

Comportement thermique et efficacité de collecte de la rosée d'un condenseur incliné dans des conditions de vent variable

Heat behavior and dew collection efficiency of tilted condenser in varying winds conditions

Laurent ROYON^{1*}, Marc MUSELLI^{2,4}, Sylvain LEFAVRAIS^{2,3}, Daniel BEYSENS^{2,3}

¹ Laboratoire des Energies de Demain, 75013 Paris

² OPUR, 75016 Paris France

³ Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, 75005 Paris

⁴ Università di Corsica Pasquale Paoli, 20250 Corté

*(Corresponding author: laurent.royon@lu-paris.fr)

Résumé - Cette étude examine le comportement thermique et la collecte d'eau d'un condenseur de rosée incliné à 30° en fonction de l'orientation du vent. Le rendement dépend fortement de l'orientation du vent : les vents qui arrivent en face avant du condenseur favorisent le refroidissement et la condensation par rapport à des vents venant de l'arrière. Ce comportement peut être attribué à la présence de convection naturelle, dans laquelle l'air refroidi au niveau de la surface de condensation descend et s'oppose à l'écoulement forcé ascendant.

Abstract - This study examines the thermal behavior and water collection performance of a dew condenser tilted at 30° as a function of wind orientation. The yield strongly depends on wind direction: winds striking the front face of the condenser enhance cooling and condensation compared to winds coming from the rear. This behavior can be attributed to the presence of natural convection, in which air cooled at the condensing surface descends and opposes the upward forced flow.

Nomenclature (11 pt, 2 columns)

<i>T</i>	température, °C	<i>Indices et exposants</i>	
<i>Dir</i>	direction du vent (°)	<i>a</i>	air
<i>RH</i>	taux d'humidité (%)	<i>d</i>	point de rosée
<i>S</i>	surface d'échange, m ²	<i>p</i>	condenseur plan
<i>h</i>	eau collectée par m ² en mm (L·m ⁻²)	<i>ref</i>	condenseur de référence
<i>x, x'</i>	coordonnée cartésienne (m)	<i>β, γ</i>	pente
<i>U_z</i>	vitesse à la hauteur <i>z</i> (ms ⁻¹)	<i>w</i>	essuyage au levée du jour
<i>Symboles grecs</i>		<i>w'</i>	sans essuyage au levée du jour
<i>θ</i>	angle d'inclinaison du condenseur		
<i>φ</i>	angle de direction du vent		

1. Introduction

La pénurie d'eau douce, aggravée par la croissance démographique et le changement climatique, stimule l'intérêt pour la récupération passive de l'eau atmosphérique par refroidissement radiatif. Bien que la physique de la rosée soit connue, sa collecte reste difficile, les rendements théoriques ($\approx 3,5 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}/\text{j}$) dépassant largement les rendements observés ($\approx 0,6$

$L \cdot m^{-2}/j$). L'optimisation des matériaux et de la géométrie des condenseurs peut améliorer significativement les performances ainsi que le positionnement du dispositif par rapport aux vents dominants.

Cette étude s'intéresse à l'orientation du vent sur les performances d'un condenseur plan incliné à 30° (Fig. 1). Basé sur des travaux expérimentaux et numériques[1], l'objectif est de définir l'orientation optimale qui induit un refroidissement et un rendement de rosée maximal. Les résultats sont comparés à ceux obtenus par un condenseur plan horizontal, constituant la référence.

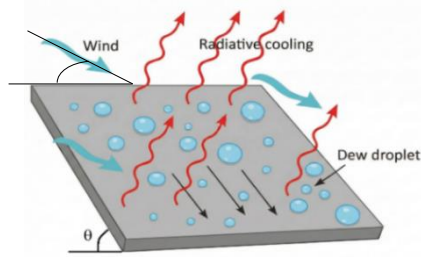


Figure 1: Représentation schématique du condenseur incliné

2. Site expérimental et matériel

2.1. Site expérimental

Le condenseur est installé sur un site de l'aéroport d'Ajaccio, en Corse (France). Le climat méditerranéen de type Csa (selon la classification de Köppen) se caractérise notamment par un grand nombre annuel de nuits claires, propices à la formation de rosée.



Figure 2: Carte de la Corse et localisation du site expérimental de l'aéroport d'Ajaccio. La flèche jaune indique l'orientation du vent en période diurne (D, orientation SW), les flèches bleues le vent en période nocturne (N, orientation NE).

En journée, une brise de mer arrive sur le condenseur sous une orientation à 220° ($\approx$ SO), tandis qu'une brise nocturne presque symétrique venant à 55° ($\approx$ NE) prédomine la nuit (table 1). Lors des épisodes de rosée, la vitesse moyenne du vent à 1 m au-dessus du sol est de $2,6 \pm 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.2. Condenseurs de rosée

La Figure 3 présente une photographie du condenseur plan (P) incliné à 30° par rapport à l'horizontale installé à proximité d'un condenseur plan horizontal (Ref). La configuration en disque arrondi a fait l'objet d'une étude approfondie et nous avons récemment démontré qu'elle pouvait être considérée comme la norme pour la mesure de la rosée [2].

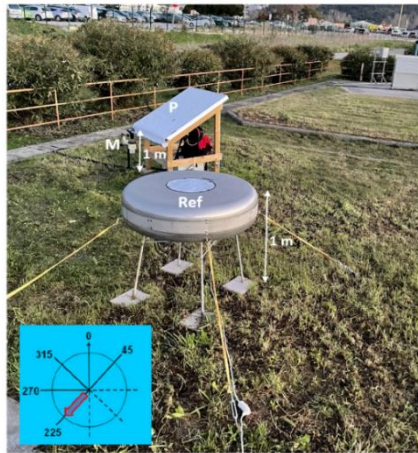


Figure 3: Photographie du condenseur incliné à 30° (P, direction SW) et du condenseur horizontal. Légende de la rose des vents: direction du vent la nuit (flèche noire) et l'angle des orientations testées

Le condenseur incliné à 30° est recouvert d'une feuille de LDPE de nature hydrophobe, de d'épaisseur 0,35mm [3], composée de microbilles de TiO_2 et de BaSO_4 , présentant une émissivité élevée (0,96 dans la fenêtre atmosphérique) et un albédo élevé (0,76). En tenant compte de la moitié de la surface de la gouttière ($0,182/2 \text{ m}^2$), la surface totale de condensation est $S_c = 1,032 \pm 0,09 \text{ m}^2$.

La formation de rosée se produit principalement la nuit, lorsque le vent souffle généralement du nord-est ($\approx 45^\circ$). La plupart des expériences ont donc été réalisées avec le condenseur orienté vers le NE (vent de face) et le SW (vent arrière). Des mesures supplémentaires ont été effectuées pour des orientations intermédiaires, en faisant pivoter le condenseur pas par pas de 45° . Les orientations 90° , 135° et 180° n'ont pas été testées car elles sont redondantes par symétrie.

Le condenseur de référence [2] est un disque en PMMA de 357 mm de diameter et d'épaisseur 2 mm. Son émissivité normale est de 0,95 et l'albédo de 0,074. Le disque est isolé sur sa face inférieure par 30 mm de polystyrène extrudé. Il est également entouré d'un carénage conçu pour maintenir un écoulement d'air laminaire uniforme au-dessus de la surface du disque.

3. Température

3.1. Mesure de température

Un enregistrement typique est présenté à la Fig. 4. Pendant la nuit, les températures en surface T_p et T_{ref} des condenseurs plan et de référence, respectivement, sont inférieures à la température de l'air T_a . T_d représente ici la température de rosée.

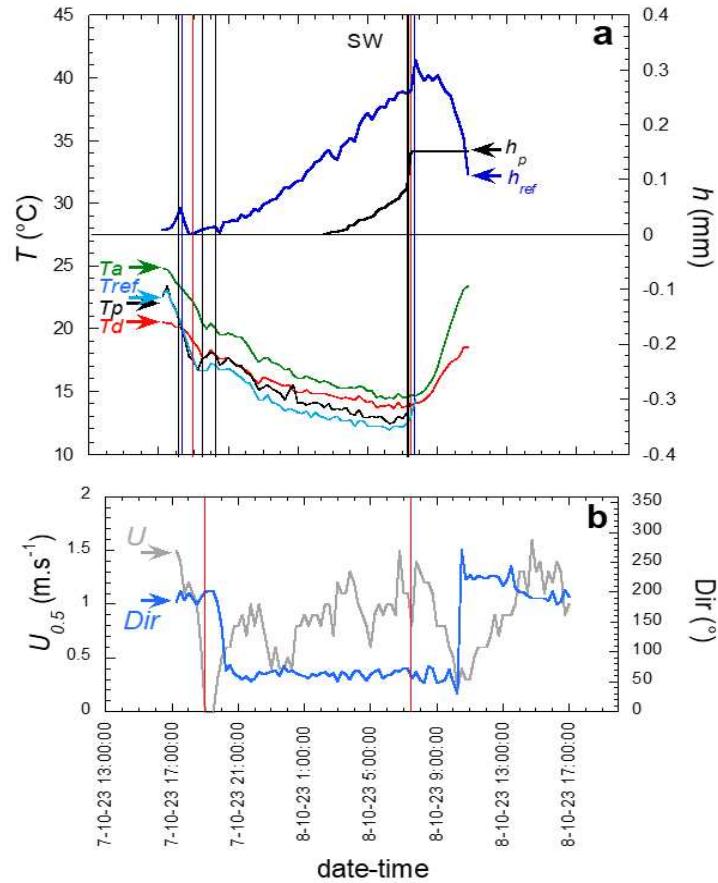


Figure 4: Données typiques issues des condenseurs de référence et du plan (orienté à 225°). Nuit du 07-08/10/2023 SW. L'heure est en UT+2. (a) Variations de la température (axe de gauche) et du volume de rosée par unité de surface h (mm ; axe de droite). T_a : Température de l'air (courbe verte) ; T_d : Température du point de rosée (courbe rouge) ; T_p : Température du plan (courbe noire) ; T_{ref} : Température de référence (courbe bleu clair). T_p et T_{ref} sont mesurées par caméra infrarouge avec une correction de +1°C. Les lignes verticales bleues correspondent à $T_a = T_d$ et les lignes verticales noires à $T_p = T_d$. h_p (courbe noire) correspond à la rosée du plan, h_{ref} (courbe bleue) correspond à la rosée de la référence. L'augmentation verticale de h_p à 7:30 correspond à un essuyage manuel.

3.2. Données météorologiques

La température de l'air T_a (°C), l'humidité relative RH (%), la vitesse du vent U ($= U_{0.5}$) ($m \cdot s^{-1}$) et la direction du vent Dir (°) sont mesurées à une hauteur de 0,5 m à l'aide d'une station météorologique Froggit HE4000 présentant les caractéristiques suivantes : températures (-40 °C à 60 °C, résolution 0,1 °C), RH (10 % à 99 %, résolution 1 %), $U_{0.5}$ (0 à 50 $m \cdot s^{-1}$, résolution 0,5 $m \cdot s^{-1}$, vitesse de démarrage 0,3 $m \cdot s^{-1}$), Dir (0 à 360°, largeur de classe 22,5°).

L'eau de rosée s'écoulant par gravité depuis la surface du condenseur P est mesurée par un pluviomètre électronique avec une plage de 0 à 9999 mm et une résolution de 0,3 mm pour une surface de 0,009503 m^2 . En tenant compte de la surface du condenseur (1,032 m^2), un facteur de $(9,21 \pm 0,07) \times 10^{-3}$ doit être appliqué aux mesures du pluviomètre afin d'obtenir les données réelles du condenseur en mm. La plage du pluviomètre devient alors de 0 à 95 mm avec une résolution de 0,003 mm. Toutes les données sont enregistrées chaque minute.

3.3 Masses d'eau condensée

L'eau de rosée se formant sur le disque de référence est pesée toutes les 15 minutes alors que celle s'écoulant du condenseur plan est mesurée à l'aide du pluviomètre. Occasionnellement, la surface du condenseur est raclée le matin afin de comparer la rosée collectée par gravité avec la quantité totale condensée ; cette méthode indique une efficacité d'essuyage estimée à environ 99 %. Toutes les mesures d'eau de rosée sont exprimées en volume par unité de surface, soit h , en mm ($L \cdot m^{-2}$).

3.4 Température de surface infrarouge

Une caméra infrarouge (FLIR T420), fonctionnant dans la fenêtre atmosphérique de 7,5 à 13 μm , est utilisée pour cartographier la température de surface des condenseurs. Les mesures sont réalisées soit sur un seul condenseur, avec la caméra placée à 2,5 m de distance et à 1,7 m de hauteur, soit simultanément sur les deux condenseurs, à une distance de 2,2 m. Les images sont prises toutes les 15 minutes.

Pour compenser les effets liés à l'humidité atmosphérique, les données de température infrarouge T_{IR} sont corrigées en appliquant un décalage de température constant ΔT_c , de sorte que les températures corrigées $T_{ref,p}$ correspondent à la température du point de rosée au début et à la fin de la période de condensation. Les valeurs de correction de température obtenues se situent dans l'intervalle $\Delta T_c = 1$ à 2 $^{\circ}C$, avec une incertitude inférieure à 0,5 $^{\circ}C$.

Afin de fournir une référence d'émissivité, un ruban adhésif noir en PVC (émissivité 0,97, épaisseur 0,15 mm) est appliqué sur les surfaces de condensation. En camera I.R., le scotch devient invisible dès que la surface devient humide car l'émissivité de l'eau [5] est proche de celle du ruban adhésif noir.

4. Résultats et discussion

4.1 Températures de surface

La figure 6 montre la température de surface à 6h00 pour différentes orientations condenseur-vent. La vitesse du vent U_1 à 1m de la surface du sol reste proche de $2 m \cdot s^{-1}$ et la rosée est bien présente. Bien que les ondulations de la feuille de LDPE puissent quelque peu compliquer l'interprétation, les images révèlent néanmoins des tendances claires.

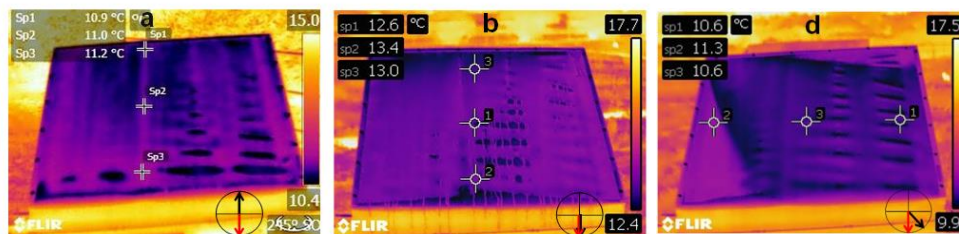


Figure 6: *Temperature de surface pour différentes orientations φ du vent. Orientation: flèche blanche orientation du condenseur, flèche noire direction du vent. (a) $\varphi = 180^{\circ}$, 3/10/2023, 03:20, $U_1 = 2.2 m \cdot s^{-1}$. (b) $\varphi = 0^{\circ}$, 10/09/2023, 04:10, $U_1 = 2 m \cdot s^{-1}$. (c) $\varphi = 45^{\circ}$, 27/09/2023, 04:10, $U_1 = 2.2 m \cdot s^{-1}$.*

4.1.1 Écoulement de l'air le long d'un axe de symétrie

Vent de face, $\varphi = 180^\circ$ (Fig. 6a). La température est presque uniforme dans la direction horizontale, à l'exception de certains effets de bord. Dans la direction verticale (axe x'), on observe un gradient de température. On se trouve dans une situation où la convection naturelle induite par les forces de flottabilité s'oppose à la convection forcée due au vent dominant. L'écoulement d'air descendant lié à la convection naturelle contrebalance l'écoulement forcé ascendant, ce qui réduit la vitesse de l'air et accentue ainsi le refroidissement (Fig. 7).

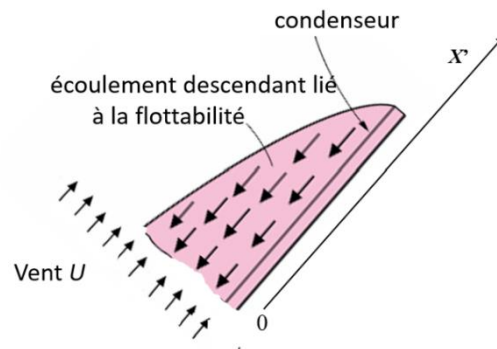


Figure 7 : Représentation schématique du mouvement de l'air en surface du condenseur incliné

Par conséquent, le mouvement de convection naturelle descendant accentue le refroidissement radiatif ce qui se traduit par une température de la surface qui diminue lorsque x' augmente, comme observé expérimentalement (Fig. 6a). Cette configuration de vent de face correspond donc à un taux de condensation plus élevé.

Vent arrière, $\varphi = 0^\circ$ (voir Fig. 6b). Le champ de température est plus uniforme que lorsque l'écoulement de l'air est dirigé vers l'avant. Selon la simulation numérique développée dans [4], la ligne de courant proche de la surface illustrée en Fig. 8 révèle une couche limite thermique qui s'épaissit avec x' , conduisant à une réduction du transfert de chaleur et à un gradient de température similaire à celui observé dans le cas où l'écoulement d'air est dirigé vers l'avant. Cependant, la contribution de la convection naturelle est probablement plus faible ici, ce qui entraîne un transfert de chaleur global plus élevé que dans la configuration précédente.

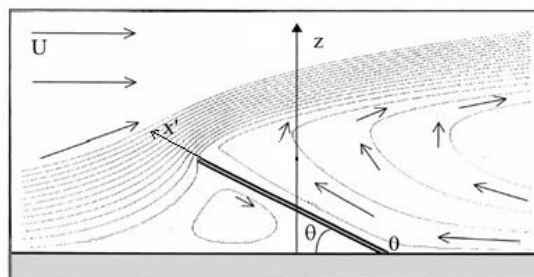


Figure 8: Lignes de courant obtenues à partir d'un écoulement d'air se déplaçant à rebours le long d'un plan de 1,2 m de long et de 10 mm d'épaisseur, incliné d'un angle $\theta = 30^\circ$ par rapport à l'horizontale. La vitesse du vent est de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. adapté de [4], avec autorisation.

4.1.2 Écoulement de l'air ne s'écoulant pas le long d'un axe de symétrie.

Vent arrière de quart, $\varphi = 45^\circ$ (Fig. 6c). Sans surprise, les régions à partir du coin supérieur gauche présentent deux zones chaudes et une région centrale plus froide, correspondant à une zone protégée du vent.

Concernant le vent de quart avant ($\varphi = 135^\circ$, non montré ici), on observe, comme dans la configuration à 45° , un fort gradient thermique orienté horizontalement. Pour un vent de travers ($\varphi = 90^\circ$, non montré), l'écoulement est tangentiel avec un gradient de gauche à droite.

4.2 Taux de condensation.

La figure 9 montre le rendement en rosée du condenseur non essuyée h_w' (en volume par unité de surface) par rapport au rendement total du condenseur essuyé h_w . Deux configurations sont considérées : (i) lorsque le plan est orienté face au vent NE et (ii) lorsque le plan est orienté dos au vent SW. On observe une relation linéaire entre ces deux variables avec une pente de 0.98 ± 0.04 pour un vent de face avant et 1.01 ± 0.07 pour un vent de face arrière.

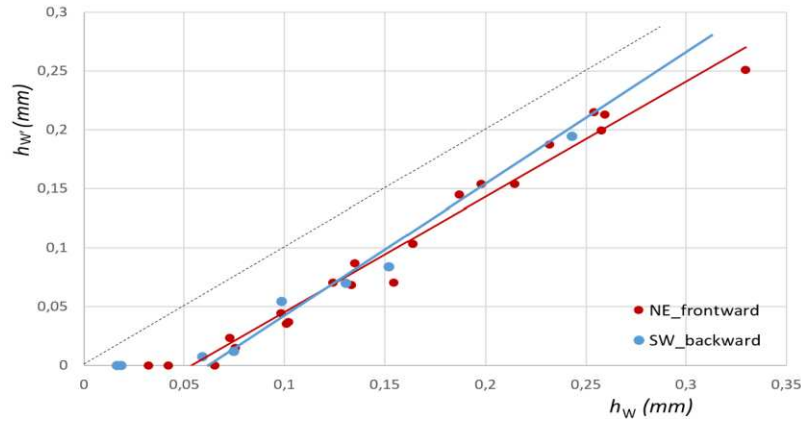


Figure 9 Correlation entre (h_w) and (h_w') pour un vent de face (en rouge) et un vent arrière (en bleu). La ligne pointillée est la droite de pente 1.

Maintenant, si l'on compare ces données avec celles du condenseur de référence, on observe une relation de proportionnalité linéaire de la forme :

$$h_w = \beta_\varphi h_{ref} \quad (1)$$

On constate que pour un vent de face ($\varphi = 180^\circ$), la pente $\beta_{(180^\circ)} = 0.70 \pm 0.03$, et pour un vent arrière ($\varphi = 0^\circ$), la pente $\beta_{(0^\circ)} = 0.52 \pm 0.06$. Les rendements de rosée sont donc plus faibles pour les condenseurs plans inclinés par rapport au condenseur de référence horizontal, d'environ 30 % (vent de face) ou près de 50 % (vent arrière). De plus, la configuration avec vent arrière donne des rendements 26 % plus faibles que la configuration avec vent de face.

Bien que les autres angles disposent d'un nombre limité de données, il est intéressant de représenter le rapport $\beta_\varphi = (h_w/h_{ref})$ en fonction de φ sur la Fig. 10. Les angles de 45° et 90° donnent les rendements les plus faibles, en lien avec les forts gradients de température observés sur la surface de condensation pour ces angles.

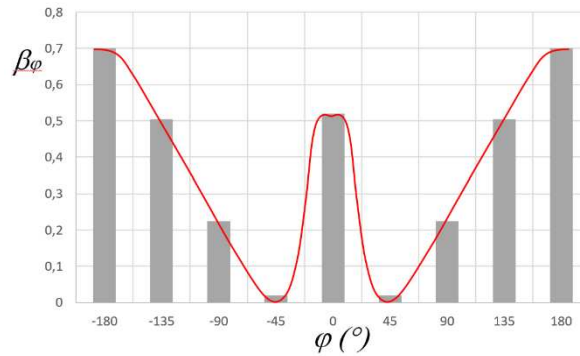


Figure 10 : Rapport $\beta_\phi=(h_w/h_{ref})$ en fonction de ϕ

5. Conclusion

Les résultats de cette étude expérimentale montrent que l'orientation des condenseurs plans inclinés à 30° a un effet significatif à la fois sur le refroidissement radiatif et sur les échanges convectifs de chaleur avec l'air ambiant. Un résultat majeur est que le rendement en rosée est maximal dans la configuration de vent de face par rapport aux autres configurations. Ce comportement peut être attribué à la présence de convection naturelle, dans laquelle l'air refroidi au niveau de la surface de condensation descend et s'oppose à l'écoulement forcé ascendant. En conséquence, la vitesse nette de l'écoulement d'air est réduite, ce qui entraîne une diminution du transfert de chaleur convectif. Ces résultats confirment et prolongent les mesures antérieures rapportées par Beysens et al. [6], Kidron [7] et Sharan et al. [8].

Du point de vue de la conception, ces résultats devraient contribuer au développement de futurs condenseurs. En particulier, pour des configurations planes, orienter la surface face au vent nocturne dominant est susceptible de maximiser l'efficacité de collecte de la rosée.

Références

- [1] M. Muselli, S. Lefavrais, L. Royon, P. Florès, D. Beysens, Heat transfer mechanisms governing the performance of tilted planar dew condensers. *International Journal of Thermal Sciences*, (2026) 110493.
- [2] D. Beysens, S. Lefavrais, M. Muselli, P. Rébillout, L. Royon, A standard for dew measurement, *Journal of Hydrology*, Vol.661, Part A, (2025) 133527.
- [3] OPUR, 2025. <https://www.opur.cloud/index.php/condensers-for-sale/>
- [4] Howell, J.C., Yizhaq, T., Drechsler, N., Zamir, Y., Beysens, D. and Shaw, J.A., Generalized nighttime radiative deficits. *Journal of Hydrology*, 603, (2021) 126971.
- [5] Trosseille, J., Mongruel, A., Royon, L. and Beysens, D., Effective substrate emissivity during dew water condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183, (2022) 122078.
- [6] D. Beysens, I. Milimouk, I. V. Nikolayev, M. Muselli, M., J. Marcillat, Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: A study to improve water yield. *Journal of Hydrology*, 276, (2003), 1–11.
- [7] G.J. Kidron, Angle and aspect dependent dew and fog precipitation in the Negev desert. *Journal of Hydrology*, 301, (2005), 66-74.
- [8] G. Sharan, O. Clus, S. Singh, M. Muselli, D. Beysens, A very large dew and rain ridge collector in the Kutch area (Gujarat, India), *Journal of hydrology*, 405, (2011), 171-181.