

Un procédé économique pour l'amélioration du confort thermique en zone tropicale sèche: la ventilation forcée par de l'air extérieur éventuellement humidifié

Yves Jannot

Département Energies pour le Développement Rural,
Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Équipement Rural (EIER),
03 BP7023 Ouagadougou 03, Burkina Faso
Reçu le 16 juin 1992; révisé le 8 février 1993

On présente les caractéristiques principales du climat tropical sec. On souligne, à partir des données climatiques et des revenus locaux, le besoin existant en équipements de climatisation économiques. On montre que la ventilation forcée par de l'air extérieur humidifié permet d'atteindre un confort thermique acceptable toute l'année dans cette zone. On présente les résultats d'un test effectué avec un ventilohumidificateur réalisé localement à un coût compatible avec le pouvoir d'achat local. On préconise d'associer des mesures de climatisation passive à l'utilisation de ce procédé pour un meilleur confort thermique.

(Mots clés: conditionnement d'air; confort; ventilation; air; économie; pays chaud)

Amelioration of thermal comfort in dry tropical climate by use of an economic process: direct evaporative cooling

The characteristics of a dry tropical climate are given; the needs of economic equipment for air cooling are outlined from climatic data and local financial possibilities. It is shown that in this climatic zone, an acceptable thermal comfort can be obtained all year round by direct evaporative cooling of outside air. Experimental results obtained by testing a direct evaporative cooler built locally at a cost compatible with local incomes are given. However, for best thermal comfort, the use of both a direct evaporative cooler and some techniques of passive cooling must be done.

(Keywords: air conditioning; comfort; ventilation; air; economics; hot country)

Nomenclature

e_a	Humidité relative air extérieur (%)	θ_{ha}	température humide air extérieur (°C)
G	Irradiation globale journalière sur un plan horizontal ($\text{kJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$)	θ'_a	température de rosée air extérieur (°C)
p_a	Pression atmosphérique (mmHg)	θ_i	température air intérieur d'une pièce (°C)
v_a	vitesse du vent (m s^{-1})	θ_1	température air en sortie d'un ventilohumidificateur (°C)
θ_a	température (sèche) air extérieur (°C)		

Nous allons présenter dans ce document des procédés, à la fois simples et économiques, permettant d'améliorer de façon appréciable le confort thermique dans l'habitat à Ouagadougou et, plus généralement, sous un climat tropical sec.

Nous commencerons par présenter les caractéristiques principales du climat tropical sec qui prévaut à Ouagadougou. En considérant ensuite les conditions climatiques et le contexte économique, nous montrerons le besoin qui existe à l'heure actuelle en matière de recherche du confort thermique. Nous proposerons alors deux procédés simples et économiques:

1. la ventilation nocturne par de l'air aspiré de l'extérieur;

2. l'utilisation d'un ventilohumidificateur: ventilation par de l'air aspiré de l'extérieur, puis refroidi par passage sur une surface humide.

Nous montrerons que ces deux procédés permettent d'apporter une amélioration notable du confort thermique. L'investissement inhérent à leur mise en oeuvre et le coût de fonctionnement occasionné par leur utilisation sont compatibles avec les revenus d'une partie de la population. Nous noterons par ailleurs que les appareils utilisant ces procédés peuvent être construits et installés par de la main d'oeuvre locale.

Nous préconiserons enfin de les associer à des mesures de climatisation passive, pour permettre d'approcher davantage, voire d'atteindre, le confort thermique toute

0140-7007/94/030174-06

© 1994 Butterworth-Heinemann Ltd and IIR

174 Int. J. Refrig. 1994 Volume 17 Number 5

l'année. Nous terminerons par une conclusion concernant les possibilités de développement de ces deux appareils.

La zone d'étude: son climat

Les performances des procédés envisagés vont dépendre fortement des conditions climatiques; il importe donc de connaître le type de climat qui prévaut à Ouagadougou et ses caractéristiques. Les cartes climatologiques consultées dans les références 1, 2 et 3 placent Ouagadougou dans la zone à climat tropical sec correspondant à la zone sahélienne (Figure 1).

Les conclusions auxquelles nous aboutirons pour Ouagadougou seront donc valables pour d'autres grands centres urbains tels que Bamako, Ségou, Niamey, Maroua, N'djamena, entre autres.

Pour établir les caractéristiques du climat tropical sec, nous avons recueilli auprès des services de la Météorologie Nationale les relevés de la station de Ouagadougou pour la période 1982-1987. Cela nous a permis d'établir, pour chaque mois de l'année, les variations journalières types des différentes grandeurs climatiques:

1. la température 'sèche' θ_a (°C);
2. la température 'humide' θ_{ha} (°C);
3. la température de rosée θ'_a (°C);
4. l'humidité relative e_a (%);
5. la vitesse du vent v_a (m s⁻¹);
6. la pression atmosphérique p_a (mmHg);
7. l'irradiation journalière globale G (kJ m⁻²);
8. la pluviométrie mensuelle (mm d'eau).

On trouvera à titre d'exemple les données du mois d'avril dans le *Tableau 1*. Les tableaux correspondant aux autres mois figurent en annexe.

Tableau 1 Exemple de présentation des journées types établies pour chaque mois à Ouagadougou

Table 1 Example of how typical days for each month in Ouagadougou are presented

		avril							
heure		0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h
θ_a (°C)		30.7	29.0	27.6	32.1	37.5	39.2	37.1	32.9
θ_{ha} (°C)		19.7	19.6	19.6	21.0	21.6	21.2	20.6	20.3
θ'_a (°C)		14.1	14.9	15.7	15.7	13.8	11.9	12.0	14.0
θ'_a (°C)		37	42	48	37	24	20	22	32
v_a (m s ⁻¹)		2.1	2.2	1.6	3.0	3.5	2.9	2.6	1.7
p_a (mmHg)		730	730	730	730	731	730	728	729
$10^{-3} G$ (kJ m ⁻² j ⁻¹)							22.7		
pluviométrie							15.2 mm		

Tableau 2 Valeurs estimées des moyennes de la température intérieure θ_i (°C) à 15 h et à 21 h dans une habitation à Ouagadougou

Table 2 Estimated values of average inside temperatures θ_i at 3:00 p.m. and at 9:00 p.m., in a Ouagadougou home

mois		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15 h	θ_a	32.1	35.4	37.3	39.2	37.2	33.4	31.5	30.2	31.7	34.8	35.6	32.1
	θ_i	26.8	30.4	33.5	35.8	34.7	32.0	30.2	29.3	29.9	31.5	30.4	27.1
21 h	θ_a	23.9	27.4	30.7	32.9	32.5	29.8	27.6	26.5	26.9	28.1	26.7	23.7
	θ_i	26.3	29.9	33.0	35.3	34.2	31.5	29.7	28.8	29.4	31.0	29.9	26.6

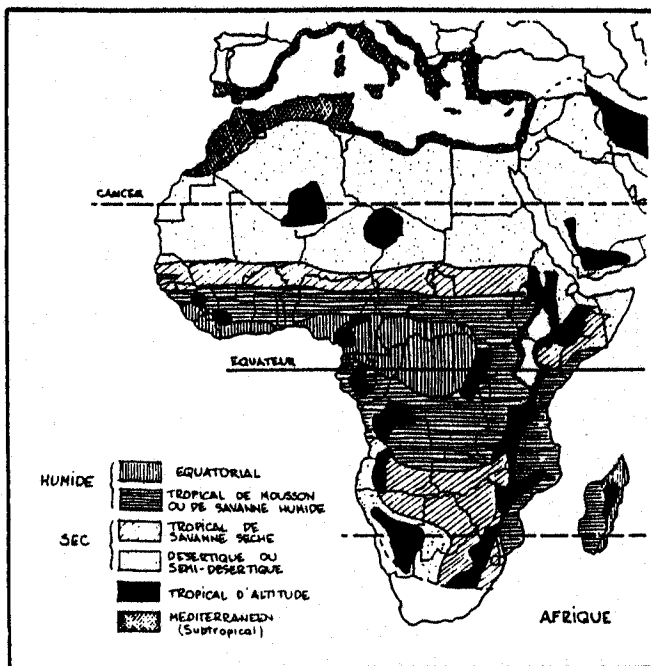


Figure 1 Les climats d'Afrique, extrait de Estienne et Godard¹

Figure 1 Climates in Africa, extracted from Estienne and Godard¹

Le besoin

Les températures dans l'habitat

A partir de relevés simultanés des températures θ_a à l'extérieur et θ_i à l'intérieur d'une habitation de type 'villa' à Ouagadougou, nous avons extrapolé les valeurs de la température intérieure θ_i à 15 h et à 21 h pour chaque mois de l'année: les résultats sont présentés dans le *Tableau 2*.

Insuffisance des moyens existants

Nous pouvons, en première approximation, retenir les résultats suivants: pour un individu au repos vêtu légèrement, la température maximale acceptable est de 30 °C si l'air est immobile (absence de ventilation); elle est de 32 °C si l'on fait usage d'un ventilateur (de bureau, sur pied ou plafonnier). Nous déduisons des valeurs du *Tableau 2* que l'utilisation du ventilateur est nécessaire et suffisante en février, juin, juillet, octobre et novembre, mais qu'elle ne permet pas d'atteindre des conditions de confort acceptables de mars à mai. Il faut donc recourir à un autre procédé durant cette période.

Le seul autre moyen disponible est la climatisation

dont le coût est malheureusement trop élevé: le plus petit climatiseur coûte à l'achat 250 000 FCFA (1 FCFA = 0,02 FF) et conduit à une dépense de fonctionnement minimale de 17 000 FCFA par pièce et par mois d'après⁴. Ces chiffres, comparés aux salaires locaux qui varient de 25 000 FCFA à 150 000 FCFA, expliquent qu'une très faible minorité de la population utilise la climatisation.

Entre la ventilation aux performances insuffisantes de mars à mai et la climatisation trop coûteuse, il existe donc un besoin pour des procédés intermédiaires.

Les solutions proposées

La ventilation nocturne par de l'air extérieur

En comparant les valeurs des températures θ_a et θ_i sur le Tableau 2, nous constatons qu'à 21 h la température extérieure est en moyenne inférieure à la température intérieure de 2,5 °C.

L'utilisation classique du ventilateur consiste à lui faire brasser l'air de la pièce à la température θ_i . Une amélioration sensible peut être obtenue en plaçant simplement le ventilateur devant une ouverture de façon à ce qu'il pulse dans la pièce de l'air extérieur à $\theta_a < \theta_i$; voir schéma de principe sur la Figure 2.

L'amélioration apportée est très sensible, comme le

montre le Tableau 3 où nous avons reporté les valeurs moyennes de la température θ_a relevée à Ouagadougou. La zone hachurée correspond aux valeurs de θ_a supérieures à 30 °C. La zone non hachurée correspond aux périodes où le procédé proposé permet d'atteindre un confort acceptable, ce qui est pratiquement toujours le cas entre 0 h et 9 h.

Ce procédé est donc particulièrement adapté à une utilisation dans une chambre où un ventilateur (type ventilateur de bureau de forme carrée) posé sur une fenêtre ouverte et orienté de façon convenable peut permettre d'atteindre des conditions nocturnes acceptables presque toute l'année (cf. zone non hachurée du Tableau 3). Notons qu'en saison chaude la ventilation par de l'air extérieur doit être stoppée à partir de 9 h et être remplacée par une ventilation intérieure classique (plafonnier ou déplacement du ventilateur) pendant la journée.

Le procédé décrit apporte donc une amélioration notable des conditions nocturnes mais ne résout pas le problème de l'inconfort thermique dans la journée. Ceci nous a amené à considérer un deuxième procédé: le refroidissement de l'air par évaporation d'eau, appelé refroidissement évaporatif direct.

Le refroidissement évaporatif direct

Principe. On fait subir à l'air une humidification, qui s'accompagne d'un refroidissement, dans un appareil appelé ventilo-humidificateur dont le schéma de principe est donné dans la Figure 3.

Performances de l'installation. La température θ_i de l'air en sortie d'appareil est d'autant plus basse que l'air

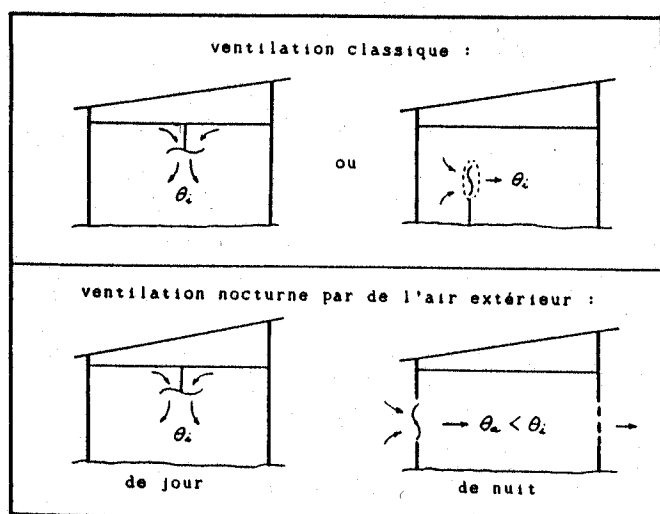


Figure 2 Schéma de principe du procédé de ventilation nocturne par de l'air extérieur
Figure 2 Diagram of the night-ventilation process with external air

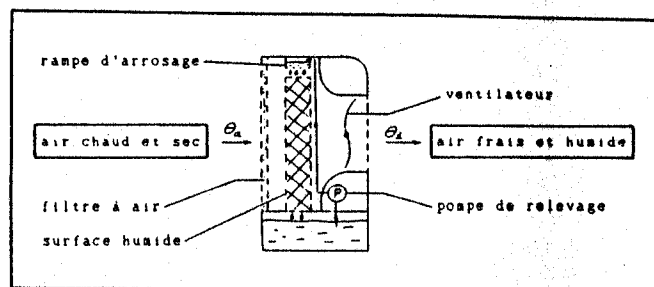


Figure 3 Schéma de principe d'un ventilo-humidificateur
Figure 3 Diagram of a fan-humidifier

Tableau 3 Valeurs moyennes de la température extérieure θ_a (°C) à Ouagadougou
Table 3 Average values of outside temperature θ_a in Ouagadougou

heure	mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0 h	21,0	24,5	28,2	30,7	30,4	27,9	26,3	25,1	25,4	26,3	24,1	21,2
3 h	18,9	22,4	26,3	29,0	28,9	26,6	25,2	24,4	24,5	24,7	22,0	19,2
6 h	17,2	20,7	24,8	27,6	27,8	25,6	24,3	23,8	23,7	23,7	20,4	17,6
9 h	22,5	26,2	29,9	32,1	30,3	28,9	26,7	26,3	26,8	28,8	28,3	24,7
12 h	29,8	33,4	35,5	37,5	34,9	32,1	29,9	29,4	30,3	33,8	34,4	30,4
15 h	32,1	35,4	37,3	39,2	37,2	33,4	31,5	30,2	31,7	34,8	35,6	32,1
18 h	29,0	33,4	35,2	37,1	35,3	31,9	30,3	28,9	29,5	31,5	31,4	28,2
21 h	23,9	27,4	30,7	32,9	32,5	29,8	27,6	26,5	26,9	28,1	26,7	23,7

extérieur est sec. En prenant un rendement de 70% (humidification obtenue sur humidification maximale possible), nous obtenons en sortie d'appareil, après humidification de l'air extérieur à θ_a , les températures θ_1 présentées dans le *Tableau 4*.

Nous constatons que la valeur moyenne de θ_1 reste inférieure à 28°C, valeur qu'elle peut dépasser certains jours tout en restant en-deça de 30°C. Cependant, l'utilisation de l'appareil en saison humide conduirait à des humidités trop élevées; c'est pourquoi nous recommandons le schéma d'utilisation suivant:

(a) de nuit:

- (i) utilisation de la fonction ventilation de février à novembre;
- (ii) utilisation de la fonction humidification (pompe de relevage alimentée) seulement en mars, avril et mai, voire février et octobre.

(b) de jour:

- (i) utilisation de la fonction ventilation si la température intérieure dépasse 30°C;
- (ii) utilisation de la fonction humidification d'octobre à mai (en l'absence de pluie).

Installation d'un ventilo-humidificateur. L'appareil doit être placé de façon à ce que l'air aspiré à travers la surface humidificatrice provienne exclusivement de l'extérieur. L'idéal est de l'encastrer dans un mur comme un climatiseur de fenêtre: une solution plus facile à mettre en oeuvre (mais un peu moins efficace) consiste à le placer devant une fenêtre ouverte. Il doit exister dans la pièce une autre ouverture (fenêtre ou à défaut porte, ouverte) par laquelle l'air pulsé dans la pièce pourra sortir.

Important. En période chaude (avril, mai), le ventilo-humidificateur permet d'atteindre le confort dans sa zone de soufflage, mais il est insuffisant pour refroidir toute une pièce. Il doit donc être disposé de façon à ce que le flux d'air sortant de l'appareil balaie la zone d'occupation. Son domaine d'utilisation privilégié sera donc la chambre où la zone d'occupation est bien délimitée (*Figure 4*).

Possibilité de réalisation locale. Un des avantages du ventilo-humidificateur réside dans sa simplicité technique permettant d'envisager une fabrication locale.

Fokouo Kouam⁵ a pu faire réaliser aux ateliers de l'EIER un appareil ayant un rendement d'humidification

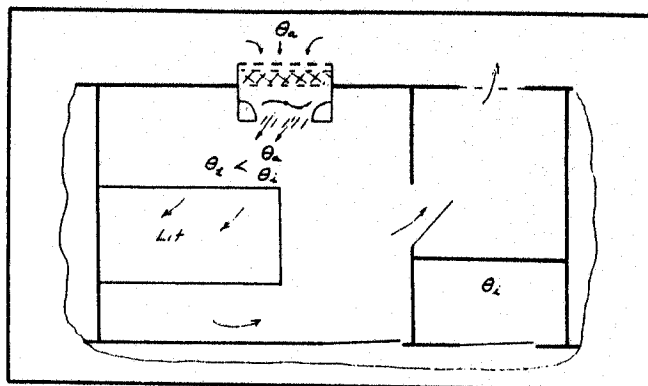


Figure 4 Exemple d'installation d'un ventilo-humidificateur sur la fenêtre d'une chambre

Figure 4 Example of the installation of a fan-humidifier in the window of a room

supérieur à 70%, et ne comportant qu'un seul élément non disponible sur le marché local: la pompe de relevage. En utilisant un ventilateur acheté d'occasion, il a évalué le coût de l'appareil à 87 500 FCFA.

L'appareil réalisé a été testé pendant la semaine la plus chaude du mois d'avril 1991 (du 22 au 28 avril) dans une chambre d'étudiant à l'EIER. Les sensations exprimées par l'utilisateur ont été comparées avec celles de l'occupant d'une chambre voisine utilisant un ventilateur simple. Les résultats relevés sont consignés dans le *Tableau 5*.

Ces résultats sont satisfaisants et ont été confirmés lors d'une deuxième semaine de tests effectués chez un particulier. Le travail de Fokouo Kouam a permis de montrer la possibilité de réaliser localement un appareil performant.

Tableau 5 Sensations (en %, du total) exprimées par deux occupants de chambres à l'EIER (Ouagadougou), semaine du 22 au 28 avril 1991
Table 5 Feelings (in %, of the total) expressed by two occupants of rooms at the EIER (Ouagadougou), week of 22-28 April 1991

procédé	sensation			
	légèrement froid	confort	légèrement chaud	chaud
ventilo-humidificateur	19	57	24	
ventilateur		14		86

Tableau 4 Valeurs moyennes de la température θ_1 (°C) de l'air en sortie d'un ventilo-humidificateur
Table 4 Average values of temperature θ_1 of air leaving the fan-humidifier

heure	mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0 h	14.5	16.9	20.0	23.0	25.2	24.7	24.1	23.8	23.9	22.8	18.8	15.0
3 h	13.2	15.6	18.9	22.4	24.6	23.9	23.5	23.8	23.2	22.0	17.6	15.1
6 h	12.1	15.0	18.1	22.0	24.3	23.5	23.0	23.0	22.7	21.7	18.8	12.8
9 h	14.4	16.8	20.3	24.3	25.6	25.0	24.1	24.1	24.3	24.2	20.2	16.1
12 h	18.6	20.9	23.1	26.4	27.3	26.4	25.6	25.6	25.9	26.2	23.0	19.3
15 h	20.0	22.2	24.1	26.9	27.8	26.8	26.2	25.5	26.6	26.0	23.6	20.4
18 h	18.9	21.6	23.3	25.6	26.8	26.2	25.8	25.5	25.6	24.8	22.2	20.0
21 h	16.2	18.6	21.5	24.1	25.9	25.5	24.7	24.4	24.6	23.5	20.0	16.6

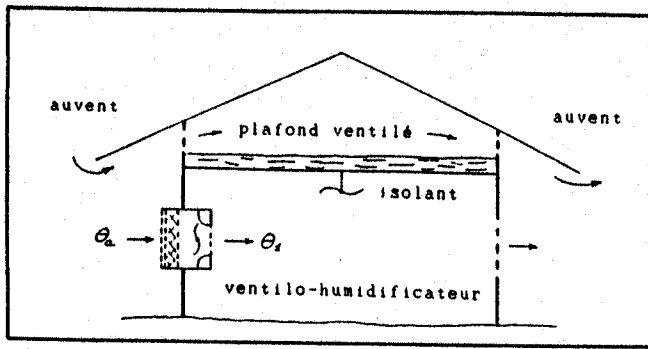


Figure 5 Le confort thermique sans climatisation active: proposition de réalisation

Figure 5 Thermal comfort without active air-conditioning: a design proposal

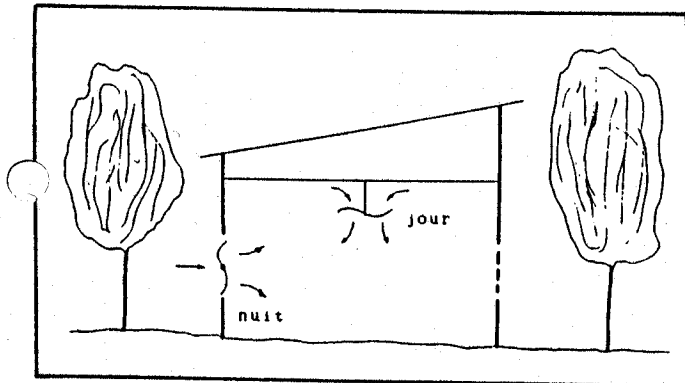


Figure 6 Amélioration du confort thermique à faible coût: proposition de réalisation

Figure 6 Improvement of low-cost thermal comfort: a design proposal

Aspect économique. La puissance électrique consommée par l'appareil varie entre 90 et 150 W suivant la vitesse sélectionnée; la consommation maximale en eau est de 4 l h⁻¹. Le coût de fonctionnement pour une utilisation de 10 h par jour est inférieur à 4 200 FCFA par mois.

Une enquête réalisée à Ouagadougou par Temeching⁶ a permis de montrer l'inhêret suscité par le ventilo-humidificateur, sous réserve d'un prix d'achat inférieur à 200 000 FCFA et de la durabilité de l'appareil.

Des recherches sont actuellement menées à l'EIER pour étudier les possibilités de production locale d'un appareil répondant à ces contraintes.

Conclusion

Nous pensons qu'il est possible, sous un climat tropical sec, d'obtenir des conditions de confort thermique acceptables sans avoir recours à des procédés actifs de climatisation (climatiseur de fenêtre ou split system). Nous préconisons pour cela l'emploi d'un ventilo-humidificateur (par pièce) associé aux mesures passives schématisées sur la Figure 5.

Pour un coût d'investissement minimum (20 000 FCFA par ventilateur et 200 FCFA par plant d'arbre: acacia ou neem), il est également possible de réduire la contrainte diurne et d'atteindre pratiquement le confort thermique la nuit toute l'année (Figure 6).

Nos recherches portent maintenant sur la réalisation locale, à un prix compétitif, de ventilo-humidificateur ainsi que sur la production d'isolant à poser en plafond.

References

- 1 Estienne, P., Godard, A. *Climatologie*. Colin, Paris, 1970
- 2 Huet, O., Celaire, R. *Bioclimatisme en Zone Tropicale* GRET, Paris, 1984
- 3 Vire, G. *Éléments de Climatologie* Nathan, Paris, 1968
- 4 Jannot, Y. Production d'eau, d'air frais et conservation des produits par des procédés solaires rustiques. *Thèse de doctorat* INPL, Nancy, 1991
- 5 Fokouo Kouam, D. Conception, réalisation et test d'un ventilo-humidificateur *Mémoire de fin d'études* EIER, Ouagadougou, 1991
- 6 Temeching, K. F. Etude des possibilités de climatisation par évaporation d'eau à Ouagadougou *Mémoire de fin d'études* EIER, Ouagadougou, 1990

Annexe: Journées types de la station de Ouagadougou (suite)

janvier								
heure	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h
θ_a (°C)	21,0	18,9	17,2	22,5	29,8	32,1	29,0	23,9
θ_{ha} (°C)	11,7	10,7	9,9	11,0	13,8	14,9	14,5	12,9
θ'_a (°C)	3,8	3,4	3,2	-0,3	-0,6	0,1	2,9	3,9
θ_a (%)	32	36	39	22	14	13	19	27
v_a (m s ⁻¹)	1,3	1,1	1,1	3,7	4,3	3,2	2,1	1,5
p_a (mmHg)	734	734	734	734	734	733	732	733
$10^{-3} G$ (kJ m ⁻² j ⁻¹)					20,2			
pluviométrie					0 mm			

février								
heure	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h
θ_a (°C)	24,5	22,4	20,7	26,2	33,4	35,4	33,4	27,4
θ_{ha} (°C)	13,7	12,7	12,6	12,7	15,6	16,6	16,5	14,9
θ'_a (°C)	5,4	4,9	6,4	0,6	1,1	2,2	4,0	6,2
θ_a (%)	29	32	40	19	13	12	16	27
v_a (m s ⁻¹)	1,1	1,4	1,0	3,4	4,1	3,1	2,2	1,3
p_a (mmHg)	733	732	732	732	732	732	731	732
$10^{-3} G$ (kJ m ⁻² j ⁻¹)					22,9			
pluviométrie					0 mm			

mars								
heure	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h
θ_a (°C)	28,2	26,3	24,8	29,9	35,5	37,3	35,2	30,7
θ_{ha} (°C)	16,5	15,8	15,3	16,2	17,8	18,5	18,2	17,5
θ'_a (°C)	9,0	8,9	9,0	6,8	6,0	6,4	7,4	9,3
θ_a (%)	30	33	37	24	16	15	18	27
v_a (m s ⁻¹)	1,1	1,4	1,3	3,5	3,6	2,6	2,0	1,1
p_a (mmHg)	731	731	731	731	731	731	730	731
$10^{-3} G$ (kJ m ⁻² j ⁻¹)					22,6			
pluviométrie					11,2 mm			

avril								
heure	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h
θ_a (°C)	30,7	29,0	27,6	32,1	37,5	39,2	37,1	32,9
θ_{ha} (°C)	19,7	19,6	19,6	21,0	21,6	21,2	20,6	20,3
θ'_a (°C)	14,1	14,9	15,7	15,7	13,8	11,9	12,0	14,0
θ_a (%)	37	42	48	37	24	20	22	32
v_a (m s ⁻¹)	2,1	2,2	1,6	3,0	3,5	2,9	2,6	1,7
p_a (mmHg)	730	730	730	730	731	730	728	729
$10^{-3} G$ (kJ m ⁻² j ⁻¹)					22,7			
pluviométrie					15,2 mm			

