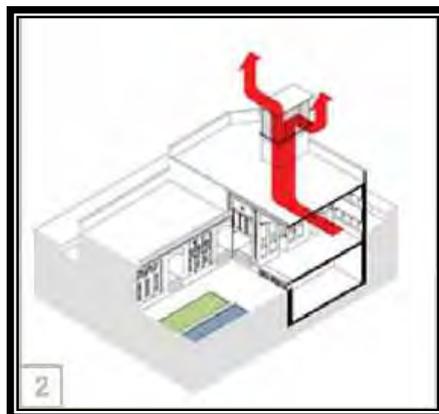
*Figure 3.52 : Tour à vent latérale effet attrape vent
Source Richard-Tolouie 2006.*



*Figure 3.53 : Simulation informatique du cheminement de l'air dans une tour à vent à Dubaï : le flux principal du vent (en rouge) crée une dépression dans la pièce, aspirant l'air frais des fenêtres (en jaune).
Source Richard-Tolouie 2006.*



*Figure 3.54 : Tour à vent centré effet cheminée
Source Richard-Tolouie 2006.*



*Figure 3.55 : Tour à vent latérale effet cheminée
Source Richard-Tolouie 2006.*

3.6 Matériaux, Couleur, Texture et Taille

Les matériaux de construction utilisés dans les tours à vent dépendent du climat. Le choix des matériaux est fait pour s'assurer que l'ouvrage fonctionne convenablement comme un système de refroidissement passif. Les tours à vent dans les climats chauds et arides sont construites de brique de terre ou généralement de brique cuite couverte de plâtre de terre. La brique de terre (adobe) restitue la chaleur à long terme, parce que la terre à un volume incompressible, et les briques sont réalisées de terre et d'eau. Après évaporation, on obtient des puits vides. Ce qui empêche la pénétration de la chaleur et du froid à l'intérieur des molécules de la brique. Le Plâtre de terre (kah_gel) est un mélange de la terre humide avec la paille brute coupée. Ces matériaux de construction donnent à la tour à vent une texture brute. Le plâtre de terre couvrant la façade des tours à vent a une couleur claire, pour refléter les rayons solaires. Les tours à vent dans les climats humides et chauds sont couvertes de plâtre (de gâche) et (sarooj) car ce modèle d'enduit résiste à l'humidité (figure 3.39).



*Figure 3.56 : les Tours à vent sont faites de brique de terre crue recouvertes d'un enduit
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005*

La vapeur contenue dans l'air dans ce type de climat repose sur la surface, avec la température inférieure à celle de la condensation dans l'environnement. S'il y a une grande pénétration sur les murs et les surfaces du bâtiment, ces gouttelettes pénètrent dans le mur pour faciliter l'absorption par les matériaux. Ceci cause la destruction des surfaces, et repousse les sels des matériaux hors de celles-ci. La texture des tours à vent est peinte avec une couleur blanche, ce qui assure également qu'elles n'absorbent pas les rayons solaires. Cela lui donne plusieurs rôles dans la fonction climatique (thermique).

Les tours à vent captent les courants désirés et les transportent aux espaces intérieurs. Pour atteindre ce but, une tour à vent est conçue afin d'être plus haute que le bâtiment. Pour permettre son fonctionnement efficace à travers l'utilisation judicieuse des courants d'air, le rapport entre la longueur, largeur et la hauteur doit être important. La taille de la tour à vent

dans les climats chauds et arides n'est pas la même que celle des climats chauds et humides. Cette taille est plus importante dans les climats chauds et arides (figure 3.40) que celles dans les climats chauds et humides (figure 3.41). Quand le courant d'air est plus près de la surface du sol, il est plus chaud en raison de l'effet du soleil sur la surface de celui-ci. Ainsi dans une région chaude et aride, vu que la température est basse et le vent est plus fort en hauteurs. Les tours à vent sont donc construites en hauteur, permettant ainsi de capter de tels courants. Les zones résidentielles dans les climats humides et chauds sont construites près des plages.

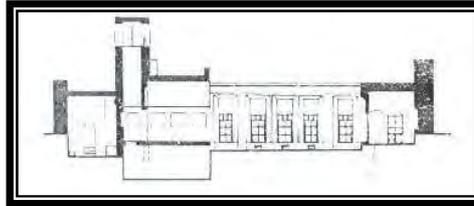


Figure 3.57 : Coupe sur une maison à Yazd
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

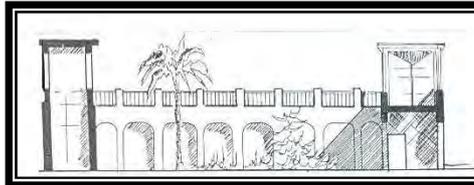


Figure 3.58 : Coupe sur une maison à Bandar Lengeh
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

3.7 Structure et Ornement

Les tours à vent montent pour recevoir les vents en hauteur. Les conduits ouverts réduisent la résistance en face des forces horizontales. La brique de terre et les bois de construction sont employés dans la réalisation des tours à vent (Figure 3.41). Puisqu'une tour à vent s'élève au dessus d'un bâtiment. Elle a besoin d'éléments pour la soutenir. Elles sont construites de brique de terre ou de brique et de bois. La structure principale typique d'une tour à vent consiste en plusieurs ouvertures et des compartiments (Figure 3.42).

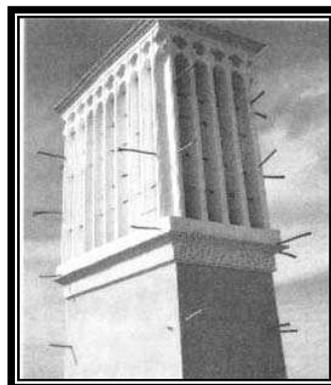


Figure 3.59 : Tête de tour à vent à Yazd
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

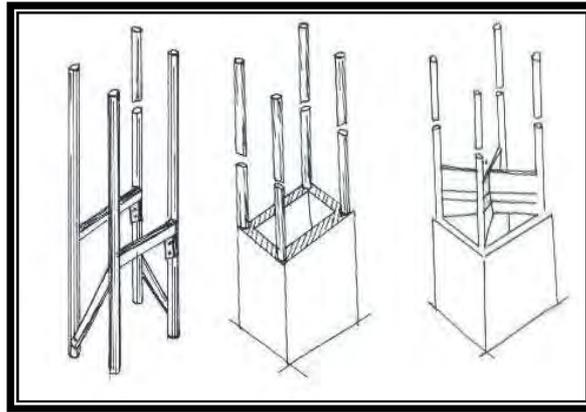


Figure 3.60 : Structure des tours à vent
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

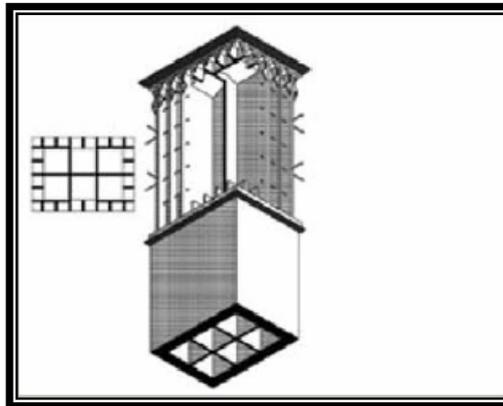


Figure 3.61 : Les fines colonnettes sont solidarisées par des Branches servant, d'échafaudage pour l'entretien
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

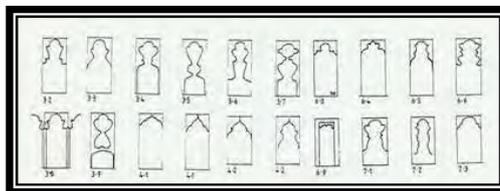


Figure 3.62 : Exemples d'Ornementation des têtes de Tour à Vent
Source P.S. Ghaemmaghami / M. Mahmoudi, 2005

Chaque architecte a employé un type différent de voûte selon sa préférence personnelle; Il considère que ce type d'ornement est son propre cachet (Figure 3.45). De tels dispositifs sont là uniquement pour la décoration et ne remplissent aucune autre fonction. Par exemple, les rangées de briques sont parfois placées sur le dessus et le bas et sur une partie de la tête d'une tour à vent, de ce fait ces rangées créent probablement un effet d'ombre sur le corps de la tour à vent. Ces différences dans les éléments d'ornement ne sont pas liées aux conditions climatiques et les problèmes fonctionnels existant dans ces secteurs, mais plutôt reflètent des dispositifs et des effets culturels.

3.8 Nouvelle conception des tour/capteur à vent

Les tours à vent traditionnelles utilisent la gravité pour faire circuler l'air sans l'utilisation de ventilateur électrique. Elles sont généralement en forme d'entonnoir, pour créer un effet de Venturi, et orientées face aux vents dominants. Dans les climats à forte amplitude thermique, la forte inertie des matériaux du conduit peut rafraîchir l'air efficacement.

Le système est amélioré par la suspension de jarres d'eau poreuses en terre non cuite dans la tour. Le passage de l'air à travers ces vases provoque de l'évaporation de l'eau avant la ventilation, réduisant ainsi la température de l'air rentrant avant d'arriver à l'intérieur de la construction. (Alain Liébard et André de Herde, Décembre 2005).

Le retour vers les systèmes de refroidissement passif dans les années 80 a mené au développement d'un nombre important de tours à vent dans les quelles l'air a été conduit vers l'intérieur à travers des déflecteurs (dampers) sorte de fermeture par gravité afin d'éviter les déperditions d'air (Bahadori, 1985) ou bien par l'utilisation des garnitures mouillés ou pulvérisateurs humides (Cunningham et Thompson, 1986)

Le potentiel pour une convection thermodynamique pure dans une tour à vent est directement relié à sa taille. Cependant la taille de la tour utilisée pour le refroidissement d'un espace est limitée par des considérations structurelles importantes. Le coût et la forme architecturale font en sorte que la tour soit incapable de générer un écoulement thermique puissant. (Guetta, 1993).

Ces capteurs doivent être renforcés par l'utilisation d'un ventilateur électrique afin d'améliorer leurs performances. (Erell, Etzion et Pearlmutter, 1997).

En Europe du sud, la consommation énergétique a augmenté au cours de ces deux dernières décennies d'une façon extraordinaire, suite à l'utilisation des systèmes conventionnels de climatisation.

En effet, de 1985 à 1990, les ventes de centrales de climatisation ont connu une hausse allant de 15 % pour la France et l'Italie, 30 % pour le Portugal à 150 % pour la Grèce (Santamouris, 1995).

Outre l'aspect énergétique, l'usage de fluides chlorofluorocarbones dans les climatiseurs conduit à des problèmes environnementaux préjudiciables à la qualité de l'air et à la Santé des occupants.

Cette préoccupation a conduit, au niveau européen, à l'utilisation expérimentale des techniques de rafraîchissement passives dans les espaces ouverts ou semi-ouverts (Alvarez et al, 1991) et dans les bâtiments (Ducrottoy et Hutter, 1989; Gabel, 1990).

En France, une expérience réalisée par le CSTB en collaboration avec GDF (Ducrotoy et Hutter, 1989) dans un immeuble de bureaux de Senlis (région parisienne), a montré l'intérêt économique et énergétique d'utiliser un rafraîchissement passif (par évaporation d'eau) dans les immeubles de bureaux (Gabel, 1990).

Les différentes réalisations pour l'Exposition Universelle de Séville de 1992 ont confirmé la performance énergétique des techniques passives de rafraîchissement.

Durant toute la période de cette manifestation, le temps de fonctionnement de l'appoint (système de rafraîchissement conventionnel) n'a pas excédé 7 % du temps total de conditionnement (Alvarez et al, 1991).

Ces premières expériences encourageantes dans le domaine du rafraîchissement passif ont incité L'union européenne d'instaurer des actions de recherche tels que les projets Pascool/Joule II ou Altener/Sink.

L'objectif de ces projets est de limiter l'usage de la climatisation « active », dans les pays du sud de L'Europe et de proposer des solutions alternatives. (R. Belrabi, M. Spérandio, F. Allard, 1997).

La contribution du laboratoire d'étude des phénomènes de transfert appliqués au bâtiment, université de la rochelle, France 1997 fut le développement de la partie relative aux systèmes de rafraîchissement passif par évaporation directe et indirecte.

La démarche générale adoptée dans les travaux de recherche, consiste dans un premier temps à définir des indices permettant dévaluer les potentialités des systèmes de rafraîchissement, compte tenu des critères relatifs aux conditions climatiques et aux exigences de confort (Alvarez, 1994). Cette phase présente un intérêt certain pour les architectes et les concepteurs de bâtiments dans la mesure où elle permet de collecter des informations déterminantes quant au choix d'une technique naturelle de rafraîchissement. Par la suite, l'étude a portée plus particulièrement, pour différentes conditions de fonctionnement, sur le comportement des systèmes de rafraîchissement évaporatif les plus répandus, afin d'évaluer d'une façon plus précise, d'une part leurs performances énergétiques, d'autre part l'influence de chacun des paramètres d'entrée du système sur l'efficacité de refroidissement (Alvarez, 1995).

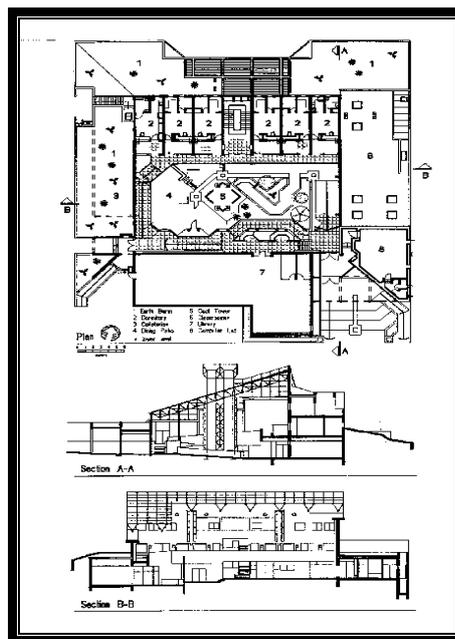
Comme application de ces théories, des travaux expérimentaux récents ont été exécutés afin de développer le domaine d'utilisation de ces tours fraîches ou comme elles sont appelées par les nouveaux scientifiques et chercheurs "naturel down-draft évaporative coolers" aux bâtiments non domestiques.

Cependant les résultats ont relevé que les tours/capteurs à vent ont réduits d'une façon remarquable les charges de refroidissement dans les constructions là où ils étaient adoptés. Ceci a prouvé leur efficacité dans l'amélioration des conditions de confort d'été dans certains nombres d'exemples, parmi les quels on peut citer :

3.8.1 Le centre international de Jacob Blaustein pour les études du Désert (BIC), Israël

Le bâtiment décrit ci-dessous à été construit au campus de Sed-Boqer de l'université de Ben-gurion du Néguev, situé à une latitude de $30,8^\circ$, environ 480m au dessus du niveau de la mer.

Le bâtiment est un complexe multifonctionnel destiné aux activités internationales de l'institut J. Blaustein pour la recherche du désert. D'une surface de 1100 m², le projet mis en service en 1994 (figure 3.46), comprend une bibliothèque, salles de cours, cafeteria, salons, bureaux administratif ainsi que des appartements et studios pour les scientifiques et chercheurs.



*Figure 3.63 : Le bâtiment du centre international pour les études du désert vu en plan et coupes
Source Y. Etzion, D. Pearlmutter, E. Erell. I.A. Meir, 1997.*

Le bâtiment en R+2, s'organise autour d'un atrium central de 500m². Une artère piétonnière relie le campus existant avec sa future extension, l'espace central couvert abrite un jardin tropical. Atteindre les conditions de confort thermique à l'intérieur de cet espace relativement grand était l'un des défis majeurs de l'équipe de conception, mais également un moyen d'approche complète des conditions climatiques du campus entier.

-
- En hiver, atteindre un confort thermique par des moyens passifs été faisable grâce à deux stratégies :
 1. Maximum des gains solaire,
 2. Minimum de perte de chaleur par l'enveloppe du bâtiment,

La couverture vitrée de l'atrium central assure la première condition, l'isolation des murs et les toits minimisent des pertes par l'enveloppe (figure 3.47).

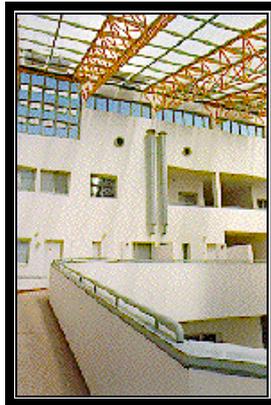


Figure 3.64 : Vue à l'intérieur du bâtiment
Source Y. Etzion, D. Pearlmutter, E. Erell. I.A. Meir, 1997.

- En été, le confort thermique est assuré par la combinaison de trois stratégies:
 1. Réduction des gains non désirés de la chaleur par le traitement soigneux de l'extérieur du bâtiment, la surface extérieure des murs est peinte en un stuc lisse et blanc, afin de réduire l'adhérence des particules de poussières aéroportées. L'orientation des fenêtres et surfaces vitrées vers les vents dominants et ce dans le but de réduire les gains de chaleur et en fin neutraliser les gains de chaleurs du vitrage de l'atrium en réduisant la transmission du rayonnement solaire par la surface du toit, au moyen d'un vitrage sélectif unique, et par l'addition de la nuance interne sous la surface vitrée.
 2. Utilisation de matériaux de capacité thermique élevée (effet de masse), afin de maintenir les conditions thermique à l'intérieur près de la zone de confort. L'extérieur du bâtiment est couvert de bernes de terres, les recherches ont montrées que les bernes de terre peuvent ramener de manière significative le chauffage et les charges de refroidissement sur des bâtiments en condition climatiques semblables à ceux des montagnes de Néguev. L'effet de la couverture de la terre est double : d'abord, il réduit l'effet des conditions thermique extrêmes sur les surfaces externes du bâtiment, de ce fait, elle réduit les taux de gain d'énergie (été) et de déperdition d'énergie (hiver). En second lieu, réduire les fluctuations de la température interne.

3. Utilisation d'un système de refroidissement passif. La tour fraîche évaporative, a été réalisée pour améliorer le confort thermique dans un secteur choisi qui est l'atrium, où en raison de sa taille et son exposition, l'effet d'autres mesures adoptées pour fournir un confort thermique à été considéré insuffisant.

L'innovation de l'utilisation de la tour à vent dans ce projet est l'exploitation des forces convectrices pour le traitement d'un espace public relativement ouvert.

La tour à vent à une hauteur approximative de 12 mètres et un plan octogonal, avec une largeur de 4 mètres. Construite en tubes d'acier et recouverte de matériaux lisses, sur la partie haute (tête de la tour), des injecteurs ou pulvérisateurs étaient choisis empiriquement, saturent l'air de la tour avec de l'eau, causant ainsi une évaporation rapide et intensive et abaissent de manière significative la température de l'air. L'excès d'eau tombe dans un petit étang de collection au fond de la tour (figure 3.48), pour être réutilisé par une petite pompe, pour être ré-pulvérisé dans l'air. La quantité d'eau qui est évaporée par l'air en se déplaçant dans la tour est environ de 1 à 1,5 m³ par jour, selon les conditions externes. Dans la partie supérieure de la tour, un ventilateur a été installé pour compléter le DOWN-DRAFT convecteur qui est provoqué par la différence de la température entre l'air au niveau de la tête et celui qui est au niveau de la base de la tour. L'air frais est fourni au plus bas point de l'atrium, de sorte qu'il s'accumule dans le secteur de la cafeteria et monte seulement pendant qu'il commence à se chauffer. Pendant que l'air chaud s'élève, il est remplacé par un air plus frais fourni par la tour, de sorte que la couche inférieure d'air, qui est plus près du plancher de l'atrium, demeure relativement fraîche.



Figure 3.65 : Vue sur la tour à vent et bassin d'eau
Source Y. Etzion, D. Pearlmutter, E. Erell. I.A. Meir, 1997.

Le schéma (figure 3.49) montre le rafraichissement dû à la tour à vent, l'air extérieur est de 35 à 36°C par contre à la partie basse de la tour, la température était de l'ordre de 21 à 22°C, donc une réduction de la température enregistrée est de 14°C, alors que l'humidité relative était de 65%.

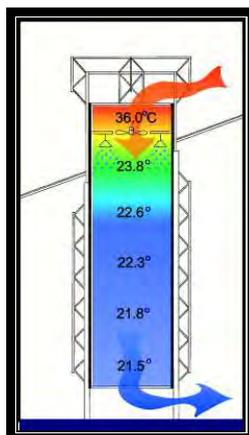


Figure 3.66 : Coupe schématique sur la tour à vent

Source Y. Etzion, D. Pearlmutter, E. Erell. I.A. Meir, 1997.

3.8.2 Bâtiment d'office de Catane, Italie

La conception finale proposée par les architectes de Mario Cucinella, pour les nouveaux bureaux en Italie a évolué d'un bâtiment avec une tour à vent au niveau du noyau central à une conception avec une approche de refroidissement évaporatif passif (PDEC). L'application étendue du système de refroidissement passif, en opposition aux systèmes mécaniques courants, a impliquée une stratégie à énergie réduite. Ceci signifie que les petites quantités d'énergie que le bâtiment pourrait produire « passivement » doivent être entièrement exploitées et concentrées où le refroidissement est nécessaire sans n'importe quelle dispersion. L'idée originale d'un bâtiment avec une tour à vent centrale agissant en tant qu'un réservoir d'air frais représente un grand pas en avant en comparaison avec les bâtiments de bureaux standard, mais l'énergie exigée pour refroidir un grand volume d'air et le distribuer dans chaque plancher est probablement utopique pour être entièrement passif.

Pour cette raison MCM décidés d'abord pour réduire la taille de la tour à vent, et définir en second lieu une forme qui pourrait mieux répondre à la distribution de downdraught. L'analyse a été effectuée par des schémas de balance et des séries de modèles d'étude. La conception finale a représentée les résultats de cet effort, avec la forme du bâtiment plus simplifiée, avec d'avantage de réduction des coûts de construction et amélioration conséquente des indicateurs d'efficacité.

L'idée principale était de créer un certain nombre de tours de PDEC qui vont traverser le bâtiment verticalement. La forme de chaque tour a bien répondu à la distribution normale d'air frais une fois produite par un système évaporatif, avec un cône légèrement incurvé au dessus, dont les injecteurs ont été localisés. Chaque tour va refroidir l'air dans le secteur adjacent. Les

tours ont été également employées pour assurer diurne et nocturne ainsi que pour introduire le jour et la lumière dans un espace profond (figure 3.50).

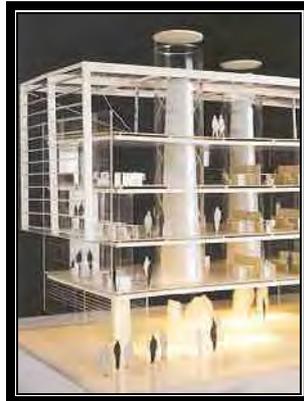


Figure 3.67 : Solution finale de conception, modèle montrant les tours de refroidissement et jardin interne
Source Elizabeth Francis, Brian Ford, 1999.

La solution actuelle a renforcé les similitudes entre un bâtiment et une organisation normale qui réagit aux changements externes d'une manière sensible. Le concept de la perméabilité et de la transpiration implique maintenant tout les bâtiments et non seulement ses composants (figure 3.51).

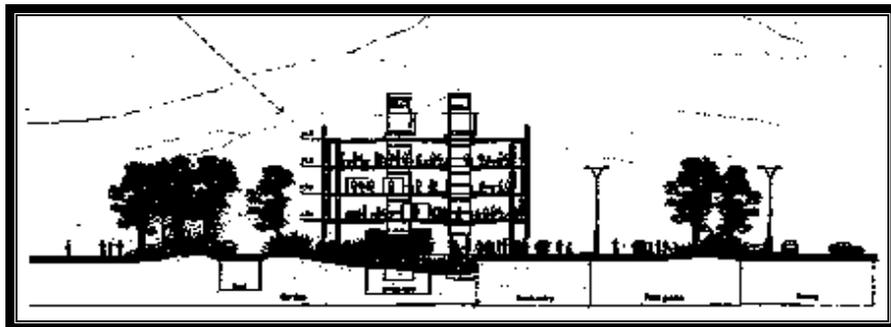


Figure 3.68 : Coupe transversale sur le bâtiment et l'aménagement
Source Elizabeth Francis, Brian Ford, 1999.

Les avantages principaux de cette approche peuvent être résumés en:

- Une possibilité de différents secteurs frais du bâtiment répondant à la demande,
- Une stratégie plus précise de gestion d'immeubles, grâce à la plus grande sensibilité du système,
- La définition du rôle de chaque tour individuelle et de la possibilité de calculer la puissance de refroidissement requise pour chaque secteur,
- La possibilité de distribuer l'éclairage normal et donc d'augmenter la profondeur de plancher sans réduire le confort visuel,
- La réduction de façades internes, donc de construction et de coûts de fonctionnement,

-
- La définition d'une application de PDEC qui peut être facilement prolongée à différentes typologies des bâtiments non domestiques (figure 3.52).

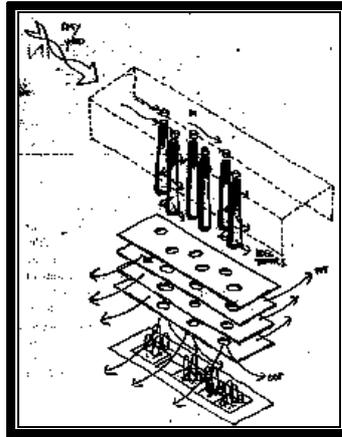


Figure 3.69 Stratégie environnementale de refroidissement et ventilation passif
Source Elizabeth Francis, Brian Ford, 1999.

3.8.3 Le MOMRA Rowdah environnemental, Arabie Saoudite

Le nouveau bâtiment du ministère des affaires municipales et rurales (MOMRA) est considéré comme une addition importante à la richesse d'architecture de la ville de Riyadh en Arabie Saoudite. Le bâtiment est situé sur l'emplacement en avant sur une des rues les plus importantes de Riyadh, « le Roi Fahd Road ». Le projet est caractérisé par sa simplicité de forme, clarté de structure et d'une manière plus importante son intégration réussite des espaces intérieurs et extérieurs.

Le nouveau bâtiment de MOMRA dans la forme est un grand cube (8x8x35) m est implanté parmi une plantation de 1000 arbres de pomme et une grande variété d'autres arbres et arbustes. La plantation se compose de quatre (04) jardins aménagés en parc définis par des frontières en pierres. Le quart du nord-ouest de la plantation est choisi pour l'implantation du rowdah environnemental. Nader V. Chalfoun Professeur associé d'architecture, Université de l'Arizona a été nommé en tant qu'architecte principal travaillant sur la conception du Rowdah environnemental. Le Rowdah est conçu comme un modèle servant à l'illustration des stratégies du dernier cri de contrôle de l'environnement et des techniques humaines de confort thermique pour les espaces extérieurs. Les stratégies incorporées au Rowdah sont une tour fraîche, un puits frais, une tente, de fines herbes, halophyte, légume, et jardins médicinaux, étangs de poissons et d'eau, une salle de racine, et des fontaines d'eau (figure 3.53)



*Figure 3.70 : Vue du Rowdah environnemental montrant les éléments de commande de climat et les jardins
Source Nader V. Chalfoun, 1992*

La tour incorpore et intègre le savoir faire des tours à vent du monde arabe et celui de la technologie moderne de refroidissement par évaporation. La tour est plaquée en pierre à chaux de Riyadh (matériau local).

La tour a une hauteur de 25.2 mètres et une section externe passant de 8x8 à 6,5x6,5m² (figure 3.54).

Le système évaporatif qui se trouve dans la partie haute de la tour (la tourelle), se compose d'une série de garnitures qui sont constamment maintenues humides en utilisant une pompe. L'eau vient d'un réservoir dans la tourelle. La tour refroidit l'air par le processus de l'évaporation. Car l'air sec entre en contact avec les garnitures saturées d'eau, et se refroidit en évaporant une quantité de celle-ci. Ce processus consomme de l'énergie et l'air est refroidi. Cet air maintenant plus frais commence à descendre car il est plus lourd que l'air plus chaud environnant. En descendant l'air crée un vide derrière lui, ce dernier est aussitôt rempli par l'air chaud venant de l'extérieur. Aucun ventilateur n'est exigé pour faire circuler l'air dans la tour ou pour le forcer à se propager dans le rowdah.

L'exécution de la tour a été optimisée par le logiciel « CoolT© ». Elle s'est basée sur les données climatiques d'une journée type du mois de juin. Durant cette journée et à 15h00, la température de l'air ambiante était de 41.7°C (107.1°F), elle sera refroidie de 18.4°C (65.2 °F) pour arriver à 23.3°C (73.9°F). Cet air refroidi sera mélangé à l'air environnant. Tout en s'éloignant de la base de la tour, l'air crée un gradient perceptible de la température. Les résultats du modèle d'analyse confirment les solutions techniques et le choix des matériaux prévus pour la réalisation en l'associant avec les variables de la température et de l'humidité relative. Le meilleur fonctionnement du système se fait dans les jours les plus secs et chauds, exactement les jours où le fonctionnement optimal de la tour est désiré.



Figure 3.71 : La tour fraîche après construction
Source Nader V. Chalfoun, 1992

3.8.4 Projet de maison individuelle en Iran

Le projet de maison proposé par Hervé Richard et Shiva Tolouie en 2006, est une alternative aux constructions qui s'étendent à la périphérie des villes iraniennes. La dimension climatique de la maison met en jeu des protections solaires mobiles permettant de se protéger du soleil ou de capter sa chaleur selon les besoins (figure 3.55).



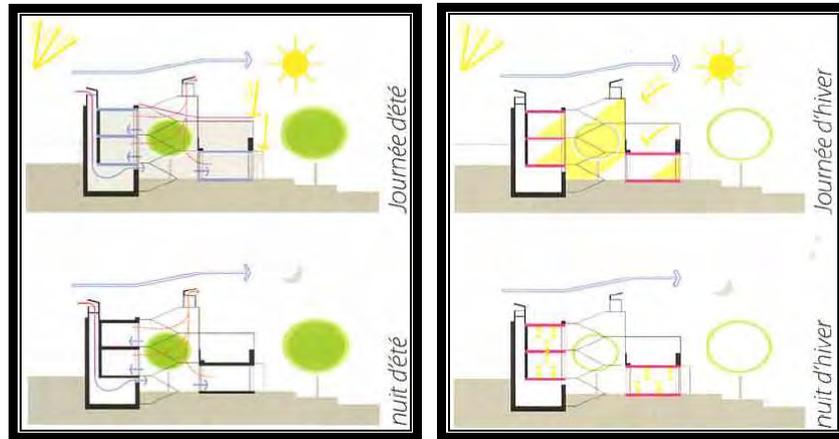
Figure 3.72 : Perspective sur le projet de maison
Source Richard-Tolouie 2006.

La ventilation est obtenue par deux tours à vents, dont les têtes mobiles s'adaptent au mieux à l'orientation du vent et à ses moindres variations. La première tour capte les vents, la deuxième, donne le dos au vent, évacue l'air chaud de la maison. L'air capté au-dessus des toits descend dans le sous-sol pour y être rafraîchi avant d'arriver dans le jardin intérieur (figure 3.56).



Figure 3.73 : Coupe sur les chambres, sous sol et jardin
Source Richard-Tolouie 2006.

Les pièces ouvrant sur le jardin, profitent de sa fraîcheur. La deuxième tour à vent crée une dépression qui fait circuler l'air dans l'ensemble de la maison, ensuite il est évacué par les ouvertures supérieures. Une forte inertie thermique permet de décaler le moment des plus hautes températures entre l'intérieur et l'extérieur (figure 3.57).



*Figure 3.74 : Fonctionnement des tours à vents
Source Richard-Tolouie 2006.*

Réinterprétant les thèmes de la maison traditionnelle, tout en correspondant au mode de vie d'une famille Iranienne contemporaine, ce projet associe compacité, adaptation au gré des saisons et résistance sismique.

Il s'agit d'un projet en cours, ouvert pour but de mutualiser les expériences.

Conclusion

L'intérieur d'un immeuble moderne peut être confortable malgré des conditions climatiques défavorables, si l'on consomme de l'énergie sans restriction pour le chauffer ou le refroidir.

Dans les régions chaudes et arides comme l'Iran, l'Iraq, l'Egypte et d'autre pays, grâce à certaines formes architecturales traditionnelles (capteur à vent / tour à vent) on n'obtient pas seulement une réduction des écarts de température mais aussi on peut faire circuler de l'air frais et humide dans le bâtiment en pleine canicule. Ce résultat est atteint sans faire appel à d'autres sources d'énergie que celles qui existent dans l'environnement naturel «vent, soleil et eau». A une époque où le coût de l'énergie dépasse considérablement celui de l'habitat, de tels systèmes méritent une attention particulière. Comme note N.Bahadori (1985), même dans les pays où les systèmes de refroidissements passifs ne trouveraient pas les mêmes applications qu'en Iran, ils prouveraient qu'on peut se servir de l'environnement extérieur au lieu de le combattre. Il faudrait qu'à l'avenir, les architectes et les ingénieurs tiennent d'avantage compte du climat et prennent soin d'examiner les possibilités d'installation de systèmes passifs de chauffage, de refroidissement et de ventilation. Munis de ces informations, ils devraient être capable de concevoir des immeubles dotés du confort moderne et ne consommant qu'un minimum d'énergie.

La mise en application de cet héritage historique et les améliorations techniques et architecturales apportées aux tours à vent se traduit par la réalisation d'un prototype de tour à vent objet du chapitre 4 « réalisation de la tour à vent » dont l'objectif est de finaliser la partie théorique faite par Y. Bouchahm en 2003. La réalisation vise à tester a grandeur réelle l'effet de rafraichissement évaporatif passif de la tour à vent dans un climat chaud et aride cas de la ville de Hassi Messaoud.

Réalisation de la tour à vent

L'Objectif principal de ce chapitre porte sur la réalisation d'une tour à vent dans la ville de Hassi Messaoud. L'idée de ce travail aspire à finaliser la partie théorique faite par Y. Bouchahm en 2003. Il s'agit d'une simulation de techniques et de dimensions d'un modèle de tour à vent. Le but était d'assurer un rafraichissement évaporatif, passif dans un climat chaud et aride, pour le cas de la ville de Ouargla . Ces travaux ont permis d'évaluer le comportement de la tour à vent ajustée à la construction. Une partie de ce chapitre traite les étapes de la réalisation, telles que la préparation, l'élaboration, la vérification et l'approbation des plans. Avant d'entamer la réalisation, une étude climatique et bioclimatique de la ville est présentée.

4.1 Objectifs de la simulation :

Ce travail visait une adaptation au climat hostile afin de maintenir un confort acceptable à l'intérieur des constructions et de réduire le coût exorbitant de l'énergie consommée par la climatisation artificielle fortement utilisée dans la région.

La simulation a permis d'évaluer le comportement de la tour à vent ajustée à la construction et son effet sur l'intérieur soumis aux sollicitations climatiques, par ailleurs son rendement et ses stratégies dans la régulation thermique.

Les paramètres affectant la ventilation naturelle induite par la tour à vent et le refroidissement des constructions qui ont été testées et mesurées par Y. BOUCHAHM, 2003 sont :

1. Des mesures de températures, d'humidité ainsi que de la vitesse de l'air à l'intérieur de la construction et à l'extérieur au niveau de l'entrée d'air (tête de la tour à vent).
2. L'aridité de l'air a incité une deuxième série de tests, là où l'humidification, facteur favorisant la réduction de la température et l'augmentation de l'humidité ; des parois intérieures du système ont été introduites.
3. A l'aide du logiciel « CAP COOL », des séries de simulations ont été entreprises, en tenant compte des améliorations apportées au système « Tour à vent ». La configuration et la technique d'humidification de la tour à vent ont été ciblées afin d'établir des recommandations et des guides pratiques. Ces recommandations permettent aux concepteurs une meilleure maîtrise d'utilisation du système dans la région, de façon à pouvoir élargir son exploitation dans différentes régions du pays.

En général, ce travail est considéré comme un outil d'aide à la réalisation des constructions bioclimatiques « autonomes » pour une bonne partie de l'année. En d'autres termes, maintenir l'ambiance intérieure dans une zone de confort acceptable avec un minimum d'utilisation d'énergie.

4.2 Résultat de la simulation

Ce travail a permis d'évaluer le comportement de la tour à vent ajustée à la construction et son effet sur l'intérieur soumis à des sollicitations climatiques. Par conséquent son rendement et sa stratégie dans la régulation thermique.

Les résultats des campagnes de mesures effectuées en juillet 2002 à Ouargla par Y. BOUCHAHM, ont montré qu'avec la tour ou capteur à vent humidifié comme réalisé par les Frères MENIAOUI, la ventilation naturelle est rendue possible aussi bien le jour que la nuit. Une réduction de la température de l'air de 06°C et une augmentation de l'humidité relative de 31% ont été enregistrées.

Malgré cette réduction de la température, l'air reste non saturé, donc son humidification est toujours favorable, d'où la possibilité d'optimiser la réduction de la température.

Les simulations numériques portaient sur l'étude d'un système d'humidification passif plus élaboré, introduit dans la tour à vent, testé dans le but de garder les parois intérieures constamment humides. Ces simulations avaient pour objectif de déterminer les différents paramètres affectant directement le potentiel de rafraîchissement évaporatif sans faire appel à d'autres sources d'énergies que celles qui existent dans l'environnement naturel à savoir le soleil, le vent, l'eau et la végétation.

Cette simulation a mené aux recommandations et résultats suivants :

- L'introduction de conduits en terre cuite qui avait le rôle de stocker l'énergie, pour augmenter considérablement la surface de transfert de chaleur,
- L'augmentation de la surface d'échange de la chaleur et de la masse, a été faite en partageant la tour à vent en plusieurs conduits de petites sections (10X10) cm². La brique cuite (hygroscopique) est le matériau choisi pour le garnissage interne des conduits. La partie compartimentée et humidifiée se développe sur une hauteur de 6,50 m,
- L'introduction d'un système de refroidissement évaporatif permanent (arrosage) des parois intérieures de la tour à vent et des conduits,
- La tête de la tour à vent peut être uni ou multidirectionnelle, afin de s'adapter aux différentes régions et la direction des vents dominants,

-
- La partie supérieure (tête de la tour) est protégée contre les insectes et le vent de sable grâce à une grille orientable incorporant un système d'humidification,
 - La base de la tour est composée d'un bassin d'eau et d'un trop plein,
 - La géométrie simulée par l'outil informatique en utilisant le logiciel (CAP COOL) a donné un résultat très encourageant à savoir l'écart entre la température intérieure et extérieure de 18°C et un taux d'humidité de 60%

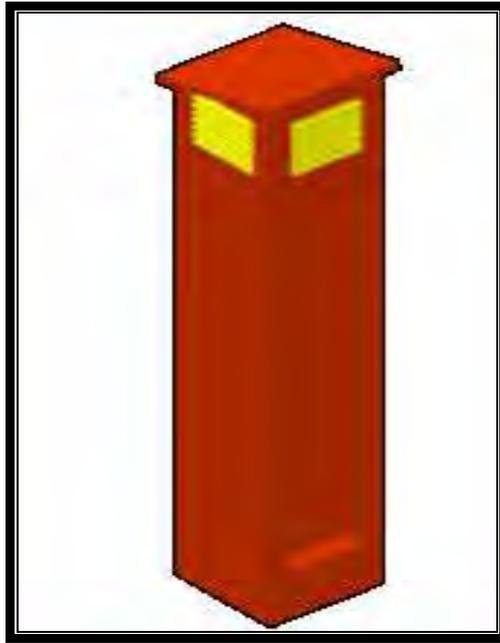


Figure 4.75 : Perspective générale de la tour à vent

4.3 Choix du site de réalisation

Le choix du site de réalisation est fixé sur la ville de Hassi Messaoud pour les raisons suivantes :

- Le climat de la ville de Hassi Messaoud est identique à celui de la ville de OUARGLA, site où le model proposé et simulé par Y.BOUCHAHM est réalisé.
La ville de Hassi Messaoud située dans le SUD EST de l'Algérie à 80 Km du chef lieu Ouargla, à une latitude de 31°40'N et une longitude de 06°09E. Elle s'élève à une altitude de 142m. Hassi Messaoud se caractérise par un climat désertique, aride et chaud, avec de très faibles précipitations, une forte insolation et un régime thermique très contrasté.
- Notre présence sur le site nous permet de veiller sur la réalisation ainsi qu'à la prise de mesures des paramètres telles que la Température et l'Humidité,
- La disponibilité d'un local pour la réalisation en grandeur réel de la tour à vent, qui est le siège administratif de la société REBO.

Nous avons eu l'accord du propriétaire de la base de vie pour la réalisation de la tour dans le bâtiment administratif. Ce dernier a des caractéristiques très favorables. Il répond aux exigences de la simulation du point de vue hauteur et implantation en milieu urbain.

Le fait que le bâtiment soit réalisé en R+2, cela favorise la réalisation d'une tour haute et bien exposée aux vents dominants, afin de bénéficier des vents forts et frais en hauteur.

Réalisé dans les années 90, ce bâtiment a une structure traditionnelle en poteaux poutres et un remplissage en briques rouges. La conception du bâtiment n'a pas tenu compte en considération le climat et les spécificités de la région, comme toutes les constructions de la ville de Hassi Messaoud.

Représentant la partie administrative de la base de vie de la société REBO (représentant exclusive de la société SCHNEIDER ELECTRIQUE à Hassi Messaoud, spécialiste dans les tableaux et armoires électrique). Le bâtiment en R+2 abrite au RDC un grand espace de montage de tableaux électrique.

Au premier étage se trouve l'administration, composée du bureau du gérant, hall d'accueil, secrétariat, kitchenette, bureaux paysagés, sanitaires et salle de réunion. Toutes les cloisons à l'intérieur du premier étage sont mixtes (un sous bassement en brique de 10cm, la partie restante est vitrée jusqu'au faux plafond), la séparation se fait grâce à des stores vénitiens (figure 4.2).



Figure 4.76 : Vues sur le 1^{er} Etage de l'administration

Le deuxième étage est aménagé en studios (chambre, salon et salle de bain) pour les invités et missionnaires, ainsi qu'une petite terrasse qui donne sur la partie centrale de la base de vie.

Le bâtiment orienté NORD-SUD à trois façades, les façades Nord et Sud donnent sur les deux rues qui délimitent la base de vie, la façade Ouest donne sur la cour centrale de la base de vie. La bâtisse n'a pas d'ouvertures coté Est à cause de la mitoyenneté avec une autre construction (figure 4.3).



Figure 4.77 : Bâtiment administratif

Le bureau du gérant est le local choisi pour la réalisation de la tour à vent, orienté vers le Sud, ayant une porte fenêtre vitrée avec persienne en bois, donnant directement sur un balcon d'une largeur de 1,3m ;

Ayant une forme rectangulaire d'une surface de 45,36-m², le bureau a une profondeur de 8,85m, une largeur de 4,9m et une hauteur libre de 2,7 m (hauteur sous plafond 3,70m) soit un volume de 122,47m³.

Composé d'un grand bureau de travail et une table de réunion, il contient aussi un salon pour la réception des invités (figure 4.4). Vu les grandes dimensions et le volume important de cette salle, le propriétaire a installé dans son bureau deux climatiseurs de type split système 12000 BTU tropicalisés. Les deux split système fonctionnent en plein régime et 24h sur 24h, pour diminuer de la chaleur excessive durant la période estivale surtout que la paroi qui donne sur l'extérieur est orientée vers le Sud.



Figure 4.78 : Vues d'intérieur du bureau

Le meilleur endroit pour l'implantation de la tour à vent était le balcon, qui disposait de proportions idéales pour la construction, sans apporter de modifications au niveau du bureau du gérant et le studio, le surplus d'eau au niveau du bassin est évacué par une conduite à l'extérieur du bâtiment.

Le coin droit du balcon vu de l'extérieur était choisi pour la réalisation de cette tour et le split système était démonté et remplacé par la tour à vent (figure 4.5).



Figure 4.79 : Emplacement de la tour à vent

4.4 Etapes de la réalisation

La réalisation de la tour à vent s'est déroulée en plusieurs étapes :

4.4.1 Etape Préparatoire

En premier lieu, nous avons commencé par étudier l'état des lieux (prospection, prise de mesures, relevé et prise de photos de l'intérieur et l'extérieur de la bâtisse) où va être réalisée la tour à vent.

Le but de cette étape était d'avoir un support bien défini. Des plans, coupes et photos (figures 4.6 à 4.10), nous ont permis de positionner et de trouver les solutions aux contraintes techniques, qui pourraient surgir lors de la phase de réalisation.

4.4.2 Elaboration des plans et détails d'exécution

Les plans et les détails d'exécution de la tour à vent ont été élaborés tout en prenant en considération les points suivants :

-
- Les résultats et recommandations du travail obtenu par simulation
 - La réalité exigée par l'état des lieux.

Les plans d'exécution seront le support technique de la réalisation pour toute l'équipe qui a intervenu lors de la phase de réalisation.

Plusieurs problèmes ont été réglés, des solutions ont été imaginées durant cette étape (figures 4.7 à 4.10).

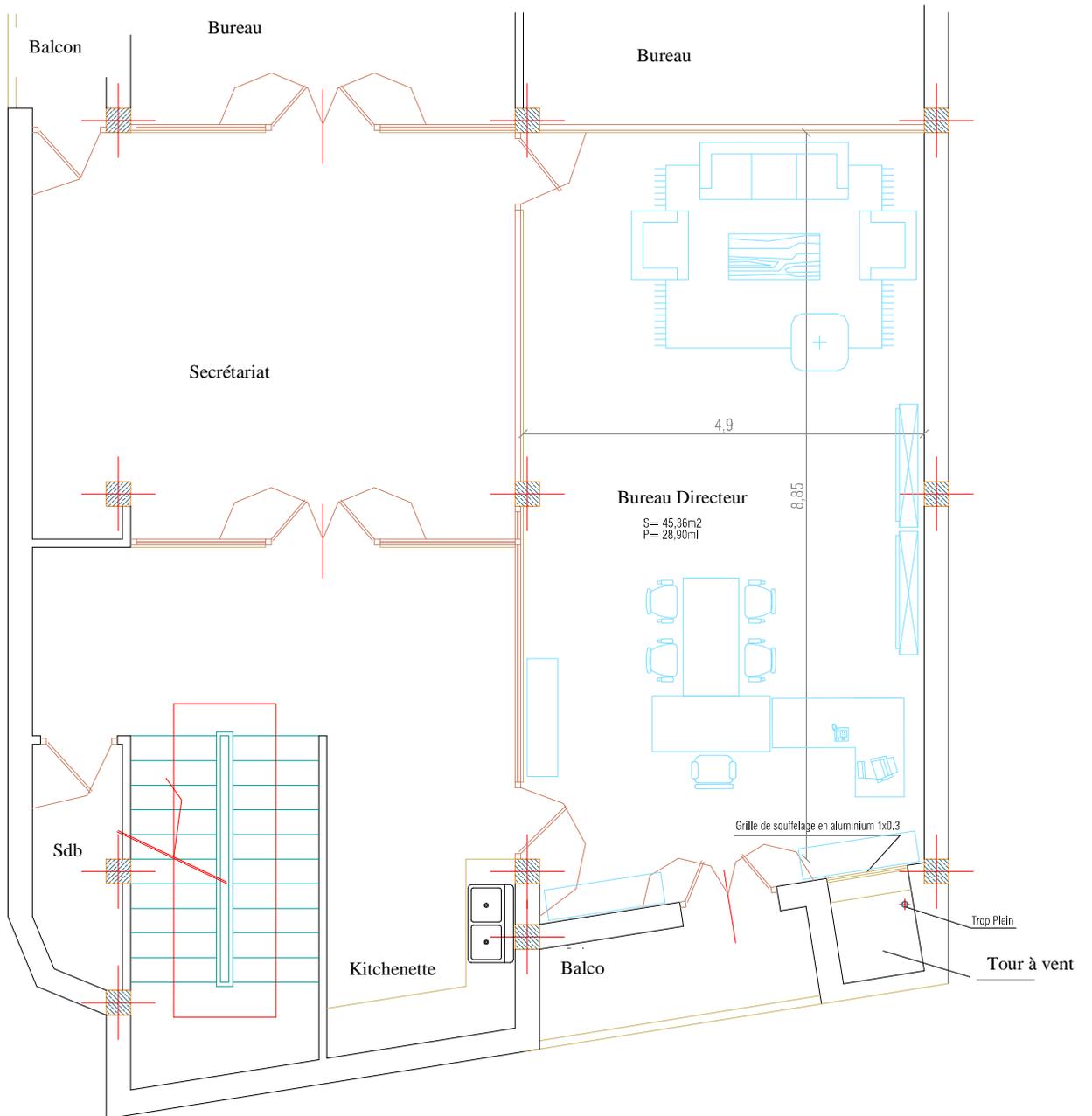


Figure 4.80 : Vue en plan d'une partie du 1^{er} Etage

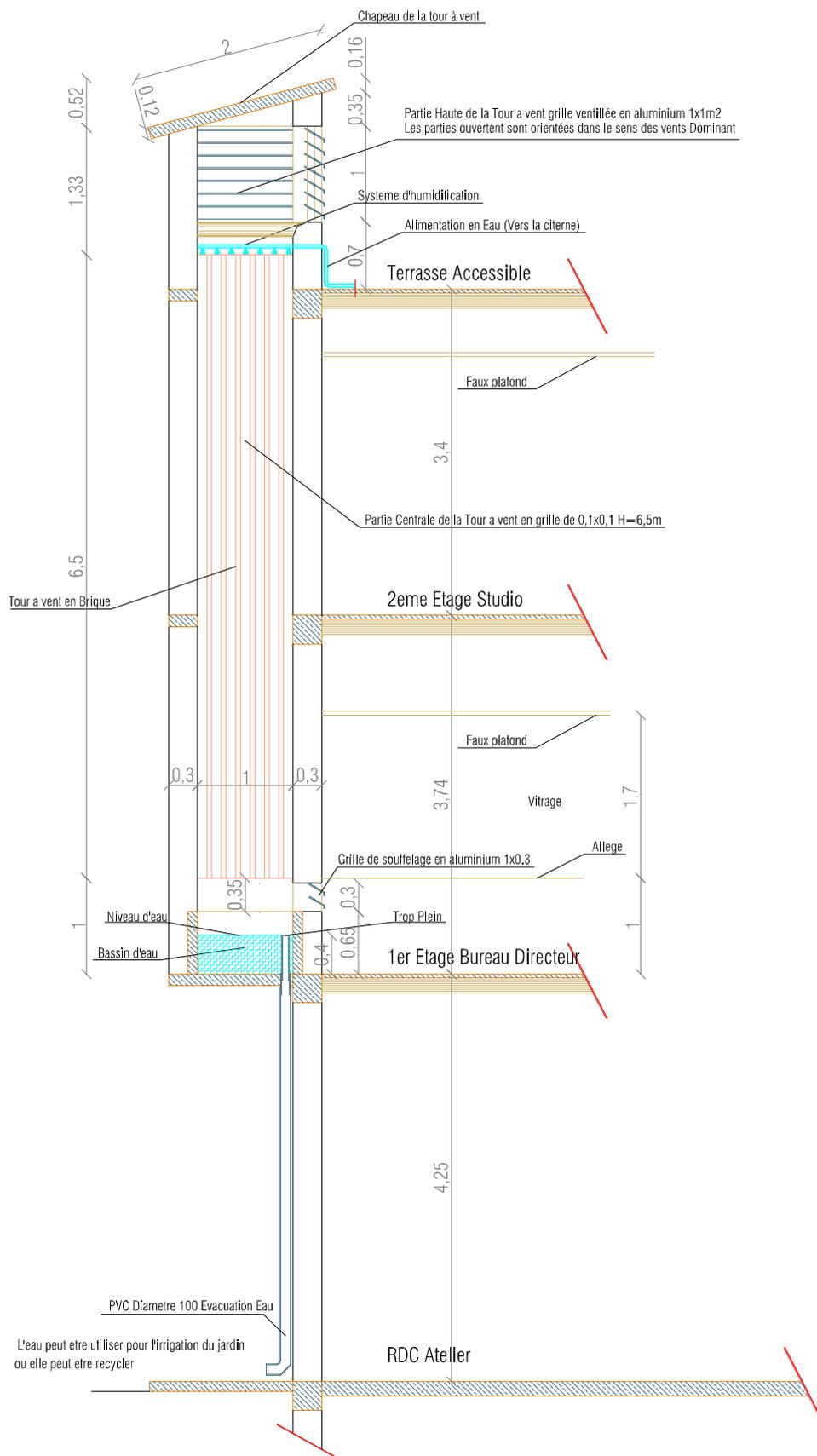


Figure4. 81 : Coupe sur la tour à vent et bloc administratif

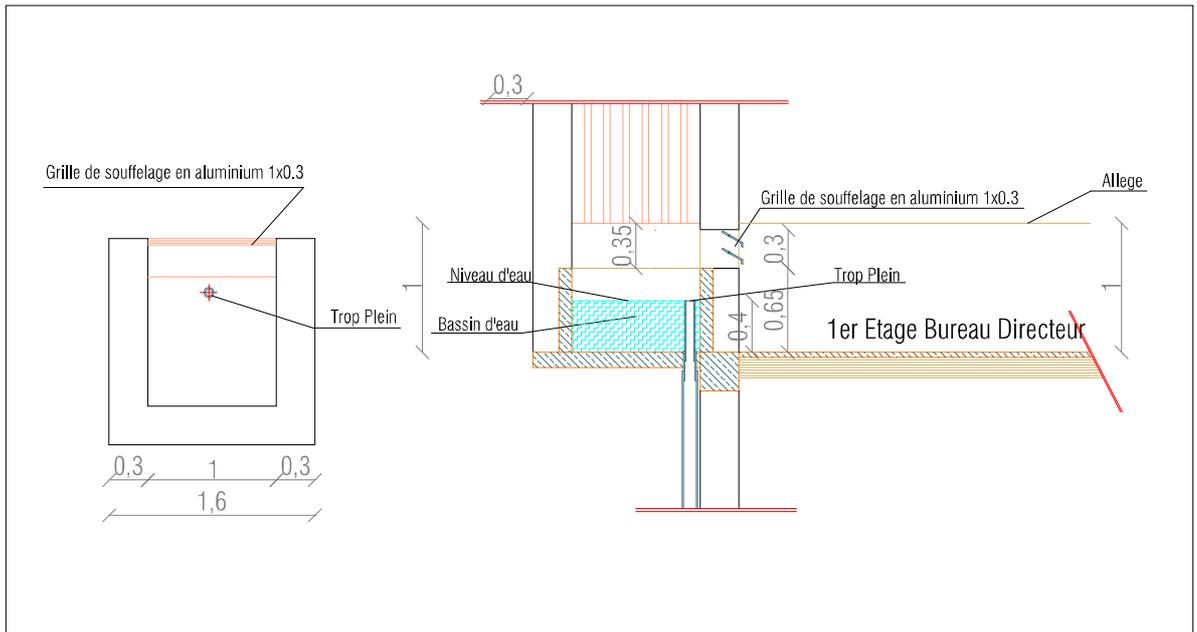


Figure4.82 : Détail sur la partie basse de la tour « Bassin d'eau »

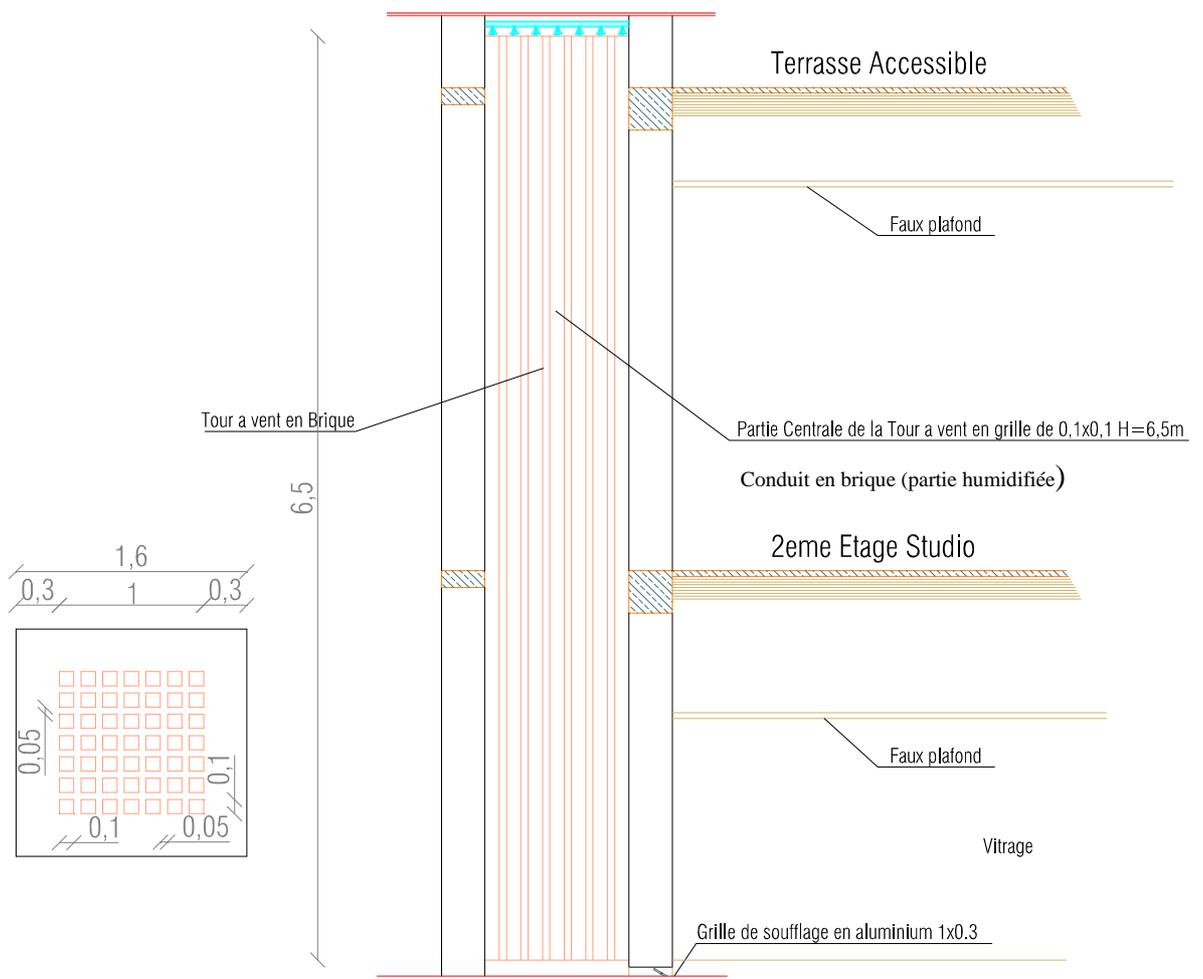


Figure4.83 : Détail sur la partie centrale de la tour « le tronc »

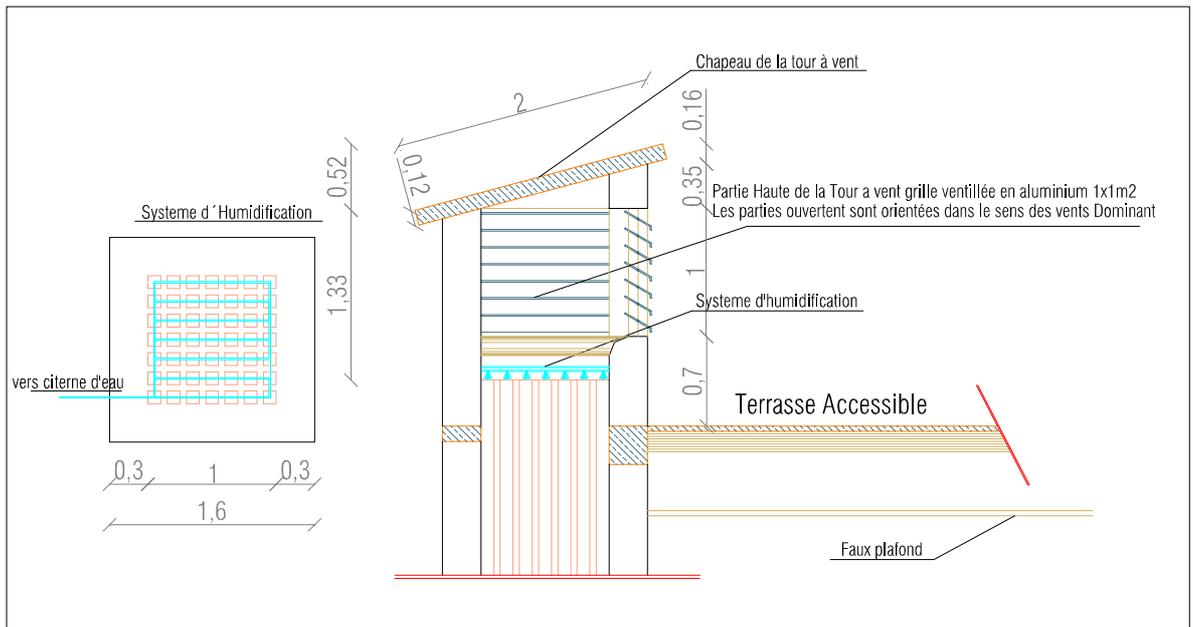


Figure 4.84 : Détail sur la partie supérieure de la tour « la tête »

4.4.3 Vérification et approbation des plans

Les plans et les détails d'exécution des différentes parties de la tour à vent, aussi, les solutions imaginées pour résoudre les problèmes techniques de réalisation ont été discutés avec l'encadreur ainsi que l'ensemble du laboratoire de recherche A.B.E (architecture bioclimatique et environnement). Ceci était dans le but de déterminer la forme et les dimensions finales de la tour à vent avant d'entamer la réalisation.

4.4.4 Etude Climatique et Bioclimatique de la ville de Hassi Messaoud

L'étude climatique et bioclimatique de la ville de Hassi Messaoud était un élément déterminant dans la confirmation du site et la validation des solutions proposées lors de la phase élaboration des plans d'exécution. Elle a plusieurs objectifs :

- Confirmer le type de climat de la ville de Hassi Messaoud à savoir Chaud et aride,
- Déterminer la direction et la fréquence des vents dominants afin de déterminer le nombre d'ouvertures au niveau de la tête de la tour à vent ainsi que leurs orientations,
- Déterminer la zone de confort spécifique à la région après acquisition des données climatiques des dix (10) dernières années (1997-2006) (Températures, Humidité, vent et pluviométrie), la source de ces paramètres étant la station météorologique de Hassi Messaoud. Cette analyse sera présentée en détail au

chapitre 5 « expérimentation » afin de vérifier et comparer les résultats avec la zone de confort.

4.4.5 Réalisation

L'expérimentation exigeait un élément de brique spécifique de 75x75x50 cm de dimensions. Cet élément n'est malheureusement pas disponible sur le marché. Pour cela nous étions obligés de contacter plusieurs briqueteries au niveau national pour la confection d'un moule et la production de treize (13) éléments afin d'obtenir la hauteur et la section recommandées par la simulation.

Cependant, le coût de la confection du moule fut très excessif (estimé à 100.000,00 D.A.) et les responsables des briqueteries contactées ne voulaient pas participer à la confection de ce moule, qui risquait de retarder la chaîne de production de blocs de briques de dimensions standard, surtout que les briqueteries tournaient à plein temps et ne subvenaient pas aux besoins du marché, est que la demande était urgente.

Devant cette contrainte, nous avons à réfléchir sur une solution qui prenait en considération la réalité du marché Algérien et les recommandations de la simulation.

L'idée était de couper dans le sens de la longueur la brique de 15x30x20 cm à 12 trous en deux, dans le but d'obtenir deux briques de 05x30x20 cm (4 trous superposés).

Un assemblage est ensuite réalisé en découpant cette même brique en trois parties, pour obtenir des morceaux de briques de 05x10x20 (figure 4.11).



Figure 4.85 : Découpage des Briques

Cet assemblage devait ramener la section de la tour à $1 \times 1 \text{ m}^2$ au lieu de $75 \times 75 \text{ cm}^2$.

Le nombre de trous ou conduits d'air à l'intérieur de la section est de 49, soit Sept dans le sens de la longueur et Sept dans le sens de la largeur, notons que le changement de la section n'avait aucune influence sur la hauteur totale de la tour à vent et la hauteur de la partie centrale, qui comporte les conduits de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ de section chacune.

Les étapes de la réalisation de la tour à vent étaient comme suit :

❖ **Partie basse de la tour « Bassin d'eau »**

En premier lieu nous avons procédé à la construction de la base de la tour à vent sur une hauteur d'un mètre (figure 4.12). La partie inférieure sur une hauteur de 60 cm y compris le sol était recouverte de dalle de sol (figure 4.13), dans le but de rendre cette partie la plus étanche possible, car elle va contenir de l'eau durant toute la phase expérimentation et la période de fonctionnement de la tour à vent. La vidange et l'évacuation de la quantité débordante d'eau au niveau du bassin est assuré par un système de vidange composé de deux tubes en acier galvanisé, le premier d'une longueur de 40 cm et 10 cm de diamètre, fileté a un deuxième morceau de tube en acier galvanisé encastré dans la dalle du premier plancher existant du balcon (figure 4.15). Le tout est relié à une conduite en PVC de même diamètre par le biais d'un ensemble de coudes, permettant ainsi l'évacuation de cette eau en cas de besoin vers l'extérieur du bâtiment.

La vidange du bassin se fait par le dévissage de la partie supérieure du trop plein de l'intérieur du bureau où l'air frais arrivera à travers une ouverture de $30 \times 100 \text{ cm}^2$ (figure 4.14), cette ouverture se trouve à 65 cm de la base de la tour et 5 cm de la partie inférieure de la partie centrale (figure 4.8), comprenant les conduits.

Cette ouverture de soufflage d'air frais vers l'intérieur du bureau est équipée d'une grille en aluminium réglable (figure 4.16), elle permettra de contrôler le débit d'air entrant dans le local, ou la fermeture totale de cette ouverture durant les périodes hivernales.

Durant cette période de l'année et d'après l'étude climatique et bioclimatique de la ville de Hassi Messaoud, il faut passer à un chauffage passif au lieu d'utiliser un système de rafraîchissement.

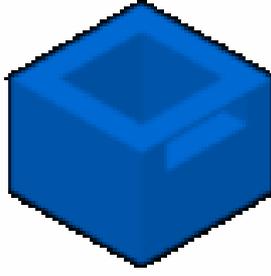


Figure 4.86 : Perspective sur le Bassin



Figure 4.87 : Pose de la dalle de sol à l'intérieur du bassin



Figure 4.88 : Ouverture de la partie de soufflage sur une hauteur de 30 cm



Figure 4.89 : Les différents éléments du système de vidange



Figure 4.90: Grille en aluminium (Contrôle du débit d'air du soufflage)

❖ **Partie centrale de la tour « Le Tronc »**

La partie la plus difficile dans la réalisation de la tour à vent était la partie centrale, divisée en quarante neuf (49) conduits d'air de 10x10 cm sur une hauteur de 6,5m. Cette partie repose sur le bassin à 1m du sol (figure 4.17).

Pour la réalisation de cette partie, nous avons commencé par la découpe des briques de 05x30x20 et 05x10x20. L'idée était de concevoir un coffrage composé de plusieurs morceaux de bois (figure 4.19), ces derniers étaient récupérés de l'intérieur de la tour à vent à travers l'ouverture de soufflage. Le coffrage était supporté par des tiges en acier T14 intégrées dans les briques qui composent les deux murs orientés Est et Ouest, de la tour à vent (figure 4.18). Les tiges étaient placées après traçage du niveau à l'intérieur du bassin. Les tiges débordées du côté Ouest, afin de permettre la récupération du coffrage en bois et le nettoyage des conduits du surplus de mortier de pose et autres (figure 4.20).



Figure 4.91 : Perspective sur la partie centrale de la Tour (conduit intérieur pour l'humidification)



Figure 4.92 : pose des tiges en acier pour supporter les conduits en briques (10x10cm²)



Figure 4.93 Pose du coffrage en bois

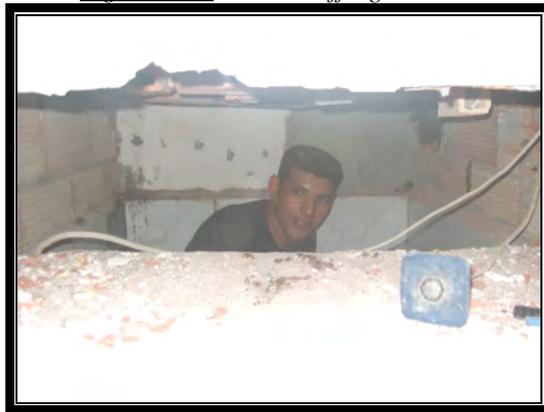


Figure 4.94 : Nettoyage du bassin et récupération du coffrage

La première rangée des conduits était posée directement sur le coffrage en bois, une barre d'acier était intégrée à l'intérieur de chaque rangée et reposait sur les parois latérales de la tour. La jonction entre les briques est faite par un mortier en ciment (figure 4.21). Les rangées au dessus de la première rangée étaient imbriquées, afin de soutenir les blocs de briques en dessus, assurant ainsi une bonne rigidité de toute la structure.

Le gabarit de bloc de briques de 05x10x20, facilitait la confection des conduits de 10x10cm² (figure 4.22).



Figure 4.95 : Pose de la première rangée (a,b)





Figure 4.96 : Etapes de réalisation de la partie centrale (a,b,c,d,e)

Le percement des deux dalles (premier et deuxième plancher) en béton armé était indispensable pour atteindre la hauteur de 6,5 m nécessaire pour l'obtention des résultats déjà simulés par le logiciel (CAP COOL). La partie centrale traversait ainsi le deuxième étage (Studio d'accueil) et se terminait au niveau de la terrasse.

Au deuxième étage, la réalisation de la partie centrale était faite à l'intérieur du studio, ainsi un volume de 1,3x1,3 de section apparaît, le déplacement du tableau de commande électrique et la déviation des câbles sous la Chappe était indispensable (figure 4.23).

Arrivant au dernier plancher, les travaux de finitions et de remise en état (enduits, pose de plinthes et peinture) au niveau du studio étaient finalisés. Le reste des travaux devaient se faire au niveau de la terrasse.



Figure 4.97 : Réalisation de la tour à l'intérieur du studio (a : préparation du sol, b : construction de la tour)

La hauteur de 6,5 m de la partie centrale était atteinte en dépassant la dernière dalle. Cette partie a consommé 1200 briques à 12 trous et 600 à 08 trous.

Sur la dernière rangée une couche de mortier de ciment était posée pour assurer une surface plane où sera posé le système d'évaporation passif (figure 4.24).

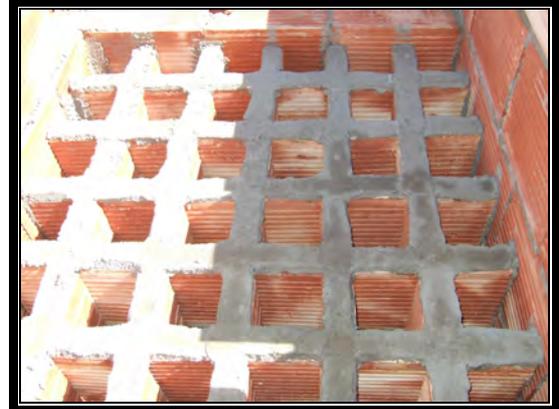


Figure 4.98 Finalisation de la tour au niveau de la terrasse

❖ **Partie supérieure de la tour « Tête »**

La réalisation de la tête de la tour (entrée d'air) était la dernière étape avant la prise de mesures. Elle est composée de quatre murets de brique réalisés en double cloisons de (30) cm d'épaisseur (figure 4.25).

Les trois faces orientées EST, OUEST et NORD contiennent des ouvertures de 1x1m², pour capter les vents dominants, comme indiqué dans l'analyse climatique de la ville de Hassi Messaoud.

Les bords des faces intérieures des ouvertures sont chanfreinés et courbés, pour faciliter l'écoulement d'air à l'intérieur de la tête et ensuite à l'intérieur des conduits (figure 4.26).

La couverture de la tête de la tour est réalisée en béton armé, composée de morceaux de dalles préfabriqués en béton armé, facilitant ainsi sa réalisation et la mise en place des dalles, réduisant ainsi les délais de réalisation, qui n'étaient pas en notre faveur (travaux à finalisés avant la période de mesure à savoir du mois de Mai au mois d'Août) (figure 4.28).

Les trois ouvertures sont équipées de grilles orientables. Cela permettra la fermeture de la tour à vent en cas de vent de sable et durant les périodes froides.

Des linteaux ont été préfabriqués sur place, pour délimiter les ouvertures.

La forme et le sens de l'inclinaison finale était réalisée conformément aux plans d'exécution (figure 4.27).

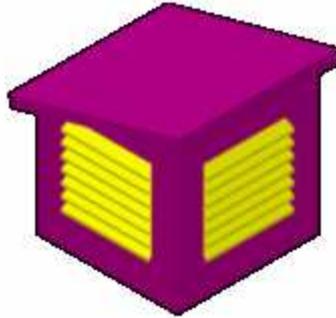


Figure 4.99 : Perspective de la partie supérieure de la tour

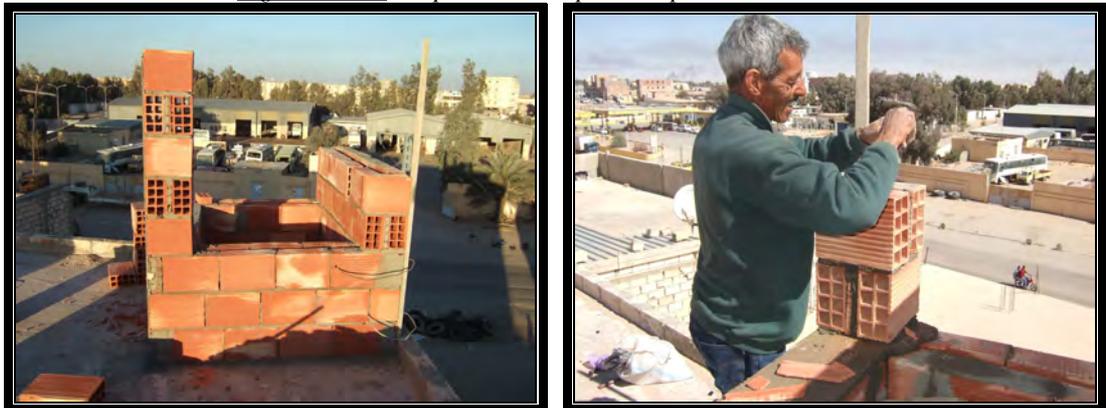


Figure 4.100 : réalisation de la tête de la tour



Figure 4.101 : Confection des linteaux et inclinaison de la tête

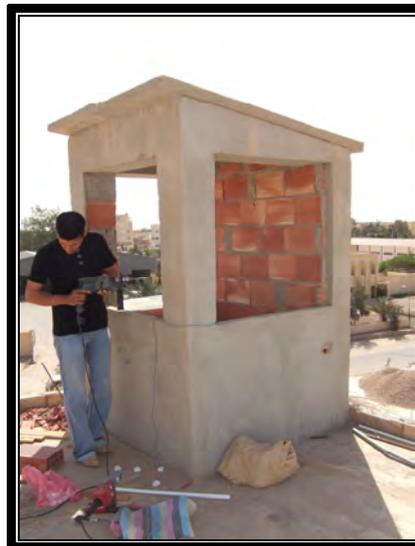


Figure 4.102 : Pose des dalles préfabriquées et finalisation des travaux de maçonnerie

Après plusieurs réflexions et deux tentatives de réalisation, le système d'évaporation passif arrêté était composé d'un maillage en tube polyuréthane Type ADARA (figure 4.29), les entraxes des tubes correspondaient aux entraxes des conduits. Au niveau de chaque intersection, une bouche d'arrosage de type goutte à goutte était intégré à la conduite.

L'objectif était d'humidifier toutes les facettes intérieures des conduits d'air pour augmenter le rendement de la tour au maximum.

Le maillage était fixé sur la face plane supérieure des conduits, par un système de support démontable, ce système est fixé sur la tour à vent grâce à des chevilles et des vises (figure 4.30).

L'assemblage des éléments composant le maillage était assuré par soudure (réchauffement des deux extrémités de chaque pièce à l'aide d'un appareil spécial fonctionnant à l'électricité).

Le maillage était ouvert d'un seul coté, le raccordement vers la source d'eau, était réalisé sur place, en utilisant les mêmes produits que le maillage (figure 4.31).

L'utilisation du système goutte à goutte commandait le volume et la vitesse à la quelle l'eau coulée sur les facettes internes des conduits, le réglage du débit évitait toute utilisation irrationnelle d'eau.

La source d'eau était une citerne déjà existante d'une capacité de 1500 litre, réalisé en acier galvanisé. Elle subvenait aux besoins du bloc administratif en eau sanitaire.

A cause de la chaleur excessive que connaît la région, la citerne était protégé des rayons solaires directes par une deuxième voute en acier, créant ainsi un vide ventilé entre les deux tôles (figure 4.32).

Aucune énergie n'a été utilisé pour arrosé de façon continue les conduits de la tour, l'eau arrivait par gravité, car le niveau de la citerne était plus élevé que celui du maillage. En cas de besoin la citerne peut être isolée du système grâce à une vanne d'arrêt. L'excès en eau d'humidification peut être utilisé pour l'arrosage du jardin ou bien être recyclé. Après vérification de toute l'installation et l'ouverture de la bouche de soufflage au niveau du bureau la première mise en service du système d'humidification était faite (figure 4.33).

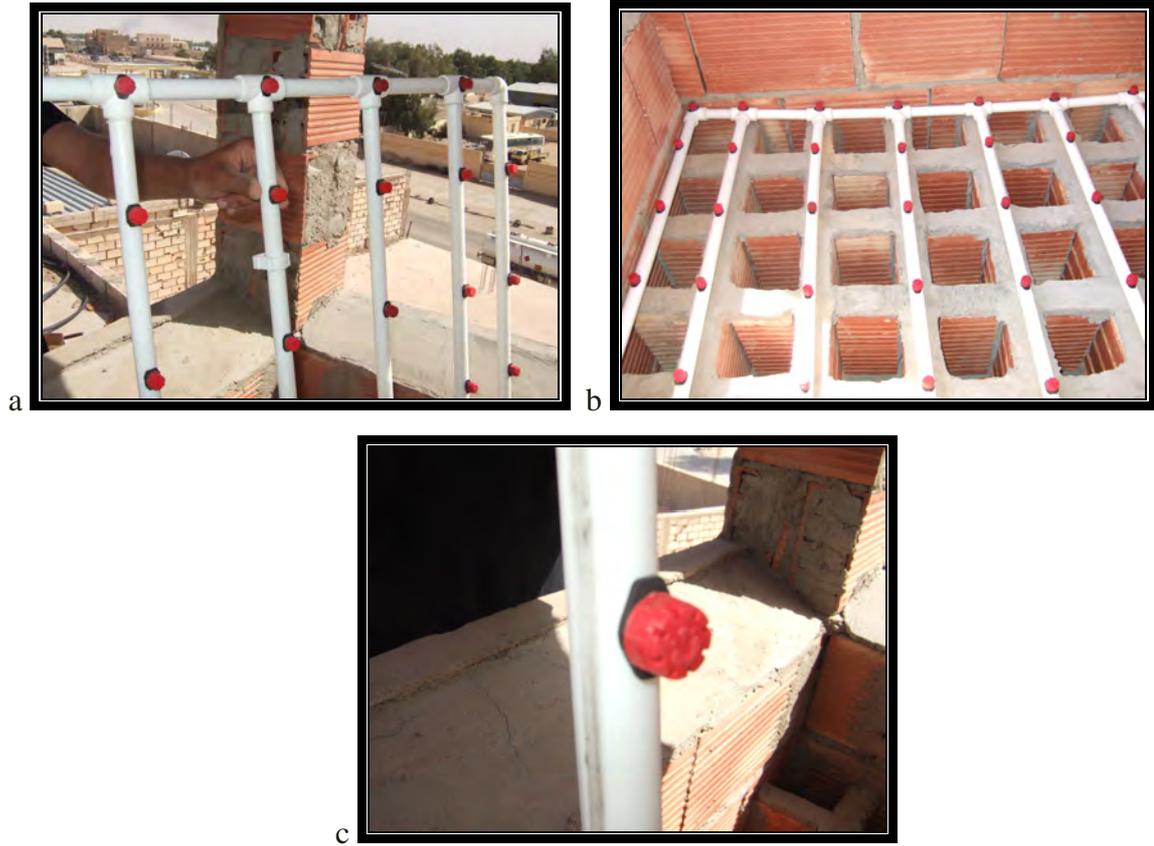


Figure 4.103 : système d'humidification arrêté (a,b,c)



Figure 4.104 : fixation du maillage sur les conduits (a,b)



a



b



c

Figure 4.105 : Raccordement du système vers la citerne d'eau (a,b,c)



Figure 4.106 : citerne d'eau existante avec double voute ventilé pour protéger l'eau de la citerne contre les rayons solaires



Figure 4.107 : première utilisation du système d'humidification

Conclusion :

La réalisation de la tour à vent est la première phase de l'expérimentation, elle est une phase indispensable pour la vérification des résultats obtenus par la simulation faite par Y. BOUCHAHM 2003.

Plusieurs contraintes ont été surmontées lors de cette phase de travail, l'accord du propriétaire de l'administration où a eu lieu la réalisation était le point de démarrage de ce travail, la non disponibilité d'un modèle de brique spécifique qui répond aux critères de la réalisation de la partie centrale de la tour à vent sur le marché national a été le problème essentiel de cette réalisation. Malgré nos maintes demandes les responsables des briqueteries contactées n'ont pas voulu collaborer à la réalisation de ce projet expérimental.

La solution retenue pour la réalisation de cette partie se basait sur la brique standard existante sur le marché. Plusieurs plans d'exécution et de détails ont été développés avant la réalisation et ce dans le but de surmonter toutes les contraintes techniques liées à la réalisation (découpe des modules, confection et récupération du coffrage, mise en place des premières rangées de brique, etc).

Un autre problème a été résolu après plusieurs essais, le système d'humidification devait arroser tout le long des parois des conduits de la partie centrale, réglable, il doit prendre en considération la qualité de l'eau de la région de Hassi Messaoud.

L'intégration de la tour à vent ayant pour objectif d'assurer un rafraîchissement évaporatif passif dans les nouveaux projets ne posera plus de problèmes techniques, mais une recherche plus approfondie sur les solutions trouvées pour la standardisation et l'industrialisation de plusieurs éléments composant la tour à vent est nécessaire.

La finalisation des travaux de réalisation de la tour à vent et la mise en service du système d'humidification, nous permettra d'entamer la phase suivante qui est l'expérimentation.

L'acquisition du matériel et le développement d'une stratégie de travail pour la prise de mesures des températures et humidités relatives de l'air à l'extérieur (tête de la tour) et à l'intérieur (bouche de soufflage) ainsi que ceux données par la station météorologique de Hassi Messaoud.

Un relevé horaire de la température et de l'humidité était fait, pour des périodes d'une semaine pour chaque scénario (avec et sans humidification) durant la période du mois de Mai à Aout. Ceci fera l'objet du prochain chapitre qui permettra de mettre en évidence l'effet de rafraîchissement de la tour à vent avec et sans humidification sur le confort d'été en région aride et chaude, (Hassi Messaoud).

Expérimentation

Les relations de l'architecture avec l'environnement sont à l'ordre du jour. Non seulement elles concernent l'impact écologique et visuel, mais aussi les échanges entre le climat et les ambiances intérieures. Cependant l'architecture climatique vise à utiliser les ressources naturelles pour réduire les dépenses d'énergies consacrées au chauffage, à la climatisation et à l'éclairage des bâtiments en vue de réaliser le confort thermique et lumineux.

L'homme à toujours construit un abri, le mode de construction prenait en considération le climat. Notre rôle de concepteur est de continuer à assurer l'abri et le confort de l'utilisateur de plus faire en sorte que l'impact du bâtiment sur l'environnement soit minimisé.

L'architecture bioclimatique vise principalement l'amélioration du confort d'un espace bâti qui peut minimiser le recours aux énergies non renouvelables. Les effets pervers de celui-ci influent sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et le fonctionnement. L'intérêt du « bioclimatique » va donc du plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui en fait un élément fondamental de l'art de l'architecture (J. L. Izard, 1979).

5.1 Cas d'étude

L'étude consiste en l'application des aboutissements et des résultats obtenus par la recherche de Y. BOUCHAHM 2003 dans la réalisation de la tour à vent.

La recherche et les résultats des simulations et l'interprétation sur l'exemple réel, qui est la tour à vent des 60 villas de la cité Amrane à Ouargla, ont conclu une conception meilleure d'une tour à vent pour un rafraîchissement passif efficace et une humidification idéale.

5.2 Objectif de l'expérimentation

L'objectif de cette expérimentation est la vérification des résultats de la simulation numérique. (Voir 4.2 Résultat de la simulation, chapitre 4).

Un autre objectif serait de contribuer, par la réalisation de la tour, à la réduction des gaz à effet de serre (CFC) dû à l'utilisation exagérée de la climatisation artificielle qui participent aux changements climatiques majeurs tels que le réchauffement de la planète.

5.3 Situation

Le choix du site de la réalisation de la tour était porté sur la ville de Hassi Messaoud. Parce que le climat de la ville est identique à celui de la ville de Ouargla. La bâtisse où sera réalisée la tour se trouve à l'intérieur de la ville.

5.4 Le climat de la ville de Hassi Messaoud

La Ville de Hassi Messaoud est située dans le Sud Est de l'Algérie, à une latitude de 31°40' nord et une longitude de 06°09E. Elle s'élève à une altitude de 142m. La région de Hassi Messaoud se caractérise par un climat désertique, aride et chaud (figure 5.1),

Le climat est caractérisé par des conditions climatiques où règne la rareté des précipitations. Elles sont très nettement inférieures (moins de 100 mm/an) et très irrégulières, parfois nulles (cas des années de sécheresse). L'ensoleillement est très intense (plus de 4000 heures par an alors que les régions méditerranéennes les plus ensoleillées atteignent à peine 2000 heures). Il y règne une chaleur torride durant la journée alors que les nuits sont relativement fraîches, voire froides ; ces passages quotidiens du chaud au froid font éclater les roches qui se transforment en sable. Les périodes de sécheresse s'étalent sur au moins huit ou neuf mois. Certaines régions connaissent la sécheresse tout au long de l'année.

Les caractéristiques de cette région sont (A Touati ; 2000):

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

5.4.1 Situation géographique

Latitude 31°40' N

Longitude 6°09' E

Altitude 142 m

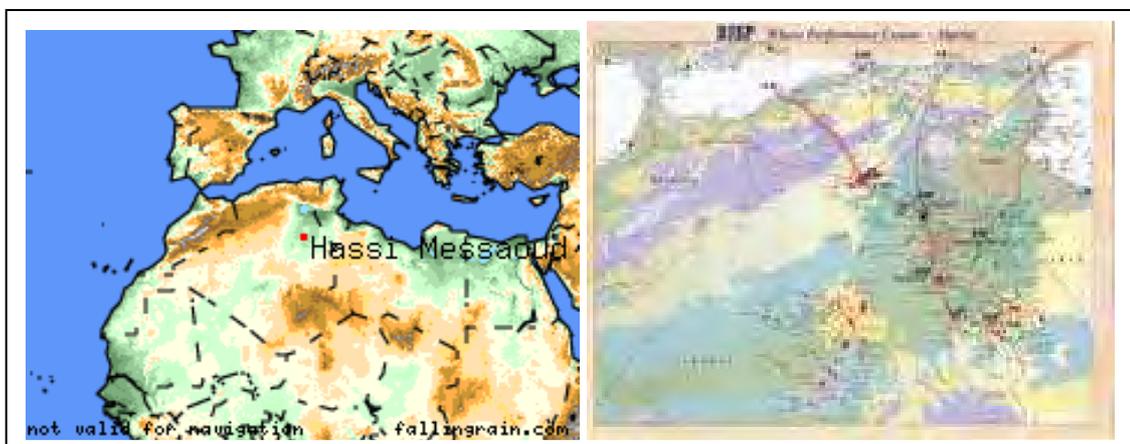


Figure 5.108: Situation de la ville de Hassi Messaoud
Source : ([http://Hassi Messaoud en line](http://HassiMessaoud.com))

D'après la classification donnée par Recommandations architecturales (ministère de l'habitat 1993) la ville de HASSI MESSAOUD appartient à la zone climatique E4 d'été et H3c d'hiver.

La zone d'été E4 a des étés chauds et secs avec un écart de température diurne élevé.

La zone d'hiver H3c a des hivers froids.

5.4.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est défini comme étant le déplacement de l'énergie sous forme de radiation solaire, cette radiation solaire transmet la chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques constituant ainsi le spectre solaire. Comme le rayonnement solaire traverse l'atmosphère terrestre, son intensité est diminuée et la distribution spectrale est modifiée par l'absorption, la réflexion et la diffusion (figure 5.2).

Pour la wilaya de Ouragla (Atlas solaire de l'Algérie 1985):

- L'énergie incidente sur un plan horizontal pour le rayonnement solaire annuel moyen est de 5686 Wh/m².
- L'énergie incidente sur un plan horizontal pour le rayonnement solaire annuel est de 68232 Wh/m².

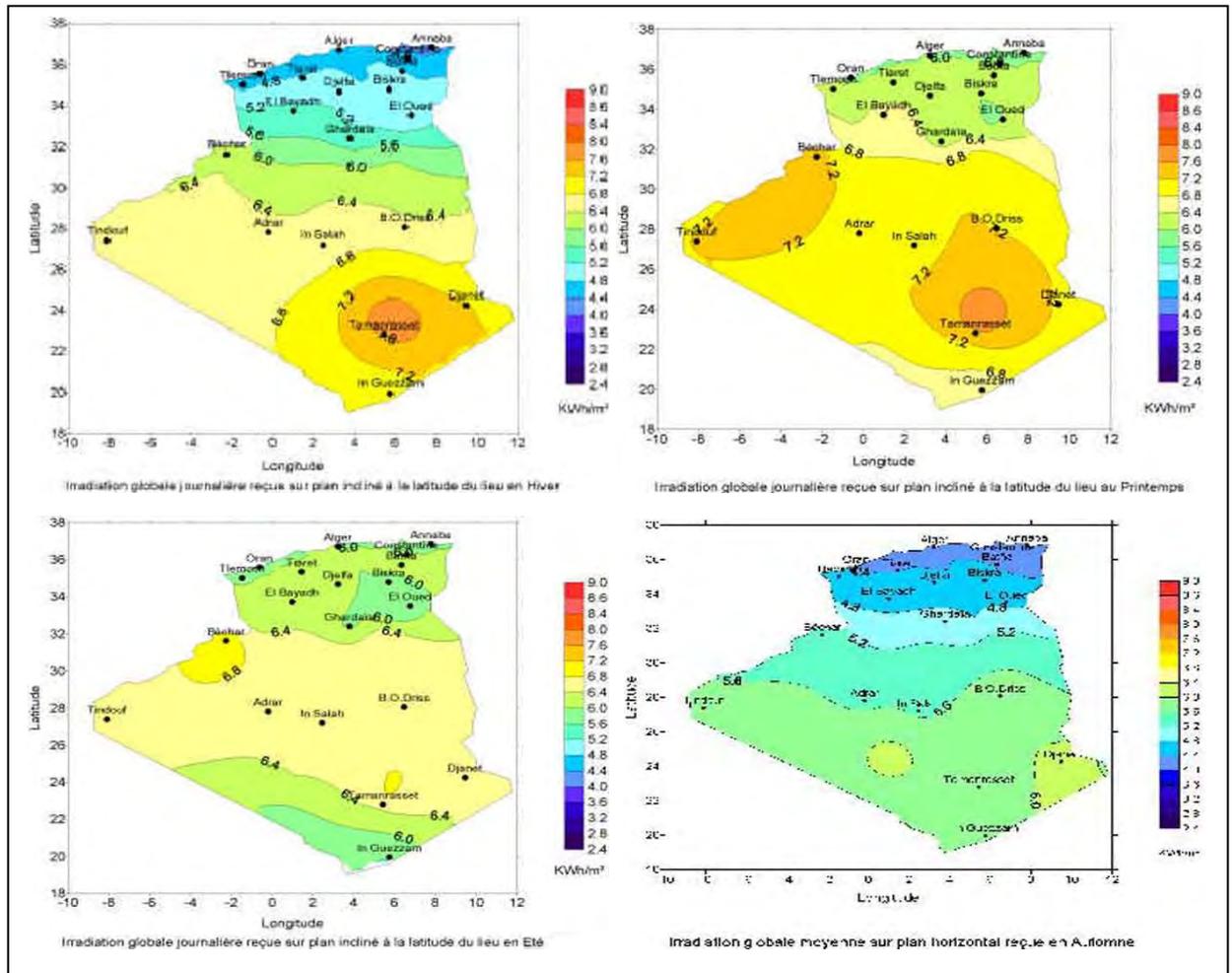


Figure 5.109 : Cartes d'irradiations moyennes reçues pendant les quatre saisons sur l'ensemble du territoire national.

5.4.3 Température de l'air

C'est une grandeur physique qui indique le taux d'échauffement et de refroidissement de la surface de la terre (CRAU, UNU) c'est l'état atmosphérique de l'air du point de vue de son action sur nos organes : degrés de froid ou de chaleur (LAROUSSE 1986).

De ce fait les régimes diurnes et nocturnes de la température de l'air dépendent des variations de la température de surface (sous les mêmes conditions de rayonnement solaire, les surfaces maritimes et continentales ne chauffent pas de la même manière, les masses d'eau chauffent moins rapidement que les masses de la terre). L'altitude modifie aussi la température de l'air.

| Mois | T° moy max | T° moy min | T° moy mensuelle | Ecart type |
|------------------|------------|------------|------------------|------------|
| Janvier | 17,7 | 4,9 | 11,1 | 12,8 |
| Février | 20,4 | 6,7 | 13,4 | 13,7 |
| Mars | 25,9 | 11,6 | 17,7 | 14,3 |
| Avril | 30,4 | 15,8 | 23,1 | 14,6 |
| Mai | 35,7 | 20,5 | 28,2 | 15,2 |
| Juin | 40,9 | 25,4 | 33,1 | 15,5 |
| Juillet | 43,4 | 28,2 | 36 | 15,2 |
| Août | 42,4 | 27,8 | 35,2 | 14,6 |
| Septembre | 37,6 | 23,9 | 31,3 | 13,7 |
| Octobre | 31,8 | 18,7 | 25,3 | 13,1 |
| Novembre | 23,4 | 11,3 | 17,4 | 12,1 |
| Décembre | 19,3 | 6,7 | 12,6 | 12,6 |
| Moyenne annuelle | 30,70 | 16,80 | 23,70 | 13,95 |

Tableau 5.1 : Tableau des données descriptives des températures moyennes mensuelles en °C à Hassi Messaoud (1997-2006).

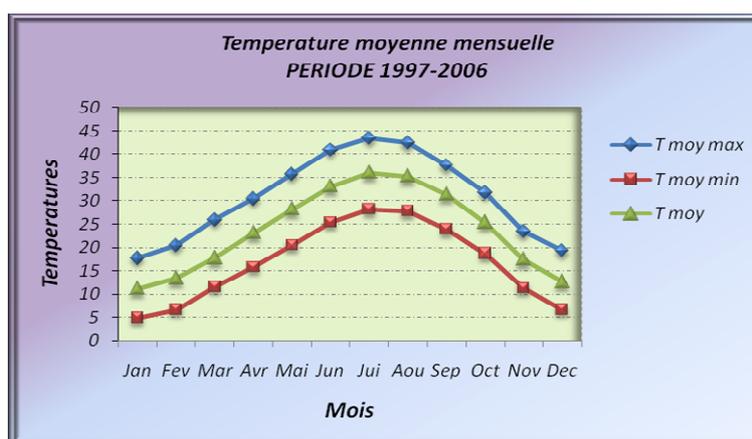


Figure 5.110 : Diagramme des températures moyennes mensuelles

Les données climatiques de la ville de Hassi Messaoud montrent qu'on peut distinguer d'après le tableau des données descriptives des températures moyennes mensuelles et le graphe des températures moyennes mensuelles sur Dix ans (de 1997 à 2006) que la courbe des températures moyennes mensuelles évolue d'une manière régulière et que la température moyenne annuelle est de 23,70°C. La température moyenne la plus basse est de 4,9°C en janvier, le mois le plus froid, alors que la température moyenne la plus importante est de 43,3°C en juillet, qui est considéré comme le mois le plus chaud.

Les écarts types ne sont pas trop contrastés entre eux mais importants avec une amplitude moyenne annuelle de 13,95°C.

On distingue deux périodes qui forment l'année :

Une période chaude qui s'étend du mois d'Avril jusqu'au mois d'Octobre ou les températures moyennes varient entre 23,1°C et 25,3°C et les températures les plus élevées sont enregistrées

en juillet avec 36°C et en août avec 35,2°C et une température moyenne minimale de 28,2°C et 27,8°C pour les mêmes mois.

Une période douce moins longue qui s'étend du mois de Novembre jusqu' au mois de Mars ou les températures moyennes varient entre 17,43°C et 17,7°C avec des températures qui peuvent atteindre un minimum de 4,9°C en janvier qui est le mois le plus froid.

L'écart type est important, la température du sol atteint son maximum à la mi journée mais pendant la nuit cette chaleur accumulée est restituée ou irradiée vers le ciel clair sans nuage. Cependant en comparaison avec la ville de Constantine par exemple dont l'amplitude annuel est de 12,43°C (station météorologique Ain el bey) celui de Hassi Messaoud est plus important 13,95°C, ceci en partie à cause des mouvements d'air qui s'opèrent entre la terre et les étendues de sable et le manque de végétation ainsi que le facteur industriel de la région surchauffant ainsi les températures de l'air en été pendant la journée.

Les amplitudes ou les écarts de températures diurnes sont importantes, Tmax-Tmin juillet est de 15,2°C, pour le mois de juin il est de 15,5°C, comme dans les régions désertiques généralement la température baisse d'une façon importante la nuit, ceci est du au ciel clair sans nuage qui facilite l'irradiation de la terre vers le ciel, alors que le jour la chaleur est très élevée, la température maximale enregistrée en juillet est de 43,4°C.

Les températures sont douces en hiver (entre 17,7 et 20,4°C)et très chaudes en été (entre 40,9 et 43,4°C), la saison chaude est plus longue que la saison froide avec des amplitudes très importantes.

5.4.4 Humidité relative

Elle indique une évaluation directe du pouvoir évaporatif de l'air. Elle est l'expression en pourcentage du degré hygrométrique (GIVONI 1978).

| Mois | H moy max% | H moy min% | H moy mensuelle% |
|-----------|------------|------------|------------------|
| Janvier | 86,5 | 27,5 | 54,1 |
| Février | 81,5 | 21,0 | 49,1 |
| Mars | 67,8 | 16,9 | 37,6 |
| Avril | 63,5 | 15,2 | 33,2 |
| Mai | 55,6 | 13,9 | 29,0 |
| Juin | 49,5 | 12,0 | 23,9 |
| Juillet | 45,6 | 11,4 | 21,5 |
| Août | 53,9 | 13,5 | 26,2 |
| Septembre | 62,3 | 17,2 | 35,5 |
| Octobre | 72,9 | 19,9 | 45,5 |
| Novembre | 81,7 | 27,8 | 52,9 |
| Décembre | 84,2 | 33,4 | 61,7 |

Tableau 5.2 : Tableau des données descriptives de l'humidité relative (%) de ville de Hassi Messaoud

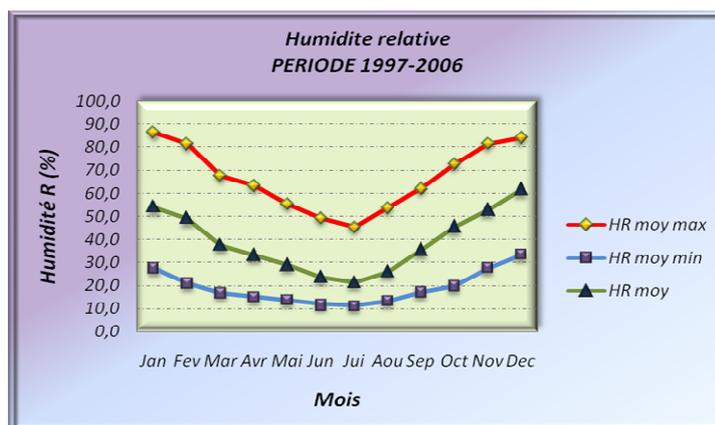


Figure 5.111 : Diagramme de l'Humidité relative

Après lecture du graphe relatif à l'humidité relative on peut remarquer que les fluctuations au niveau de la courbe de l'humidité relative moyenne sont un peu moins régulières que celles des températures : les minimales varient entre 33,48% pour le mois le plus humide Décembre et 11,4% pour le mois le plus sec et chaud (Juillet). Alors qu'on enregistre un maximum de l'ordre de 86,5% au mois de janvier

Ces données indiquent que lorsque la température est élevée, l'humidité est basse et contrairement lorsque l'humidité est élevée, la température est basse.

Les moyennes mensuelles ne dépassent pas pendant tous les mois d'hiver (de Novembre à Février) 54,45%, cette valeur est la moyenne mensuelle notée pour le mois de Janvier. Ces valeurs tombent au dessous de 30% pour les mois les plus chauds entre Mai et Août, jusqu'à atteindre une moyenne annuelle de 21,5% en Juillet.

La courbe des Humidités relatives suit dans les grandes lignes, celle des précipitations, la chute des Humidités pour les mois les plus chauds (Juin, Juillet et Août) correspondant à celle des précipitations. La remontée de ces dernières correspond aussi à la remontée des humidités, mais elle ne suit pas parfaitement la courbe des précipitations, étant donné la grande irrégularité de celle-ci.

5.4.5 Vent

Cet élément est défini par deux paramètres : Sa vitesse moyenne et sa direction. L'échelle de beaufort de 1806, basée essentiellement sur l'observation est utilisée jusqu'à ce jour. Elle explique les caractéristiques du vent suivant sa vitesse, voir tableau ci-dessous.

| Vitesse du Vent | | Caractéristique 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 et 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 pédestre très difficile et dangereuse. |
| 9 | 17-20 | Risque d'être violemment projeté à terre. |

Tableau5.3 : Echelle de Beaufort. Source : LAVIGNE, 1994.

Les vents à Hassi Messaoud varient entre 2,8 et 4,5 m/s, avec une moyenne annuelle de 3,30m/s. C'est un vent considéré comme moyen à faible, de force 3 d'après l'échelle de beaufort (feuilles et petits rameaux en mouvement permanent, le vent déploie pleinement les drapeaux, les cheveux sont dérangés, les vêtements amples battent au vent)

On peut utiliser le vent comme moyen de rafraîchissement passif des espaces intérieurs durant la nuit. Pendant le jour, le vent est souvent chaud et chargé de sable, donc on doit se protéger contre cet élément incontrôlable.

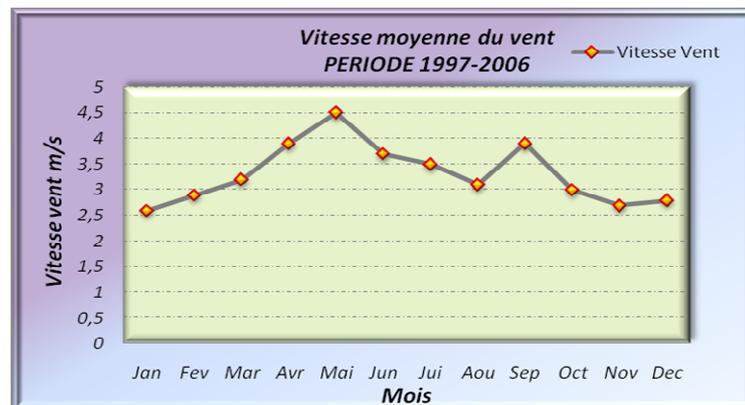


Figure 5.112 : Diagramme de la Vitesse moyenne du Vent

5.4.6 Fréquence des vents de la ville de Hassi Messaoud

La répartition fréquentielle du vent sur 08 directions et avec une vitesse supérieure à 5m / s nous donne pour la station de Hassi Messaoud la répartition suivante (figure 5.6). Le pourcentage global pour la direction Nord-est égal à 19.1% (période 1997-2006).

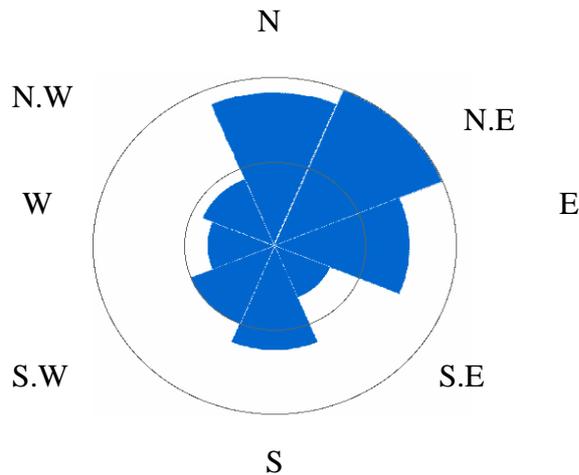


Figure 5.113 : Rose des vents, période 1997-2006)

5.4.7 Chasse sable

Le nombre de jours moyen par mois d'occurrence de chasse sable à Hassi Messaoud est résumé dans le tableau 5.4

| Paramètres climatiques | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| Nombre de jour moyen d'occurrence de chasse sable | | | | | | | | | | | | |
| Période : 1996-2005 | | | | | | | | | | | | |
| Station de Hassi Messaoud | | | | | | | | | | | | |
| J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Annuel |
| 2.1 | 2.9 | 5.2 | 8.2 | 8.0 | 4.7 | 4.0 | 2.7 | 5.3 | 2.8 | 3.2 | 1.9 | 51.0 |

Tableau 5.4 : Nombre de jour moyen d'occurrence de chasse sable

D'après ces données nous pouvons déduire que la période de chasse de sable est Avril et mai (Wilaya de Ouargla 2005)

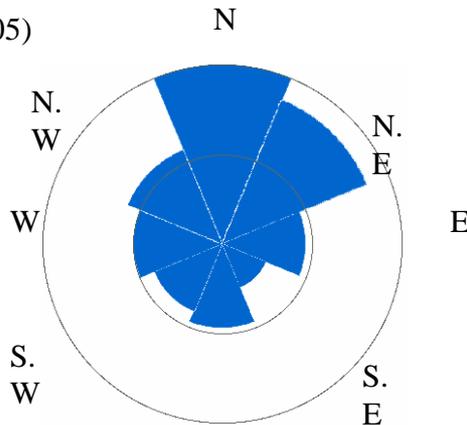


Figure 5.114 : Rose de Chasse Sable

5.4.8 Précipitations

Les précipitations sont produites par le phénomène de condensation de l'air dans les couches supérieures de l'atmosphère, sous forme de nuages contenant des gouttelettes d'eau,

l'air s'élevant de plus en plus haut, le poids des gouttelettes augmente provoquant ainsi la chute de pluies ou de neiges. (GIVONI 1978).

Les précipitations sont influencées notamment par les mouvements des vents et les changements de régime des températures. Elles sont considérées comme un élément déterminant dans la classification des climats.

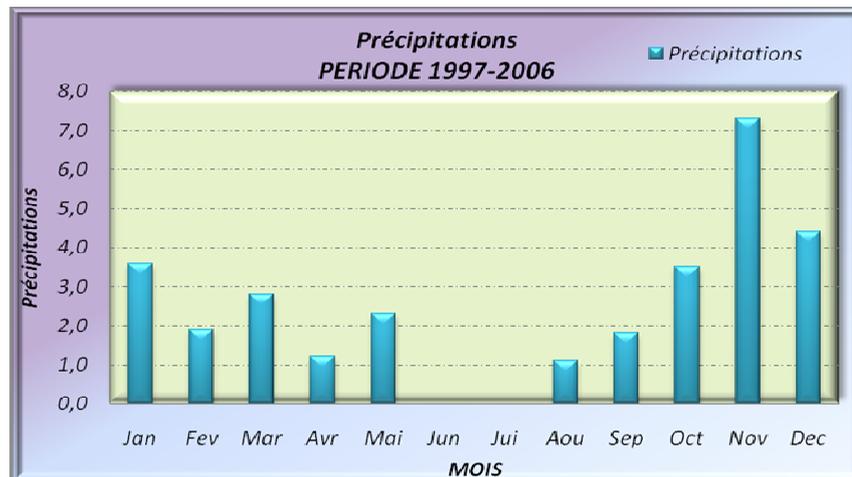


Figure 5.115 : Précipitations

La courbe oscille d'une manière irrégulière. Le mois de Novembre est considéré comme le plus pluvieux où le taux de précipitation atteint les 7,3 mm par contre la période sèche correspond aux humidités les plus faibles et les températures les plus élevées (Juin, Juillet et Aout).

5.4.9 Calcul de l'indice d'aridité de MARTONE

$$I_m = P / (T + 10)$$

I_m: indice d'aridité.

P : précipitations annuelles.

T : température moyenne annuelle.

$$I_m = 25,0 / (23,7 + 10) = 0,74$$

$$I_m = 0,74 \text{ donc } I_m < 05$$

Donc le climat de Hassi Messaoud à travers les données est un climat hyper aride. Il se caractérise par :

- Hautes intensités des radiations solaires
- Température d'air diurne très élevée
- Contraste entre les températures diurnes et nocturnes du fait de la clarté du ciel et les vents frais aux quels ces zones sont souvent sujettes

-
- Basse humidité et faibles précipitations
 - Vent de sable entraînant un environnement poussiéreux.

Ces différentes caractéristiques climatiques se manifestent comme source d'inconfort pour les habitants de ces régions.

5.4.10 Conclusion de l'étude climatique

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

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

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

Le climat de la ville de Hassi Messaoud peut être identifié selon des aspects qualitatifs mais peut être apprécié grâce à des données quantitatives à l'orientation de la construction, différents facteurs influents sur son climat

La région de Hassi Messaoud à un climat aride, elle se caractérise par une température très élevée et une humidité très basse pendant l'été et des tempêtes de sable le printemps.

La belle saison chaude mais sans excès, ne connaît par contre que de rares pluies, des températures agréables allongent la saison d'hiver et le début du printemps avec des variations mensuelles de 11°C à 18°C.

Les pluies rares se manifestent essentiellement en hiver avec de faibles quantités.

La hauteur annuelle moyenne de 2,52mm (à Hassi Messaoud) fait de cette région une des régions les peu arrosées.

D'après cette analyse il se révèle que le climat de Hassi Messaoud est :

Très aride durant toute l'année, des températures élevées, un écart de température diurne très considérable durant toute l'année.

En plus de ce facteur naturel, il apparait que la ville subit les conséquences des torches des puits de pétrole ainsi que ceux des deux raffineries existantes à Hassi Messaoud. Ce qui aggrave la situation climatique de cette ville particulière qui en dehors des bases de vie

pétrolières est vide de tout espace vert et oasis qui pourrait créer un micro climat et diminuait de cette chaleur.

5.5 Analyse bioclimatique de la ville de Hassi Messaoud

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

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

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

Pour l'analyse bioclimatique de la ville de Hassi Messaoud les méthodes des diagrammes bioclimatiques ont été choisies, elles reposent essentiellement sur l'analyse des données climatiques de la ville de Hassi Messaoud en exploitant les tableaux de Mahoney, les diagrammes psychrométriques de Givoni et notamment de Steve Szockolay pour ressortir enfin avec des recommandations conformes au climat de la région.

5.5.1 Application de la méthode de mahoney

D'après l'application de la méthode de Mahoney sur la ville de Hassi Messaoud sous la latitude 31°40' Nord, on aboutit à un certain nombre de recommandations variant du général (implantation – plan de masse - orientation...), jusqu'au détail (dimension des ouvertures...) :

❖ Recommandations générales:

- Plan et tissu compact (figure 5.9).
- Orientation Nord – Sud (axe long Est – Ouest) (figure 5.10).
- Ouvertures de taille moyenne (figure 5.12).
- Murs extérieurs et intérieurs épais (inertie importante, avec un déphasage dépassant les 8h tel que la pierre...) (figure 5.12).
- Toits lourds (plus de 8h de temps de déphasage) (figure 5.12).
- Aménager des espaces extérieurs pour dormir le soir (figure 5.13).

❖ **Recommandations Détaillées:**

- Déphasage des murs extérieurs et des toits supérieur à 8h (figure 5.12)
- Taille moyenne des ouvertures 25 - 40% (figure 5.12).

L'analyse bioclimatique à travers la méthode de Mahonay a fait sortir des recommandations qui pourront être adoptés dans les projets d'architecture dans le climat de Hassi Messaoud (froid et sec / chaud et aride).

Un plan compact avec patio et recommandé, avec de petites ouvertures. La protection des ouvertures contre l'ensoleillement direct est un élément important étant donné la longueur de la saison chaude (ceci sans autant priver les mois les plus frais de la chaleur solaire nécessaire).

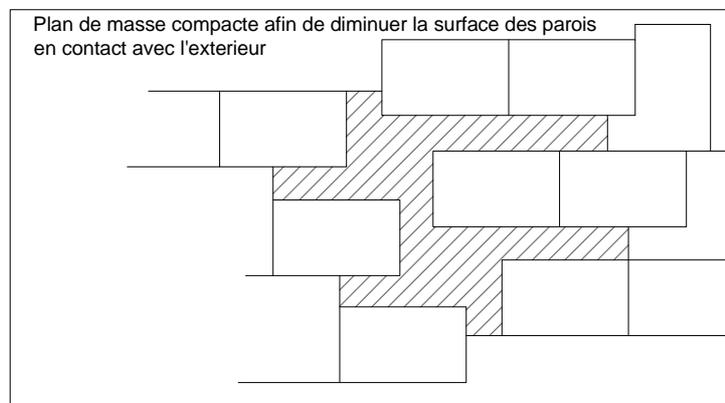


Figure 5.116 : Recommandations Mahoney Plan de masse

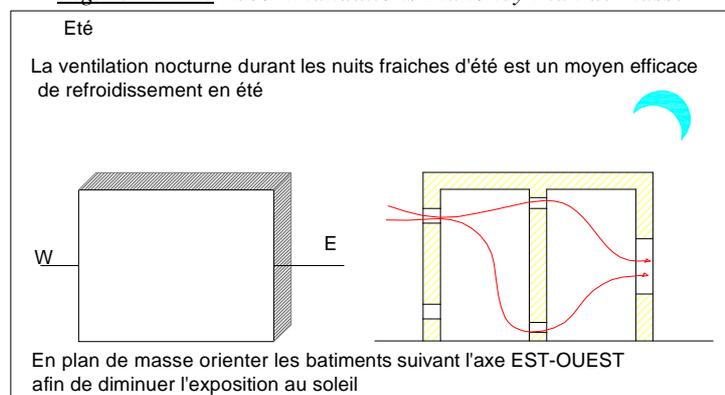


Figure 5.117 : Recommandations Mahoney Orientation et Ventilation

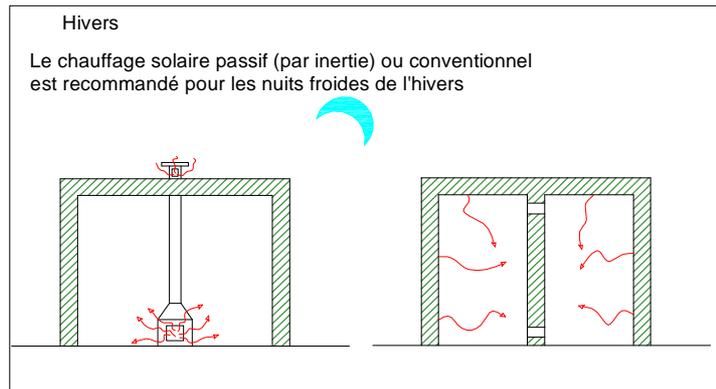


Figure 5.118 : Recommandations Mahoney Chauffage

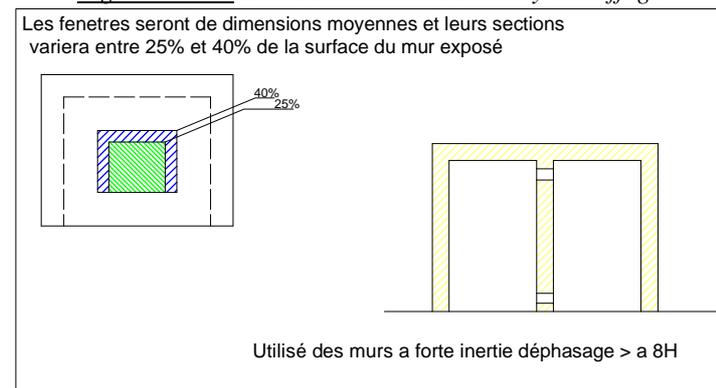


Figure 5.119 : Recommandations Mahoney Sections des Ouvertures et inertie des parois

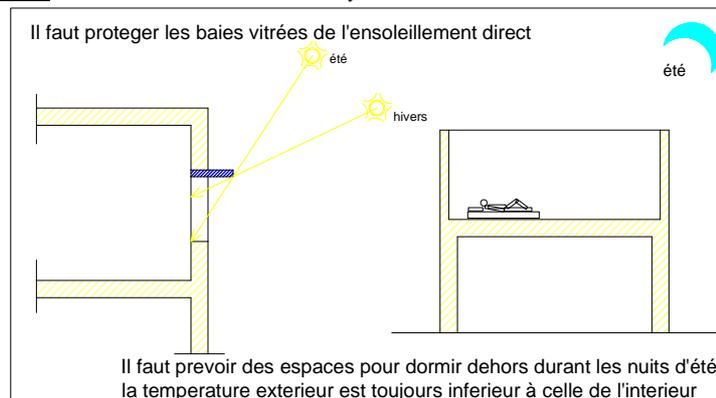


Figure 5.120 : Recommandations Mahoney Protection des ouvertures

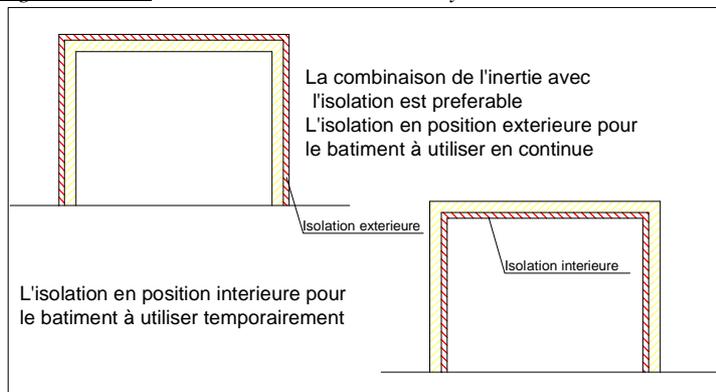


Figure 5.121 : Recommandations Mahoney Position de l'isolation

TABLE 1

| | |
|-----------|----------------|
| Location | HASSI MESSAOUD |
| Longitude | 06°09 E |
| Latitude | 31°40' |
| Altitude | 142m |

Air Temperature : °C

| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | High | AMT |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Monthly mean max | 17,7 | 20,4 | 25,9 | 30,4 | 35,7 | 40,9 | 43,4 | 42,4 | 37,6 | 31,8 | 23,4 | 19,3 | 43,4 | 23,70 |
| Monthly mean min | 4,9 | 6,7 | 11,6 | 15,8 | 20,5 | 25,4 | 28,2 | 27,8 | 23,9 | 18,7 | 11,3 | 6,7 | 4,9 | 19,25 |
| Monthly mean range | 11,1 | 13,4 | 17,7 | 23,1 | 28,2 | 33,1 | 36,0 | 35,2 | 31,3 | 25,3 | 17,4 | 12,6 | Low | AMR |

Relative humidity %

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Monthly mean max.a.m | 86,5 | 81,5 | 67,8 | 63,5 | 55,6 | 49,5 | 45,6 | 53,9 | 62,3 | 72,9 | 81,7 | 84,2 |
| Monthly mean min.p.m | 27,5 | 21,0 | 16,9 | 15,2 | 13,9 | 12,0 | 11,4 | 13,5 | 17,2 | 19,9 | 27,8 | 33,4 |
| Average | 54,1 | 49,1 | 37,6 | 33,2 | 29,0 | 23,9 | 21,5 | 26,2 | 35,5 | 45,5 | 52,9 | 61,7 |
| Humidity group | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |

| | | | |
|-----------------|---|----------------------|-----------|
| Humidity group: | 1 | if average RH: below | 30% |
| | 2 | | 30-50% |
| | 3 | | 50-70% |
| | 4 | | above 70% |

Rain and wind

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|
| Rainfall mm | 3,6 | 1,9 | 2,8 | 1,2 | 2,3 | 0,0 | 0,0 | 1,1 | 1,8 | 3,5 | 7,3 | 4,4 | 29,9 | Total |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|

| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Wind prevailing | | | | | | | | | | | | |
| Wind secondary | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,9 | 4,5 | 3,7 | 3,5 | 3,1 | 3,9 | 3,0 | 2,7 | 2,8 |

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|---------------|-------|-------------|-------|----------------|-------|-------|
| Comfort limits Humidity group: | 1 | AMT over 20°C | | AMT 15-20°C | | AMT below 15°C | | |
| | | Day | Night | Day | Night | Day | Night | |
| | | 26-34 | 17-25 | 23-32 | 14-23 | 21-30 | 12-21 | |
| | | 2 | 25-31 | 17-24 | 22-30 | 14-22 | 20-27 | 12-20 |
| | | 3 | 23-29 | 17-23 | 21-28 | 14-21 | 19-26 | 12-19 |
| 4 | 22-27 | 17-21 | 20-25 | 14-20 | 18-24 | 12-18 | | |

TABLE 2
DIAGNOSIS: °C

| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | AMT |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Monthly mean max | 17,7 | 20,4 | 25,9 | 30,4 | 35,7 | 40,9 | 43,4 | 42,4 | 37,6 | 31,8 | 23,4 | 19,3 | 23,70 |
| Day comfort: upper | 29 | 31 | 31 | 31 | 34 | 34 | 34 | 34 | 31 | 31 | 29 | 29 | |
| Lower | 23 | 25 | 25 | 25 | 26 | 26 | 26 | 26 | 25 | 25 | 23 | 23 | |
| Monthly mean min | 4,9 | 6,7 | 11,6 | 15,8 | 20,5 | 25,4 | 28,2 | 27,8 | 23,9 | 18,7 | 11,3 | 6,7 | |
| Night comfort: upper | 23 | 24 | 24 | 24 | 25 | 25 | 25 | 25 | 24 | 24 | 23 | 23 | |
| Lower | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | |
| Thermal stress: day | C | C | O | O | H | H | H | H | H | H | O | C | |
| Night | C | C | C | C | O | H | H | H | H | O | C | C | |

Indicators

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Humid: H1 totals | | | | | | | | | | | | | 0 |
| H2 | | | | | | | | | | | | | 0 |
| H3 | | | | | | | | | | | | | 0 |
| Aride: A1 | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | 12 |
| A2 | | | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | | | 8 |
| A3 | √ | √ | | | | | | | | | | √ | 3 |

Applicable when

| Meaning | Indicator | Thermal stress | | rainfall | Humidity group | Monthly mean range |
|-----------------------------|-----------|----------------|-------|------------|----------------|--------------------|
| | | Day | Night | | | |
| Air movement essential | H1 | H | | | 4 | Less than 10°C |
| | | H | | | 2,3 | |
| Air movement desirable | H2 | O | | | 4 | |
| Rain protection necessary | H3 | | | Over 200mm | | |
| Thermal capacity necessary | A1 | | | | 1,2,3 | More than 10°C |
| Out door sleeping desirable | A2 | H | | | 1,2 | More than 10°C |
| | | H | O | | 1,2 | |
| Protection from cold | A3 | C | | | | |

TABLE 3
RECOMMENDED SPECIFICATIONS

| Indicator totals from table 2 | | | | | |
|-------------------------------|----|----|----|----|----|
| H1 | H2 | H3 | A1 | A2 | A3 |
| 0 | 0 | 0 | 12 | 8 | 3 |

Layout

| | | | | | | |
|--|--|-------|------|---|---|---|
| | | 0-10 | | | 1 | Orientation north and south (long axis east-west) |
| | | 11,12 | 5-12 | | | |
| | | | 0-4 | √ | 2 | Compact courtyard planning |

Spacing

| | | | | | | | |
|-------|--|--|--|--|---|---|--|
| 11,12 | | | | | | 3 | Open spacing for breeze penetration |
| 2-10 | | | | | | 4 | As 3.but protection from hot and cold wind |
| 0,1 | | | | | √ | 5 | Compact lay-out of estaes |

Air movement

| | | | | | | | |
|------|------|--|------|--|---|---|---|
| 3-12 | | | | | | 6 | Rooms single banked, permanent provision air movement |
| 1,2 | | | 0-5 | | | | |
| | | | 6-12 | | | | 7 |
| 0 | 2-12 | | | | | | |
| | 0,1 | | | | √ | 8 | No air movement requirement |

Openings

| | | | | | | | | |
|----------------------|--|--|-------|--|-----|---|----|----------------------------|
| | | | 0,1 | | 0 | | 9 | Large openings 40-80% |
| | | | 11,12 | | 0,1 | | 10 | Very small openings 10-20% |
| Any other conditions | | | | | | √ | 11 | Medium openings 20-40% |

Walls

| | | | | | | | | |
|--|--|--|------|--|--|---|----|-----------------------------------|
| | | | 0-2 | | | | 12 | Light walls, short time-lag |
| | | | 3-12 | | | √ | 13 | Heavy external and internal walls |

Roofs

| | | | | | | | | |
|--|--|--|------|--|--|---|----|-------------------------------|
| | | | 0-5 | | | | 14 | Light, insulated roofs |
| | | | 6-12 | | | √ | 15 | Heavy roofs, over 8h time-lag |

Out –door sleeping

| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|------|--|---|----|--------------------------------------|
| | | | | 2-12 | | √ | 16 | Space for out-door sleeping required |
|--|--|--|--|------|--|---|----|--------------------------------------|

Rain protection

| | | | | | | | | |
|--|--|-------|--|--|--|--|----|--------------------------------------|
| | | 3- 12 | | | | | 17 | Protection from heavy rain necessary |
|--|--|-------|--|--|--|--|----|--------------------------------------|

TABLE 4
DETAIL RECOMMENDATIONS

| Indicator totals from table 2 | | | | | |
|-------------------------------|----|----|----|----|----|
| H1 | H2 | H3 | A1 | A2 | A3 |
| 0 | 0 | 0 | 12 | 8 | 3 |

Size of opening

| | | | | | | | | |
|--|--|--|-------|------|---|---|-------------|--------|
| | | | 0,1 | 0 | | 1 | Large: | 40-80% |
| | | | | 1-12 | | | | |
| | | | 2-5 | | | 2 | Medium: | 25-40% |
| | | | 6-10 | | | 3 | Small: | 15-25% |
| | | | | 0-3 | | 4 | Very small: | 10-20% |
| | | | 11,12 | 4-12 | √ | 5 | Medium: | 25-40% |

Position of openings

| | | | | | | | |
|------|------|--|------|--|---|---|--|
| 3-12 | | | | | | 6 | In north and south walls at body height on windward side |
| | | | 0-5 | | | | |
| | | | 6-12 | | √ | | |
| 0 | 2-12 | | | | | 7 | As above, openings also in internal walls |

Protection of openings

| | | | | | | | |
|--|--|------|--|-----|--|---|------------------------------|
| | | | | 0-2 | | 8 | Exclude direct sunlight |
| | | 2-12 | | | | 9 | Provide protection from rain |

Walls and floors

| | | | | | | | |
|--|--|--|------|--|---|----|-----------------------------|
| | | | 0-2 | | | 10 | Light, low thermal capacity |
| | | | 3-12 | | √ | 11 | Heavy, over 8h time-lag |

Roofs

| | | | | | | | |
|-------|--|--|------|--|---|----|-----------------------------------|
| 10-12 | | | 0-2 | | | 12 | Light, reflective surface, cavity |
| | | | 3-12 | | | | |
| | | | 0-5 | | | 13 | Light, well insulated |
| 0,9 | | | 6-12 | | √ | 14 | Heavy, over 8h time-lag |

External features

| | | | | | | | | |
|--|--|------|--|------|--|---|----|-----------------------------|
| | | | | 1-12 | | √ | 15 | Space for out-door sleeping |
| | | 1-12 | | | | | 16 | Adequate rainwater drainage |

5.5.2 Application de la méthode de GIVONI

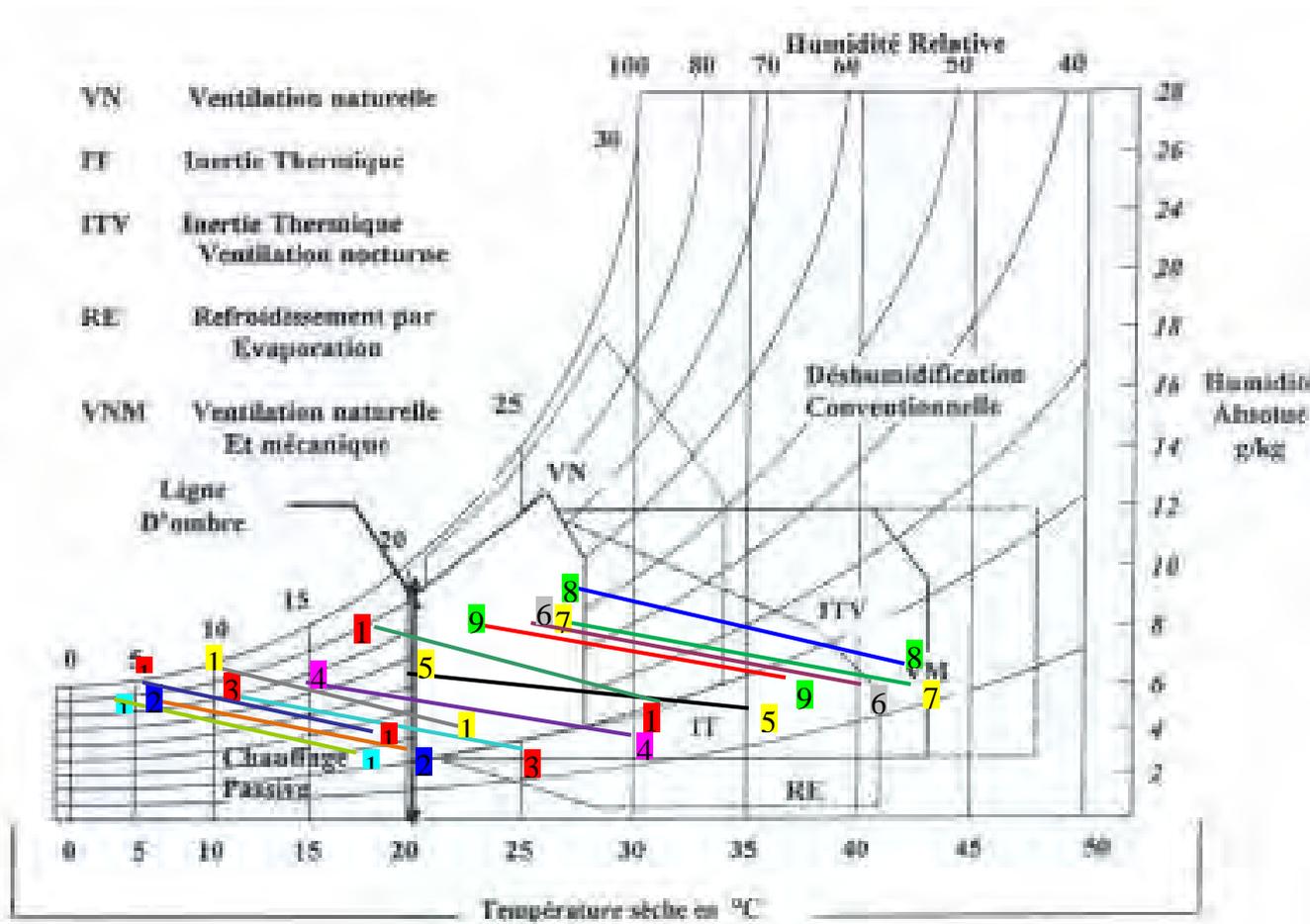


Figure 5.122 : Diagramme psychrométrique de GIVONI avec application sur la ville de Hassi Messaoud.

Le diagramme psychrométrique de Givoni consiste à évaluer les exigences physiologiques du confort, à partir desquelles, les grandes lignes de la conception du bâtiment sont déterminées et permettent de garantir ce confort; Givoni a établi des zones d'intervention obtenues en fonction des données climatiques de chaque mois.

D'après le diagramme de Givoni on remarque que :

- La majeure partie des mois d'Avril et Octobre ainsi que le 1/3 du mois de Mai sont situés dans la zone confort.
- La totalité des mois de janvier, février, mars, novembre et décembre sont situés dans la zone du chauffage solaire passif. Le confort ne pourra être atteint que lorsque les radiations solaires pour le chauffage passif sont déployées avec l'aide d'un chauffage actif et surtout pour les mois de Décembre et Janvier
- Les mois les plus chauds et secs s'étalent des 2/3 du mois de Mai ainsi que les mois de Juin à Septembre, pour cela le contrôle solaire, l'effet de masse thermique (inertie thermique), et surtout un rafraichissement évaporatif et une ventilation nocturne sont les stratégies recommandées pour cette période afin de réintégrer le confort d'été.

5.5.3 Application de la méthode de STEEVE SZOCKOLAY

Détermination des zones de confort pour la ville de HASSI MESSAOUD selon la méthode de Steeve SZOCKOLAY.

a) Détermination de la température neutre :

Etablir la température moyenne annuelle :

$$T_m = \Sigma t_m / 12 = 284,40 / 12 = 23,70^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_m = 23,70^\circ\text{C}}$$

La température neutre sera :

$$T_n = 17,6 + (0,31 \times T_m) = 24,95^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_n = 24,95^\circ\text{C}}$$

Porter sur le graphe le point neutre à l'intersection de T_n et la ligne représentant 50% d'humidité relative.

b) Détermination de la Zone confort :

Cette zone est délimitée par les points : 1, 2, 3 et 4

La température du point 1 sera :

$$T_1 = T_n + (A_{hn} - 12) \times 0,025 \times (T_n - 14) - 2$$

Ou A_{hn} représente l'humidité absolue du point de neutralité.

$$\mathbf{T_1 = 22,40^\circ\text{C}}$$

$$T2 = T1 + 4$$

$$\mathbf{T2 = 26,40^{\circ}\text{C}}$$

$$T3 = T1 + 0,2 \times (T1 - 14)$$

$$\mathbf{T3 = 24,08^{\circ}\text{C}}$$

$$T4 = T2 + 0,2 \times (T2 - 14)$$

$$\mathbf{T4 = 28,88^{\circ}\text{C}}$$

Les points 1 et 2 correspondront à celle de 12g/kg.

Les points 3 et 4 correspondront à celle de 04g/kg.

c) Détermination de la zone de contrôle potentiel pour les périodes froides :

- Zone de chauffage solaire passif :

$$T5 = Tn + 0,36 - 0,0025 \times Hv$$

Ou Hv = moyenne journalière totale d'irradiation solaires en wh/m^2 d'une surface verticale sud pour le mois le plus froid donc : $T5 = 24,95 + 0,36 - 0,0025 \times 5724 = 10,98^{\circ}\text{C}$

$$\mathbf{T5 = 11,00^{\circ}\text{C}}$$

Le point % correspond à la ligne de saturation $HB = 100\%$

d) Détermination de la zone de contrôle potentiel pour les périodes chaudes :

- Zone d'effet de masse :

Détermination de la variation moyenne de température pour le mois le plus chaud :

$$dTm = T_{\text{moy.max}} - T_{\text{moy.min}} = 43,40 - 4,90 = 38,50^{\circ}\text{C} \quad \mathbf{dTm = 38,50^{\circ}\text{C}}$$

Cette zone est délimitée par les points 6,7 et 8.

$$T6 = T2 + 0,5 \times dTm = 45,65^{\circ}\text{C}$$

$$\mathbf{T6 = 45,65^{\circ}\text{C}}$$

Le point 6 correspond à la ligne d'humidité absolue 12g/kg.

$$T7 = T6 - 0,05 \times (T6 - 14) = 44,07^{\circ}\text{C}$$

$$\mathbf{T7 = 44,07^{\circ}\text{C}}$$

Le point 7 correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

$$T8 = T6 + 0,2 \times (T6 - 14) = 51,98^{\circ}\text{C}$$

$$\mathbf{T8 = 51,98^{\circ}\text{C}}$$

Le point 8 correspond à la ligne 04g/kg d'humidité absolue.

La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'HR du point 1.

- Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne :

Cette zone est délimitée par les points 9,10 et 11.

$$T9 = T2 + 0,8 \times (dTm) = 57,20^{\circ}\text{C}$$

$$\mathbf{T9 = 57,20^{\circ}\text{C}}$$

Le point 9 correspond à la ligne 12g/kg d'humidité absolue.

$$T_{10} = T_9 - 0,05(T_9 - 14) = 55,04^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_{10} = 55,04^\circ\text{C}}$$

Le point 10 correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

$$T_{11} = T_9 + 0,2(T_9 - 14) = 65,84^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_{11} = 65,84^\circ\text{C}}$$

Le point 11 correspond à la ligne 04g/kg d'humidité absolue.

- Zone de ventilation naturelle :

Cette zone dépend de la vitesse de l'air.

$$\text{Pour } 1 \text{ m/s : } T_{12} = T_2 + 5$$

$$\text{Pour } 1,5 \text{ m/s : } T_{12} = T_2 + 6,5 = 32,90^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_{12} = 32,90^\circ\text{C}}$$

Le point 12 correspond à la ligne 12g/kg d'humidité absolue.

$$\text{Pour } 1 \text{ m/s : } T_{13} = T_{12} + 0,1(T_{12} - 14)$$

$$\text{Pour } 1,5 \text{ m/s : } T_{13} = T_{12} + 0,1(T_{12} - 14) = 34,79^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_{13} = 34,79^\circ\text{C}}$$

Le point 13 correspond à la ligne 04g/kg d'humidité absolue.

$$T_{14} = T_1 = 22,40^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_{14} = 22,40^\circ\text{C}}$$

Le point 14 sera localisé sur la courbe de 90% d'humidité relative.

$$T_{15} = T_{12} - 0,18(T_{12} - 14) = 29,50^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_{15} = 29,50^\circ\text{C}}$$

Le point 15 sera localisé sur la courbe de 90% d'humidité relative.

- Zone de refroidissement évaporatif direct :

La température limite la plus élevée est :

$$T_{16} = T_n + 12 = 36,95^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_{16} = 36,95^\circ\text{C}}$$

Les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracées à partir des lignes de températures humides des points 2 et 3.

- Zone de refroidissement évaporatif indirect :

La température limite la plus haute est :

$$T_{17} = T_n + 15 = 39,95^\circ\text{C}.$$

$$\mathbf{T_{17} = 39,95^\circ\text{C}}$$

La limite supérieure de cette zone correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

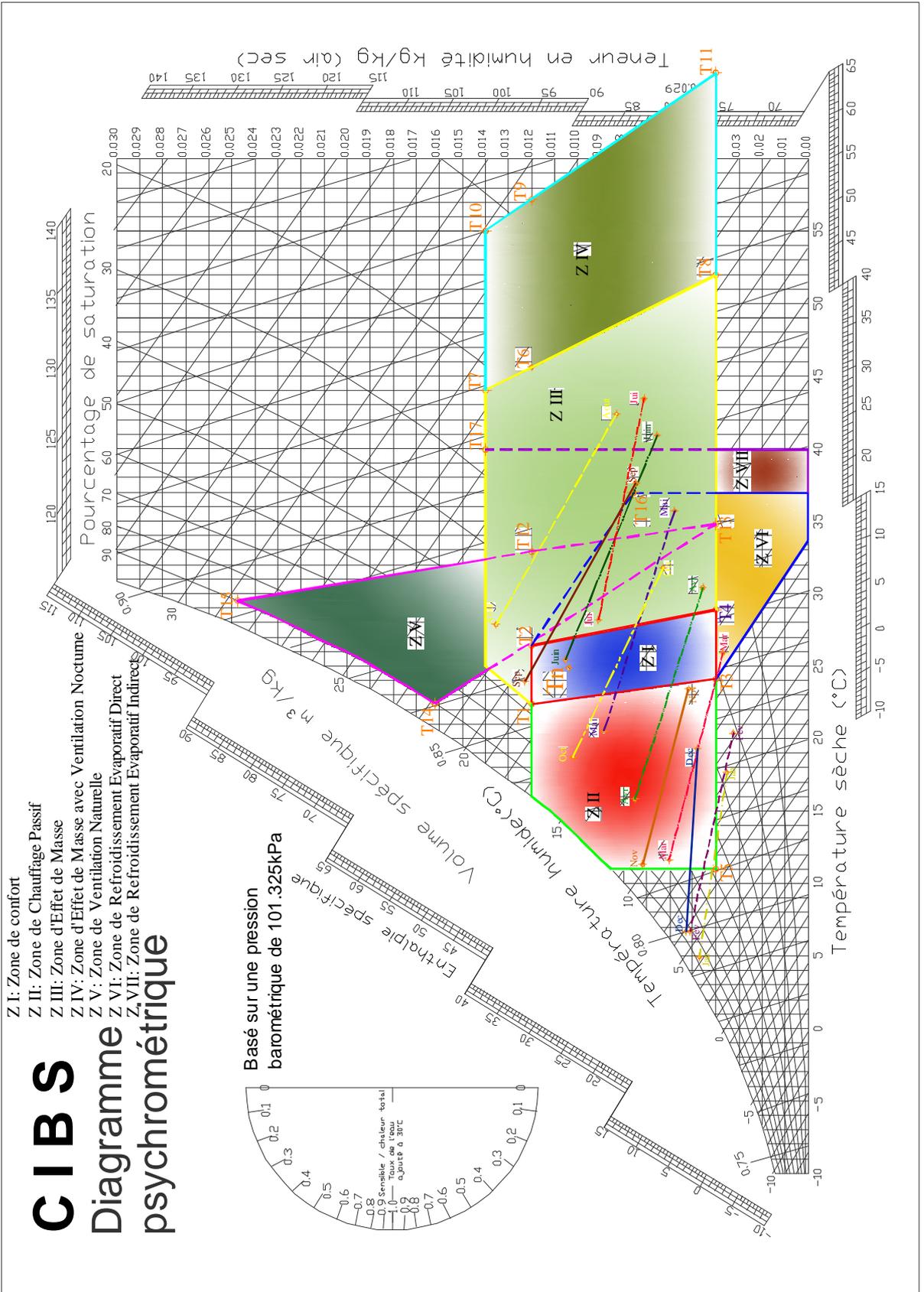


Figure 5.123 : Diagramme de SZOCKOLAY

La méthode de Szockolay consiste à établir la zone neutre en plus des différentes zones selon les données climatiques propres à chaque région. Tout en s'inspirant des travaux de ses prédécesseurs ; OLGYAY et GIVONI, SZOCKOLAY a voulu intégrer les données climatiques comme faisant partie intégrante de la conception architecturale.

Plus spécifique que le diagramme de GIVONI, la méthode de SZOCKOLAY permet de déterminer les différentes zones qui composent le diagramme avec les données climatiques spécifiques aux régions concernées.

En localisant une zone de confort on détermine les limites au delà des quelles, des moyens passifs ou actifs doivent être mis en œuvre pour réintégrer le confort nécessaire à l'utilisateur.

Après avoir reporté les différents mois sur le diagramme, chaque mois étant représenté par une ligne donnée par deux coordonnées (Tmin-Hrmax / Tmax-Hrmin); Les recommandations obtenues par cette représentation sont :

- La majeure partie de l'année se situe en dehors de la zone de confort.
- Une petite partie de la saison d'hiver se situe dans la zone de chauffage actif (mécanique) ; Il s'agit d'une partie des mois de Décembre, Janvier et Février. La majeure partie de ces mois se situe dans la zone de chauffage solaire passif (favoriser donc le chauffage par l'ensoleillement, une bonne pénétration du soleil en hiver est recommandée), utiliser les matériaux appropriés (agir sur les parois).
- La chaleur captée le jour, peut être ainsi restituée la nuit grâce à la masse thermique, car durant cette saison les températures nocturnes sont très froides.
- Les mois de Mars et Novembre se situent dans la zone de chauffage solaire passif.
- Une partie du mois d'Avril (40%) se situe dans la zone de confort, la grande partie dans la zone de chauffage solaire passif soit 50%. La partie restante se situe dans la zone de refroidissement évaporatif.
- Les mois de Mai et Octobre traversent trois zones : celle du chauffage solaire passif, celle du confort et enfin, celle du rafraîchissement passif : effet de masse (l'épaisseur des murs et les matériaux utilisés peuvent donner un déphasage assez important qui aide à garder la fraîcheur nocturne à l'intérieur des constructions et à ralentir la pénétration de la chaleur du jour). Ventilation naturelle, effet de masse avec ventilation nocturne, refroidissement évaporatif direct sont atteints par : (en s'évaporant, l'eau rafraîchit l'air et l'humidifie : fontaine, matériaux poreux en contact avec l'eau, végétation...).

-
- Les mois de juin et septembre ont une petite partie dans la zone de confort soit 10%, la majorité des mois de Juin et Septembre soit 90% et la totalité des mois de Juillet et Août se situe dans la zone de refroidissement passif : Ventilation naturelle, effet de masse, effet de masse avec ventilation nocturne, refroidissement évaporatif direct et indirect.
 - Une petite partie de Juillet et d’Août (les plus chauds de l’année) se situe dans la zone de refroidissement actif est nécessite donc une climatisation artificielle.

On constate que l’année peut se diviser en trois zones de contrôle, une très petite partie entre dans la zone de confort (surtout : Septembre, Octobre, Avril et Mai), une autre nécessitant essentiellement un chauffage passif et une autre qui connaît une surchauffe importante et une autre qui connaît une surchauffe et qui nécessite en grande partie un rafraîchissement évaporatif passif mais aussi pour une partie des mois les plus chauds, (Juin, Juillet et Août) un refroidissement actif (climatisation).

En comparant le diagramme de Szockolay avec celui de Givoni, on remarque qu’il y a un certain décalage dans les zones.

On se réfère alors au diagramme de Szockolay qui est plus précis et adapté pour chaque climat tandis que le diagramme de Givoni ne prend pas en considération les données climatiques spécifiques à chaque région, car la zone de confort est standard et les zones de contrôle sont déjà tracées. Alors que dans le diagramme de Steeve Szockolay toutes les zones sont déterminées à la base des données climatique de chaque région.

5.5.4 Conclusion de l’analyse bioclimatique

La Ville de Hassi Messaoud se caractérise par un climat chaud et aride. La sécheresse est une donnée généralisée sur tout les mois de l’année. Les fortes chaleurs concernent certes une grande partie de l’année, mais il n’en demeure pas moins que les besoins de chauffage en hivers, malgré qu’ils soient faibles, restent bien réels.

Ici le chauffage passif est recommandé, ceci sera atteint par une bonne pénétration du rayonnement solaire, le choix rigoureux des matériaux, la compacité du tissu urbain pour limiter les déperditions. Pendant la saison chaude qui dure plus longtemps, les besoins en refroidissement sont beaucoup plus importants que les besoins de chauffage en hiver, (Privilégier donc cet aspect semble être une bonne option). Les mois de grandes chaleurs nécessitent un rafraîchissement passif : plan compact, effet de masse et inertie thermique, ventilation nocturne et refroidissement par évaporation.

Ces procédés sont indispensables pour parvenir aux conditions de confort à l'intérieur du bâtiment, surtout durant les mois de Juin, Juillet et Août qui sont les plus chauds de l'année. Pendant ces mois, les techniques passives ne suffisent pas à elles seules à maintenir une température de confort acceptable durant toute la journée, il faut donc faire appel à la climatisation d'appoint avec une architecture appropriée qui prendrait en considération les recommandations précédemment citées. On pourrait arriver à un gain d'énergie considérable en s'appuyant sur des procédés purement passifs, et avoir recours d'une façon raisonnable aux moyens actifs.

La tour à vent est un moyen de rafraîchissement évaporatif passif très utilisée dans les régions chaudes et arides à travers le monde. L'utilisation de ce moyen de rafraîchissement passif en Algérie aura sûrement des effets bénéfiques surtout le gain considérable en énergie et la réduction des émissions des gaz à effet de serre qui participe et engendre le changement climatique.

5.6 Organisation de l'expérimentation

Les mesures étaient faites sur la tour à vent réalisée à Hassi Messaoud. Elles concernaient deux paramètres climatiques qui sont : la température et l'humidité.

Les stations de mesures sont organisées comme suit :

- La station 1 : est la station qui se trouve à l'extérieur au niveau de la terrasse, devant la tête de la tour à vent. Posée sur une hauteur de 1,5m du sol, l'appareil de mesure est protégé des rayons solaires directs, elle permet de mesurer la température et l'humidité de l'air à son entrée par la tête de la tour à vent.
- La station 2 : est la station qui se trouve à l'intérieur du bureau du gérant, au niveau de la bouche de soufflage de la partie basse de la tour à vent, l'appareil est posé sur un rangement en bois qui se trouve au niveau de la bouche de soufflage.
- La station 3 (météo) : les températures et les humidités horaires de la station météo de la ville de Hassi Messaoud sont indispensables pour la vérification et la comparaison de ces données climatiques avec celles mesurées au niveau de la station 1.

Les travaux de réalisation de la tour étaient terminés à la fin du mois de Mars 2007, les campagnes de mesures ont été effectuées durant la période du mois de Mai au Mois d'Août 2007. Deux types d'expérimentations ont été réalisées, la première était sans humidification et la deuxième était avec humidification.

Elles consistent à mesurer les paramètres déjà cités à l'intérieur et l'extérieur du bureau, (au niveau de la tête, l'entrée de l'air et la base de la tour à vent, soufflage de l'air dans le bureau).

L'objectif consiste en :

- La comparaison des résultats obtenus à l'extérieur et l'intérieur à ceux donnés par la station météo en premier lieu, ensuite calculer l'écart entre les mêmes paramètres et les comparer aux résultats obtenus par simulation du modèle.
- La comparaison entre les résultats des campagnes de mesures avec et sans humidification, afin de vérifier l'impact et le rôle du système de rafraîchissement évaporatif sur la réduction de la température de l'air au soufflage et l'augmentation du taux d'humidification à l'intérieur du bureau.

Pendant l'expérimentation sans humidification, l'effet de la ventilation naturelle est provoqué par l'effet de tirage thermique dû à la différence de pression ou la différence de la température entre l'extérieur et l'intérieur à l'entrée et le soufflage de l'air par la tour à vent.

Dans l'expérimentation avec humidification, en plus, de cet effet de ventilation naturelle provoqué, l'air qui va circuler dans la tour à vent sera humidifié une fois par les parois des conduits puis par la surface humide (eau du bassin) une deuxième fois.

Donc, les mesures enregistrées durant les deux expérimentations seront comparées aux relevés des données climatiques de la station météo de Hassi Messaoud, pour déterminer la représentativité climatique des mesures de terrains et pour vérifier l'efficacité du système de rafraîchissement évaporatif.

5.7 Description des instruments de mesures

L'acquisition des données était faite à partir d'un certain nombre de matériel empreinté ou acquis, comme le thermo-hygromètre, qui mesure la température et l'humidité dans le même espace, une station météo et un thermomètre à double sondes.

5.7.1 Thermo-hygromètre

Le thermo-hygromètre sert à mesurer les données climatiques (température et humidité) intérieur ou extérieur (figure 5.17). Dans notre cas, il a été utilisé pour la prise des mesures à l'intérieur du bureau (bouche de soufflage ou sortie d'air) durant les mois de Mai. L'appareil était étalonné par les services météo de Hassi Messaoud. Il est muni de deux aiguilles qui inscrivent les températures et les humidités relatives, horaires de l'air (les valeurs inscrites sont respectivement en degré Celsius et pourcentage). Un cylindre sur lequel est enroulé un papier millimétré représentant sur la partie supérieure le tracé de température et sur la partie inférieure, le tracé de l'humidité. Il prévoit la prise continue et horaire pour une durée d'une semaine de la température de 0°C jusqu'à 70°C et de l'humidité de 0% à 100% (figure 5.18).



Figure 5.124 : thermo-hygromètre

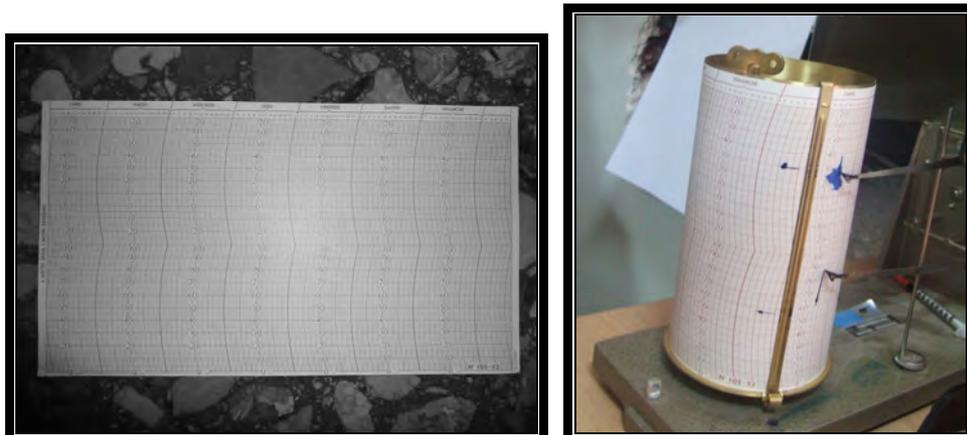


Figure 5.125 : Tracés de la température et de l'humidité relative de l'air

5.7.2 Thermomètre à double sondes

Le thermomètre à double sonde est un thermomètre électronique dont la précision est de $\pm 0,2$ °C (figure 5.19) allant de -20°C à $+60^{\circ}\text{C}$. Il est équipé de deux sondes pour la mesure de la température. La première sonde est placée sur l'appareil, elle prend les mesures sur le lieu et dans l'environnement où est placé ce dernier. La deuxième sonde est placée au bout d'un fil électrique de 12 mètre de longueur, permettant ainsi la prise de mesure de température à l'entrée de l'air par la tête de la tour à vent. La lecture des deux températures se fait sur un écran digital affichant les deux températures ainsi le temps de mesure. L'inconvénient de cet appareil est qu'il n'est pas doté d'un système d'enregistrement, ce qui nous a obligé à mobilisé plusieurs personnes (ingénieurs travaillant à la société REBO) pour la prise de mesures horaires durant la période du mois de Mai au mois de Juin.

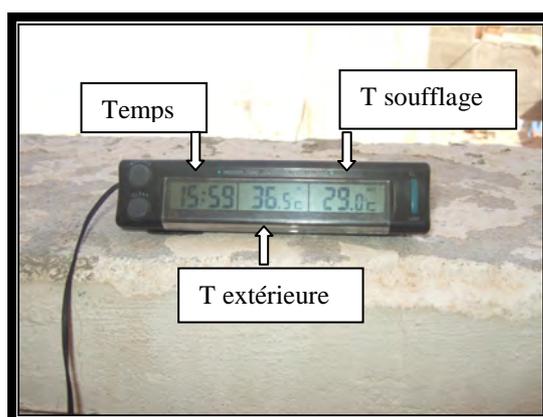


Figure 5.126 : Thermomètre à double sondes

5.7.3 Station météo SMV sans fil WMR928NX

La station météo (Wireless weather station with PC software model WMR928NX) (figure 5.20), nous permet de contrôler les paramètres climatiques suivants:

- Température de l'air,
- Humidité relative,
- Pression atmosphérique,
- Vitesse et direction du vent,
- Niveau de précipitations.

Elle est équipée de :

- Horloge calendrier radio piloté avec alarme quotidienne,
- Prévision météo dans un rayon de 32 à 48 km,
- Alarmes météo,
- Mémoire de relevés maximum et minimum,
- Ecran tactile simple,
- Port de connexion RS232,
- Logiciel pour PC,
- Câble série RS232.

La station est fournie avec les éléments suivants :

- Appareil principal (WMR928NX),
- Anémomètre (WGR918N),
- Thermo-hygromètre (THGR918N),
- Pluviomètre (PCR918N),
- Baro-thermo-hygromètre (BTHR918N),
- Transmetteurs solaires (STR928N),
- Transmetteurs solaires (STR938N),
- 03 sondes thermo-hygromètre.

La station a une portée de 100m sans interférences, pour la prise des températures, elle a une précision de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, les températures de fonctionnement conseillées sont entre -50°C et $+70^{\circ}\text{C}$, pour l'intérieur et l'extérieur. Pour la prise de l'humidité relative, elle à une précision de $\pm 1\%$ HR, le rayon de relevé (intérieur et extérieur) est de 2 à 98%.

Pour notre cas, nous avons utilisé l'appareil principal « WMR928NX » (figure 5.21) pour la récolte des données, le Thermo-hygromètre (THGR918N) (figure 5.22) pour les mesures des

températures et humidités à l'extérieur au niveau de la tête de la tour et le Baro-thermo-hygromètre (BTHR918N) (figure 5.23) pour les mesures des températures et humidités à l'intérieur au niveau de la bouche de soufflage de la tour. Pour plus de sécurité, les mesures horaires étaient relevées par les ingénieurs jour et nuit durant toute la période de mesure.

La station météo empruntée chez la société Belge MEDIATONE cocontractante avec la SONATRACH est l'appareil qui a été le plus utilisé pour la prise de mesures.



Figure 5.127 : Station météo



Figure 5.128 : Appareil principal « WMR928NX »



Figure 5.129 : Thermo-hygromètre (THGR918N)



Figure 5.130 : Baro-thermo-hygromètre (BTHR918N)

5.8 Facteurs climatiques mesurés

Il s'agit de mesurer dans cette expérimentation les facteurs climatiques ayant un impact sur le confort thermique et les comparer avec les résultats obtenus par la simulation du modèle faite par (Y. BOUCHAHM, 2003).

- La température de l'air en °C,
- L'humidité relative en %.

5.9 Durée de l'expérimentation

La durée de l'expérimentation est d'une semaine pour chaque type d'expérimentation (avec et sans humidification), durant la période du mois de Mai au mois d'Août.

5.10 Description de l'expérimentation

L'expérimentation était faite avec et sans humidification. Le but était de vérifier les performances thermiques et la capacité de refroidissement par :

- Le transfert de chaleur direct entre l'air et les parois des conduits,
- L'humidification des parois des conduits et la présence du bassin d'eau dans la partie basse de la tour à vent

Les températures et les humidités mesurées à l'intérieur et l'extérieur sont comparées dans les deux cas.

Les mesures sont faites de la façon suivante :

1. Le mois de Mai :

Par manque de moyens et vu l'indisponibilité des appareils de mesures (matériel acquis le 15/05/2007). Une seule série de tests a été faite. Une fois la bouche de soufflage complètement ouverte, le système d'humidification mis en fonction, les mesures des températures et humidités étaient entamées. La durée des mesures était de quatre (04) jours du 22 au 25 Mai 2007. Des relevés quotidiens des mêmes paramètres au niveau de la station météorologique étaient comparés aux résultats des mesures prises sur le site de la réalisation durant tous les mois de l'expérimentation.

2. Le mois de Juin :

Les résultats obtenus durant le mois de Mai, nous ont encouragés à poursuivre l'expérimentation et de chercher à obtenir un matériel plus performant et plus fiable.

Les mesures sans humidification étaient faites du 11 au 17 Juin 2007

Les mesures avec humidification étaient faites du 18 au 24 Juin 2007

3. Le mois de Juillet :

Les mesures ont été prises durant le mois de juillet par la station météo

Les mesures sans humidification étaient faites du 18 au 24 Juillet 2007

Les mesures avec humidification étaient faites du 25 au 31 Juillet 2007

4. Le mois d'Aout :

Les mesures sans humidification étaient faites du 08 au 14 Aout 2007

Les mesures avec humidification étaient faites du 01 au 07 Aout 2007

Conclusion

La connaissance des facteurs climatiques et leurs différentes combinaisons permettent de comprendre leur impact sur le confort humain et sur le comportement des éléments du bâtiment soumis à ces contraintes.

Le climat présente une vaste diversité à l'échelle mondiale. Ceci a engendré l'apparition de plusieurs méthodes de classification, répondant aux besoins des disciplines en relation avec le climat. En architecture, son influence sur le confort dans le bâtiment et à l'échelle urbaine nécessite l'identification des variables climatiques caractérisant la région étudiée.

Le confort c'est l'ambiance qui évite au corps de réagir aux conditions extérieures et d'économiser de l'énergie de son métabolisme.

Dans les régions chaudes et arides, l'architecture traditionnelle est un exemple vivant d'adaptation aux conditions climatiques. La recherche de l'ombre et de l'air frais sont des objectifs principaux de ces formes. L'adaptation des habitations aux conditions climatiques s'est résumée en :

- L'introversion vers la cours, l'exploitation des radiations solaires pour le chauffage passive d'hiver,
- L'utilisation de l'eau, du mouvement d'air, du vent et les radiations nocturnes pour le refroidissement,
- La capacité des murs épais de retarder la transmission de la chaleur,
- La migration journalière et saisonnière est un moyen de rechercher la chaleur en hiver et de la fraîcheur en été, forte adopter dans la plupart des régions chaudes et arides.

Connaitre le climat ou en va construire et déterminer les conditions de confort à l'intérieur des constructions dans cet environnement sont les premières étapes de l'architecture bioclimatique. En second lieu, choisir le système ou la combinaison de systèmes qui nous mènerons à l'obtention des conditions de confort.

Dans les climats chauds et arides, satisfaire l'objectif de rafraichissement évaporatif passif ou la prévention de surchauffe en bâtiment sous un tel climat est indispensable. La combinaison judicieuse des différentes techniques sous formes modernes est impérative, car la transposition aveugle des formes traditionnelles dans un contexte actuel implique le risque de l'inadaptation de celle-ci à l'architecture contemporaine.

Résultats et interprétation

Les mesures des températures et des humidités relatives présentées dans ce chapitre visent à analyser quantitativement, le comportement de la tour à vent vis-à-vis des conditions climatiques de la région de Hassi Messaoud et leurs impacts sur le confort thermique et l'amélioration de la performance thermique de la construction.

L'analyse portera sur les résultats obtenus par la simulation à savoir un écart de température de 18°C entre l'extérieur (tête de la tour) et l'intérieur (bouche de soufflage) et une humidité de 60% pour les comparer aux résultats obtenus durant la période de mesure (du mois de Mai à Août) avec et sans humidification dans le cas de la tour à vent réalisée (greffée à la construction existante).

Vérifier la réponse thermique de la tour à vent réalisée et le pouvoir du système rafraichissant par évaporation dont la diminution de la température durant toute la période de mesure afin d'améliorer les conditions de confort recherchées dans cette région.

En fin évaluer le taux de refroidissement journalier et vérifier l'effet de la tour à vent sur la ventilation diurne et nocturne.

6. 1 Résultats et interprétations

Les mesures étaient effectuées durant la période du mois de Mai au mois de Août, durant chaque mois, ces dernières étaient établies avec et sans humidification. La durée des mesures était d'une semaine pour chaque période.

La première journée de prise de mesures était le 21 Mai 2007. Cette journée n'a pas été prise en considération, parce qu'elle a connue l'ouverture de la bouche de soufflage à l'intérieur du bureau (figure 6.1), le nettoyage des conduits du mortier qui bouchait quelques conduits et la récupération du coffrage utilisé pour la réalisation de la partie centrale de la tour (figure 6.2).



Figure 6.131: Ouverture de la bouche de soufflage



Figure 6.132 : Nettoyage des conduits et récupération du coffrage

La mise en service du système d'humidification était l'étape suivante après l'ouverture de la bouche de soufflage, un arrosage complet de la tour a eu lieu par versement de quantité importante d'eau à l'intérieur de la tour à vent, le système d'humidification mis en marche et le contrôle du débit d'eau était fait par le réglage des orifices du système goutte à goutte.

A l'ouverture de la bouche de soufflage, on a constaté une évacuation d'air chaud et humide. Ceci est expliqué par l'accumulation de la chaleur à l'intérieur de la tour à vent du fait que la bouche de soufflage était fermée durant la phase de réalisation de la tour jusqu'au commencement des prises de mesures, le taux d'humidité élevé est expliqué par l'arrosage abondant de la tour le jour même de l'ouverture de la bouche. C'est un résultat assez logique, il a fallu un certain temps pour que le système puisse fonctionner correctement (figure 6.3).



Figure 6.133 : Mise en service du système d'humidification

Durant cette journée, les deux effets qui pouvaient se produire dans une tour à vent à savoir « effet de cheminée et effet attrape vent » ont été constatés.

L'effet de cheminée étant le premier constaté (figure 6.4), du fait que la température à l'intérieur des conduits de la tour était plus élevée que celle de la température extérieure. L'air chaud avait tendance à monter et remplacé par l'air qui se trouvait dans le bureau. Ce phénomène a durait cinq (05) heures de 10h00 à 15h00.



Figure 6.134 : Effet de cheminée

Une fois la tour refroidit, la température extérieure était devenue supérieure à la température intérieure de la tour. C'est l'effet « attrape vent » qui a été constaté (figure 6.5). La tour à vent commençait à faire rentrer de l'air frais et une grande partie de l'humidité était évacuée.



Figure 6.135 : Effet attrape vent

A cette étape de l'expérimentation, une première série de mesures a été effectuée. Elle avait comme objectif de voir l'effet de refroidissement de la tour à vent en utilisant le système de rafraîchissement évaporatif passif le jour même de l'ouverture de la bouche de soufflage, le calcul de l'écart de la température entre l'entrée de l'air au niveau de la tête de la tour à vent et à la sortie vers le bureau, ainsi que le taux d'humidité relative à l'intérieur.

A l'aide du thermomètre à double sondes, les températures, intérieure et extérieure étaient prises (figure 6.6), l'humidité à l'intérieur du bureau est enregistrée sur le thermo-hygromètre



Figure 6.136 : Première prise de mesure de la température

La première prise de mesure de la température a eu lieu à 15h59 à l'aide d'un thermomètre à double sondes. La sonde reliée au fil était positionnée devant la bouche de soufflage, l'appareil était posé à l'ombre dans le balcon.

L'appareil affichait une température extérieure de 36,5°C et une température intérieure au soufflage de 29,0°C, soit un écart de 07,5°C (figure 6.6). Au fur et à mesure que le temps s'écoulait, la tour fonctionnait de mieux en mieux et l'écart entre les deux températures mesurées augmentait.

A 16h02, l'appareil affichait 37,0°C pour la température extérieure et 28,5°C pour la température intérieure au soufflage soit un écart de 08,5°C (figure 6.7).

A 16h03, l'appareil affichait 37,5°C pour la température extérieure et 26,0°C pour la température intérieure au soufflage soit un écart de 11,5°C (figure 6.8).

A 16h05, l'appareil affichait 37,5°C pour la température extérieure et 24,5°C pour la température intérieure au soufflage soit un écart de 13,0°C (figure 6.9).

A 16h06, l'appareil affichait 37,5°C pour la température extérieure et 24,0°C pour la température intérieure au soufflage soit un écart de 13,5°C (figure 6.10).

A 16h07, l'appareil affichait 38,0°C pour la température extérieure et 24,5°C pour la température intérieure au soufflage soit un écart de 13,5°C (figure 6.11).

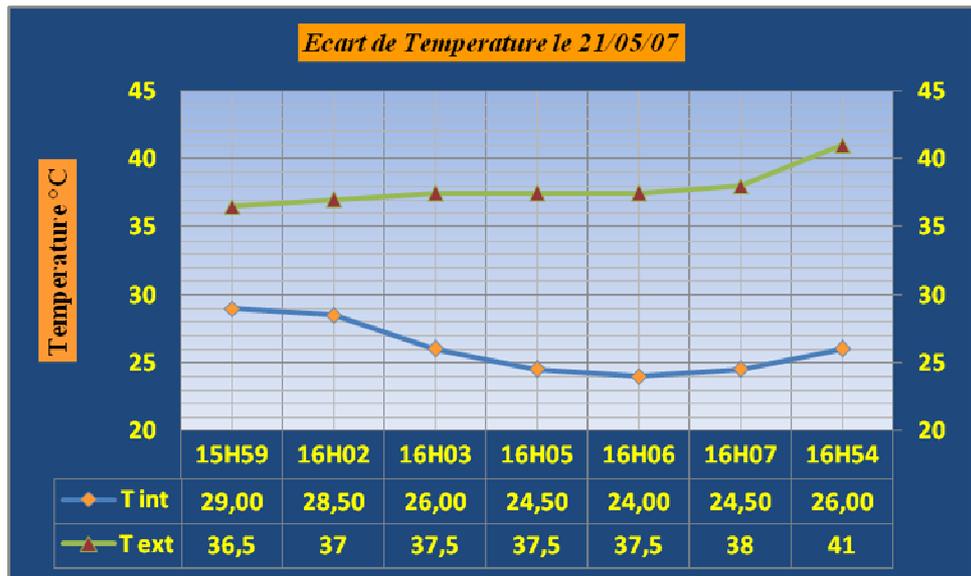


Figure 6.137 : Ecart de température le 21/05/2007



Figure 6.138 : Températures à 16h02



Figure 6.139 : Températures à 16h03



Figure 6.140 : Températures à 16h05



Figure 6.141 : Températures à 16h06



Figure 6.142 : Températures à 16h07

L'écart de température s'est stabilisé à 13,5°C. Il était très encourageant pour la poursuite de la campagne de mesure, malgré que la sonde extérieure ne fût pas positionnée au bon endroit (la tête de la tour, au niveau de la terrasse). La température au niveau du balcon devrait être inférieure à celle au niveau de la tête de la tour (lieu où est posé l'appareil de mesure).

Pour confirmer cette hypothèse et se conformer aux règles de l'expérimentation, à savoir la prise des températures extérieure au niveau de la tête de la tour, la sonde était déplacée et mise dans son emplacement prévu. Pour une première expérimentation, la sonde était positionnée au milieu de la tête de la tour et à l'ombre (figure 6.12).

Le thermo-hygromètre mit devant la bouche de soufflage indiquait la température et l'humidité à l'intérieur du bureau au niveau de la sortie de l'air de la tour à vent.

Le thermo-hygromètre affichait une température de 26,0°C et une humidité de 85% (figure 6.13), alors que la température au niveau de la tête de la tour était de 41,0°C (figure 6.14), soit un écart de 15°C. Cette mesure était effectuée à 16h54.

Malgré les conditions dans lesquelles la prise de mesure expérimentale était faite, les résultats se rapprochaient nettement de ceux obtenus par la simulation (18°C et 60%).



Figure 6.143 : Mesure au niveau de la tête de la tour

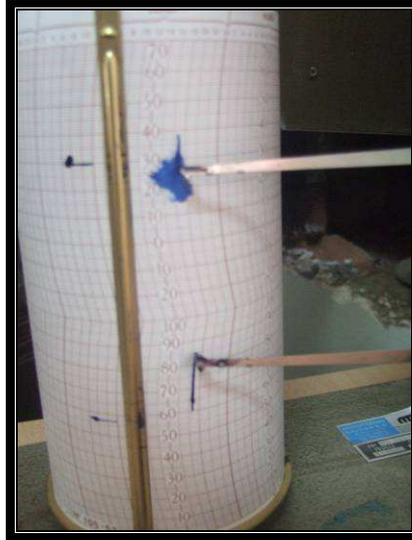


Figure 6.144 : Température et humidité à l'intérieur du bureau



Figure 6.145 : Température au niveau de la tête de la tour

La première série de tests avec humidification a été menée du 22 au 25 Mai 2007. Juste après l'acquisition de la station météo, la sonde extérieure était placée à l'ombre au niveau de la tête de la tour à vent et la sonde intérieure était placée au niveau de la bouche de soufflage à l'intérieur du bureau.

6.2 Interprétation des résultats

Tous les résultats obtenus lors de la prise des mesures durant la période de Mai à Août des températures et des humidités à l'intérieur et à l'extérieur de la tour ainsi que ceux communiqués par la station météo de Hassi Messaoud ont fait l'objet d'analyses et de comparaisons. Les résultats obtenus durant le mois de juillet sont les plus représentatifs du phénomène de refroidissement passif, pour cela le mois de juillet est choisi pour

l'interprétation des résultats. Dans ce chapitre les résultats des deux prises de mesures sans humidification (période du 18 au 24 juillet 2007) et avec humidification (période du 25 au 31 juillet 2007) seront étudiés. Tous les résultats obtenus durant la période du mois de Mai au mois d'Août seront énumérés dans l'annexe du chapitre 6 (résultats et interprétation).

6.2.1 Interprétation des résultats des mesures sans humidification période du 18 au 24 Juillet 2007

Les températures données par la station météorologique de Hassi Messaoud ainsi que les températures mesurées au niveau de la tête et la bouche de soufflage pour la période du 18 au 24 juillet permettent de remarquer qu'elle atteint son minimum à 6h du matin et son maximum à 15h30 de l'après midi, (tableau 6.1, Données Température, Annexe 6 résultats et interprétations).

La température horaire minimale météo est de 23,7°C enregistrée à 6h le premier jour, la température horaire maximale météo est de 42,1°C enregistrée à 16h le dernier jour. La température moyenne du même jour est de 33,11°C (tableau 6.1, Données Température, Annexe 6 résultats et interprétations).

La température de la station Ext au niveau de la tête de la tour (entrée de l'air) atteint son minimum de 26,1°C à 6h du matin et son maximum de 48,3°C à 16h. La température moyenne est de 34,49°C. (Tableau 6.1, Données Température, Annexe 6 résultats et interprétations).

La température de la station Int au niveau de la bouche de soufflage (sortie d'air) atteint son minimum de 31°C à 6h du matin et son maximum de 35,8°C à 18h00, la température moyenne est de 33,34°C pour cette période.

(Tableau 6.1, Données Température, Annexe 6 résultats et interprétations).

En comparant les températures mesurées à l'extérieure, au niveau de la tête de la tour à ceux de la station météo, nous constatons qu'il y a une augmentation de température de l'air d'une moyenne de 1,38°C. Cet écart pourrait être expliqué par l'exposition de la tête de la tour au soleil, la proximité de la terrasse plate qui reçoit le maximum de radiation. Le caractère industriel de la ville et la proximité de la raffinerie et torches des puits qui participent à l'augmentation de la température de l'air au niveau de la ville. Plusieurs villes dans le monde sont confrontées à une augmentations de la température dû à l'îlot de chaleur (les relevés sur une trentaine de villes de Californie et des zones rurales environnante ont montré qu'avant 1940, les zones urbaines étaient plus froides, contrairement à la situation actuelle où la température est plus élevée de 3°C en moyenne. (A. De Hatten, 2002).

L'humidité relative donnée par la station météo pour la période du 18 au 24 juillet permet de remarquer qu'inversement à la température, elle atteint son maximum à 6h du matin et son minimum à 16h de l'après midi, (tableau 6.2 Données Humidité Annexe 6 résultats et interprétations).

L'humidité relative de l'air minimale communiquée pour cette période par la station météo est de 0% enregistrée à 16h (cette valeur est représentatif, car toutes les valeurs inférieure à 9% sont considérer comme nul et non prise en considération par les services de la station météorologique de Hassi Messaoud), l'humidité relative de l'air maximale données était de 44% enregistrée à 6h le premier jour, l'humidité relative moyenne était de 20,26% (tableau 6.2 Données Humidité Annexe 6 résultats et interprétations).

L'humidité relative de l'air enregistrée au niveau de la station Ext (au niveau de la tête de la tour) est très faible, elle atteint son minimum de 1% à 16h de l'après midi pendant le deuxième, le sixième et le septième jour durant la période de mesure et ne dépasse pas les 3% le reste des jours. L'humidité relative maximale est de 33% enregistrée le quatrième jour à 6h. L'humidité relative de l'air moyenne au niveau de la tête de la tour est de 10,46%, (tableau 6.2 Données des Humidités, Annexe 6 résultats et interprétations).

L'humidité relative mesurée au niveau de la station Int (bouche de soufflage) atteint son minimum de 14% à 16h de l'après midi durant le cinquième, sixième et septième jour. Elle atteint son maximum de 20% pratiquement durant toute la semaine à 6h00. L'humidité relative intérieure moyenne mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 17,40%.

En comparant les humidités relatives enregistrées à l'extérieure, au niveau de la tête de la tour à ceux de la station météo, nous constatons qu'il y a une diminution considérable d'humidité relative de l'air. L'écart moyen pour cette période est de 9,8%. Ceci pourrait être expliqué par le manque en espace vert et point d'eau. En plus de la chaleur naturelle, le caractère industriel et pétrolier de la ville ainsi que le mode de construction (constructions qui ne prennent pas en considération le climat chaud et aride, et le caractère sud de la région) qui favorise l'augmentation de la température et diminue considérablement l'humidité au niveau de la ville de Hassi Messaoud. L'implantation de la station météorologique dans un micro climat particulièrement boisé expliquerait aussi cet écart d'humidité.

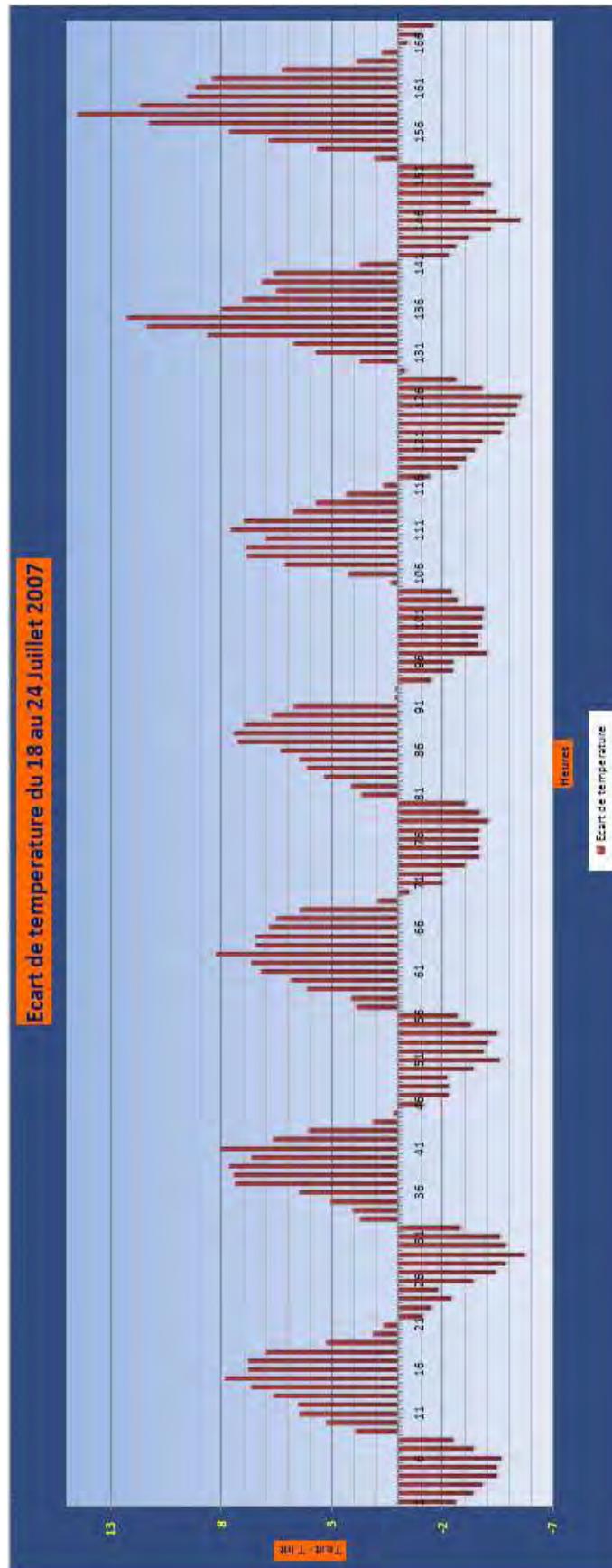
Nous remarquons que le taux de l'humidité relative mesuré au niveau de la bouche de soufflage augmente de 7% par rapport à l'humidité relative mesurée au niveau de la tête de la tour, mais elle est considéré comme très faible et ne répond pas aux normes de confort en

domaine d'humidité ($30 < HR < 70$ ASHRAE 55 – 1992) (tableau 6.2 Données Humidité, Annexe 6 résultats et interprétations).

6.2.1.1 Discussion des écarts des mesures de températures, sans humidification période du 18 au 24 Juillet 2007

Les expériences récentes sur les tours à vent à système évaporatif ont montré qu'avec une conception bien réfléchie de cette dernière, le rafraîchissement évaporatif pourra atteindre les 85-90% de la température humide, produisant un air à une température de 2-3°C au dessus de la température humide ambiante (Pearlmutter et Al, 1996).

Cependant à travers cette étude le pouvoir rafraîchissant de la tour à vent avec de telles configurations et géométrie (Y. Bouchahm 2003) sera mis en exergue. Ceci sera établi par le calcul de l'écart entre la température de l'air mesurée au niveau de la tête de la tour et la température de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage au niveau du bureau (figure 6.16).



La première journée (Le 18/07/2007) :

Deux cas de figures se présentent : Un écart de température de l'air négatif entre la station Ext et la station Int avec une température de l'air intérieure supérieure à la température de l'air extérieur durant deux périodes de la journée, de 0h à 8h du matin et 21h à 24h du soir, soit 45,84% de la journée. Un écart de température de l'air positif où la température de l'air au niveau de la bouche de soufflage est inférieure à la température de l'air au niveau de la tête de la tour durant la période de 8h du matin à 21h du soir, soit 54,16% (tableau 6.1).

La période où l'écart est négatif dure 11h de 21h à 8h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de $-4,7^{\circ}\text{C}$ à 6h du matin. Il diminue progressivement pour atteindre un écart nul vers 8h et 21h. La période de 0h à 8h représente le 1/3 de la journée, elle est la période matinale où l'écart négatif est le plus remarquable (figure 6.16).

La période où l'écart est positif dure 13h de 8h du matin à 21h du soir, l'écart augmente durant cette période pour atteindre son maximum de $+7,8^{\circ}\text{C}$ à 15h de l'après midi (figure 6.16, tableau 6.1).

Nous remarquons que la température de l'air à l'intérieure, enregistrée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable durant toute la journée et représente une amplitude de 2°C . La température de l'air à l'extérieur, enregistrée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de $14,1^{\circ}\text{C}$, elle influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent, provoque ainsi cet écart négatif et positif durant la journée (figure 6.18).

La tour à vent a un effet de rafraîchissement par transfert de chaleur direct durant la journée entre 8h et 21h, cet effet de rafraîchissement augmente avec l'augmentation de la température de l'air à l'extérieur de la tour à vent, le rendement maximal de la tour à vent est atteint entre 12h et 18h ($4,5^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 7,8^{\circ}\text{C}$). Durant cet interval de temps, le besoin de rafraîchissement est le plus convoité, surtout que dans la région de Hassi Messaoud, l'utilisation de la climatisation artificielle est à son maximum durant cette période (tableau 6.1, première journée).

À la tombée de la nuit, la température de l'air à l'extérieur de la tour à vent diminue mais la température de l'air enregistrée au niveau de la bouche de soufflage reste pratiquement stable, La masse thermique de la tour, ainsi que celle des murs intérieurs des conduits d'air ont absorbés une quantité de chaleur importante durant le jour. La chaleur accumulée par radiation sera restituée au contact de l'air frais la nuit (il y a transfert de chaleur entre la masse et l'air) (Y. Bouchahm 2003).

Le déphasage atteint son maximum donc il ya restitution de la chaleur vers l'intérieur. La nuit l'ouverture des fenêtres est nécessaire pour ventiler l'espace et chasser l'air chaud restitué par les murs et les planchers ainsi que par les parois de la tour sans humidification (chapitre 5 Expérimentation, article 5.5.1).

Malgré la réduction de la température de l'air au niveau de la bouche de soufflage, cette dernière reste élevée. La température neutre calculer pour la période de mesure selon la méthode de Humphrey est de $27,87^{\circ}\text{C}$ (chapitre 7, calcul de la température neutre), la température de l'air intérieure moyenne est de $32,18^{\circ}\text{C}$ reste supérieur à la température de la zone de confort (La largeur de la zone de confort est de -2K et $+2\text{K}$). Le recours à la climatisation artificielle est toujours nécessaire pour assurer une température intérieure de confort car à l'inverse des villes saharienne, la majorité des habitants de la ville de Hassi Messaoud n'ont pas la tendance de se déplacer vers les cours, les terrasses et même l'extérieur car la brise est plus ressentie à l'extérieur loin des constructions et leurs restitutions de la chaleur accumuler durant le jour puisque ils ne sont pas originaires du sud et la majorité des habitants viennent du Nord.

La deuxième journée (Le 19/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 11h de 21h à 8h du matin, l'écart augmente durant cette période pour atteindre son maximum de $-5,7^{\circ}\text{C}$ à 5h du matin. Il diminue progressivement pour atteindre un écart nul vers 8h du matin et 21h du soir. La période de 0h à 8h du matin représente le 1/3 de la journée, elle est la période matinale où l'écart négatif est le plus remarquable.

La période où l'écart est positif dure 13h de 8h du matin à 21h du soir soit 54,16% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $+8^{\circ}\text{C}$ à 17h, l'écart est toujours inférieur à 10°C .

Nous remarquons que la température de l'air à l'intérieure, enregistrée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable durant toute la journée et représente une amplitude de $2,8^{\circ}\text{C}$. La température de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de $14,9^{\circ}\text{C}$, elle influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent et provoque ainsi cet écart négatif et positif durant la journée (figure 6.18).

La tour à vent a un effet de rafraichissement par transfert de chaleur accumuler durant la nuit par les différents éléments de structure de cette dernière durant la journée entre 8h et 21h, cet effet de rafraichissement augmente avec l'élévation de la température de l'air à l'extérieur de

la tour à vent, le rendement maximal de la tour à vent est produit entre 12h et 18h ($5,6^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 8^{\circ}\text{C}$). Durant cet interval de temps, le besoin de rafraichissement est le plus demandé (tableau 6.1, deuxième journée, figure 6.16).

Malgré la réduction de la température de l'air au niveau de la bouche de soufflage, cette dernière reste élevée (Température de l'air intérieure moyenne de $32,74^{\circ}\text{C}$) et le recours à la climatisation artificielle est toujours nécessaire pour assurer une température intérieure de confort.

La troisième journée (Le 20/07/2007) :

Les deux cas de figures sont identiques à la deuxième journée (tableau 6.1 troisième journée).

La période où l'écart est négatif dure 11h de 21h du soir à 8h du matin, l'écart augmente durant cette période pour atteindre son maximum de $-4,5^{\circ}\text{C}$ à 6h du matin. Il diminue progressivement pour se neutraliser vers 8h et 21h. La période où l'écart est positif dure 13h de 8h à 21h soit 54,16% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de $+8,2^{\circ}\text{C}$ à 14h, l'écart est toujours inférieur à 10°C .

Nous remarquons que la température de l'air à l'intérieure, enregistrée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable durant toute la troisième journée et représente une amplitude de $3,2^{\circ}\text{C}$. La température de l'air à l'extérieur, enregistrée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de $14,2^{\circ}\text{C}$, elle influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent est provoqué ainsi cette variabilité d'écart (figure 6.18).

La tour à vent a un effet de rafraichissement par transfert de chaleur direct durant la journée entre 8h du matin et 21h du soir, cet effet de rafraichissement augmente avec l'augmentation de la température de l'air à l'extérieur de la tour à vent (plus la température de l'air extérieure augmente plus l'effet de rafraichissement augmente), le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 12h et 18h ($5,8^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 8,2^{\circ}\text{C}$). Durant cet intervalle de temps, le besoin de rafraichissement est le plus demandé (tableau 6.1, Troisième journée).

La température de l'air intérieure moyenne de $33,24^{\circ}\text{C}$ est supérieure à la température de la zone de confort. Le recours à la climatisation artificielle est toujours nécessaire pour assurer une température intérieure de confort.

La quatrième journée (Le 21/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 11h de 21h à 8h du matin, l'écart augmente durant cette période pour atteindre son maximum de $-4,1^{\circ}\text{C}$ à 6h du matin. Il diminue progressivement pour atteindre un écart nul vers 8h et 21h.

La période où l'écart est positif dure 13h de 8h à 21h du soir soit 54,16% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $+7,4^{\circ}\text{C}$ à 14h, l'écart est toujours inférieur à 10°C (figure 6.16).

Nous remarquons que la température de l'air à l'intérieure, enregistrée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable durant toute la quatrième journée et représente une amplitude de $4,1^{\circ}\text{C}$. La température de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de $14,8^{\circ}\text{C}$, elle influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent (figure 6.18).

L'effet de rafraichissement augmente avec l'augmentation de la température de l'air à l'extérieur de la tour à vent (plus la température de l'air extérieure augmente plus l'effet de rafraichissement augmente), le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 12h et 18h ($4,4^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 7,4^{\circ}\text{C}$). Durant cet intervalle de temps, le besoin de rafraichissement est le plus convoité (tableau 6.1, Quatrième journée).

La cinquième journée (Le 22/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 12h de 20h à 8h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $-3,9^{\circ}\text{C}$ à 6h du matin. Il diminue progressivement pour se neutralisé vers 8h et 20h. La période de 0h à 8h du matin représente le 1/3 de la journée, elle est la période matinale où l'écart négatif est le plus constaté.

La période où l'écart est positif dure 12h de 8h à 20h soit 50% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $+7,5^{\circ}\text{C}$ à 15h, l'écart est toujours inférieur à 10°C (figure 6.16).

La température de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable, elle et représente une amplitude de $3,3^{\circ}\text{C}$. La température de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de $14,2^{\circ}\text{C}$, elle influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent (figure 6.18).

L'effet de rafraichissement augmente avec l'augmentation de la température de l'air à l'extérieur de la tour à vent, le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 12h et

18h ($5,1^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 7,5^{\circ}\text{C}$). Durant cet intervalle de temps, le besoin de rafraîchissement est le plus demandé (tableau 6.1, Cinquième journée).

La sixième journée (Le 23/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 12h de 21h du soir à 9h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $-5,6^{\circ}\text{C}$ à 6h du matin. Il diminue progressivement pour se neutralisé vers 9h et 21h. La période de 0h à 9h du matin représente 35% de la journée, elle est la période matinale où l'écart négatif est le plus constaté.

La période où l'écart est positif dur 12h de 9h du matin à 21h du soir soit 50% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $+12,2^{\circ}\text{C}$ à 15h, pour la première fois de la semaine, l'écart a dépassé le seuil de 10°C (figure 6.16).

L'amplitude de la température de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable, elle est de $3,8^{\circ}\text{C}$. La température de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de $10,2^{\circ}\text{C}$, elle influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent (figure 6.18).

L'effet de rafraîchissement augmente avec l'augmentation de la température de l'air à l'extérieur de la tour à vent, le rendement est maximum entre 12h et 18h ($4,7^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 12,2^{\circ}\text{C}$) (tableau 6.1, Sixième journée, figure 6.16).

La septième journée (Le 24/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 11h de 21h à 8h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $-5,5^{\circ}\text{C}$ à 2h du matin. Il diminue progressivement pour se neutralisé vers 8h du matin et 21h du soir (figure 6.17).

La période où l'écart est positif dure 13h de 8h à 21h du soir soit 54,16% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $+14,5^{\circ}\text{C}$ à 15h (figure 6.17), l'écart dépasse le seuil de 10°C pour rentré dans le deuxième palier de ($10 < \Delta T \leq 15$) (tableau 6.1, Septième journée).

Nous remarquons que la température de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable durant toute la septième et dernière journée et représente une amplitude de $2,2^{\circ}\text{C}$. La température de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de $10,5^{\circ}\text{C}$, elle influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent (figure 6.18).

Le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 12h et 19h ($5,8^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 14,5^{\circ}\text{C}$). Durant cet intervalle de temps, le besoin de rafraîchissement est le plus demandé (tableau 6.1, Septième journée).

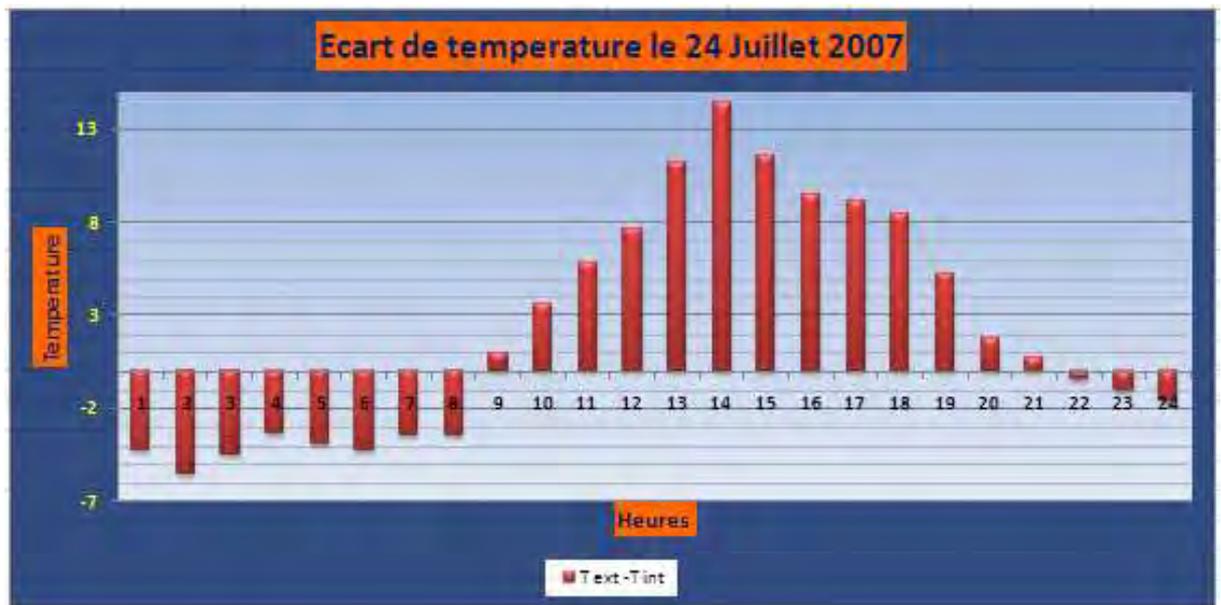


Figure 6.147 : Ecart de température le 24 Juillet 2007

Durant toute la campagne de mesure entre le 18 au 24 juillet 2007 (mesure sans humidification), l'effet de rafraîchissement par transfert de chaleur de l'air et la masse augmentait de jour en jour et l'écart entre les températures de l'air intérieure et extérieure de la tour à vent augmentait aussi, pour arriver au dernier jour de la prise de mesure à $14,5^{\circ}\text{C}$. Cet écart de température est obtenu grâce à l'effet de transfert de chaleur entre l'air entrant dans les conduits de la tour à vent et les matériaux de construction dont est construite la tour à vent ainsi que la géométrie et la forme de cette dernière (figure 6.18).

La température de l'air extérieure mesurée au niveau de la tête de la tour et la température de l'air donnée par la station météorologique forme une courbe sinusoïdale régulière ayant une période ou un rythme régulier de 24h. L'écart moyen pour toute la période de mesure entre ces deux températures est de $1,38^{\circ}\text{C}$.

La température de l'air intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est pratiquement stable durant toute la période de mesure, la température de l'air intérieure moyenne pour la période du 18 au 24 juillet est de $33,34^{\circ}\text{C}$.

Le graphe en figure 6.18 représente les trois températures sus mentionnées à travers toute la campagne de mesure.

Ayant la même forme, les deux courbes sinusoïdales des températures de l'air au niveau de la tête et de la station météo sont coupées par la courbe pratiquement linéaire de la température

de l'air intérieure (figure 6.18). Les points d'intersection des courbes représentent un écart de température nul, généralement les courbes se croisent à 8h du matin et 9h du soir. Les parties des courbes des deux températures de l'air extérieur et météo qui sont au dessus de la courbe de la température de l'air intérieure représente l'écart positif, traduit par le rafraichissement du bureau par le biais de la tour à vent. Nous remarquons que le rafraichissement augmente et l'écart entre les températures de l'air à l'intérieur et l'extérieur de la tour à vent s'accroît avec l'augmentation de la température de l'air à l'extérieur, l'effet est optimal entre 12h et 18h, le maximum d'écart est obtenue généralement à 15h (figure 6.18).

Cet interval de temps correspond à celui où l'utilisation de la climatisation est la plus demandée, nous remarquons que le potentiel de la tour à vent et son pouvoir rafraichissant sans l'utilisation de l'humidification participe considérablement à la réduction de la température de l'air à l'intérieur du bureau (au soufflage) pour obtenir une température de l'air intérieure moyenne de 33,34°C par rapport à une température de l'air moyenne de 34,49°C au niveau de la tête de la tour (figure 6.18).

Les parties des courbes des deux températures de l'air extérieur (entrée d'air) et météo qui sont au dessous de la courbe de la température de l'air intérieure (au soufflage) représente l'écart négatif, expliqué par le déphasage de la température dû à l'inertie des matériaux de construction à savoir la brique rouge (effet de masse). Nous remarquons aussi que l'écart de la température de l'air diminue de jour en jour est par conséquent, la tour à vent et de plus en plus performante.

La nuit, la température de l'air extérieur est inférieure à la température de l'air intérieure (caractéristiques du climat chaud et aride) (Tableau 6.1 et figure 6.18), dans ce cas, il faut appliquer le refroidissement passif par ventilation nocturne. Celui-ci consiste à refroidir la structure du bâtiment à l'aide de la ventilation naturelle, de manière à permettre à cette structure d'évacuer la chaleur accumuler dans le bâtiment pendant la journée. Le bâtiment est ainsi aéré et refroidi pendant cette période.

Pour le refroidissement par ventilation nocturne, l'amplitude des variations de la température de l'air extérieur doit être importante (**minimum 5°C**) (Claude Alain Roulet ; 2002).

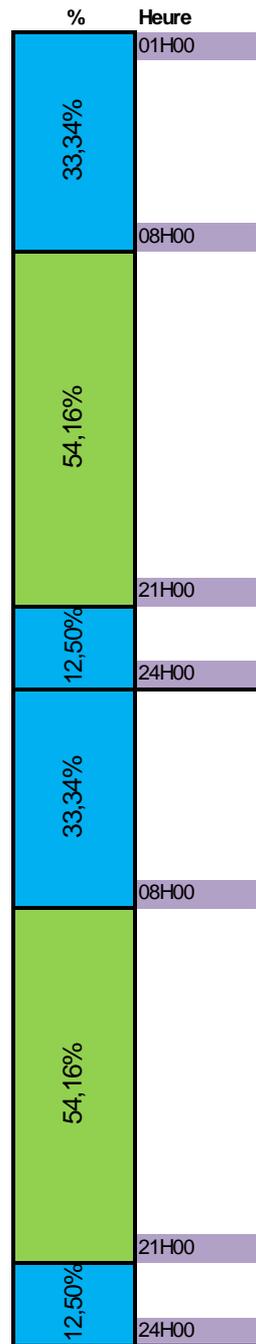
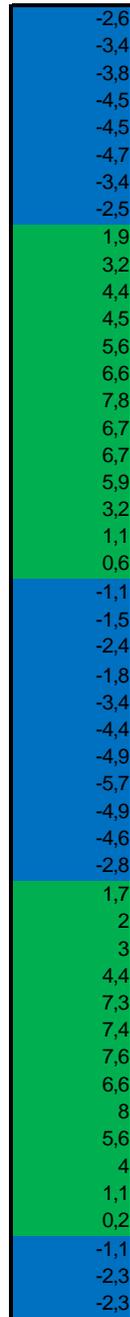
A ce titre, il faut bien souligner que cet objectif a été l'objet de plusieurs conférences telle la conférence de Milan 1995 « Proc. Of Healthy Buildings » (Claude Alain Roulet & al; 2002).

Données Temperature

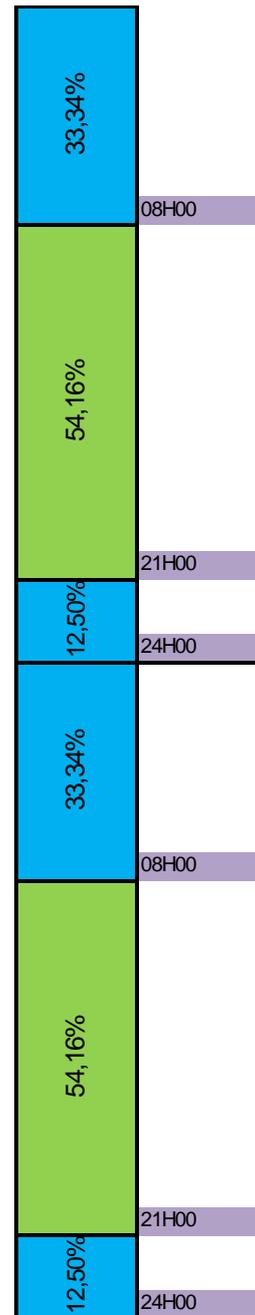
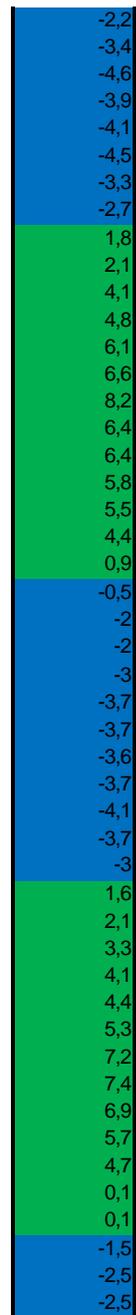
| | TMEIEO °C | TEXT °C | TINT °C |
|-------|-----------|---------|---------|
| 01H00 | 29 | 29,6 | 32,2 |
| 02H00 | 27,8 | 28,6 | 32 |
| 03H00 | 27 | 27,8 | 31,6 |
| 04H00 | 26,2 | 26,7 | 31,2 |
| 05H00 | 25,2 | 26,5 | 31 |
| 06H00 | 23,7 | 26,3 | 31 |
| 07H00 | 25 | 27,6 | 31 |
| 08H00 | 27,4 | 28,5 | 31 |
| 09H00 | 30,1 | 33,5 | 31,6 |
| 10H00 | 32,5 | 35,4 | 32,2 |
| 11H00 | 34,4 | 36,7 | 32,3 |
| 12H00 | 36 | 37 | 32,5 |
| 13H00 | 36,5 | 38,3 | 32,7 |
| 14H00 | 37,4 | 39,5 | 32,9 |
| 15H00 | 38 | 40,4 | 32,6 |
| 16H00 | 38 | 39,7 | 33 |
| 17H00 | 38 | 39,2 | 32,5 |
| 18H00 | 37,3 | 38,5 | 32,6 |
| 19H00 | 36,5 | 36 | 32,8 |
| 20H00 | 35 | 34,1 | 33 |
| 21H00 | 33 | 33,5 | 32,9 |
| 22H00 | 31,8 | 31,8 | 32,9 |
| 23H00 | 30,7 | 31 | 32,5 |
| 24H00 | 28,3 | 30 | 32,4 |
| 25H00 | 27,5 | 30,2 | 32 |
| 26H00 | 26,8 | 28,7 | 32,1 |
| 27H00 | 26 | 27,6 | 32 |
| 28H00 | 24,6 | 26,5 | 31,4 |
| 29H00 | 25,5 | 26,3 | 32 |
| 30H00 | 24 | 26,1 | 31 |
| 31H00 | 25,2 | 27,4 | 32 |
| 32H00 | 28 | 28,2 | 31 |
| 33H00 | 31 | 33,7 | 32 |
| 34H00 | 33,6 | 34,3 | 32,3 |
| 35H00 | 35,7 | 37 | 34 |
| 36H00 | 36,5 | 37,9 | 33,5 |
| 37H00 | 37,4 | 40,3 | 33 |
| 38H00 | 37,8 | 41 | 33,6 |
| 39H00 | 38,5 | 40,6 | 33 |
| 40H00 | 39 | 40,4 | 33,8 |
| 41H00 | 38,8 | 40 | 32 |
| 42H00 | 38,1 | 39,7 | 34,1 |
| 43H00 | 37,4 | 37 | 33 |
| 44H00 | 36,4 | 35,2 | 34,1 |
| 45H00 | 34 | 33,7 | 33,5 |
| 46H00 | 31,6 | 32,6 | 33,7 |
| 47H00 | 29,5 | 31,2 | 33,5 |
| 48H00 | 28,1 | 30,9 | 33,2 |

Mesures sans Humidification

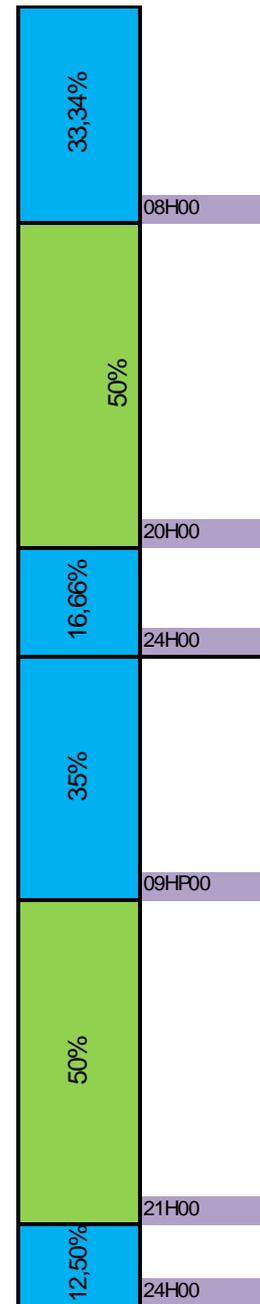
TEXT - TINT



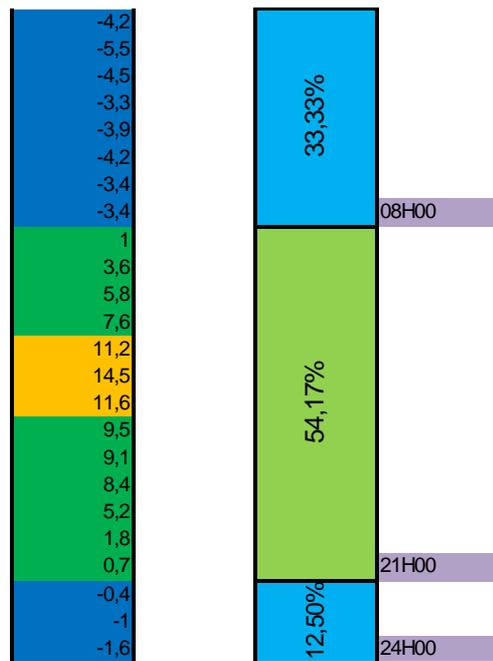
| | | | |
|-------|------|------|------|
| 49H00 | 27,3 | 30,8 | 33 |
| 50H00 | 26,6 | 29,4 | 32,8 |
| 51H00 | 26 | 28,9 | 33,5 |
| 52H00 | 24,5 | 28,4 | 32,3 |
| 53H00 | 24 | 28 | 32,1 |
| 54H00 | 25,5 | 27,5 | 32 |
| 55H00 | 26,2 | 28,5 | 31,8 |
| 56H00 | 29 | 28,9 | 31,6 |
| 57H00 | 32 | 34 | 32,2 |
| 58H00 | 34,5 | 35 | 32,9 |
| 59H00 | 36,6 | 37 | 32,9 |
| 60H00 | 37,6 | 37,7 | 32,9 |
| 61H00 | 39 | 39,2 | 33,1 |
| 62H00 | 39,8 | 39,9 | 33,3 |
| 63H00 | 40 | 41,7 | 33,5 |
| 64H00 | 40 | 41,2 | 34,8 |
| 65H00 | 39,6 | 40,6 | 34,2 |
| 66H00 | 39 | 40,2 | 34,4 |
| 67H00 | 38 | 39,7 | 34,2 |
| 68H00 | 36,7 | 38,5 | 34,1 |
| 69H00 | 34,6 | 35 | 34,1 |
| 70H00 | 32,6 | 33,7 | 34,2 |
| 71H00 | 31,3 | 32 | 34 |
| 72H00 | 29,3 | 31,8 | 33,8 |
| 73H00 | 29 | 29,6 | 32,6 |
| 74H00 | 28,3 | 29,1 | 32,8 |
| 75H00 | 27,5 | 28,7 | 32,4 |
| 76H00 | 26,1 | 28,5 | 32,1 |
| 77H00 | 25,7 | 28,4 | 32,1 |
| 78H00 | 25 | 28,2 | 32,3 |
| 79H00 | 26,2 | 28,6 | 32,3 |
| 80H00 | 28 | 29,3 | 32,3 |
| 81H00 | 31,4 | 34,1 | 32,5 |
| 82H00 | 33,9 | 35 | 32,9 |
| 83H00 | 36,3 | 37,5 | 34,2 |
| 84H00 | 37,5 | 39,2 | 35,1 |
| 85H00 | 39 | 40,2 | 35,8 |
| 86H00 | 39,5 | 41,5 | 36,2 |
| 87H00 | 40,6 | 43 | 35,8 |
| 88H00 | 40,9 | 42,6 | 35,2 |
| 89H00 | 40,9 | 42,2 | 35,3 |
| 90H00 | 40,1 | 41,1 | 35,4 |
| 91H00 | 39 | 40 | 35,3 |
| 92H00 | 36,5 | 35,3 | 35,2 |
| 93H00 | 33,5 | 35 | 34,9 |
| 94H00 | 31,7 | 33,2 | 34,7 |
| 95H00 | 31,4 | 32 | 34,5 |
| 96H00 | 30,7 | 31,7 | 34,2 |



| | | | |
|--------|------|------|------|
| 97H00 | 28,6 | 29,5 | 33,5 |
| 98H00 | 28,2 | 29,2 | 32,8 |
| 99H00 | 27,6 | 28,9 | 32,5 |
| 100H00 | 27,1 | 28,4 | 32,2 |
| 101H00 | 26,6 | 28,4 | 32,2 |
| 102H00 | 26,2 | 28,3 | 32,2 |
| 103H00 | 27 | 29,5 | 32,2 |
| 104H00 | 29,4 | 29,8 | 32,2 |
| 105H00 | 33 | 33 | 32,7 |
| 106H00 | 34,5 | 35,6 | 33,4 |
| 107H00 | 36 | 38,6 | 33,5 |
| 108H00 | 37,4 | 40,4 | 33,6 |
| 109H00 | 38,5 | 40,8 | 34 |
| 110H00 | 39,7 | 41,1 | 35,2 |
| 111H00 | 40,4 | 42,5 | 35 |
| 112H00 | 40,7 | 41,8 | 34,9 |
| 113H00 | 40,1 | 39,7 | 35 |
| 114H00 | 39,5 | 38,8 | 35,1 |
| 115H00 | 38,6 | 37,6 | 35,3 |
| 116H00 | 37 | 36,1 | 35,5 |
| 117H00 | 34 | 33,4 | 34,8 |
| 118H00 | 31,3 | 31,6 | 34,3 |
| 119H00 | 33 | 31,1 | 34,2 |
| 120H00 | 31 | 30,6 | 34,1 |
| 121H00 | 29 | 30,2 | 34 |
| 122H00 | 28,4 | 29 | 33,7 |
| 123H00 | 28 | 28,5 | 33,3 |
| 124H00 | 26,8 | 27,6 | 32,9 |
| 125H00 | 26,3 | 27,1 | 32,5 |
| 126H00 | 25 | 26,6 | 32,2 |
| 127H00 | 27 | 28,3 | 32,1 |
| 128H00 | 30 | 29,4 | 32 |
| 129H00 | 32 | 32,7 | 33 |
| 130H00 | 35,8 | 35,8 | 34,1 |
| 131H00 | 38 | 38,3 | 34,6 |
| 132H00 | 39,5 | 39,9 | 35,2 |
| 133H00 | 40 | 43,5 | 34,9 |
| 134H00 | 40,5 | 46 | 34,7 |
| 135H00 | 41 | 46,8 | 34,6 |
| 136H00 | 41 | 42,5 | 34,5 |
| 137H00 | 41,7 | 42 | 35 |
| 138H00 | 40,4 | 41,3 | 35,8 |
| 139H00 | 39 | 40,5 | 34,4 |
| 140H00 | 36,7 | 39,4 | 33,8 |
| 141H00 | 34,6 | 35,8 | 34,1 |
| 142H00 | 32,2 | 32,3 | 34,6 |
| 143H00 | 31,2 | 31,8 | 34,4 |
| 144H00 | 29,5 | 31,1 | 34,3 |



| | | | |
|--------|------|------|------|
| 145H00 | 28 | 29,8 | 34 |
| 146H00 | 27,6 | 28,3 | 33,8 |
| 147H00 | 26,5 | 29 | 33,5 |
| 148H00 | 26,8 | 29,5 | 32,8 |
| 149H00 | 26,1 | 28,5 | 32,4 |
| 150H00 | 24,4 | 27,8 | 32 |
| 151H00 | 25,4 | 29,1 | 32,5 |
| 152H00 | 28,6 | 29,6 | 33 |
| 153H00 | 33,3 | 34,5 | 33,5 |
| 154H00 | 35,5 | 37,7 | 34,1 |
| 155H00 | 38,3 | 39,4 | 33,6 |
| 156H00 | 40 | 40,5 | 32,9 |
| 157H00 | 41 | 44,6 | 33,4 |
| 158H00 | 42 | 48,3 | 33,8 |
| 159H00 | 42 | 45,2 | 33,6 |
| 160H00 | 42,1 | 43 | 33,5 |
| 161H00 | 41,5 | 42,8 | 33,7 |
| 162H00 | 41 | 42,3 | 33,9 |
| 163H00 | 40 | 39,2 | 34 |
| 164H00 | 37 | 35,9 | 34,1 |
| 165H00 | 36 | 34,8 | 34,1 |
| 166H00 | 34,7 | 33,8 | 34,2 |
| 167H00 | 31 | 33,1 | 34,1 |
| 168H00 | 30,3 | 32,5 | 34,1 |



Légende

| | | | | | |
|--|---|--|--|--|---|
| | $\Delta T < 0^{\circ}\text{C}$ | | $0 \leq \Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ | | $10 \leq \Delta T < 15^{\circ}\text{C}$ |
| | $15 \leq \Delta T < 18^{\circ}\text{C}$ | | $18 \leq \Delta T$ | | |

Tableau 6.5 : Mesures des températures météo, extérieures et intérieures période 18 au 24 Juillet 2007

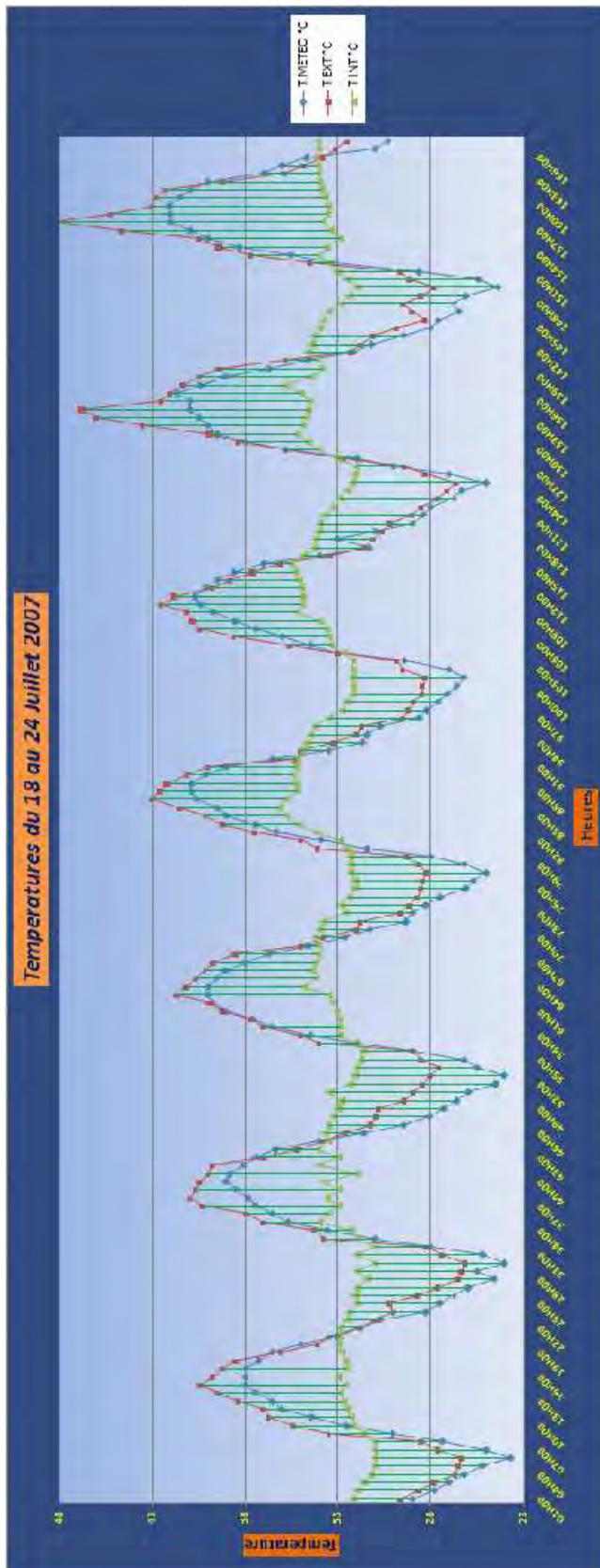


Figure 6.148 : Courbes des températures pour la période du 18 au 24 Juillet 2007

6.2.1.2 Discussion des écarts des mesures d'humidité, sans humidification période du 18 au 24 Juillet 2007

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

Lorsque la température est au-delà des limites du confort, l'humidité provoque une sensation de sécheresse, si elle est inférieure à 20%. L'écart de l'humidité relative de l'air étudié désigne la différence d'humidité relative de l'air entre les mesures prises au niveau de la bouche de soufflage et les mesures prises au niveau de la tête de la tour (figure 6.19).

L'analyse des humidités relatives de l'air mesurées au niveau de la tour à vent et les données météo nous donne pour :

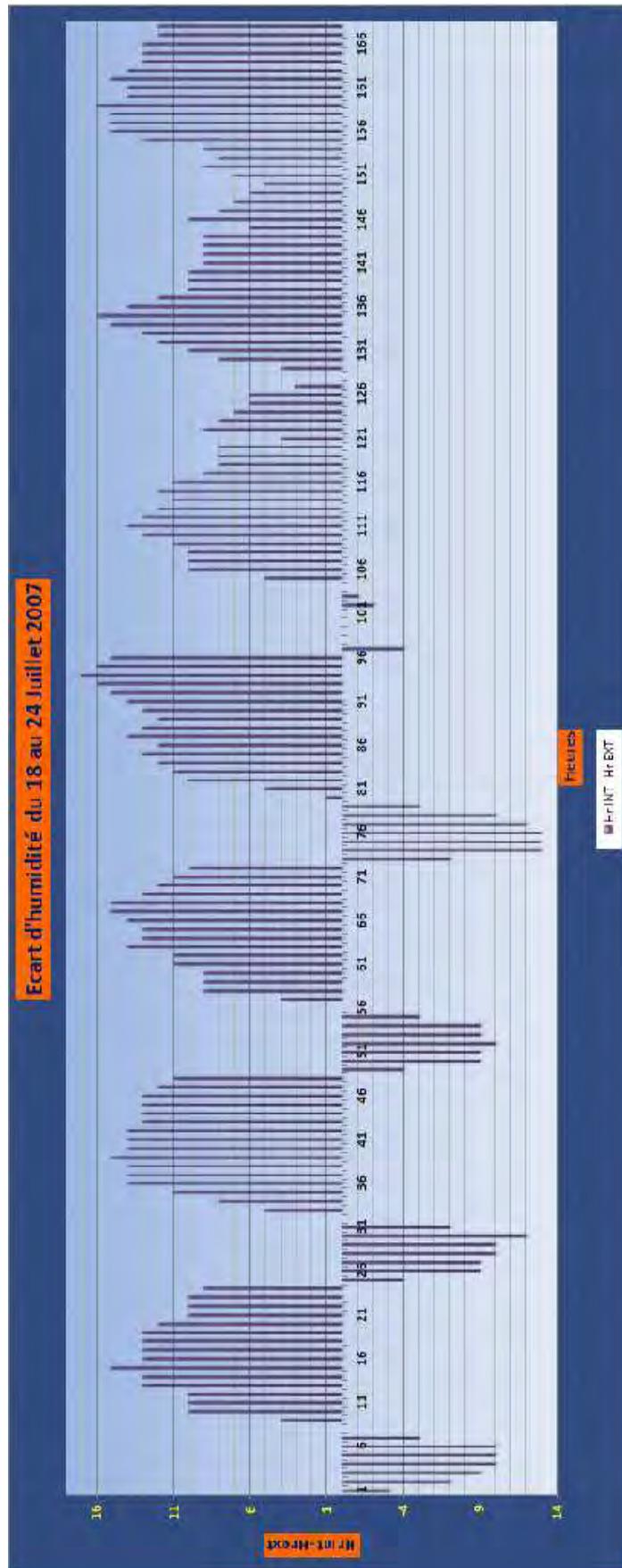


Figure 6.149 : Ecart d'humidité relative de l'air durant la période du 18 au 24 Juillet 2007

La première journée (Le 18/07/2007) :

Deux cas de figures se présentent : Un écart d'humidité relative de l'air négatif entre la station Int (bouche de soufflage) et la station Ext (entrée d'air) avec une humidité relative de l'air intérieure inférieure à l'humidité relative de l'air extérieur durant la période, de 0h à 7h du matin, soit 29,16% de la journée. Un écart d'humidité relative de l'air positif où l'humidité relative de l'air intérieur au niveau de la bouche de soufflage est supérieure à l'humidité relative de l'air extérieure au niveau de la tête de la tour durant la période de 8h à 24h du soir. Cette période représente 2/3 de la journée (tableau 6.2, première journée). L'écart est nul à 8h du matin.

La période où l'écart est négatif dure 7 heures de 0h à 7h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de -10% à 6h du matin. Il diminue progressivement pour se neutraliser vers 8h et 24h.

La période où l'écart est positif dure 16 heures de 8h à 24h soit 66,66% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +15% à 15h.

Nous remarquons que l'humidité relative de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable durant toute la journée et représente une amplitude de 5%. L'humidité relative de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de 27%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent est provoqué ainsi cet écart négatif et positif durant la journée.

La tour à vent a un effet de rafraîchissement par transfert de chaleur direct durant la journée entre 8h et 21h, cet effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air diminue. Cette humidité diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 15% entre 20h et 22h du soir, là où la température de l'air extérieure diminue et la température de l'air à l'intérieure de la tour à vent augmente (restitution de la chaleur accumulée pendant la journée).

L'humidité relative de l'air extérieure maximale enregistrée à la tête de la tour est de 30%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure est 12,58%. Cette humidité est nettement au-dessous de la norme (**ASHRAE 55 - 1992** $30 \leq HR \leq 70$) (tableau 6.2, première journée, figure 6.19).

L'humidité relative de l'air maximale intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 20% à 6h du matin, l'humidité relative de l'air moyenne intérieure est de 17,75%, cette humidité est inférieure à 30%, l'air soufflé au niveau de la bouche de la tour est sec. Ce

dernier peut provoquer des sensations d'inconfort remarquées par des difficultés de respiration et d'un risque d'étouffement (D. Zaroual 2006).

L'augmentation du taux de l'humidité dans l'air par l'évaporation de l'eau, peuvent améliorer le confort thermique en minimisant la chaleur sèche en créant une sensation de fraîcheur agréable pour l'ambiance intérieure et pour l'utilisateur.

La deuxième journée (Le 19/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 8h de 0h à 7h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de -12% à 6h du matin. Il diminue progressivement pour se neutraliser vers 8h et 24h (figure 6.19).

La période où l'écart est positif dure 16h de 8h à 24h soit 66,66% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +15% à 15h de l'après midi (figure 6.19).

Nous remarquons que l'humidité relative de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est relativement stable durant toute la journée et représente une amplitude de 4%. L'humidité relative de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de 29%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent est provoqué ainsi cet écart négatif et positif durant la journée. L'humidité relative de l'air mesurée à l'extérieur de la tour et donnée par la station météo diminue avec l'augmentation de la température de l'air et augmente avec la diminution de cette dernière. L'humidité relative de l'air mesurée à l'intérieur du bureau (au soufflage) reste relativement stable comme il est le cas de la température de l'air.

L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air diminue. Elle diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 16% à 18h, là où la température de l'air extérieure augmente et la température de l'air à l'intérieure de la tour à vent diminue (figure 6.19).

L'humidité relative de l'air extérieure maximale enregistrée à la tête de la tour est de 30%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure (entrée d'air) est de 12,%, cette humidité est nettement au-dessous de la norme (ASHRAE 55 - 1992 $30 \leq HR \leq 70$) (tableau 6.2, deuxième journée).

L'humidité relative de l'air maximale intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 20%, l'humidité relative de l'air moyenne intérieure est de 17,71%, cette humidité est inférieure à 30%, l'air soufflé au niveau de la bouche de la tour est sec.

La troisième journée (Le 20/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 8h de 0h à 7h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de -10% à 6h du matin. Il diminue progressivement pour se neutraliser vers 8h et 24h.

La période où l'écart est positif dure 16h de 8h à 24h soit 66,66% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +15% à 8h du soir.

L'humidité relative de l'air à l'intérieure (au niveau de la bouche de soufflage) représente une amplitude de 3%. L'humidité relative de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de 26%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent. L'humidité relative de l'air mesurée à l'extérieure de la tour et donnée par la station

L'effet de rafraichissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air diminue. Cette dernière diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 17% 17h, là où la température de l'air extérieure augmente.

L'humidité relative de l'air extérieure maximale enregistrée à la tête de la tour est de 29%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure est 13%, cette humidité est nettement au dessous de la norme (ASHRAE 55 - 1992 $30 \leq HR \leq 70$) (tableau 6.2, troisième journée).

L'humidité relative de l'air maximale intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 20% à 6h du matin. L'humidité relative de l'air moyenne intérieure est de 18,33%, cette humidité est inférieure à 30%, l'air soufflé au niveau de la bouche de la tour est sec.

La quatrième journée (Le 21/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 8h de 0h à 7h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de -13% à 4h du matin. Il diminue progressivement pour se neutraliser vers 8h et 24h.

La période où l'écart est positif dure 16h de 8h à 24h soit 66,66% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +17% à 22h.

L'amplitude de l'humidité relative de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 4%. L'humidité relative de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de 31%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent.

L'effet de rafraichissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air diminue. Elle diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 16% 17h. L'humidité relative de

l'air maximale enregistrée au niveau de la bouche de soufflage est de 20%, cette mesure est prise à 6h du matin (tableau 6.2, quatrième journée, figure 6.19).

L'humidité relative de l'air extérieure maximale enregistrée à la tête de la tour est de 33%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure est 11,96%, cette humidité est nettement au dessous de la norme (**ASHRAE 55 - 1992** $30 \leq HR \leq 70$). L'humidité relative de l'air maximale intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 20%, l'humidité relative de l'air moyenne intérieure est de 17,63%, cette humidité est inférieure à 30%, l'air soufflé au niveau de la bouche de la tour est sec.

La cinquième journée (Le 22/07/2007) :

La période où l'écart est négatif dure 8h de 0h à 7h du matin, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de -2% à 6h du matin. Il diminue progressivement pour se neutraliser entre la période de 2h à 5h et à 8h puis à 24h.

La période où l'écart est positif dure 16h de 8h à 24h soit 66,66% de la journée, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +14% à 15h.

L'amplitude de l'humidité relative de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 6%. L'humidité relative de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de 18%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent (figure 6.19).

L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air diminue. Cette dernière diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 14% à 19h.

L'humidité relative de l'air extérieure maximale enregistrée à la tête de la tour est de 21%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure est 10,92%, cette humidité est nettement au dessous de la norme (**ASHRAE 55 - 1992** $30 \leq HR \leq 70$) (tableau 6.2, cinquième journée).

L'humidité relative de l'air maximale intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 20% à 6h du matin, l'humidité relative de l'air moyenne intérieure est de 17,50%, cette humidité est inférieure à 30%, l'air soufflé au niveau de la bouche de la tour est sec.

La sixième journée (Le 23/07/2007) :

Durant la sixième journée, l'écart d'humidité relative de l'air est toujours positif où l'humidité relative de l'air intérieur au niveau de la bouche de soufflage est supérieure à l'humidité relative de l'air extérieure au niveau de la tête de la tour durant toute la journée (tableau 6.2, sixième journée, figure 6.19). L'écart est nul à 8h du matin.

Il augmente durant la journée pour arriver à son maximum de +16% à 15h.

L'amplitude de l'humidité relative de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 5%. L'humidité relative de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour est très variable. Ayant une amplitude de 18%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent (figure 6.19).

L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air diminue. Cette dernière diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 14% à 16h. L'humidité relative de l'air extérieure maximale enregistrée à la tête de la tour est de 19%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure est 7,2% cette humidité est nettement au dessous de la norme (ASHRAE 55 - 1992 $30 \leq HR \leq 70$) (tableau 6.2, sixième journée).

L'humidité relative de l'air maximale intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 19% à 6h du matin, l'humidité relative de l'air moyenne intérieure est de 16,08%, cette humidité est inférieure à 30%, l'air soufflé au niveau de la bouche de la tour est sec.

La septième journée (Le 24/07/2007) :

Durant la septième journée, l'écart d'humidité relative de l'air est toujours positif où l'humidité relative de l'air intérieur au niveau de la bouche de soufflage est supérieure à l'humidité relative de l'air extérieure au niveau de la tête de la tour durant toute la journée (tableau 6.2, septième journée et figure 6.20).



Figure 6.150 : Ecart d'humidité relative le 24 Juillet 2007

L'écart augmente durant la journée pour arriver à son maximum de +16% à 15h (figure 6.20).

L'amplitude de l'humidité relative de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 4%. L'humidité relative de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de

la tour est très variable. Ayant une amplitude de 10%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent.

L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air diminue. Elle diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 14% à 10h (figure 6.20).

L'humidité relative de l'air extérieure maximale enregistrée à la tête de la tour est de 11%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure est 5,58%, cette humidité est nettement au dessous de la norme (**ASHRAE 55 - 1992** $30 \leq HR \leq 70$) (tableau 6.2, septième journée).

L'humidité relative de l'air maximale intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 18% à 2h du matin, l'humidité relative de l'air moyenne intérieure est de 16,79, cette humidité est inférieure à 30%, l'air soufflé au niveau de la bouche de la tour est sec.

L'humidité relative de l'air extérieur mesurée au niveau de la tête de la tour et l'humidité relative de l'air donnée par la station météo forme une courbe sinusoïdale régulière ayant une période ou un rythme régulier de 24h. L'écart moyen pour toute la période de mesure entre ces deux humidités est de 9,8% ($Hr_{int} - Hr_{ext}$).

L'humidité relative de l'air intérieure mesurée au niveau de la bouche de soufflage est pratiquement stable durant toute la période de mesure, l'humidité relative de l'air intérieure moyenne pour la période du 18 au 24 juillet est de 17,40%.

Le graphe en la figure 6.21 représente les trois humidités relatives sus mentionnées à travers toute la période de mesure.

Ayant la même forme, les deux courbes sinusoïdales des humidités relatives extérieures (entrée d'air) et de la station météo sont coupées par la courbe pratiquement linéaire de l'humidité relative de l'air intérieure (bouche de soufflage). Les points d'intersection des courbes représentent un écart d'humidité relative nul, généralement les courbes se croisent à 8h du matin et 24h. Les parties des courbes des deux humidités relatives de l'air au niveau de la tête de la tour et météo qui sont au dessus de la courbe de l'humidité relative de l'air au niveau de la bouche de soufflage représentent l'écart positif, traduit par l'augmentation de l'humidité relative par rapport à celle mesurée à l'extérieur (entrée d'air). Nous remarquons qu'inversement à la température, l'humidité relative augmente le soir avec la diminution de la température de l'air et diminue avec l'augmentation de la température avec un petit décalage horaire de 2h (figure 6.18 et figure 6.21).

Durant toute la période de mesure entre le 18 au 24 juillet 2007 (mesure sans humidification de la tour à vent), l'humidité relative de l'air moyenne mesurée au niveau de la bouche de soufflage était de 17,40%, ce taux est largement supérieur au taux d'humidité relative de l'air

mesuré au niveau de la tête de la tour (10,46%) car la toiture est exposée aux radiations intenses pendant toute la journée, donc les températures sont très élevées et les humidités relatives sont très faibles. Cela est dû au micro climat créé au niveau des bureaux et reste inférieur à celui donné par la station météo (20,26%). Les trois taux sont inférieurs à 30% est le climat est considéré comme très sec. Connaissant l'effet de rafraîchissement évaporatif de l'eau et le caractère hyper aride de la ville de Hassi Messaoud. En plus de l'effet de rafraîchissement par transfert de chaleur entre l'air et la masse de la tour à vent une humidification des conduits s'avère indispensable surtout du fait que les résultats des mesures de températures d'air et d'humidités relatives au niveau de la bouche de soufflage étaient inférieurs à la norme de confort.

Plusieurs travaux dans le monde ont confirmés la performance énergétique des techniques passives du rafraîchissement évaporatif dans les climats chaud et aride tel que les travaux de E. Erell, D. Pearlmutter, Y. Etzion, 2007

L'objectif de la deuxième période de mesure 25 au 31 juillet 2007 (mesures avec humidification) est de vérifier cet effet de rafraîchissement évaporatif passif et d'améliorer le potentiel et la performance thermique de la tour à vent.

Données Humidite

Mesures sans Humidification

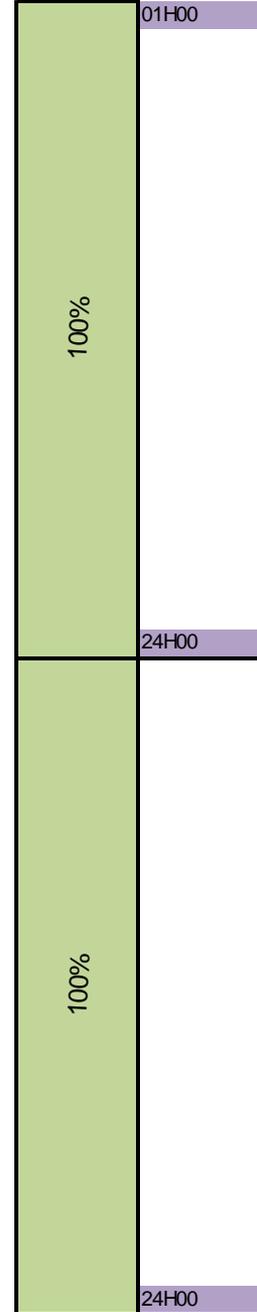
| | Hr METEO % | Hr EXT % | Hr INT % |
|-------|------------|----------|----------|
| 01H00 | 30 | 20 | 17 |
| 02H00 | 34 | 26 | 19 |
| 03H00 | 37 | 28 | 19 |
| 04H00 | 40 | 30 | 20 |
| 05H00 | 43 | 30 | 20 |
| 06H00 | 44 | 30 | 20 |
| 07H00 | 37 | 24 | 19 |
| 08H00 | 34 | 18 | 18 |
| 09H00 | 31 | 14 | 18 |
| 10H00 | 27 | 9 | 19 |
| 11H00 | 24 | 9 | 19 |
| 12H00 | 18 | 9 | 19 |
| 13H00 | 19 | 6 | 19 |
| 14H00 | 16 | 5 | 18 |
| 15H00 | 14 | 3 | 18 |
| 16H00 | 14 | 4 | 17 |
| 17H00 | 14 | 4 | 17 |
| 18H00 | 14 | 3 | 16 |
| 19H00 | 14 | 3 | 16 |
| 20H00 | 13 | 3 | 15 |
| 21H00 | 17 | 5 | 15 |
| 22H00 | 21 | 6 | 16 |
| 23H00 | 21 | 6 | 16 |
| 24H00 | 24 | 7 | 16 |
| 25H00 | 28 | 21 | 17 |
| 26H00 | 30 | 26 | 17 |
| 27H00 | 32 | 27 | 18 |
| 28H00 | 37 | 29 | 19 |
| 29H00 | 37 | 29 | 19 |
| 30H00 | 40 | 30 | 18 |
| 31H00 | 40 | 25 | 18 |
| 32H00 | 34 | 19 | 19 |
| 33H00 | 28 | 14 | 19 |
| 34H00 | 23 | 10 | 18 |
| 35H00 | 20 | 7 | 18 |
| 36H00 | 16 | 3 | 17 |
| 37H00 | 15 | 3 | 17 |
| 38H00 | 14 | 2 | 16 |
| 39H00 | 13 | 1 | 16 |
| 40H00 | 11 | 2 | 16 |
| 41H00 | 11 | 2 | 16 |
| 42H00 | 12 | 3 | 17 |
| 43H00 | 12 | 4 | 17 |
| 44H00 | 14 | 5 | 18 |
| 45H00 | 17 | 6 | 19 |
| 46H00 | 20 | 7 | 20 |
| 47H00 | 22 | 7 | 19 |
| 48H00 | 21 | 6 | 17 |

Hr INT - Hr EXT

| |
|-----|
| -3 |
| -7 |
| -9 |
| -10 |
| -10 |
| -10 |
| -5 |
| 0 |
| 4 |
| 10 |
| 10 |
| 10 |
| 10 |
| 13 |
| 13 |
| 15 |
| 13 |
| 13 |
| 13 |
| 13 |
| 13 |
| 12 |
| 10 |
| 10 |
| 10 |
| 9 |
| -4 |
| -9 |
| -9 |
| -10 |
| -10 |
| -12 |
| -7 |
| 0 |
| 5 |
| 8 |
| 11 |
| 14 |
| 14 |
| 14 |
| 15 |
| 14 |
| 14 |
| 14 |
| 13 |
| 13 |
| 13 |
| 12 |
| 11 |

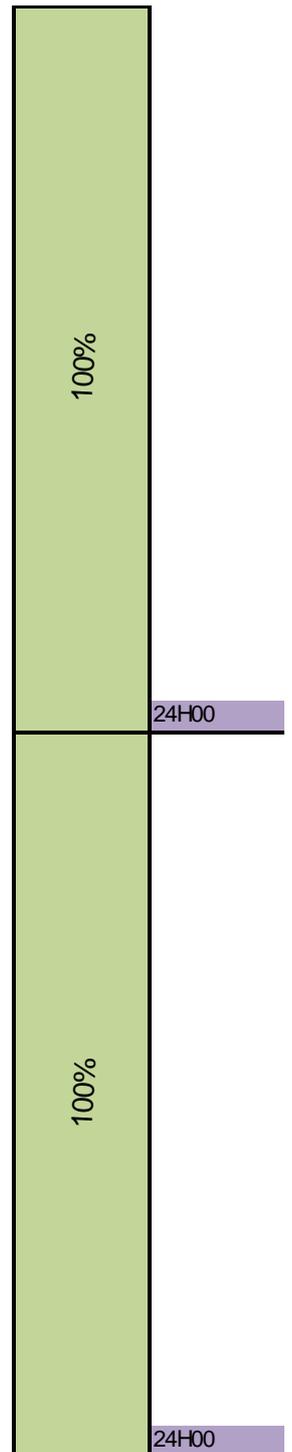
%

Heure



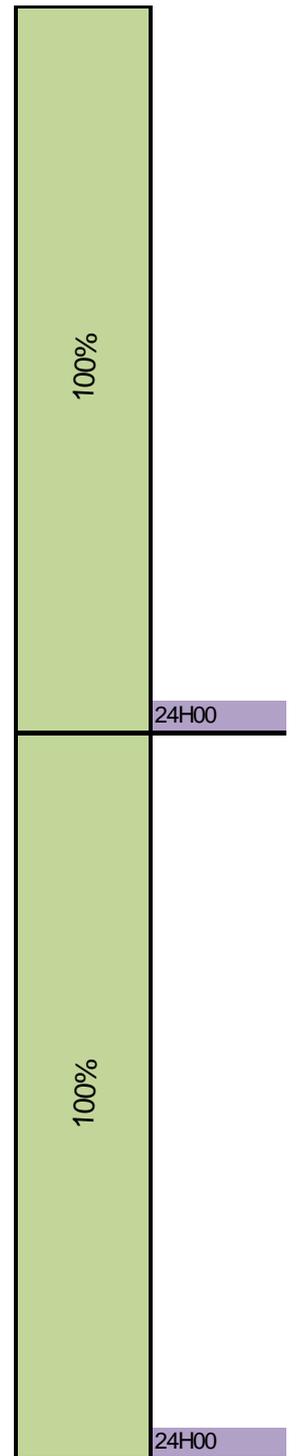
| | | | |
|-------|----|----|----|
| 49H00 | 23 | 22 | 18 |
| 50H00 | 23 | 27 | 18 |
| 51H00 | 25 | 28 | 19 |
| 52H00 | 28 | 30 | 20 |
| 53H00 | 29 | 29 | 20 |
| 54H00 | 27 | 28 | 19 |
| 55H00 | 27 | 24 | 19 |
| 56H00 | 23 | 20 | 20 |
| 57H00 | 20 | 15 | 19 |
| 58H00 | 22 | 9 | 18 |
| 59H00 | 17 | 9 | 18 |
| 60H00 | 15 | 9 | 18 |
| 61H00 | 12 | 7 | 18 |
| 62H00 | 13 | 6 | 17 |
| 63H00 | 12 | 3 | 17 |
| 64H00 | 10 | 4 | 17 |
| 65H00 | 11 | 4 | 17 |
| 66H00 | 13 | 4 | 18 |
| 67H00 | 14 | 3 | 18 |
| 68H00 | 17 | 3 | 18 |
| 69H00 | 19 | 5 | 18 |
| 70H00 | 21 | 7 | 19 |
| 71H00 | 24 | 8 | 19 |
| 72H00 | 25 | 8 | 18 |
| 73H00 | 25 | 25 | 18 |
| 74H00 | 27 | 32 | 19 |
| 75H00 | 30 | 32 | 19 |
| 76H00 | 36 | 33 | 20 |
| 77H00 | 34 | 31 | 19 |
| 78H00 | 31 | 28 | 18 |
| 79H00 | 30 | 23 | 18 |
| 80H00 | 26 | 18 | 19 |
| 81H00 | 20 | 13 | 18 |
| 82H00 | 17 | 7 | 17 |
| 83H00 | 15 | 6 | 17 |
| 84H00 | 13 | 5 | 17 |
| 85H00 | 12 | 4 | 17 |
| 86H00 | 11 | 4 | 16 |
| 87H00 | 10 | 2 | 16 |
| 88H00 | 0 | 3 | 16 |
| 89H00 | 0 | 4 | 16 |
| 90H00 | 0 | 4 | 17 |
| 91H00 | 9 | 3 | 17 |
| 92H00 | 12 | 2 | 17 |
| 93H00 | 16 | 2 | 18 |
| 94H00 | 19 | 2 | 19 |
| 95H00 | 20 | 2 | 18 |
| 96H00 | 21 | 2 | 17 |

| |
|-----|
| -4 |
| -9 |
| -9 |
| -10 |
| -9 |
| -9 |
| -5 |
| 0 |
| 4 |
| 9 |
| 9 |
| 9 |
| 11 |
| 11 |
| 14 |
| 13 |
| 13 |
| 14 |
| 15 |
| 15 |
| 13 |
| 12 |
| 11 |
| 10 |
| -7 |
| -13 |
| -13 |
| -13 |
| -12 |
| -10 |
| -5 |
| 1 |
| 5 |
| 10 |
| 11 |
| 12 |
| 13 |
| 12 |
| 14 |
| 13 |
| 12 |
| 13 |
| 13 |
| 14 |
| 15 |
| 16 |
| 17 |
| 16 |
| 15 |



| | | | |
|--------|----|----|----|
| 97H00 | 26 | 21 | 17 |
| 98H00 | 28 | 19 | 19 |
| 99H00 | 28 | 19 | 19 |
| 100H00 | 26 | 20 | 20 |
| 101H00 | 27 | 20 | 20 |
| 102H00 | 30 | 21 | 19 |
| 103H00 | 32 | 20 | 19 |
| 104H00 | 23 | 19 | 19 |
| 105H00 | 17 | 14 | 19 |
| 106H00 | 16 | 9 | 19 |
| 107H00 | 14 | 9 | 19 |
| 108H00 | 13 | 9 | 19 |
| 109H00 | 12 | 7 | 18 |
| 110H00 | 11 | 4 | 17 |
| 111H00 | 10 | 3 | 17 |
| 112H00 | 9 | 4 | 17 |
| 113H00 | 0 | 4 | 16 |
| 114H00 | 10 | 4 | 15 |
| 115H00 | 11 | 3 | 15 |
| 116H00 | 12 | 3 | 14 |
| 117H00 | 17 | 6 | 15 |
| 118H00 | 20 | 8 | 16 |
| 119H00 | 21 | 8 | 16 |
| 120H00 | 22 | 8 | 16 |
| 121H00 | 23 | 12 | 16 |
| 122H00 | 24 | 8 | 17 |
| 123H00 | 23 | 9 | 17 |
| 124H00 | 22 | 9 | 16 |
| 125H00 | 22 | 11 | 17 |
| 126H00 | 29 | 12 | 18 |
| 127H00 | 27 | 15 | 18 |
| 128H00 | 22 | 19 | 19 |
| 129H00 | 22 | 14 | 18 |
| 130H00 | 19 | 9 | 17 |
| 131H00 | 14 | 7 | 17 |
| 132H00 | 15 | 4 | 16 |
| 133H00 | 14 | 3 | 16 |
| 134H00 | 11 | 2 | 17 |
| 135H00 | 11 | 1 | 17 |
| 136H00 | 10 | 3 | 17 |
| 137H00 | 9 | 3 | 15 |
| 138H00 | 10 | 4 | 14 |
| 139H00 | 12 | 4 | 14 |
| 140H00 | 13 | 4 | 14 |
| 141H00 | 18 | 5 | 14 |
| 142H00 | 19 | 5 | 14 |
| 143H00 | 20 | 5 | 14 |
| 144H00 | 23 | 5 | 14 |

| |
|----|
| -4 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| -2 |
| -1 |
| 0 |
| 5 |
| 10 |
| 10 |
| 10 |
| 11 |
| 13 |
| 14 |
| 13 |
| 12 |
| 11 |
| 12 |
| 11 |
| 9 |
| 8 |
| 8 |
| 8 |
| 4 |
| 9 |
| 8 |
| 7 |
| 6 |
| 6 |
| 3 |
| 0 |
| 4 |
| 8 |
| 10 |
| 12 |
| 13 |
| 15 |
| 16 |
| 14 |
| 12 |
| 10 |
| 10 |
| 10 |
| 9 |
| 9 |
| 9 |
| 9 |



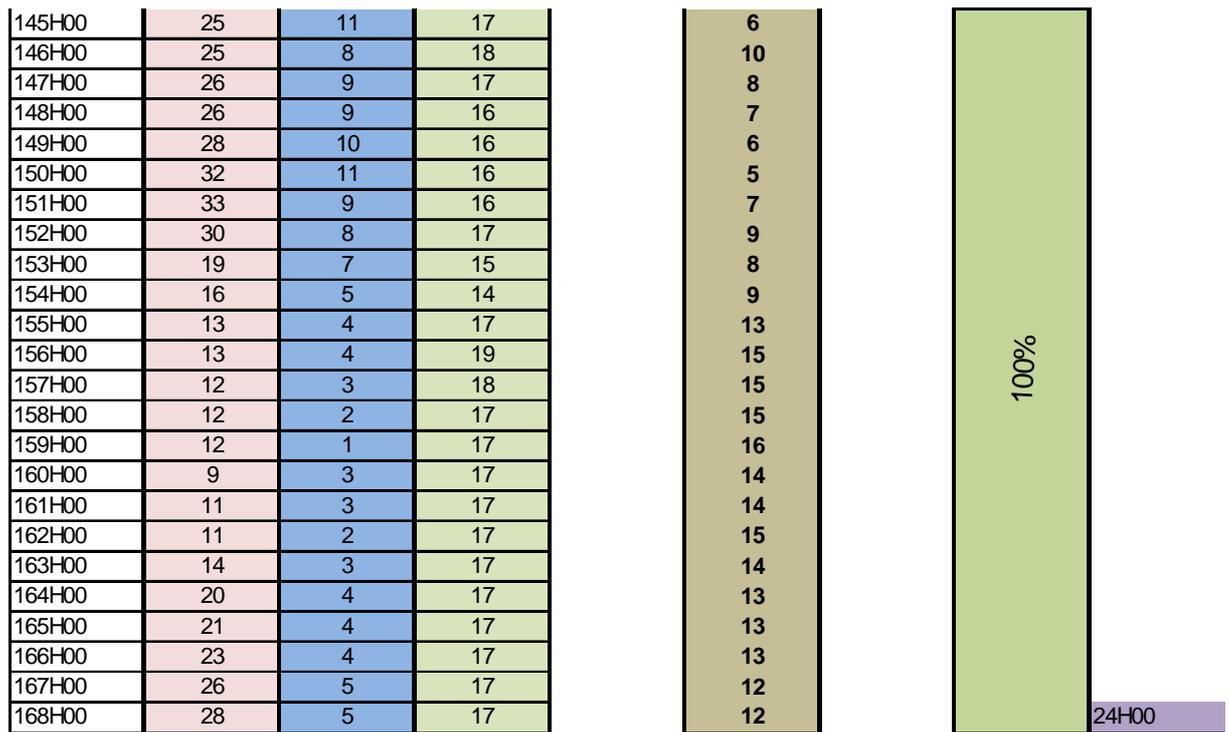


Tableau 6.6 : Mesures des humidités météo, extérieures et intérieures période 18 au 24 Juillet 2007

Légende

| | | | | | |
|--|--------------|--|-------------------------------------|--|------------------------|
| | Hr int < 30% | | $30\% \leq \text{Hr int} \leq 70\%$ | | $70\% < \text{Hr int}$ |
|--|--------------|--|-------------------------------------|--|------------------------|

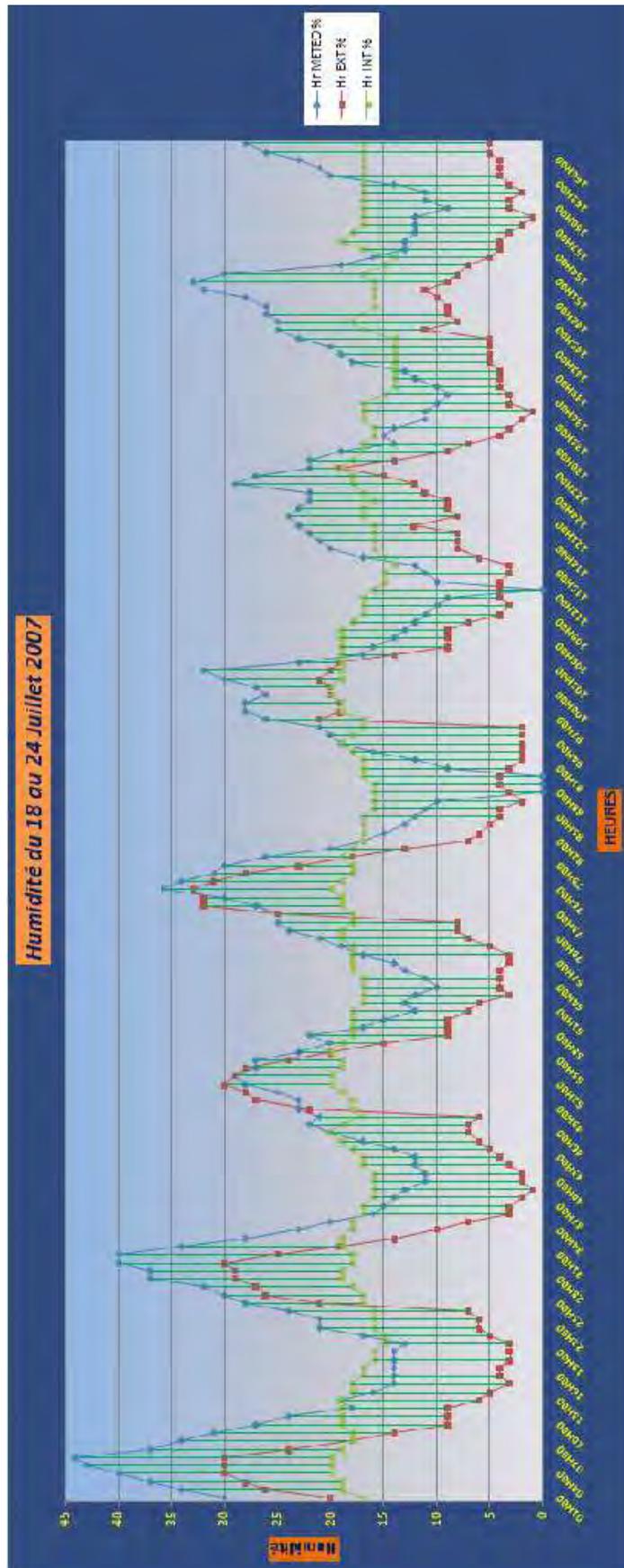


Figure 6.151 : Courbes des humidités pour la période du 18 au 24 Juillet 2007

6.2.2 Interprétation des résultats des mesures avec humidification période du 25 au 31 Juillet 2007

Le système de goutte à goutte a été mis en service. Une humidification complète des conduits intérieurs en brique et le remplissage du bassin d'eau au niveau de la base de la tour à été entrepris afin d'entamer les mesures de température et humidité relative de l'air.

La température donnée par la station météo pour la période du 25 au 31 juillet permet de remarquer qu'elle atteint son minimum à 6h du matin et son maximum à 16h de l'après midi.

La température minimale donnée pour cette période par la station météo est de 24°C enregistrée à 6h le premier jour, la température maximale était de 44°C enregistrée à 15h30 le troisième jour. La température moyenne était de 34,88°C (tableau 6.3, Données Température, Annexe 6 résultats et interprétations).

La température de la station Ext (au niveau de la tête) atteint son minimum de 26,8°C à 6h du matin et son maximum de 47,6°C à 16h. La température moyenne pour la même période, prise au niveau de la tête de la tour est de 37,88°C. (Tableau 6.3, Données Température, Annexe 6 résultats et interprétations).

La température de la station Int (au soufflage) atteint son minimum de 21°C à 2h du matin et son maximum de 30,7°C à 14h00, la température intérieure moyenne mesurée au niveau de la bouche de soufflage est de 26,75°C (tableau 6.3, Données Température, Annexe 6 résultats et interprétations).

En comparant les températures mesurées à l'extérieure, au niveau de la tête de la tour à ceux de la station météo, nous constatons qu'il y a une augmentation de température d'une moyenne de 3°C.

L'humidité relative donnée par la station météo pour la période du 25 au 31 juillet permet de remarquer qu'elle atteint son maximum à 6h du matin et son minimum à 16h de l'après midi. 21,73%.

L'humidité relative minimale donnée pour cette période par la station météo est de 0% enregistrée à 16h la première journée, elle est de 9% la deuxième journée. L'humidité maximale donnée était de 42% enregistrée à 5h le cinquième jour. L'humidité relative moyenne était de 21,73% (tableau 6.4 Données Humidité Annexe 6 résultats et interprétations).

Durant le mois de mai, le système d'humidification était utilisé 24/24 durant toute la période de mesure (du 22 au 25) ou il a été constaté que les résultats obtenus relatifs à l'humidité relative mesurée au niveau de la bouche de soufflage étaient légèrement élevés, pour cela, il a

été décidé de faire fonctionner le système d'humidification une journée sur deux pour le reste des mesures avec humidification à savoir les mois de Juin, Juillet et Août.

En comparant les humidités relatives mesurées à l'extérieure, au niveau de la tête de la tour à ceux de la station météo, nous avons constaté qu'il y a une diminution considérable d'humidité relative l'écart moyen pour cette période est de 13,55%. Ceci pourrait être expliqué par l'exposition de la toiture au soleil sans protection. En plus de la chaleur naturelle, le caractère industriel et pétrolier de la ville ainsi que l'absence des mesures et stratégies pour répondre au climat rude de la ville de Hassi Messaoud. L'implantation de la station météorologique dans un micro climat particulièrement boisé expliquerait aussi cet écart d'humidité.

L'humidité relative mesurée au niveau de la station Ext (au niveau de la tête de la tour) atteint son minimum de 1% à 15h de l'après midi pendant le deuxième, troisième, sixième et septième jour de la période de mesure et ne dépasse pas les 4% le reste des jours. L'humidité relative maximale est de 22% enregistrée le cinquième et sixième jour à 7h du matin. L'humidité relative extérieure moyenne pour la même période, prise au niveau de la tête de la tour était de 8,18%, (tableau 6.4 Données des Humidités, Annexe 6 résultats et interprétations).

L'humidité relative mesurée au niveau de la station Int (bouche de soufflage) atteint son minimum de 19% à 12h durant le cinquième jour. Elle atteint son maximum de 84% le dernier jour de la prise de mesure à 20h. L'humidité relative intérieure moyenne mesurée au niveau de la bouche de soufflage pour cette période est de 46,26%. Cette dernière rentre dans la norme de confort en domaine d'humidité ($30 < HR < 70$ norme **ASHRAE 55 - 1992**).

La mise en service du système d'humidification durant la période du 25 au 31 juillet a diminuer la température de l'air au niveau de la bouche de soufflage d'une façon considérable en la comparant à la température intérieure durant la période du 18 au 24.

L'écart entre les deux températures de l'air est de 6,59°C. Nous constatons aussi une augmentation du taux d'humidité relative mesurée au niveau de la bouche de soufflage, l'écart est de 28,86%, l'humidification diminue la température et augmente l'humidité relative de l'air et rapproche ces deux paramètres des conditions de confort. Plusieurs expériences confirment ce résultat, la réduction de la température en utilisant un système de rafraichissement évaporatif était de 4 à 10°C, E. Erell, Y. Etzion, D. Pearlmutter, 2006.

6.2.2.1 Discussion des écarts des mesures de températures avec humidification période du 25 au 31 Juillet 2007

Une fois la prise de mesure terminée, l'étape suivante était de vérifier le pouvoir de rafraichissement par transfert de chaleur vers la masse jumelé à celui du rafraichissement évaporatif par l'utilisation de l'eau. Cela est possible grâce au calcul de l'écart entre la température de l'air extérieure mesurée au niveau de la tête de la tour et la température de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage (figure 6.22).

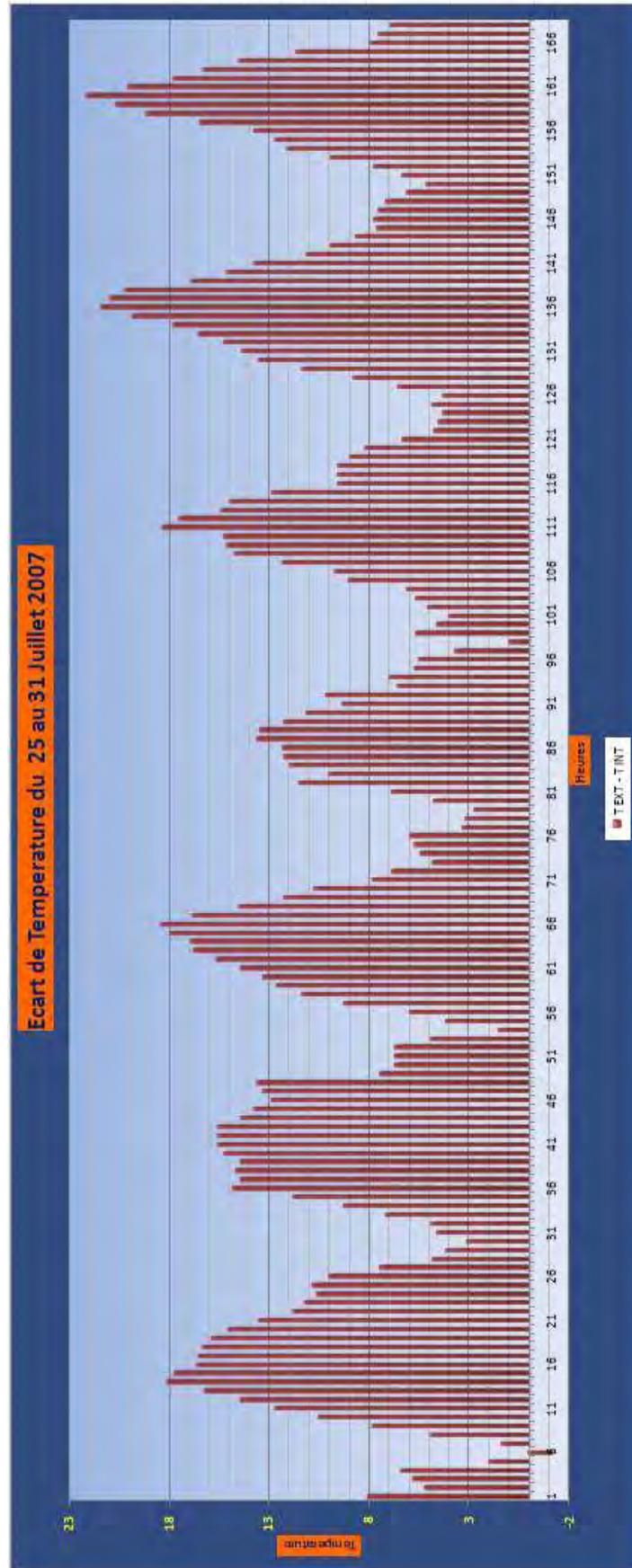


Figure 6.152 : Ecart de la température période du 25 au 31 Juillet 2007

La première journée (Le 25/07/2007) :

Un écart de température de l'air négatif entre la station Ext et la station Int avec une température de l'air intérieure (bouche de soufflage) supérieure à la température de l'air extérieur (entrée d'air) est enregistré le premier jour à 6h. Un écart de température de l'air positif où la température de l'air intérieur au niveau de la bouche de soufflage est inférieure à la température de l'air extérieure au niveau de la tête de la tour est enregistré durant le reste du temps. Cette période représente 95,83% de la journée (tableau 6.3 première journée, figure.22).

La période où l'écart est négatif dure 1h de 5h à 6h du matin, il est de $-4,7^{\circ}\text{C}$.

La période où l'écart est positif dure 23h, l'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de $+18,1^{\circ}\text{C}$ à 14h ($\Delta T > 18^{\circ}\text{C}$ résultat de la simulation).

Nous remarquons que la température de l'air à l'intérieure, mesurée au niveau de la bouche de soufflage suit le même rythme que les températures de l'air extérieure et météorologique, elle a une amplitude de $5,8^{\circ}\text{C}$, inférieure à l'amplitude de la température de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour qui est de $14,1^{\circ}\text{C}$. Ceci influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent.

L'effet de rafraîchissement évaporatif passif de la tour à vent est enregistré sur toute la journée, au fur et à mesure que la température au niveau de la tête croît, l'effet évaporatif augmente. Le rendement maximal de la tour est réalisé entre 10h et 24h ($10,5^{\circ}\text{C} < \Delta T < 18^{\circ}\text{C}$) l'écart maximal de $18,1^{\circ}\text{C}$ est obtenu à 14h, il est de $17,7^{\circ}\text{C}$ à 15h. Durant cet interval de temps, le besoin de rafraîchissement est le plus demandé, surtout que dans la région de Hassi Messaoud, l'utilisation de la climatisation artificielle est à son maximum durant cette période (tableau 6.3, première journée).

La nuit tombée, la température de l'air à l'extérieur de la tour à vent diminue et la température de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage diminue aussi, malgré qu'il y a restitution de chaleur par les parois de la tour, ainsi que celle des murs intérieurs des conduits. Cette chaleur accumulée par radiation au contact de l'air frais la nuit va être restitué et chauffera l'air à l'intérieur des conduits de la tour à vent, mais grâce à l'effet de rafraîchissement par évaporation d'eau utilisé durant cette période, l'air à l'intérieur des conduits est refroidit. Malgré que l'écart des températures de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour et moins important que celui enregistré la journée et surtout durant la période entre 12h et 20h, les températures de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage reste basse (entre 25 et 23°C). Ces températures sont considérées comme très confortables.

Les températures de l'air à l'intérieur du bureau (bouche de soufflage) reste toujours inférieures aux températures de l'air à l'extérieur (entrée d'air), le besoin d'ouvrir les fenêtres n'est plus nécessaire pour ventiler l'espace et diminuer la température d'air.

Avec une température de l'air maximale de 28,9°C à 10h du matin à l'intérieur du bureau (au soufflage), l'utilisation de la climatisation n'est plus indispensable même pendant les heures de pique.

La deuxième journée (Le 26/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de +15,5°C entre 16h et 19h ($15^{\circ}\text{C} < \Delta T < 18^{\circ}\text{C}$).

L'amplitude de la température de l'air au soufflage est de 9,4°C, elle est inférieure à l'amplitude de la température de l'air à l'entrée qui est de 15,7°C (figure 6.22).

Le rendement maximal de la tour à vent est effectuée entre 11h du matin et 24h ($11,8^{\circ}\text{C} < \Delta T < 15,5^{\circ}\text{C}$) l'écart maximal de 15,5°C est obtenu à 15h, (tableau 6.3, deuxième journée).

La nuit tombée, les températures de l'air mesurées au niveau de la bouche de soufflage restent basse (entre 27 et 21°C). Ces températures sont considérées comme très confortables.

La troisième journée (Le 27/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de +18,4°C à 18h ($\Delta T > 18^{\circ}\text{C}$) (tableau 6.3 troisième journée).

La température de l'air au soufflage a une amplitude de 7,8°C, inférieure à l'amplitude de la température de l'air à l'entrée qui est de 16,7°C. La température de l'air extérieur influe directement sur l'écart de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour à vent

Le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 10h et 20h ($10,7^{\circ}\text{C} < \Delta T < 18,4^{\circ}\text{C}$) l'écart maximal de 18,4°C est obtenu à 18h du soir, (figure 6.22).

La nuit tombée, malgré que l'écart des températures de l'air entre l'extérieur et l'intérieur et moins important que celui enregistré la journée et surtout durant la période entre 10h et 20h, les températures de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage reste basse (entre 28,6 et 22,9°C). Ces températures sont considérées comme très confortables (figure 6.24).

La quatrième journée (Le 28/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $+13,6^{\circ}\text{C}$ à 15h ($10^{\circ}\text{C} < \Delta T < 15^{\circ}\text{C}$), (tableau 6.3 quatrième journée).

La température de l'air au soufflage a une amplitude de 4°C , inférieure à l'amplitude de la température de l'air à l'entrée qui est de $12,7^{\circ}\text{C}$.

Le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 10h et 20h ($10^{\circ}\text{C} < \Delta T < 13,6^{\circ}\text{C}$) l'écart maximal de $13,6^{\circ}\text{C}$ est obtenu à 15h, (tableau 6.3, quatrième journée).

La nuit tombée, malgré que l'écart des températures de l'air entre l'extérieur et l'intérieur et moins important que celui enregistré la journée et surtout durant la période entre 10h et 20h, les températures de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage reste basse (entre $28,4$ et $26,6^{\circ}\text{C}$) (figure 6.22). Ces températures sont considérées comme très confortables.

La cinquième journée (Le 29/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $+18,3^{\circ}\text{C}$ à 15h ($\Delta T > 18^{\circ}\text{C}$ résultat de la simulation), (tableau 6.3 cinquième journée).

L'amplitude de la température de l'air au soufflage a une amplitude de $4,8^{\circ}\text{C}$, inférieure à l'amplitude de la température de l'air à l'entrée qui est de $14,1^{\circ}\text{C}$.

Le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 10h et 20h ($12,3^{\circ}\text{C} < \Delta T < 18,3^{\circ}\text{C}$) l'écart maximal de $18,3^{\circ}\text{C}$ (figure 6.22) est obtenu à 15h, (tableau 6.3, cinquième journée).

La nuit tombée, malgré que l'écart des températures de l'air entre l'extérieur et l'intérieur et moins important que celui enregistré la journée et surtout durant la période entre 10h et 20h, les températures de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage reste basse (entre 28 et 26°C). Ces températures sont considérées comme très confortables.

La sixième journée (Le 30/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arrivé à son maximum de $+21,4^{\circ}\text{C}$ à 16h ($\Delta T > 18^{\circ}\text{C}$ résultat de la simulation) (tableau 6.3 sixième journée).

L'amplitude de la température de l'air au soufflage de $3,9^{\circ}\text{C}$ est inférieure à l'amplitude de la température de l'air à l'entrée qui est de $19,2^{\circ}\text{C}$ (figure 6.22).

Le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 9h et 23h ($11,1^{\circ}\text{C} < \Delta T < 21,4^{\circ}\text{C}$) l'écart maximal de $21,4^{\circ}\text{C}$ est obtenu à 16h, (tableau 6.3, sixième journée).

La nuit tombée, malgré que l'écart des températures de l'air entre l'extérieur et l'intérieur et moins important que celui enregistré la journée et surtout durant la période entre 9h et 23h, les

températures de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage reste basse (entre 25,9 et 22,6°C). Ces températures sont considérées comme très confortables.

La septième journée (Le 31/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +22,1°C à 16h ($\Delta T > 18^\circ\text{C}$ résultat de la simulation) (tableau 6.3 septième journée).

L'amplitude de la température de l'air au soufflage de 1,9°C est inférieure à l'amplitude de la température de l'air à l'extérieur, mesurée au niveau de la tête de la tour qui est de 17,1°C, (figure 6.24)

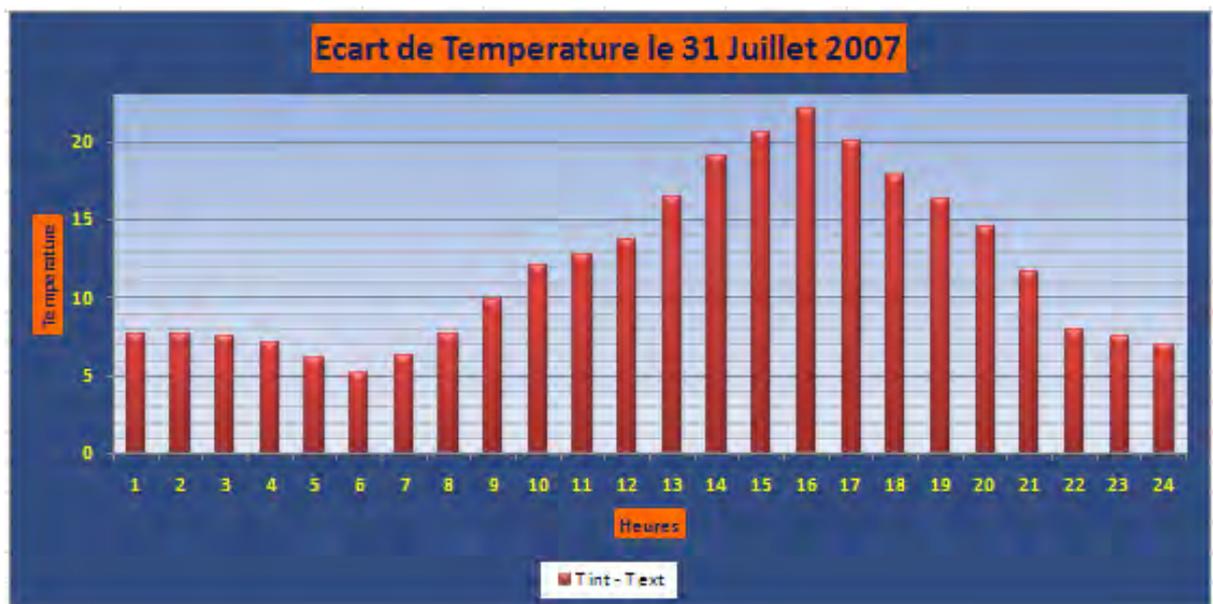


Figure 6.153 : Ecart de la température le 31 Juillet 2007

Le rendement maximal de la tour à vent est réalisé entre 10h et 21h ($11,6^\circ\text{C} < \Delta T < 22,1^\circ\text{C}$) l'écart maximal de 22,1°C est obtenu à 16h, (figure 6.23, tableau 6.3, septième journée).

La nuit tombée, malgré que l'écart des températures de l'air entre l'extérieur et l'intérieur et moins important que celui enregistré la journée et surtout durant la période entre 10h et 21h, les températures de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage reste basse (entre 29,79 et 25,4°C). Ces températures sont considérées comme très confortables.

Durant toute la période de mesure avec humidification entre le 25 au 31 juillet 2007, l'effet de rafraichissement évaporatif passif augmentait de jour en jour et l'écart entre les températures de l'air intérieur et extérieur de la tour à vent augmentait aussi, il atteint une valeur très importante de l'ordre de 22,1°C le dernier jour. Cet écart de température est obtenu grâce au pouvoir et potentiel évaporatif efficace (figure 6.24).

En effet, l'efficacité de la tour à vent est strictement liée à son rôle évaporatif et à son pouvoir rafraichissant.

La température de l'air moyenne au soufflage pour la période du 25 au 31 juillet est de 26,75°C.

Contrairement aux graphes de la figure 6.18 où les trois courbes se croisent. En utilisant le système d'humidification, les températures de l'air mesurées au niveau de la bouche de soufflage sont toujours inférieures aux températures de l'air mesurées au niveau de la tête de la tour, ainsi le graphe des températures de l'air intérieur est toujours plus bas que le graphe des températures de l'air extérieur, l'écart positif est traduit par le rafraichissement évaporatif passif du bureau par le biais de la tour à vent. Nous remarquons que le rafraichissement augmente et l'écart entre les températures de l'air à l'intérieur et l'extérieur de la tour à vent s'accroît avec l'augmentation de la température de l'air à l'extérieur, l'effet est optimal entre 10h et 20h, le maximum d'écart est obtenu généralement à 15h (figure 6.24).

Cet interval de temps correspond à celui où l'utilisation de la climatisation est la plus utilisée, nous concluons que le système de rafraichissement en utilisant l'humidification participe considérablement à la réduction de la température de l'air à l'intérieur du bureau pour obtenir une température de l'air intérieure moyenne de 26,75°C (figure 6.24).

Plusieurs expériences ont été réalisées dans le monde où le système de rafraichissement évaporatif passif a montré son efficacité. Durant toute la période de l'exposition universelle de Séville 92, le temps de fonctionnement de l'appoint (système de rafraichissement conventionnel) n'a pas excédé 7% du temps total de conditionnement (Alvarez et al, 1991).

En utilisant un système de rafraichissement évaporatif passif dans le bâtiment du centre international pour les études du désert (BIC), Israël, l'écart de température enregistré est de 14°C, alors que l'humidité relative était de 65% (Y. Etzion, D. Pearlmutter, E. Erell, I.A. Meir, 1997).

Sur le projet du Momra Rowdah environnemental, Arabie Saoudite, réalisé par Nader V. Chalfoun, l'écart de température maximal enregistré à 15h était de 18,4°C. Le meilleur fonctionnement optimal du système se fait dans les jours les plus secs et chauds, exactement les jours où le fonctionnement optimal de la tour est désiré.

Données Temperature

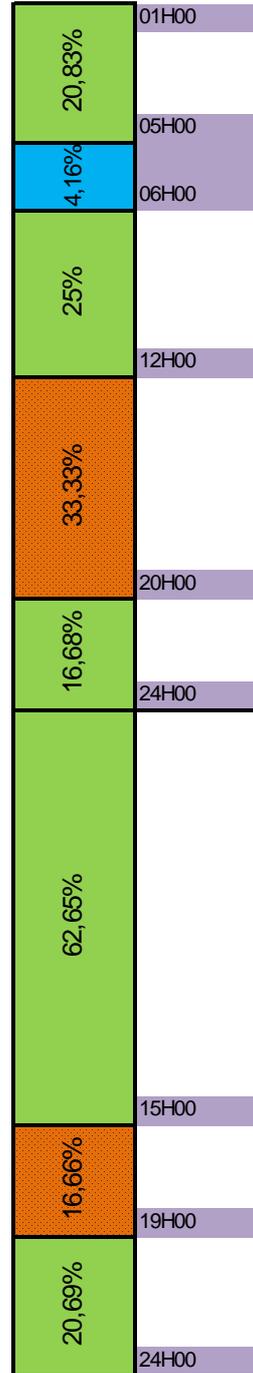
| | TMEIEO °C | TEXT °C | TINT °C |
|-------|-----------|---------|---------|
| 01H00 | 29 | 31,6 | 23,6 |
| 02H00 | 28,3 | 29,3 | 24,1 |
| 03H00 | 27,3 | 29,4 | 23,6 |
| 04H00 | 25,4 | 29,5 | 23,1 |
| 05H00 | 24,6 | 27,5 | 25,5 |
| 06H00 | 24 | 26,8 | 28 |
| 07H00 | 25,3 | 29,2 | 27,8 |
| 08H00 | 29 | 32,5 | 27,6 |
| 09H00 | 34,2 | 36,1 | 28,3 |
| 10H00 | 38,4 | 39,4 | 28,9 |
| 11H00 | 40 | 40,9 | 28,2 |
| 12H00 | 41 | 41,9 | 27,5 |
| 13H00 | 41,6 | 42,6 | 26,4 |
| 14H00 | 42 | 43,5 | 25,4 |
| 15H00 | 42,1 | 43,9 | 26,2 |
| 16H00 | 42,6 | 43,7 | 27,1 |
| 17H00 | 42,4 | 43,5 | 27 |
| 18H00 | 41,7 | 43,2 | 26,9 |
| 19H00 | 40,8 | 41,8 | 26 |
| 20H00 | 39 | 40,5 | 25,5 |
| 21H00 | 35 | 38,3 | 24,8 |
| 22H00 | 35,5 | 35,9 | 24,1 |
| 23H00 | 32,5 | 34,8 | 23,6 |
| 24H00 | 32 | 33,7 | 23,1 |
| 25H00 | 28,9 | 34,2 | 23,4 |
| 26H00 | 28 | 31,3 | 21,3 |
| 27H00 | 27,4 | 30,9 | 23,5 |
| 28H00 | 26,9 | 30,6 | 25,8 |
| 29H00 | 26,4 | 30,1 | 26 |
| 30H00 | 26,1 | 29,6 | 26,5 |
| 31H00 | 27 | 31,8 | 27,2 |
| 32H00 | 30,5 | 33 | 28,1 |
| 33H00 | 33 | 35,2 | 28,1 |
| 34H00 | 36,4 | 37,4 | 28,2 |
| 35H00 | 39 | 39,9 | 28,1 |
| 36H00 | 41 | 42,7 | 27,9 |
| 37H00 | 42 | 43,6 | 29,2 |
| 38H00 | 42,5 | 45,3 | 30,7 |
| 39H00 | 43,3 | 44,9 | 30,5 |
| 40H00 | 43,5 | 44,5 | 29,3 |
| 41H00 | 43,2 | 44,3 | 28,8 |
| 42H00 | 42,2 | 43,9 | 28,4 |
| 43H00 | 41,4 | 43,7 | 28,2 |
| 44H00 | 39 | 42,5 | 28,1 |
| 45H00 | 35,9 | 41,4 | 27,7 |
| 46H00 | 34,7 | 40,1 | 27,3 |
| 47H00 | 32,7 | 39,6 | 26,3 |
| 48H00 | 31,5 | 39,1 | 25,5 |

Mesures avec Humidification

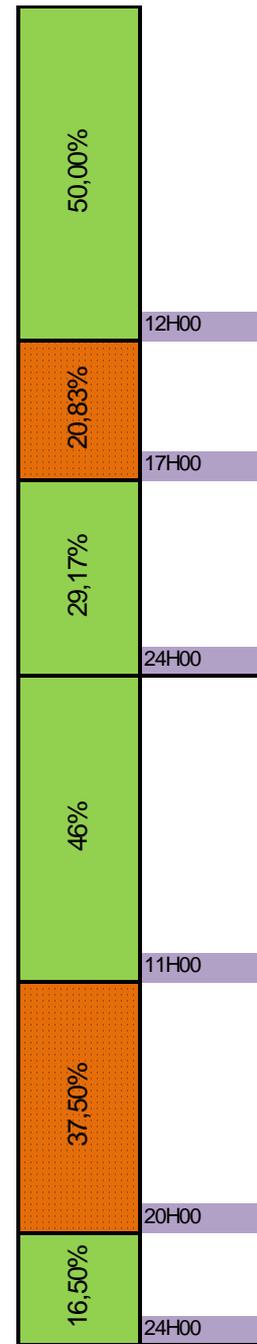
T EXT - T INT



% Heure



| | | | |
|--------|------|------|------|
| 97H00 | 30 | 31,3 | 27,6 |
| 98H00 | 29,4 | 30,2 | 29,2 |
| 99H00 | 28,2 | 31,7 | 26,1 |
| 100H00 | 26 | 32,8 | 28,2 |
| 101H00 | 25,4 | 32 | 28 |
| 102H00 | 24,5 | 31,6 | 26,6 |
| 103H00 | 25,4 | 31,8 | 26,2 |
| 104H00 | 29 | 31,9 | 25,8 |
| 105H00 | 31,5 | 34,3 | 25,3 |
| 106H00 | 33,8 | 36,5 | 26,8 |
| 107H00 | 35,2 | 39,6 | 27,3 |
| 108H00 | 36,5 | 42,1 | 27,4 |
| 109H00 | 37 | 42,6 | 27,5 |
| 110H00 | 37,4 | 43,1 | 27,9 |
| 111H00 | 38,1 | 46,7 | 28,4 |
| 112H00 | 38,5 | 45,7 | 28,2 |
| 113H00 | 38,5 | 45,1 | 29,7 |
| 114H00 | 37,9 | 44,8 | 29,9 |
| 115H00 | 37,1 | 40,8 | 28 |
| 116H00 | 36,1 | 36,7 | 27,2 |
| 117H00 | 33,7 | 35,5 | 26 |
| 118H00 | 31,6 | 34,4 | 24,9 |
| 119H00 | 30 | 33,4 | 24,5 |
| 120H00 | 28,8 | 32,3 | 24,1 |
| 121H00 | 27,7 | 31,5 | 25,2 |
| 122H00 | 27,3 | 31 | 26,3 |
| 123H00 | 26,8 | 30,9 | 26,4 |
| 124H00 | 26,4 | 30,8 | 26,5 |
| 125H00 | 25,6 | 29,3 | 24,5 |
| 126H00 | 25 | 27,8 | 23,5 |
| 127H00 | 25,5 | 29,5 | 23 |
| 128H00 | 28,8 | 31,4 | 22,6 |
| 129H00 | 33 | 34,4 | 23,1 |
| 130H00 | 35,4 | 37,3 | 23,8 |
| 131H00 | 37 | 38,3 | 24 |
| 132H00 | 38,5 | 39,4 | 24,2 |
| 133H00 | 39,4 | 41,2 | 24,7 |
| 134H00 | 40,5 | 43,1 | 25,3 |
| 135H00 | 41 | 45,2 | 25,4 |
| 136H00 | 40,6 | 47 | 25,6 |
| 137H00 | 41 | 46,8 | 25,9 |
| 138H00 | 40,5 | 46,5 | 26,3 |
| 139H00 | 40 | 43,1 | 26,2 |
| 140H00 | 38 | 41,2 | 26,1 |
| 141H00 | 36 | 39,5 | 25,8 |
| 142H00 | 34 | 36,7 | 25,6 |
| 143H00 | 33,4 | 35,6 | 25,7 |
| 144H00 | 32,3 | 34,5 | 25,9 |



| | | | |
|--------|------|------|------|
| 145H00 | 30,4 | 33,3 | 25,7 |
| 146H00 | 29,7 | 33,2 | 25,5 |
| 147H00 | 29 | 32,9 | 25,4 |
| 148H00 | 28 | 32,5 | 25,4 |
| 149H00 | 27,6 | 31,5 | 25,4 |
| 150H00 | 26,5 | 30,5 | 25,4 |
| 151H00 | 27 | 31,5 | 25,2 |
| 152H00 | 30,5 | 32,6 | 24,9 |
| 153H00 | 34,4 | 35,1 | 25,2 |
| 154H00 | 37 | 37,5 | 25,4 |
| 155H00 | 39,2 | 39 | 26,3 |
| 156H00 | 40,8 | 40,5 | 26,8 |
| 157H00 | 41,2 | 42,5 | 26,1 |
| 158H00 | 42 | 44,6 | 25,5 |
| 159H00 | 42,4 | 46,1 | 25,5 |
| 160H00 | 42,8 | 47,6 | 25,5 |
| 161H00 | 42,4 | 45,6 | 25,6 |
| 162H00 | 42 | 43,6 | 25,8 |
| 163H00 | 41 | 41,3 | 25 |
| 164H00 | 39,6 | 38,8 | 24,3 |
| 165H00 | 38,5 | 38,1 | 26,5 |
| 166H00 | 37,5 | 37,5 | 29,6 |
| 167H00 | 36,1 | 37,2 | 29,7 |
| 168H00 | 35 | 36,8 | 29,9 |

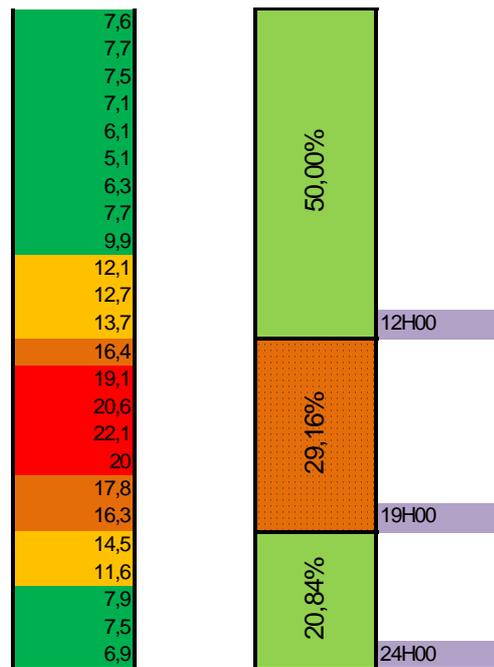


Tableau 6.7 : Mesures des températures météo, extérieures et intérieures période 25 au 31 Juillet 2007

Légende

| | | | | | |
|---|---|---|--|---|---|
|  | $\Delta T < 0^{\circ}\text{C}$ |  | $0 \leq \Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ |  | $10 \leq \Delta T < 15^{\circ}\text{C}$ |
|  | $15 \leq \Delta T < 18^{\circ}\text{C}$ |  | $18 \leq \Delta T$ | | |

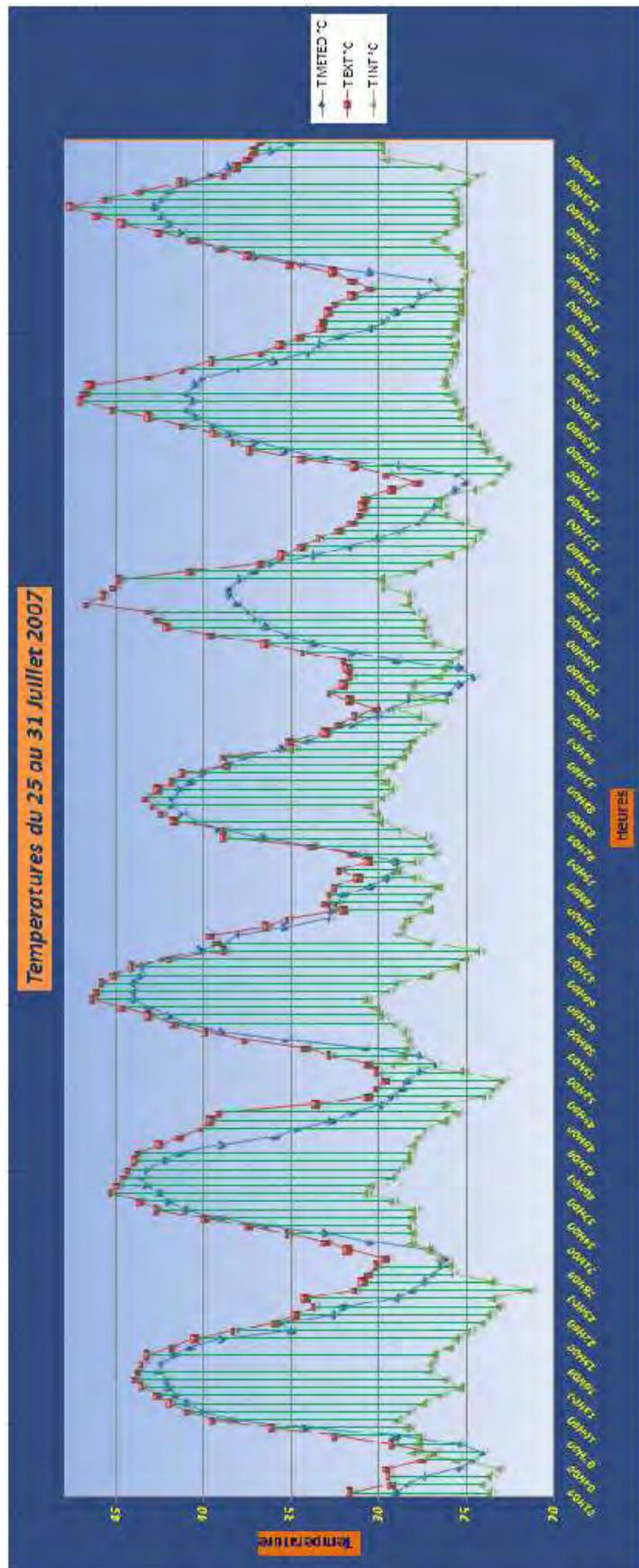


Figure 6.154 : Courbes des températures pour la période du 25 au 31 Juillet 2007

6.2.2.2 Discussion des écarts des mesures d'humidité avec humidification période du 25 au 31 Juillet 2007

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

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

L'analyse des écarts d'humidités relatives de l'air mesurées au niveau de l'entrée et au soufflage de l'air (figure 6.25) nous donne pour :

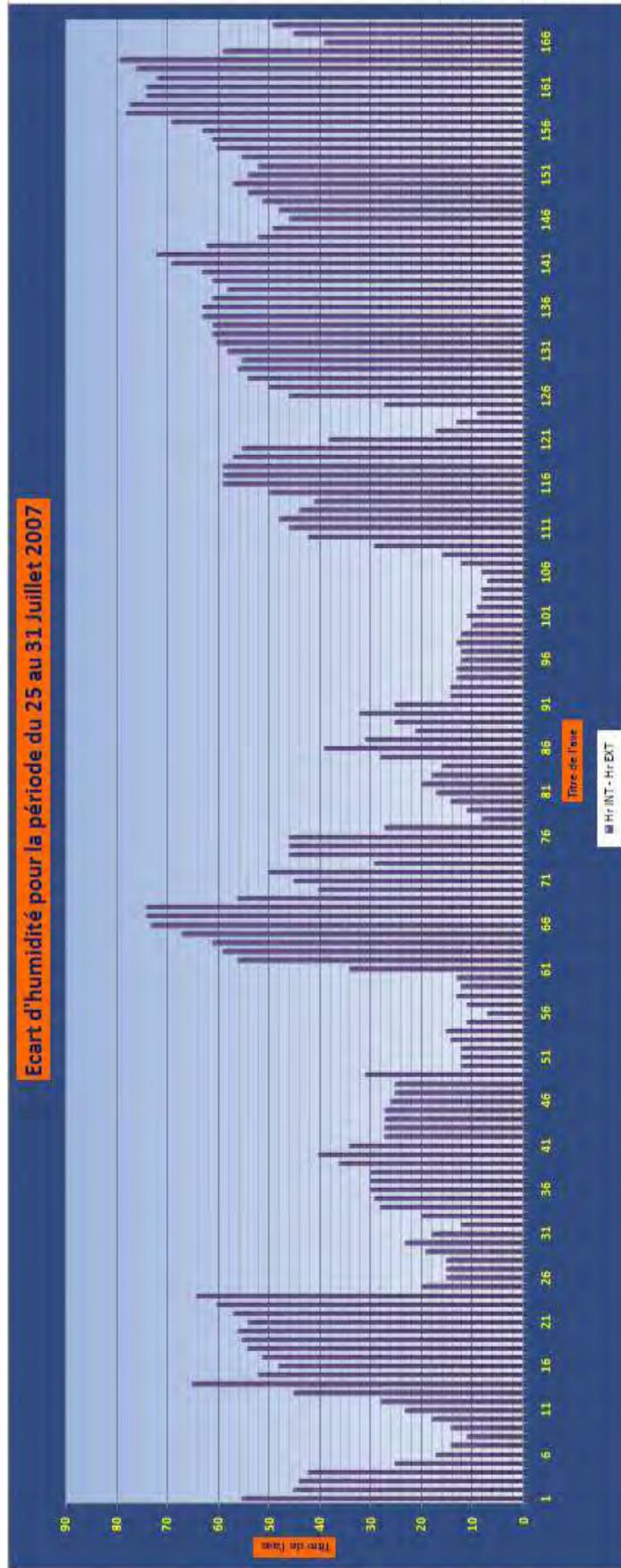


Figure 6.155 : Ecart d'humidité relative pour la période du 25 au 31 Juillet 2007

La première journée (Le 25/07/2007) :

Durant cette période de mesure le système d'humidification a été utilisé une journée sur deux. L'écart d'humidité relative de l'air est positif, où l'humidité relative de l'air intérieur au niveau de la bouche de soufflage est supérieure à l'humidité relative de l'air extérieure au niveau de la tête de la tour durant toute la journée (tableau 6.4, première journée, figure 6.25).

L'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +65% à 14h.

L'humidité relative de l'air au soufflage est très instable durant toute la journée et représente une amplitude de 49%. L'humidité relative de l'air à l'entrée est plus stable. Ayant une amplitude de 7%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative.

La tour à vent a un effet de rafraîchissement jumelé : par transfert de chaleur et par effet d'évaporation d'eau durant la journée entre 10h et 20h. Cet effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air à l'intérieur du bureau (au soufflage) diminue. Elle diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 19% à 8h.

L'humidité relative de l'air maximale enregistrée au niveau de la bouche de soufflage est de 68%, cette mesure est prise à 14h de l'après midi (tableau 6.4, première journée).

L'humidité relative de l'air maximale à l'entrée, enregistrée au niveau la tête de la tour est de 10%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure est 5,38%, cette humidité est nettement au dessous de la norme (**ASHRAE 55 - 1992** $30 \leq HR \leq 70$). L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 68%, l'humidité relative de l'air moyenne intérieure est de 46,92%, cette humidité est supérieure à 30%, l'air soufflé au niveau de la bouche de la tour est humide. Ce dernier provoque une sensation de rafraîchissement et de confort hygrométrique (**ASHRAE 55 - 1992**). Nous remarquons que durant la période entre 6h et 11h du matin soit 25% de la journée l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bureau est inférieure à 30%.

L'augmentation du taux de l'humidité dans l'air par évaporation de l'eau, améliore la sensation thermique en minimisant la chaleur sèche par une sensation de fraîcheur agréable pour l'ambiance intérieure.

La deuxième journée (Le 26/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +17% à 15h de l'après midi (journée sans humidification) (figure 6.25).

L'amplitude de l'humidité relative de l'air au soufflage est de 17%. L'amplitude de l'humidité relative de l'air à l'entrée est de 9%.

L'effet de rafraîchissement est mesuré durant la journée entre 10h et 20h. L'humidité relative de l'air minimum au soufflage est de 20% à 8h du matin.

L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 37%, cette mesure est prise à 15h de l'après midi (tableau 6.4, deuxième journée).

L'humidité relative de l'air maximale à l'entrée est de 10%, l'humidité relative de l'air moyenne à l'entrée est de 5,17% (figure 6.25). L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 37%, l'humidité relative de l'air moyenne au soufflage est de 30,08%, cette humidité est supérieure à 30%, l'air soufflé au niveau du bureau est humide. Ce dernier provoque une sensation de rafraîchissement et de confort hygrométrique (**ASHRAE 55 - 1992**). Nous remarquons que durant les périodes entre 0h à 9H et 22h à 24h soit 50% de la journée l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bureau est légèrement inférieure à 30%, (entre 23 et 29%), (figure 6.25).

La troisième journée (Le 27/07/2007) :

L'amplitude de l'humidité relative de l'air au soufflage est de 60% (journée avec humidification). L'amplitude de l'humidité relative de l'air à l'entrée est de 13%.

L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air au soufflage diminue. L'humidité relative minimale de l'air au soufflage est de 19% à 12h.

L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 79%, cette mesure est prise à 20h du soir (tableau 6.4, troisième journée, figure 6.25).

L'humidité relative de l'air maximale à l'entrée est de 14%, l'humidité relative de l'air moyenne extérieure est 6%. L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 79%, l'humidité relative de l'air moyenne au soufflage est de 41,50%, cette humidité est supérieure à 30%, l'air soufflé au niveau du bureau est humide. Nous remarquons que durant la période de 1h à 12h, l'humidité relative de l'air à l'intérieure du bureau est inférieure à 30% soit 45,83% de la journée, elle est supérieure à 70% entre 17h et 20h soit 12,5% de la journée et le reste du temps, elle est comprise entre 30 et 70%.

La quatrième journée (Le 28/07/2007) :

L'amplitude de l'humidité relative de l'air au soufflage est de 33% à 3h du matin (journée sans humidification). L'humidité relative de l'air à l'entrée a une amplitude de 8,18%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air. L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air à l'intérieur du bureau diminue. L'humidité relative de l'air diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 22% à 12h.

L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 55%, cette mesure est prise à 3h du matin (tableau 6.4, quatrième journée, figure 6.25).

L'humidité relative de l'air maximale à l'entrée est de 20%, l'humidité relative de l'air moyenne à l'entrée est de 11,75%. L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 55%, l'humidité relative de l'air moyenne au soufflage est de 35,29%. Cette humidité est supérieure à 30%, l'air soufflé au niveau du bureau est humide. Nous constatons que durant la période de 10h à 12h, l'humidité relative de l'air à l'intérieure du bureau est inférieure à 30% soit 8,33% de la journée, le reste du temps, elle est comprise entre 30 et 70%.

La cinquième journée (Le 29/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +54% à 22h (journée sans humidification).

L'amplitude de l'humidité relative de l'air au soufflage a une amplitude de 54%. L'humidité relative de l'air à l'entrée a une amplitude de 20%.

L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air au soufflage diminue. Elle diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 19% à 12h.

L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 73%, cette mesure est prise à 22h du soir (tableau 6.4, cinquième journée, figure 6.25).

L'humidité relative de l'air maximale à l'entrée enregistrée à la tête de la tour est de 22%, l'humidité relative de l'air moyenne à l'entrée est 10,58%. L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 73%, l'humidité relative de l'air moyenne au soufflage est de 40,38%, cette humidité est supérieure à 30%, l'air soufflé au niveau du bureau est humide. Nous remarquons que durant la période de 0h à 12h, l'humidité relative de l'air à l'intérieure du bureau est inférieure à 30% soit 45,83% de la journée, elle est supérieure à 70% entre 21h et 24h soit 12,5% de la journée, le reste du temps, elle est comprise entre 30 et 70%.

La sixième journée (Le 30/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +49% à 22h (journée avec humidification).

L'amplitude de l'humidité relative de l'air au soufflage est de 49%. L'humidité relative de l'air à l'entrée a une amplitude de 21%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative.

L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air au soufflage diminue. Elle diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 29% à 4h.

L'humidité relative de l'air maximale enregistrée au soufflage est de 78%, cette mesure est prise à 22h du soir (tableau 6.4, sixième journée, figure 6.25).

L'humidité relative de l'air maximale à l'entrée est de 22%, l'humidité relative de l'air moyenne à l'entrée est de 10,75%. L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 78%, l'humidité relative de l'air moyenne au soufflage est de 61,69%, cette humidité est supérieure à 30%, l'air soufflé au niveau du bureau est humide. Nous remarquons que durant les périodes de 6h à 9h et de 20h à 22h, l'humidité relative de l'air à l'intérieure du bureau est supérieure à 70% soit 20,83% de la journée. Le reste du temps, elle est comprise entre 30 et 70%.

La septième journée (Le 31/07/2007) :

L'écart augmente durant cette période pour arriver à son maximum de +40% à 20h (journée avec humidification).

L'amplitude de l'humidité relative de l'air au soufflage est de 40% à 20h du soir (journée avec humidification). L'humidité relative de l'air à l'entrée a une amplitude de 17%, elle influe directement sur l'écart de l'humidité relative de l'air, (figure 6.26).

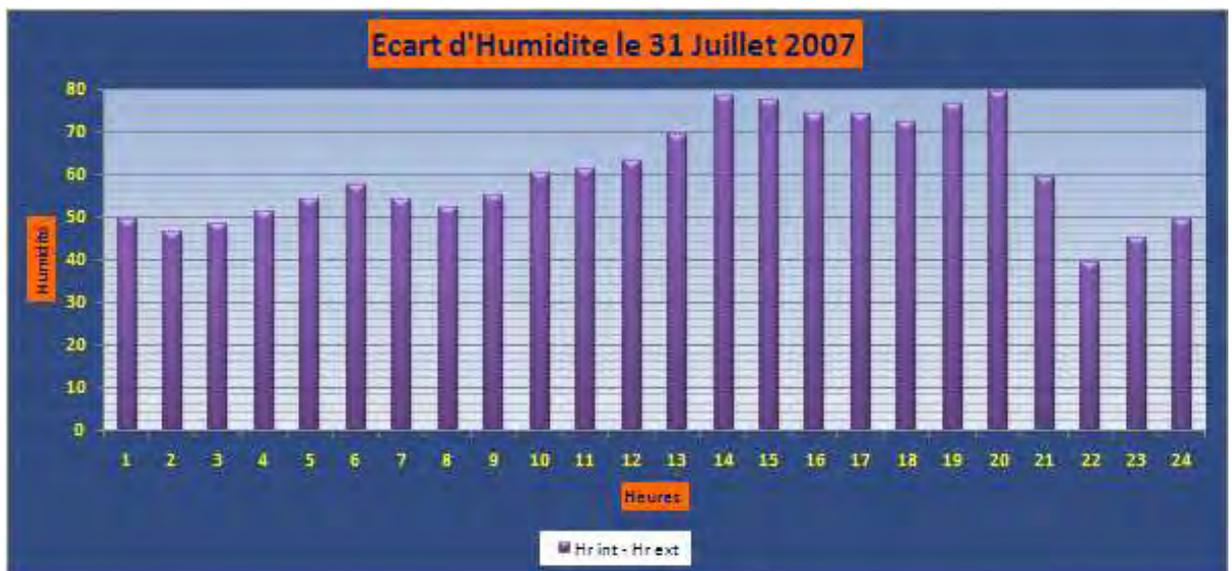


Figure 6.156 : Ecart d'humidité relative le 31 Juillet 2007

L'effet de rafraîchissement augmente et le taux d'humidité relative de l'air au soufflage diminue. Elle diminue le long de la journée pour atteindre son minimum de 44% à 22h du soir.

L'humidité relative de l'air maximale enregistrée au soufflage est de 84%, cette mesure est prise à 20h du soir (tableau 6.4, septième journée, figure 6.26).

L'humidité relative de l'air maximale à l'entrée est de 16%, l'humidité relative de l'air moyenne à l'entrée est 7,67%. L'humidité relative de l'air maximale au soufflage est de 84%, l'humidité relative de l'air moyenne au soufflage est de 67,71% (figure 6.26), cette humidité est supérieure à 30%, l'air soufflé au niveau du bureau est humide. Nous constatons que durant la période de 12h à 20h, l'humidité relative de l'air à l'intérieure du bureau est supérieure à 70% soit 1/3 de la journée. Le reste du temps, elle est comprise entre 30 et 70%. L'humidité relative de l'air à l'entrée et l'humidité relative de l'air donnée par la station météo forme une courbe sinusoïdale régulière ayant une période ou un rythme régulier de 24h. L'écart moyen pour toute la période de mesure entre ces deux humidités est de 13,55% (Hr met –Hr ext) (figure 6.27).

L'humidité relative de l'air au soufflage est très instable durant toute la période de mesure puisque l'humidification n'était pas continue (une journée sur deux), l'humidité relative de l'air au soufflage moyenne pour la période du 25 au 31 juillet est de 46,26% (valeur comprise entre 30 et 70%).

Le graphe de la figure 6.27 représente les trois humidités relatives sus mentionnées à travers toute la période de mesure.

Les deux courbes sinusoïdales des humidités relatives à l'entrée et de la station météo ont la même allure. Malgré l'irrégularité de la courbe de l'humidité relative de l'air au soufflage, elle est toujours au dessus de la courbe de l'humidité relative de l'air à l'entrée. L'écart positif est traduit par l'augmentation de l'humidité relative par rapport à celle mesurée à l'entrée. Nous remarquons qu'inversement à la température, l'humidité relative augmente le soir avec la diminution de la température et diminue avec l'augmentation de la température avec un petit décalage horaire de 2h (figure 6.24 et 6.27).

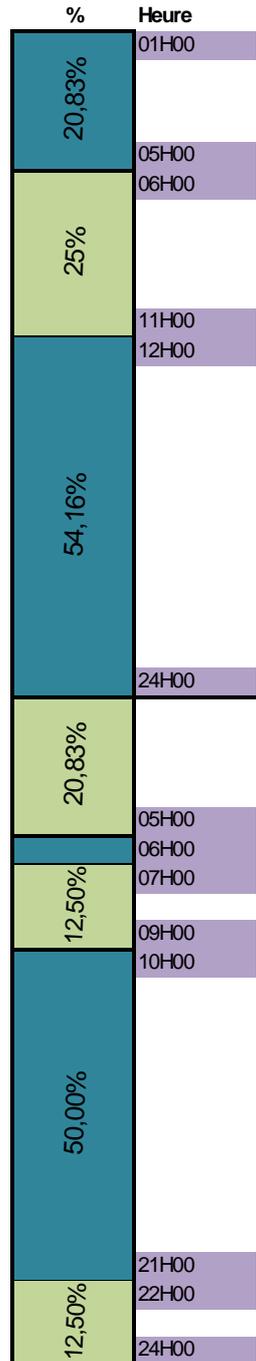
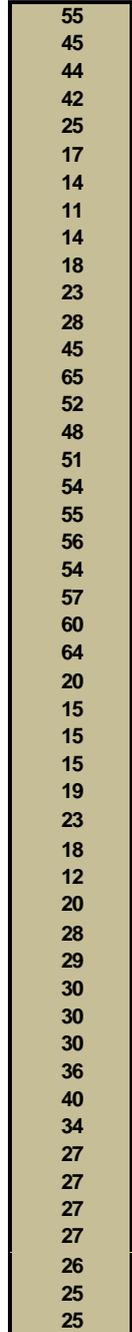
Durant toute la période de mesure entre le 25 au 31 juillet 2007 (mesure avec humidification), l'humidité relative de l'air moyenne mesurée au niveau de la bouche de soufflage était de 46,26%. Ce taux est largement supérieur au taux d'humidité relative de l'air mesurée au niveau de la tête de la tour (8,18%). Cela est dû à l'augmentation du taux d'humidité grâce au système d'humidification des conduits de la tour à vent. Les deux taux d'humidité relative de l'air (météo et extérieur) sont inférieurs à 30% est le climat est considéré comme très sec. Par contre le taux d'humidité à l'intérieur du bureau est inclus entre 30 et 70%, il est de 46,26%, Ce taux répond aux normes de confort.

Données Humidite

| | Hr METEO % | Hr EXT % | Hr INT % |
|-------|------------|----------|----------|
| 01H00 | 30 | 6 | 61 |
| 02H00 | 32 | 8 | 53 |
| 03H00 | 33 | 8 | 52 |
| 04H00 | 32 | 9 | 51 |
| 05H00 | 34 | 9 | 34 |
| 06H00 | 35 | 10 | 27 |
| 07H00 | 34 | 9 | 23 |
| 08H00 | 28 | 8 | 19 |
| 09H00 | 17 | 7 | 21 |
| 10H00 | 11 | 5 | 23 |
| 11H00 | 10 | 5 | 28 |
| 12H00 | 9 | 4 | 32 |
| 13H00 | 0 | 4 | 49 |
| 14H00 | 0 | 3 | 68 |
| 15H00 | 0 | 3 | 55 |
| 16H00 | 0 | 3 | 51 |
| 17H00 | 0 | 3 | 54 |
| 18H00 | 0 | 3 | 57 |
| 19H00 | 9 | 3 | 58 |
| 20H00 | 12 | 3 | 59 |
| 21H00 | 21 | 5 | 59 |
| 22H00 | 18 | 3 | 60 |
| 23H00 | 18 | 4 | 64 |
| 24H00 | 18 | 4 | 68 |
| 25H00 | 27 | 6 | 26 |
| 26H00 | 29 | 8 | 23 |
| 27H00 | 28 | 8 | 23 |
| 28H00 | 22 | 8 | 23 |
| 29H00 | 24 | 8 | 27 |
| 30H00 | 28 | 8 | 31 |
| 31H00 | 30 | 8 | 26 |
| 32H00 | 26 | 8 | 20 |
| 33H00 | 26 | 9 | 29 |
| 34H00 | 20 | 10 | 38 |
| 35H00 | 17 | 7 | 36 |
| 36H00 | 15 | 3 | 33 |
| 37H00 | 13 | 3 | 33 |
| 38H00 | 12 | 2 | 32 |
| 39H00 | 9 | 1 | 37 |
| 40H00 | 9 | 2 | 42 |
| 41H00 | 9 | 2 | 36 |
| 42H00 | 10 | 3 | 30 |
| 43H00 | 9 | 3 | 30 |
| 44H00 | 12 | 3 | 30 |
| 45H00 | 17 | 3 | 30 |
| 46H00 | 20 | 3 | 29 |
| 47H00 | 20 | 4 | 29 |
| 48H00 | 24 | 4 | 29 |

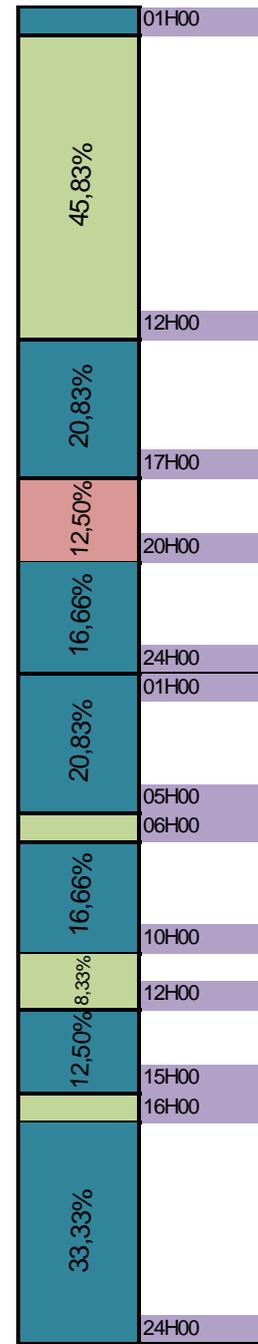
Mesures avec Humidification

Hr INT - Hr EXT



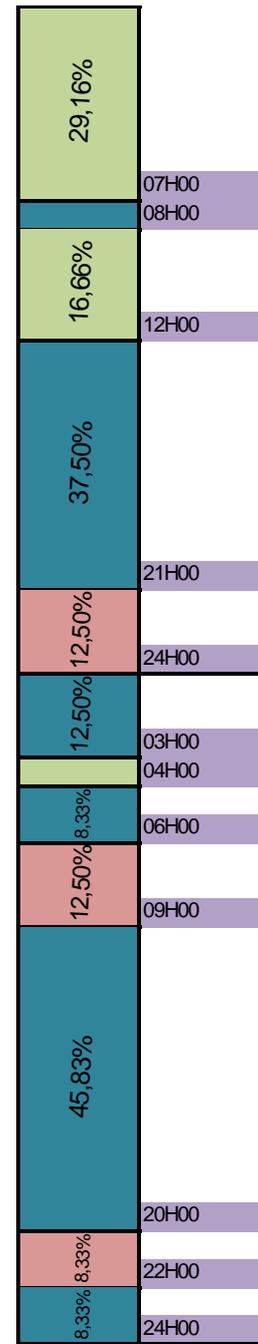
| | | | |
|-------|----|----|----|
| 49H00 | 22 | 7 | 38 |
| 50H00 | 24 | 8 | 20 |
| 51H00 | 25 | 8 | 20 |
| 52H00 | 25 | 8 | 20 |
| 53H00 | 25 | 8 | 22 |
| 54H00 | 26 | 8 | 23 |
| 55H00 | 28 | 11 | 22 |
| 56H00 | 24 | 14 | 21 |
| 57H00 | 22 | 10 | 21 |
| 58H00 | 17 | 7 | 20 |
| 59H00 | 16 | 7 | 19 |
| 60H00 | 13 | 6 | 19 |
| 61H00 | 11 | 4 | 38 |
| 62H00 | 13 | 2 | 58 |
| 63H00 | 12 | 1 | 60 |
| 64H00 | 13 | 2 | 63 |
| 65H00 | 13 | 2 | 69 |
| 66H00 | 13 | 2 | 75 |
| 67H00 | 14 | 3 | 77 |
| 68H00 | 18 | 5 | 79 |
| 69H00 | 19 | 5 | 61 |
| 70H00 | 21 | 5 | 45 |
| 71H00 | 24 | 5 | 50 |
| 72H00 | 28 | 6 | 56 |
| 73H00 | 30 | 14 | 43 |
| 74H00 | 31 | 9 | 55 |
| 75H00 | 34 | 9 | 55 |
| 76H00 | 35 | 9 | 55 |
| 77H00 | 36 | 14 | 41 |
| 78H00 | 38 | 18 | 26 |
| 79H00 | 41 | 19 | 30 |
| 80H00 | 38 | 20 | 34 |
| 81H00 | 28 | 15 | 32 |
| 82H00 | 23 | 10 | 30 |
| 83H00 | 16 | 8 | 26 |
| 84H00 | 16 | 6 | 22 |
| 85H00 | 15 | 6 | 34 |
| 86H00 | 15 | 6 | 45 |
| 87H00 | 14 | 4 | 35 |
| 88H00 | 14 | 6 | 27 |
| 89H00 | 15 | 6 | 31 |
| 90H00 | 16 | 6 | 38 |
| 91H00 | 17 | 9 | 34 |
| 92H00 | 17 | 16 | 30 |
| 93H00 | 27 | 17 | 31 |
| 94H00 | 26 | 19 | 32 |
| 95H00 | 24 | 18 | 31 |
| 96H00 | 23 | 18 | 30 |

| |
|----|
| 31 |
| 12 |
| 12 |
| 12 |
| 14 |
| 15 |
| 11 |
| 7 |
| 11 |
| 13 |
| 12 |
| 13 |
| 34 |
| 56 |
| 59 |
| 61 |
| 67 |
| 73 |
| 74 |
| 74 |
| 56 |
| 40 |
| 45 |
| 50 |
| 29 |
| 46 |
| 46 |
| 46 |
| 27 |
| 8 |
| 11 |
| 14 |
| 17 |
| 20 |
| 18 |
| 16 |
| 28 |
| 39 |
| 31 |
| 21 |
| 25 |
| 32 |
| 25 |
| 14 |
| 14 |
| 13 |
| 13 |
| 12 |



| | | | |
|--------|----|----|----|
| 97H00 | 23 | 14 | 26 |
| 98H00 | 25 | 9 | 22 |
| 99H00 | 25 | 10 | 22 |
| 100H00 | 31 | 12 | 22 |
| 101H00 | 33 | 15 | 26 |
| 102H00 | 38 | 19 | 28 |
| 103H00 | 39 | 21 | 29 |
| 104H00 | 33 | 22 | 30 |
| 105H00 | 28 | 18 | 25 |
| 106H00 | 20 | 13 | 21 |
| 107H00 | 20 | 8 | 20 |
| 108H00 | 20 | 3 | 19 |
| 109H00 | 19 | 4 | 33 |
| 110H00 | 19 | 5 | 47 |
| 111H00 | 18 | 3 | 49 |
| 112H00 | 18 | 2 | 50 |
| 113H00 | 18 | 2 | 46 |
| 114H00 | 18 | 2 | 43 |
| 115H00 | 19 | 5 | 55 |
| 116H00 | 22 | 8 | 67 |
| 117H00 | 27 | 11 | 70 |
| 118H00 | 31 | 14 | 73 |
| 119H00 | 35 | 16 | 73 |
| 120H00 | 38 | 18 | 73 |
| 121H00 | 38 | 18 | 56 |
| 122H00 | 39 | 19 | 36 |
| 123H00 | 39 | 19 | 32 |
| 124H00 | 41 | 20 | 29 |
| 125H00 | 42 | 22 | 49 |
| 126H00 | 41 | 24 | 70 |
| 127H00 | 39 | 22 | 72 |
| 128H00 | 28 | 20 | 74 |
| 129H00 | 21 | 16 | 72 |
| 130H00 | 19 | 14 | 69 |
| 131H00 | 16 | 10 | 68 |
| 132H00 | 16 | 7 | 67 |
| 133H00 | 17 | 4 | 65 |
| 134H00 | 15 | 2 | 63 |
| 135H00 | 15 | 1 | 64 |
| 136H00 | 16 | 2 | 65 |
| 137H00 | 18 | 2 | 63 |
| 138H00 | 15 | 2 | 60 |
| 139H00 | 17 | 3 | 64 |
| 140H00 | 20 | 5 | 68 |
| 141H00 | 23 | 4 | 73 |
| 142H00 | 23 | 6 | 78 |
| 143H00 | 25 | 7 | 69 |
| 144H00 | 27 | 9 | 61 |

| |
|----|
| 12 |
| 13 |
| 12 |
| 10 |
| 11 |
| 9 |
| 8 |
| 8 |
| 7 |
| 8 |
| 12 |
| 16 |
| 29 |
| 42 |
| 46 |
| 48 |
| 44 |
| 41 |
| 50 |
| 59 |
| 59 |
| 57 |
| 55 |
| 38 |
| 17 |
| 13 |
| 9 |
| 27 |
| 46 |
| 50 |
| 54 |
| 56 |
| 55 |
| 58 |
| 60 |
| 61 |
| 61 |
| 63 |
| 63 |
| 61 |
| 58 |
| 61 |
| 61 |
| 63 |
| 69 |
| 72 |
| 62 |
| 52 |



| | | | |
|--------|----|----|----|
| 145H00 | 30 | 10 | 59 |
| 146H00 | 31 | 12 | 58 |
| 147H00 | 33 | 13 | 61 |
| 148H00 | 33 | 14 | 65 |
| 149H00 | 30 | 15 | 69 |
| 150H00 | 31 | 16 | 73 |
| 151H00 | 33 | 16 | 70 |
| 152H00 | 25 | 15 | 67 |
| 153H00 | 18 | 12 | 67 |
| 154H00 | 14 | 8 | 68 |
| 155H00 | 15 | 6 | 67 |
| 156H00 | 15 | 4 | 67 |
| 157H00 | 15 | 3 | 72 |
| 158H00 | 15 | 2 | 80 |
| 159H00 | 14 | 1 | 78 |
| 160H00 | 15 | 2 | 76 |
| 161H00 | 14 | 2 | 76 |
| 162H00 | 14 | 3 | 75 |
| 163H00 | 15 | 4 | 80 |
| 164H00 | 18 | 5 | 84 |
| 165H00 | 19 | 5 | 64 |
| 166H00 | 21 | 5 | 44 |
| 167H00 | 21 | 5 | 50 |
| 168H00 | 23 | 6 | 55 |

| |
|----|
| 49 |
| 46 |
| 48 |
| 51 |
| 54 |
| 57 |
| 54 |
| 52 |
| 55 |
| 60 |
| 61 |
| 63 |
| 69 |
| 78 |
| 77 |
| 74 |
| 74 |
| 72 |
| 76 |
| 79 |
| 59 |
| 39 |
| 45 |
| 49 |

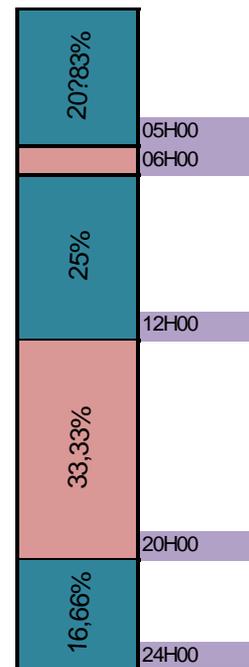


Tableau 6.8 : Mesures des humidités météo, extérieures et intérieures période 25 au 31 Juillet 2007

Légende

| | | | | | |
|--|--------------|--|--------------------|--|--------------|
| | Hr int < 30% | | 30% ≤ Hr int ≤ 70% | | 70% < Hr int |
|--|--------------|--|--------------------|--|--------------|

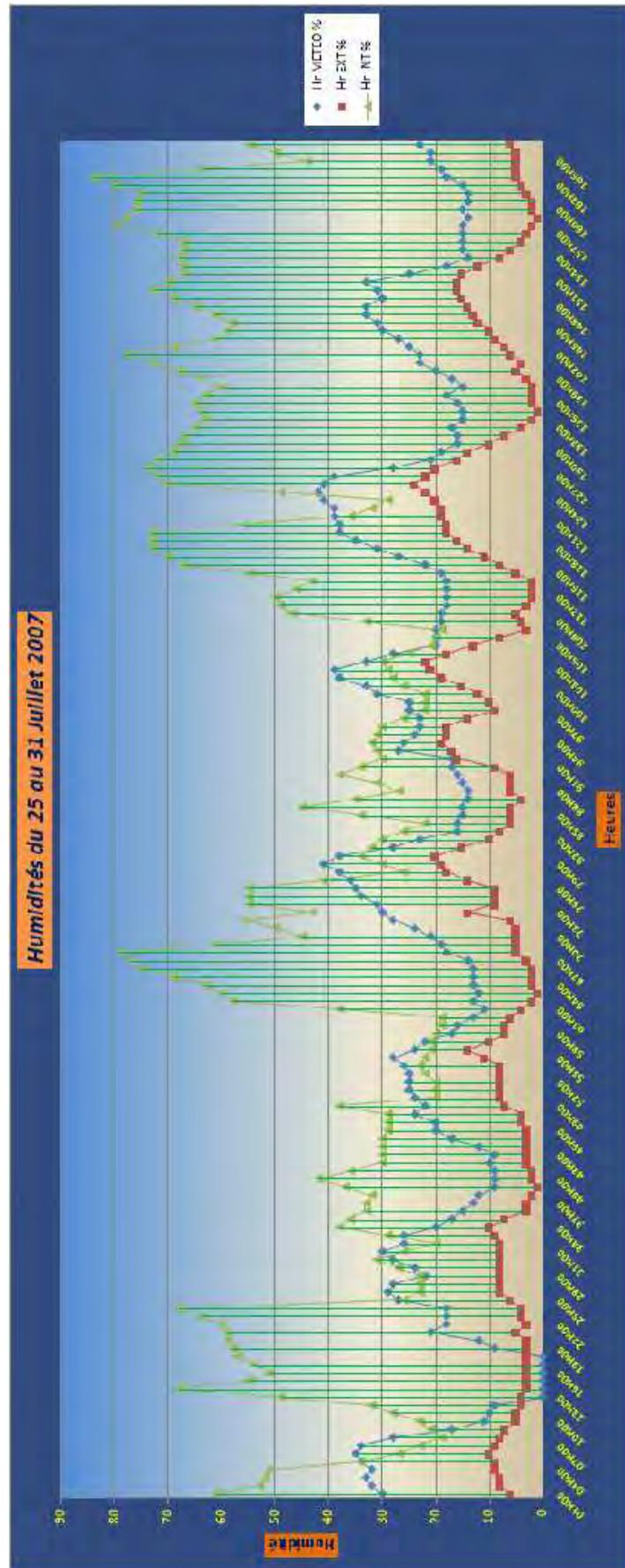


Figure 6.157 : Courbes des humidités pour la période du 25 au 31 Juillet 2007

Conclusion

Le refroidissement passif consiste à mettre à profit tout phénomène abaissant la température intérieure et ne consommant pas d'énergie. Il permet d'assurer, sous nos climats, un excellent confort estival, tout en évitant l'installation de coûteux systèmes de conditionnement d'air. En premier lieu, on cherche à réduire les gains de chaleur solaire (mesures de réduction des gains solaires). Dans la mesure où le climat le permet, on évacue l'excédent de chaleur en ventilant fortement. L'utilisation des tours à vent munies de système d'humidification permet d'avoir un rafraîchissement évaporatif passif durant toute la journée. Cela est possible grâce au transfert de chaleur entre l'air et la masse entrant dans les conduits et l'effet de rafraîchissement évaporatif de l'eau.

En premier lieu, nous avons pu voir l'effet de rafraîchissement de l'air grâce au transfert de chaleur entre l'air et la masse (brique rouge). L'écart maximal enregistré entre la température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur de la tour durant la première période de mesure sans humidification était de $14,5^{\circ}\text{C}$, mais la température de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage reste relativement élevée et ne rentre pas dans les limites de confort :

($-2\text{K} / 27,87^{\circ}\text{C} / +2\text{K}$) alors que la majorité des températures mesurées au soufflage sont supérieures à $29,87^{\circ}\text{C}$.

La nuit, la température de l'air au soufflage est plus élevée que la température de l'air à l'extérieur (restitution de la chaleur à l'intérieur des conduits, effet de masse), pour éviter l'utilisation de la climatisation, on peut appliquer le refroidissement passif par ventilation nocturne. Celui-ci consiste à refroidir la structure du bâtiment à l'aide de la ventilation naturelle, de manière à permettre à cette structure de dégager la chaleur accumulée dans le bâtiment pendant la journée (Alain Chatelet & Al ; 1998).

L'humidité relative de l'air maximale, mesurée au soufflage est de 20%, inférieure à 30%, elle reste au dessous de l'humidité de confort. Dans les régions chaudes et arides, la notion de confort est très attachée à l'hygrométrie, cette dernière est très faible, ce qui donne un mouvement d'air sec.

L'augmentation du taux de l'humidité de l'air par évaporation de l'eau, peut améliorer la sensation de confort en réduisant la chaleur sèche et créant une sensation de fraîcheur agréable pour l'ambiance intérieure.

L'obtention de la fraîcheur est le résultat de l'échange couplé entre l'air en circulation et l'eau en contact direct avec ce dernier. L'eau en circulation constante à l'intérieur de la tour à vent

atteint une température d'équilibre égale à la température humide de l'air introduit. En utilisant le système d'humidification, le taux d'humidité relative de l'air à l'intérieur du bureau augmente considérablement, 46,26% est le taux moyen pour la période de mesure entre le 25 et le 31 juillet 2007. Le taux moyen mesuré à l'extérieur de la tour à vent est de 8,18%.

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

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

En utilisant le système d'humidification, l'effet de rafraîchissement est plus important, l'écart maximal enregistré entre la température de l'air, à l'intérieur et à l'extérieur de la tour atteint 22,1°C, la température de l'air moyenne mesurée au soufflage pour cette période est de 26,75°C, cette température est considéré comme confortable, il ne faut plus recourir à la climatisation conventionnelle pour assurer des conditions de confort à l'intérieur du bureau.

Ce travail nous à permis de prédire le comportement du bureau (lieu d'expérimentation) sur toute la période de climatisation d'été, afin de localiser les jours ou heures d'inconfort éventuel, le temps d'utilisation du système de rafraîchissement, les conditions intérieures dans le bureau (température humidité relative) réalisée grâce à l'utilisation d'une technique passive (Tour à vent), le degré de confort et la qualité des ambiances (évaluée par comparaison aux normes données en ne considérant que le potentiel climatique du site et les exigences liées au confort des occupants).

Comparaison des résultats et graphes

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de la campagne de mesure des paramètres climatiques comme (températures et humidités relative de l'air) durant la période estivale entre le mois de Mai à Août. Durant chaque mois, les mesures ont été entrepris une fois avec humidification et une deuxième fois sans humidification, il est question de présenter et vérifier l'effet de rafraichissement passif en utilisant les caractéristiques physique des matériaux de construction (Transfert de chaleur) et le rôle que joue l'humidification dans le rafraichissement passif évaporatif. Le but de la comparaison est de confirmer les résultats obtenus durant cette période et illustrer l'apport considérable de l'utilisation des tours à vent dans les climats chauds et arides surtout en utilisant l'humidification.

7.1 Objectif des campagnes de mesure (avec et sans humidification)

Durant la période entre le mois de Mai et le mois d'Août, les mesures ont été entrepris avec et sans humidification pour une durée d'une semaine pour chaque cas de figure. Le but de cette prise de mesure avec et sans humidification était de confirmer l'effet de rafraichissement passif seul de la tour à vent obtenu par le transfert de chaleur directe entre l'air entrant dans les conduits secs et humides et le matériau (à savoir les blocs de briques rouges) et l'effet de rafraichissement passif évaporatif en utilisant l'eau pour humidifier les conduits d'air de la partie centrale de la tour, le bassin d'eau au niveau de la base de la tour augmentera d'avantage le taux d'humidité et diminuera aussi la température de l'air allant vers la bouche de soufflage.

Comme il a été vérifié dans le chapitre 6 (résultats et interprétation), le coefficient de convection de transfert de chaleur de l'air traversant le matériau de stockage d'énergie est généralement faible.

L'augmentation de la surface de contact entre l'air entrant par la tête de la tour à vent et la brique (matériau de réalisation de la tour à vent) est la solution proposée dans la simulation faite par Y. BOUCHAHM en 2003. Cette augmentation de surface d'échange thermique doit se faire sans pour autant avoir d'excessives pertes de pressions d'air quand il traverse la tour à vent.

La masse de la brique rouge est d'environ 306 Kg, la partie centrale de la tour à vent a une surface d'échange ou transfert de chaleur de l'ordre de 127 m². On assiste ici à une

augmentation d'environ 5 fois de la surface d'échange. Nous enregistrons en mois de juillet un écart de température de 14,2°C pour atteindre une température de l'air à l'intérieur du bureau de 33,8°C par l'effet de tirage thermique et la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur.

Les conduits en brique rouge sont arrosés en permanence du haut, à l'entrée de l'air par l'utilisation d'un système d'arrosage (goutte à goutte). Cette eau est directement absorbée par les conduits qui ont une hygroscopicité importante, le transfert de chaleur se fait par évaporation d'eau. L'eau en s'évaporant absorbe une grande quantité de la chaleur de l'air entrant, l'écart maximal enregistré en mois de juillet est de 22,1°C, la température de l'air à l'intérieur du bureau était de 25,5°C tandis que l'humidité relative de l'air toujours à l'intérieur du bureau était de 80%.

La réalisation de la tour à vent a le pouvoir d'exploiter le potentiel de refroidissement évaporatif, et pourra distribuer l'air à l'intérieur du bureau avec des températures très basses et réduites. Par conséquent l'air soufflé est filtré de toute impureté et poussière venant de l'extérieure.

La comparaison de la performance de la tour à vent sans et avec humidification est faite pour les mois de Juin, Juillet et Août, elle ne peut être faite pour le mois de Mai car durant ce mois les mesures effectuées étaient avec humidification seulement.

7.2 Comparaison des graphes

Afin de vérifier l'effet de rafraichissement passif de la tour à vent réalisée à Hassi Messaoud et le rôle de l'humidification dans la réduction de la température de l'air ainsi que l'augmentation du taux d'humidité relative à l'intérieur du bureau, nous avons procédé à des comparaisons des résultats obtenus aux plages de confort. Les mesures obtenues représentées par des graphes des températures et des humidités relatives de l'air au niveau de la bouche de soufflage sont des outils d'illustration et de vérification nous permettant de distinguer cet effet de rafraichissement dans les deux cas de figures, avec et sans le système d'humidification.

Nous pouvons indiqués que les deux périodes de mesures ne présentent que peu de différences de températures à l'extérieur.

7.2.1 Comparaison des températures (mois de juin)

En se fiant aux résultats de la prise de mesure des températures de l'air au niveau de la bouche de soufflage durant le mois de Juin, nous remarquons que les températures de l'air au niveau de la bouche de soufflage (mesure prise avec humidification) sont inférieures à celles prises sans humidification.

Comme expliqué dans le chapitre 6 (résultats et interprétation), la mise en service du système d'humidification était faite en alternance (une journée sur deux). Ce principe d'humidification se répercute directement sur les résultats obtenus au niveau de la bouche de soufflage (figure 7.1). Avec la mise en marche du système d'humidification, le premier et le troisième jour, l'écart est très significatif, il est de l'ordre de 8°C le premier jour à 20h et de 12°C le troisième jour à 5h du matin. Alors, que l'écart devient moins important une fois ce système d'arrosage est interrompu, le deuxième, quatrième, cinquième et sixième jour, l'écart maximal calculé durant ces quatre jours est de 7°C.

Le septième jour l'écart est nul, l'effet de l'humidification des conduits de la tour à vent n'est pas enregistré ce jour-ci.

Lorsque le système d'humidification est mis en marche l'eau va être absorbée par les conduits en briques qui sont perméable à l'eau. Une fois la tour bien humidifier, l'air sec entrant par la tête sera aspirer vers le bas par l'effet de tirage thermique, en traversant les conduits en brique humidifiés le phénomène de l'échange entre la masse et l'air s'effectue, donc l'évaporation est déclenché, l'air en s'humidifiant va être rafraichie et devient plus dense, il descend vers le bas ou il passe par une deuxième phase d'humidification et cette fois-ci par le bassin d'eau qui se trouve au pied de la tour à vent. Donc une additionnelle réduction de la température de l'air par humidification est confirmée. C'est pour cela la température de l'air au soufflage avec humidification est plus basse que celle mesurée sans humidification.

Cependant, il est important à mentionner que lorsque l'humidification est interrompue le second jour, les conduits en brique contiennent encore de l'humidité mais pas autant que le premier jour. Donc la réduction de la température et le rafraichissement sont effectués mais d'une manière moindre que dans le premier cas (avec humidification). En effet si l'écart entre les deux jours (avec et sans humidification) est important (on enregistre un écart de 8°C), c'est par ce que le phénomène humidificateur joue un rôle très important.

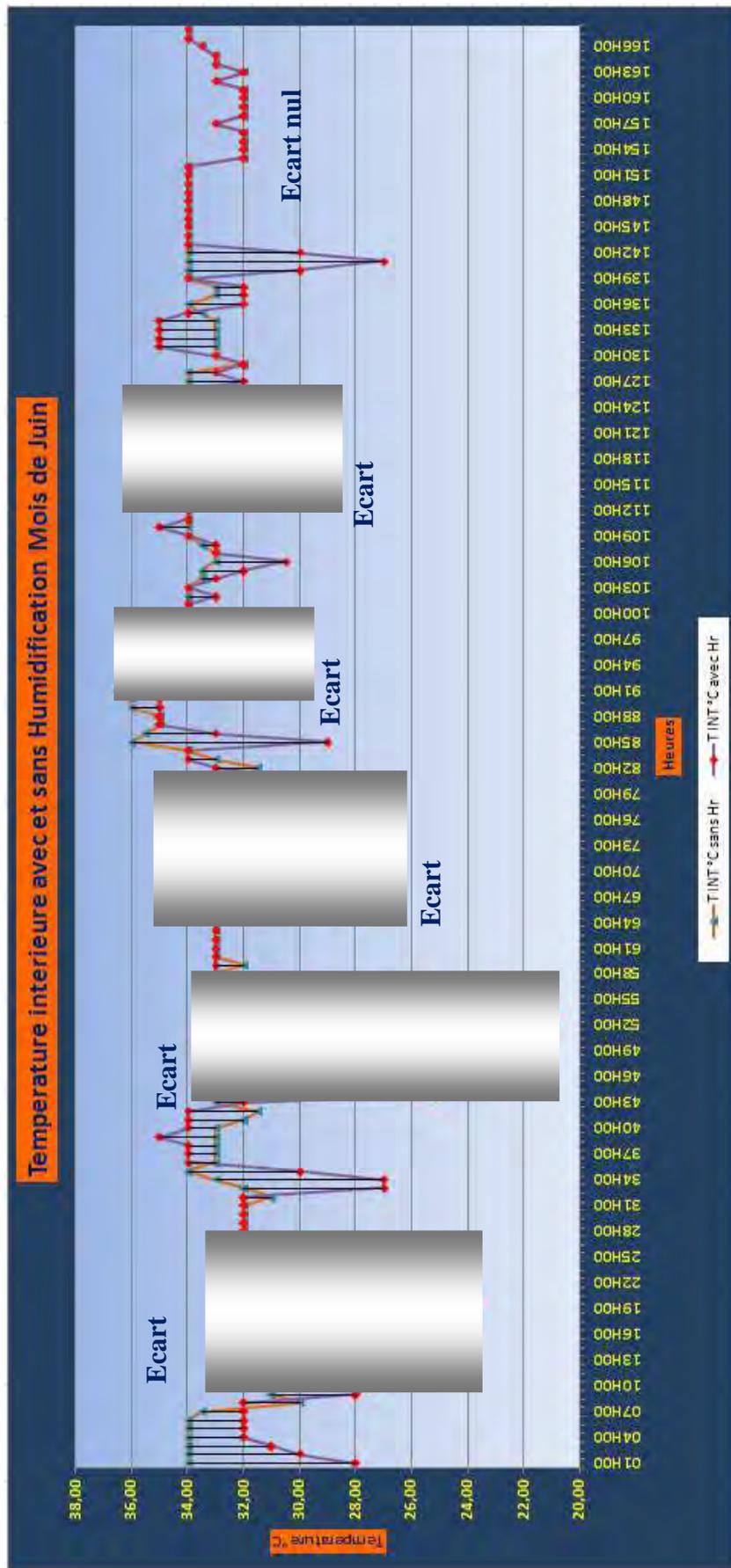


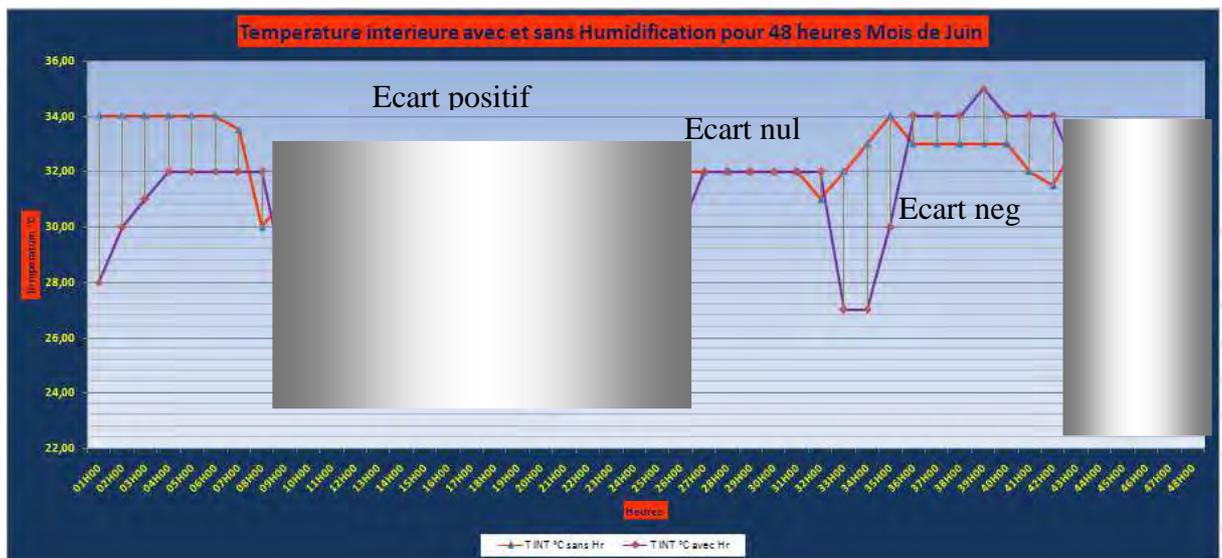
Figure 7.158 : Comparaison des températures intérieures avec et sans humidification durant le mois de Juin

La température de l'air minimale au niveau de la bouche de soufflage durant la période du 18 au 24 Juin 2007 (mesure avec humidification) était de 21°C à 5h du matin le troisième jour.

La température de l'air au niveau de la bouche de soufflage durant la période du 11 au 17 Juin 2007 (mesure sans humidification) à la même heure était de 33°C l'écart est de 12°C. Dans les deux cas l'effet de rafraîchissement passif existe, il est supérieur en utilisant le système d'humidification.

L'utilisation du système d'humidification augmente encore cet écart et par conséquent diminue la température de l'air soufflée au niveau du bureau (figure 7.1).

Durant les deux premiers jours de la prise de mesure respective avec et sans humidification au mois de juin, nous confirmons que l'humidification des conduits de la tour à vent diminue considérablement la température de l'air au soufflage (figure 7.2). L'écart maximal est de 8°C à 20h du soir la première journée. Il est nul à 7h30 et 8h30 du matin, mais il augmente durant la période la plus critique de la journée entre 11h et 18h là où le besoin de rafraîchissement est le plus demandé. La deuxième journée l'effet de rafraîchissement avec humidification est moindre en le comparant à la première journée. Il est nul de 3h à 7h du matin, il est négatif entre 12h et 18h. La température de l'air au soufflage prise sans humidification à 16h était de 31,5°C, elle était de 33°C à la même heure, mesure prise avec humidification. La nuit tombée, avec la diminution de la température de l'air et la remise en marche du système d'humidification, l'effet de rafraîchissement évaporatif augmente et l'écart maximal enregistré est de 10,5°C à 9h du soir.



7.2.2 Comparaison des Humidités relatives (Mois de Juin)

Dans le même contexte, nous remarquons que contrairement à la température de l'air, l'humidité relative de l'air au niveau de la bouche de soufflage augmente. La figure 7.3 montre que l'humidité relative mesurée en utilisant le système d'humidification est supérieure à l'humidité relative de l'air mesurée sans l'utilisation de ce système.

Dans les deux courbes, nous constatons que le taux d'humidité est supérieur à 40%, les humidités relatives de l'air sans l'utilisation du système d'humidification ne dépassent pas 60%. Comprise entre 44% et 60%, l'humidité relative de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage sans humidification rentre dans la norme de confort relative à l'humidité d'après (ASHREA $30 < Hr < 70$). L'air à la sortie de la bouche de soufflage n'est pas saturé et peut contenir par conséquent une quantité supérieure d'eau. Cette dernière augmentera le taux d'humidité et diminuera par conséquent la température de l'air, donc l'évaporation se fait encore.

Une fois le système d'humidification est mis en service, la courbe d'humidité relative de l'air intérieur change d'allure et devient instable (mesures avec humidification), cela est dû à l'utilisation alterné du système (une journée sur deux). Le taux d'humidité augmente, il est compris entre 45% et 90%.

Le taux d'humidité relative mesuré au niveau de la bouche de soufflage moyen durant la période du 11 au 17 juin est de 52,52% (mesure sans humidification), il est de 67,21% pour la période du 18 au 24 juin (mesure avec humidification).

Les taux d'humidité relative de l'air les plus élevés mesurés durant la période avec humidification sont enregistrés entre 19h et 6h du matin et dépassent 70%, la valeur maximale est de 90%. Ces valeurs dépassent la norme d'ASHREA et nécessite l'utilisation de la ventilation nocturne, surtout que durant cette période la température extérieure diminue, donc l'excès d'humidité pourra être chassé de la pièce si les fenêtres sont ouvertes grâce à la création d'un courant d'air la nuit avec un renouvellement d'air plus important (ventilation transversale nocturne entre la tour à vent et la fenêtre ouverte).

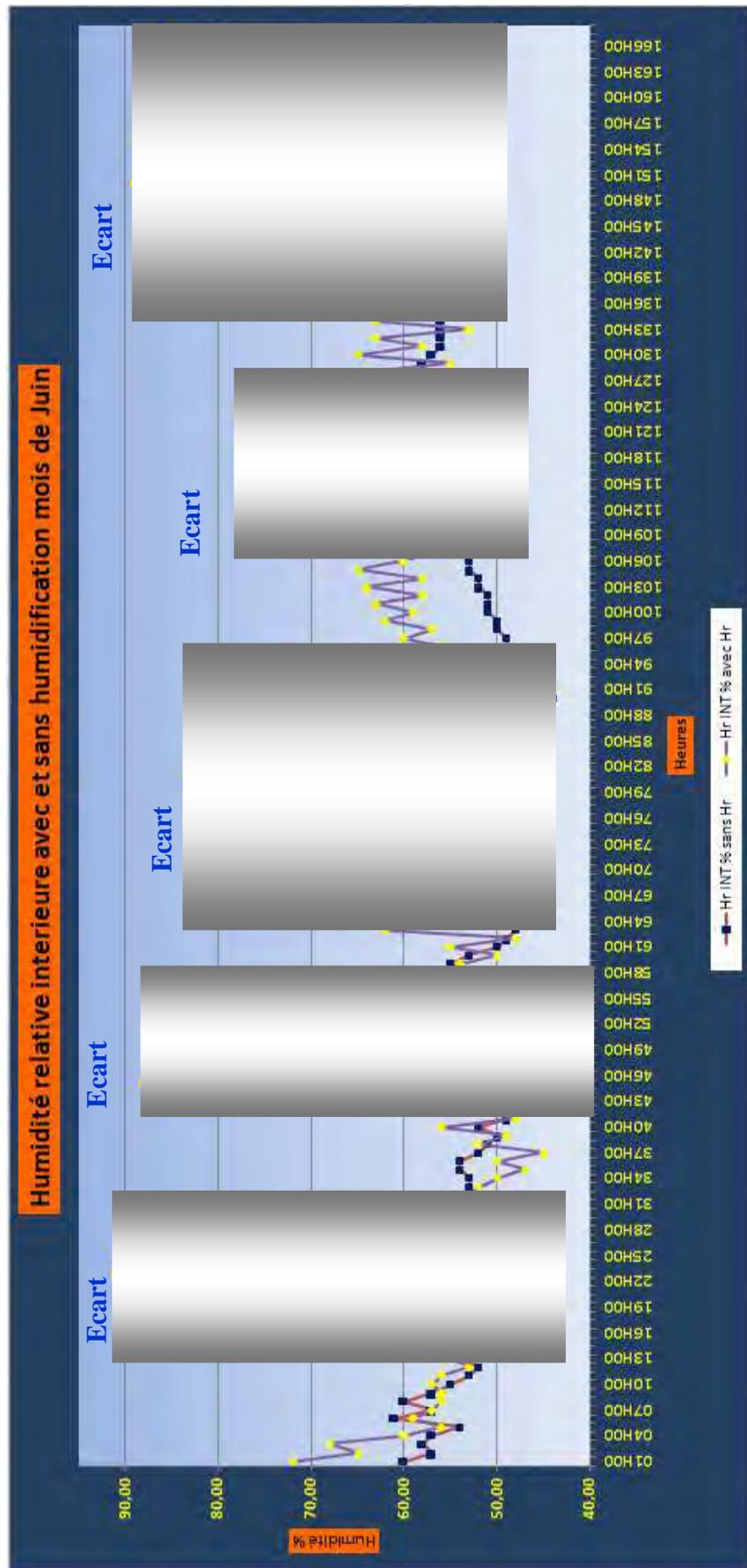


Figure 7.160 : Comparaison des humidités intérieures avec et sans humidification durant le mois de Juin

La figure 7.4 nous montre que durant la période entre 9h et 18h pour les deux jours successifs de comparaison (mesure prise avec et sans humidification), l'humidité relative de l'air au soufflage rentre dans la norme d'ASHREA $30 < Hr < 70$ par contre la nuit le taux d'humidité relative de l'air au soufflage (mesure avec humidification) augmente considérablement et l'écart maximal enregistré est de 42% à 11h du soir.



7.2.3 Comparaisons des Températures (Mois de Juillet)

La même démarche est prise pour les trois mois (Juin, Juillet et Août) pour la comparaison des températures de l'air au soufflage. Les températures de l'air au niveau de la bouche de soufflage (mesure prise avec humidification) sont inférieures à celles prises sans humidification. La mise en service du système était faite une journée sur deux. Ce principe d'humidification se répercute directement sur les résultats obtenus au niveau de la bouche de soufflage (figure 7.5). En effet l'écart est important les journées où le système d'humidification est mis en service. Il est relativement faible les journées non humidifiées. L'écart est toujours positif et l'humidification des conduits diminue la température de l'air au soufflage (mesure prise avec humidification) pour les deux journées de comparaison. L'écart maximal obtenu est de $10,8^{\circ}\text{C}$ la deuxième journée à 2h du matin, l'écart minimal était de $2,5^{\circ}\text{C}$ à 15h la deuxième journée. L'écart augmente la nuit et le matin et diminue la journée entre 9h et 18h, cela est dû à la température élevée durant cette période.

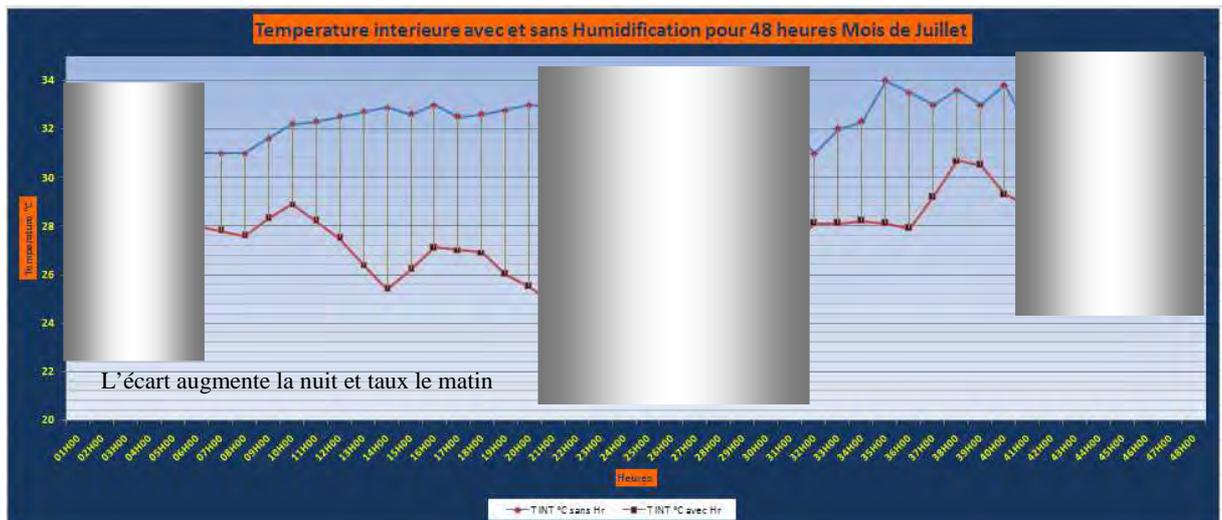


Figure 7.162 : Comparaison des températures intérieures avec et sans humidification durant 48 heures (Mois de Juillet)

L'écart est très significatif durant toute la période de comparaison, il varie de 3°C à 11°C selon les heures de la journée et dépend aussi de l'utilisation du système d'humidification. Il augmente durant la période la plus chaude de la journée entre 10h et 18h et surtout tard la nuit, où les résultats des mesures de la température de l'air sans humidification étaient supérieures aux températures de l'air mesurées à l'extérieur (au niveau de la tête de la tour). La tour à vent à un rendement supérieur en bénéficiant des deux principes de rafraîchissement (par transfert de chaleur et par évaporation) combiné (figure 7.6).

La température de l'air moyenne au niveau de la bouche de soufflage durant la période du 25 au 31 Juillet 2007 (mesure avec humidification) était de 26,75°C.

La température de l'air moyenne au niveau de la bouche de soufflage durant la période du 18 au 24 Juillet 2007 (mesure sans humidification) était de 33,34°C. L'écart était de 6,59°C. On comparant ces températures aux températures mesurées au niveau de la tête de la tour, il devient plus important (voir chapitre 6, résultats et interprétation). L'utilisation du système d'humidification augmente encore cet écart et par conséquent diminue la température de l'air soufflée au niveau du bureau et rend la température au niveau de la bouche de soufflage très confortable. On passe d'une réduction moyenne de la température de l'air entre l'extérieur et l'intérieur de la tour de 1,15°C (sans humidification) à une réduction moyenne de 10,63°C avec l'utilisation du système d'humidification (figure 7.6).

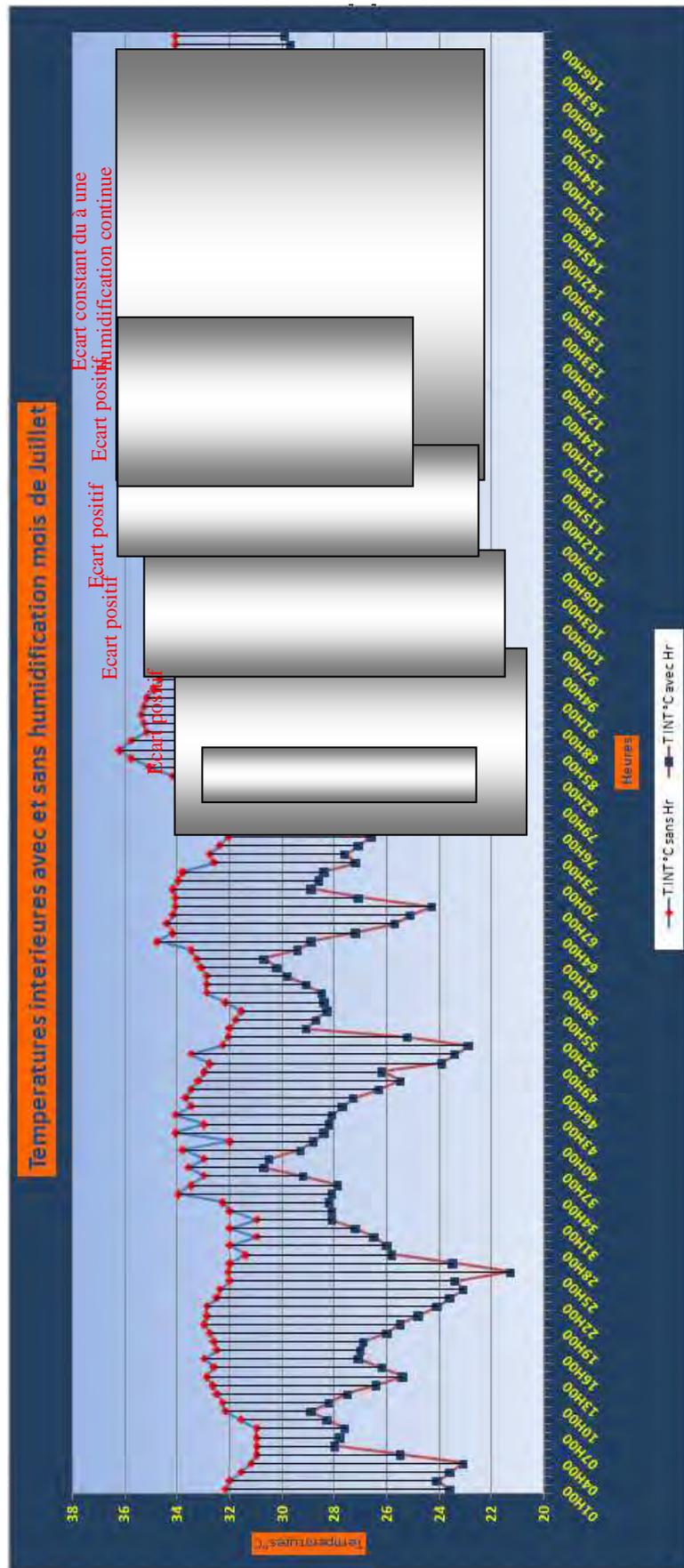


Figure 7.163 : Comparaison des températures intérieur avec et sans humidification durant le mois de Juillet

7.2.4 Comparaison des Humidités relatives (Mois de Juillet)

Dans le même contexte, nous remarquons que contrairement à la température de l'air, l'humidité relative de l'air au niveau de la bouche de soufflage augmente. La figure 7.7 montre que l'humidité relative mesurée en utilisant le système d'humidification est supérieure à l'humidité relative de l'air mesurée sans l'utilisation de ce système.

L'écart en humidité relative de l'air au soufflage diminue considérablement durant la période entre 6h et 12h du matin pour atteindre un écart de 1% la première journée, la nuit et le matin l'écart en humidité relative augmente, la valeur maximale calculée était de 52% à minuit.

La deuxième journée ou le système d'humidification n'était pas en service l'écart de l'humidité relative de l'air au soufflage diminue, il atteint sa valeur maximale de 26% à 16h et sa valeur minimale de 1% à 9h du matin.

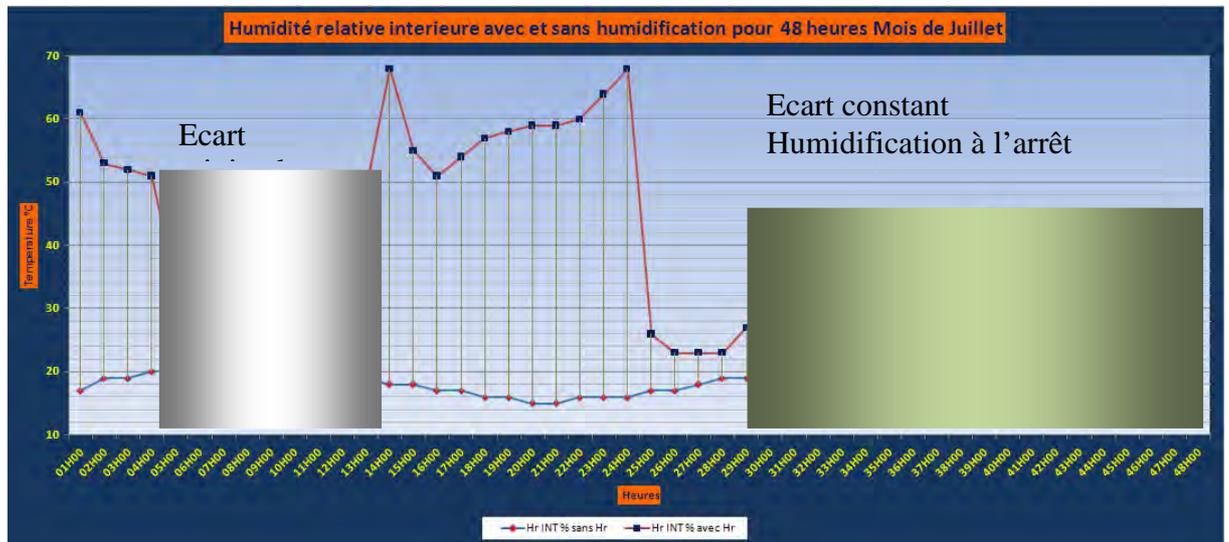


Figure 7.164 : Comparaison des humidités intérieure avec et sans humidification durant 48 heures (Mois de Juillet)

Les humidités relatives de l'air sans utilisation du système d'humidification ne dépassent pas les 20%. Comprise entre 14% et 20%, l'humidité relative de l'air mesurée au niveau de la bouche de soufflage sans humidification ne rentre pas dans la norme de confort donner par (ASHREA 30<Hr<70) adoptée dans cette recherche. L'air à la sortie de la bouche de soufflage est considéré comme sec, par conséquent, il peut contenir une quantité supplémentaire de vapeur d'eau. Cette dernière augmentera le taux d'humidité et diminuera la température de l'air au niveau de la bouche de soufflage.

Selon l'utilisation du système d'humidification, la courbe d'humidité relative de l'air intérieur change d'allure et devient instable, cela est dû à l'utilisation alterné du système (une journée sur deux). Le taux d'humidité augmente, il est compris entre 19% et 84%.

Le taux d'humidité relative mesuré au niveau de la bouche de soufflage durant la période du 18 au 24 juillet varie entre 14% et 20% (mesure sans humidification), il est entre 19% et 84% pour la période du 25 au 31 juillet (mesure avec humidification). Cette humidité relative de l'air au niveau de la bouche de soufflage rentre dans la norme de confort et rend l'air moins sec et l'ambiance thermique à l'intérieur du bureau très confortable.

Les taux d'humidité relative de l'air les plus élevés mesurés durant la période avec humidification sont enregistrés entre 19h et 6h du matin (figure 7.8). Avec le couché du soleil, l'irradiation vers la voûte céleste commence donc, la température de l'air extérieur diminue progressivement et ainsi la restitution de la chaleur emmagasinée dans la masse sera vers l'intérieur du bureau.

Avec notamment l'utilisation de ce système de rafraîchissement, le problème de surchauffe est minimisé. Cependant une ventilation nocturne doit accompagner ce système afin de chasser l'excès d'humidité mesuré au niveau du soufflage pendant cette même période et ceci établira le confort thermique souhaité.

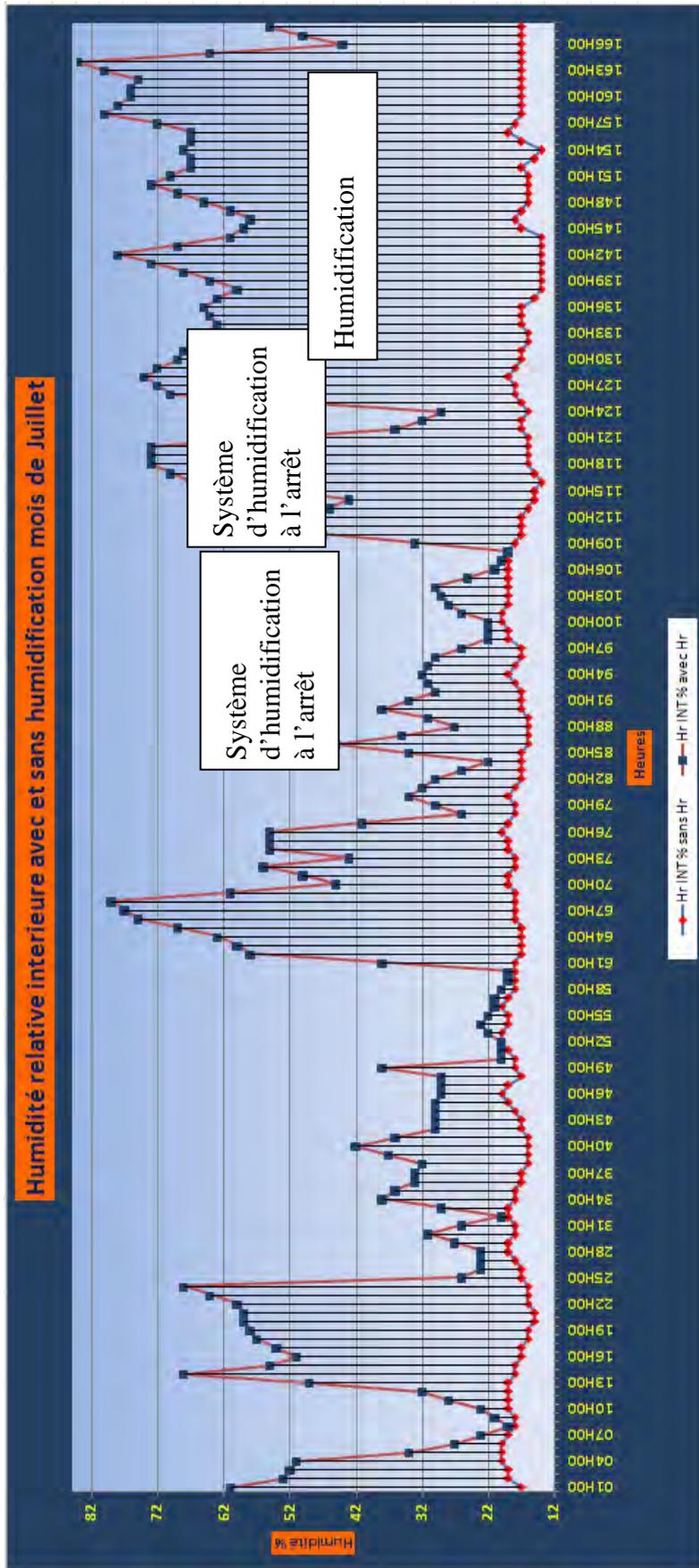


Figure 7.165 : Comparaison des humidités intérieures avec et sans humidification durant le mois de Juillet

7.2.5 Comparaison des températures (Mois d'Août)

En se basant sur les résultats et les lectures des températures de l'air au niveau de la bouche de soufflage durant le mois d'Août, nous remarquons que les températures de l'air au niveau de la bouche de soufflage (mesure prise avec humidification) sont inférieures à celles prises sans humidification, du deuxième au cinquième jour nous remarquons que les trois températures de l'air extérieure, intérieure et météorologique sont relativement basse par rapport à la saison, cela est dû aux pluies torrentielles qu'a connue la région du 09 au 13 Août. Durant ces quatre jours les graphes se démarquent par rapport aux autres jours ainsi que ceux des mois de Juin et Juillet. Les résultats ne correspondent pas aux résultats déjà trouvés durant les journées des mois de Juin et Juillet. La comparaison ne peut se faire pour cette période surtout que durant la deuxième semaine (mesure avec humidification), la région n'a pas connue le même changement climatique.

L'écart est important les journées où le système d'humidification est mis en service. Il est relativement faible les journées où le système d'arrosage est interrompue. L'écart est très significatif durant toute la période de comparaison, il varie de 1°C à 12,5°C selon les heures de la journée et dépend aussi de l'utilisation du système d'humidification. Il augmente durant la période la plus chaude de la journée entre 10h et 18h et surtout tard la nuit où les résultats des mesures de la température de l'air sans humidification étaient supérieurs aux résultats des mesures de la température de l'air à l'extérieur.

L'écart maximal de 12,5°C enregistré à 14h est significatif (figure 7.9), il est plus important en comparant ces températures aux températures de l'air mesurées au niveau de la tête de la tour (chapitre 6, résultats et interprétation). L'utilisation du système d'humidification augmente encore cet écart et par conséquent diminue la température de l'air soufflé au niveau du bureau et rend la température au niveau de la bouche de soufflage très confortable.



Figure 7.166 : Comparaison des températures intérieures avec et sans humidification durant le mois d'Août

7.2.6 Comparaison des Humidités relatives (Mois d'Août)

Dans le même contexte, nous remarquons que contrairement à la température de l'air, l'humidité relative au niveau de la bouche de soufflage augmente. La figure 7.10 montre que l'humidité relative de l'air mesurée en utilisant le système d'humidification est supérieure à l'humidité relative de l'air mesurée sans l'utilisation de ce système. Malheureusement les pluies torrentielles qu'a connues la wilaya de Ouargla durant la période du 09 au 12 Août 2007 ont augmentées le taux de l'humidité de l'air durant ces journées et par conséquent, l'écart en humidité durant la phase comparaison est réduit.

Selon l'utilisation du système d'humidification, la courbe d'humidité relative de l'air intérieur change d'allure et devient irrégulière, l'air est saturé par les pluies et le pouvoir d'évaporation est réduit, donc l'écart est moindre. L'irrégularité des graphes est due à l'utilisation alternée du système (une journée sur deux). Le taux d'humidité augmente, il est compris entre 21% et 76%. Ce phénomène de pluies a perturbé le fonctionnement général de la tour à vent.

Le taux d'humidité relative de l'air mesuré au niveau de la bouche de soufflage durant la période du 08 au 14 Août varie entre 11% et 66% (mesure sans humidification), il est entre 21% et 76% pour la période du 01 au 07 Août (mesure avec humidification). Cette humidité relative de l'air au niveau de la bouche de soufflage rentre dans la norme de confort et rend l'air moins sec et l'ambiance climatique à l'intérieur du bureau très confortable.

Les taux d'humidité relative de l'air les plus élevés mesurés durant la période avec humidification sont enregistrés entre 19h et 6h du matin, durant cette période la température extérieure diminue et l'ouverture des fenêtres est recommandée dans ce genre de climat (chaud et aride), donc cet excès en humidité pourra être évacué grâce à la création d'un courant d'air la nuit.

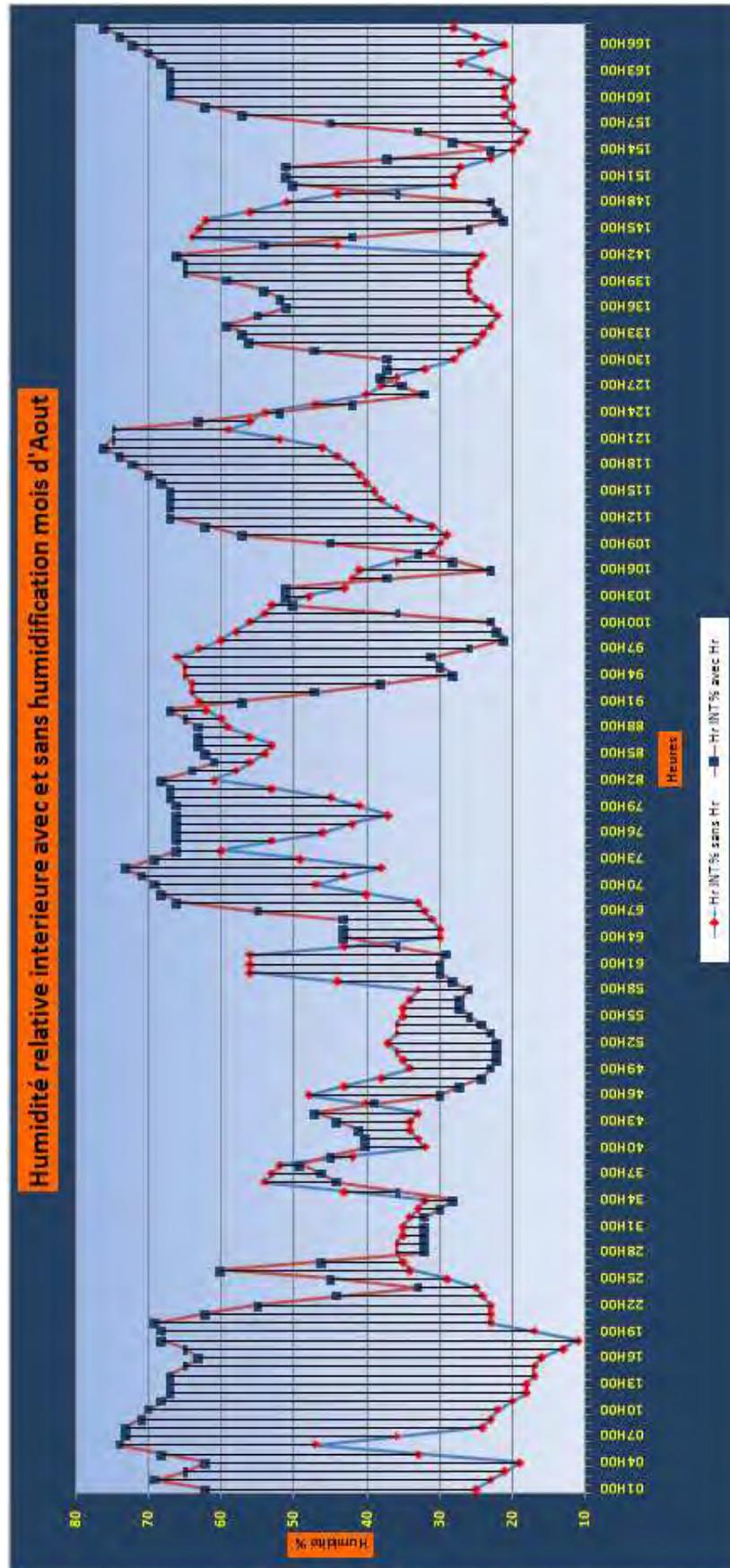


Figure 7.167 : Comparaison des humidités intérieures avec et sans humidification durant le mois d'Août

Ce qui découle de la campagne de mesure durant les quatre mois (Mai à Août) de l'expérimentation est la confirmation de l'effet positif de rafraîchissement passif de la tour à vent, réalisée à Hassi Messaoud. Cet effet de rafraîchissement est accentué en utilisant l'eau comme moyen de rafraîchissement évaporatif. Des réductions de températures sont observées, l'effet de rafraîchissement est accentué par l'utilisation de l'eau comme moyen de rafraîchissement évaporatif, ou non seulement des réductions de températures supplémentaires sont acquies, mais des augmentations considérables dans les humidités relatives sont établies aussi. Ces résultats coïncident exactement avec les conclusions des travaux théoriques ainsi que les résultats des simulations et réalisations des chercheurs dans le domaine de la ventilation naturelle par le biais des tours à vent pour un rafraîchissement évaporatif. Nous citons parmi ces recherches, les travaux expérimentales qui ont adopté ces techniques de rafraîchissement passives évaporatives dans les espaces ouverts ou semi ouvert comme (Alvarez et al, 1991) ainsi que dans les bâtiments comme (Ductrotoy et Hutter, 1989 ; Gabel, 1990) de Y. Etzion, D. Pearlmutter, E. Erell, I. A. Meir, 1997 dans le bâtiment du centre international pour les études du désert, Alvarez et Al, 1991 dans l'exposition universelle de Séville, 1992, N. V. Chalfoun dans le projet du Momra rowdah environnemental, les travaux de E. Erell, D. Pearlmutter, Y. Etzion, 2007 Ces travaux ont confirmé la performance énergétique des techniques passives du rafraîchissement évaporatif (tour à vent) dans les climats chaud et aride.

Ce pendant, nous notons qu'avec cette même configuration de la tour à vent, et cette spécifique géométrie et la conception du système d'humidification ont a pu enregistrer des diminutions de température spectaculaires qui a pu atteindre 22,2°C d'écart entre la température d'entrée d'air au niveau de la tête et celle au soufflage. Ceci n'a jamais jusqu'à présent été atteint.

7.3 Comparaison par rapport aux plages de confort (diagramme psychométrique)

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

La méthode choisie pour cette comparaison est l'utilisation du diagramme psychométrique de Szockolay. Elle consiste à établir la zone neutre en plus des différentes zones des stratégies nécessaires pour atteindre le confort selon les données climatiques propres à chaque région. Tout en s'inspirant des travaux de ses prédécesseurs ; OLGYAY et GIVONI, SZOCKOLAY a voulu intégrer les données climatiques comme partie intégrante de la conception architecturale.

7.3.1 Principe de comparaison

Pour chaque semaine de mesure, avec et sans humidification, durant la période de mesures de Mai à Août. Une journée type a été choisie pour quelle soit représenter sur le diagramme psychométrique de S. SZOCKOLAY, et la comparaison des résultats de cette journée par rapport à la zone de confort élargie. Ces journées type représentent les journées où l'écart de température de l'air mesurée entre la tête de la tour et la bouche de soufflage est maximal.

Les journées type choisies pour ce travail sont :

- Jeudi 24 mai, mesure avec humidification,
- Dimanche 17 juin, mesure sans humidification
- Lundi 18 juin, mesure avec humidification,
- Mardi 24 juillet, mesure sans humidification,
- Mardi 31 juillet, mesure avec humidification,
- Mercredi 01 août, mesure avec humidification,
- Mardi 14 août, mesure sans humidification.

En déterminant la zone de confort relative à la période de prise de mesure, on déduit les limites au delà des quelles, des moyens passifs ou actifs doivent être mis en œuvre pour réintégrer le confort nécessaire à l'utilisateur.

Après avoir reporté les différentes températures et humidités de la journée choisi sur le diagramme, chaque jour étant représenté par une ligne donnée par deux coordonnées (T_{\min} - H_{\max} / T_{\max} - H_{\min}), la lecture du diagramme ainsi représenté nous indiquera si tout les

résultats sont dans la zone de confort ou non, si non des propositions de solutions pour atteindre les limites du confort seront à préconiser. Comme le digramme psychométrique de Szokolay se base sur un taux d'humidité relative de 50% pour la détermination de la zone de confort, par contre dans cette étude, une zone de confort élargie a été adoptée en se basant sur les limites d'humidité donnée par ASHRAE 55-1992 qui vont de 30% à 70%, d'où l'extension de la zone de confort à 70%.

7.4 Calcul de la zone neutre

Humphrey et Nicole (1998) rapportent que la différence dans les températures de confort perçue est importante entre les individus, M. Humphrey (1970) dans ces recherches est arrivé à déterminer une expression mathématique de la température neutre :

$$T_n = 11,9 + 0,534T_o$$

D'où T_n = la température neutre en °C

T_o = la température extérieure moyenne pour un mois en question °C.

En 1981, A. Auliciemes révisé cette même formule et propose une expression légèrement différente qu'est la suivante :

$$T_n = 17,6 + 0,31T_o$$

Les températures neutres sont directement liées à la température extérieure, ceci conduit à une confirmation de l'importance de l'adaptation et de l'acclimatation de l'individu à une situation donnée.

La température et l'humidité sont déterminantes pour la perception du confort thermique entre 16°C et 28°C, la température est approximativement dans les limites du confort (Evans 1980), inférieur à 16°C, le froid commence à être ressenti, au-delà de 30°C, la chaleur commence à être gênante.

L'humidité, faible ou élevée rend l'atmosphère inconfortable quand la température est au delà des limites du confort. Lorsqu'elle est inférieure à 20%, elle provoque une sensation de sécheresse et de picotement chez l'individu, et amplifie la sensation du froid quand la température est basse. A une humidité relative élevée, entre 60% et 80% l'évaporation de l'air est très difficile et la sensation de saturation de l'air est plus ressentie par une impression d'étouffement.

S. Szokolay (1992) et Baker (1993) notent aussi que dans les régions à climat chaud et aride, la sudation est le résultat de l'évaporation de la sueur qui est due à la dissipation du surplus de chaleur du corps humain. Cette évaporation aide à maintenir un certain degré de confort thermique en augmentant la vitesse de dissipation de la chaleur du corps, il détermine

l'échange de la chaleur du corps, et détermine l'échange de la chaleur par convection. Il a le pouvoir d'activer l'évaporation dans une ambiance où l'humidité est entre 40% et 50% avec bien sûr une vitesse de l'air adéquate. (S. Mazzouz, 2000).

Pour la détermination de la zone de confort il est nécessaire de calculer la température neutre définie par Humphrey ($T_n = 11,9 + 0,534T_o$) ainsi qu'avec la température neutre déterminée par Auliciemes ($T_n = 17,6 + 0,31T_o$).

La prise de mesure concerne uniquement la période du mois de Mai à Août, donc le calcul de la température neutre ne prendra en considération que cette période de mesure.

Cette zone de confort est basée sur les températures neutres de Humphrey et Auliciemes en relation avec les températures moyennes extérieures de la période ou les mois considérés.

$$T_n = 17,6 + 0,31T_m$$

D'où T_m = température moyenne des mois en question

Cette équation est valable que si ces conditions sont remplies

$$18,5^\circ\text{C} < T_n < 28,5^\circ\text{C},$$

La plage de la zone de confort est de (-2K et +2K) à 50% d'humidité relative,

Basée sur les limites d'ASHRAE (standard 55-81) qui fixe la limite basse et haute entre 4 et 12 g/kg (teneur de la vapeur),

L'humidité relative ne doit pas dépasser 90%.

Les données climatiques de la ville de Hassi Messaoud permettent l'utilisation de la méthode de Szokolay du fait que les conditions ci-dessus sont vérifiées.

7.4.1 Application de la méthode de Steeve Szockolay pour la période de Mai à Août

La représentation de la nouvelle zone de confort relative à la période de mesure de Mai à Août sur le diagramme psychrométrique, nous montre bien qu'il existe deux zones de confort. La première zone de confort sur la figure 7.11 est relative à la période de 1997 à 2006, la deuxième zone de confort est relative à la période de Mai à Août 2007. La Détermination des zones de confort pour la ville de HASSI MESSAOUD selon la méthode de Steeve SZOCKOLAY pour la période de Mai à Août est donnée dans l'annexe chapitre 7.

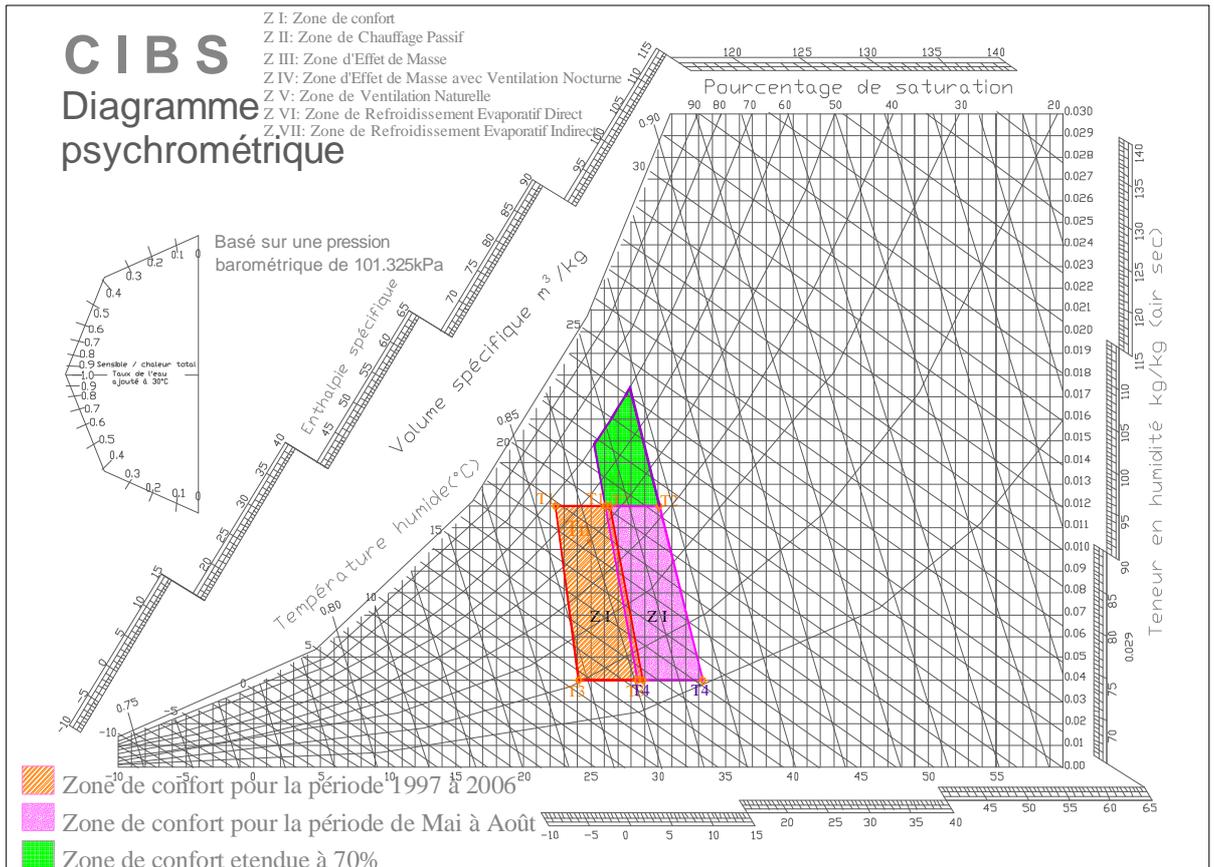


Figure 7.168 : Zone de confort pour la période de Mai à Août

7.4.2 Représentation des résultats sur le diagramme de St Szockolay

◆ Journée du 24 Mai

Les points représentant les heures, traversent trois zones, tous les points sont en dehors de la zone de confort (ZI). Cela est dû au taux d'humidité relative qui dépasse 50%.

Les 24 points représentant la journée du 24 Mai traversent 3 zones (figure 7.12). Treize points sont au dessus de la zone de chauffage passif, les températures représentées par ces points sont inférieures aux températures de la zone de confort pour cette période (Mai à Août), par contre les humidités relatives représentées sont très élevées et dépassent la zone de confort étendue à 70%. Trois points sont à l'intérieur de la zone de confort étendue et six points rentrent dans la zone de ventilation naturelle. Les températures comprises entre 21°C et 25°C sont très confortables par contre l'humidité relative est élevée. Cela est dû à l'humidification continue de la tour à vent. La diminution du taux d'humidité au niveau de la bouche de soufflage est impérative.

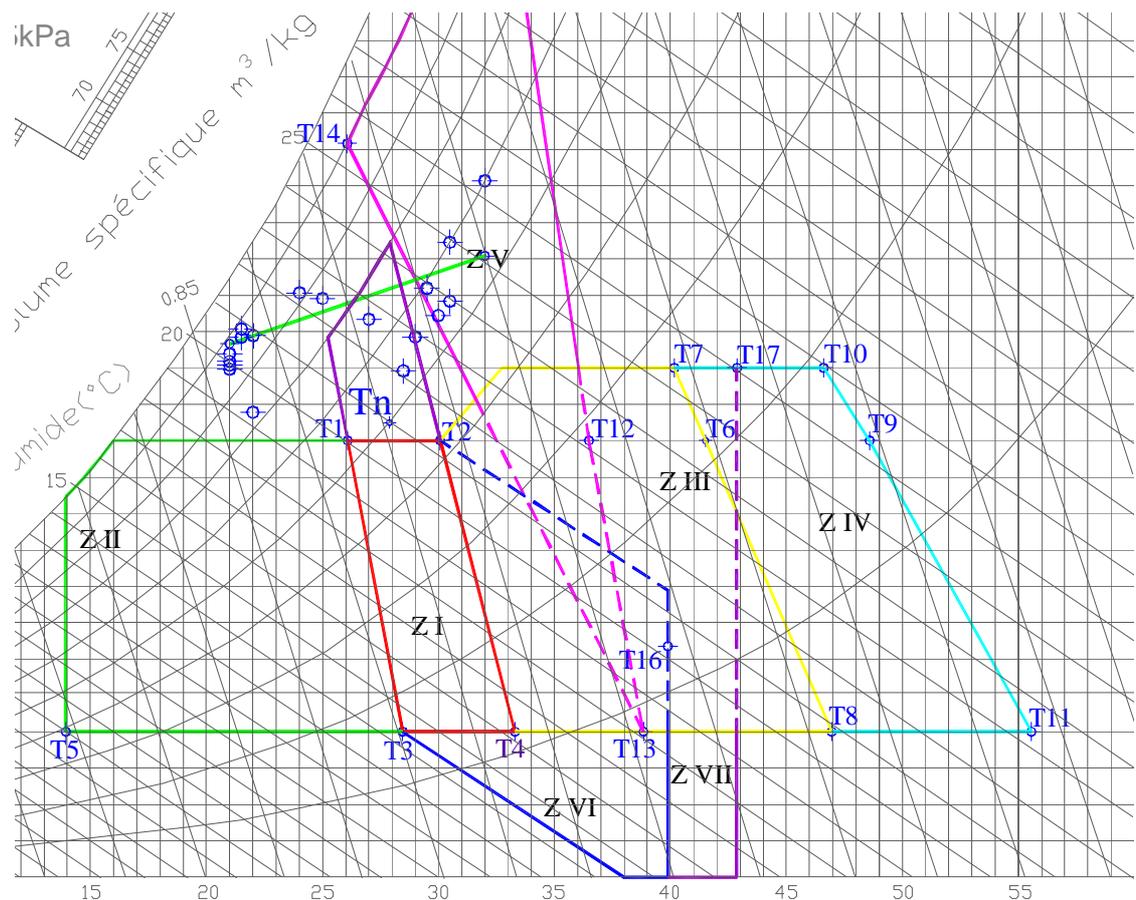


Figure 7.169 : Journée du 24 Mai, mesure avec humidification

ZI : Zone de confort ZII : Zone de chauffage passif ZIII : Zone d'effet de masse
 ZIV : Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne ZV : Zone de ventilation naturelle
 ZVI : Zone de refroidissement évaporatif direct ZVII : Zone de refroidissement évaporatif direct

◆ Journée du 17 Juin

Durant la journée du 17 Juin les mesures étaient prises sans humidification, la température maximale été de 34°C, la température minimale été de 32°C, l'humidité relative maximale été de 63% et l'humidité relative minimale été de 56%.

Les points représentant les heures, se trouvent dans la zone ventilation naturelle (ZV). Les températures et les humidités relatives de l'air au niveau de la bouche de soufflage ne rentrent pas dans la zone de confort (ZI) ni dans la zone de confort étendue. Cela est dû aux températures élevées par rapport aux limites de la zone de confort, malgré que le taux d'humidité relative dépasse 50%, l'air au niveau de la bouche de soufflage reste non saturé par rapport à la zone de confort étendue, malgré l'effet de rafraîchissement par transfert de chaleur, il reste insuffisant sans humidification (figure (7.13)).

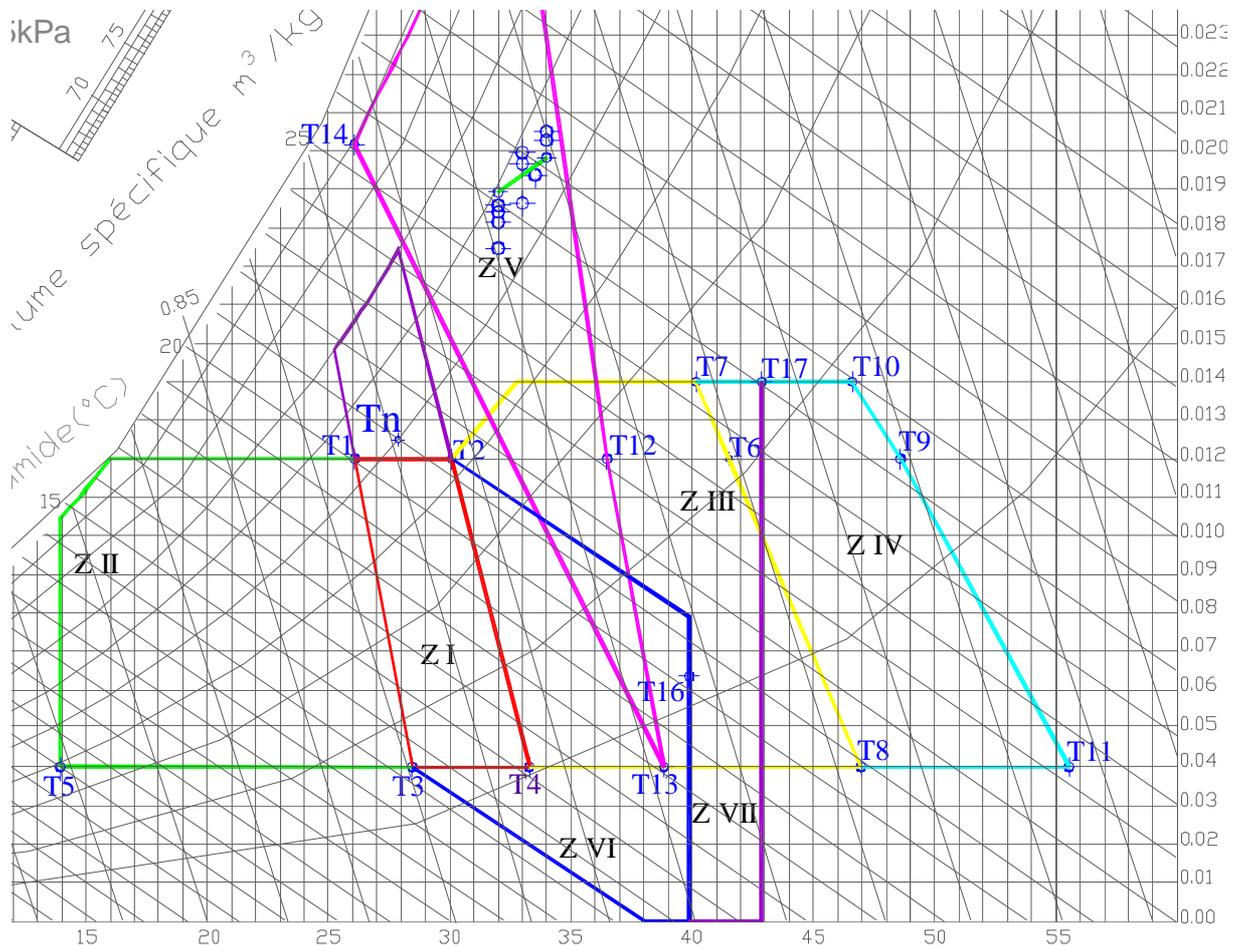


Figure 7.170 : Journée du 17 Juin, mesure sans humidification

◆ Journée du 24 Juillet

La journée du 24 Juillet, les mesures étaient prises sans humidification, la température maximale été de 34,2°C, la température minimale été de 32°C, l'humidité relative maximale été de 19% et l'humidité relative minimale été de 15%.

Vingt points représentant les heures, se trouvent dans la zone de refroidissement évaporatif directe (ZVI) (figure 7.15). Les températures et les humidités relatives de l'air au niveau de la bouche de soufflage ne rentrent pas dans la zone de confort (ZI) ni dans la zone de confort étendue. Cela est dû aux températures élevées par rapport aux limites de la zone de confort, le taux d'humidité relative est inférieur à 50%, l'air au niveau de la bouche de soufflage reste non saturé par rapport à la zone de confort étendue, car le système d'humidification n'a pas été déployé, malgré l'effet de rafraîchissement par transfert de chaleur, il reste insuffisant. Malgré que les quatre heures restantes rentre dans la zone de confort, les températures restent élevées et les humidités relatives basses. Le recours à l'humidification est indispensable car le rafraîchissement par transfert de chaleur seul n'est pas suffisant.

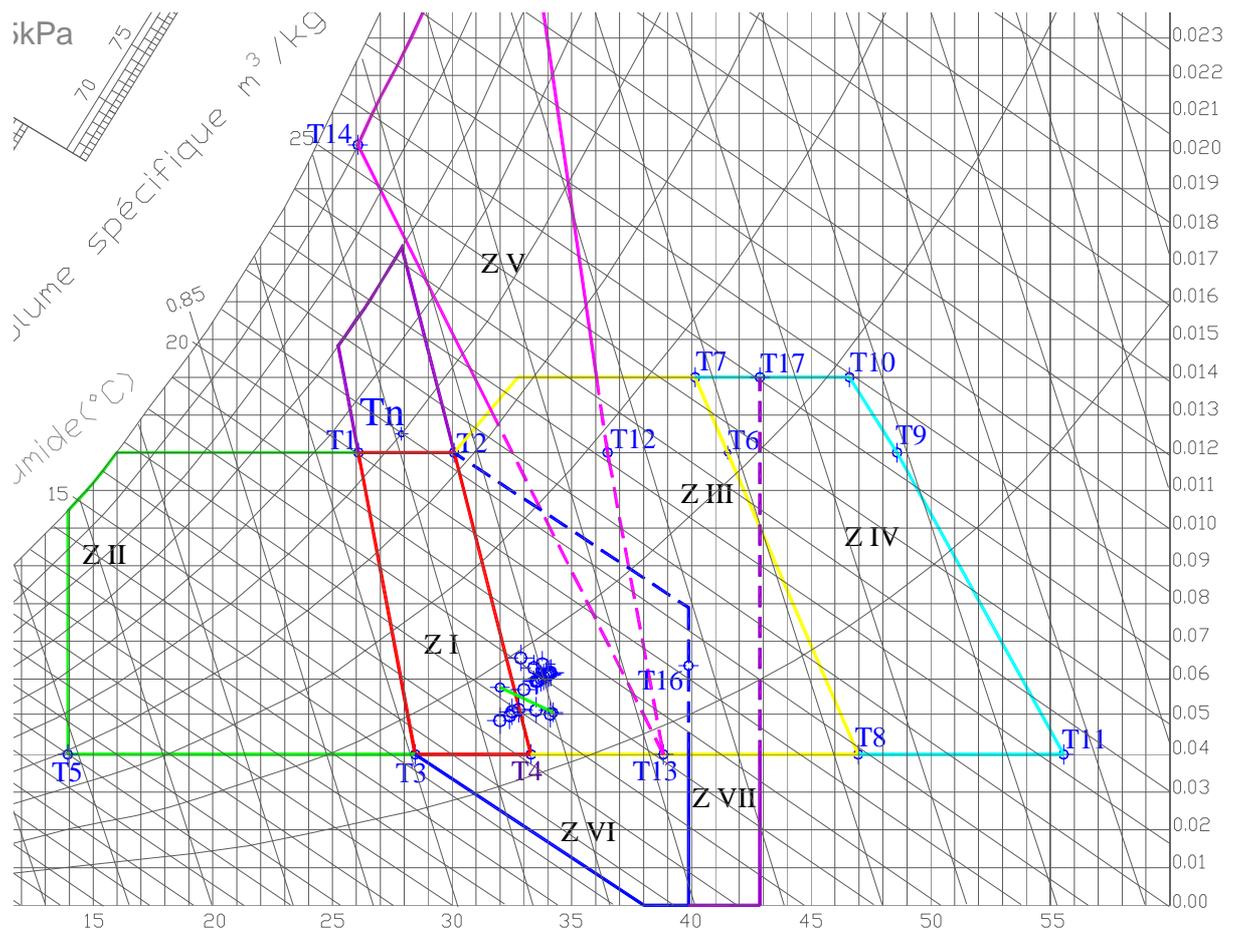


Figure 7.172 : Journée du 24 Juillet, mesure sans humidification

Journée du 31 Juillet

La journée du 31 Juillet, les mesures étaient prises avec humidification, la température maximale été de 29,9°C, la température minimale été de 24,3°C, l'humidité relative maximale été de 19% et l'humidité relative minimale été de 15%. Nous remarquons qu'avec une telle stratégie le nombre d'heures où le confort est établi augmente et passe à 15 heures plus que la moitié de la journée.

Quinze points représentant les heures, se trouvent dans la zone de confort étendue à 70%. Neuf points sont au dessus de cette zone soit le 1/3 de la journée (figure 7 ;16), Nous remarquons que les températures de l'air au niveau de la bouche de soufflage sont inférieures aux températures de la limite de la zone de confort et les températures mesurées ont diminué en les comparant aux températures mesurées le 24 juillet, mais l'humidité durant le 1/3 de la journée reste élevée et dépasse 70%. En comparant les résultats des deux journées du mois de juillet (avec et sans humidification), nous confirmons l'effet de rafraîchissement évaporatif passif de la tour à vent, les 2/3 de la journée rentre dans la zone de confort étendue.

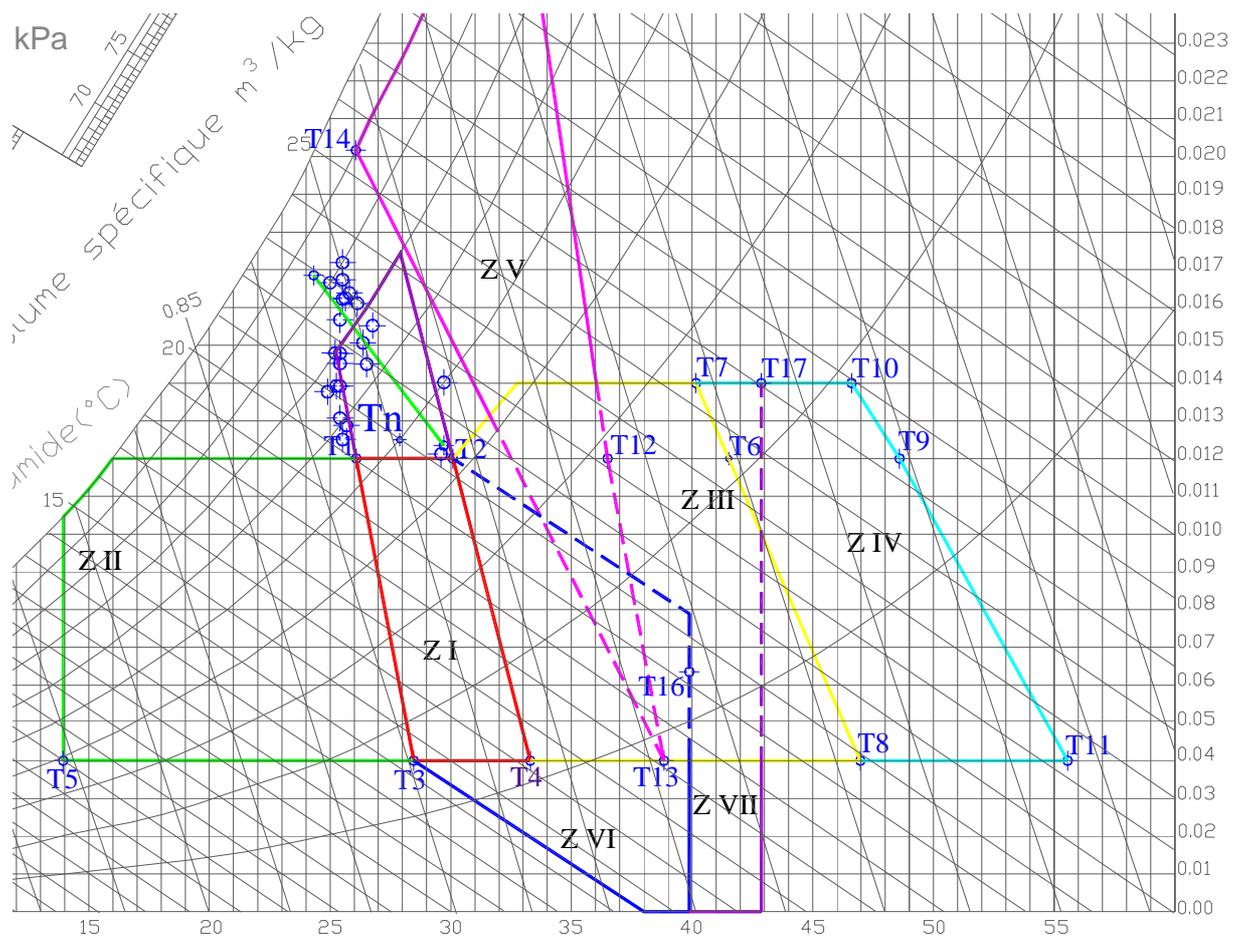


Figure 7.173 : Journée du 31 Juillet, mesure avec humidification

Journée du 01 Août

La journée du 01 Août, les mesures étaient prises avec humidification, la température maximale été de 31,3°C, la température minimale été de 22,8°C, l'humidité relative maximale été de 74% et l'humidité relative minimale été de 33%.

La moitié de la journée est dans le confort, alors que l'autre moitié de la journée, les températures sont plus basses (figure 7.17), Nous remarquons que ces températures de l'air au niveau de la bouche de soufflage sont inférieures aux températures de la limite de la zone de confort et les températures mesurées ont diminué par rapport aux températures mesurées le 14 Août, contrairement les humidités relatives de l'air au niveau de la bouche de soufflage ont augmenté, mais reste inférieures à 70%. En comparant les résultats des deux journées du mois de Août (avec et sans humidification), l'efficacité du rafraîchissement évaporatif passif de la tour à vent se confirme de plus en plus.

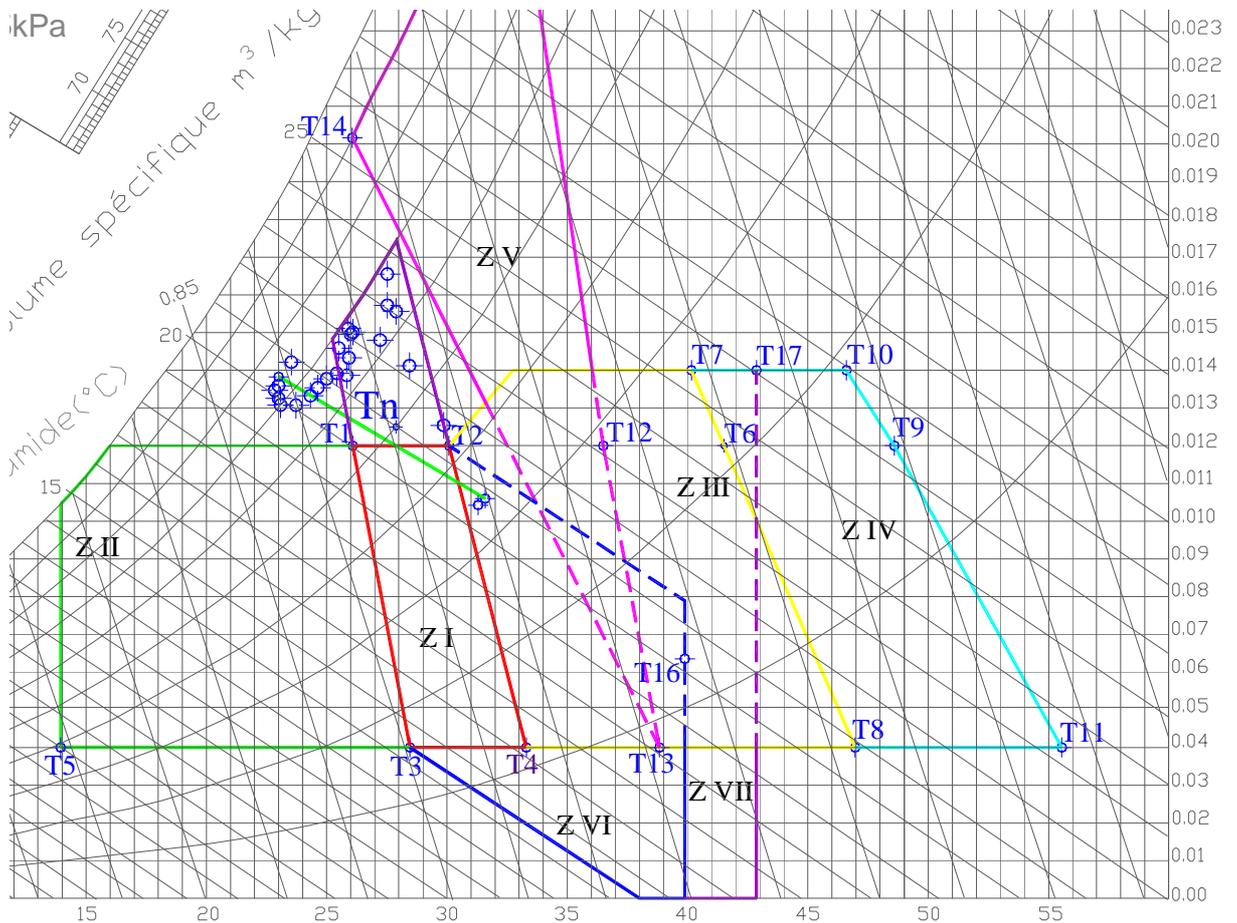


Figure 7.174 : Journée du 01 Août, mesure avec humidification

Journée du 14 Août

La journée du 14 Août, les mesures étaient prises sans humidification, la température maximale été de 32,4°C, la température minimale été de 29,1°C, l'humidité relative maximale été de 63% et l'humidité relative minimale été de 18%.

La majorité des points représentant les heures de la journée, se trouvent dans la zone de confort (ZI). Cela est dû aux changements climatiques qu'a connus la région durant cette semaine, de ce fait, ces résultats ne peuvent être pris en considération (figure 7.18) du fait à la vague de fraîcheur qui a balayé la ville de Hassi Messaoud ces jours ci ou la température extérieure minimale été de 30°C et l'humidité relative maximale de 63%.

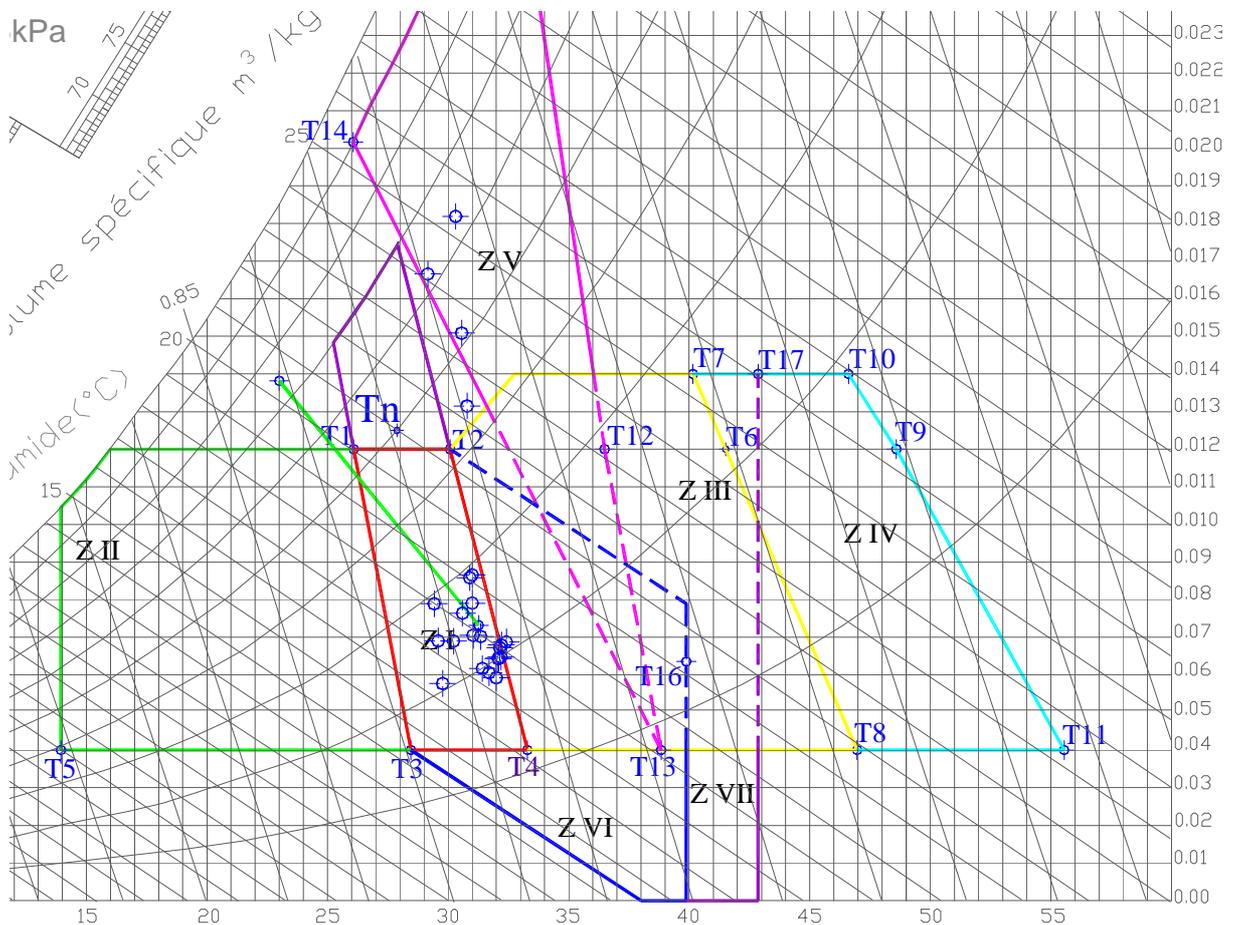


Figure 7.175 : Journée du 14 Août, mesure sans humidification

Conclusion :

L'interprétation des résultats et graphes, nous montre que la tour à vent réalisée à Hassi Messaoud en respectant les recommandations de la simulation faite par Y. Bouchahm, 2003 a un effet de rafraîchissement évaporatif passif.

Les mesures effectuées, confirment les résultats de la simulation. L'écart maximal de température de l'air entre la tête de la tour et la bouche de soufflage au niveau du bureau dépasse les 18°C et dépasse même les 22°C. Cet écart est obtenu pendant la période la plus chaude de la journée (10h à 18h) ou la demande en climatisation est la plus grande.

Malgré une mise en service alternée du système d'humidification. L'humidité relative de l'air au niveau de la bouche de soufflage reste élevée durant l'intervalle horaire entre 21h et 6h du matin. Pour un tel équipement le contrôle du confort est atteint avec succès vu que durant cette tranche horaire l'équipement est fermé. Par contre quand il s'agit d'une habitation dont l'utilisation est permanente, il faut chercher à mieux contrôler l'humidification

La campagne de mesure durant les quatre mois (Mai à Août) de l'expérimentation nous a permis de vérifier et de confirmer l'effet positif de rafraîchissement passif de la tour à vent, réalisée à Hassi Messaoud. Cet effet de rafraîchissement est accentué en utilisant l'eau comme moyen de rafraîchissement évaporatif. Des réductions de températures sont observées. Non seulement des réductions de températures supplémentaires sont acquies, mais des augmentations considérables dans les humidités relatives sont établies aussi. Ces résultats coïncident exactement avec les conclusions des travaux théoriques ainsi que les résultats des simulations et réalisations des chercheurs dans le domaine de la ventilation naturelle.

Le meilleur résultat obtenu durant cette expérimentation est l'obtention de condition de confort thermique et hygrométrique durant la grande partie de l'expérimentation du mois de Mai à Août. Le climatiseur restant dans le bureau n'a jamais été mis en service pour des raisons de fiabilité des mesures, mais sans autant gêner les occupants du bureau durant leurs travaux quotidiens, surtout que la réduction de la température était obtenue entre 9h et 18h, période d'occupation du bureau. La nuit ou l'humidité relative augmente le bureau est vide.

Malgré l'utilisation du système goutte à goutte, la quantité d'eau utilisée reste élevée et augmente le taux d'humidité relative de l'air au niveau de la bouche de soufflage. Ceci ne devrait pas être une contrainte, car le fait de ventiler l'espace rafraîchit par la tour à vent (bureau) la nuit, l'humidité de l'air diminuera, Ceci permettra de profiter de la fraîcheur nocturne qui caractérise la région ou diminuer du débit d'eau du système goutte à goutte arrosant les conduits de la tour à vent.

Pour une large utilisation, les solutions suivantes pourront être utilisées :

En restant dans le concept de l'utilisation des solutions passives. L'utilisation d'une tour à vent couplée par une cheminée solaire se trouve une solution passive du problème d'excès en humidité. Cette solution simulée par N. K. Bansal, Rajesh. Mathur, et M. S. Bhandari (Center for energy studies, Indian institute of technology, Hauz Khaz, New Delhi, INDIA) se base sur la cheminée solaire pour créer un courant d'air. L'air chauffé par la cheminée a tendance à sortir et monter vers le haut, créant ainsi une dépression qui fera fonctionner la tour à vent et accentuera l'effet de rafraîchissement tout en diminuant du taux d'humidité relative de l'air (figure 7.19). Une autre alternative pourra donner de meilleurs résultats est d'interrompre peut être l'humidification pendant la nuit.

N. K. Bansal et al.

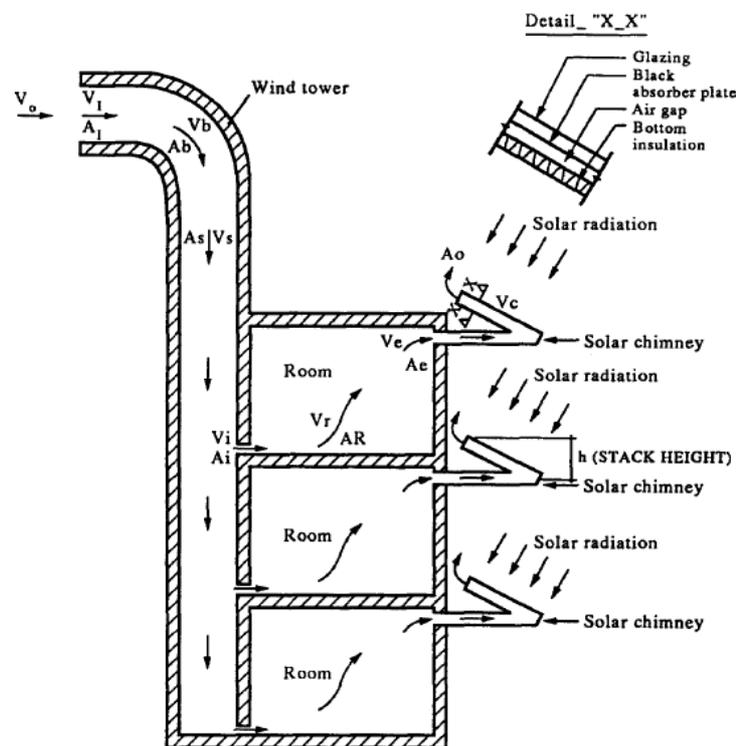


Fig. 1. Schematic of wind tower-solar chimney system.

Figure 7.176. : Utilisation couplée d'une tour à vent et une cheminée solaire

L'utilisation d'un ventilateur est une autre solution pour réduire le taux d'humidité relative. Dans la majorité des travaux et réalisations des tours à vent dans le monde, le ventilateur est placé au niveau supérieur de la tour à vent (tête de la tour), nous citerons la réalisation de la tour à vent de l'institut J. Blaustein pour la recherche sur le désert, université de Negev, Israël. Réalisée en 2007 par Evyatar Erell, David Pearlmutter et Yair Etzion, le ventilateur se trouve à la partie supérieure de la tour (figure 7.20). Dans notre cas il est préférable de placer le ventilateur au niveau de la bouche de soufflage car la conception architecturale le permet. Le

ventilateur est à l'abri des gouttelettes d'eau. Cette position lui permettra d'aspirer l'air frais de la bouche de soufflage et accentuera sa propagation au niveau du bureau, l'excès en humidité sera absorbé et il y'aura un brassage meilleur de l'air à l'intérieur du bureau

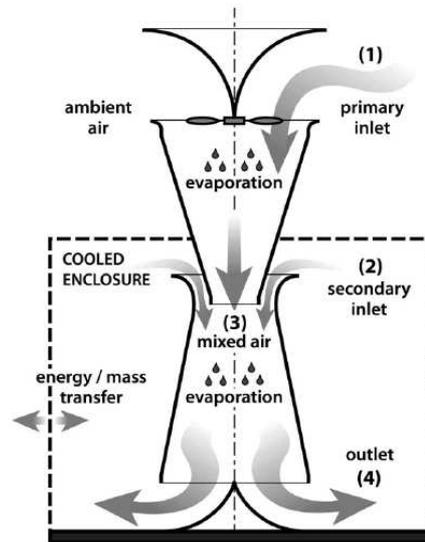


Figure 7.177 : Utilisation du ventilateur au niveau de la tête de la tour

Pour un bon control du taux d'humidité au niveau de la bouche de soufflage, l'utilisation d'un régulateur hygrométrique est la solution la mieux appropriée. L'hygrostat est un appareil qui control le taux d'humidité.

Cet hygrostat nous permettra de contrôler le taux d'humidité au niveau de la tour à vent et extracteurs afin de ne pas dépasser un seuil d'humidité choisi. Cet hygrostat peut déclencher le ventilateur ou arrêter le système d'humidification dès que l'humidité dépasse un certain seuil. Ou encore, de déclencher l'humidificateur si l'hygrométrie devient trop faible.

La détermination d'un intervalle d'humidité au niveau de la tour à vent, l'hygrostat déclenchera ou arrêtera selon le besoin le ventilateur et ou le système d'humidification.

Plusieurs modèles sont disponibles sur le marché, le prix varie selon le model et sa performance figure 7.21.



Figure 7.178 : Modèles d'hygrostat

Conclusions et recommandations

Promouvoir une ventilation naturelle en exploitant les potentiels de rafraîchissement passif des constructions que possède la tour à vent dans un climat chaud et aride en l'occurrence la ville de Hassi Messaoud ainsi que la réduction de l'utilisation de la climatisation artificielle et l'émission des gaz à effet de serre qui participe directement dans le réchauffement de la planète sont les objectifs principaux de ce travail.

Le recours à l'utilisation de systèmes passifs contribuera forcément à la réduction de ce phénomène et préservera par conséquent cette énergie fossile pour les générations future. La tour à vent est l'une des solutions qui peut être utilisée pour atteindre ce but.

Dans les régions chaudes et arides comme l'Iran, l'Iraq, l'Egypte et d'autre pays, grâce à certaines formes architecturales traditionnelles (capteur à vent / tour à vent) on n'obtient pas seulement une réduction des écarts de température mais aussi on peut faire circuler de l'air frais et humide dans le bâtiment en pleine canicule. Ce résultat est atteint sans faire appel à d'autres sources d'énergie que celles qui existent dans l'environnement naturel «vent, soleil et eau». A une époque où le coût de l'énergie dépasse considérablement celui de l'habitat, de tels systèmes méritent une attention particulière. Comme note N.Bahadori (1985), même dans les pays où les systèmes de refroidissements passifs ne trouveraient pas les mêmes applications qu'en Iran, ils prouveraient qu'on peut se servir de l'environnement extérieur au lieu de le combattre. Il faudrait qu'à l'avenir, les architectes et les ingénieurs tiennent d'avantage compte du climat et prennent soin d'examiner les possibilités d'installation de systèmes passifs de chauffage, de refroidissement et de ventilation. Munis de ces informations, ils devraient être capable de concevoir des immeubles dotés du confort moderne et ne consommant qu'un minimum d'énergie.

8.1 Conclusion et résultats des objectifs

Ce travail se veut comme objectif de vérifier les résultats de la simulation faite par Y. Bouchahm en 2003 qui visait l'évaluation du comportement de la tour à vent ajustée à la construction et sa performance thermique sur l'intérieur soumis à des sollicitations climatiques. Par conséquent son rendement et sa stratégie dans la régulation thermique. Ces techniques adoptées dans l'architecture traditionnelle sont d'actualités et sont réintégréés dans des projets contemporains, tout en apportant des améliorations architecturales et techniques afin de s'adapter dans une architecture moderne et pour une société en plein changement.

Les améliorations techniques, malgré les difficultés rencontrées durant la phase de réalisation et d'expérimentation sont une contribution qui favorise l'épanouissement des expressions architecturales et urbaines.

Durant la période entre le mois de Mai et le mois d'Août, les mesures ont été entreprises avec et sans humidification pour une durée d'une semaine pour chaque cas de figure.

Le but de cette campagne de mesure avec et sans humidification était de confirmer l'effet de rafraîchissement passif seul de la tour à vent obtenu par le transfert de chaleur directe entre l'air entrant dans les conduits et la masse (à savoir les blocs de briques rouges) et l'effet de rafraîchissement passif évaporatif en utilisant l'eau pour humidifier les conduits d'air de la partie centrale de la tour, le bassin d'eau au niveau de la base de la tour augmentera le taux d'humidité et diminuera aussi la température de l'air allant vers la bouche de soufflage.

Les paramètres affectant la ventilation naturelle (induite par la tour à vent et refroidissement des constructions testées et mesurées) sont :

- Des mesures de températures et d'humidités relatives de l'air à l'intérieur du bureau au niveau de la bouche de soufflage et à l'extérieur au niveau de l'entrée d'air (tête de la tour) ainsi que les températures et les humidités relatives de l'air données par la station météo. Ceci a été la première stratégie concernant la mise en évidence du pouvoir de rafraîchissement par effet de masse (transfert de chaleur entre l'air et les cloisons en briques des conduits de la tour) de ce système et sa participation dans la réduction de la température qui est un des facteurs dominants pour le maintien du confort. Dans ce cas le système d'humidification n'était pas mis en service et la comparaison était faite entre les paramètres de mesures à l'intérieur et à l'extérieur de la tour à vent réalisée.
- L'aridité de l'air de la ville de Hassi Messaoud et les résultats obtenus lors de la première série d'expérimentation ont incité à une deuxième démarche, là où l'humidification, facteur favorisant la réduction de la température et l'augmentation de l'humidité relative de l'air au soufflage à l'intérieur du bureau est introduite et le système d'humidification était mis en service.

Avec l'utilisation du système d'humidification les résultats obtenus étaient meilleurs que ceux de la simulation, l'écart maximal de la température de l'air entre l'entrée et le soufflage de l'air enregistré durant la période de mesure était de 22,1°C, avec cette réduction de température le confort était largement atteint (la limite de confort ainsi calculée pour la ville de Hassi Messaoud 25/29°C).

Cependant, les résultats obtenus avec cette stratégie vis-à-vis de l'humidité relative de l'air mesurée au soufflage étaient plus ou moins supérieurs aux limites de confort.

Malgré la mise en opération du système d'humidification d'une journée sur deux le taux d'humidité restait un peu élevé. Plusieurs solutions passives et actives trouvent leurs places dans les solutions proposées, reste à vérifier leurs efficacités.

Ce travail a pu confirmer les deux objectifs soulignés par cette étude, la corrélation entre les résultats des simulations et ceux de l'expérimentation où il a été constaté une coïncidence des écarts et même de meilleurs résultats ont pu être obtenus avec cette configuration spécifique, donc une validation du programme utilisé et confirmation des simulations d'un côté.

Le second résultat positif méritant d'être mentionné est la confirmation absolue de la relation étroite qui existe entre la configuration ou la conception de la tour à vent (Hauteur/largeur des conduits humidifiés et leurs répartitions) et les écarts de températures et des humidités de l'air obtenus au soufflage.

La masse de la brique rouge est d'environ 306 Kg, la partie centrale de la tour à vent a une surface d'échange ou transfert de chaleur de l'ordre de 127 m². On assiste ici à une augmentation d'environ 5 fois de la surface d'échange (air et masse). Nous enregistrons en mois de juillet un écart de température de 14,2°C pour atteindre une température moyenne de l'air à l'intérieur du bureau de 33,8°C, ce résultat est obtenu dans le cas où l'effet de tirage thermique seul est déployé (différence de température et de pression).

En utilisant le système d'humidification et d'arrosage des conduits intérieurs de la tour. L'eau est directement absorbée par les conduits qui ont une hygroscopicité importante, le transfert de chaleur se fait par évaporation d'eau et aussi en contact avec les parois humidifiées. L'eau en s'évaporant absorbe une grande quantité de la chaleur de l'air entrant, l'écart maximal enregistré en mois de juillet est de 22,1°C, la température de l'air à l'intérieur du bureau était de 25,5°C tandis que l'humidité relative de l'air toujours à l'intérieur du bureau était de 80%.

La réalisation ou l'expérimentation a le pouvoir d'exploiter le potentiel de refroidissement évaporatif, et pourra distribuer l'air à l'intérieur du bureau avec des températures très basses et réduites. Par conséquent l'air soufflé est filtré de toute impureté et poussière venant de l'extérieure.

L'analyse des résultats obtenus durant la période d'expérimentation du mois de Mai à Août illustre cet effet de rafraîchissement et montre la relation directe entre cet effet et la température de l'air au niveau de la tête de la tour.

En effet plus la température de l'air à l'entrée augmente, l'efficacité de la tour est maximale. La tour à vent atteint son rendement maximal durant la période où le besoin de rafraîchissement est le plus demandé (période entre 10h à 18h)

8.2 Recommandations

Afin d'assurer le confort physiologique sous les climats chauds et arides et de vérifier l'effet de rafraîchissement passif de la tour à vent réalisée à Hassi Messaoud et le rôle de l'humidification dans la réduction de la température de l'air ainsi que l'augmentation du taux d'humidité relative à l'intérieur du cadre bâti. Les constructions doivent être adaptées aux conditions d'été en partant du principe que les exigences d'hiver seront satisfaites par un chauffage d'appoint surtout la nuit, par contre le confort du jour sera atteint par des gains solaires directs. A partir des diagrammes étudiés dans le chapitre 5 « expérimentation », les conditions chaudes et arides sont incluses dans la zone de refroidissement évaporatif.

Ceci indique que le confort d'été dans ces régions ne sera atteint sans le recours à un système de refroidissement actif tel que la climatisation artificielle ou un système passif, comme la solution adoptée dans cette étude, la tour à vent pour un rafraîchissement évaporatif passif.

D'après les résultats obtenus, les mesures représentées par des graphes des températures et des humidités relatives de l'air au niveau de la bouche de soufflage sont des outils d'illustration et de vérification. Elles nous permettent de distinguer cet effet de rafraîchissement dans les deux cas de figures, avec ou sans le système d'humidification. Les résultats nous montrent que l'effet de rafraîchissement sans utilisation de système d'humidification reste insuffisant. Les températures de l'air au soufflage restent au dessus de la zone de confort et l'humidité relative de l'air au soufflage est toujours au dessous de la limite de confort. Avec l'utilisation du système d'humidification, les températures de l'air au soufflage réintègrent largement la zone de confort, les humidités relatives obtenues au soufflage dépassent à certaines heures des journées les limites de confort, on doit souligner que ces résultats sont obtenues aux soufflages mais l'air humide sera mélangé avec l'air sec du bureau on suppose que le confort sera établi.

Cependant si ce problème persiste, certaines solutions sont envisageables pour mieux contrôler le débit d'eau au niveau de la tour à vent et par conséquent le taux d'humidité au soufflage.

La configuration de la tour à vent comme simulée et réalisée ainsi que l'utilisation du système d'humidification influent directement sur les températures et les humidités de l'air au soufflage. La nuit, la température de l'air extérieur est inférieure à la température de l'air intérieure (caractéristiques du climat chaud et aride), dans ce cas, il faut favoriser le

refroidissement passif par ventilation naturelle nocturne. Celui-ci consiste à refroidir la structure du bâtiment à l'aide de la ventilation naturelle, de manière à permettre à cette chaleur et l'humidité excédante accumuler dans la structure pendant la journée d'être évacuer et chasser du bâtiment. Le bâtiment est ainsi aéré et la masse sera refroidie pendant cette période.

Pour le refroidissement par ventilation nocturne, l'amplitude des variations de la température de l'air extérieur doit être importante (**minimum 5°C**) (Claude Alain Roulet ; 2002).

D'autre part les conclusions ont conduit aux recommandations qui peuvent être considéré comme outil d'aide à la réalisation des constructions bioclimatiques « autonome » pour une bonne partie de l'année. En d'autre terme maintenir l'ambiance dans une zone de confort acceptable avec un minimum d'utilisation d'énergie (Y. Bouchahm 2003).

La maîtrise et la modernisation du système de refroidissement passif, changera forcément notre façon de concevoir la climatisation. La réalisation du model simulé par outil informatique nous a donner la certitude concernant son pouvoir de rafraichissement évaporatif passif en premier lieu ainsi que son rôle dans l'économie de l'utilisation de la climatisation artificielle dans les bâtiments et la réduction des coûts de l'utilisation de l'énergie électrique.

8.3 Originalité et contribution à la science

La validation des résultats simulés par la réalisation à échelle réelle de la tour à vent dans un climat chaud et aride en l'occurrence la ville de Hassi Messaoud ainsi que la prise de mesures et leurs interprétations durant la période la plus chaude de l'année est originale dans sa forme car, elle c'est la méthode la plus proche de la réalité. Par conséquent elle peut fournir aux concepteurs et architectes des résultats exactes et très fiables concernant la mise en œuvre et le rôle que joue la tour à vent dans le rafraichissement évaporatif passif, technique mal connue dans notre pays.

Les résultats obtenus de cette expérimentation à l'échelle réelle et la détermination de la performance thermique de cette tour à vent, ainsi réalisée, à travers la campagne de mesure durant toute la période estivale ou la demande de la climatisation est maximale nous confirme que réellement avec un tel système on peut s'en passer du climatiseur ou au moins on peut réduire au maximum son utilisation du fait qu' il a été prouver que l'efficacité optimale du système est réalisé lors des grandes canicules et que le confort intérieur est atteint à moindre coût et sans l'utilisation d'énergie non renouvelable. Ce système (tour à vent) rentre dans le

cadre de solution bioclimatique économique et écologique durable non polluant comme le climatiseur et ses émissions du CFC qui a été juger comme élément qui participe à l'apparition de l'effet de serre et de l'îlot de chaleur urbain dans les régions chaudes et arides.

Malgré le coût excessivement élevé des systèmes mécaniques de conditionnement d'air (climatiseurs), la consommation énergétique exorbitante et les problèmes directement liées aux gaz à effet de serre (gaz à CFC) de ces derniers. Le recours à l'utilisation excessif de ces systèmes est devenu une habitude chez les habitants de ces régions. Le recours aux tours à vent s'avère aujourd'hui plus que avantageux mais indispensable dans de nombreuses régions.

8.4 Recommandations pour des recherches futures

Plusieurs aspects de ce travail révèlent d'importante considération pour de futures recherches.

Les résultats obtenus ont indiqués clairement le besoin de certaines améliorations qui doivent être appliquées dans plusieurs étapes de la réalisation de la tour à vent afin d'aboutir a des résultats meilleurs répondant aux normes de confort dans ces régions.

- L'utilisation d'un système de régulation de l'humidité relative de l'air à savoir un Hygrostat réglera tous les problèmes rencontrés lors de la phase mise en service de la tour à vent avec humidification.
- L'utilisation d'un petit ventilateur au niveau de la bouche de soufflage ou système passif (cheminée solaire...etc.) permettrons une bonne propagation de l'air soufflé à l'intérieur du local et diminueront aussi l'excédent d'humidité et balaiérons l'air d'une façon homogène à l'intérieur du local.
- Le recours à une bonne manipulation des fenêtres le soir qui vont créer une ventilation naturelle diminuera de la température à l'intérieur du local et chassera l'excès de chaleur dû à sa restitution cumulée dans les parois exposées au soleil durant la journée.
- Une industrialisation du procédé permettra d'écourter les délais de réalisation et facilitera la mise en œuvre du système. Cela réduira impérativement le coût de la réalisation des tours à vent et permettra une utilisation plus large à moindre coût.
- La validation des résultats obtenus par les organismes y afférent permettra l'utilisation élargie du procédé de refroidissement évaporatif à travers le territoire national.

Le mouvement de l'air est un régulateur thermique incontournable. L'étude de ces phénomènes nécessite une investigation plus poussée et détaillée par des moyens techniques adéquats. Les résultats permettront de dégager des critères de conceptions et de réalisations pour les futures tours à vent.

L'élargissement de l'utilisation des tours à vent dans les régions chaudes et arides en Algérie dépend de la prise de conscience des architectes, ingénieurs et chercheurs du problème de la négligence du climat dans la conception. Il faudra qu'ils tiennent en compte d'avantage du climat et prennent soin d'examiner les possibilités d'introduire les systèmes de refroidissement évaporatif passif qui induit la ventilation naturelle. Muni de ces informations, ils devraient être capables de concevoir des constructions dotées du confort moderne et ne consommant qu'un minimum d'énergie.

Références

- Abro, R, S**, 1994, Recognition of passive cooling techniques.
- Addeen, M, omer**, 2006, Renewable building energy systems and passive human comfort solutions.
- Alain, Liébard et André de Herde**, 2005. Traites d'architecture et d'Urbanisme Bioclimatique. Elizabeth francis, brian ford, 1999. Sustainable and energy efficient building, Développements récents dans Dwindraught refroidissement passif, une perspective architecturale.
- ASHRAE, Conditioning Engineers Inc.**, 1993. Energy efficient design of new building except new low-rise residential buildings. BSRIASHRAE proposed standards 90-2P-1993, alternative GA. USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air.
- Aung, W, Fletcher LS, Sernas V.** 1972;15:2293–308. Developing laminar free convection between flat plates with asymmetric heating. Int J Heat Mass Transfer.
- Awbi, H.** 1991. Ventilation of buildings. London: Spon.
- Azami, A**, 2005, Badgir in traditional Iranian architecture.
- Badran, A, A**, 2003, Performance of cool towers under various climates in Jordan.
- Bahadori, MN.** 1978;238 (2):144–52. Passive cooling system in Iranian architecture. Sci Am.
- Bahadori, M.** Massachusetts, 1988, A passive cooling/heating system for hot arid regions. In: Proceedings of the American Solar Energy Society Conference, Cambridge. p. 364–7.
- Bansal, NK, Mathur R, Bhandari MS.** 1994;29(4):495–500. A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. Build Environ.
- Benhamouda, L.** 2001, Analyse de la perception du confort thermique dans les regions arides et semi arides (bousaada) magister en architecture Biskra.
- Bennadji, A.** 1999, Adaptation climatique ou culturelle en zones arides, cas du Sud-est Algérien. Thèse de doctorat, Université Aix Marseille, France.
- Belarbi, R, Ghians, C, Allard, F.** 2006, Modeling of water spray evaporation: application to passive cooling of buildings.
- Belrabi, R, Spérandio, M, Allard, F.** 1997, evaluation des batiments munis de systems de rafraichissement passif. Application au cas de l'évaporation adiabatique.
- Bilgen, E, Ben Yedder R.** 2006. Natural convection in enclosure with heating and cooling by sinusoidal temperature profiles on one side. Int J Heat Mass Transfer.

-
- Bilgen, E, Chaaban M.** 1982;28 (3):227–33. Solar heating–ventilating system using a solar chimney. *Sol Energy*.
- Bilgen, E, Michel J.** 1979 [chapter 19]. Integration of solar systems in architectural and urban design. In: Sayigh AAM, editor. *Sol Energy Appl Build*. New York: Academic Press.
- Bouchahm, Y.** 2003, 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.
- Bouchair, A.** 1994;18(2):81–93. Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria. *Build Serv Eng Res Technol*.
- Calnay, E., M. Cai.** (2003), Impact of urbanization and land-use change on climate, *Nature*, 423, 528-331.
- Chalfoun, N, V.** 1995, Conception et application des dispositifs normaux de refroidissement par évaporation de down-draft.
- Chalfoun, N.,** 1990. Autres planification et critères architecturaux en ce qui concerne le climat : Comportement thermique d'enveloppe de bâtiment. Académie égyptienne de Research et de Technology scientifiques, le Caire, Egypte.
- Chalfoun, N.,** CoolT, V. 1.4. (1992). Garantissent les droits d'auteur le programme frais d'exécution de tour, le laboratoire environnemental de recherches, université de l'Arizona, Tucson, Arizona.
- Chand, I, Bhargava, P, K.** 1989, Studies on design and performance of a non-conventional system of natural ventilation in buildings.
- Chattot, J, J.** 2007, Tower shadow modelization with helicoidal vortex method.
- Crisp, V, Cooper I, McKennan G.** 1988, Daylighting as a passive solar energy option: an assessment of its potential in non-domestic buildings. Report BR129-BRE.
- Detuncq, B, Bilgen E.** 1984;8(1):35–9. Etude expérimentale d'un capteur solaire du type Trombe et validation des relations théoriques. *Trans CSME*.
- El mualim, A, A.** 2005, Effect of damper and heat source on wind catcher natural ventilation performance.
- Erell, E, Pearlmutter, D, Etzion, Y,** 2007, A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces: aerodynamic performance.
- Erell, E, Pearlmutter, D, Guetta, R, Pecornik, D, Zimmermann, H, Krutzler, F.** 2005, A novel multi-stage down-draft evaporative cool tower for space cooling. Part I: Aerodynamic design.

-
- Erell, E, Etzion, Y, Pearlmutter, D, Guetta, R, Cornik, D, P, Zimmermann, H, Krutzler, F.** 2005, A novel multi-stage down-draft evaporative cool tower for space cooling; Part II: Preliminary experiments with a water spraying system.
- Etzion, Y. D. Pearlmutter, E. Erell. I.A. Meir,** Automation dans la construction 6(1997) 417-425, Architecture adaptative : technologies à énergie réduite d'intégration pour les études du climat dans le désert.
- Fanger, P.** 1970. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press.
- Foelich, N, J, Schmid, H, P.** 2006, Flow divergence and density flows above and below a deciduous forest. Part II, Below-canopy thermotopographic flows.
- Ford, Brian et autres.** 1996, Refroidissement par évaporation passifs de Downdraught dans les bâtiments non domestiques. Un examen de la situation actuelle courante, démarches de la 4eme conférence européenne sur l'énergie solaire dans l'architecture, Berlin.
- Fordham, M.** 2000;19:17–37. Natural ventilation. *Renew Energy*.
- Francis, E, Ford, B,** 1999, Développements récents dans downdraught refroidissement passif.
- Fujibe, F.** (1995), Temperature rising trends at Japanese cities during the last hundred years and their relationships with population, population increasing rate and daily temperature ranges, *Papers in Meteorology and Geophysics*, 46, 2, 35-55.
- Gallo, K.P. et al.** (1999), Temperature trends in the US historical climatology network based on satellite designated land-use land-cover, *Journal of Climate*, 12, 5, 1344-1348.
- Gonzalez, J.E. et al.** (2005), Urban heat islands developing in coastal tropical cities, *Eos*, 86, 42, 397-403.
- Gan, G, Riffat SB.** 1998;18:1171–87. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery. *Appl Therm Eng.*
- Gao, M, Zhong Sun, F, Wang, K, Shi, T, Y, Zhao, Y, B.** 2007, Experimental research of heat transfer performance on natural draft counter flow wet cooling tower under cross-wind conditions.
- Ghaemmaghami, P, S, Mahmoudi, M.** 2005, Wind tower a natural cooling system in Iranian traditional architecture.
- Givoni, B.** Man 1976. p. 289–306, Climate and architecture. London, UK: Applied Science Publisher Ltd;
BS 5454. 1989. Storage and exhibition archive documents. London: British Standard Institute.
- Givoni, B,** Passive low energy cooling of buildings, 1994.
- Geophys, J. Res.,** 106, 23947-23963.

-
- Hajter, S, J, Torcellini, P, A, Hayter, R, B, Judkoff, R, 2001, The energy design process for designing and constructing high-performance buildings.**
- Hansen, J. et al. (2001), A closer look at United States and global surface temperature change.**
- Hassen, Fathy. 1988, Natural energy and vernacular architecture, Arabic published, pages 101 a 113.**
- Higane, L.S. (1996), Is a signature of socio-economic impact written on the climate ?; *Climatic Change*, 22, 1, 91-162.**
- Horning, M, Skeffington R. 1993, Critical loads: concept and applications. Institute of Terrestrial Ecology.**
- Humphrey's, M. 1978;6(2). Outdoor temperatures and comfort indoor. Building Res Pract.**
- Ichinose, T. (2001), Regional warming related with land use change during past 135 years in Japan, in T. Matsumo, H. Kida, *Present and Future of Modeling Global Environmental Change: Toward Integrated Modeling*, 433-440, Terrapub.**
- Jin, M. et al. (2005), The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS, *Journal of Climate*, 18, 1551-1565.**
- Jones, P.D., A. Moberg (2003), Hemispheric and large-scale surface and temperature variations, an extensive revision and an update to 2001, *Journal of Climate*, 16, 206-223. Pp 186-196**
- Kant, K Mullik, S, C. 2003, Thermal comfort in a room with exposed roof using evaporative cooling in Delhi, *Building and environment* 38 (2003).**
- Kasmaee, M, 1999. Climat et architecture, page 344, 400.**
- Limb, MJ. AIVC. 1995, Air intake positioning to avoid contamination of ventilation.**
- Lobo, C. 1998, Defining a sustainable building. In: Proceedings of the twenty third national passive conference. American Solar Energy Society (ASES'98).**
- Mahyari, A, 1997. Tour á vent, thèse de Ph.D, université de Sydney, page 58-62.**
- Martin, W, WREC. 1996, Air quality control in commercial buildings.**
- Miller, G; Wadsworth. 1990, Resource conservation and management. California.**
- Molla, M. 1997, Air pollutants and its probable transmutation in the ionosphere. *Renew Energy* 10 (2/3):327-9.**
- Moujalled, B, Cantin, R, Guarracino, G. 2005, Adaptive thermal comfort evaluation in a field study.**

-
- Nader**, V. Chalfoun, 1997. Conception et application des dispositifs normaux de refroidissement par évaporation de down-draft.
- Nouanégué**, H, F, Alardji, L, R, Bilgen, E, 2007, Numerical study of solar-wind tower systems for ventilation of dwellings.
- Nouanégué**, H.F. et al. / *Renewable Energy* 33 (2008) 434–443 443.
- Oke**, T.R. (1976) City size and the urban heat island, *Atmos. Environ.*, 7, 769-79.
- Oke**, T.R. (1982), The energetic basis of an urban heat island, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108, 1-24.
- Parker**, D.E. (2004), Large-scale warming is not urban, *Nature*, 432, 18, 290.
- Patankar**, S.V. 1980, Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation.
- Pearlmutter**, D, Erell, E, Etzion, Y, Meir, I, A, 1996, Raffiner l'utilisation de l'évaporation dans une tour fraîche de down-draft expérimental.
- Peterson**, T.C. (2003), Assessment of urban versus rural in situ temperatures in the contiguous United States: No difference found, *Journal of Climate*, 16, 2941-2959.
- Pielke**, R.A. (2002), The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond radiative effect of greenhouse gases, *Phil. Trans. Res. Soc. Lond. A*, 360, 1705-1719.
- Pielke**, R.A., T. Matsui. (2005), Should light wind and windy nights have the same temperature trends at individual levels even if boundary layer averaged heat content change is the same, *Geophysical Research Letters*, 32, 21, doi:10.1029/2005GL024407.
- Roaf**, S. 2005, Air conditioning avoidance: lessons from the windcatchers of Iran.
- Shiva**, Tolouie et Hervé Richard. Avril 2006, Architectures Autrement, Habiter le Monde.
- Sodha**, M, 1991, Exécution thermique d'Al d'une salle couplée à une tour de refroidissement par évaporation. Démarches du congrès solaire du monde, Denver, le Colorado, Etats-Unis, pp. 3095-3100 (1991).
- Srivastava**, A, Nayak, J, K, Tiwari, G, N, Sodha, M, S. 1983, design and thermal performance of passive cooled building for the semiarid climate on India.
- Streutker**, D. (2003), Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas, *Remote Sensing of Environment*, 85, 3, 2595-2608.
- Soflaee**, F, Sho Kouhian, M. 2005, Natural cooling systems in sustainable traditional architecture of Iran.

-
- Thompson, T, Chalfoun, N., et Yoklic, M.** (1994), estimant l'exécution thermique des refroidisseurs évaporatifs de Down-draft normal, énergie Convers. Mgmt. Vol. 35, No.11, pp. 909-915, Science Ltd, Pergamon d'EL Sevier.
- Tiwari, G, N, Lugani, N, Singh, A, K.** 1992, Design parameters of a non-air conditioned cinema hall for thermal comfort under aride-zone climatic conditions.
- Torok, S.J. et al.** (2001), Urban heat island features of southeast Australian towns, *Aust. Met. Mag.*, 50 1-13.
- Tripathi, B, Moulic, S, G.** 2006, Investigation of the buoyancy affected air flow patterno in the enclosure subjected at the different wall temperatures.
- Van metter, C,** 1994, How to stay cool in the hot desert (with less power)
- Vikram, S.** 2005, College of architecture and environement design Arizona State University. Applying computational fluid dynamics to analyse natural ventilation and human confort in buildings.
- Watt, R.** (1986), manuel de refroidissement par évaporation, 22eme edn, pp. 107-114, 185. Chapman et Hall, New York.
- Yaghoubi, MA, Sabzevari A, Golneshan AA.** 1991; 47(2):97–106. Wind towers: measurementand performance. Sol Energy.
- Zhou, L. et al.** (2004), Evidence for a significant urbanization effect on climate in China, *PNAS*, 26, 9540-9544.
- Zomorshidy, H.** 1999, Architecture iranienne, Téhéran Amir Kabir, page15.

SITES INTERNET :

<http://www.europa.eu.int/comm/dg12>

http://europa.eu.int/comm/environment/index_fr.htm

http://europa.eu.int/comm/research/index_fr.html

<http://www.ei.jrc.it>

<http://www.nature.coe.int>

<http://www.irc.nl/lgfr/index.html>

http://www.worldwatercouncil.org/activities_events.htm

<http://www.unccd.ch>

http://www.environment.fgov.be/Root/tasks/atmosphere/klim/set_fr.htm

<http://www.climatechange.gc.ca/french/>

<http://www.ipcc.ch>

<http://www.iepf.org/>

<http://www.wri.org>

<http://www.globalforestwatch.org/french/>

http://www2.unesco.org/oss1/v_fr/presentation.htm

<http://www.unesco.org/general/fre/>

<http://www.unep.org>

http://www.unesco.org/water/ihp/index_fr.shtml

<http://www.unesco.org/ioc>

<http://iucn.org>

<http://www.academie-sciences.fr/>

<http://www.ademe.fr>

<http://www.eaufrance.tm.fr>

<http://www.brgm.fr>

<http://www.centre-cired.fr/home/home.htm>

<http://www.cnrs.fr/>

PÉRIODIQUES SCIENTIFIQUES :

<http://www.club-internet.fr/perso/passages>

<http://www.larecherche.fr>

<http://www.nature.com>

<http://www.pourlascience.com>

<http://www.yazd/the> city of wind catchers.com

<http://www.airconditioning.com>

<http://www.climax/comprendre le climat.com>

http://www.prim_net/les changements climatiques.com

<http://www.changement climatique.com>

<http://www.greenfacts.org> consensus scientifique sur le changement climatique

http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/facteur4_rapport.pdf

<http://www.insu.curs.fr>

http://www.medias.obs_imp.fr/giec

<http://www.frstrategie.org>

<http://www.onerc.gouv.fr/strategie nationale d'adaptation au changement climatique>

<http://www.ecologie.gouv.fr>

<http://www.effet de serre.gouv.fr/main.cfm>

<http://www.ukcip.org.uk>

<http://www.whc.unesco.org>

<http://www.emilis.sa.on.net>

<http://www.eetd.pbl.gov/heat Island>

<http://www.ashrae.org>

<http://www.clima2000.com>

<http://www.wikipedia.com>

http://www.architecture_arrizona_edu_research_hed_publications_ases97.com

<http://www.greenhouse.gov.an.yourhome.technical.fs152.com>

<http://www.airinfiltrationandventilationcentrecestquolaventilation.com>

<http://www.bespokesystems.com>

<http://www.bre.com>

<http://www.monodraught.com>, wind catcher case studies.com

<http://www.espace.net/changementclimatique>

<http://www.greenfacts.com>.consensus scientifique sur le changement climatique et le réchauffement de la planète

<http://www.wikipedia.com>, histoire du climat.com

<http://www.changementclimatique.com>

<http://www.lechangementclimatique.com>, le réchauffement climatique la documentation française.com

<http://www.lechangementclimatique.com>, l'effet de serre_ la documentation française.fr

<http://www.notreplanete.info>

<http://www.effetdeserre.com>, notre planete.info

<http://www.climatsceptique.com>/ ilots de chaleur urbains quand les villes rechauffent le monde

<http://www.courrierdes sciences.com>

<http://www.passiveairconditioning.com>

<http://www.sciencedirect.com>.renewable energy passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates.com

REVUES :

Richard, H, Tolouie, S, Architecture autrement, Habiter le monde, 2006

Casas (construire, renover, decorer), N°288, mars 2006

Dà, d'architecture, N°154, avril 2006

Habitat naturel, N°7, avril 2006.

Annexes

| | | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Températures | Températures moyennes max, °c | 17,7 | 20,4 | 25,9 | 30,4 | 35,7 | 40,9 | 43,4 | 42,4 | 37,6 | 31,8 | 23,4 | 19,3 |
| | Températures moyennes min, °c | 4,9 | 6,7 | 11,6 | 15,8 | 20,5 | 25,4 | 28,2 | 27,8 | 23,9 | 18,7 | 11,3 | 6,7 |
| | Températures moyennes annuelles, °c | 11,1 | 13,4 | 17,7 | 23,1 | 28,2 | 33,1 | 36,0 | 35,2 | 31,3 | 25,3 | 17,4 | 12,6 |
| Humidité | Humidité relative moyenne max, % | 86,5 | 81,5 | 67,8 | 63,5 | 55,6 | 49,5 | 45,6 | 53,9 | 62,3 | 72,9 | 81,7 | 84,2 |
| | Humidité relative moyenne min, % | 27,5 | 21,0 | 16,9 | 15,2 | 13,9 | 12,0 | 11,4 | 13,5 | 17,2 | 19,9 | 27,8 | 33,4 |
| | Humidité relative annuelle, % | 54,1 | 49,1 | 37,6 | 33,2 | 29,0 | 23,9 | 21,5 | 26,2 | 35,5 | 45,5 | 52,9 | 61,7 |
| Vent | Vent moyen, m/s | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,9 | 4,5 | 3,7 | 3,5 | 3,1 | 3,9 | 3,0 | 2,7 | 2,8 |
| | Vent max, m/s | 16,4 | 19,7 | 19,9 | 23,5 | 25,4 | 18,6 | 17,6 | 19,6 | 22,7 | 17,7 | 16,6 | 16,9 |
| | Direction du vent | N | S | WSW | W | S | NE | S | N | W | NNE | ENE | NNW |
| Précipitation | Précipitations, mm | 3,6 | 1,9 | 2,8 | 1,2 | 2,3 | 0,0 | 0,0 | 1,1 | 1,8 | 3,5 | 7,3 | 4,4 |

Tableau 5.5 : Données météorologiques de la ville de HASSI MESSAOUD (PERIODE de 1997-2006)

| Données Temperature | | | | | | | | | | Mesures sans Humidification |
|------------------------------|---------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|-----------------------------|
| | Mercredi 18/07/2007 | | | Jeudi 19/07/2007 | | | Vendredi 20/07/2007 | | | Sa |
| | TMEIO C | TEXT C | TINT C | TMEIO C | TEXT C | TINT C | TMEIO C | TEXT C | TINT C | TMEIO C |
| 01H00 | 29 | 29,6 | 32,2 | 27,5 | 30,2 | 32 | 27,3 | 30,8 | 33 | 29 |
| 02H00 | 27,8 | 28,6 | 32 | 26,8 | 28,7 | 32,1 | 26,6 | 29,4 | 32,8 | 28,3 |
| 03H00 | 27 | 27,8 | 31,6 | 26 | 27,6 | 32 | 26 | 28,9 | 33,5 | 27,5 |
| 04H00 | 26,2 | 26,7 | 31,2 | 24,6 | 26,5 | 31,4 | 24,5 | 28,4 | 32,3 | 26,1 |
| 05H00 | 25,2 | 26,5 | 31 | 25,5 | 26,3 | 32 | 24 | 28 | 32,1 | 25,7 |
| 06H00 | 23,7 | 26,3 | 31 | 24 | 26,1 | 31 | 25,5 | 27,5 | 32 | 25 |
| 07H00 | 25 | 27,6 | 31 | 25,2 | 27,4 | 32 | 26,2 | 28,5 | 31,8 | 26,2 |
| 08H00 | 27,4 | 28,5 | 31 | 28 | 28,2 | 31 | 29 | 28,9 | 31,6 | 28 |
| 09H00 | 30,1 | 33,5 | 31,6 | 31 | 33,7 | 32 | 32 | 34 | 32,2 | 31,4 |
| 10H00 | 32,5 | 35,4 | 32,2 | 33,6 | 34,3 | 32,3 | 34,5 | 35 | 32,9 | 33,9 |
| 11H00 | 34,4 | 36,7 | 32,3 | 35,7 | 37 | 34 | 36,6 | 37 | 32,9 | 36,3 |
| 12H00 | 36 | 37 | 32,5 | 36,5 | 37,9 | 33,5 | 37,6 | 37,7 | 32,9 | 37,5 |
| 13H00 | 36,5 | 38,3 | 32,7 | 37,4 | 40,3 | 33 | 39 | 39,2 | 33,1 | 39 |
| 14H00 | 37,4 | 39,5 | 32,9 | 37,8 | 41 | 33,6 | 39,8 | 39,9 | 33,3 | 39,5 |
| 15H00 | 38 | 40,4 | 32,6 | 38,5 | 40,6 | 33 | 40 | 41,7 | 33,5 | 40,6 |
| 16H00 | 38 | 39,7 | 33 | 39 | 40,4 | 33,8 | 40 | 41,2 | 34,8 | 40,9 |
| 17H00 | 38 | 39,2 | 32,5 | 38,8 | 40 | 32 | 39,6 | 40,6 | 34,2 | 40,9 |
| 18H00 | 37,3 | 38,5 | 32,6 | 38,1 | 39,7 | 34,1 | 39 | 40,2 | 34,4 | 40,1 |
| 19H00 | 36,5 | 36 | 32,8 | 37,4 | 37 | 33 | 38 | 39,7 | 34,2 | 39 |
| 20H00 | 35 | 34,1 | 33 | 36,4 | 35,2 | 34,1 | 36,7 | 38,5 | 34,1 | 36,5 |
| 21H00 | 33 | 33,5 | 32,9 | 34 | 33,7 | 33,5 | 34,6 | 35 | 34,1 | 33,5 |
| 22H00 | 31,8 | 31,8 | 32,9 | 31,6 | 32,6 | 33,7 | 32,6 | 33,7 | 34,2 | 31,7 |
| 23H00 | 30,7 | 31 | 32,5 | 29,5 | 31,2 | 33,5 | 31,3 | 32 | 34 | 31,4 |
| 24H00 | 28,3 | 30 | 32,4 | 28,1 | 30,9 | 33,2 | 29,3 | 31,8 | 33,8 | 30,7 |
| Moyenne | 31,87 | 33,18 | 32,18 | 32,13 | 33,60 | 32,74 | 32,90 | 34,48 | 33,24 | 33,28 |
| Moyenne de la semaine | 33,11 | | 34,49 | | | 33,34 | | | | |

| n | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|
| medi 21/07/2007 | | Dimanche 22/07/2007 | | | Lundi 23/07/2007 | | | Mardi 24/07/2007 | | |
| TEXT C | TINT C | TMEIO C | TEXT C | TINT C | TMEIO C | TEXT C | TINT C | TMEIO C | TEXT C | TINT C |
| 29,6 | 32,6 | 28,6 | 29,5 | 33,5 | 29 | 30,2 | 34 | 28 | 29,8 | 34 |
| 29,1 | 32,8 | 28,2 | 29,2 | 32,8 | 28,4 | 29 | 33,7 | 27,6 | 28,3 | 33,8 |
| 28,7 | 32,4 | 27,6 | 28,9 | 32,5 | 28 | 28,5 | 33,3 | 26,5 | 29 | 33,5 |
| 28,5 | 32,1 | 27,1 | 28,4 | 32,2 | 26,8 | 27,6 | 32,9 | 26,8 | 29,5 | 32,8 |
| 28,4 | 32,1 | 26,6 | 28,4 | 32,2 | 26,3 | 27,1 | 32,5 | 26,1 | 28,5 | 32,4 |
| 28,2 | 32,3 | 26,2 | 28,3 | 32,2 | 25 | 26,6 | 32,2 | 24,4 | 27,8 | 32 |
| 28,6 | 32,3 | 27 | 29,5 | 32,2 | 27 | 28,3 | 32,1 | 25,4 | 29,1 | 32,5 |
| 29,3 | 32,3 | 29,4 | 29,8 | 32,2 | 30 | 29,4 | 32 | 28,6 | 29,6 | 33 |
| 34,1 | 32,5 | 33 | 33 | 32,7 | 32 | 32,7 | 33 | 33,3 | 34,5 | 33,5 |
| 35 | 32,9 | 34,5 | 35,6 | 33,4 | 35,8 | 35,8 | 34,1 | 35,5 | 37,7 | 34,1 |
| 37,5 | 34,2 | 36 | 38,6 | 33,5 | 38 | 38,3 | 34,6 | 38,3 | 39,4 | 33,6 |
| 39,2 | 35,1 | 37,4 | 40,4 | 33,6 | 39,5 | 39,9 | 35,2 | 40 | 40,5 | 32,9 |
| 40,2 | 35,8 | 38,5 | 40,8 | 34 | 40 | 43,5 | 34,9 | 41 | 44,6 | 33,4 |
| 41,5 | 36,2 | 39,7 | 41,1 | 35,2 | 40,5 | 46 | 34,7 | 42 | 48,3 | 33,8 |
| 43 | 35,8 | 40,4 | 42,5 | 35 | 41 | 46,8 | 34,6 | 42 | 45,2 | 33,6 |
| 42,6 | 35,2 | 40,7 | 41,8 | 34,9 | 41 | 42,5 | 34,5 | 42,1 | 43 | 33,5 |
| 42,2 | 35,3 | 40,1 | 39,7 | 35 | 41,7 | 42 | 35 | 41,5 | 42,8 | 33,7 |
| 41,1 | 35,4 | 39,5 | 38,8 | 35,1 | 40,4 | 41,3 | 35,8 | 41 | 42,3 | 33,9 |
| 40 | 35,3 | 38,6 | 37,6 | 35,3 | 39 | 40,5 | 34,4 | 40 | 39,2 | 34 |
| 35,3 | 35,2 | 37 | 36,1 | 35,5 | 36,7 | 39,4 | 33,8 | 37 | 35,9 | 34,1 |
| 35 | 34,9 | 34 | 33,4 | 34,8 | 34,6 | 35,8 | 34,1 | 36 | 34,8 | 34,1 |
| 33,2 | 34,7 | 31,3 | 31,6 | 34,3 | 32,2 | 32,3 | 34,6 | 34,7 | 33,8 | 34,2 |
| 32 | 34,5 | 33 | 31,1 | 34,2 | 31,2 | 31,8 | 34,4 | 31 | 33,1 | 34,1 |
| 31,7 | 34,2 | 31 | 30,6 | 34,1 | 29,5 | 31,1 | 34,3 | 30,3 | 32,5 | 34,1 |
| 34,75 | 34,00 | 33,56 | 34,36 | 33,77 | 33,90 | 35,27 | 33,95 | 34,13 | 35,80 | 33,53 |

Tableau 6.9 : mesures des températures du 18 au 24 Juillet 2007

| Données Humidité | | | | | | | Mesures sans Humidification | | | |
|------------------------------|---------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | Mercredi 18/07/2007 | | | Jeudi 19/07/2007 | | | Vendredi 20/07/2007 | | | Sa |
| | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% |
| 01H00 | 30 | 20 | 17 | 28 | 21 | 17 | 23 | 22 | 18 | 25 |
| 02H00 | 34 | 26 | 19 | 30 | 26 | 17 | 23 | 27 | 18 | 27 |
| 03H00 | 37 | 28 | 19 | 32 | 27 | 18 | 25 | 28 | 19 | 30 |
| 04H00 | 40 | 30 | 20 | 37 | 29 | 19 | 28 | 30 | 20 | 36 |
| 05H00 | 43 | 30 | 20 | 37 | 29 | 19 | 29 | 29 | 20 | 34 |
| 06H00 | 44 | 30 | 20 | 40 | 30 | 18 | 27 | 28 | 19 | 31 |
| 07H00 | 37 | 24 | 19 | 40 | 25 | 18 | 27 | 24 | 19 | 30 |
| 08H00 | 34 | 18 | 18 | 34 | 19 | 19 | 23 | 20 | 20 | 26 |
| 09H00 | 31 | 14 | 18 | 28 | 14 | 19 | 20 | 15 | 19 | 20 |
| 10H00 | 27 | 9 | 19 | 23 | 10 | 18 | 22 | 9 | 18 | 17 |
| 11H00 | 24 | 9 | 19 | 20 | 7 | 18 | 17 | 9 | 18 | 15 |
| 12H00 | 18 | 9 | 19 | 16 | 3 | 17 | 15 | 9 | 18 | 13 |
| 13H00 | 19 | 6 | 19 | 15 | 3 | 17 | 12 | 7 | 18 | 12 |
| 14H00 | 16 | 5 | 18 | 14 | 2 | 16 | 13 | 6 | 17 | 11 |
| 15H00 | 14 | 3 | 18 | 13 | 1 | 16 | 12 | 3 | 17 | 10 |
| 16H00 | 14 | 4 | 17 | 11 | 2 | 16 | 10 | 4 | 17 | 0 |
| 17H00 | 14 | 4 | 17 | 11 | 2 | 16 | 11 | 4 | 17 | 0 |
| 18H00 | 14 | 3 | 16 | 12 | 3 | 17 | 13 | 4 | 18 | 0 |
| 19H00 | 14 | 3 | 16 | 12 | 4 | 17 | 14 | 3 | 18 | 9 |
| 20H00 | 13 | 3 | 15 | 14 | 5 | 18 | 17 | 3 | 18 | 12 |
| 21H00 | 17 | 5 | 15 | 17 | 6 | 19 | 19 | 5 | 18 | 16 |
| 22H00 | 21 | 6 | 16 | 20 | 7 | 20 | 21 | 7 | 19 | 19 |
| 23H00 | 21 | 6 | 16 | 22 | 7 | 19 | 24 | 8 | 19 | 20 |
| 24H00 | 24 | 7 | 16 | 21 | 6 | 17 | 25 | 8 | 18 | 21 |
| Moyenne | 25,00 | 12,58 | 17,75 | 22,79 | 12,00 | 17,71 | 19,58 | 13,00 | 18,33 | 18,08 |
| Moyenne de la semaine | 20,26 | | | 10,46 | | | 17,40 | | | |

| n | | Dimanche 22/07/2007 | | | Lundi 23/07/2007 | | | Mardi 24/07/2007 | | |
|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|------------------|-------------|--------------|------------------|-------------|--------------|
| Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% |
| 25 | 18 | 26 | 21 | 17 | 23 | 12 | 16 | 25 | 11 | 17 |
| 32 | 19 | 28 | 19 | 19 | 24 | 8 | 17 | 25 | 8 | 18 |
| 32 | 19 | 28 | 19 | 19 | 23 | 9 | 17 | 26 | 9 | 17 |
| 33 | 20 | 26 | 20 | 20 | 22 | 9 | 16 | 26 | 9 | 16 |
| 31 | 19 | 27 | 20 | 20 | 22 | 11 | 17 | 28 | 10 | 16 |
| 28 | 18 | 30 | 21 | 19 | 29 | 12 | 18 | 32 | 11 | 16 |
| 23 | 18 | 32 | 20 | 19 | 27 | 15 | 18 | 33 | 9 | 16 |
| 18 | 19 | 23 | 19 | 19 | 22 | 19 | 19 | 30 | 8 | 17 |
| 13 | 18 | 17 | 14 | 19 | 22 | 14 | 18 | 19 | 7 | 15 |
| 7 | 17 | 16 | 9 | 19 | 19 | 9 | 17 | 16 | 5 | 14 |
| 6 | 17 | 14 | 9 | 19 | 14 | 7 | 17 | 13 | 4 | 17 |
| 5 | 17 | 13 | 9 | 19 | 15 | 4 | 16 | 13 | 4 | 19 |
| 4 | 17 | 12 | 7 | 18 | 14 | 3 | 16 | 12 | 3 | 18 |
| 4 | 16 | 11 | 4 | 17 | 11 | 2 | 17 | 12 | 2 | 17 |
| 2 | 16 | 10 | 3 | 17 | 11 | 1 | 17 | 12 | 1 | 17 |
| 3 | 16 | 9 | 4 | 17 | 10 | 3 | 17 | 9 | 3 | 17 |
| 4 | 16 | 0 | 4 | 16 | 9 | 3 | 15 | 11 | 3 | 17 |
| 4 | 17 | 10 | 4 | 15 | 10 | 4 | 14 | 11 | 2 | 17 |
| 3 | 17 | 11 | 3 | 15 | 12 | 4 | 14 | 14 | 3 | 17 |
| 2 | 17 | 12 | 3 | 14 | 13 | 4 | 14 | 20 | 4 | 17 |
| 2 | 18 | 17 | 6 | 15 | 18 | 5 | 14 | 21 | 4 | 17 |
| 2 | 19 | 20 | 8 | 16 | 19 | 5 | 14 | 23 | 4 | 17 |
| 2 | 18 | 21 | 8 | 16 | 20 | 5 | 14 | 26 | 5 | 17 |
| 2 | 17 | 22 | 8 | 16 | 23 | 5 | 14 | 28 | 5 | 17 |
| 11,96 | 17,63 | 18,13 | 10,92 | 17,50 | 18,00 | 7,21 | 16,08 | 20,21 | 5,58 | 16,79 |

Tableau 6.10 : Mesures des humidités du 18 au 24 Juillet 2007

| Données Temperature | | | | | | | | | | Mesures avec Humidificatio |
|------------------------------|---------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|----------------------------|
| | Mercredi 25/07/2007 | | | Jeudi 26/07/2007 | | | Vendredi 27/07/2007 | | | Sa |
| | TMEIEO C | TEXT C | TINT C | TMEIEO C | TEXT C | TINT C | TMEIEO C | TEXT C | TINT C | TMEIEO C |
| 01H00 | 29 | 31,6 | 23,6 | 28,9 | 34,2 | 23,4 | 29,8 | 33,6 | 26,2 | 32,7 |
| 02H00 | 28,3 | 29,3 | 24,1 | 28 | 31,3 | 21,3 | 29,2 | 30,6 | 23,9 | 32,4 |
| 03H00 | 27,3 | 29,4 | 23,6 | 27,4 | 30,9 | 23,5 | 28,7 | 30,1 | 23,4 | 32 |
| 04H00 | 25,4 | 29,5 | 23,1 | 26,9 | 30,6 | 25,8 | 28,4 | 29,6 | 22,9 | 30,5 |
| 05H00 | 24,6 | 27,5 | 25,5 | 26,4 | 30,1 | 26 | 27,6 | 30,1 | 25,2 | 29,5 |
| 06H00 | 24 | 26,8 | 28 | 26,1 | 29,6 | 26,5 | 26,7 | 30,6 | 29,1 | 29 |
| 07H00 | 25,3 | 29,2 | 27,8 | 27 | 31,8 | 27,2 | 27,6 | 32,8 | 28,7 | 29 |
| 08H00 | 29 | 32,5 | 27,6 | 30,5 | 33 | 28,1 | 30,8 | 34,2 | 28,3 | 31 |
| 09H00 | 34,2 | 36,1 | 28,3 | 33 | 35,2 | 28,1 | 35,3 | 37,6 | 28,4 | 33,9 |
| 10H00 | 38,4 | 39,4 | 28,9 | 36,4 | 37,4 | 28,2 | 39 | 39,8 | 28,5 | 36,6 |
| 11H00 | 40 | 40,9 | 28,2 | 39 | 39,9 | 28,1 | 40,8 | 41,7 | 29,1 | 39,1 |
| 12H00 | 41 | 41,9 | 27,5 | 41 | 42,7 | 27,9 | 42 | 43,1 | 29,8 | 40,4 |
| 13H00 | 41,6 | 42,6 | 26,4 | 42 | 43,6 | 29,2 | 43,1 | 44,6 | 30,2 | 41,2 |
| 14H00 | 42 | 43,5 | 25,4 | 42,5 | 45,3 | 30,7 | 44 | 46,3 | 30,7 | 41,8 |
| 15H00 | 42,1 | 43,9 | 26,2 | 43,3 | 44,9 | 30,5 | 44 | 46,1 | 29,4 | 41,8 |
| 16H00 | 42,6 | 43,7 | 27,1 | 43,5 | 44,5 | 29,3 | 44 | 45,8 | 28,9 | 41,4 |
| 17H00 | 42,4 | 43,5 | 27 | 43,2 | 44,3 | 28,8 | 43,6 | 45,1 | 27,2 | 40,8 |
| 18H00 | 41,7 | 43,2 | 26,9 | 42,2 | 43,9 | 28,4 | 43,5 | 44,1 | 25,7 | 40 |
| 19H00 | 40,8 | 41,8 | 26 | 41,4 | 43,7 | 28,2 | 42,4 | 41,9 | 25,1 | 38,8 |
| 20H00 | 39 | 40,5 | 25,5 | 39 | 42,5 | 28,1 | 40,2 | 38,8 | 24,3 | 37,6 |
| 21H00 | 35 | 38,3 | 24,8 | 35,9 | 41,4 | 27,7 | 38,8 | 39,3 | 27,1 | 35,6 |
| 22H00 | 35,5 | 35,9 | 24,1 | 34,7 | 40,1 | 27,3 | 38 | 39,6 | 28,9 | 34 |
| 23H00 | 32,5 | 34,8 | 23,6 | 32,7 | 39,6 | 26,3 | 35,4 | 36,4 | 28,6 | 33 |
| 24H00 | 32 | 33,7 | 23,1 | 31,5 | 39,1 | 25,5 | 32,8 | 35,2 | 28,4 | 31,5 |
| Moyenne | 34,74 | 36,65 | 25,93 | 35,10 | 38,32 | 27,25 | 36,49 | 38,21 | 27,42 | 35,57 |
| Moyenne de la semaine | 34,88 | | 37,38 | | | 26,75 | | | | |

| 1 | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|
| medi 28/07/2007 | | Dimanche 29/07/2007 | | | Lundi 30/07/2007 | | | Mardi 31/07/2007 | | |
| TEXT C | TINT C | TMEIEO C | TEXT C | TINT C | TMEIEO C | TEXT C | TINT C | TMEIEO C | TEXT C | TINT C |
| 32 | 27,2 | 30 | 31,3 | 27,6 | 27,7 | 31,5 | 25,2 | 30,4 | 33,3 | 25,7 |
| 33 | 27,6 | 29,4 | 30,2 | 29,2 | 27,3 | 31 | 26,3 | 29,7 | 33,2 | 25,5 |
| 32,8 | 27,1 | 28,2 | 31,7 | 26,1 | 26,8 | 30,9 | 26,4 | 29 | 32,9 | 25,4 |
| 32,5 | 26,6 | 26 | 32,8 | 28,2 | 26,4 | 30,8 | 26,5 | 28 | 32,5 | 25,4 |
| 31,2 | 27,9 | 25,4 | 32 | 28 | 25,6 | 29,3 | 24,5 | 27,6 | 31,5 | 25,4 |
| 32,2 | 29 | 24,5 | 31,6 | 26,6 | 25 | 27,8 | 23,5 | 26,5 | 30,5 | 25,4 |
| 30,6 | 27,9 | 25,4 | 31,8 | 26,2 | 25,5 | 29,5 | 23 | 27 | 31,5 | 25,2 |
| 31,5 | 26,8 | 29 | 31,9 | 25,8 | 28,8 | 31,4 | 22,6 | 30,5 | 32,6 | 24,9 |
| 33,8 | 27 | 31,5 | 34,3 | 25,3 | 33 | 34,4 | 23,1 | 34,4 | 35,1 | 25,2 |
| 38,8 | 27,3 | 33,8 | 36,5 | 26,8 | 35,4 | 37,3 | 23,8 | 37 | 37,5 | 25,4 |
| 38,8 | 28,8 | 35,2 | 39,6 | 27,3 | 37 | 38,3 | 24 | 39,2 | 39 | 26,3 |
| 41,7 | 29,8 | 36,5 | 42,1 | 27,4 | 38,5 | 39,4 | 24,2 | 40,8 | 40,5 | 26,8 |
| 42,4 | 30,2 | 37 | 42,6 | 27,5 | 39,4 | 41,2 | 24,7 | 41,2 | 42,5 | 26,1 |
| 42,9 | 30,6 | 37,4 | 43,1 | 27,9 | 40,5 | 43,1 | 25,3 | 42 | 44,6 | 25,5 |
| 43,3 | 29,7 | 38,1 | 46,7 | 28,4 | 41 | 45,2 | 25,4 | 42,4 | 46,1 | 25,5 |
| 42,6 | 29,2 | 38,5 | 45,7 | 28,2 | 40,6 | 47 | 25,6 | 42,8 | 47,6 | 25,5 |
| 41,8 | 29,6 | 38,5 | 45,1 | 29,7 | 41 | 46,8 | 25,9 | 42,4 | 45,6 | 25,6 |
| 41,2 | 30,1 | 37,9 | 44,8 | 29,9 | 40,5 | 46,5 | 26,3 | 42 | 43,6 | 25,8 |
| 38,6 | 29,3 | 37,1 | 40,8 | 28 | 40 | 43,1 | 26,2 | 41 | 41,3 | 25 |
| 38,8 | 28,7 | 36,1 | 36,7 | 27,2 | 38 | 41,2 | 26,1 | 39,6 | 38,8 | 24,3 |
| 34,9 | 28,4 | 33,7 | 35,5 | 26 | 36 | 39,5 | 25,8 | 38,5 | 38,1 | 26,5 |
| 35,1 | 28,1 | 31,6 | 34,4 | 24,9 | 34 | 36,7 | 25,6 | 37,5 | 37,5 | 29,6 |
| 33 | 27,3 | 30 | 33,4 | 24,5 | 33,4 | 35,6 | 25,7 | 36,1 | 37,2 | 29,7 |
| 32,3 | 26,8 | 28,8 | 32,3 | 24,1 | 32,3 | 34,5 | 25,9 | 35 | 36,8 | 29,9 |
| 36,49 | 28,38 | 32,48 | 36,95 | 27,12 | 33,90 | 37,17 | 25,07 | 35,86 | 37,91 | 26,07 |

Tableau 6.11 : mesures des températures du 25 au 31 Juillet 2007

| Données Humidité | | | | | | | | | | Mesures avec Humidificatio |
|------------------------------|---------------------|-------------|--------------|------------------|-------------|--------------|---------------------|-------------|--------------|----------------------------|
| | Mercredi 25/07/2007 | | | Jeudi 26/07/2007 | | | Vendredi 27/07/2007 | | | Sa |
| | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% |
| 01H00 | 30 | 6 | 61 | 27 | 6 | 26 | 22 | 7 | 38 | 30 |
| 02H00 | 32 | 8 | 53 | 29 | 8 | 23 | 24 | 8 | 20 | 31 |
| 03H00 | 33 | 8 | 52 | 28 | 8 | 23 | 25 | 8 | 20 | 34 |
| 04H00 | 32 | 9 | 51 | 22 | 8 | 23 | 25 | 8 | 20 | 35 |
| 05H00 | 34 | 9 | 34 | 24 | 8 | 27 | 25 | 8 | 22 | 36 |
| 06H00 | 35 | 10 | 27 | 28 | 8 | 31 | 26 | 8 | 23 | 38 |
| 07H00 | 34 | 9 | 23 | 30 | 8 | 26 | 28 | 11 | 22 | 41 |
| 08H00 | 28 | 8 | 19 | 26 | 8 | 20 | 24 | 14 | 21 | 38 |
| 09H00 | 17 | 7 | 21 | 26 | 9 | 29 | 22 | 10 | 21 | 28 |
| 10H00 | 11 | 5 | 23 | 20 | 10 | 38 | 17 | 7 | 20 | 23 |
| 11H00 | 10 | 5 | 28 | 17 | 7 | 36 | 16 | 7 | 19 | 16 |
| 12H00 | 9 | 4 | 32 | 15 | 3 | 33 | 13 | 6 | 19 | 16 |
| 13H00 | 0 | 4 | 49 | 13 | 3 | 33 | 11 | 4 | 38 | 15 |
| 14H00 | 0 | 3 | 68 | 12 | 2 | 32 | 13 | 2 | 58 | 15 |
| 15H00 | 0 | 3 | 55 | 9 | 1 | 37 | 12 | 1 | 60 | 14 |
| 16H00 | 0 | 3 | 51 | 9 | 2 | 42 | 13 | 2 | 63 | 14 |
| 17H00 | 0 | 3 | 54 | 9 | 2 | 36 | 13 | 2 | 69 | 15 |
| 18H00 | 0 | 3 | 57 | 10 | 3 | 30 | 13 | 2 | 75 | 16 |
| 19H00 | 9 | 3 | 58 | 9 | 3 | 30 | 14 | 3 | 77 | 17 |
| 20H00 | 12 | 3 | 59 | 12 | 3 | 30 | 18 | 5 | 79 | 17 |
| 21H00 | 21 | 5 | 59 | 17 | 3 | 30 | 19 | 5 | 61 | 27 |
| 22H00 | 18 | 3 | 60 | 20 | 3 | 29 | 21 | 5 | 45 | 26 |
| 23H00 | 18 | 4 | 64 | 20 | 4 | 29 | 24 | 5 | 50 | 24 |
| 24H00 | 18 | 4 | 68 | 24 | 4 | 29 | 28 | 6 | 56 | 23 |
| Moyenne | 16,71 | 5,38 | 46,92 | 19,00 | 5,17 | 30,08 | 19,42 | 6,00 | 41,50 | 24,54 |
| Moyenne de la semaine | 21,73 | | 8,18 | | | 46,26 | | | | |

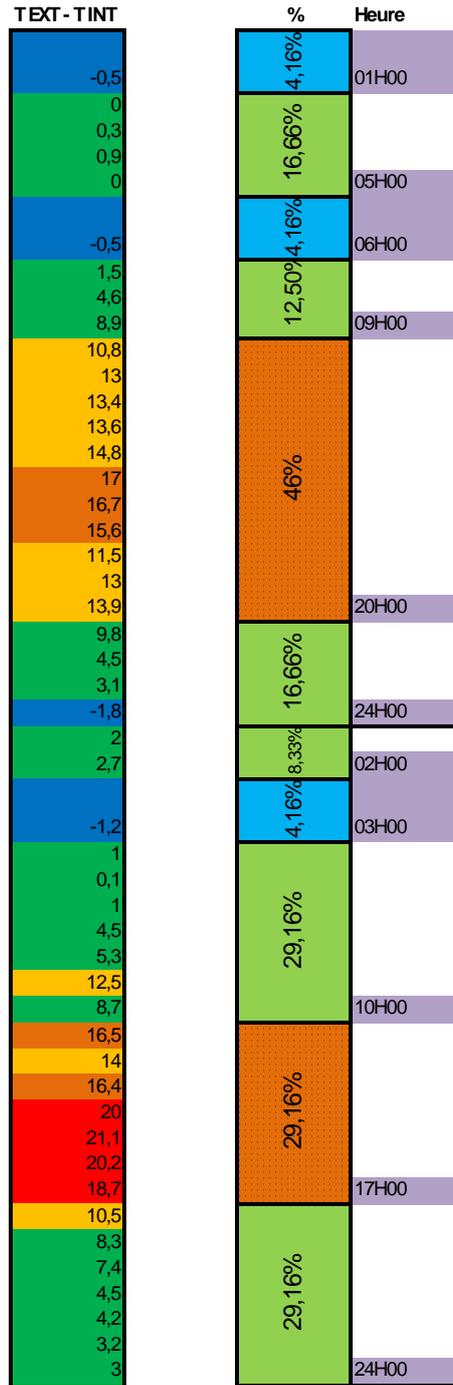
| n | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|------------------|-------------|--------------|
| medi 28/07/2007 | | Dimanche 29/07/2007 | | | Lundi 30/07/2007 | | | Mardi 31/07/2007 | | |
| Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% | Hr METEO% | Hr EXT% | Hr INT% |
| 14 | 43 | 23 | 14 | 26 | 38 | 18 | 56 | 30 | 10 | 59 |
| 9 | 55 | 25 | 9 | 22 | 39 | 19 | 36 | 31 | 12 | 58 |
| 9 | 55 | 25 | 10 | 22 | 39 | 19 | 32 | 33 | 13 | 61 |
| 9 | 55 | 31 | 12 | 22 | 41 | 20 | 29 | 33 | 14 | 65 |
| 14 | 41 | 33 | 15 | 26 | 42 | 22 | 49 | 30 | 15 | 69 |
| 18 | 26 | 38 | 19 | 28 | 41 | 24 | 70 | 31 | 16 | 73 |
| 19 | 30 | 39 | 21 | 29 | 39 | 22 | 72 | 33 | 16 | 70 |
| 20 | 34 | 33 | 22 | 30 | 28 | 20 | 74 | 25 | 15 | 67 |
| 15 | 32 | 28 | 18 | 25 | 21 | 16 | 72 | 18 | 12 | 67 |
| 10 | 30 | 20 | 13 | 21 | 19 | 14 | 69 | 14 | 8 | 68 |
| 8 | 26 | 20 | 8 | 20 | 16 | 10 | 68 | 15 | 6 | 67 |
| 6 | 22 | 20 | 3 | 19 | 16 | 7 | 67 | 15 | 4 | 67 |
| 6 | 34 | 19 | 4 | 33 | 17 | 4 | 65 | 15 | 3 | 72 |
| 6 | 45 | 19 | 5 | 47 | 15 | 2 | 63 | 15 | 2 | 80 |
| 4 | 35 | 18 | 3 | 49 | 15 | 1 | 64 | 14 | 1 | 78 |
| 6 | 27 | 18 | 2 | 50 | 16 | 2 | 65 | 15 | 2 | 76 |
| 6 | 31 | 18 | 2 | 46 | 18 | 2 | 63 | 14 | 2 | 76 |
| 6 | 38 | 18 | 2 | 43 | 15 | 2 | 60 | 14 | 3 | 75 |
| 9 | 34 | 19 | 5 | 55 | 17 | 3 | 64 | 15 | 4 | 80 |
| 16 | 30 | 22 | 8 | 67 | 20 | 5 | 68 | 18 | 5 | 84 |
| 17 | 31 | 27 | 11 | 70 | 23 | 4 | 73 | 19 | 5 | 64 |
| 19 | 32 | 31 | 14 | 73 | 23 | 6 | 78 | 21 | 5 | 44 |
| 18 | 31 | 35 | 16 | 73 | 25 | 7 | 69 | 21 | 5 | 50 |
| 18 | 30 | 38 | 18 | 73 | 27 | 9 | 61 | 23 | 6 | 55 |
| 11,75 | 35,29 | 25,71 | 10,58 | 40,38 | 25,42 | 10,75 | 61,96 | 21,33 | 7,67 | 67,71 |

Tableau 6.12 : mesures des humidités du 25 au 31 Juillet 2007

Données Temperature

| | TMEIEO°C | TEXT°C | TINT°C |
|-------|----------|--------|--------|
| 01H00 | 26,00 | 28,50 | 29,00 |
| 02H00 | 27,00 | 30,00 | 30,00 |
| 03H00 | 26,00 | 29,30 | 29,00 |
| 04H00 | 25,70 | 29,90 | 29,00 |
| 05H00 | 25,70 | 30,00 | 30,00 |
| 06H00 | 26,50 | 29,50 | 30,00 |
| 07H00 | 28,50 | 31,50 | 30,00 |
| 08H00 | 31,80 | 34,60 | 30,00 |
| 09H00 | 35,00 | 37,90 | 29,00 |
| 10H00 | 38,00 | 40,80 | 30,00 |
| 11H00 | 39,00 | 42,00 | 29,00 |
| 12H00 | 40,60 | 43,40 | 30,00 |
| 13H00 | 41,60 | 44,60 | 31,00 |
| 14H00 | 42,50 | 45,30 | 30,50 |
| 15H00 | 42,50 | 45,50 | 28,50 |
| 16H00 | 42,00 | 44,70 | 28,00 |
| 17H00 | 40,40 | 43,10 | 27,50 |
| 18H00 | 38,80 | 41,50 | 30,00 |
| 19H00 | 36,50 | 39,00 | 26,00 |
| 20H00 | 35,60 | 38,90 | 25,00 |
| 21H00 | 34,30 | 36,80 | 27,00 |
| 22H00 | 32,60 | 35,00 | 30,50 |
| 23H00 | 31,30 | 34,10 | 31,00 |
| 24H00 | 26,80 | 29,20 | 31,00 |
| 25H00 | 30,50 | 33,00 | 31,00 |
| 26H00 | 30,50 | 33,20 | 30,50 |
| 27H00 | 30,00 | 29,80 | 31,00 |
| 28H00 | 29,40 | 32,00 | 31,00 |
| 29H00 | 28,30 | 31,10 | 31,00 |
| 30H00 | 29,00 | 32,00 | 31,00 |
| 31H00 | 31,00 | 34,00 | 29,50 |
| 32H00 | 32,50 | 35,30 | 30,00 |
| 33H00 | 34,40 | 37,00 | 24,50 |
| 34H00 | 37,00 | 39,70 | 31,00 |
| 35H00 | 39,00 | 41,50 | 25,00 |
| 36H00 | 40,00 | 42,00 | 28,00 |
| 37H00 | 40,60 | 43,40 | 27,00 |
| 38H00 | 41,00 | 44,00 | 24,00 |
| 39H00 | 40,80 | 43,60 | 22,50 |
| 40H00 | 40,50 | 43,20 | 23,00 |
| 41H00 | 39,00 | 41,70 | 23,00 |
| 42H00 | 37,40 | 40,00 | 29,50 |
| 43H00 | 35,70 | 38,30 | 30,00 |
| 44H00 | 35,20 | 37,90 | 30,50 |
| 45H00 | 33,00 | 35,00 | 30,50 |
| 46H00 | 32,20 | 35,20 | 31,00 |
| 47H00 | 30,70 | 33,70 | 30,50 |
| 48H00 | 30,50 | 33,00 | 30,00 |

Mesures avec Humidification



| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 49H00 | 28,40 | 31,20 | 30,50 |
| 50H00 | 27,70 | 30,60 | 30,50 |
| 51H00 | 26,80 | 29,60 | 30,50 |
| 52H00 | 25,70 | 28,50 | 30,50 |
| 53H00 | 25,40 | 28,10 | 30,50 |
| 54H00 | 26,80 | 29,70 | 30,00 |
| 55H00 | 29,40 | 32,20 | 30,00 |
| 56H00 | 33,00 | 35,80 | 29,50 |
| 57H00 | 35,00 | 37,90 | 29,00 |
| 58H00 | 38,20 | 41,00 | 28,50 |
| 59H00 | 39,50 | 42,40 | 32,00 |
| 60H00 | 41,00 | 43,50 | 27,00 |
| 61H00 | 42,00 | 43,90 | 22,00 |
| 62H00 | 41,70 | 43,70 | 21,50 |
| 63H00 | 41,80 | 43,40 | 21,00 |
| 64H00 | 40,40 | 42,40 | 21,00 |
| 65H00 | 39,90 | 42,20 | 21,00 |
| 66H00 | 38,40 | 40,50 | 21,00 |
| 67H00 | 35,80 | 38,50 | 21,00 |
| 68H00 | 33,60 | 36,60 | 21,50 |
| 69H00 | 33,50 | 36,50 | 21,50 |
| 70H00 | 31,00 | 34,00 | 22,00 |
| 71H00 | 29,10 | 32,10 | 24,00 |
| 72H00 | 29,70 | 32,70 | 25,00 |
| 73H00 | 26,20 | 29,20 | 23,50 |
| 74H00 | 25,50 | 28,50 | 23,00 |
| 75H00 | 25,00 | 28,00 | 24,00 |
| 76H00 | 24,50 | 27,50 | 23,50 |
| 77H00 | 25,00 | 28,00 | 26,00 |
| 78H00 | 25,90 | 28,70 | 27,00 |
| 79H00 | 29,00 | 31,80 | 26,00 |
| 80H00 | 34,00 | 36,80 | 24,00 |
| 81H00 | 37,00 | 40,00 | 25,50 |
| 82H00 | 40,00 | 42,70 | 25,00 |
| 83H00 | 42,30 | 45,30 | 29,00 |
| 84H00 | 43,00 | 46,00 | 28,00 |
| 85H00 | 43,00 | 46,00 | 27,00 |
| 86H00 | 43,60 | 45,60 | 25,00 |
| 87H00 | 43,60 | 45,40 | 23,00 |
| 88H00 | 42,50 | 44,20 | 22,00 |
| 89H00 | 39,00 | 42,00 | 23,00 |
| 90H00 | 37,60 | 40,60 | 28,00 |
| 91H00 | 36,70 | 39,70 | 29,00 |
| 92H00 | 36,00 | 39,00 | 30,00 |
| 93H00 | 35,40 | 38,40 | 30,50 |
| 94H00 | 34,50 | 37,50 | 30,50 |
| 95H00 | 34,00 | 37,00 | 30,00 |
| 96H00 | 27,00 | 30,00 | 29,50 |

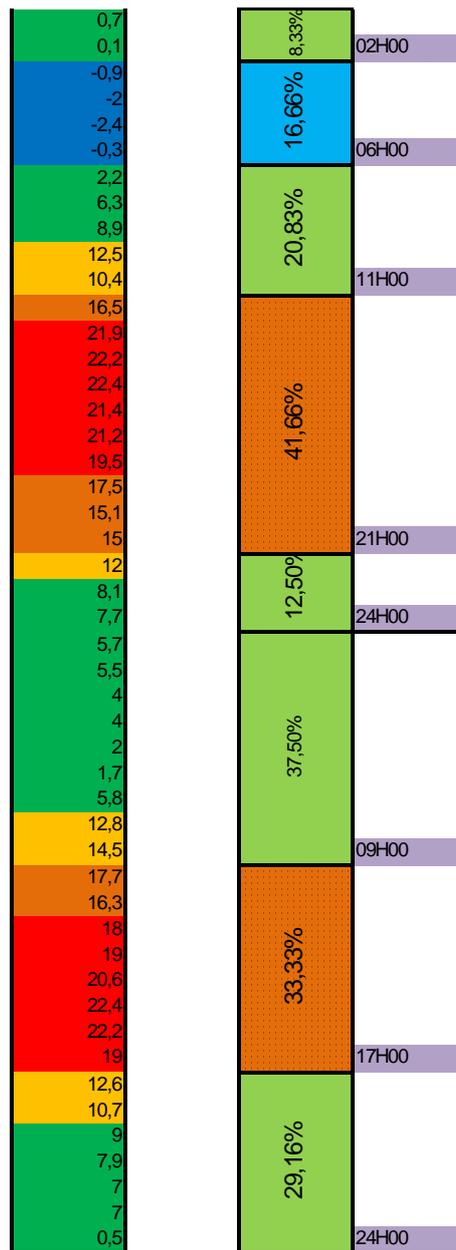


Tableau 6.13 : Tableau des températures pour la période du 22 au 25 Mai 2007, mesures avec Humidification

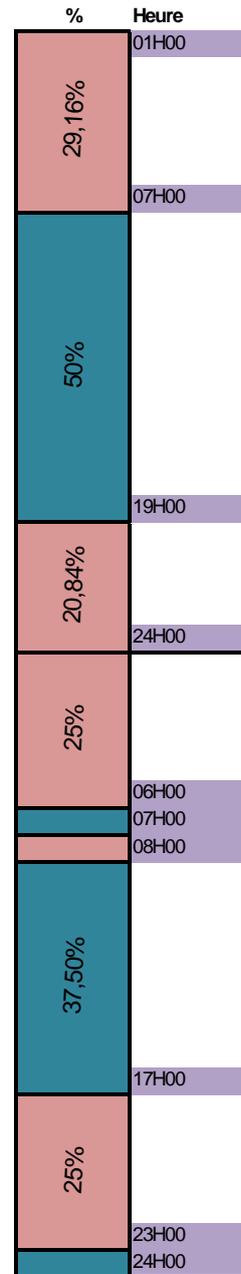
Données Humidite

Mesures avec Humidification

| | Hr METEO % | Hr EXT % | Hr INT % |
|-------|------------|----------|----------|
| 01H00 | 28,00 | 18,00 | 90,00 |
| 02H00 | 38,00 | 20,00 | 86,00 |
| 03H00 | 42,00 | 22,00 | 83,00 |
| 04H00 | 42,00 | 22,00 | 80,00 |
| 05H00 | 42,00 | 22,00 | 79,00 |
| 06H00 | 41,00 | 21,00 | 78,00 |
| 07H00 | 32,00 | 16,00 | 77,00 |
| 08H00 | 27,00 | 13,00 | 53,00 |
| 09H00 | 21,00 | 15,00 | 52,00 |
| 10H00 | 17,00 | 10,00 | 50,00 |
| 11H00 | 15,00 | 10,00 | 47,00 |
| 12H00 | 13,00 | 9,00 | 50,00 |
| 13H00 | 11,00 | 9,00 | 45,00 |
| 14H00 | 10,00 | 5,00 | 52,00 |
| 15H00 | 10,00 | 3,00 | 49,00 |
| 16H00 | 9,00 | 4,00 | 56,00 |
| 17H00 | 9,00 | 5,00 | 48,00 |
| 18H00 | 10,00 | 6,00 | 53,00 |
| 19H00 | 14,00 | 8,00 | 55,00 |
| 20H00 | 14,00 | 7,00 | 87,00 |
| 21H00 | 17,00 | 10,00 | 88,00 |
| 22H00 | 19,00 | 12,00 | 87,00 |
| 23H00 | 21,00 | 15,00 | 83,00 |
| 24H00 | 27,00 | 17,00 | 85,00 |
| 25H00 | 23,00 | 13,00 | 85,00 |
| 26H00 | 23,00 | 13,00 | 73,00 |
| 27H00 | 31,00 | 15,00 | 85,00 |
| 28H00 | 32,00 | 16,00 | 86,00 |
| 29H00 | 33,00 | 16,00 | 71,00 |
| 30H00 | 30,00 | 15,00 | 85,00 |
| 31H00 | 25,00 | 12,00 | 65,00 |
| 32H00 | 25,00 | 12,00 | 80,00 |
| 33H00 | 22,00 | 11,00 | 60,00 |
| 34H00 | 19,00 | 10,00 | 55,00 |
| 35H00 | 16,00 | 8,00 | 54,00 |
| 36H00 | 14,00 | 7,00 | 50,00 |
| 37H00 | 13,00 | 6,00 | 55,00 |
| 38H00 | 12,00 | 6,00 | 48,00 |
| 39H00 | 12,00 | 3,00 | 62,00 |
| 40H00 | 12,00 | 3,00 | 52,00 |
| 41H00 | 18,00 | 7,00 | 65,00 |
| 42H00 | 18,00 | 9,00 | 73,00 |
| 43H00 | 19,00 | 9,00 | 78,00 |
| 44H00 | 20,00 | 10,00 | 73,00 |
| 45H00 | 22,00 | 11,00 | 72,00 |
| 46H00 | 22,00 | 11,00 | 76,00 |
| 47H00 | 24,00 | 12,00 | 74,00 |
| 48H00 | 23,00 | 13,00 | 61,00 |

Hr INT -Hr EXT

| |
|----|
| 72 |
| 66 |
| 61 |
| 58 |
| 57 |
| 57 |
| 61 |
| 40 |
| 37 |
| 40 |
| 37 |
| 41 |
| 36 |
| 47 |
| 46 |
| 52 |
| 43 |
| 47 |
| 47 |
| 80 |
| 78 |
| 75 |
| 68 |
| 68 |
| 72 |
| 60 |
| 70 |
| 70 |
| 55 |
| 70 |
| 53 |
| 68 |
| 49 |
| 45 |
| 46 |
| 43 |
| 49 |
| 42 |
| 59 |
| 49 |
| 58 |
| 64 |
| 69 |
| 63 |
| 61 |
| 65 |
| 62 |
| 48 |



| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 49H00 | 27,00 | 13,00 | 71,00 |
| 50H00 | 28,00 | 14,00 | 60,00 |
| 51H00 | 30,00 | 15,00 | 66,00 |
| 52H00 | 32,00 | 16,00 | 60,00 |
| 53H00 | 34,00 | 17,00 | 75,00 |
| 54H00 | 36,00 | 18,00 | 57,00 |
| 55H00 | 29,00 | 15,00 | 70,00 |
| 56H00 | 18,00 | 9,00 | 82,00 |
| 57H00 | 13,00 | 6,00 | 68,00 |
| 58H00 | 12,00 | 6,00 | 62,00 |
| 59H00 | 11,00 | 5,00 | 55,00 |
| 60H00 | 11,00 | 5,00 | 60,00 |
| 61H00 | 10,00 | 4,00 | 77,00 |
| 62H00 | 9,00 | 3,00 | 72,00 |
| 63H00 | 10,00 | 2,00 | 55,00 |
| 64H00 | 10,00 | 4,00 | 50,00 |
| 65H00 | 11,00 | 5,00 | 67,00 |
| 66H00 | 12,00 | 6,00 | 62,00 |
| 67H00 | 15,00 | 6,00 | 60,00 |
| 68H00 | 23,00 | 11,00 | 67,00 |
| 69H00 | 21,00 | 10,00 | 77,00 |
| 70H00 | 27,00 | 13,00 | 60,00 |
| 71H00 | 33,00 | 15,00 | 70,00 |
| 72H00 | 25,00 | 12,00 | 56,00 |
| 73H00 | 40,00 | 20,00 | 60,00 |
| 74H00 | 42,00 | 21,00 | 57,00 |
| 75H00 | 42,00 | 21,00 | 62,00 |
| 76H00 | 44,00 | 22,00 | 59,00 |
| 77H00 | 36,00 | 18,00 | 63,00 |
| 78H00 | 37,00 | 19,00 | 58,00 |
| 79H00 | 25,00 | 12,00 | 64,00 |
| 80H00 | 15,00 | 7,00 | 58,00 |
| 81H00 | 13,00 | 6,00 | 65,00 |
| 82H00 | 11,00 | 5,00 | 60,00 |
| 83H00 | 9,00 | 4,00 | 57,00 |
| 84H00 | 9,00 | 4,00 | 70,00 |
| 85H00 | 9,00 | 2,00 | 57,00 |
| 86H00 | 9,00 | 2,00 | 64,00 |
| 87H00 | 9,00 | 4,00 | 75,00 |
| 88H00 | 10,00 | 5,00 | 70,00 |
| 89H00 | 12,00 | 6,00 | 70,00 |
| 90H00 | 19,00 | 9,00 | 68,00 |
| 91H00 | 19,00 | 10,00 | 67,00 |
| 92H00 | 19,00 | 10,00 | 70,00 |
| 93H00 | 20,00 | 11,00 | 69,00 |
| 94H00 | 22,00 | 11,00 | 76,00 |
| 95H00 | 22,00 | 11,00 | 69,00 |
| 96H00 | 38,00 | 19,00 | 74,00 |

| |
|----|
| 58 |
| 46 |
| 51 |
| 44 |
| 58 |
| 39 |
| 55 |
| 73 |
| 62 |
| 56 |
| 50 |
| 55 |
| 73 |
| 69 |
| 53 |
| 46 |
| 62 |
| 56 |
| 54 |
| 56 |
| 67 |
| 47 |
| 55 |
| 44 |
| 40 |
| 36 |
| 41 |
| 37 |
| 45 |
| 39 |
| 52 |
| 51 |
| 59 |
| 55 |
| 53 |
| 66 |
| 55 |
| 62 |
| 71 |
| 65 |
| 64 |
| 59 |
| 57 |
| 60 |
| 58 |
| 55 |

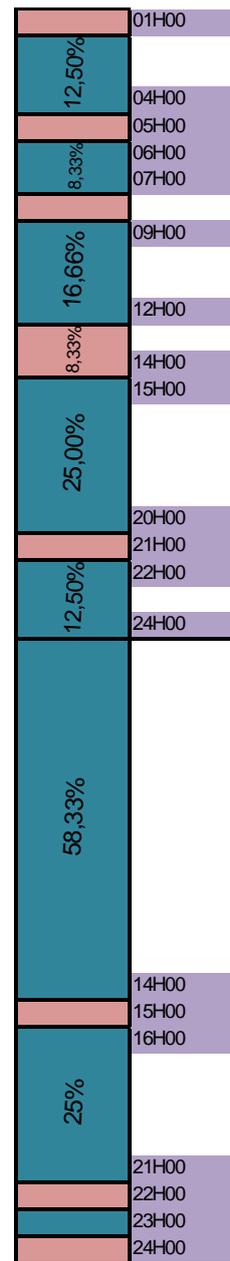


Tableau 6.14 : Tableau des humidités pour la période du 22 au 25 Mai 2007, mesures avec Humidification

Application de la méthode de Steeve Szockolay pour la période de Mai à Août

Détermination des zones de confort pour la ville de HASSI MESSAOUD selon la méthode de Steeve SZOCKOLAY.

a- Détermination de la température neutre :

Etablir la température moyenne pour la période de Mai à Août :

$$T_m = \Sigma t_m / 4 = 132,50 / 4 = 33,12^\circ\text{C}$$

$$\underline{T_m = 33,12^\circ\text{C}}$$

La température neutre sera :

$$T_n = 17,6 + (0,31 \times T_m) = 27,87^\circ\text{C}$$

$$\underline{T_n = 27,87^\circ\text{C}}$$

Porter sur le graphe le point neutre à l'intersection de T_n et la ligne représentant 50% d'humidité relative.

Détermination de la Zone confort :

Cette zone est délimitée par les points 1, 2, 3 et 4

La température du point 1 sera :

$$T_1 = T_n + (A_{hn} - 12) \times 0,025 \times (T_n - 14) - 2$$

Où A_{hn} représente l'humidité absolue du point de neutralité.

$$\underline{T_1 = 26,04^\circ\text{C}}$$

$$T_2 = T_1 + 4$$

$$\underline{T_2 = 30,04^\circ\text{C}}$$

$$T_3 = T_1 + 0,2 \times (T_1 - 14)$$

$$\underline{T_3 = 28,45^\circ\text{C}}$$

$$T_4 = T_2 + 0,2 \times (T_2 - 14)$$

$$\underline{T_4 = 33,25^\circ\text{C}}$$

Les points 1 et 2 correspondront à celle de 12g/kg.

Les points 3 et 4 correspondront à celle de 04g/kg.

Détermination de la zone de contrôle potentiel pour les périodes froides :

- Zone de chauffage solaire passif :

$$T_5 = T_n + 0,36 - 0,0025 \times H_v$$

Où H_v = moyenne journalière totale d'irradiation solaires en wh/m^2 d'une surface verticale sud pour le mois le plus froid donc :

$$T_5 = 27,87 + 0,36 - 0,0025 \times 5724 = 13,92^\circ\text{C}$$

$$\underline{T_5 = 13,92^\circ\text{C}}$$

Le point % correspond à la ligne de saturation HB = 100%

Détermination de la zone de contrôle potentiel pour les périodes chaudes :

- a- Zone d'effet de masse :

Détermination de la variation moyenne de température pour le mois le plus chaud :

$$dT_m = T_{\text{moy.max}} - T_{\text{moy.min}} = 43,40 - 20,50 = 22,90^\circ\text{C}$$

$$\underline{dT_m = 22,90^\circ\text{C}}$$

Cette zone est délimitée par les points 6, 7 et 8.

$$T_6 = T_2 + 0,5 \times dT_m = 41,49^\circ\text{C}$$

$$\underline{T_6 = 41,49^\circ\text{C}}$$

Le point 6 correspond à la ligne d'humidité absolue 12g/kg.

$$T_7 = T_6 - 0,05 \times (T_6 - 14) = 40,11^\circ\text{C}$$

$$\underline{T_7 = 40,11^\circ\text{C}}$$

Le point 7 correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

$$T_8 = T_6 + 0,2 \times (T_6 - 14) = 46,99^\circ\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T8 = 46,99^{\circ}\text{C}}}$$

Le point 8 correspond à la ligne 04g/kg d'humidité absolue.

La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'HR du point 1.

b- Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne :

Cette zone est délimitée par les points 9,10 et 11.

$$T9 = T2 + 0,8(dTm) = 48,36^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T9 = 48,36^{\circ}\text{C}}}$$

Le point 9 correspond à la ligne 12g/kg d'humidité absolue.

$$T10 = T9 - 0,05(T9 - 14) = 46,64^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T10 = 46,64^{\circ}\text{C}}}$$

Le point 10 correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

$$T11 = T9 + 0,2(T9 - 14) = 55,23^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T11 = 55,23^{\circ}\text{C}}}$$

Le point 11 correspond à la ligne 04g/kg d'humidité absolue.

c- Zone de ventilation naturelle :

Cette zone dépend de la vitesse de l'air.

$$\text{Pour } 1 \text{ m/s : } T12 = T2 + 5$$

$$\text{Pour } 1,5 \text{ m/s : } T12 = T2 + 6,5 = 36,54^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T12 = 36,54^{\circ}\text{C}}}$$

Le point 12 correspond à la ligne 12g/kg d'humidité absolue.

$$\text{Pour } 1 \text{ m/s : } T13 = T12 + 0,1(T12 - 14)$$

$$\text{Pour } 1,5 \text{ m/s : } T13 = T12 + 0,1(T12 - 14) = 38,79^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T13 = 38,79^{\circ}\text{C}}}$$

Le point 13 correspond à la ligne 04g/kg d'humidité absolue.

$$T14 = T1 = 26,04^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T14 = 26,04^{\circ}\text{C}}}$$

Le point 14 sera localisé sur la courbe de 90% d'humidité relative.

$$T15 = T12 - 0,18(T12 - 14) = 32,48^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T15 = 32,48^{\circ}\text{C}}}$$

Le point 15 sera localisé sur la courbe de 90% d'humidité relative.

d- Zone de refroidissement évaporatif direct :

La température limite la plus élevée est :

$$T16 = Tn + 12 = 39,87^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T16 = 39,87^{\circ}\text{C}}}$$

Les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracées à partir des lignes de températures humides des points 2 et 3.

e- Zone de refroidissement évaporatif indirect :

La température limite la plus haute est :

$$T17 = Tn + 15 = 42,87^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{\mathbf{T17 = 42,87^{\circ}\text{C}}}$$

La limite supérieure de cette zone correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----|
| Chapitre 1.Introduction générale | 1 |
| 1.1 Problématique | 3 |
| 1.2 Objectifs de l'étude et Hypothèses : | 6 |
| 1.3 Méthodologie de Recherche : | 8 |
| | |
| Chapitre 2. Changement climatique | 1 |
| 2.1 Historique..... | 10 |
| 2.2 Définitions | 12 |
| 2.3 Cycle climatiques..... | 15 |
| 2.3.1 Poursuite du réchauffement climatique | 17 |
| 2.4 Conséquences physiques du réchauffement climatique..... | 17 |
| 2.4.1 La montée des eaux..... | 17 |
| 2.4.2 L'humidité absolue | 18 |
| 2.5 Pourquoi ce changement climatique ? | 19 |
| 2.5.1 Les activités humaines modifient-elles l'atmosphère ? | 19 |
| 2.6 Quels changements climatiques prévoit-on à l'avenir ? | 20 |
| 2.7 L'effet de serre | 24 |
| 2.7.1 Qu'est-ce que l'effet de serre? | 24 |
| 2.7.2 Rayonnement solaire et effet de serre..... | 24 |
| 2.7.3 Les principales sources de gaz à effet de serre ? | 25 |
| 2.7.4 Comprendre l'effet de serre..... | 26 |
| 2.7.5 Quelles options permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre ? | 27 |
| 2.7.6 Les limites d'une réaction humaine..... | 28 |
| 2.8 Ilot de chaleur urbain | 28 |
| 2.8.1 Des études partout à Travers le monde..... | 33 |
| 2.9. Utilisation des ressources énergétique et ICU | 35 |
| Conclusion | 38 |
| | |
| Chapitre 3.Tour à vent, moyen de rafraichissement passif | 1 |
| 3.1 Historique..... | 40 |
| 3.2 Définition des Tours à Vent..... | 42 |
| 3.3 Fonctionnement de la Tour à Vent | 44 |
| 3.3.1 Tour à Vent Face aux vents dominants..... | 45 |
| 3.3.1.a Tour à vent unidirectionnelle..... | 46 |
| 3.3.1.b Tour à vent multidirectionnelle | 47 |
| A.La nuit sans vent | 48 |
| B.La nuit avec vent..... | 48 |
| C.Jour sans vent..... | 49 |
| D.Jour avec vent | 49 |
| 3.3.2 Tour à Vent Contre les vents dominants..... | 49 |
| 3.4 Classification des tours à vent | 54 |
| 3.4.1 Classification basée sur la fonction | 54 |
| 3.4.1.a Les tours unidirectionnelles (yek-tarafe)..... | 55 |
| 3.4.1.b Les tours bidirectionnelles (do-tarafe) | 56 |
| 3.4.1.c Les tours quadri-directionnelles (tarafe de chahar) | 56 |
| 3.4.1.d Les tours octo-directionnelles (tarafe de hasht) | 56 |
| 3.4.2 Classification basée sur la forme du plan | 57 |

| | |
|--|----|
| 3.4.3 Classification basée sur le nombre d'ouvertures | 58 |
| 3.4.3.a Les tours à deux ouvertures | 58 |
| 3.4.3.b Les tours à quatre ouvertures..... | 59 |
| 3.4.3.c Les tours à six ouvertures | 59 |
| 3.4.3.d Les tours à huit ouvertures | 59 |
| 3.5 Orientation de la tour à vent | 60 |
| 3.6 Matériaux, Couleur, Texture et Taille | 64 |
| 3.7 Structure et Ornement..... | 65 |
| 3.8 Nouvelle conception des tour/capteur à vent..... | 67 |
| 3.8.1 Le centre international de Jacob Blaustein pour les études du Désert (BIC), Israël.... | 69 |
| 3.8.2 Bâtiment d'office de Catane, Italie | 72 |
| 3.8.3 Le MOMRA Rowdah environnemental, Arabie Saoudite..... | 74 |
| 3.8.4 Projet de maison individuelle en Iran | 76 |
| Conclusion | 78 |

Chapitre 4.Réalisation de la tour à vent.....1

| | |
|---|-----|
| 4.1 Objectifs de la simulation : | 79 |
| 4.2 Résultat de la simulation..... | 80 |
| 4.3 Choix du site de réalisation..... | 81 |
| 4.4 Etapes de la réalisation | 84 |
| 4.4.1 Etape Préparatoire..... | 84 |
| 4.4.2 Elaboration des plans et détails d'exécution..... | 84 |
| 4.4.3 Vérification et approbation des plans | 89 |
| 4.4.4 Etude Climatique et Bioclimatique de la ville de Hassi Messaoud | 89 |
| 4.4.5 Réalisation | 90 |
| ❖ Partie basse de la tour « Bassin d'eau »..... | 91 |
| ❖ Partie centrale de la tour « Le Tronc »..... | 94 |
| ❖ Partie supérieure de la tour « Tête » | 98 |
| Conclusion : | 105 |

Chapitre 5.Expérimentation1

| | |
|---|-----|
| 5.1 Cas d'étude | 106 |
| 5.2 Objectif de l'expérimentation | 106 |
| 5.3 Situation..... | 106 |
| 5.4 Le climat de la ville de Hassi Messaoud..... | 107 |
| 5.4.1 Situation géographique | 107 |
| 5.4.2 Rayonnement solaire..... | 108 |
| 5.4.3 Température de l'air..... | 109 |
| 5.4.4 Humidité relative | 111 |
| 5.4.5 Vent..... | 112 |
| 5.4.6 Fréquence des vents de la ville de Hassi Messaoud | 113 |
| 5.4.7 Chasse sable..... | 114 |
| 5.4.8 Précipitations | 114 |
| 5.4.9 Calcul de l'indice d'aridité de MARTONE..... | 115 |
| 5.4.10 Conclusion de l'étude climatique | 116 |
| 5.5 Analyse bioclimatique de la ville de Hassi Messaoud..... | 117 |
| 5.5.1 Application de la méthode de mahoney..... | 117 |
| ❖ Recommandations générales:..... | 117 |
| ❖ Recommandations Détaillées:..... | 118 |
| 5.5.2 Application de la méthode de GIVONI | 124 |

| | |
|---|-----|
| 5.5.3 Application de la méthode de STEEVE SZOCKOLAY | 125 |
| 5.5.4 Conclusion de l'analyse bioclimatique | 130 |
| 5.6 Organisation de l'expérimentation..... | 132 |
| 5.7 Description des instruments de mesures | 133 |
| 5.7.1 Thermo-hygomètre | 133 |
| 5.7.2 Thermomètre à double sondes | 134 |
| 5.7.3 Station météo SMV sans fil WMR928NX | 135 |
| 5.8 Facteurs climatiques mesurés | 137 |
| 5.9 Durée de l'expérimentation | 137 |
| 5.10 Description de l'expérimentation..... | 137 |
| 1.Le mois de Mai : | 138 |
| 2.Le mois de Juin : | 138 |
| 3.Le mois de Juillet : | 138 |
| 4.Le mois d' Aout : | 138 |
| Conclusion | 139 |

Chapitre 6.Résultats et interprétation..... 1

| | |
|--|-----|
| 6. 1 Résultats et interprétations..... | 140 |
| 6.2 Interprétation des résultats | 146 |
| 6.2.1 Interprétation des résultats des mesures sans humidification période du 18 au 24 Juillet 2007..... | 147 |
| 6.2.1.1 Discussion des écarts des mesures de températures, sans humidification période du 18 au 24 Juillet 2007 | 149 |
| La première journée (Le 18/07/2007) : | 151 |
| La deuxième journée (Le 19/07/2007) : | 152 |
| La troisième journée (Le 20/07/2007) : | 153 |
| La quatrième journée (Le 21/07/2007) : | 154 |
| La cinquième journée (Le 22/07/2007) : | 154 |
| La sixième journée (Le 23/07/2007) : | 155 |
| La septième journée (Le 24/07/2007) : | 155 |
| 6.2.1.2 Discussion des écarts des mesures d'humidité, sans humidification période du 18 au 24 Juillet 2007 | 163 |
| La première journée (Le 18/07/2007) : | 165 |
| La deuxième journée (Le 19/07/2007) : | 166 |
| La troisième journée (Le 20/07/2007) : | 167 |
| La quatrième journée (Le 21/07/2007) : | 167 |
| La cinquième journée (Le 22/07/2007) : | 168 |
| La sixième journée (Le 23/07/2007) : | 168 |
| La septième journée (Le 24/07/2007) : | 169 |
| 6.2.2 Interprétation des résultats des mesures avec humidification période du 25 au 31 Juillet 2007..... | 177 |
| 6.2.2.1 Discussion des écarts des mesures de températures avec humidification période du 25 au 31 Juillet 2007 | 179 |
| La première journée (Le 25/07/2007) : | 181 |
| La deuxième journée (Le 26/07/2007) : | 182 |
| La troisième journée (Le 27/07/2007) : | 182 |
| La quatrième journée (Le 28/07/2007) : | 183 |
| La cinquième journée (Le 29/07/2007) : | 183 |
| La sixième journée (Le 30/07/2007) : | 183 |
| La septième journée (Le 31/07/2007) : | 184 |

| | |
|---|-----|
| 6.2.2.2 Discussion des écarts des mesures d'humidité avec humidification période du 25 au 31 Juillet 2007 | 191 |
| La première journée (Le 25/07/2007) : | 193 |
| La deuxième journée (Le 26/07/2007) : | 193 |
| La troisième journée (Le 27/07/2007) : | 194 |
| La quatrième journée (Le 28/07/2007) : | 194 |
| La cinquième journée (Le 29/07/2007) : | 195 |
| La sixième journée (Le 30/07/2007) : | 195 |
| La septième journée (Le 31/07/2007) : | 196 |
| Conclusion | 203 |
| | |
| Chapitre 7. Comparaison des résultats et graphes | 1 |
| 7.1 Objectif des campagnes de mesure (avec et sans humidification)..... | 205 |
| 7.2 Comparaison des graphes | 206 |
| 7.2.1 Comparaison des températures (mois de juin)..... | 207 |
| 7.2.2 Comparaison des Humidités relatives (Mois de Juin) | 210 |
| 7.2.3 Comparaisons des Températures (Mois de Juillet)..... | 212 |
| 7.2.4 Comparaison des Humidités relatives (Mois de Juillet) | 215 |
| 7.2.5 Comparaison des températures (Mois d' Août) | 218 |
| 7.2.6 Comparaison des Humidités relatives (Mois d' Août) | 220 |
| 7.3 Comparaison par rapport aux plages de confort (diagramme psychométrique) | 223 |
| 7.3.1 Principe de comparaison | 223 |
| 7.4 Calcul de la zone neutre | 224 |
| 7.4.1 Application de la méthode de Steeve Szockolay pour la période de Mai à Août..... | 226 |
| 7.4.2 Représentation des résultats sur le diagramme de St Szockolay | 227 |
| Journée du 24 Mai | 227 |
| Journée du 17 Juin | 228 |
| Journée du 18 Juin | 229 |
| Journée du 24 Juillet..... | 230 |
| Journée du 31 Juillet..... | 231 |
| Journée du 01 Août..... | 232 |
| Journée du 14 Août..... | 233 |
| Conclusion : | 234 |
| | |
| Chapitre 8. Conclusions et recommandations | 1 |
| 8.1 Conclusion et résultats des objectifs | 238 |
| 8.2 Recommandations | 241 |
| 8.3 Originalité et contribution à la science | 242 |
| 8.4 Recommandations pour des recherches futures | 244 |
| Références..... | 245 |
| Annexes | 254 |

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1 : Organigramme de la méthodologie de recherche1

Chapitre 2

Figure 2.1 : Schéma d'observation sur les variations des indicateurs de température12
 Figure 2.2 : Changement de l'accumulation des neiges au sommet du Kilimandjaro13
 Figure 2.3 : Fonte de front de la mer de glace 1820-199514
 Figure 2.4 : Changement de la température au cours des 20000 dernières années16
 Figure 2.5 : Température moyenne de surface entre 1856 et 2005.....16
 Figure 2.6 : Schéma d'observation sur les variations des indicateurs de température19
 Figure 2.7 : Distribution globale des émissions de carbone suie pour 1900, 1997 et 210020
 Figure 2.8 : Distribution géographique des différences de température et de précipitations entre la fin du XXI^e siècle et la fin du XX^e siècle21
 Figure 2.9 : Différentes réponses des modèles climatiques utilisés21
 Figure 2.10 : Effet de serre.....25
 Figure 2.11 : Le bilan radiatif et sa perturbation anthropique : estimation de l'impact de l'effet de serre et de l'effet parasol sur le bilan énergétique de la terre.27
 Figure 2.12 : L'îlot de chaleur de New York, Les zones les plus chaudes sont en rouge.29
 Figure 2.13 : Relation entre l'intensité maximale de l'îlot de chaleur et le nombre d'habitants d'une ville30
 Figure 2.14 : Allure d'un profil d'îlot de chaleur31
 Figure 2.15 : Emission de chaleur anthropique- voitures photo: Sebastian Wypych31
 Figure 2.16 : Emission de chaleur anthropique- tours de refroidissement.....32

Chapitre 3

Figure 3.1 : Les tours à vent dans le moyen orient41
 Figure 3.2 : Tour à vent dans la maison pharaonique du Bout-Amun en Egypte42
 Figure 3.3 : Tour à vent à YAZD, IRAN42
 Figure 3.4 : Différentes formes de capteurs à vent à Yazd.....43
 Figure 3.5 : Tour à vent dans une maison à YAZD43
 Figure 3.6 : Tour à vent dans une mosquée44
 Figure 3.7 : Tour à vent dans une résidence en IRAN44
 Figure 3.8 : Capteur à vent unidirectionnel au Caire, les flèches montrent l'état de l'air au niveau du capteur. Source Izard 199346
 Figure 3.9 : Circuit du mouvement d'air à travers la tour à vent47
 Figure 3.10 : fonctionnement de la tour à vent le jour et la nuit.....47
 Figure 3.11 : l'effet d'aspiration dans une tour multidirectionnelle mise avec vent48
 Figure 3.12 : fonctionnement de la tour à vent le jour et la nuit avec vent.....49
 Figure 3.13 : tour à vent contre le vent50
 Figure 3.14 : utilisation de l'humidification dans les tours à vent.....51
 Figure 3.15 : tour à vent avec souterrain pour un refroidissement évaporatif.....51
 Figure 3.16 : capteur à vent dans une école à Gournia52
 Figure 3.17 : Efficacité du capteur à vent (humidification par arrosage)53
 Figure 3.18 : Effet de refroidissement par évaporation (jarre plus charbon)53
 Figure 3.19 : pavillon de Bagh-e khan rafraichissement par ventilation et évaporation rivière sous-terrine54

| | |
|---|----|
| <i>Figure 3.20 : Tour á vent á BARGHOO</i> | 55 |
| <i>Figure 3.21 : Tour á vent á Yazd</i> | 55 |
| <i>Figure 3.22 : Plan type d'une tour à vent unidirectionnelle</i> | 55 |
| <i>Figure 3.23 : Plan type d'une tour à vent bidirectionnelle</i> | 56 |
| <i>Figure 3.24 : Plan type d'une tour à vent quadri-directionnelle</i> | 56 |
| <i>Figure 3.25 : Plan type d'une tour à vent octo-directionnelle</i> | 56 |
| <i>Figure 3.26 : Classification basée sur la forme du plan</i> | 57 |
| <i>Figure 3.27 : Tour à vent à deux ouvertures</i> | 58 |
| <i>Figure 3.28 : Tour à vent à quatre ouvertures</i> | 59 |
| <i>Figure 3.29 : Tour à vent à six ouvertures</i> | 59 |
| <i>Figure 3.30 : Tour à vent à huit ouvertures</i> | 59 |
| <i>Figure 3.31 : Orientation des tours à vent à Yazd</i> | 60 |
| <i>Figure 3.32 : Orientation des tours à vent à Bandar Lengeh</i> | 60 |
| <i>Figure 3.33 : Tour à vent dans un climat chaud et humide</i> | 61 |
| <i>Figure 3.34 : Tour à vent centré effet attrape vent</i> | 62 |
| <i>Figure 3.35 : Tour à vent latérale effet attrape vent</i> | 62 |
| <i>Figure 3.36 : Simulation informatique du cheminement de l'air dans une tour à vent à Dubaï : le flux principal du vent (en rouge) crée une dépression dans la pièce, aspirant l'air frais des fenêtres (en jaune).</i> | 63 |
| <i>Figure 3.37 : Tour à vent centré effet cheminée</i> | 63 |
| <i>Figure 3.38 : Tour à vent latérale effet cheminée</i> | 63 |
| <i>Figure 3.39 : les Tours à vent sont faites de brique de terre crue recouvertes d'un enduit</i> | 64 |
| <i>Figure 3.40 : Coupe sur une maison à Yazdt</i> | 65 |
| <i>Figure 3.41 : Coupe sur une maison à Bandar Length</i> | 65 |
| <i>Figure 3.42 : Tête de tour à vent à Yazd</i> | 65 |
| <i>Figure 3.43 : Structure des tours à vent</i> | 66 |
| <i>Figure 3.44 : Les fines colonnettes sont solidarisées par des Branches servant, d'échafaudage pour l'entretien</i> | 66 |
| <i>Figure 3.45 : Exemples d'Ornementation des têtes de Tour à Vent</i> | 66 |
| <i>Figure 3.46 : Le bâtiment du centre international pour les études du désert vu en plan et coupes</i> | 69 |
| <i>Figure 3.47 : Vue à l'intérieur du bâtiment</i> | 70 |
| <i>Figure 3.48 : Vue sur la tour à vent et bassin d'eau</i> | 71 |
| <i>Figure 3.49 : Coupe schématique sur la tour à vent</i> | 72 |
| <i>Figure 3.50 : Solution finale de conception, modèle montrant les tours de refroidissement et jardin interne</i> | 73 |
| <i>Figure 3.51 : Coupe transversale sur le bâtiment et l'aménagement</i> | 73 |
| <i>Figure 3.52 Stratégie environnementale de refroidissement et ventilation passif</i> | 74 |
| <i>Figure 3.53 : Vue du Rowdah environnemental montrant les éléments de commande de climat et les jardins Source Nader V. Chalfoun, 1992</i> | 75 |
| <i>Figure 3.54 : La tour fraîche après construction</i> | 76 |
| <i>Figure 3.55 : Perspective sur le projet de maison</i> | 76 |
| <i>Figure 3.56 : Coupe sur les chambres, sous sol et jardin</i> | 76 |
| <i>Figure 3.57 : Fonctionnement des tours à vents</i> | 77 |

Chapitre 4

| | |
|---|-----|
| <i>Figure 4.1 : Perspective générale de la tour à vent</i> | 81 |
| <i>Figure 4.2 : Vues sur le 1^{er} Etage de l'administration</i> | 82 |
| <i>Figure 4.3 : Bâtiment administratif</i> | 83 |
| <i>Figure 4.4 : Vues d'intérieur du bureau</i> | 83 |
| <i>Figure 4.5 : Emplacement de la tour à vent</i> | 84 |
| <i>Figure 4.6 : Vue en plan d'une partie du 1^{er} Etage</i> | 86 |
| <i>Figure 4.7 : Coupe sur la tour à vent et bloc administratif</i> | 87 |
| <i>Figure 4.8 : Détail sur la partie basse de la tour « Bassin d'eau »</i> | 88 |
| <i>Figure 4.9 : Détail sur la partie centrale de la tour « le tronc »</i> | 88 |
| <i>Figure 4.10 : Détail sur la partie supérieure de la tour « la tête »</i> | 89 |
| <i>Figure 4.11 : Découpage des Briques</i> | 90 |
| <i>Figure 4.12 : Perspective sur le Bassin</i> | 92 |
| <i>Figure 4.13 : Pose de la dalle de sol à l'intérieur du bassin</i> | 92 |
| <i>Figure 4.14 : Ouverture de la partie de soufflage sur une hauteur de 30 cm</i> | 92 |
| <i>Figure 4.15 : Les différents éléments du système de vidange</i> | 93 |
| <i>Figure 4.16: Grille en aluminium (Contrôle du débit d'air du soufflage)</i> | 93 |
| <i>Figure 4.17 : Perspective sur la partie centrale de la Tour (conduit intérieur pour l'humidification)</i> | 94 |
| <i>Figure 4.18 : pose des tiges en acier pour supporter les conduits en briques (10x10cm²)</i> | 94 |
| <i>Figure 4.19 Pose du coffrage en bois</i> | 95 |
| <i>Figure 4.20 : Nettoyage du bassin et récupération du coffrage</i> | 95 |
| <i>Figure 4.21 : Pose de la première rangée (a,b)</i> | 96 |
| <i>Figure 4.22 : Etapes de réalisation de la partie centrale (a,b,c,d,e)</i> | 97 |
| <i>Figure 4.23 : Réalisation de la tour à l'intérieur du studio (a : préparation du sol, b : construction de la tour)</i> | 97 |
| <i>Figure 4.24 Finalisation de la tour au niveau de la terrasse</i> | 98 |
| <i>Figure 4.25 : Perspective de la partie supérieure de la tour</i> | 99 |
| <i>Figure 4.26 : réalisation de la tête de la tour</i> | 99 |
| <i>Figure 4.27 : Confection des linteaux et inclinaison de la tête</i> | 100 |
| <i>Figure 4.28 : Pose des dalles préfabriquées et finalisation des travaux de maçonnerie</i> | 100 |
| <i>Figure 4.29 : système d'humidification arrêté (a,b,c)</i> | 102 |
| <i>Figure 4.30 : fixation du maillage sur les conduits (a,b)</i> | 102 |
| <i>Figure 4.31 : Raccordement du système vers la citerne d'eau (a,b,c)</i> | 103 |
| <i>Figure 4.32 : citerne d'eau existante avec double voute ventilé pour protéger l'eau de la citerne contre les rayons solaires</i> | 103 |
| <i>Figure 4.33 : première utilisation du système d'humidification</i> | 104 |

Chapitre 5

| | |
|---|-----|
| <i>Figure 5.1: Situation de la ville de Hassi Messaoud</i> | 107 |
| <i>Figure 5.2 : Cartes d'irradiations moyennes reçues pendant les quatre saisons sur l'ensemble du territoire national.</i> | 109 |
| <i>Figure 5.3 : Diagramme des températures moyennes mensuelles</i> | 110 |
| <i>Figure 5.4 : Diagramme de l'Humidité relative</i> | 112 |
| <i>Figure 5.5 : Diagramme de la Vitesse moyenne du Vent</i> | 113 |
| <i>Figure 5.6 : Rose des vents, période 1997-2006)</i> | 114 |
| <i>Figure 5.7 : Rose de Chasse Sable</i> | 114 |
| <i>Figure 5.8 : Précipitations</i> | 115 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figure 5.9 : Recommandations Mahoney Plan de masse</i> | 118 |
| <i>Figure 5.10 : Recommandations Mahoney Orientation et Ventilation</i> | 118 |
| <i>Figure 5.11 : Recommandations Mahoney Chauffage</i> | 119 |
| <i>Figure 5.12 : Recommandations Mahoney Sections des Ouvertures et inertie des parois</i> | 119 |
| <i>Figure 5.13 : Recommandations Mahoney Protection des ouvertures</i> | 119 |
| <i>Figure 5.14 : Recommandations Mahoney Position de l'isolation</i> | 119 |
| <i>Figure 5.15 : Diagramme psychométrique de GIVONI avec application sur la ville de Hassi Messaoud.</i> | 124 |
| <i>Figure 5.16 : thermo-hygromètre</i> | 133 |
| <i>Figure 5.17 : Tracés de la température et de l'humidité relative de l'air</i> | 134 |
| <i>Figure 5.18 : Thermomètre à double sondes</i> | 134 |
| <i>Figure 5.19 : Station météo</i> | 136 |
| <i>Figure 5.20 : Appareil principal « WMR928NX »</i> | 136 |
| <i>Figure 5.21 : Thermo-hygromètre (THGR918N)</i> | 136 |
| <i>Figure 5.22 : Baro-thermo-hygromètre (BTHR918N)</i> | 137 |

Chapitre 6

| | |
|--|-----|
| <i>Figure 6.1 : Ouverture de la bouche de soufflage</i> | 140 |
| <i>Figure 6.2 : Nettoyage des conduits et récupération du coffrage</i> | 141 |
| <i>Figure 6.3 : Mise en service du système d'humidification</i> | 141 |
| <i>Figure 6.4 : Effet de cheminée</i> | 142 |
| <i>Figure 6.5 : Effet attrape vent</i> | 142 |
| <i>Figure 6.6 : Première prise de mesure de la température</i> | 143 |
| <i>Figure 6.7 : Ecart de température le 21/05/2007</i> | 144 |
| <i>Figure 6.8 : Températures à 16h02</i> <i>Figure 6.139 : Températures à 16h03</i> | 144 |
| <i>Figure 6.9 : Températures à 16h05</i> <i>Figure 6.141 : Températures à 16h06</i> | 144 |
| <i>Figure 6.10 : Températures à 16h07</i> | 145 |
| <i>Figure 6.11 : Mesure au niveau de la tête de la tour</i> | 145 |
| <i>Figure 6.12 : Température et humidité à l'intérieur du bureau</i> | 146 |
| <i>Figure 6.13 : Température au niveau de la tête de la tour</i> | 146 |
| <i>Figure 6.14 : Ecart de températures pour la période du 18 au 24 Juillet 2007</i> | 150 |
| <i>Figure 6.15 : Ecart de température le 24 Juillet 2007</i> | 156 |
| <i>Figure 6.16 : Courbes des températures pour la période du 18 au 24 Juillet 2007</i> | 162 |
| <i>Figure 6.17 : Ecart d'humidité relative de l'air durant la période du 18 au 24 Juillet 2007</i> | 164 |
| <i>Figure 6.18 : Ecart d'humidité relative le 24 Juillet 2007</i> | 169 |
| <i>Figure 6.19 : Courbes des humidités pour la période du 18 au 24 Juillet 2007</i> | 176 |
| <i>Figure 6.20 : Ecart de la température période du 25 au 31 Juillet 2007</i> | 180 |
| <i>Figure 6.21 : Ecart de la température le 31 Juillet 2007</i> | 184 |
| <i>Figure 6.22 : Courbes des températures pour la période du 25 au 31 Juillet 2007</i> | 190 |
| <i>Figure 6.23 : Ecart d'humidité relative pour la période du 25 au 31 Juillet 2007</i> | 192 |
| <i>Figure 6.24 : Ecart d'humidité relative le 31 Juillet 2007</i> | 196 |
| <i>Figure 6.25 : Courbes des humidités pour la période du 25 au 31 Juillet 2007</i> | 202 |

Chapitre 7

| | |
|--|-----|
| <i>Figure 7.1: Comparaison des températures intérieures avec et sans humidification durant le mois de Juin</i> | 208 |
| <i>Figure 7.2: Comparaison des températures intérieures avec et sans humidification durant 48heures (Mois de Juin)</i> | 209 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figure 7.3 : Comparaison des humidités intérieures avec et sans humidification durant le mois de Juin</i> | 211 |
| <i>Figure 7.4 : Comparaison des humidités intérieur avec et sans humidification durant 48heures (Mois de Juin)</i> | 212 |
| <i>Figure 7.5 : Comparaison des températures intérieures avec et sans humidification durant 48heures (Mois de Juillet)</i> | 213 |
| <i>Figure7.6 : Comparaison des températures intérieur avec et sans humidification durant le mois de Juillet</i> | 214 |
| <i>Figure 7.7 : Comparaison des humidités intérieur avec et sans humidification durant 48heures (Mois de Juillet)</i> | 215 |
| <i>Figure 7.8 : Comparaison des humidités intérieures avec et sans humidification durant le mois de Juillet</i> | 217 |
| <i>Figure 7.9 : Comparaison des températures intérieures avec et sans humidification durant le mois d’Août</i> | 219 |
| <i>Figure 7.10 : Comparaison des humidités intérieures avec et sans humidification durant le mois d’Août</i> | 221 |
| <i>Figure 7.11 : Zone de confort pour la période de Mai à Août</i> | 226 |
| <i>Figure 7.12 : Journée du 24 Mai, mesure avec humidification</i> | 227 |
| <i>Figure 7.13 : Journée du 17 Juin, mesure sans humidification</i> | 228 |
| <i>Figure 7.14 : Journée du 18 Juin, mesure avec humidification</i> | 229 |
| <i>Figure 7.15 : Journée du 24 Juillet, mesure sans humidification</i> | 230 |
| <i>Figure 7.16 : Journée du 31 Juillet, mesure avec humidification</i> | 231 |
| <i>Figure 7.17 : Journée du 01 Août, mesure avec humidification</i> | 232 |
| <i>Figure 7.18 : Journée du 14 Août, mesure sans humidification</i> | 233 |
| <i>Figure 7.19 : Utilisation couplée d’une tour à vent et une cheminée solaire</i> | 235 |
| <i>Figure 7.20 : Utilisation du ventilateur au niveau de la tête de la tour</i> | 236 |
| <i>Figure 7.21 : Modèles d’hygrostat</i> | 237 |

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 5

| | |
|--|-----|
| <i>Tableau 5.1 : Tableau des données descriptives des températures moyennes mensuelles en c° à Hassi Messaoud (1997-2006).</i> | 110 |
| <i>Tableau 5.2 : Tableau des données descriptives de l'humidité relative (%) de ville de Hassi Messaoud</i> | 111 |
| <i>Tableau 5.3 : Echelle de Beaufort. Source : LAVIGNE, 1994.</i> | 113 |
| <i>Tableau 5.4 : Nombre de jour moyen d'occurrence de chasse sable</i> | 114 |

Chapitre 6

| | |
|---|-----|
| <i>Tableau 6.1 : Mesures des températures météo, extérieures et intérieures période 18 au 24 Juillet 2007</i> | 161 |
| <i>Tableau 6.2 : Mesures des humidités météo, extérieures et intérieures période 18 au 24 Juillet 2007</i> | 175 |
| <i>Tableau 6.3 : Mesures des températures météo, extérieures et intérieures période 25 au 31 Juillet 2007</i> | 189 |
| <i>Tableau 6.4 : Mesures des humidités météo, extérieures et intérieures période 25 au 31 Juillet 2007</i> | 201 |

RESUME

Les variations météorologiques récentes (canicules à répétition, cyclones dévastateurs...) ont fait, depuis peu, un sujet d'actualité quasi permanent, bien que leurs liens avec le changement climatique ne soient pas, à ce jour, établis de façon certaine. Parallèlement, les progrès de la connaissance scientifique ont transformé peu à peu ce qui était au départ une simple hypothèse « un réchauffement climatique causé par l'homme » en une quasi-certitude.

Il est urgent que l'homme change ses habitudes en matière d'utilisation des ressources énergétiques. Parmi les problèmes d'intensification de l'urbanisation, l'utilisation massive de la climatisation qui dépend directement de gaz très nocif au climat qui est le CFC.

Le recours aux énergies renouvelables est plus que nécessaire, cette énergie inépuisable est propre se trouve solution pour la diminution de l'utilisation de l'énergie fossile dans le domaine du bâtiment.

L'objectif général de ce travail vise à promouvoir un habitat écologique avec des techniques passives adaptées aux régions du sud à climat chaud et aride.

Ce travail propose une tentative d'approche bioclimatique ayant pour but d'améliorer la qualité du cadre bâti en développant un modèle conceptuel nouveau ou actualisé, d'une part en valorisant les ressources naturelles locales, et d'autre part en traitant l'information par des outils scientifiques. Cet objectif est possible grâce à la réalisation et l'utilisation d'un système de rafraîchissement évaporatif passif (Tour à vent) dans les climats chauds et arides (ville de Hassi Messaoud).

Un intérêt a été particulièrement porté sur une nouvelle forme de réponse à ce type de climat. Ce sont des systèmes de refroidissement passif qui ont prouvés leurs efficacités non seulement par l'obtention des réductions des écarts de températures (extérieur-intérieur) mais encore par leur pouvoir de faire circuler de l'air dans la construction en pleine canicule.

La réalisation de la tour à vent vient compléter le travail fait par Y. Bouchahm en 2003 à Ouargla.

A travers les mesures effectuées sur site, la comparaison entre les mesures prises à l'intérieur et celles prises à l'extérieur de la construction a comme objectif de déterminer et mettre en exergue le pouvoir de rafraîchissement passif de la tour à vent. La série de tests sera faite sans l'utilisation du système d'humidification en première étape pour mesurer cet effet de rafraîchissement par transfert de chaleur entre l'air et les matériaux de construction de la tour (masse), puis en second lieu, quantifier cet effet en associant de l'eau par la mise en service

d'un système d'humidification établi par Y.Bouchahm (rafraîchissement évaporatif de la tour à vent) durant la période estivale qui s'étalera du mois de Mai à Août.

Les résultats révèlent une réduction de la température de l'air au soufflage de 15,5°C et une humidité relative de 65% sans l'utilisation du système d'humidification. Et un écart de plus de 22°C et une augmentation de l'humidité relative de l'air au niveau de la bouche de soufflage arrivant à 89% en utilisant le système de rafraîchissement évaporatif, les taux élevés de l'humidité relative de l'air sont enregistrés la nuit. Ces résultats dépassent largement les résultats obtenus par simulation.

Par conséquent, le confort thermique estival a pu être atteint par une simple introduction d'une tour à vent, une ventilation naturelle diurne est devenue possible dans un climat chaud et aride, donc cette étude recommande vivement l'intégration de cette tour à vent écologique et à faible coût ayant une stratégie à énergie renouvelable.

ملخص البحث

إن التغيرات الجوية الحديثة من تيارات حرارية شديدة و أعاصير مدمرة جعلت منها و في وقت جد قصير حدث الساعة، هذا بالرغم من عدم التأكد من ثبوت علاقة سببية وطيدة بينها وبين التغيرات المناخية.

بالتوازي مع التطورات في المجال العلمي التي حولت تدريجيا ما كان مسبقا فرضية التسخين الحراري للكرة الأرضية بفعل الإنسان إلى حقيقة مؤكدة، لقد أصبح حتميا الآن على الإنسان إعادة النظر في كيفية استعمال موارد الطاقة.

إن من ضمن إشكاليات التكثيف العمراني الاستعمال الكمي الهائل لمكيفات التبريد الكهربائية المرتبطة مباشرة بالغازات الضارة للبيئة و المحيط مثل CFC. إذ أصبح للجوء إلى موارد الطاقة المتجددة ضروريا، هذه الطاقة المستدامة و النظيفة في آن واحد تعتبر حلا ناجعا في التقليل من استعمال الطاقات النافذة و المضرة بالبيئة في مجال العمران.

هذا البحث يستهدف بصفة رئيسية ترقية السكن الإيكولوجي باستعمال التقنيات الطبيعية غير المكلفة للطاقة النافذة ، المتكيفة مع البيئة الصحراوية الحارة و الجافة . إنها تعد محاولة دراسة بيومناخية هدفها ترقية الإطار المبني من خلال تطوير تصميم نموذج مستحدث أو جديد ، بإعادة تقييم الطاقات الطبيعية المحلية من جهة و معالجة المعطيات بوسائل علمية حديثة من جهة أخرى.

هذا الهدف أصبح ممكنا من خلال إنجاز و تشغيل نظام تبريد هوائي ترطبي طبيعي ممثلا في البرج الهوائي بمنطقة حاسي مسعود بالجزائر ذات المناخ الحار و الجاف.

لقد أعطيت أهمية خاصة لتطوير شكل جديد من الحلول كإجابة على هذا النوع من المناخ.

إن هذا النوع من أنظمة التبريد الطبيعية بالترطيب أثبتت فعاليتها ليس فقط في تخفيض درجة حرارة الهواء بين الداخل و الخارج بل تعداه في قدرته على تحريك الهواء داخل المباني في أقصى الظروف المناخية.

إنجاز هذا البرج الهوائي جاء تكميلا لدراسة نظرية أعدت من طرف ي.بوشم سنة 2003 في مدينة ورقلة.

من خلال سلسلة القياسات المسجلة ميدانيا ، بينت المقارنة بين هذه القياسات المأخوذة داخل و خارج المبني و أبرزت جليا قدرة و كفاءة هذا البرج على تبريد الهواء طبيعيا. بداية سجلت القياسات دون إدخال فعل الرطوبة في التبريد الطبيعي على البرج الهوائي بهدف قياس فعل التبريد بالانتقال الحراري بين الهواء و مواد بناء البرج (الكتلة) ، ثانيا تقدير هذا الفعل التبريدي بإدخال عامل الرطوبة المتمثل في الماء والمقترح في دراسة ي.بوشم سنة 2003 خلال الفترة الصيفية الممتدة بين شهر ماي و أوت.

النتائج المتحصل عليها أوضحت تخفيض درجة حرارة الهواء في مخرج البرج بـ 15.5 ° م بدرجة رطوبة نسبتها 65% وذلك دون إدخال فعل الماء ، و بفارق في درجة حرارة الهواء يتجاوز 22 ° م بدرجة رطوبة نسبتها 89% هذا باستعمال الترطيب بفعل الماء. النسب المرتفعة لرطوبة الهواء سجلت ليلا .

النتائج الميدانية لهذه الدراسة فاقت بكثير النتائج النظرية، التي مكنتنا من التوصل إلى إحداث رفاهية حرارية في فصل الصيف بمنطقة ذات مناخ حار و جاف. إن هذه الدراسة تحث على إدماج نظام الأبراج الهوائية الإيكولوجية ذات التكلفة الرخيصة الصديقة للبيئة.

SUMMARY

Although recent meteorological disturbances are subject of discussion, it has not yet been proved that they are due to weather changes. Scientific progress has led to the emergence of a new hypothesis: weather changes are caused by man.

Among the problems man causes is his intensive use of air conditioning which depends on the use of a toxic gas that damages the climate: CFC.

Therefore, he has to use renewable energy. It is in fact a kind of energy that is clean, and everlasting. It is a substitute to fossil energy.

The main objective of this research is to promote passive techniques in the building industry that are adapted to southern regions characterized by hot and arid climate.

This research suggests a bioclimatic architectural approach which attempts to improve the quality of the living space, on one hand by developing a new conceptual design, and by analyzing the data using scientific instruments on the other hand. This objective is relatively easy to achieve, the solution is the realization of the evaporative cooling system (via wind tower) which uses sprayers water inside the tower, the water droplets evaporate in the air which lowers the air temperature and increases the humidity ratio, in a hot and arid climate (Hassi Messaoud).

Interest was focused on a new form of response to this type of climate. These are passive cooling systems which have proved their efficiency not only by the reduction of temperature variation (internal/external) but also creating natural cross ventilation inside the building during the hot season.

The realization of the wind tower came to complete the work done by Y. BOUCHAHM in 2003 in Ouargla.

Through site measurements, the comparison of measures taken at inlet and outlet of the building aimed to identify and highlight the wind tower potential for passive cooling.

In a first step of experiment, the sprayers are inactive (dry operating). The purpose is to measure the cooling by heat and mass transfer between air and the building components of the tower. Next set, the sprayers are active in order to operate the evaporative system of the tower. The measurements will be taken from May to August. The results obtained reveal the following:

A reduction of 15.5°C of air temperature at the outlet is recorded, a humidity ratio of about 65%. This happened in dry operating.

However, a decrease rate of about 22°C is recorded and an 89% rise of relative humidity, this is obtained when the sprayers of water are active by using the evaporative cooling system.

These results exceed widely the results obtained through simulation.

Consequently, the summer thermal comfort has been achieved by a simple introduction of a wind tower; hence day-time natural ventilation became possible in a hot and dry climate.

Thus this study deeply recommends the integration of such wind towers with ecological and low-cost design having a strategy for renewable energy.