

ETUDE EXPERIMENTALE DU TRANSFERT DE CHALEUR AIR-EAU PAR CONTACT DIRECT DANS UNE COLONNE A GRILLES VERTICALES – APPLICATION AU REFROIDISSEMENT DE L’EAU

M. Lemouari ¹, M. Boumaza ²

¹ Département de génie des procédés, Faculté des sciences et des sciences de l’ingénieur, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algérie ; E-mail : messaoudl@yahoo.fr ; Tel/Fax : 034 21 57 04

² Laboratoire de génie climatique, Faculté des sciences de l’ingénieur, Université Mentouri, Constantine, Algérie

RESUME

Dans le présent travail, les performances thermiques d’une tour de refroidissement à contre courant air-eau ont été étudiées expérimentalement. Les expériences ont été faites dans une colonne à garnissage de 550 mm de haut, 206 mm de long et 148 mm de large. Le garnissage ‘A. G. V.’ utilisé est de 420 mm de haut et consiste en quatre (04) plaques en tôle galvanisée sous forme de zigzags, entre lesquelles sont disposées trois (03) grilles métalliques verticales en parallèle et distantes de 50 mm l’une de l’autre (largeur de la cellule). La section interne d’échange est $A = 0.15 \times 0.148$ m. On a étudié l’évolution de la caractéristique de la tour, KaV/L , et l’écart de refroidissement de l’eau en fonction des débits d’air et d’eau pour deux températures d’entrée de l’eau, 35°C et 50°C. Deux régimes de fonctionnement de la colonne à grilles verticales ont été observés: un premier régime appelé régime pelliculaire et un deuxième régime appelé régime de barbotage et dispersion. Ces deux régimes sont efficaces d’un point de vue transfert thermique. En effet, le deuxième régime semble plus efficace que le premier tout en permettant de refroidir de plus grands débits d’eau. La comparaison des résultats avec ceux trouvés dans la littérature pour d’autres systèmes de garnissages indique que la colonne à grilles verticales possède des performances supérieures et peut très bien être exploitée à l’échelle industrielle.

Mots clés: Colonne à grilles verticales, Tour de refroidissement, Transfert thermique, Contact direct air-eau, caractéristique de la tour.

NOMENCLATURE

a: Surface de contact air-eau [m^2/m^3]

A, B: Constantes de l’équation (2)

‘A. G. V.’: Appareil à grille verticale

C_{pe} : Chaleur spécifique de l’eau [$kJ/kg \text{ } ^\circ C$]

G : Débit masse d’air sec [kg/h]

G’ : Débit masse surfacique d’air sec [$kg/h.m^2$]

H : Enthalpie massique de l’air (indice 1: entrée; indice 2: sortie) [kJ/kg]

H_L : Enthalpie massique de l’air saturé à la température de l’eau [kJ/kg]

KaV/L : Caractéristique de la tour

L : Débit masse d’eau [kg/h]

L’ : Débit masse surfacique de l’eau [$kg/h.m^2$]

n: Constante dans l’équation (4)

T: Température de l’eau (indice 1: entrée; indice 2: sortie) [$^\circ C$]

t: Température de l’air (indice h: humide; indice s: sèche ; indice 1: sortie ; indice 2: entrée) [$^\circ C$]

V: Volume du corps d’échange (garnissage) [m^3]

α : Constante dans l’équation (4)

σ : Dispersion (%)

1. INTRODUCTION

Dans de nombreux procédés de fabrication, suite à des réactions chimiques ou des mouvements de pièces, la chaleur générée atteint des quantités importantes gênantes et parfois nuisibles aux installations et matériels industriels, le refroidissement de ces équipements doit donc être assuré en permanence afin de conserver la qualité et assurer le meilleur rendement possible des procédés [1]. Ainsi, depuis longtemps, le refroidissement est effectué en circuits ouverts, l’eau traversant les échangeurs de chaleur était réchauffée et directement rejetée dans le milieu naturel, entraînant une pollution thermique et un gaspillage très important en eau. En raison de ces inconvénients, on a développé les systèmes de refroidissement en circuits fermés (ou semi fermés), qui permettent d’économiser une grande quantité d’eau en circulation. Parmi ces systèmes, les colonnes à garnissage (tours de refroidissement) constituent la solution la plus adoptée jusqu’à l’heure actuelle. Ces appareils, puisqu’ils permettent un contact aussi intime que possible entre les phases en écoulement, assurent une capacité d’échange plus élevée par rapport aux échangeurs classiques où l’échange entre les phases s’effectue à travers une paroi conductrice. En effet, par le principe de contact direct à travers un garnissage, les performances thermiques d’un tel appareil se trouvent nettement améliorées du fait de la suppression de la paroi d’échange séparant les deux fluides [2]. C’est ainsi, que pour améliorer le transfert de chaleur et de masse entre fluides en

écoulement, plusieurs types de garnissages sont inventés depuis une cinquantaine d'années [3], et les travaux se sont poursuivis jusqu'à l'heure actuelle. Nous citons à titre d'exemple, le garnissage 'A. G. V.' destiné à des contacts gaz-liquide et qui a prouvé une bonne efficacité dans les opérations de transfert de masse [4, 5].

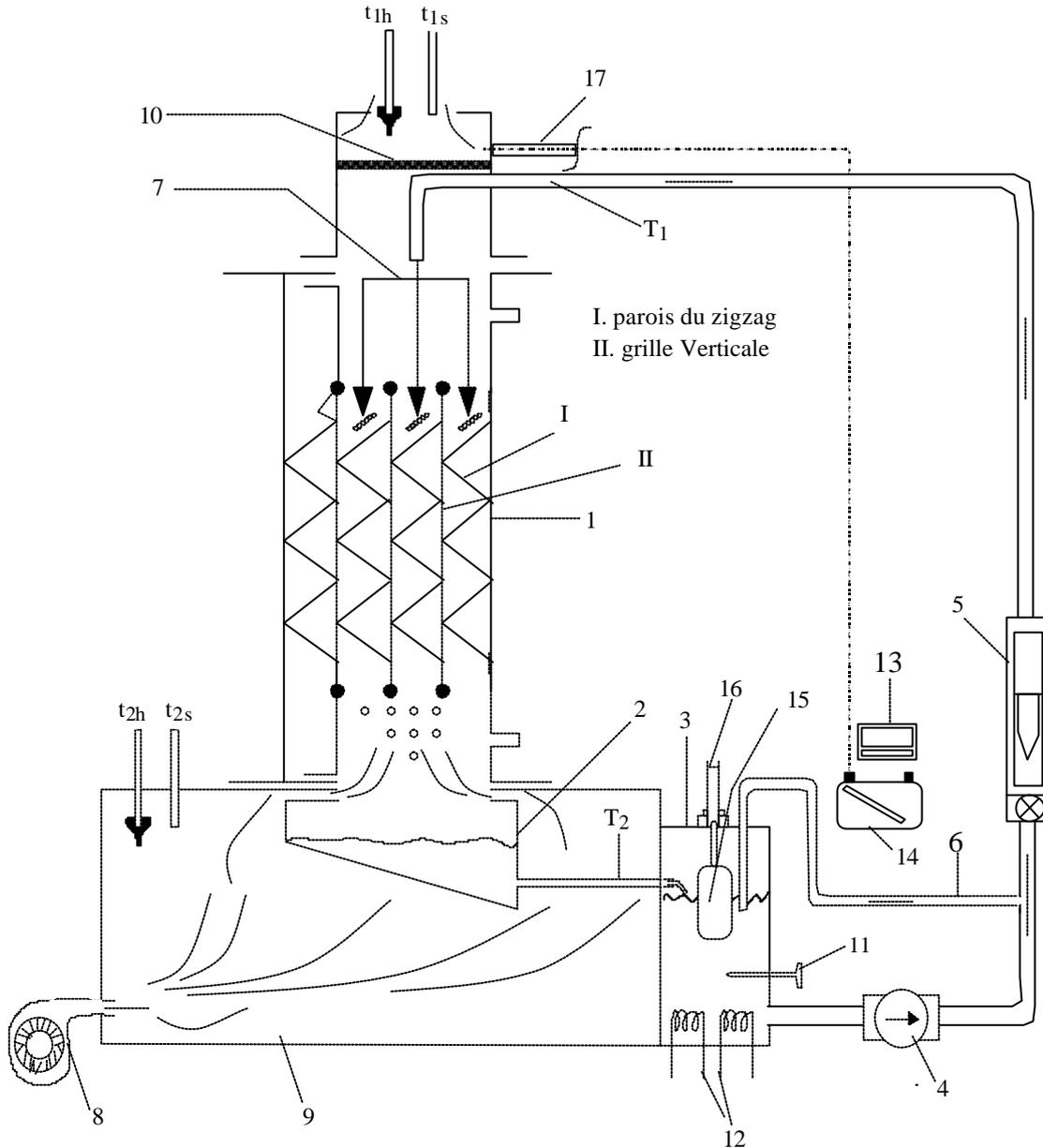
Jusqu'à ces dernières années, plusieurs chercheurs se sont préoccupés de l'analyse expérimentale des phénomènes de transferts de chaleur et de masse résultant des interactions air-eau dans les colonnes munies de différents types de garnissages. En effet, dès 1940, LONDON et al. [6] ont étudié le transfert de chaleur et de masse dans un écoulement diphasique air-eau. Ils ont utilisé une colonne ayant une section droite de 0.7068 m^2 sur une hauteur de 0.53 m, garnie par des plaques parallèles formant des étages espacés de 1.27 cm. Les auteurs ont présenté l'évolution du coefficient d'échange global en fonction du débit d'air et du débit d'eau. De son côté, LICHENSTEIN [7] a étudié le transfert de chaleur et de masse air-eau dans une tour de refroidissement ayant une section droite de $1.8 \times 1.8 \text{ m}^2$ sur une hauteur de 3.43 m garnie par des plaques en bois de dimensions $9.525 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm}$ en plusieurs blocs superposés espacés de 381 mm. L'auteur conclue que le coefficient d'échange global, K_a , est proportionnel à la puissance 0.4 du débit d'eau et à la puissance 0.5 du débit d'air. SIMPSON et SHERWOOD [8] ont étudié les performances d'une colonne de refroidissement à tirage forcé ayant une section droite de $1.057 \text{ m} \times 0.606 \text{ m}$, en utilisant un garnissage de 1.05 m de haut, constitué par des plaques en bois de dimensions $6.35 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm} \times 66.675 \text{ mm}$. L'eau à refroidir est introduite au sommet de la colonne à une température moyenne de 35°C . Les auteurs ont présenté l'évolution du coefficient d'échange global, K_a , en fonction du débit d'air et du débit d'eau mais n'ont pas proposé de corrélations. A leur tour, KELLY et SWENSON [9] se sont intéressés à l'étude des performances d'une tour de refroidissement de 15 m de haut et 3 m^2 de section droite, garnie par des plaques en bois de diverses géométries en plusieurs arrangements (garnissage de type splash). Ils présentent l'influence de la hauteur du garnissage sur la caractéristique de la tour. L'influence de la température d'entrée de l'eau ainsi que la température de bulbe humide de l'air de refroidissement sur la caractéristique de la tour a été également étudiée. Les auteurs ont corrélé la caractéristique de la tour en fonction du rapport des débits des fluides (eau/air). BARILE et al. [10] ont étudié les performances d'une colonne de refroidissement garnie par des particules sphériques creuses en polypropylène de diamètres, 19 et 38 mm respectivement. La colonne étant un tube cylindrique de 28.6 cm de diamètre intérieur et 162.6 cm de hauteur. L'eau à refroidir entre au sommet de la colonne à la température de 41°C et subit un refroidissement d'environ 12°C . Ils ont étudié l'effet de la hauteur du garnissage sur la caractéristique de la tour, mais n'ont pas proposé de corrélation à cet effet. Cependant, ils ont corrélé la caractéristique de la tour en fonction du rapport des débits des fluides (eau/air). Plus récemment, GOSHAYSHI et al. [11] ont étudié le transfert de chaleur et de masse air-eau dans une colonne de refroidissement garnie par des plaques en 'P. V. C.' de forme ondulée, à surfaces lisses et à surfaces contenant des éléments de rugosité. Les éléments du garnissage sont disposés en parallèle, verticalement en plusieurs arrangements, occupant une hauteur de 1.60 m et une section droite de $0.15 \times 0.15 \text{ m}$. L'eau chaude entre par le sommet de la colonne à la température de 37°C pour être refroidie de 10°C à travers le garnissage. Les auteurs ont corrélé le coefficient d'échange global en fonction du rapport de la perte de charge à la hauteur du garnissage. Par la suite, en utilisant la même installation expérimentale et sous les mêmes conditions de travail, GOSHAYSHI et MISSENDEN [12] se sont préoccupés de l'étude expérimentale des caractéristiques thermiques et hydrodynamiques du garnissage utilisé dans [11]. Pour les mêmes arrangements, ils ont étudié l'influence des débits des fluides (air-eau) sur le coefficient d'échange global ainsi que la perte de charge à travers le garnissage.

L'objectif principal de ce travail est de mettre en évidence, les performances thermiques d'un garnissage 'A. G. V.', lors du refroidissement de l'eau chaude tombant dans un courant d'air ascendant.

2. INSTALLATION EXPERIMENTALE ET PROCEDURE

L'installation expérimentale utilisée dans cette étude est présentée schématiquement dans la figure 1 [13]. Elle est constituée principalement d'une colonne de refroidissement (1) qui est le siège des phénomènes de transfert, un bassin d'eau froide (2) pour la récupération d'eau refroidie à la sortie de celle-ci, ce dernier déverse dans un réservoir d'alimentation (3) contenant deux résistances chauffantes (12) dont le rôle est de chauffer l'eau à refroidir à la température désirée et qui est maintenue à l'aide d'un thermostat (11) prévu à cet effet. L'eau ainsi chauffée est mise en circulation à partir du réservoir d'alimentation grâce à une pompe (4), son débit est mesuré à travers un débitmètre (5) placé à l'amont d'un by-pass (6). L'eau arrive ensuite au sommet de la colonne où elle sera distribuée uniformément sur le garnissage au moyen d'un distributeur (7) pour être récupéré en bas dans le bassin de récupération et le cycle recommence à nouveau. En bas de la colonne, est installé un ventilateur (8) permettant de délivrer le débit d'air. Cet air traverse la chambre de distribution (9) dans laquelle est placé le bassin de récupération, et entre ensuite en interactions avec l'eau coulant sur le corps d'échange, pour être dégagé vers l'atmosphère après passage sur un séparateur de gouttes (10) dont le rôle principal est de renvoyer vers le garnissage les gouttes d'eau entraînées par le courant d'air. Ainsi, d'autres organes annexes complètent l'installation, il s'agit du système de mesure de température (13) et celui de mesure de pression et du débit d'air (14) ainsi que le système de régulation du niveau d'eau (15) dans le réservoir d'alimentation. La colonne de

refroidissement est de forme parallélépipédique de dimensions 206 x 148 x 550 mm, construite à partir des plaques en Plexiglas soigneusement préparées. Elle est remplie par le garnissage 'A. G. V.' qui occupe une section droite de 150 x 148 mm, une hauteur de 420 mm et qui consiste en quatre plaques métalliques en tôle galvanisée, sous forme de zigzag disposées parallèlement, entre lesquelles, sont installées trois grilles verticales distantes de 50 mm l'une de l'autre [13].



- | | |
|---|--|
| 1. Colonne à grilles verticales | 10. Séparateur de gouttes d'eau |
| 2. Bassin d'eau froide | 11. Thermostat |
| 3. Réservoir d'alimentation en eau chaude | 12. Résistances chauffantes |
| 4. Pompe de circulation d'eau | 13. Système d'affichage des températures |
| 5. By-pass | 14. Manomètre différentiel |
| 6. Distributeur d'eau | 15. Régulateur du niveau d'eau |
| 7. Ventilateur | 16. Réserve en eau d'appoint |
| 8. Chambre de distribution d'air | 17. Orifice |

Fig. 1 Schéma général de l'installation expérimentale

Les mesures effectuées consistent en des relevés des températures (sèches et humides) d'entrée et de sortie de l'air et les températures d'entrée et de sortie de l'eau. Les instruments de mesures d'une installation existant [14] sont utilisés à cet effet. Le débit d'eau circulant sur le garnissage est mesuré à l'aide d'un débitmètre dont la gamme de variation est de 0 à 50 g/s. Le débit d'air de refroidissement est calculé à partir des mesures de pression prises au moyen d'un manomètre différentiel incliné ayant une plage de variation de 0 à 40 mm H₂O. La formule de calcul est donnée par le constructeur de l'installation [14]. Pour mesurer la température de l'air humide avant son entrée dans la colonne de refroidissement, deux thermocouples de type 'K' à affichage digital sont logés dans la chambre de distribution d'air, l'un indique la température humide de l'air, l'autre affiche la température sèche. A la sortie, sont aussi installés deux thermocouples de même type pour la prise des températures de l'air sortant de la colonne. Ainsi, les températures d'entrée et de sortie de l'eau, sont mesurées à l'aide de deux autres thermocouples installés respectivement, dans la conduite d'alimentation et la conduite par laquelle l'eau refroidie déverse dans le réservoir d'alimentation. La procédure expérimentale est la suivante: on met en circulation un débit d'eau, allumant en même temps les résistances chauffantes. Dès que la température de l'eau d'alimentation dépasse de quelques degrés la température désirée, on envoie un débit d'air en mettant en fonctionnement le ventilateur. Après quelques instants, la température de l'eau à refroidir décroît et repasse par sa valeur initiale (température de consigne) à laquelle correspond la prise, respectivement, des températures sèches et humides de l'air à l'entrée et à la sortie de la colonne et la température d'entrée et de sortie de l'eau.

3. CALCUL DES PERFORMANCES THERMIQUES DE LA TOUR DE REFROIDISSEMENT

Différents paramètres sont utilisés pour la présentation des performances des tours de refroidissement humides. Le premier est l'écart de refroidissement, qui est la différence entre la température d'entrée et de sortie de l'eau. Le deuxième paramètre, souvent utilisé en pratique est la caractéristique de la tour, KaV/L, définie par l'équation suivante [15]:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{C_{pe} dT}{H_L - H} \quad (1)$$

Les symboles sont définis dans la nomenclature. L'équation (1) est résolue numériquement pour évaluer la caractéristique de la tour pour différentes conditions expérimentales. Les équations suivantes sont utilisées pour l'intégration numérique:

$$H_L = A \exp(BT) \quad (2)$$

$$\text{avec : } A = 18.573, B = 0.0561 \text{ pour } 14^\circ\text{C} \leq T \leq 36^\circ\text{C}$$

$$A = 20.900, B = 0.0520 \text{ pour } 17^\circ\text{C} \leq T \leq 51^\circ\text{C}$$

$$H = H_1 + C_{pe} (L/G)(T_1 - T_2) \quad (3)$$

L'équation (2) est obtenue après avoir approximé la fonction enthalpie de l'air à saturation, H_L, en utilisant les valeurs tabulées dans la littérature [14, 16].

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Pendant l'interaction air-eau dans la colonne à grilles verticales deux régimes de fonctionnement ont été observés: a. Le régime (I), appelé 'régime pelliculaire', caractérisé par l'écoulement d'eau le long des fils verticaux des grilles, en formant des pellicules suivant des chemins de passage préférentiels qui recouvrent une fraction de surfaces des grilles verticales. Ce régime existe à faibles débits d'eau qui, sont insuffisants pour mouiller toute la surface de celles-ci ou de fermer tout les trous, ce qui offre une grande surface libre au passage du gaz.

b. Le régime (II), appelé 'régime de barbotage et dispersion', apparaît à forts débits d'eau. Le film d'eau se développe au fur et à mesure que son débit augmente, jusqu'à occuper la quasi-totalité des surfaces des grilles verticales et recouvrir les trous de celles-ci, ce qui constitue une grande résistance au passage d'air, conduisant ainsi à l'accumulation d'eau sous forme de couches stagnantes dans quelques cellules, notamment les cellules supérieures dans lesquelles prend naissance un barbotage suivi d'un fort brassage et dispersion contribuant à une distribution plus ou moins uniforme d'eau sur les surfaces des grilles verticales.

Les figures 2, 3, représentent la variation de la caractéristique de la tour, KaV/L, en fonction du rapport des débits d'eau et d'air, L/G, aux températures d'entrée de l'eau de 35°C et 50°C (en coordonnées log-log). La

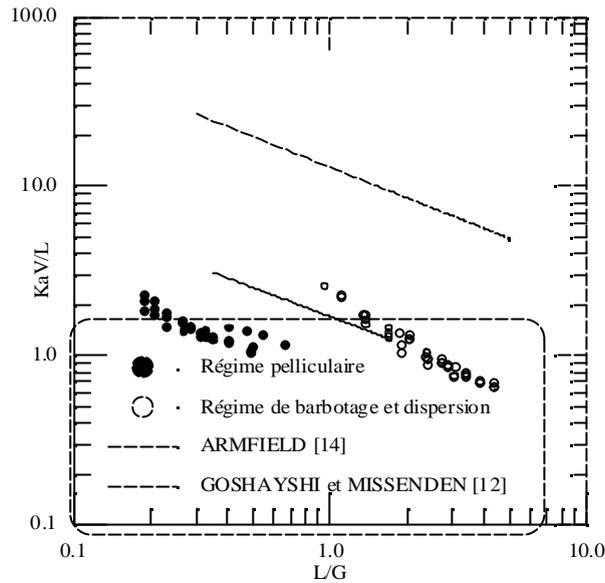


Fig. 2 Caractéristique de la tour en fonction du rapport des débits eau/air à une température d'entrée de l'eau de 35°C - résultats expérimentaux et corrélations de la littérature [12] et [14]

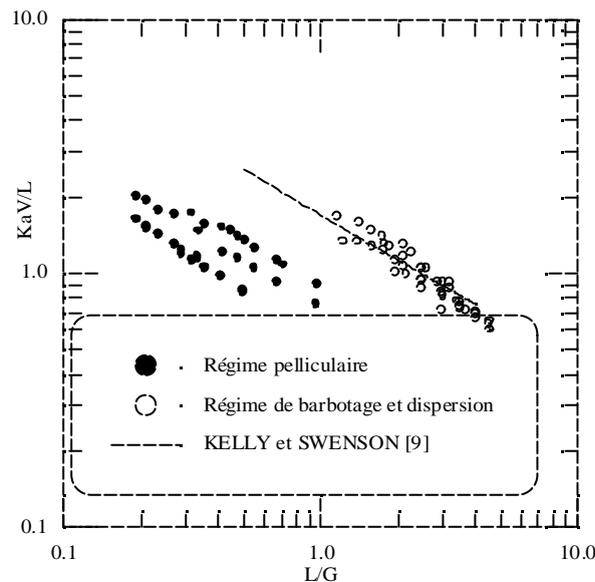


Fig. 3 Caractéristique de la tour en fonction du rapport des débits eau/air à une température d'entrée de l'eau de 50°C - résultats expérimentaux et corrélation de la littérature [9]

caractéristique de la tour, KaV/L , diminue avec l'augmentation du rapport des débits des fluides. Elle est plus élevée pour les valeurs les plus faibles de L/G , correspondant aux faibles débits d'eau, ce qui présente le meilleur refroidissement. Ainsi, on observe que l'effet du débit d'eau sur la caractéristique de la tour devient plus faible comparativement à celui d'air dès que le régime de barbotage et dispersion est atteint. Cet effet, contrairement à celui d'air, augmente avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau, ce que nous pouvons rapporter à l'énergie absorbée par la masse d'air et qui est fournie par l'eau. Cette énergie augmente en fonction du débit et de la température d'entrée de l'eau.

On présente sur les figures 4, 5, l'évolution de l'écart de refroidissement de l'eau, en fonction du débit d'air, G , pour plusieurs valeurs du débit d'eau, L , porté aux températures d'entrée de 35°C et 50°C respectivement. Pour chaque valeur du débit d'eau, l'écart de refroidissement augmente progressivement avec l'augmentation du débit

d'air. Il est plus prononcé en régime de barbotage et dispersion comparativement au régime pelliculaire, ce qui peut être expliqué principalement par l'augmentation de la surface de contact air-eau qui est plus importante en régime (II) qu'en régime (I). Ainsi, on constate, de façon générale, une diminution de l'écart de refroidissement avec l'augmentation du débit d'eau, L . L'écart le plus élevé est atteint aux débits d'eau les plus faibles correspondants aux rapports des débits, L/G , les plus faibles. Il devient ensuite relativement faible pour des débits plus élevés. Une telle évolution s'explique par l'augmentation de la température de l'eau à la sortie. Par ailleurs, l'écart de refroidissement augmente avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau. En effet, l'écart le plus élevé apparaît à 50°C alors qu'il est moins élevé à la température de 35°C . Cette augmentation peut être expliquée par l'énergie transférée, de l'eau à l'air, qui est plus intense à des températures de l'eau plus élevées qu'à des températures moins élevées.

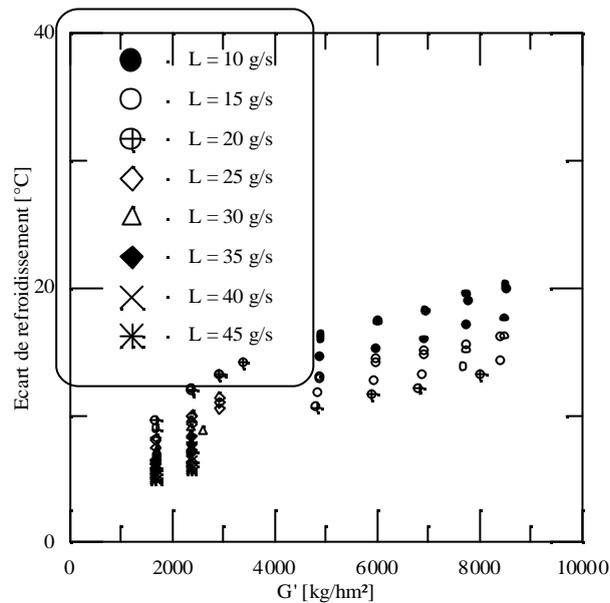


Fig. 4 Ecart de refroidissement en fonction du débit d'air pour plusieurs valeurs du débit d'eau à la température d'entrée de l'eau de 35°C

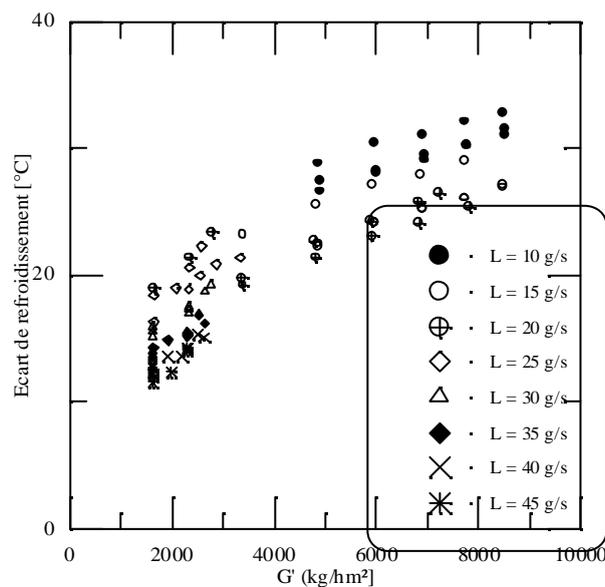


Fig. 5 Ecart de refroidissement en fonction du débit d'air pour plusieurs valeurs du débit d'eau à la température d'entrée de l'eau de 50°C

5. CORRELATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Comme il a été mentionné précédemment, la caractéristique de la tour, KaV/L , est influencée par le rapport des débits des fluides, L/G . Afin d'établir l'équation caractéristique de l'échange thermique à travers le garnissage 'A. G. V.', on a recherché une relation du type :

$$KaV/L = \alpha (L/G)^n \quad (4)$$

α , et n , sont des constantes déterminées expérimentalement. La méthode de régression linéaire appliquée aux résultats expérimentaux a donné les valeurs de α , et n , rassemblées dans le tableau 1, ainsi que la dispersion, σ .

Tableau 1 : Valeurs des constantes de la relation (4)

Température d'entrée de l'eau	Régime	α	n	σ (%)
35°C	pelliculaire	0.79	-0.51	14.00
	De barbotage et dispersion	2.22	-0.89	8.90
50°C	pelliculaire	0.84	-0.40	20.40
	De barbotage et dispersion	1.86	-0.71	9.10

6. COMPARAISON AVEC LES TRAVAUX DE LA LITTERATURE

Les résultats obtenus dans ce travail sont comparés avec ceux calculés en utilisant des corrélations établies par quelques auteurs pour d'autres types de garnissages. Ces corrélations sont les suivantes :

Corrélation donnée dans [14] :

$$KaV/L = 1.70 (L/G)^{-0.57} \quad (5)$$

Avec : $(L/G) = 0.35-2.5$

Corrélation de Goshayshi et Missenden [12] :

$$KaV/L = 12.96 (L/G)^{-0.60} \quad (6)$$

Avec: $(L/A) = L' = 0.45-2.22 \text{ kg}/(\text{s.m}^2)$ et $(G/A) = G' = 0.2-1.50 \text{ kg}/(\text{s.m}^2)$

Corrélation de Kelly et Swenson [9] :

$$KaV/L = 0.07 + 1.62 (L/G)^{-0.62} \quad (7)$$

Avec: $(L/G) = 0.6-3.5$

La figure 2 présente la comparaison entre la caractéristique de la tour, KaV/L , obtenue dans ce travail, pour une température d'entrée de l'eau de 35°C et celles calculées en utilisant la corrélation de GOSHAYSHI et MISSENDEN [12]. Les écarts peuvent être attribués d'une part à l'effet de la hauteur du garnissage (1.60 m) qui est équivalente approximativement à quatre fois la hauteur utilisée dans notre étude. D'autre part, le garnissage constitué de plaques ondulées en 'P. V. C.', présente une surface de contact plus importante. Par ailleurs, on note que l'écart de refroidissement de l'eau (10°C) obtenu par ces auteurs, est moins importante que celui obtenu à travers le garnissage 'A. G. V.' et qui peut atteindre 20°C. Sur la même figure (Fig. 2) on effectue aussi une comparaison entre nos résultats et une corrélation proposée pour le garnissage utilisé dans [14]. Ce garnissage est constitué par des blocs de plaques en 'P. V. C.' inclinées, disposées de façon alternée, formant des zigzags, sur une hauteur de 0.48 m dans une colonne ayant une section droite de 0.15 x 0.15 m. Si on tient compte du fait que la hauteur garnie utilisée pour notre étude (0.42 m) est inférieure à celle du système à plaques inclinées, et que le nombre de canaux formé pour une même section par les plaques inclinées (neufs canaux) est plus grand que celui du système 'A. G. V.' (trois canaux seulement), on peut dire que ce dernier présente de bonnes caractéristiques thermiques.

La figure 3 présente la comparaison entre la caractéristique de la tour, KaV/L , obtenue dans ce travail, pour une température d'entrée de l'eau de 50°C et celle calculée en utilisant la corrélation de KELLY et SWENSON [9] établie à une température d'entrée de l'eau de 49°C et une hauteur du garnissage (de type splash) de 6.1m. Si on tient compte du fait que cette hauteur (6.1 m) est plus grande (égale approximativement, 15 fois) que celle du garnissage 'A. G. V.' utilisé dans notre étude (0.42 m), on peut dire que le garnissage étudié au cours de ce travail, malgré sa hauteur plus faible comparativement à celle utilisée par les auteurs, présente de bonnes performances thermiques.

7. CONCLUSION

L'étude des performances thermiques d'une tour de refroidissement type 'A. G. V.' a été effectuée. Les résultats obtenus dans une gamme de variation du débit d'eau et du débit d'air, pour deux températures d'entrée de l'eau (35°C et 50°C) peuvent être résumés ci-dessous :

- Deux régimes de fonctionnement de la tour ont été observés : un régime pelliculaire existant à faibles débits d'eau et un régime de barbotage et dispersion existant à fort débits d'eau. Ces deux régimes sont relativement efficaces d'un point de vue transfert thermique.
- La caractéristique de la tour, KaV/L , diminue avec l'augmentation du rapport de débits des fluides, L/G . Cette diminution est plus prononcée pour des valeurs de, L/G , plus faibles. Ainsi, elle augmente avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau.
- L'écart de refroidissement augmente avec l'augmentation des débits des fluides. Il augmente aussi avec l'augmentation de la température d'entrée de l'eau.
- La tour de refroidissement dotée du garnissage 'A. G. V.', malgré sa hauteur plus faible, possède de bonnes performances thermiques comparativement à des systèmes dotés d'autres types de garnissages, et peut donc être exploitée à l'échelle industrielle.

REFERENCES

- [1] LEMOINE P., "Le refroidissement des eaux", techniques de l'Ingénieur, B 2480 (1986).
- [2] STRIGLE R. F., "Heat transfer" In "Packed tower design and applications: random and structured packings", 2nd ed., Gulf Publishing Company, pp.150-180 (1994)
- [3] COPIGNEAUX P., "Distillation-absorption: 4. colonnes garnies", techniques de l'Ingénieur, J 2626 (1980).
- [4] IGNATENKOV Y. I., "Etude et élaboration d'une méthode de calcul des paramètres optimums des appareils d'échange de matière à grilles verticales", Thèse de doctorat (en russe), Institut de LENS SOVET de technologie, Leningrad, (1979).
- [5] GRIGORIAN L. G., IGNATENKOV Y. I., CHEVELEV Y. V., "Appareils de rectification et d'absorption à grilles de contact verticales" (en russe), Institut central de l'information scientifique, Moscou, (1988).
- [6] LONDON A. M., MASON W. E., BOELTER L. M. K., "Performance characteristics of a mechanically induced draft, counterflow, packed cooling tower", Trans. A. S. M. E., 62 (1940), pp.41-50
- [7] LICHTENSTEIN J., "Performance and selection of mechanical-draft cooling towers", Trans. A. S. M. E., 65 (1943), pp.779-787
- [8] SIMPSON W. M., and SHERWOOD T. K., "Performance of small mechanical draft cooling towers", Am. Soc. Refrig. Eng., 52 (1946), pp.535-543 and 574-576
- [9] KELLY N. W. and SWENSON L. K., "Comparative performance of cooling tower packing arrangements", Chem. Engng. Prog., 52 (1956), pp.263-268
- [10] BARILE R. G., DENGLER J. L., HERTWIG T. A., "Performance and design of a turbulent bed cooling tower", AIChE Symp. Ser., 70 (1974), pp.154-162
- [11] GOSHAYSHI H. R., MISSENDEN J. F., TOZER R., "Cooling tower - an energy conservation resource", Appl. therm. Engng., 19 (1999), pp.1223-1235
- [12] GOSHAYSHI H. R. and MISSENDEN J. F., "The investigation of cooling tower packings in various arrangements", Appl. therm. Engng., 20 (2000), pp.69-80
- [13] LEMOUARI M., "Etude expérimentale du transfert de chaleur air-eau par contact direct dans une colonne à grilles verticales – application au refroidissement de l'eau", Thèse de magister, Université de Bejaia, Département de génie des procédés, Algérie, (2001).
- [14] "Instruction manual: Basic water cooling tower", Engineering Teaching and Research Equipment, ARMPFIELD, England, (1993).
- [15] PERRY R. H., GREEN D. W., MALONEY J. O., "Chemical Engineers Hand Book", 6th ed., McGraw-Hill, sec. 12, pp.13-24, (1987).
- [16] TREYBAL R. E., "Mass-Transfer operations", 3rd ed., McGraw-Hill, (1980).