



**Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 4nd International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 et 25 Octobre 2016



Modélisation des Pertes Thermique dans un Distillateur Solaire à Film Capillaire

Zerrouki Moussa ^{a,1}, Boukebous Seife ddine ^{a,2}, Marif Yacine ^{c,3}, Belhadj Moustapha ^{d,4}

^a Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie.

Moussa.zerrouki@yahoo.fr

^c Univ Ouargla, Fac. des Mathématiques et Sciences de la Matière, Lab. Développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes, LENREZA, P.O. Box 511, Ouargla 30 000, Algérie.

³ Marif.Yacine@yahoo.fr

^d Unité de Recherche en Energies Renouvelables En Milieu Saharien, URERMS, Center de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 01000, Adrar, ALGERIE

⁴ mhmu_belhadj@yahoo.com

Résumé — la production d'eau douce trouve toute sa justification dans la région d'Adrar sud de l'Algérie. La plupart des eaux d'origine souterraine sont saumâtres et impropres à la consommation humaine. Ces eaux sont caractérisées par une salinité qui dépasse les normes de L'OMS. La distillation solaire peut être envisagée non seulement comme une solution qui respect l'environnement et économique, mais une réelle alternative aux ressources énergétiques d'origine fossiles.

L'objectif de cet article, c'est la modélisation numérique des pertes de chaleur qui se produisent pendant le processus de distillation dans un distillateur solaire à film capillaire. Nous avons établi les équations régissant le fonctionnement de distillateur, dont la résolution a été abordée par une approche numérique de Runge-Kutta-Fehlberg. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres météorologiques et opératoires sur les caractéristiques de fonctionnement. Les pertes de chaleur par l'apport de eau d'appointe pouvant affecter considérablement le débit de distillat, un minimum de ces pertes assuré une importante production.

Mots clés — distillation solaire ; film capillaire ; pertes thermiques ; simulation numérique

Nomenclature:

A	Surface d'échange thermique.	m^2
Cp_i	Chaleur massique.	$J/kg.°C$
G	Rayonnement solaire global.	W/m^2
h	Coefficient de transfert thermique.	$W/m^2.°C$
Lv	Chaleur latente de vaporisation.	J/kg
M	Masse.	kg
\dot{m}	Débit massique de l'eau d'appointe.	kg/s
$\dot{m}d$	Débit massique de distillat.	kg/s

$\dot{m}s$	Débit massique de saumure concentrée sortante	kg/s
t	Temps.	s
T_i	Température du nœud i .	$°C$
V	Vitesse du vent.	m/s
q	Flux de chaleur.	W
Q	Energie.	Wh

Symboles grecs :

α	Absorptivité.	-
ρ	Masse volumique du fluide.	kg/m^3
ϵ	Emissivité effective.	-
ϵ	Epaisseur.	m
σ	Constante de Stefan Boltzmann.	$W/m^2 °C^4$
λ_i	Conductivité thermique.	$W/m °C$
τ	Transitivité.	-

Indices:

a	Ambiante.
ap	Appointe.
c	Condenseur.
c	Convection.
co	Conduction.
cs	Couche de soleil.
e	Eau.
e	Évaporateur.
g	Vitre.
ins	Isolant.
ls	Lever de soleil.
max	Maximal.
r	Rayonnement.
rf	Réflexion.



min Minimal.
sky Ciel.

l'unité est assurée par un isolant (5), La Fig.1 montre le schéma de principe de fonctionnement d'une unité de distillation. [2] :

I. INTRODUCTION

Les eaux souterraines représentent la source principale en eau potable dans la région d'Adrar, Algérie. Les résultats des analyses chimiques montrent une dominance des eaux de mauvaise qualité chimique sur celles de bonne qualité. Ces eaux de potabilité mauvaise sont caractérisées par une salinité supérieure de 1g/l dépassant de loin les normes établies par l'O.M.S. Cependant cette région dispose de l'un des gisements solaires les plus importants du monde, avec plus 3000 heures d'ensoleillement par an. L'énergie solaire moyenne quotidienne reçue par unité de surface horizontale sur cette région est évaluée 5.75kwh, elle est disponible en abondance [1].

Plusieurs types de configurations de distillateurs solaires à film capillaire ont été construits et essayés à travers le monde, depuis les travaux de R. et C. Ouahes et P. Le Goff suivi par celles de B. Bouchekima[2], suite par ce de H.Tanaka et al S.Hikmet; [3], et plus récemment les travaux S. Ben Jabrallah et M. Abidi[4]. Dans cette présente étude on cherche de maîtriser mieux les pertes de chaleur à l'extérieur à fin d'améliorer les performances de distillateur et rendre ce procédé bénéfique pour les petites communautés rurales manquant d'eau potable.

II. DESCRIPTION DU SYSTEME

L'appareil est formé d'une vitre (1) et de deux plaques métalliques disposées face à face et inclinées d'un certain angle. La face avant de la première plaque est peinte en noir (2). Sur l'autre côté l'eau à distiller, s'écoule lentement à l'aide d'un tissu (3), ce tissu est convenable pour former un film capillaire d'eau. Ceci justifie le nom donné à l'appareil Distillateur à Film Capillaire (DIFICAP). La vapeur d'eau produite quitte le tissu et va se condenser au contact de la seconde plaque(4). L'eau distillée et le résidu sont récupérés par des collecteurs. L'isolation thermique de

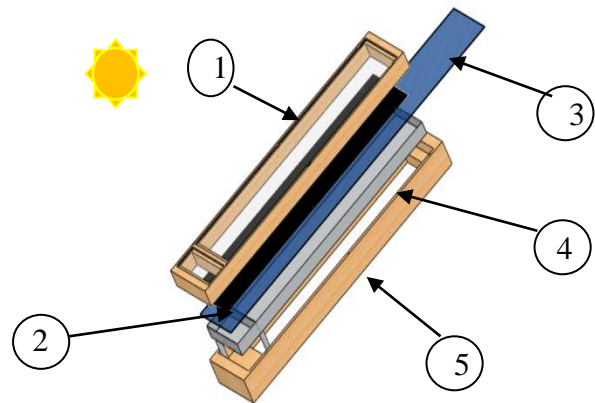


Fig. 1 Système d'un distillateur à film capillaire

III. MODELISATION DES PERTES THERMIQUES

La modélisation est faite sur la base des bilans thermique et massique au niveau de chaque partie du système, il faut connaître les différents coefficients d'échange thermique et massique des surfaces d'échange [2,5]. Dans le but de rendre le modèle accessible, nous devons prendre en considération les hypothèses simplificatrices suivantes.

- La température des plaques est supposée uniforme ainsi que celle de la vitre.
- La paroi de condensation est non mouillable.
- L'eau à évaporer, et le distillat sont des films très minces (capillaires). Ils sont donc supposés ne présenter aucune inertie thermique.
- Les propriétés physiques des plaques et de la vitre sont considérées indépendantes de la température et sont prises égales à des valeurs moyennes.

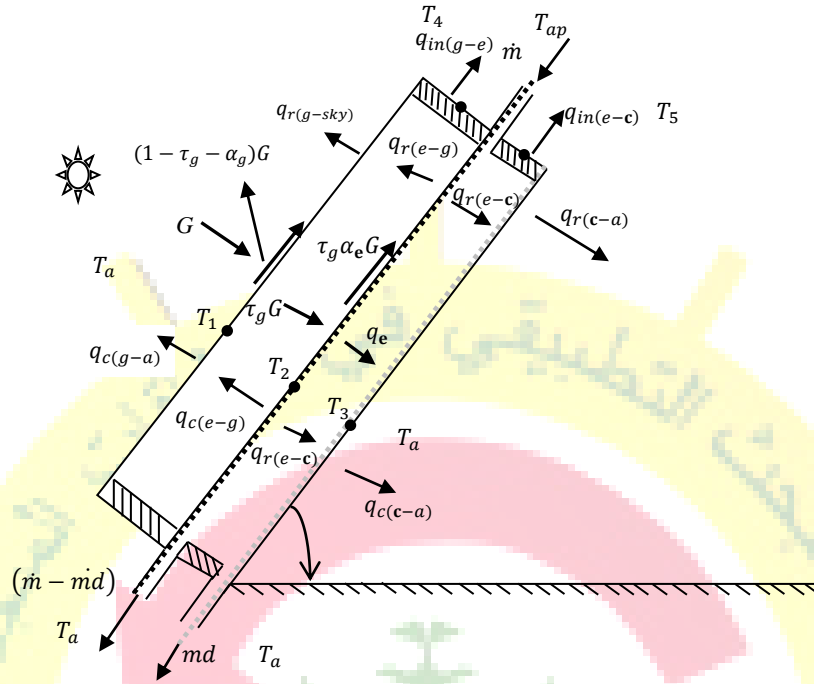


Fig. 2 Les flux thermiques perdus par un distillateur solaire à film capillaire

A. Au niveau de la vitre

$$(mCp)_g \frac{dT_1}{dt} = q_{r(e-g)} + q_{c(e-g)} - q_{r(g-sky)} - q_{c(g-a)} + \alpha_g G \quad (1)$$

G : Le rayonnement solaire global estimé par le modèle de Michel Capderou bien adapter au climat de l'Algérie.

$q_{r(g-sky)}$: Pertes thermique par rayonnement libérées par la vitre à l'extérieur.

$$q_{r(g-sky)} = h_{r(g-a)}(T_1 - T_{sky})A_g \quad (2)$$

$$h_{r(g-sky)} = \epsilon_g \sigma \left[(T_g + 273.15)^2 + (T_{sky} + 273.15)^2 \right] / (T_g + T_{sky} + 546.30) \quad (3)$$

La température de ciel est estimée par une simple relation en fonction de température ambiante [3].

$$T_{sky} = 0.00552(T_a + 273.15)^{1.5} - 273.15 \quad (4)$$

L'estimation de la température ambiante est basée sur la formule de Parton et Logan [6].

$$T_a = (T_{amax} - T_{amin}) \sin[(t - (T_{ls} - 0.17)) \pi / (T_{ls} - T_{cs} + 3.6)] + T_{amin} \quad (5)$$

$q_{c(g-a)}$: Pertes thermiques par convection libérées par la vitre à l'extérieur.

$$q_{c(g-a)} = h_{c(g-a)}(T_1 - T_a)A_g \quad (6)$$

$$h_{c(g-a)} = 2.8 + 3V \quad (7)$$

B. Au niveau de la plaque évaporant

$$(mCp)_e \frac{dT_2}{dt} = -q_{r(e-g)} - q_{c(e-g)} - q_{r(e-c)} - q_{c(e-c)} - \dot{m}d \times Lv(T_2) +$$

$$\dot{m}scp(T_2 - T_a) + (\dot{m}Cp)_e(T_2 - T_{ap}) - q_{co(e-insg)} - q_{co(e-insc)} + \tau_g \alpha_e G \quad (8)$$



$(\dot{m}Cp)_e(T_2 - T_{ap})$: La quantité de chaleur perdue par apport d'eau d'appointe.

$\dot{m}scP(T_2 - T_a)$: La quantité de chaleur perdue vers l'extérieur avec l'eau non distillée.

$q_{co(e-insg)}$: Les pertes thermiques par conduction à travers l'isolant latéral entre la vitre et l'évaporateur [7].

$$q_{co(e-insg)} = h_{co(e-insg)} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_4 \right) A_{insg} \quad (9)$$

$$h_{co(e-insg)} = \frac{\lambda_{ins}}{\varepsilon_{insg}} \quad (10)$$

$q_{co(e-insc)}$: Les pertes thermiques par conduction à travers l'isolant latéral entre le condenseur et l'évaporateur.

$$q_{co(e-insc)} = h_{co(e-insc)} \left(\frac{T_3 + T_2}{2} - T_5 \right) A_{insc} \quad (11)$$

$$h_{co(e-insc)} = \frac{\lambda_{ins}}{\varepsilon_{insc}} \quad (12)$$

C. Au niveau de la plaque condensant

$$(\dot{m}Cp)_c \frac{dT_3}{dt} = q_{r(e-c)} + q_{c(e-c)} + \dot{m}d \times Lv(T_3) - q_{r(c-a)} - q_{c(c-a)} + (\dot{m}dCp)_e(T_3 - T_a) \quad (13)$$

$q_{c(c-a)}$: Pertes thermiques par convection libérées par la plaque condensant vers l'extérieur.

$$q_{c(c-a)} = h_{c(c-a)}(T_3 - T_a)A_c \quad (14)$$

$q_{r(c-a)}$: Pertes thermiques par rayonnement libérées par la plaque condensant vers l'extérieur

$$q_{r(c-a)} = h_{r(c-a)}(T_3 - T_a)A_c \quad (15)$$

$(\dot{m}dCp)_e(T_3 - T_a)$: La quantité de chaleur perdue vers l'extérieur avec l'eau distillée.

D. Au niveau de l'isolation entre la vitre et l'évaporateur

$$(\dot{m}Cp)_{ins} \frac{dT_4}{dt} = q_{co(e-insg)} - q_{c(4,a)} - q_{r(4,a)} \quad (16)$$

Les deux termes $q_{c(4,a)}$ et $q_{r(4,a)}$ sont exprimés à l'aide des équations (14) et (15) respectivement.

E. Au niveau de l'isolation entre le condenseur et l'évaporateur

$$(\dot{m}Cp)_{ins} \frac{dT_5}{dt} = q_{co(e-insc)} - q_{c(5,a)} - q_{r(5,a)} \quad (17)$$

Toutes les termes et les quantités physiques non détaillées dans cet article sont présentés dans d'autres articles antérieurs de l'auteur [5,8].

Durant un jour donné la somme d'énergie entrante dans le distillateur égal à la somme de l'énergie perdue à l'extérieur, nous pouvons écrire ce qui suit :

$$A_g \int_{t_0}^{t_f} G \cdot dt = \sum Q_i \quad (18)$$

$$Q_i = \int_{t_0}^{t_f} q_i \cdot dt \quad (19)$$

Dans ce travail les différentes pertes thermiques interviennent dans le bilan énergétique du distillateur solaire sont classées en quatre catégories pour faciliter la discussion des résultats [9]:

1. Catégorie I représente l'énergie incidente réfléxie par la vitre
2. Catégorie II représente l'ensemble d'énergie perdue par rayonnement et convection à travers les différentes parties composantes le distillateur vers l'extérieur
3. Catégorie III représente l'énergie thermique perdue par l'isolant.
4. Catégorie IV représente l'énergie thermique perdue par l'écoulement d'eau entrant et sortant de distillateur.

$$Q_{rfg} = A_g \int_{t_0}^{t_f} (1 - \alpha_g - \tau_g) G \cdot dt \quad (20)$$

IV. RESOLUTION NUMERIQUE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Les équations (1), (8), (13), (16) et (17) décrivant les phénomènes de transfert thermique dans un distillateur solaire à film capillaire constituent un système d'équations différentielles ordinaires de premier ordre. Une approche numérique basée sur la méthode numérique de Runge-Kutta-Fehlberg 4(5) a été choisie pour résoudre le modèle mathématique obtenu [10]. Le programme de calcul est écrit en langage FORTRAN90, la convergence est considérée comme obtenue lorsque l'erreur relative est inférieure 10^{-4} .

Les calculs sont effectués à Adrar dont les coordonnées géographiques, Latitude $27^{\circ}.53$ Nord, longitude $0^{\circ}.17$ Est et de l'altitude 264m, et un décalage horaire, d'une heure [1], à partir d'un instant initial " t_0 ", dans cette instante tous les parties composantes le distillateurs sont à une température initiale égale à T_a à l'exception de température de la plaque évaporant $T_2 = T_a + 1$, l'angle d'inclinaison de distillateur est prise égale à $32^{\circ}C$, le débit d'alimentation par la saumure est constante fixe à 1.25kg/h sa température est prise égale à T_a , la vitesse de vent est considérée aussi constante et prise à 2



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 et 25 Octobre 2016



m/s. Les propriétés thermo-physiques des éléments composantes le distillateur ont été prise constantes durant la simulation, ces propriétés thermo-physiques et géométriques sont présentées dans le tableau ci-après :

TABLE I. LES PROPRIETES THERMO PHYSIQUE ET GEOMETRIQUES

Paramètres	Vitre	insg	Eva	insc	Con
Masse volumique ρ	2530	200	7864	200	7864
Conductivité thermique λ	1.2	0.037	20	0.037	20
Capacité thermique C_p	840	670	460	670	460
Absorptivité α	0.05	-	0.95	-	0.95
Transitivité τ	0.9	-	0	-	0
Épaisseur ϵ	0.003	0.06	2.10^{-3}	0.06	10^{-3}
Emissivité ϵ	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2
Surface A	1.00	0.05	1.00	0.03	1.00

La Fig.3 illustre l'évolution de la température de la vitre, des deux plaques et de l'isolant d'un distillateur DIFICAP pour une journée typique du 22 Septembre. On constate que les courbes sont superposées, et que la température de la plaque absorbante est la plus élevée tandis que la température de l'isolant avoisinante la température ambiante.

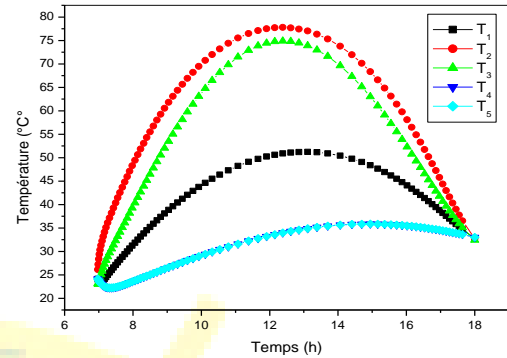
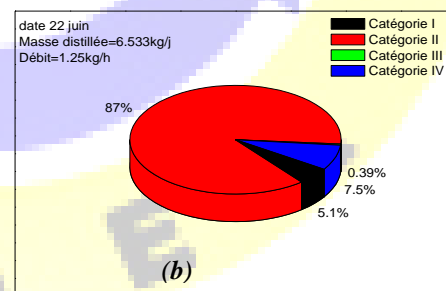
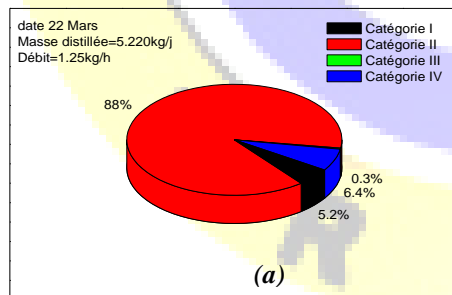


Fig. 3 Evolution de la température de la vitre, isolants et les plaques pour un DIFICAP

La distribution de l'énergie thermique perdue à l'extérieur par un DIFICAP selon les quatre catégories définies plus haut sont présentées dans la Fig.4 (a, b, c, d) pour 22^{ème} jour des mois Mars, Juin, Septembre et Décembre, Nous constatons que les pertes par convection et par rayonnement (catégorie II) c'est la plus dominant à 88%, alors que les pertes par les isolants latérales (catégorie III) sont négligeables moins de 0.5%, les pertes thermique par réflexion de l'énergie incidente (catégorie I) sur la vitre elle constante 5%, cette quantité n'est pas transmise à l'intérieur de distillateur elle dépendante des caractéristique de la vitre notamment le taux réflexion, épaisseur et l'angle d'inclinaison, le reste de l'énergie est perdue a travers le débit d'alimentation en eau saumâtre (catégorie IV) 7%, cette catégorie elle sensible à la valeur de débit et sa température.





Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 et 25 Octobre 2016

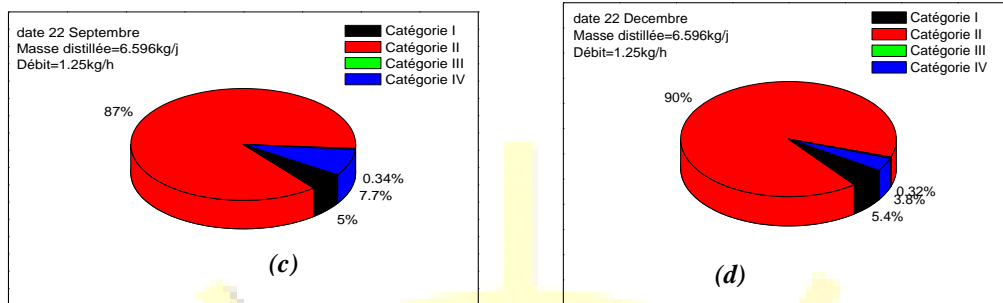


Fig. 4 Distribution de l'énergie perdue pour les quatre jours typiques.

La Fig.5 (a, b, c, d) montrer la variation de l'énergie perdue a travers l'eau d'appointe, l'eau distillée et l'eau non distillée grouper dans la catégorie IV en fonction de débit d'appointe, l'augmentation de débit d'appointe engendre l'augmentation de ces pertes et par conséquent la diminution de la production quotidienne, le passage de débit de 1.25kg/h à 4kg/h le pourcentage des pertes passe de 7.7% à près de 18%, et par la suite la quantité d'eau distillée diminue de 6.596 kg/jm² à 4.23 kg/jm².

D'autre part cette quantité d'eau distillée est moins influencée par la variation de la température d'eau saumâtre qui alimente le distillateur, la production quotidienne augment de 3.02 kg/j.m² à 3.73 kg/j.m² lorsque la température de l'eau saumâtre augmente de 10C° à 60C° pour un jour typique de 22 Décembre.

Cette variation correspondante une diminution des pertes thermique de 16% à 6%, la variation est schématisée dans la Fig.6 (a, b, c, d).

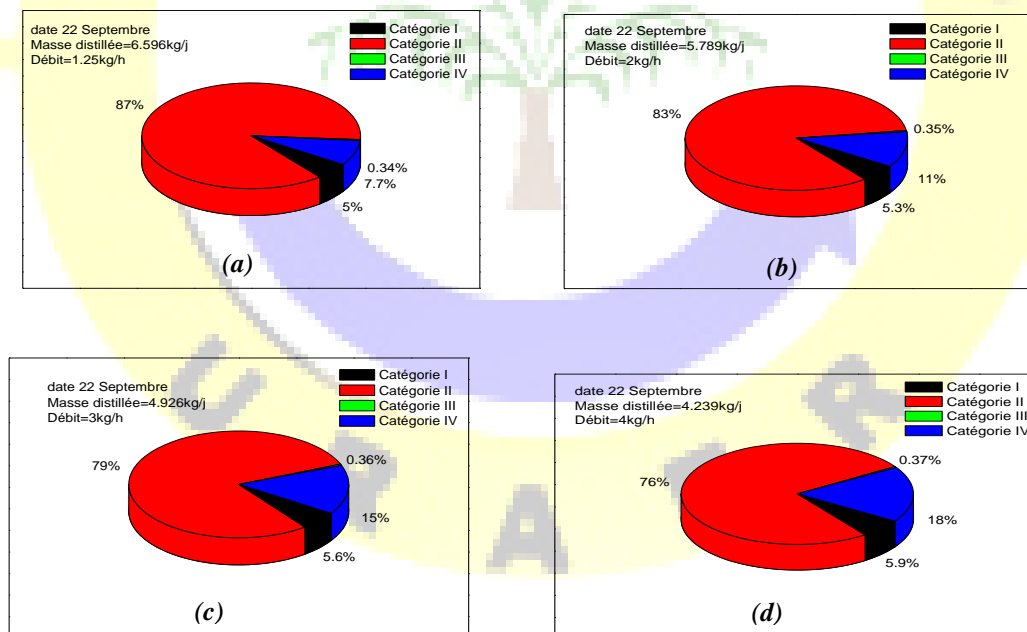


Fig. 5 Distribution de l'énergie perdue en fonction de débit d'appointe

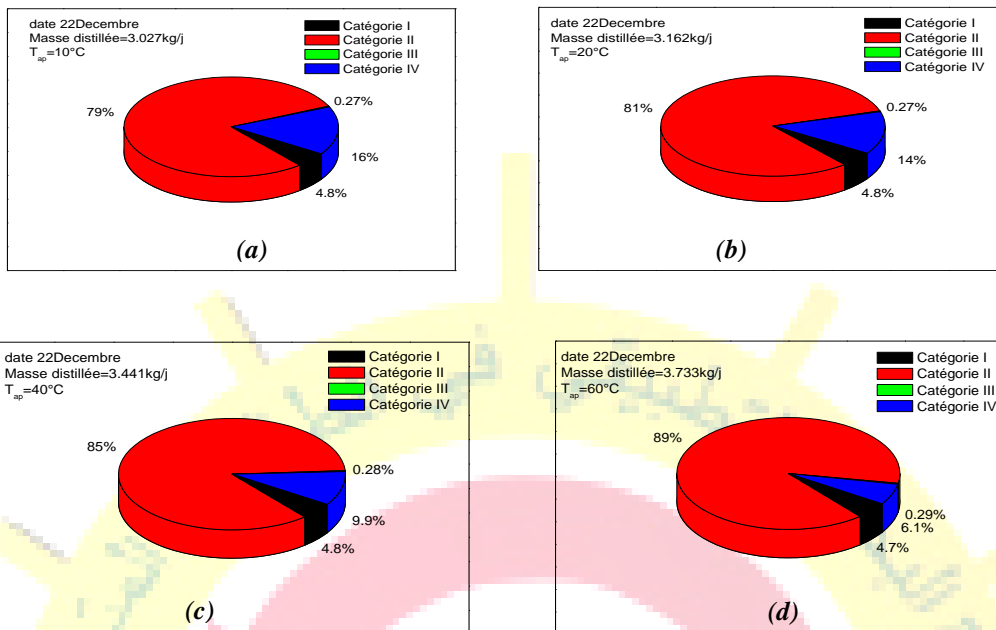


Fig. 6 Distribution de l'énergie perdue en fonction de température de l'eau d'appointe

Les pertes thermiques par convection et par rayonnement catégorie II est influencer par les conditions climatologiques de site d'étude notamment la vitesse du vent la température de l'ambiance, la Fig.7 (a, b, c, d) présente l'influence de la vitesse du vent sur la quantité de distillat par jour, cette

quantité varie inversement avec la vitesse du vent, pour le jour typique de 22 Mars la masse d'eau distillée diminué de 5.596 à 3.79 kg/j.m² quand la vitesse augment de 1 à 6m/s, la variation de la vitesse influencer sur l'énergie perdue catégorie II qui passe de 86% à 93%.

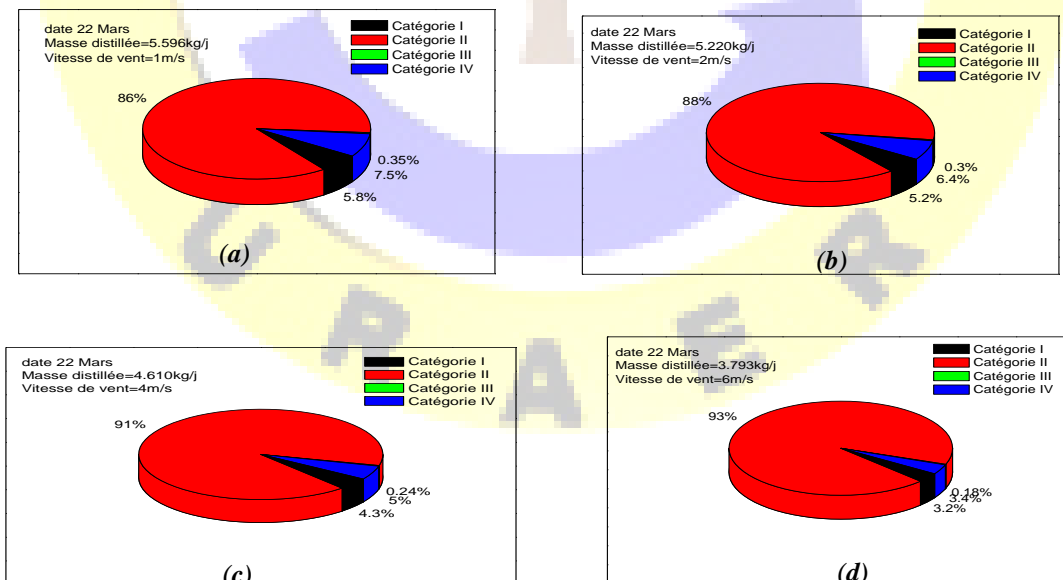


Fig. 7 Distribution de l'énergie perdue en fonction de la vitesse du vent



V. CONCLUSIONS

Un modèle numérique a été développé, pour le fonctionnement d'un distillateur solaire à film capillaire DIFICAP. L'applicabilité du modèle est démontrée pour l'ensemble des paramètres typiques correspondant au site d'Adrar. L'analyse des résultats obtenus lors de la simulation numérique sur l'effet des paramètres météorologiques et opératoires, nous permettent de conclure ce qui suit :

La production en eau distillée augmente avec la minimisation des pertes de chaleur par l'apport d'eau appointe et ça est assuré soit par la diminution de débit d'appointe ou bien par l'augmentation de sa température.

Les pertes thermique à travers l'isolant est négligeable, donc le choix de matériaux d'isolation se fait sur des considérations économiques plus que techniques.

REFERENCES

- [1] M. Capderou, *Atlas Solaire de l'Algérie, modèles théorique et Expérimentaux Tome I*, OPU, Algérie: 1988.
- [2] B. Bouchekima, B. Gros, R. Ouahes, and M. Diboun, "A Etude théorique et application pratique du distillateur solaire à film capillaire" *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 39, pp. 442–459, juillet. 2000.
- [3] X. Gang, W. Xihui, N. Mingjiang, W. Fei, Z. Weijun, L. Zhongyang and C. Kefa. "A review on solar stills for brine desalination" *Applied Energy*, vol. 103, pp. 642–652, Nov. 2013.
- [4] M. Abidi, S. Ben jabrallah, J.P. Corriou, "Optimization of the dynamic behavior of a solar distillation cell by Model predictive control" *Desalination.*, vol. 279, pp. 315–324, 2011.
- [5] M. Zerrouki, Y. Marif, M. Belhadj et N. Settou, "Simulation et expérimentation d'un distillateur solaire à film capillaire dans le sud Algérien" *Annales des Sciences et Technologie.*, vol. 4, pp. 46–57, Juin 2012.
- [6] DC. Reicosky, L.J. Winkelman, J.M. Baker, and DG. Baker, "Accuracy of hourly air temperatures calculated from daily minima and maxima" *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 46, pp. 193–209, 1989.
- [7] T. Mohamed, "Etude de comparaison et d'amélioration des différents distillateurs solaires pour produire d'eau potable dans les régions sahariennes sèches," *Mémoire de Magister.*, Université de Khasdi Merbah, Ouargla, Algérie, Nov 2004.
- [8] M. Zerrouki, N. Settou, Y. Marif, M. Belhadj et M. Benhamou, "L'Optimisation de débit d'alimentation d'un distillateur solaire à film capillaire," in *2 International Conference on Energy and Sustainable Development 19-20 February*, 2013.
- [9] B. Nassima, "Etude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire," *Mémoire de Magister.*, Université de Mentouri, Consantine, Algérie, 2005.
- [10] T.E Simos, A Runge-Kutta Fehlberg method with phase-lag of order infinity for initial-value problems with oscillating solution, *Computers Math. Applic.* vol.25 N°6, pp. 95-101, 1993