

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de Technologie

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Mécanique

Présentée et soutenue publiquement

Le : 09 Février 2020

BENSAHAL DJAMEL

THEME

Etude, réalisation d'un capteur solaire à air et détermination des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire du capteur dans le site de Laghouat

JURY :

Mr Aouissi Mokhtar	Professeur	Université de Laghouat	Président du jury
Mr Brima Abdelhafid	Professeur	Université de Batna	Examineur
Mr Gueribiz Djalloul	Professeur	Université de Laghouat	Examineur
Mr Chabane Foued	MCA	Université de Biskra	Examineur
Mr Teggat Mohamed	MCA	Université de Laghouat	Examineur
Mr Yousfi Ahmed	Professeur	Université de Laghouat	Directeur de thèse

Dédicaces

À mes chers parents, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être ;

À mes chers et adorables frères et sœurs ;

À mon épouse et à mes chers enfants : Bensahal Fatma Ezzahra et Bensahal Mohamed ;

À mes chers amis et collègues du département de génie - mécanique, Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Bensahal Djamel



Remerciements

Je veux remercier tout d'abord mon Dieu Allah tout puissant ;

Puis je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, monsieur le **Professeur : Yousfi Ahmed**, pour avoir accepté la direction de cette thèse, pour m'avoir guidé, conseillé, et surtout pour sa confiance totale en moi et sa patience tout au cours de ce travail ;

Mes très sincères remerciements vont également à monsieur le **Professeur : Aouissi Mokhtar**, de l'Université de Laghouat, pour le grand honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance ;

Je tiens à remercier également monsieur le **Professeur : Brima Abdelhafid**, de l'Université de Batna, d'avoir accepté d'examiner ce travail de recherche ;

J'exprime également ma gratitude à monsieur le **Professeur : Gueribiz Djalloul**, de l'Université de Laghouat, pour avoir bien voulu prendre part à mon jury ;

J'adresse mes vives remerciements à monsieur le **Professeur : Chabane Foued**, de l'Université de Biskra, d'avoir accepté d'examiner ce travail de recherche ;

Mes remerciements vont également à monsieur le **Professeur : Teggat Mohamed**, de l'Université de Laghouat, pour avoir bien voulu prendre part à mon jury ;

Enfin, je voudrais remercier tout particulièrement ma femme et mes enfants qui m'en soutenu tout au long de la réalisation de ce travail.

Bensahal Djamel
*Enseignant au département de génie-mécanique
Université de Laghouat*

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	x
Nomenclature	xi
Résumé	xiv
Introduction générale.....	xvii
Chapitre 01 : Systèmes de conversion thermique de l'énergie solaire	01
1.1. Introduction sur les capteurs solaires.....	01
1.2. Caractéristiques des capteurs solaires	01
1.2.1. Capteurs stationnaires	01
1.2.2. Capteurs dotés d'un mouvement autour d'un seul axe	02
1.2.3. Capteurs dotés d'un mouvement autour de deux axes	03
1.3. Différents types de conversions.....	04
1.4. Capteurs solaires plans	05
1.4.1. Capteurs solaires à eau	05
1.4.2. Capteurs solaires à air	05
1.5. Capteurs à tubes sous vide	06
1.6. Les capteurs à concentration	08
1.6.1. Avantages et inconvénients	08
1.6.2. Classification des capteurs à concentration	08
1.6.2.1. Le capteur entièrement mobile	09
1.6.2.2. Capteurs à chaudière fixe et concentrateur mobile	10
1.6.2.3. Capteur à concentration fixe et chaudière mobile	10
1.6.2.4. Capteur à renforcement du rayonnement	11
1.7. Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire	11
1.7.1. Les paramètres internes	11
1.7.1.1. La vitre	11
1.7.1.2. L'absorbeur	12
1.7.1.3. La circulation du fluide caloporteur	13
1.7.1.4. L'isolation	13
1.7.1.5. L'orientation et l'inclinaison du capteur	13
1.7.2. Paramètres externes	14
1.7.2.1. Rayonnement solaire	14
1.7.2.2. Température ambiante de l'air	14
1.7.2.3. Vitesse du vent	14
1.8. Propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan	14
1.8.1. Propriétés physiques de quelques matériaux	14
1.8.2. Les propriétés optiques de quelques surfaces sélectives	15
1.8.3. Emissivité de quelques matériaux	15
1.9. Conclusions	15
Références	16

Chapitre 02 : Paramètres de conversion thermique des capteurs solaires plans à air	18
2.1. Introduction	18
2.2. Energie solaire active et passive	18
2.2.1. Propriétés des systèmes actifs	18
2.2.2. Propriétés des systèmes passifs	19
2.3. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques	19
2.3.1. Transfert convectif	20
2.3.2. Transfert radiatif	24
2.3.3. Coefficients des pertes avant, arrière et globale	27
2.3.4. Mise en équation de l'équilibre thermique d'un capteur solaire plan à air ..	29
2.4. Rendement thermique (%)	30
2.5. Conclusions	31
Références	31

Chapitre 03 : Contribution à la modélisation des paramètres de la conversion thermique par rayonnement solaire	33
3.1. Introduction	33
3.2. Modélisation de la température de l'air instantanée	33
3.2.1. Collecte de données et méthodes	35
3.2.1. 1. Modèle de Wave	35
3.2.1. 2. Modèle d'Idliman	36
3.2.1. 3. Modèle de Double Cosinus (DC)	36
3.2.2. Nouveau modèle proposé	37
3.3. Modélisation de la température de l'air journalière	38
3.3.1. Collecte de données et méthodes	39
3.3.2. Nouveau modèle proposé	40
3.4. Conclusions	41
Références	41

Chapitre 04 : Etude expérimentale	45
4.1. Introduction	45
4.2. Conception proposée	45
4.2.1. Support métallique avec un mécanisme de réglage d'angle	46
4.2.2. Capteur solaire	48
4.2.3. Collecteur	49
4.2.4. Caisson en bois	50
4.2.5. Dispositif expérimental	50
4.3. Distribution des thermocouples sur la plaque d'absorbeur et la plaque inférieure	51
4.4. Les étapes principales de fabrication du capteur solaire	53
4.5. Analyse statique du panneau solaire	57
4.5.1. Contraintes de Von Mises pour différents forces et angles d'inclinaison ...	57
4.5.2. Déplacements pour différents forces et angles d'inclinaison	59
4.6. Matériels et méthodes	61
4.6.1. Description du dispositif expérimental	61
4.6.2. Instrumentation et appareillage	62
4.6.3. Conditions d'expérimentation	64
4.6.3.1. Variation des débits	65
4.6.3.2. Variation de la distance entre l'absorbeur et la vitre	65

4.6.3.3. Variation des angles d'inclinaison	65
4.6.3.4. Variation des angles d'azimut	66
4.6.3.5. Simple et double vitrage	67
4.7. Conclusions	67
Chapitre 05 : Résultats et discussion	68
5.1. Introduction	68
5.2. Evolution expérimentale et simulée de la température ambiante de l'air	68
5.2.1. Méthodes d'analyse des erreurs	69
5.2.1.1. L'erreur moyenne (MBE)	69
5.2.1.2. L'erreur moyenne absolue (MAE)	69
5.2.1.3. L'erreur quadratique moyenne (RMSE)	69
5.2.1.4. Le coefficient de détermination (R^2)	69
5.2.1.5. L'erreur moyenne de pourcentage (MPE)	69
5.2.2. Détermination instantanée de la température ambiante de l'air	70
5.2.2.1. Évaluation du modèle pour des jours choisis au hasard	70
5.2.2.2. Évaluation du modèle pour la moyenne mensuelle de la température instantanée de l'air	74
5.2.2.3. Évaluation du modèle pour les différentes saisons	78
5.2.2.4. Valeurs statistiques moyennes présentant les données de températures horaires estimées et observées pour les quatre modèles au cours de la période (janvier 2015-mars 2016)	81
5.2.3. Détermination journalière de la température ambiante de l'air	82
5.2.3.1. Evaluation du modèle pour des mois choisis au hasard pour la ville de Laghouat, Algérie	82
5.2.3.2. Évaluation du modèle sur des mois choisis au hasard pour les différents emplacements	89
5.3. Evolution des performances d'un capteur solaire à air sans chicanes	91
5.3.1. Angle d'inclinaison du capteur solaire	91
5.3.2. Angle d'azimut	98
5.3.3. Débit de l'air	106
5.3.4. Hauteur entre le Plexiglas et l'absorbeur	110
5.3.5. Double vitrage	116
5.4. Conclusions	121
Références	121
Conclusion générale	122
Annexes	126
Annexe A : Dessins de définition et d'ensemble	126
Annexe B : Propriétés physiques de quelques matériaux	139
Annexe C : Travaux réalisés dans le cadre de cette thèse	141

Liste des figures

Figure 1.1 :	Types de capteurs solaires stationnaires: (a) plans, (b) sous vide et (c) réflecteurs paraboliques composés [3]	02
Figure 1.2 :	Les réflecteurs : (a) de Fresnel, (b) cylindro-paraboliques [3] ...	03
Figure 1.3 :	Les réflecteurs : (a) paraboliques, (b) Centrale à tour [3]	04
Figure 1.4 :	Les constituants principaux du capteur solaire à eau [3]	05
Figure 1.5 :	Différents mécanismes de transfert thermique dans les capteurs solaires plans [6]	06
Figure 1.6 :	Vue en coupe du capteur sous vide [1]	07
Figure 1.7 :	Concentrateur entièrement mobile [3]	09
Figure 1.8 :	Capteur à chaudière fixe et concentrateur mobile [3]	10
Figure 1.9 :	Capteur à renforcement du rayonnement [3]	11
Figure 1.10 :	Différentes formes des ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur [18]	12
Figure 1.11:	Les milieux poreux dans le deuxième canal d'un capteur à double passes [21]	13
Figure 2.1 :	Schéma d'échanges thermiques pour un capteur solaire plan à air [3]	20
Figure 4.1 :	Capteur solaire plan à air	46
Figure 4.2 :	Support métallique avec un mécanisme de réglage d'angle	46
Figure 4.3 :	Coupe du support métallique montrant les différents constituants	47
Figure 4.4 :	Partie supérieure du capteur solaire : (a) entrée d'air, (b) sortie d'air et (c) Coupe longitudinale montrant les différents constituants	48
Figure 4.5 :	Collecteur d'entrée ou sortie d'air	49
Figure 4.6 :	Caisson en bois pour les afficheurs des sondes	50
Figure 4.7 :	Collecteur solaire à air : (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, (c) extracteur d'air, (d) boîtier des afficheurs des températures..	51
Figure 4.8:	Distribution des thermocouples sur: (a) l'absorbeur, (b) la plaque inférieure	52
Figure 4.9 :	Les différentes étapes de fabrication du panneau solaire allant de l'étape 1 jusqu'à l'étape 17	56
Figure 4.10 :	Les trois angles d'inclinaisons prises pour l'étude statique du capteur : (a) 0 deg , (b) 45 deg, (c) 90 deg	57
Figure 4.11 :	Présentation du contrainte de Von Mises (N/m ²) pour une force F=1000N et angle égale à :(a) 0 deg, (b) 45 deg et (c) 90 deg.	59
Figure 4.12:	Présentation du déplacement (mm) pour une force F=1000N et angle égale à :(a) 0 deg, (b) 45 deg et (c) 90 deg	61
Figure 4.13 :	Instrumentation et appareillage:(a) Solarimètre, (b) L'anémomètre à ailettes, (c) Thermomètre digital, (d) Thermomètre infrarouge, (e) Rapporteur d'angle et (f) Variateur de tension	63
Figure 5.1 :	Températures horaires estimées par les quatre modèles en fonction du temps par rapport aux données observées pour la journée: 05-01-2015	70

Figure 5.2 :	Comparaison des écarts entre les températures de l'air observées et estimées en fonction du temps pour les quatre modèles étudiés pour la journée: 05-01-2015	71
Figure 5.3 :	Températures horaires estimées par les quatre modèles en fonction du temps par rapport aux données observées pour la journée: 10-04-2015	71
Figure 5.4 :	Comparaison des écarts entre les températures de l'air observées et estimées en fonction du temps pour les quatre modèles étudiés pour la journée: 10-04-2015	72
Figure 5.5 :	Températures horaires estimées par les quatre modèles en fonction du temps par rapport aux données observées pour la journée: 15-07-2015	72
Figure 5.6 :	Comparaison des écarts entre les températures de l'air observées et estimées en fonction du temps pour les quatre modèles étudiés pour la journée: 15-07-2015	73
Figure 5.7 :	Températures horaires estimées par les quatre modèles en fonction du temps par rapport aux données observées pour la journée: 19-03-2016	73
Figure 5.8 :	Comparaison des écarts entre les températures de l'air observées et estimées en fonction du temps pour les quatre modèles étudiés pour la journée: 19-03-2016	74
Figure 5.9 :	Valeurs statistiques de l'erreur de biais moyenne (MBE) pour la température de l'air estimée pour les quatre modèles	79
Figure 5.10 :	Valeurs statistiques de l'erreur absolue moyenne (MAE) pour la température de l'air estimée pour les quatre modèles	79
Figure 5.11 :	Valeurs statistiques de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour la température de l'air estimée pour les quatre modèles.	80
Figure 5.12 :	Valeurs statistiques du coefficient de détermination (R^2) pour la température de l'air estimée pour les quatre modèles	80
Figure 5.13 :	Valeurs statistiques de l'erreur moyenne en pourcentage (MPE) pour la température de l'air estimée pour les quatre modèles.	81
Figure 5.14 :	Comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour un mois choisi au hasard Avril 2004 à Laghouat	83
Figure 5.15 :	Comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour un mois choisi au hasard Juin 2004 à Laghouat	83
Figure 5.16 :	Différences journalières entre les températures de l'air observées et estimées pour avril 2004 et juin 2004 à Laghouat..	84
Figure 5.17 :	Comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour un mois choisi au hasard Novembre 2004 à Laghouat	84
Figure 5.18 :	Comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour un mois choisi au hasard Janvier 2005 à Laghouat	85
Figure 5.19 :	Différences journalières entre les températures de l'air observées et estimées pour novembre 2004 et janvier 2005 à Laghouat	85
Figure 5.20 :	Les valeurs statistiques de l'erreur de biais moyen (MBE) pour la comparaison entre les données quotidiennes de température	86

	de l'air observées et estimées pendant la période de mars 2004 à février 2005 pour le site de Laghouat, Algérie	
Figure 5.21 :	Comparaison des valeurs statistiques de l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les données quotidiennes de température de l'air observées et estimées pendant la période de mars 2004 à février 2005 à Laghouat	87
Figure 5.22 :	Les valeurs statistiques d'erreur moyenne en pourcentage (MPE) pour la comparaison entre les données quotidiennes et estimées de température de l'air pendant la période de mars 2004 à février 2005 à Laghouat	87
Figure 5.23 :	Les valeurs statistiques de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour la comparaison des données quotidiennes et estimées de la température de l'air pendant la période de mars 2004 à février 2005 à Laghouat	88
Figure 5.24 :	Les valeurs statistiques du coefficient de détermination (R^2) pour la comparaison entre les données quotidiennes de température de l'air observées et estimées pendant la période de mars 2004 à février 2005 à Laghouat	88
Figure 5.25 :	Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 40° b) 50° à 90°	92
Figure 5.26 :	Variation de l'écart entre la température de vitre et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 40° b) 50° à 90°	93
Figure 5.27 :	Variation de l'écart entre la température d'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 40° b) 50° à 90°	94
Figure 5.28 :	Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 40°, b) 50° à 90°	95
Figure 5.29 :	Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 40° b) 50° à 90° ..	96
Figure 5.30 :	Variation du rendement thermique à 13h30 en fonction d'angle d'azimut variant de 0° à 90°	97
Figure 5.31 :	Evolution de la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50°	98
Figure 5.32 :	Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50°	99
Figure 5.33 :	Variation de l'écart entre la température de vitre et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50°	100
Figure 5.34 :	Variation de l'écart entre la température d'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50°	101
Figure 5.35 :	Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50°	102
Figure 5.36 :	Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour	104

	différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50°	
Figure 5.37 :	Variation du rendement thermique à 13h30 en fonction d'angle d'azimut variant de -50° à 50°	104
Figure 5.38 :	Evolution de la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50°	105
Figure 5.39 :	Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour différents débits	106
Figure 5.40 :	Variation de l'écart entre la température de la vitre et la température ambiante en fonction du temps pour différents débits	107
Figure 5.41 :	Variation de l'écart entre la température de l'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour différents débits	107
Figure 5.42 :	Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour différents débits	108
Figure 5.43 :	Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps pour les cinq différents débits	109
Figure 5.44 :	Influence du débit d'air sur le rendement thermique du panneau solaire en fonction du temps pour les cinq différents débits	109
Figure 5.45 :	Evolution de la température ambiante en fonction du temps pour les cinq différents débits	110
Figure 5.46 :	Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour différentes hauteurs	111
Figure 5.47 :	(a)Variation de l'écart entre la température de la vitre et la température ambiante en fonction du temps pour différentes hauteurs, (b) cisaillement de la vitre	112
Figure 5.48 :	Variation de l'écart entre la température de l'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour différentes hauteurs	113
Figure 5.49 :	Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour différentes hauteurs.	113
Figure 5.50 :	Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps pour les trois différentes hauteurs	114
Figure 5.51 :	Influence de la hauteur sur le rendement thermique du panneau solaire en fonction du temps	115
Figure 5.52 :	Evolution de la température ambiante en fonction du temps pour les trois hauteurs étudiées	115
Figure 5.53 :	Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour simple et double vitrage	116
Figure 5.54 :	Variation de l'écart entre la température de la vitre et la température ambiante en fonction du temps pour simple et double vitrage	117
Figure 5.55 :	Variation de l'écart entre la température de l'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour simple et	118

	double vitrage	
Figure 5.56 :	Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour simple et double vitrage	118
Figure 5.57 :	Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps pour simple et double vitrage	119
Figure 5.58 :	Influence du double vitrage sur le rendement thermique du panneau solaire en fonction du temps	120
Figure 5.59 :	Evolution de la température ambiante pour les cas étudiés simple et double vitrage en fonction du temps	120

Liste des tableaux

Tableau 1.1 :	Propriétés optiques de quelques surfaces sélectives [30]	15
Tableau 1.2 :	Emissivité de quelques matériaux [30]	15
Tableau 3.1 :	Données géographiques des cinq emplacements choisis	39
Tableau 4.1 :	Les éléments constitutifs du support métallique	47
Tableau 4.2 :	Les éléments constitutifs de la partie supérieure du capteur solaire	49
Tableau 4.3 :	Résultats des contraintes de Von Mises (N/m ²) pour différentes forces et angles d'inclinaison	58
Tableau 4.4 :	Résultats des déplacements (mm) pour différentes forces et angles d'inclinaison	60
Tableau 4.5 :	Caractéristiques techniques des appareils de mesure	64
Tableau 4.6 :	Les conditions d'expérimentation pour différents débits	65
Tableau 4.7 :	Les conditions d'expérimentation pour les différentes distances étudiées	65
Tableau 4.8 :	Les conditions d'expérimentation pour différents angles d'inclinaisons	66
Tableau 4.9 :	Les conditions d'expérimentation pour différents angles d'azimut	66
Tableau 4.10 :	Les conditions d'expérimentation pour un simple vitrage	67
Tableau 4.11 :	Les conditions d'expérimentation pour un double vitrage	67
Tableau 5.1 :	Analyse des erreurs pour la température mensuelle moyenne de l'air pour le modèle MAT	75
Tableau 5.2 :	Analyse des erreurs pour la température mensuelle moyenne de l'air pour le modèle Idliman	76
Tableau 5.3 :	Analyse des erreurs pour la température mensuelle moyenne de l'air pour le modèle Double cosinus	77
Tableau 5.4 :	Analyse des erreurs pour la température mensuelle moyenne de l'air pour le modèle Wave	78
Tableau 5.5 :	Valeurs moyennes des statistiques entre les données de températures horaires estimées et observées pour les quatre modèles au cours de la période (janvier 2015-mars 2016)	81
Tableau 5.6 :	Différence entre la température quotidienne moyenne maximale et minimale de l'air pour différents mois pour la ville de Laghouat, Algérie pour la période étudiée	89
Tableau 5.7 :	Paramètres statistiques MBE, MAE, RMSE, MPE et R ² avec la différence entre la température quotidienne moyenne de l'air maximale et minimale pour les quatre emplacements pour les mois choisis au hasard à partir de l'année 2004	90
Tableau 5.8 :	Les paramètres statistiques moyens MBE, MAE, RMSE, MPE et R ² par lieu pendant la période d'étude	91

Nomenclature

<i>A_c</i>	Surface de captation du capteur solaire (m ²)
<i>A_f</i>	Section de passage du fluide dans le capteur (m ²)
<i>A_T</i> (y, m, d)	Amplitude thermique journalière (°C)
<i>a</i>	Hauteur de la chicane (m)
<i>b</i>	Distance entre les deux extrémités de chicane (m)
<i>c</i>	Épaisseur de la plaque dont sont façonnées les chicanes (m)
<i>C_p</i>	Capacité calorifique (J/kg.°C)
<i>C_{pf}</i>	Capacité calorifique du fluide à pression constante (J/kg.K)
<i>D_H</i>	Diamètre hydraulique ou dimension caractéristique de l'écoulement (m)
DC	Modèle du Double Cosinus
<i>e</i>	Épaisseur de la couche d'air en circulation autour de l'absorbeur (m)
<i>e_{pl}</i>	Épaisseur de la plaque métallique (m)
<i>e_{pol}</i>	Épaisseur de la plaque du polystyrène (m)
<i>e_b</i>	Épaisseur de la plaque en bois installée à l'arrière (m)
<i>F_{1.2}</i>	Facteur de forme relatif aux surfaces dans leur position
<i>Gz</i>	Nombre de Graetz
<i>h_c</i>	Coefficient de transfert convectif (W/m ² .K)
<i>h_{cp_f}</i>	Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide (W/m ² .K)
<i>h_{cpl_f}</i>	Coefficient de transfert convectif entre la plaque métallique et le fluide (W/m ² .K)
<i>h_{c_v}</i>	Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'environnement (W/m ² .K)
<i>h_{c_nat}</i>	Coefficient de transfert dû à la convection naturelle de la lame d'air (W/m ² .K)
<i>h_d</i>	Coefficient de transfert par conduction de l'isolation arrière (W/m.K)
<i>h_{rp_pl}</i>	Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque métallique (W/m ² .K)
<i>h_{rp_v}</i>	Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre (W/m ² .K)
<i>h_{rv_c}</i>	Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et le ciel (W/m ² .K)
<i>h_{rv_s}</i>	Coefficient de transfert radiatif entre le sol et la vitre (W/m ² .K)
<i>h_{ris_s}</i>	Coefficient de transfert radiatif entre la plaque isolante (externe) et le sol (W/m ² .K)
<i>I₀</i>	Constante solaire ($I_0 = 1367 \text{ W / m}^2$)
<i>I</i>	Rayonnement solaire global incident sur une surface horizontale (W / m ²)
<i>I_m</i>	Rayonnement solaire global moyen incident sur une surface horizontale (W / m ²)
<i>J</i>	Facteur de Colburn
<i>k_f</i>	Coefficient de conductivité thermique du fluide (W/m.K)
<i>k_{pl}</i>	Conductivité thermique de la plaque métallique (W/m.K)
<i>k_{pol}</i>	Conductivité thermique de la plaque du polystyrène (W/m.K)
<i>k_b</i>	Conductivité thermique de la plaque en bois (W/m.k)
<i>L</i>	Longueur du capteur plan à air (m)
<i>l</i>	Largeur du capteur plan à air (m)
Lat	Latitude (°)

Long	Longitude (°)
MBE	Erreur de biais moyen (°C)
MAE	Erreur absolue moyenne (°C)
MAT	Modèle proposé pour le calcul de la température de l'air instantané
MPE	Erreur moyenne en pourcentage (%)
\dot{m}	Débit massique du fluide caloporteur (kg/s)
N_c	Nombre de vitrage
N	Nombre de mesures ou d'observations
Nu	Nombre de Nusselt
P	Périmètre de la section de passage du fluide caloporteur (m)
P_o	Pression atmosphérique ($P_o = 101.235$ kPa)
P_{at}	Pression atmosphérique à l'endroit étudié (kPa)
P_m	Pression atmosphérique moyenne à l'endroit étudié (kPa)
Pr	Nombre de Prandtl
Q_U	Puissance utile extraite de l'insolateur (W)
T_{max}	Température maximale (°C) ou (K)
T_{min}	Température minimale (°C) ou (K)
T(H)	Température à une heure donnée (°C) ou (K)
T_{ab}	Température de l'air ambiant (°C) ou (K)
T_c	Température équivalente du ciel (°C) ou (K)
T_f	Température du fluide caloporteur (°C) ou (K)
T_{in}	Température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur (°C) ou (K)
T_{out}	Température du fluide caloporteur à sa sortie du capteur (°C) ou (K)
T_{pl}	Température de la plaque métallique isolante (°C) ou (K)
T_p	Température de l'absorbeur (°C) ou (K)
T_{is}	Température de la plaque arrière isolante (K) (°C) ou (K)
T_{pm}	Température moyenne de l'absorbeur (°C) ou (K)
T_s	Température du sol (°C) ou (K)
T_v	Température de la vitre (°C) ou (K)
T (y, m, d)	Température moyenne journalière de l'air (°C) ou (K)
t_{Tmin}	Heure à laquelle se produit la température minimale horaire (heure)
t_{Tmax}	Heure où la température maximale horaire se produit (heure)
t	Heure du jour (heure)
T_{air}	Température de l'air (°C) ou (K)
T_{min}	Température minimale de l'air (°C) ou (K)
T_{max}	Température maximale de l'air (°C) ou (K)
$T_{air, m}$	Température moyenne ou quotidienne de l'air (°C) ou (K)
tsl	Temps solaire local (heure)
R^2	Coefficient de détermination
Re	Nombre de Reynolds
RH	Humidité relative (%)
RH_m	Humidité relative moyenne (%)
RISE	Lever du soleil (heure)
RMSE	Erreur quadratique moyenne (°C) ou (K)
S	Section de passage du fluide caloporteur (m ²)
S_1, S_2	Surfaces des plaques (m ²)
U_{av}	Coefficient des pertes thermique à l'avant de l'absorbeur (W/m ² .K)
U_{ar}	Coefficient des pertes thermique à l'arrière de l'absorbeur (W/m ² .K)
U_L	Coefficient des pertes thermiques globales entre le capteur et l'environnement (W/m ² .K)

V_f	Vitesse du fluide caloporteur à l'intérieur du capteur (m/s)
V_v	Vitesse du vent (m/s)
X_{ch}	Longueur du chicane (m)

Lettres grecques

α_p	Coefficient d'absorptivité de l'absorbeur
α_v	Coefficient d'absorptivité de la vitre
β	Angle d'inclinaison du capteur par rapport au sol ($^\circ$)
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Emissivités des surfaces d'échange
ε_{pl}	Emissivité de la plaque métallique coté absorbeur
ε_{p_pl}	Emissivité totale normale de l'absorbeur coté plaque métallique isolante
ε_{p_v}	Emissivité totale normale de l'absorbeur coté mat tourné vers la vitre
ε_{is}	Emissivité de la plaque arrière isolante du capteur
$\varepsilon_{p, \beta}$	Emissivité de l'absorbeur coté vitre évalué à l'angle d'inclinaison β
$\varepsilon_{v, \beta}$	Emissivité de la surface externe de la vitre à l'angle
ε_v	Emissivité de la vitre
η	Rendement thermique du capteur solaire (%)
μ_f	Viscosité dynamique du fluide caloporteur (kg/m.s)
ρ_f	Masse volumique du fluide en (kg/m ³)
σ	Constante de Stephan-Boltzman (W/m ² k ⁴)
τ_v	Transmittivité du vitrage
λ	Conductivité thermique (W/m.°C)
θ	Température ($^\circ$ C)
ρ	Masse volumique (kg/m ³)

Indices

ab.max	Ambiante maximale
ab.min	Ambiante minimale
av	Avant
ar	Arrière
b	Bois
ch	Chicane
c	Ciel
f	Fluide caloporteur
in	Entrée
is	Plaque arrière isolante du capteur
out	Sortie
p	Absorbeur
pl	Plaque métallique ou plaque inférieure
s	Sol
v	Vitre

Résumé

L'abondance de l'énergie solaire et sa disponibilité durant toute l'année fait d'elle une source économique et prometteuse vis-à-vis l'effet néfaste sur l'écologie des combustibles fossiles, incitant tout le monde à s'orienter vers l'exploitation d'autres types d'énergies (amies à la nature) qui peuvent être considérées renouvelables et propres. L'étude de phénomène de la conversion thermique de l'énergie solaire qui se base sur les capteurs solaires a pour but d'améliorer leurs performances. À travers cette étude, nous avons essayé d'établir deux modèles mathématiques pour la prédiction de la température instantanée et journalière de la température ambiante de l'air en se basant sur les paramètres météorologiques. En parallèle, une étude d'optimisation est faite pour certains paramètres. Nous avons également essayé de concevoir un capteur solaire à air, dont un prototype de la conception proposée a été fabriqué et testé expérimentalement à l'Université de Laghouat pour évaluer sa performance. L'étude a révélé les conclusions suivantes: (i) l'analyse dans les jours choisis au hasard a montré que le modèle MAT donnait un bon ajustement aux données observées. Le RMSE du modèle MAT est inférieur à $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant toute la période d'étude que les autres modèles étudiés dans l'intervalle ($2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$); (ii) concernant le modèle de température quotidienne de l'air a donné de bons résultats. L'erreur de biais moyen (MBE) était comprise entre $-0,493\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $1,098\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les valeurs moyennes de R^2 sont comprises entre $0,655$ et $0,782$; (iii) les résultats révèlent une bonne concordance avec celles citées dans la littérature pour l'optimisation des différents paramètres de conversion thermique.

Abstract

The abundance of solar energy and its availability throughout the year making it an economical and promising source towards the adverse effect on the ecology of fossil fuels, prompting everyone to orient towards the exploitation of other types of energies (friends to nature) that can be considered renewable and clean. The study of the phenomenon of the thermal conversion of solar energy that is based on solar collectors aims to improve their performance. Through this study, we have tried to establish two mathematical models for the prediction of the instantaneous and daily temperature of the ambient air temperature based on the meteorological parameters. In parallel, an optimization study is done for some parameters. We have also tried to design an air solar collector, a prototype of which has been designed and tested experimentally at the University of Laghouat to evaluate its performance. The study revealed the following conclusions: (i) the analysis of the randomly selected days showed that the MAT model gave a good fit to the observed data. The RMSE of the MAT model is less than $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ during all the period of study than the other models studied ranged in the interval ($2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$); (ii) the daily air temperature model give good results. The mean bias error (MBE) was ranged between $-0.493\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $1.098\text{ }^{\circ}\text{C}$. The average values of R^2 are between 0.655 and 0.782 ; (iii) the results showed a good agreement with those cited in the literature for the optimization of different thermal conversion parameters.

ملخص

وفرة الطاقة الشمسية وتوافرها على مدار العام مما يجعلها مصدرا اقتصاديا وواعدا اتجاه التأثير السلبى على بيئة بالنسبة للوقود، مما يدفع الجميع إلى التوجه نحو استغلال أنواع أخرى من الطاقات (صديقة للبيئة) التي يمكن اعتبارها متجددة ونظيفة. تهدف إلى دراسة ظاهرة التحويل الحراري للطاقة الشمسية التي تعتمد أساسا على ملاقط الطاقة الشمسية، بغرض تحسين أدائها من خلال هذه الدراسة، حاولنا إنشاء نموذجين رياضيين للتنبؤ بالحرارة الآتية واليومية لدرجة حرارة الهواء، بناءً على معايير للأرصاد الجوية. في موازاة ذلك، يتم إجراء دراسة تحسينية لبعض العناصر. كما حاولنا تصميم ملقط هواء شمسي، تم اختبار النموذج في جامعة الأغواط لتقييم أدائه. وكشفت الدراسة عن الاستنتاجات التالية: (1) أظهر التحليل في الأيام المختارة عشوائياً أن نموذج MAT مناسب تماماً للبيانات المرصودة. كما أظهر أيضاً أن المعيار الإحصائي RMSE لنموذج MAT أقل من (0.5°C) خلال فترة الدراسة مقارنة بالنماذج الأخرى التي تمت دراستها في المجال (2°C ، 2.4°C). أعطى نموذج درجة حرارة الهواء اليومي نتائج جيدة أيضاً. حيث تراوحت قيمة (MBE) بين - 0.493°C إلى 1.098°C . كما تراوحت قيم R^2 بين 0.655 و 0.782 ؛ (3) كما أظهرت النتائج اتفاقاً جيداً مع النتائج المذكورة في الدراسات العلمية لتحسين معايير التحويل الحراري المختلفة للملاقط الشمسية.

| Introduction générale

Introduction générale

La croissance démographique et économique dans le monde entraîne une forte consommation des énergies fossiles telles que le pétrole, gaz et charbon. A nos jours, la hausse des prix des hydrocarbures a conduit plusieurs pays productifs de cette matière à s'enrichir d'un côté et d'autre coté d'en faire un outil de développement économique précieux. La forte demande en combustible fossile suite au développement technologique pour la production d'électricité pour les usines et les carburants pour le transport, préoccupe plusieurs pays dans un contexte que cette source d'énergie est limitée (énergie non renouvelable) et présente beaucoup de problèmes sur le côté environnemental (éco-système) et sanitaire.

L'effet néfaste sur l'écologie des combustibles fossiles, incite tous les pays du monde à s'orienter vers l'exploitation d'autres types d'énergies (amies à la nature) qui peuvent être considérées renouvelables et propres (vertes).

Cependant, l'Algérie est un pays immense en surface et possédant un climat favorable pour le développement du secteur des énergies renouvelables qui puissent y participer à la production de l'électricité. Cette orientation vers les énergies renouvelables peut être considérée comme une bonne alternative pour remédier aux contraintes engendrées par les combustibles fossiles et surtout dans le cas où l'Algérie possède un important gisement solaire dans le grand sud spécialement et à travers tous le territoire.

Cependant, pour améliorer les performances des capteurs solaires à air et surtout du côté rendement thermique et coût de fabrication, on a toujours recours à l'utilisation de l'outil d'optimisation. Notre premier objectif porte sur l'étude de l'influence de certains paramètres sur le transfert de la chaleur au sein des capteurs solaires plans à une seule passe d'air afin de développer des modèles mathématiques fiables qui nous permettent de déterminer ces paramètres sans avoir recours à l'expérimentation tandis que le deuxième objectif évoque la conception et la réalisation d'un capteur solaire à une seule passe d'air qui va servir comme un banc d'essai pour l'étude de certains paramètres de la conversion thermique .

Le contenu de la thèse est scindé en cinq chapitres :

Le **premier chapitre** comporte une étude bibliographique concernant l'état de l'art sur les capteurs solaires à air, ainsi qu'un résumé de quelques travaux de recherches réalisés dans ce domaine.

Le **deuxième chapitre** présente un aperçu sur les technologies de conversion de l'énergie solaire en une énergie thermique. Nous évoquons aussi les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire active et passive qui reflètent l'indépendance ou l'intégration des éléments utilisés pour la conversion et le stockage d'énergie dans la structure du système, et ainsi le type de circulation du fluide caloporteur. La modélisation des coefficients d'échanges thermiques qui tiennent en compte du transfert thermique (convectif, radiatif et conductif) est étudiée dans cette partie. Ces coefficients d'échanges entrent implicitement dans la mise en équation de l'équilibre thermique des capteurs solaires plans à air.

Le **troisième chapitre** porte sur l'élaboration de deux nouveaux modèles mathématiques pour la prédiction de la température ambiante instantanée et journalière de l'air basé sur la pression

atmosphérique, le rayonnement solaire global et les données d'humidité relative. Une comparaison est établie entre les résultats obtenus par l'application des modèles proposés avec des données météorologiques mesurées sur le site de Laghouat et autres. Les résultats révèlent une meilleure précision et que les modèles proposés fonctionnaient raisonnablement bien.

Le **quatrième chapitre** est consacré à la conception et la réalisation d'un prototype de capteur solaire plan à air dont l'exploitation et les tests ont été conduits au sein du laboratoire de génie-mécanique (LGM), Université de Laghouat.

Le **cinquième chapitre** est consacré à la présentation de tous les résultats issus de notre banc d'essai et ceux obtenus par modélisation. Les résultats ont montré que les modèles proposés avaient une meilleure précision et fonctionnaient raisonnablement bien sur différents sites. Des études en parallèles ont été entreprises pour optimiser les différents paramètres de conversion thermique concernant : l'angle d'inclinaison, angle d'azimut, le débit de l'air, la hauteur entre Plexiglas et l'absorbeur et le cas du double vitrage. Les résultats révèlent une bonne concordance avec celles citées dans la littérature.

Et finalement, on termine par une conclusion générale faisant apparaître les principaux résultats obtenus dans cette étude suivis par des perspectives clôturant ce travail.

Chapitre 1

Systemes de conversion thermique de l'énergie solaire

Chapitre 1

Systemes de conversion thermique de l'énergie solaire

1.1.Introduction sur les capteurs solaires

Les capteurs solaires à air sont des dispositifs utilisant le rayonnement solaire pour diverses applications. Ces dispositifs sont simples à concevoir et à entretenir et peuvent être construits par des matériaux non onéreux. En général, les capteurs solaires plans à air sont constitués d'un couvercle transparent, d'une plaque absorbante, d'une plaque inférieure et d'un matériau isolant. Le flux d'air pénètre par le canal formé par la plaque absorbante et la plaque inférieure. Le rayonnement solaire joue un rôle très important à la transmission de la chaleur à la plaque absorbante. La chaleur absorbée est transmise à l'air au fur et à mesure que l'air circule dans le canal. Cet air chauffé peut être utilisé dans plusieurs applications telles que le séchage de produits agricoles, la climatisation, le chauffage de l'eau, le chauffage et le chauffage industriel. Ce sont des dispositifs qui respectent également l'environnement. Dans ce chapitre, on va présenter les différents types de capteurs solaires ainsi leurs caractéristiques.

1.2. Caractéristiques des capteurs solaires

Les caractéristiques des capteurs solaires se diffèrent selon les trois critères suivants [1, 2]:

1.2.1. Capteurs stationnaires

Pour ce genre de capteurs solaires, on distingue :

- Les insolateurs plans avec un absorbeur plan, rapport de concentration égale à 1 et une plage de température d'utilisation variant entre 30 °C et 80 °C.
- Les insolateurs sous vide avec un absorbeur plan, rapport de concentration égale à 1 et une plage de température d'utilisation variant entre 50 °C et 200 °C.
- Les réflecteurs paraboliques composés avec un absorbeur tubulaire, rapport de concentration compris dans l'intervalle (1 et 5) et une plage de température d'utilisation variant entre 60 °C et 240 °C.

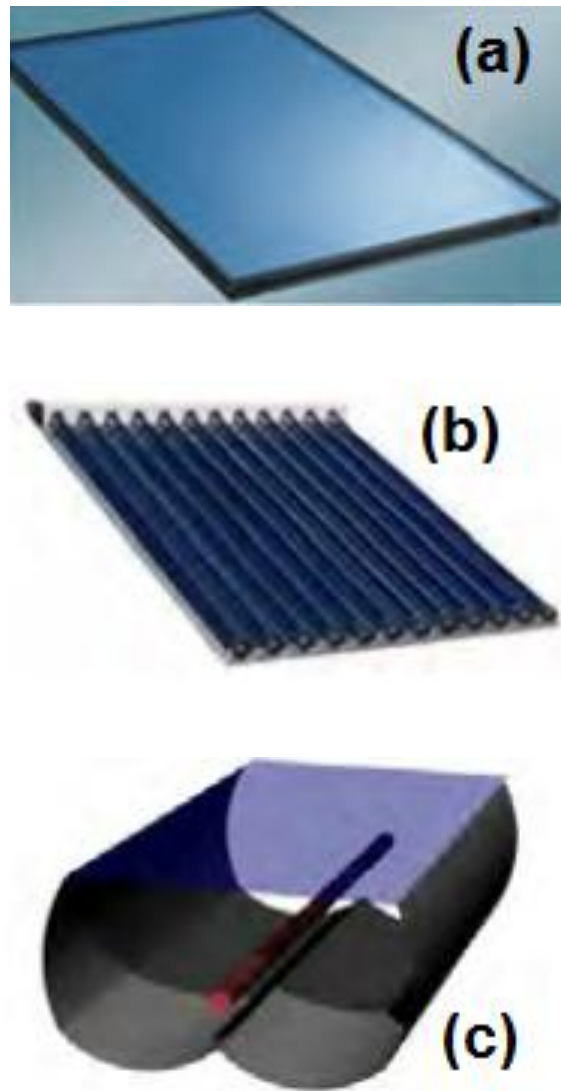


Figure 1.1 : types de capteurs solaires stationnaires: (a) plans, (b) sous vide et (c) réflecteurs paraboliques composés [3].

1.2.2. Capteurs dotés d'un mouvement autour d'un seul axe

Dans cette catégorie de capteurs ont un seul mouvement autour d'un seul axe (voir Figure 1.2) [3], on distingue :

- Les réflecteurs paraboliques composés avec un absorbeur tubulaire, rapport de concentration compris entre l'intervalle de valeurs (5 et 15) et une plage de température d'utilisation variant entre 60 °C et 300 °C.
- Les réflecteurs linéaires de Fresnel avec un absorbeur tubulaire, rapport de concentration compris dans l'intervalle de valeurs (10 et 40) et une plage de température d'utilisation variant entre 60 °C et 250 °C.

- Les réflecteurs cylindro-paraboliques avec un absorbeur tubulaire, rapport de concentration compris dans l'intervalle de valeurs (10 et 50) et une plage de température d'utilisation variant entre 60 °C et 300 °C.



Figure 1.2 : Les réflecteurs : (a) de Fresnel, (b) cylindro-paraboliques [3].

1.2.3. Capteurs dotés d'un mouvement autour de deux axes

- Les réflecteurs paraboliques avec un absorbeur point (voir Figure 1.3), rapport de concentration compris dans l'intervalle (100 et 1000) et une plage de température d'utilisation variant entre 100 °C et 500 °C.
- Centrale à tour avec un absorbeur point, rapport de concentration compris dans l'intervalle (100 et 1500) (voir Figure 1.3) et une plage de température d'utilisation variant entre 150 °C et 2000 °C [3].

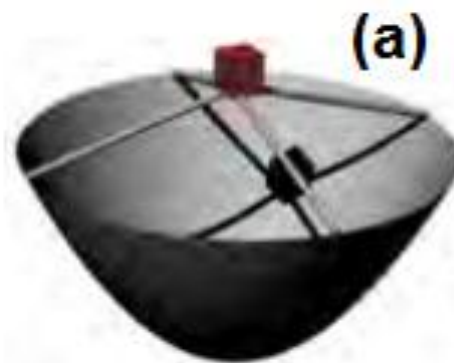




Figure 1.3 : Les réflecteurs : (a) paraboliques, (b) Centrale à tour [3].

1.3. Différents types de conversions

Comme les gens ont besoin de l'énergie sous plusieurs formes (chaleur, électricité et travail), les techniques et les systèmes de conversion de l'énergie solaire en une de ces trois formes sont également diverses.

On distingue alors deux processus de conversion d'énergie selon notre besoin qui peut prendre plusieurs formes (chaleur, électricité et travail):

- **Conversion thermique** qui consiste à transformer le rayonnement solaire en une énergie thermique par le contact direct d'un fluide caloporteur avec une surface absorbante du rayonnement solaire.
- **Processus chimique** qui a pour rôle d'assurer la photosynthèse. Ce phénomène est responsable directement de la vie sur la terre par la conversion du gaz CO_2 en O_2 et la production des aliments végétaux.
- **Conversion photovoltaïque** qui consiste à transformer directement et sans l'intervention des équipements mécaniques, l'insolation à une énergie électrique par l'utilisation de l'énergie apportée par les photons de la source lumineuse et absorbée par les cellules solaires pour libérer des charges électriques dans le matériau semi-conducteur [2, 4].

On distingue trois types de capteurs solaires :

- Capteurs solaires plans ;
- Capteurs sous vide ;
- Systèmes à concentration.

1.4. Capteurs solaires plans

Ce type de capteur solaire plan a pour rôle de convertir le rayonnement solaire en une énergie thermique. On distingue deux genres de capteurs solaires :

1.4.1. Capteurs solaires à eau

On les utilise dans le chauffage et la production de l'eau chaude sanitaire. Ils peuvent être classés en capteurs à faible pression de circulation (chauffage des piscines) et haute pression de circulation (production de l'eau chaude sanitaire) [5].

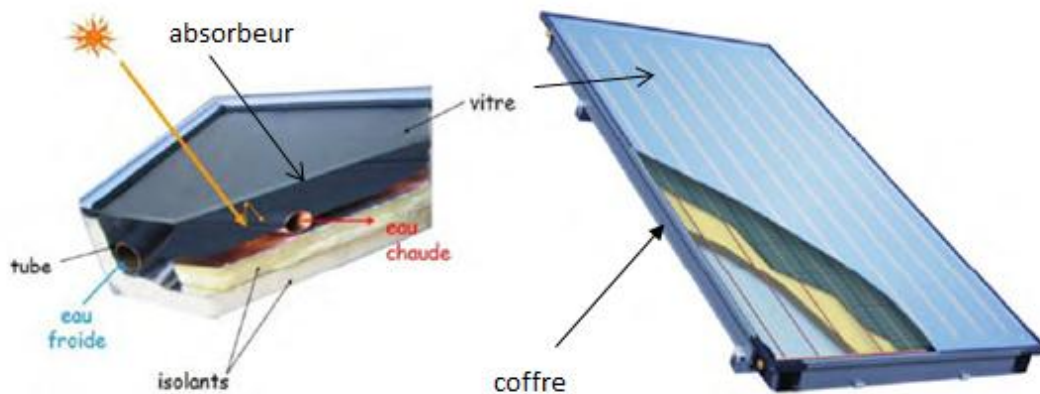


Figure 1.4 : Les constituants principaux du capteur solaire à eau [3].

1.4.2. Capteurs solaires à air

Ce type de capteurs s'adapte mieux pour le chauffage des locaux et le séchage des produits agro-alimentaires. Les éléments essentiels d'un capteur plan typique sont :

- Une vitre transparente placée au-dessus de l'absorbeur, elle a pour rôle de réduire les pertes thermiques dues par convection et par rayonnement;
- Une plaque en métal ayant une excellente conductivité thermique et doit être enduite d'une surface sélective (noir) pour l'absorption du rayonnement solaire;
- Un isolant en matériau de faible conductivité thermique (réduction des pertes thermiques par conduction) ;
- Un boîtier ou un coffre qui joue le rôle d'une structure sur laquelle on assemble tous les éléments cités ci-dessus.

Essayant de voir les différents mécanismes de transfert thermique pour un capteur solaire plan constitué d'une vitre transparente, d'un absorbeur et d'un isolant comme il est montré sur la

Figure 1.5. Une bonne partie de l'énergie reçue du rayonnement global solaire part en pertes optiques qui se manifestent de la manière suivante :

- Une partie est absorbée par la vitre transparente et une autre partie part en réflexion;
- La partie restante de cette énergie se transmet à l'absorbeur. Dans cette phase, on observe une partie d'énergie stockée sert uniquement à chauffer l'absorbeur et une autre partie d'énergie perdue thermiquement vers le milieu ambiant et en énergie utile extraite par le fluide caloporteur ;
- La température du fluide caloporteur varie dans le sens de l'écoulement.

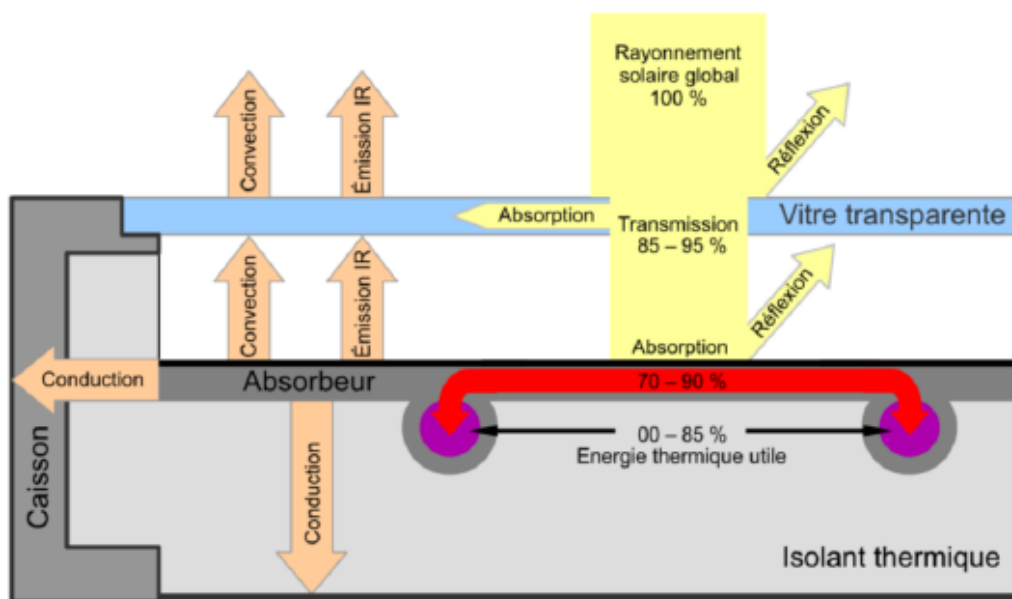


Figure 1.5 : Différents mécanismes de transfert thermique dans les capteurs solaires plans [6].

1.5. Capteurs à tubes sous vide

Les capteurs solaires sous vide sont plus performants par rapport aux capteurs solaires plans qui représentent plusieurs inconvénients, tels que les pertes thermiques considérables et le mauvais fonctionnement dans les conditions climatiques défavorables. Ce type de capteurs est utilisé pour différentes applications industrielles dont la température d'utilisation désirée est de 50–200 °C. Les capteurs sous vide captent également toutes les composantes du rayonnement solaire avec la possibilité d'utilisation de différents types de réflecteurs pour concentrer les rayons solaires. Les privilèges offerts par la conception unique de ces capteurs

améliorent fortement leur rendement même pour des petits angles d'incidence, ce qui rend les capteurs sous vide plus avantageux par rapport aux capteurs plans en termes de performance journalière [1, 7].

Un capteur solaire sous vide est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre, raccordés à un collecteur de chaleur principal de plus gros diamètre situé en haut du capteur. Dans chaque tube est placé un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide (de 10^{-3} jusqu'à 10^{-5} Pa) pour réduire les déperditions thermiques par convection et par conduction de l'absorbeur. Mais pour réduire les déperditions thermiques par rayonnement, l'absorbeur doit recevoir un traitement sélectif, car le vide ne peut pas empêcher le rayonnement infrarouge de se propager vers l'extérieur ; on obtient ainsi des capteurs solaires performants, sans isolation thermique rapportée ni coffre de protection comme le montre la Figure 1.6.

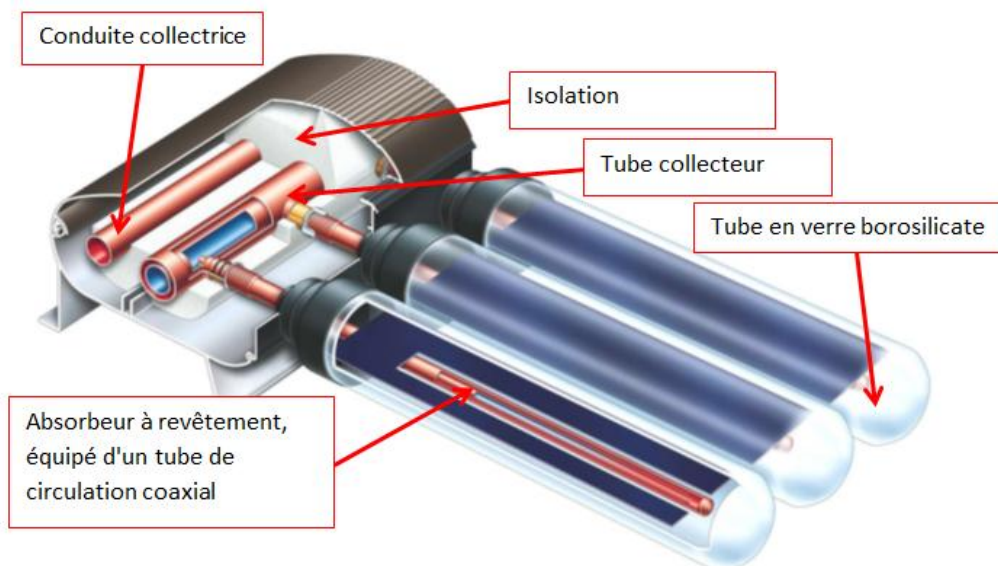


Figure 1.6 : Vue en coupe du capteur sous vide [1].

Les capteurs sous vide sont classés, selon le mécanisme d'extraction de la chaleur, en : capteurs sous vide à circulation directe et capteurs sous vide à caloduc.

Pour le premier modèle, la chaleur est transmise hors de l'enveloppe sous vide du tube en verre par la circulation d'un fluide caloporteur dans un échangeur inséré à l'intérieur de ce tube. L'échangeur est composé d'une plaque métallique sélective (absorbeur) en contact avec un canal concentrique (coaxial) ou en forme de U, à lequel le fluide caloporteur s'écoule du et vers le collecteur de chaleur principal.

Dans le deuxième modèle, un tube en cuivre (heat-pipe) contient une petite quantité d'un liquide vaporisable (eau, méthanol, alcool, etc.) est introduit dans l'enveloppe sous vide hermétique. Différemment au capteur à circulation directe qui peut être placé dans n'importe quelle position, le capteur à caloduc doit avoir une inclinaison par rapport à l'horizontale, comme le liquide vaporisable subit un cycle d'évaporation et de condensation. La chaleur solaire fait évaporer le liquide et la vapeur se déplace rapidement vers le sommet du tube en cuivre (condenseur) dans lequel la chaleur latente de la vapeur est transférée au fluide caloporteur s'écoulant à travers le collecteur de chaleur principal. Avec une inclinaison adéquate d'au moins 25° par rapport à l'horizontale, la vapeur condensée revient au fond du tube en cuivre (évaporateur) et le processus évaporation – condensation est répété de nouveau [1, 8].

1.6. Les capteurs à concentration

Ce sont des capteurs solaires ayant un système optique (réflecteurs, lentilles...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement solaire ayant traversé l'ouverture [3].

1.6.1. Avantages et inconvénients

Le concentrateur est un dispositif qui permet, par réflexion ou réfraction du rayonnement incident, de soumettre le convertisseur à des flux surfaciques intenses ; la conversion héliothermique à température élevée devient alors envisageable ; jusqu'à environ 300°C , sous quelques centaines de w.m^{-2} avec des concentrateurs de révolution. Cet avantage essentiel ne va toutefois pas sans inconvénients.

Perte à la réflexion ou à la transmission, d'une fraction du rayonnement direct selon la valeur du facteur de réflexion, ou de transmission du concentrateur. Perte totale ou partielle du rayonnement diffus (seconde composante du rayonnement global) qui provient de l'environnement, et non plus du soleil, par rapport auquel les calculs de trajectoires optiques ont été effectués. Le capteur à concentration est souvent plus sophistiqué (par exemple, mobile) et donc plus cher par unité de surface que le capteur plan traditionnel à l'investissement comme à la maintenance [9, 10].

1.6.2. Classification des capteurs à concentration

Les solutions pour concentrer le rayonnement solaire sont trop nombreuses pour que l'on puisse ici en faire une présentation exhaustive aussi, avant de songer à concevoir un concentrateur original, il est impératif de consulter une documentation spécialisée (livres et

périodique cités en bibliographie). Beaucoup de ces solutions ne sont d'ailleurs pas satisfaisantes en vue de la production d'énergie solaire en raison des contraintes technologique et économique.

1.6.2.1. Le capteur entièrement mobile



Figure 1.7 : Concentrateur entièrement mobile [3].

Ce sont des capteurs à concentration ponctuelle, linéaire ; les ponctuels sont équipés de concentrateurs de révolution orientables autour de deux axes (voir Figure 1.7) linéaires utilisent des concentrateurs cylindriques mobiles autour d'un axe de rotation, de préférence parallèle à l'axe du monde. La différence essentielle entre ponctuels et linéaires réside dans les niveaux accessibles de concentration géométrique et donc de fonctionnement : au-delà d'environ 300°C, le ponctuel est préférable.

Les avantages de la concentration linéaire sont [3]:

- Un seul mouvement de rotation est nécessaire ;
- L'énergie est véhiculée en même temps qu'elle est captée par le convertisseur héliothermique sert de réseau caloporteur ;
- Dans le cas d'intégration du capteur dans une centrale, les effets d'ombre portés sont plus faible que pour les ponctuelles ;

Ces inconvénients sont :

- L'énergie solaire disponible est réduite de l'effet cosinus ;
- La largeur du champ de flux sur l'absorbeur varie au cours de la journée ;

-En extrémité de chaudière, il y a des pertes énergétiques que l'on réduit, en valeur relative, en concevant des concentrateurs longs.

1.6.2.2. Capteurs à chaudière fixe et concentrateur mobile



Figure 1.8 : Capteur à chaudière fixe et concentrateur mobile [3].

La solution chaudière fixe-concentrateur mobile correspond essentiellement aux centrales à tour ou aux grosses centrales à foyer linéaire ; la chaudière de grande dimension est fixe et le concentrateur est constitué d'un ensemble d'héliostats qui réfléchissent le rayonnement solaire vers cette chaudière, la difficulté tient généralement à la grande précision requise par l'optique de tels systèmes. L'avantage en contrepartie, tient à la quasi-suppression du réseau caloporteur (voir Figure 1.8).

1.6.2.3. Capteur à concentration fixe et chaudière mobile

Le réflecteur ou le réfracteur constitue la partie encombrante et pesante du capteur, d'où les solutions à concentrateur fixe, qui présentent également l'avantage de poser un minimum de difficultés concernant la tenue au vent, l'immobilité du concentrateur n'est toutefois pas sans inconvénient ,car l'effet cosinus est alors très pénalisant, le meilleur positionnement sera obtenu comme pour les capteurs plans, en inclinant l'axe (ou le plan) optique d'un angle égal à la latitude du lieu dans le plan méridien.

1.6.2.4. Capteur à renforcement du rayonnement

Les solutions dites à renforcement du rayonnement incident, capteur fixe, ne peuvent être considérées comme réellement satisfaisantes, deux propositions sont toutes signalées ; la première conduit au meilleur rapport concentration géométrique /angle d'acceptance mais au prix d'une surface de miroir très importante ; la seconde est la plus immédiate pour améliorer les performances d'un capteur plan (voir Figure 1.9).



Figure 1.9 : Capteur à renforcement du rayonnement [3].

1.7. Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire

Pour avoir une bonne efficacité thermique d'un capteur solaire à air, on a recours au bon choix des matériaux utilisés, les dimensions doivent être bien adéquates, la forme des chicane soit bien choisie et toute en tenant compte de la disposition du capteur (orientation) et les conditions environnantes. Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales [11] :

1.7.1. Les paramètres internes

1.7.1.1. La vitre

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur [12]. La majorité des capteurs solaires à air utilisent une couverture simple, double et parfois triple.

Dans ce cadre, Donatien Njomo [13] a montré dans une étude numérique, qu'un capteur avec double vitrage de matière différente (ici la couverture extérieure est en Plexiglas et celle intérieure est en verre) possède des performances meilleures qu'un capteur à double vitrage de même matière.

Turhan. Koyuncu [14] a trouvé que ce facteur contribue énormément sur l'efficacité du capteur solaire. L'utilisation du verre dans les capteurs est bénéfique puisque il absorbe presque tout le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur ce qui conduit à une amélioration du rendement thermique du capteur malgré sa fragilité et son coût un peu élevé. S.Youcef-Ali [15] a montré dans une étude expérimentale que l'utilisation du triple vitrage donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce à la minimisation des pertes vers l'extérieur.

1.7.1.2. L'absorbeur

L'absorbeur est fabriqué en matériau de bonne conductivité thermique et de bonne résistance à la corrosion, et il est formé le plus souvent de tubes ou de conduites de section droite prismatique soudés à une tôle. Tandis que, pour les capteurs solaires à air, l'utilisation des surfaces d'échange larges est nécessaire pour compenser l'échange thermique faible entre l'air et l'absorbeur qui est fabriqué sous forme d'une plaque plane, une plaque ondulée ou ridée, ou encore sous forme d'une matrice poreuse [1, 16].

Cependant, plusieurs chercheurs ont proposé d'augmenter le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (sans toucher les dimensions du capteur) par l'ajout des obstacles (chicanes ou ailettes) (voir Figure 1.10) jointes à la face inférieure de l'absorbeur. Les obstacles peuvent augmenter la surface d'échange, réduire les zones mortes et créer la turbulence et que la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition de ces obstacles influents considérablement sur l'efficacité du capteur [17-20].

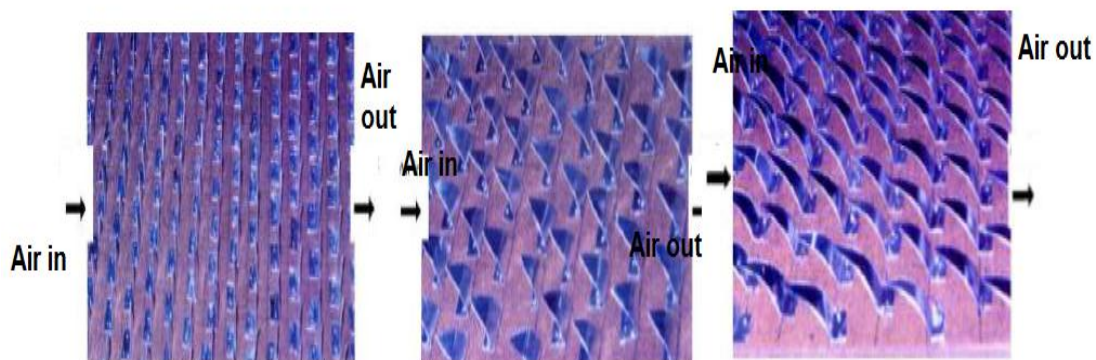


Figure 1.10 : Différentes formes des ailettes ajoutées à l'absorbeur pour améliorer l'efficacité de l'absorbeur [18].

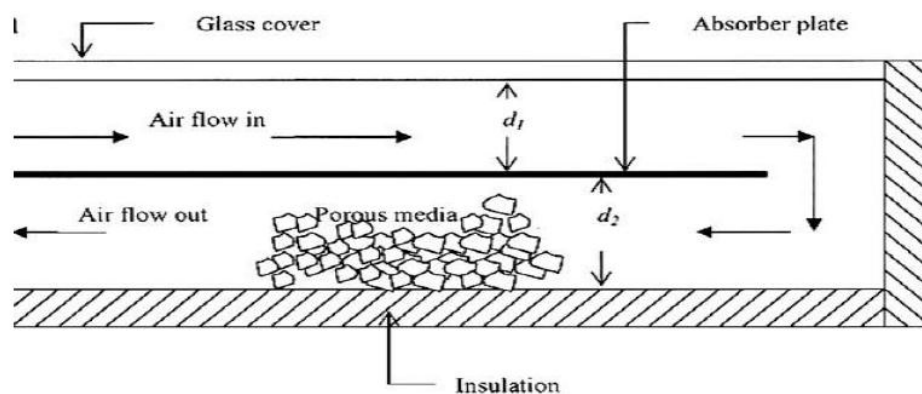


Figure 1.11: Les milieux poreux dans le deuxième canal d'un capteur à double passes [21].

Pour les réchauffeurs solaires à doubles passes et dans le but d'améliorer leurs efficacités. On ajoute un milieu poreux au canal inférieur (voir Figure 1.11), ce qui augmente le secteur de transfert thermique d'où l'élévation de la température de sortie et par conséquent un rendement de 60-70% [21].

1.7.1.3. La circulation du fluide caloporteur

Selon M. Augustus Leon et S. Kumar [22] ont montré que le débit d'air à l'effet le plus fort sur l'efficacité d'échanges thermiques et par conséquent sur le rendement. De même, la réutilisation (recyclage) de l'air accroît la vitesse du fluide ce qui peut améliorer l'efficacité du capteur plus de 80% [23].

1.7.1.4. L'isolation

L'isolant doit être un matériau de faible conductivité thermique pour réduire les pertes thermiques par conduction à travers les deux cotés latéraux et la face arrière du capteur solaire. Fayza Benyelles et al [24] ont montré dans leur travail qu'on peut utiliser de l'aérogel (matériau poreux de faible conductivité thermique) comme un superbe isolant de la face avant du capteur solaire plan.

1.7.1.5. L'orientation et l'inclinaison du capteur

Le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur qui s'affecte directement avec l'orientation et l'inclinaison du capteur solaire. La meilleure orientation du capteur solaire est de l'orienter directement au sud [25]. O. Turgut et N. Onur [26] ont tiré de leurs études

expérimentales et numériques tridimensionnelles que le nombre de Nusselt sur la surface du capteur dépend faiblement de l'angle d'attaque et quand celui-ci diminue le taux de transfert thermique augmente.

1.7.2. Paramètres externes

1.7.2.1. Rayonnement solaire

Selon F. Moukhtari et D. Semmar, l'efficacité du capteur solaire est influée considérablement par le rayonnement solaire qui change d'intensité chaque instant, chaque jour et pour chaque saison [17, 27].

1.7.2.2. Température ambiante de l'air

La température ambiante de l'air influe beaucoup sur le fonctionnement du capteur solaire et ses performances. Runsheng Tang et al [28] ont montré dans leur étude expérimentale que les capteurs peuvent être endommagés par le gel pendant la nuit couverte.

1.7.2.3. Vitesse du vent

Le coefficient de pertes thermiques par convection due au vent est important dans l'étude de la performance des insolateurs plans, malgré que l'incertitude sur sa valeur ne semble pas avoir une grande influence sur le coefficient global de pertes thermiques [1].

1.8. Propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan

1.8.1. Propriétés physiques de quelques matériaux

L'annexe B présente les propriétés physiques de quelques matériaux [29]. Ces propriétés physiques sont très importantes pour un bon choix pour la conception d'un capteur ayant des caractéristiques bien définies.

1.8.2. Les propriétés optiques de quelques surfaces sélectives

Le Tableau 1.1 présente quelques exemples de surfaces traitées ainsi leurs absorptivités et leurs émissivités.

Tableau 1.1 : Propriétés optiques de quelques surfaces sélectives [30].

Support et traitements	Absorptivité de la surface	Emissivité de la surface
Acier et nickel noir sur nickel	0.95	0.07
Acier et chrome noir sur nickel	0.95	0.09
Acier et chrome noir	0.91	0.07
Cuivre et chrome noir	0.95	0.14
Acier galvanisé et chrome noir	0.95	0.16

1.8.3. Emissivité de quelques matériaux

Le Tableau 1.2 donne des valeurs émissivités de certains matériaux à une température donnée.

Tableau 1.2:Emissivité de quelques matériaux [30].

Matériaux	Température (°C)	Emissivité
Aluminium nu après laminage	170	0.04
Aluminium anodisé noir	50	0.98
Béton	20	0.93
Glace lisse	0	0.97
Fer poncé	20	0.24
Verre	90	0.94
Cuivre oxydé	130	0.76
Acier trempé	200	0.52
Acier oxydé	200	0.79

1.9. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu les différents types de capteurs solaires tels que: les capteurs solaires plans, les capteurs à tubes sous vide et les capteurs à concentrations et leurs caractéristiques dans le but de leurs utilisations, dans le domaine de la production d'énergie thermique, le chauffage de l'eau et les chauffages des bâtiments ainsi que leurs utilisations dans la production d'électricité. En deuxième lieu, les paramètres

externes et internes influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire sont définis. Finalement, en troisième lieu, quelques exemples de propriétés thermiques et optiques de certaines composantes constituant le capteur solaire sont présentés.

Références

- [1] **Chawki M.**, Etude des phénomènes de transfert thermique dans les échangeurs de la chaleur destinés aux applications solaires. Thèse de doctorat, université de Biskra, 2016.
- [2]. **Kalogirou S. A.**, Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Elsevier, 2009.
- [3] **Tabet I.**, Étude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire. Thèse de doctorat, université de Constantine, 2016.
- [4] **Labouret A., Viloz M.**, Solar Photovoltaic Energy. The Institution of engineering and Technology, 2010.
- [5] **Edwards D. K.**, Capteurs solaires, Edition SCM, Paris, 1979.
- [6] **Richter C., Lincot D., Gueymard C. A.**, Solar Energy, Springer, 2013.
- [7] **Kalogirou S. A.**, Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Elsevier, 2009.
- [8] **Amet P., Gourdon G., Guern Y., Jules R., Marguet E., Mykieta F.**, Installer un Chauffage ou un Chauffe-eau Solaire. Eyrolles, 2008.
- [9] **Garg H. P., dayal M., furlan G., Sayigh A. A. M.**, physics and technology of solar energy volume 1, solar thermal applications, proceedings of the international workshop on physics of solar energy, New Delhi, India, 1986.
- [10] **Pasquetti R.**, chauffage de fluides par capteurs solaires à concentration, dossier technique d'ingénieur, 1987.
- [11] **Ababsa D.**, Optimisation du rendement d'un capteur solaire par minimisation des pertes convectives. Mémoire de magister, Université de Batna, 2010.
- [12] **Bernard J.**, Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. 2004.
- [13] **Donatien N.**, Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre. Rev. Gén. Therm, 37, pp. 973-980, 1998.
- [14] **Turhan K.**, Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. Renewable Energy, 31, pp. 1073–1088, 2006.
- [15] **Youcef-Ali S.**, Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing. Renewable Energy, 30, pp. 271–280, 2005.
- [16] **Sayigh A. A. M.**, Comprehensive Renewable Energy. Elsevier, 2012.

- [17] **Moumimi N., Youcef-Ali S., Moumimi A., Desmons J.Y.**, Energy analysis of a solar air collector with rows of fins. *Renewable Energy*, 29, pp. 2053–2064, 2004.
- [18] **Abene A., Dubois V., Le Ray M., Ouagued A.**, Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape. *Journal of Food Engineering*, 65, pp.15–22, 2004.
- [19] **Ucar A., Inall M.**, Thermal and exergy analysis of solar air collectors with passive augmentation techniques. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, pp. 1281–1290, 2006.
- [20] **Hikmet E.**, Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates". *Building and Environment*, 43, pp. 1046–1054, 2008.
- [21] **Sopian K., Alghoul M.A., Alfegi E.M., Sulaiman M.Y., Musa E.A.**, Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous–nonporous media. *Renewable Energy*, 34, pp. 640–645, 2009.
- [22] **Augustus Leon M., Kumar S.**, Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. *Solar Energy*, 81, pp. 62–75, 2007.
- [23] **Yeh H. M., Ho C. D.**, Solar air heaters with external recycle. *Appl. Therm. Eng.*, 29(8), pp.1694-1701, 2008.
- [24] **Ben Yelles F., Benabadji B., Benyoucef B., Ziani Z.**, Comparaison entre un capteur à aérogel de silice et d'autres capteurs plans. 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique Albi, France du 28 au 30 Août 2007.
- [25] **Gunerhan H., Hepbasli A.**, Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. *Building and Environment*, 42, pp. 779–783, 2007.
- [26] **Turgut O., Onur N.**, Three dimensional numerical and experimental study of forced convection heat transfer on solar collector surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(3), pp.274-279, 2008.
- [27] **Mokhtari F., Semmar D.**, Etude Expérimentale d'un Capteur Solaire à Air. *Rev. Energ. Ren.*, pp. 243-246, 1999.
- [28] **Tang R., Sun Z., Li Z., Yu Y., Zhong H., Xia C.** Experimental investigation on thermal performance of flat plate collectors at night. *Energy Conversion and Management*, 49, pp. 2642–2646, 2008.
- [29] **Chabane F.** Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2015.

[30] Ferdjani A. T. Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans. Mémoire de Magister, université de Biskra, 2013.

Chapitre 2

Paramètres de conversion thermique des capteurs
solaires plans à air

Chapitre 2

Paramètres de conversion thermique des capteurs solaires plans à air

2.1. Introduction

Pour mieux optimiser certains paramètres entrant dans l'amélioration des performances des capteurs solaires plans à air, la connaissance des avantages et des inconvénients de l'énergie solaire active et passive devient une nécessité pour la sélection du type de capteurs qu'on doit utiliser. Nous présenterons aussi dans ce chapitre la modélisation des coefficients d'échanges thermiques qui tiennent en compte du transfert thermique (convectif, radiatif et conductif). Ces coefficients d'échanges entrent implicitement dans la mise en équation de l'équilibre thermique des capteurs solaires plans à air.

2.2. Energie solaire active et passive

Les systèmes de conversion thermique de l'énergie solaire se divisent généralement en deux catégories principales selon l'indépendance ou l'intégration des éléments utilisés pour la conversion et le stockage d'énergie dans la structure du système, et aussi bien selon le type de circulation du fluide caloporteur [1, 2].

2.2.1. Propriétés des systèmes actifs

Ce type de système exige une source d'énergie supplémentaire pour la collection et la distribution de l'énergie solaire. Les avantages et les inconvénients de ce type de système actif [1, 2] sont :

- Avantages :
 - ✓ Distribution de chaleur contrôlée ;
 - ✓ Indépendance à l'habitation ;
 - ✓ Intégration facile aux habitations déjà construites ;
 - ✓ Rendement élevé.
- Inconvénients :
 - ✓ Coût initial élevé ;
 - ✓ Besoins de mise en marche et de maintenance significatifs ;
 - ✓ Complexe.

2.2.2. Propriétés des systèmes passifs

Ce type de système fonctionne exclusivement sur l'énergie solaire. Les avantages et les inconvénients de ce type de système passif [1, 2] sont :

- Avantages :
 - ✓ Conception simple ;
 - ✓ Fonctionnement direct ;
 - ✓ Moindre besoin de maintenance ;
 - ✓ Pas de bruit ;
 - ✓ Coût initial réduit ;
 - ✓ Construction avec des matériaux conventionnels.
- Inconvénients :
 - ✓ Influence significative sur la forme, l'orientation et le plan intérieur de l'habitation ;
 - ✓ Influence de la performance thermique de l'habitation sur la conception du système passif ;
 - ✓ Exigence d'une utilisation "intelligente" ;
 - ✓ Contrôle et distribution de chaleur inadéquats parfois ;
 - ✓ Rendement faible.

2.3. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques

Les trois modes de transfert thermique sont présents pour le capteur solaire plan à air tels que :

- **L'échange par convection** : C'est l'interaction entre le capteur solaire et l'environnement (pertes avant et arrière causé par le vent),
- **L'échange par conduction** : Elle se trouve entre les différents éléments constituant l'isolation (pertes arrière),
- **et l'échange radiatif** : Il se trouve entre la vitre et la voûte céleste.

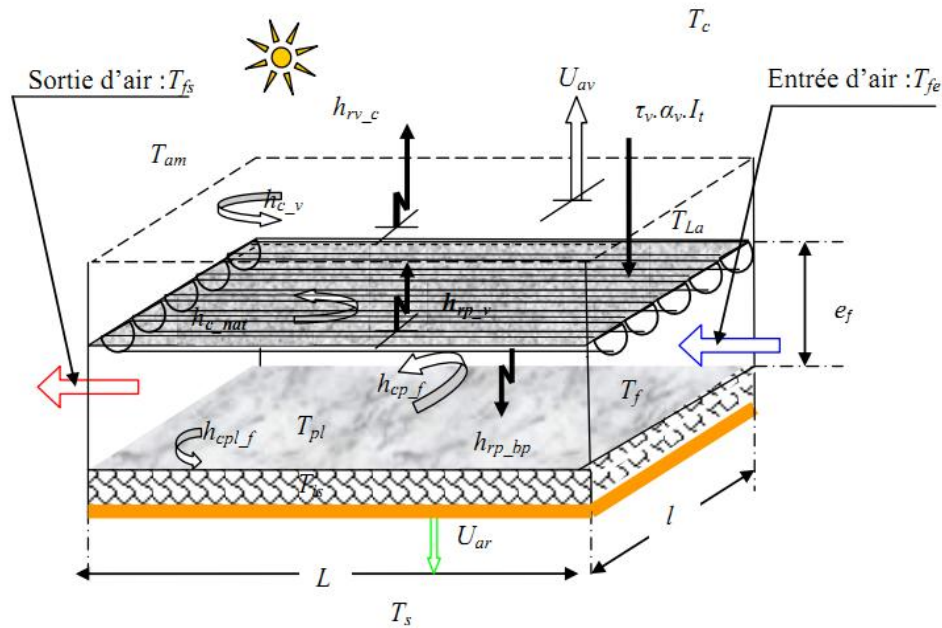


Figure 2.1 : Schéma d'échanges thermiques pour un capteur solaire plan à air [3].

2.3.1. Transfert convectif

- **Transfert dû au vent :**

Le coefficient est défini comme étant une fonction linéaire de la vitesse du vent. Ce coefficient subsiste (échange) même avec un vent de vitesse nulle. Plusieurs études utilisent la formulation de Mc Adams [4, 5]:

$$h_{c_v} = 5,67 + 3,86.V_v \quad (2-1)$$

Avec V_v : vitesse du vent (m/s)

- **Entre la vitre et l'absorbeur :**

L'échange entre la vitre et l'absorbeur, à travers la lame d'air immobile est une convection naturelle [6] :

$$h_{c_nat} = 1,42 \cdot \left\{ \frac{(T_p - T_{ab}) \cdot \sin(\beta)}{L} \right\}^{1/4} \quad (2-2)$$

Avec :

T_p : Température de l'absorbeur (K) ;

T_{ab} : Température du milieu ambiant(K) ;

β : Inclinaison du capteur par rapport au sol ($^{\circ}$) ;

L: Longueur du capteur suivant laquelle s'effectue l'écoulement du fluide caloporteur (m).

Comme on peut déterminer la température ambiante selon le modèle d'Idliman [7] :

$$T_{ab} = T_1 + T_2 \cos[(14 - tsv) \cdot \pi / 12] + 273.15 \quad (2-3)$$

Avec :

$$T_1 = (T_{ab.max} + T_{ab.min}) / 2 \quad (2-4)$$

$$T_2 = (T_{ab.max} - T_{ab.min}) / 2 \quad (2-5)$$

$T_{ab.max}$ et $T_{ab.min}$ étant la température ambiante maximale et minimale le long de la journée ($^{\circ}$ C).

tsv : Temps solaire vrai en heure.

- **Dans la couche d'air mobile :**

La vitesse du fluide caloporteur intervient pour déterminer le type de corrélation possible ; selon que l'écoulement est forcé ou naturel et selon le type d'absorbeur installé (avec ou sans chicanes). Les corrélations suivantes ont été établies par Duffie et Backman [8] pour l'absorbeur sans chicanes:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k_f}{D_H} \quad (2-6)$$

Avec :

Nu : Le nombre de Nusselt (corrélation expérimentale des coefficients de transfert).

k_f : La conductivité du fluide considéré (W/m.K)

D_H : Diamètre hydraulique (dimension caractéristique) (m).

Le diamètre hydraulique (D_H) est donné par l'expression suivante:

$$D_H = 4 \cdot S / P \quad (2-7)$$

Avec :

S : Section de passage du fluide en mouvement (m^2).

P : Périmètre de la section de passage S (m).

-Dans le domaine laminaire : $Re < 2100$

$$Nu = 3,66 + 0,085.Gz / (1 + 0,047.Gz^{2/3}) \quad ; \text{ Pour } Gz < 100 \quad (2-8)$$

$$Nu = 0,116.Gz^{1/3} + 0,87.(1 + 0,045.Gz^{1/3}) \quad ; \text{ Pour } Gz > 100 \quad (2-9)$$

-Dans le domaine de transition : $2100 < Re < 10000$

$$Nu = 0,116.(Re^{2/3} - 125). \left\{ 1 + (D_H / L)^{2/3} \right\} Pr^{1/3} \quad (2-10)$$

-Dans le domaine turbulent : $Re > 10000$

$$Nu = 0,018.Re^{0,8} . Pr^{0,4} \quad (2-11)$$

Avec :

$$Re = \frac{\rho_f}{\mu_f} V_f . D_H \quad (2-12)$$

$$Pr = \frac{\mu_f}{k_f} . Cp \quad (2-13)$$

$$Gz = Re.Pr.D_H/L \quad (2-14)$$

Ou

Re: Le nombre de Reynolds

Pr : Le nombre de Prandtl.

Gz : Nombre de Graetz.

μ_f : Viscosité dynamique du fluide en (kg/m.s).

k_f : La conductivité du fluide en(W/m.K).

ρ : Masse volumique du fluide en(kg/m³).

Cp : Capacité calorifique massique du fluide à pression constante en (J/kg.K).

L : Dimension caractéristique de l'écoulement (longueur du capteur).

Comme on peut utiliser la corrélation donnée par Kays [9] :

$$Nu = 0,0158.Re^{0,8} \quad (2-15)$$

Avec :

$L/D_H > 10$: Pour un absorbeur sans chicanes.

$X_{ch}/D_H > 10$: Pour un absorbeur avec chicanes.

Dans le cas des absorbeurs avec chicanes, il est recommandé de passer par le facteur de Colburn « J » qui prend en considération le régime d'écoulement, à travers le nombre de Reynolds, et la géométrie de chicane [4, 10].

$$J = 0,6522.Re^{-0,5403}.\alpha^{-0,1541}.\delta^{0,1499}.\gamma^{-0,0678} \left\{ 1 + 5,269.10^{-5}.\alpha^{0,504}.\delta^{0,456}.\gamma^{-1,055} \right\}^{1/10} \quad (2-16)$$

Où :

$$J = \frac{Nu}{Re.Pr^{1/3}} \quad \text{pour } 120 < Re < 10000 \quad \text{et} \quad h_{cp-f} = \frac{Nu.k_f}{D_H} \quad (2-17)$$

Avec :

$Pr \approx 0,66$ à $0,7$ (l'air est pris comme un fluide caloporteur)

$\alpha = b/a$

$\delta = c/X_{ch}$

$\gamma = c/b$.

Avec X_{ch} : Longueur du chicane (m).

- **Echange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur :**

L'installation des chicanes augmente l'énergie transférée de l'absorbeur au fluide caloporteur.

$$h_{cp-f} = \frac{Nu.k_f}{D_H} \quad (2-18)$$

- **Echange convectif entre le fluide caloporteur et la plaque isolante :**

$$h_{cp_{l-f}} = h_{cp_{-f}} \quad (2-19)$$

- **Evaluation de la vitesse du fluide :**

Comme le débit est une valeur connue, on peut exprimer la vitesse moyenne débitante par l'équation de continuité :

$$V_f = \frac{\dot{m}}{\rho_f \cdot A_f} \quad (2-20)$$

Avec :

V_f : la vitesse du fluide caloporteur (m/s) ;

\dot{m} : Débit massique (kg/s) ;

ρ_f : Masse volumique du fluide caloporteur (kg/m³) ;

A_f : Section de passage du fluide en (m²).

Pour un capteur sans chicanes, on a:

$$A_f = l \cdot e \quad (2-21)$$

Où l et e sont les dimensions de la section (rectangulaire) de passage du fluide.

2.3.2. Transfert radiatif

Il peut se faire entre deux surfaces d'échange. Le coefficient radiatif est donné par l'expression suivante :

$$h_r = \frac{\sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)} \quad (2-22)$$

Avec :

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$: Constante de Stephan Boltzman (W/m².k⁴) ;

T_1, T_2 : Températures des surfaces concernées par l'échange (K) ;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: Emissivités des surfaces d'échange ;

$F_{1,2}$: Facteur de forme relatif aux surfaces dans leur position l'une par rapport à l'autre (pour les capteurs plans à air sa valeur est 1) ;

S_1, S_2 : Surfaces des plaques (m^2).

- **Echange radiatif entre la vitre et la voûte céleste :**

Le coefficient d'échange rapporté par [4, 11] est donné par :

$$h_{rv_c} = \sigma \cdot \varepsilon_v \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \cdot (T_v + T_c) \cdot (T_v^2 + T_c^2) \quad (2-23)$$

Avec :

ε_v : Emissivité du vitrage ;

T_v : Température de la vitre ;

T_c : Température équivalente du ciel donnée par la relation de Swinbank (1963) :

$$T_c = 0,0552 \cdot T_{ab}^{3/2} \quad (2-24)$$

T_v, T_c et T_{ab} sont des températures exprimées en (K) ;

β : Inclinaison en ($^\circ$).

- **Echange radiatif entre la vitre et l'absorbeur :**

Ce coefficient est donné par l'expression [3, 4] :

$$h_{rp_v} = \frac{\sigma \cdot (T_v + T_p) \cdot (T_v^2 + T_p^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{p_v}} - 1} \quad (2-25)$$

Avec :

ε_v : Emissivité de la vitre vers l'absorbeur ;

ε_{p_v} : Emissivité de la surface mate de l'absorbeur vers la vitre ;

T_p : Température de l'absorbeur (K).

- **Echange radiatif entre la vitre et le sol :**

Ce coefficient est donné par l'expression [3, 4] :

$$h_{rv-s} = \sigma \cdot \varepsilon_v \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \cdot (T_v + T_s) \cdot (T_v^2 + T_s^2) \quad (2-26)$$

Avec :

T_s : Température du sol (K).

- **Echange radiatif entre l'absorbeur et la plaque métallique placée sur l'isolant :**

Ce coefficient est donné par l'expression [3, 4] :

$$h_{rp-pl} = \frac{\sigma \cdot (T_{pl} + T_p) \cdot (T_{pl}^2 + T_p^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{p-pl}} + \frac{1}{\varepsilon_{pl}} - 1} \quad (2-27)$$

Avec :

ε_{p-pl} : Emissivité de l'absorbeur coté plaque métallique ;

ε_{pl} : Emissivité de la plaque métallique coté absorbeur ;

T_{pl} : Température de la plaque métallique place sur l'isolation (K).

- **Echange radiatif entre l'isolant (à l'arrière du capteur) et le sol :**

Ce coefficient est donné par l'expression [3, 4] :

$$h_{ris-s} = \frac{1}{2} \cdot \sigma \varepsilon_{is} [1 + \cos(\pi - \beta)] (T_{is} + T_s) \cdot (T_{is}^2 + T_s^2) \quad (2-28)$$

Avec :

ε_{is} : Emissivité de la plaque arrière isolante du capteur ;

T_{is} : Température de la plaque arrière isolante (K).

2.3.3. Coefficients des pertes avant, arrière et globale

- **Coefficient des pertes à l'avant :**

Si on tient compte seulement de l'effet du vent et de la radiation de la vitre avec la voûte céleste le coefficient d'échange des pertes avant de la vitre s'écrit :

$$U_{av} = h_{c_v} + h_{rv_c} \quad (2-29)$$

Klein propose de calculer le coefficient des pertes avant de l'absorbeur par l'expression suivante [12] :

$$U_{av} = \left[\frac{I}{N_c \left[\frac{C}{T_{pm}} \left(\frac{T_{pm} - T_{ab}}{N_c + f} \right)^e \right] + \frac{I}{h_{c_v}}} \right] + \frac{\sigma \cdot (T_{pm} + T_{ab}) \cdot (T_{pm}^2 + T_{ab}^2)}{\frac{I}{\varepsilon_{p,\beta} + 0,05 \cdot N_c \cdot (1 - \varepsilon_{p,\beta})} + \frac{2 \cdot N_c + f - I}{\varepsilon_{v,\beta}} - N_c} \quad (2-30)$$

Avec :

T_{pm} : Température moyenne de l'absorbeur ;

T_{ab} : Température ambiante ;

$\varepsilon_{p,\beta}$: Emissivité de l'absorbeur coté vitre évalué à l'angle d'inclinaison β ;

$\varepsilon_{v,\beta}$: Emissivité de la surface externe de la vitre à l'angle ;

N_c : Nombre de vitres.

$$C = 365,9 \cdot (1 - 0,00883 \cdot \beta + 0,00012 \cdot \beta^2) \quad (2-31)$$

Ce paramètre (C) tient compte de l'influence de β sur le coefficient de convection de la lame d'air immobile.

$$f = (1 - 0,04 \cdot h_{c_v} + 0,0005 \cdot h_{c_v}^2) (1 + 0,091 \cdot N_c) \quad (2-32)$$

f : Facteur correctif tenant compte de l'effet du vent.

L'équation est valable pour les conditions suivantes:

$$47^\circ\text{C} < T_{pm} < 147^\circ\text{C} \quad ; \quad -13^\circ\text{C} < T_{ab} < 37^\circ\text{C} \quad ; \quad 0,1 < \varepsilon_{v,\beta} < 0,95$$

$$0 < \beta < 90^\circ \quad ; \quad V_V < 10 \text{ m/s} \quad ; \quad I < N_c < 3$$

- **Coefficient d'échange des pertes à l'arrière :**

Les pertes sont dues à la conduction à travers les couches isolantes [3, 4]:

- La plaque métallique (si elle est installée).
- La couche du polystyrène.
- La plaque du bois qui se trouve à l'arrière du capteur vers l'extérieur.

$$U_{ar} = \frac{I}{\frac{e_{pl}}{k_{pl}} + \frac{e_{pol}}{k_{pol}} + \frac{e_b}{k_b} + \frac{I}{h_{c-v}}} = \frac{I}{h_d + \frac{I}{h_{c-v}}} \quad (2-33)$$

Avec

$$h_d = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{e_i}{k} \quad (2-34)$$

Avec :

k_{pl} : Conductivité thermique de la plaque métallique (W/m.K) ;

k_{pol} : Conductivité thermique de la plaque du polystyrène (W/m.K) ;

k_b : Conductivité thermique de la plaque en bois installée à l'arrière (W/m.K) ;

e_{pl} : Epaisseur de la plaque métallique (m) ;

e_{pol} : Epaisseur de la plaque du polystyrène (m) ;

e_b : Epaisseur de la plaque en bois installée à l'arrière (m) ;

h_d : Coefficient de transfert par conduction à travers les couche isolantes.

- **Coefficient global des pertes :**

Ce coefficient assemble toutes les pertes à l'avant et à l'arrière du capteur :

$$U_L = U_{av} + U_{ar} \quad (2-35)$$

2.3.4. Mise en équation de l'équilibre thermique d'un capteur solaire plan à air

Les équations du bilan thermiques, pour le régime stationnaire relatives à ce type de capteur, sont les suivantes [3, 4]:

-Equilibre thermique de la vitre (indice : v) :

$$-(T_v - T_{ab})h_{c_v} - (T_v - T_c)h_{rv_c} - (T_v - T_s)h_{rv_s} + (T_{La} - T_v)h_{c_{nat}} + (T_p - T_v)h_{rp_v} + \alpha_v I_t = 0 \quad (2-36)$$

-Equilibre thermique de la lame d'air immobile (indice : La) :

$$-(T_{La} - T_v)h_{c_{nat}} + (T_p - T_{La})h_{c_{nat}} = 0 \quad (2-37)$$

Avec :

$$T_{La} = \frac{T_p + T_v}{2} \quad (2-38)$$

-Equilibre thermique de l'absorbeur (indice : p) :

$$-(T_p - T_{La})h_{c_{nat}} - (T_p - T_f)h_{cp_f} - (T_p - T_{pl})h_{rp_{pl}} - (T_p - T_v)h_{rp_v} + \tau_v \alpha_p I_t = 0 \quad (2-39)$$

-Equilibre thermique du fluide caloporteur (air) (indice : f) :

$$(T_p - T_f)h_{cp_f} - (T_f - T_{pl})h_{cpl_f} - dQu/(l.dx) = 0 \quad (2-40)$$

-Equilibre thermique de la plaque métallique isolante (indice : pl) :

$$(T_f - T_{pl})h_{cpl_f} + (T_p - T_{pl})h_{rp_{pl}} - (T_{pl} - T_{is})h_d = 0 \quad (2-41)$$

-Equilibre thermique de la plaque isolante externe qui se trouve à l'arrière du capteur (indice : is) :

$$(T_{pl} - T_{is})h_d - (T_{is} - T_{ab})h_{c_v} - (T_{is} - T_s)h_{ris_s} = 0 \quad (2-42)$$

Mettons l'ensemble des équations sous la forme d'un système d'équations :

$$\begin{cases} (T_v - T_{ab})h_{c_v} + (T_v - T_c)h_{rv_c} + (T_v - T_s)h_{rv_s} + (T_p - T_v)\{-h_{c_{nat}}/2 - h_{rp_v}\} = \alpha_v \cdot I_t \\ (T_p - T_v)\{h_{c_{nat}}/2 + h_{rp_v}\} + (T_p - T_f)h_{cp_f} + (T_p - T_{pl})h_{rp_{pl}} = \tau_v \cdot \alpha_p \cdot I_t \\ (T_p - T_f)h_{cp_f} - (T_f - T_{pl})h_{cpl_f} = dQu/(l \cdot dx) \\ (T_f - T_{pl})h_{cp_f} + (T_p - T_{pl})h_{rp_{pl}} - (T_{pl} - T_{is})h_d = 0 \\ (T_{pl} - T_{is})h_d - (T_{is} - T_{ab})h_{c_v} - (T_{is} - T_s)h_{ris_s} = 0 \end{cases} \quad (2-43)$$

L'équation (2-43) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{cases} a_v T_v + b_v T_p + c_v T_f + d_v T_{pl} + e_v T_{is} = C_v \\ a_p T_v + b_p T_p + c_p T_f + d_p T_{pl} + e_p T_{is} = C_p \\ a_f T_v + b_f T_p + c_f T_f + d_f T_{pl} + e_f T_{is} = C_f \\ a_{pl} T_v + b_{pl} T_p + c_{pl} T_f + d_{pl} T_{pl} + e_{pl} T_{is} = C_{pl} \\ a_{is} T_v + b_{is} T_p + c_{is} T_f + d_{is} T_{pl} + e_{is} T_{is} = C_{is} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} a_v & b_v & c_v & d_v & e_v \\ a_p & b_p & c_p & d_p & e_p \\ a_f & b_f & c_f & d_f & e_f \\ a_{pl} & b_{pl} & c_{pl} & d_{pl} & e_{pl} \\ a_{is} & b_{is} & c_{is} & d_{is} & e_{is} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_v \\ T_p \\ T_f \\ T_{pl} \\ T_{is} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_v \\ C_p \\ C_f \\ C_{pl} \\ C_{is} \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

On peut réécrire le système d'équations (2-44) sous la forme $A T_i = C_i$. C'est un système à cinq équations à cinq inconnus. Pour sa résolution, on utilise la méthode itérative de Gauss Seidel.

2.4. Rendement thermique (%)

Le rendement thermique du capteur solaire est donné par l'équation suivante [13] :

$$\eta = m \cdot Cp \cdot \frac{(T_{out} - T_{in})}{I \cdot Ac} \quad (2-45)$$

Ou la masse volumique du fluide est donnée par :

$$m = \rho \cdot V \quad (2-46)$$

La chaleur spécifique de l'air est déterminée par l'expression :

$$Cp = 999.23 + 0.1434T_f + 1.101 \cdot 10^{-4} T_f^2 - 6.7581 \cdot 10^{-8} T_f^3 \quad (2-47)$$

La masse volumique de l'air est donnée par l'équation suivante :

$$\rho = 1.204 \left(\frac{293}{T_f} \right) \quad (2-48)$$

Avec

I : le rayonnement solaire global incident sur une surface horizontale à l'endroit étudié (W / m^2);

C_p : Capacité calorifique du fluide à pression constante ($J/kg.K$) ;

A_c : Surface de captation du capteur (m^2) ;

T_{out} : Température du fluide caloporteur à la sortie du capteur ($^{\circ}C$) ou (K) ;

T_{in} : Température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur ($^{\circ}C$) ou (K) ;

T_f : Température du fluide caloporteur ($^{\circ}C$) ou (K) ;

ρ : Masse volumique du fluide en(kg/m^3).

2.5. Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre les avantages et les inconvénients de l'énergie active et passive. La modélisation des coefficients d'échanges thermiques devient nécessaire pour l'optimisation de certains paramètres entrant dans l'amélioration des performances des capteurs solaires plans à air et tenant compte du transfert thermique (convectif, radiatif et conductif) et nous avons terminé par l'établissement d'un système d'équations qui prennent en considération l'équilibre thermique d'un capteur solaire plan à air.

Références

- [1] **Chawki M.**, Etude des phénomènes de transfert thermique dans les échangeurs de la chaleur destinés aux applications solaires. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2016.
- [2] **Hobday R. A.**, Passive Solar-Energy Air-Heating Wall Panels. PhD thesis, Cranfieldinstitute of technology, 1987.
- [3] **Chabane F.**, Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire. Thèse de doctorat, université de Biskra, 2015.
- [4] **Alia M.**, Modélisation des capteurs solaires plans à air destinés au séchage {Convection forcée}, mémoire de magister, université de Tiaret, 2005.
- [5] **McAdams W. H.**, Transmission de la chaleur. Édition Dunod, -2^e édition, 1961.

- [6] **Moumni N., Moumni A., Belkacem A., Hachemi A., Le Ray M.,** Préviation systématique des performances des capteurs solaire plans à air dans divers sites de climats différents en Algérie. National Energie Conférence, Neptur Roumani, juillet, 1995.
- [7] **Idliman A.,** Étude théorique d'un système de séchage des peaux de cuirs pour la région de Marrakech, constitué d'une serre agricole jouant le rôle d'un générateur solaire d'air chaud et d'un séchoir conventionnel. Thèse troisième cycle, Ecole nationale supérieure de Marrakech, Maroc,1990.
- [8] **Duffie J.A., Beckman W.A.,** Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons Inc, New York, 1980.
- [9] **Kays W. M., Crawford M. E.,** Convective heat and mass transfer. Mc Graw Hill Series in Mechanical Engineering. 4th Edition, 2004.
- [10] **Sabri Y. A., Desmons J. Y.,** Simulation of a new concept of an indirect solar dryer equipped with offset rectangular plate fin absorber-plate. Int. J. Energy Res, 29, pp. 317-334, 2005.
- [11] **Belghit A., Belhamid M., Bennis A., Boutaleb B., Benet S.,** Étude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée. Revue Générale de Thermique, 36, pp.837-850, 1997.
- [12] **Klein S.A., Beckman W.A.,** A general desing methode for colsed-loop solar energy systemes . Solar Energy, 22(3), pp.269-282,1979.
- [13] **Goudarzi K., Asadi Yousef-abad S.K., Shojaeizadeh E., Hajipour A.,** Experimental investigation of thermal performance in an advanced solar collector with helical tube. International Journal of Engineering, Transaction A: Basics, 27(7), pp. 1149-1154, 2014.

Chapitre 3

Contribution à la modélisation de la température ambiante instantanée et journalière de l'air

Chapitre 3

Contribution à la modélisation de la température ambiante instantanée et journalière de l'air

3.1. Introduction

La connaissance de la température ambiante de l'air est un facteur très déterminant dans beaucoup des secteurs tels que: l'agriculture, l'énergie renouvelable et la météorologie. Les capteurs solaires utilisent l'air comme un fluide caloporteur pour y participer par la suite dans le phénomène de transfert thermique. Les stations météorologiques offrent seulement les valeurs minimales et maximales de la température de l'air. De ce fait, beaucoup de chercheurs ont essayé d'établir des modèles qui prédisent cette température ambiante. Dans ce chapitre, on présente deux nouveaux modèles mathématiques de la température ambiante instantanée et journalière de l'air basé sur la pression atmosphérique, le rayonnement solaire global et les données d'humidité relatives. Les résultats ont montré que les deux modèles avaient une meilleure précision et fonctionnaient raisonnablement bien sur différents sites. Une comparaison est établie entre les résultats obtenus par l'application des modèles proposés avec des données météorologiques mesurées sur le site de Laghouat, Algérie qui sont présentés au chapitre 5.

3.2. Modélisation de la température de l'air instantanée

La température de l'air est un facteur important dans de nombreux domaines de la vie humaine, tels que: l'agriculture, la météorologie, l'hydrologie et le comportement humain, respectivement [1, 2]. Tous les modèles existants dans la littérature sont basés sur la température minimale et maximale de l'air et d'autres paramètres qui sont définis comme: la latitude, la longitude, l'heure du lever du soleil et enfin l'heure du coucher du soleil. La forme de la courbe de température diurne a été modélisée avec différentes manières allant des cas simples aux cas complexes. Pour les cas simples, ils sont basés sur des courbes sinusoïdales et les plus complexes utilisent l'analyse de Fourier ou le bilan énergétique complexe [3-16] et des modèles de bilan énergétique plus complexes [17, 18].

Bilbao et al. [19, 20] présente quelques modèles stochastiques qui relient les valeurs de températures moyennes horaires et mensuelles. Plusieurs chercheurs comme: Hollands et al. a étudié l'effet de négliger la composante aléatoire dans les données de températures horaires

pour divers systèmes de chaleur solaire [21]. Les résultats indiquent que pour la composante aléatoire de la température ambiante horaire sont inutiles. Boland a montré que la composante de température de l'air stochastique est critique pour l'évaluation des charges de chauffage et de refroidissement pour les applications solaires passives [22]. Knight et al. a proposé un modèle pour générer des séries de températures ambiantes horaires avec la composante aléatoire incluse sans introduire de discontinuités entre la dernière heure d'un jour et la première heure du jour suivant [23]. Knight et al. et Erbs et al. ont montré que la distribution cumulative des valeurs de températures horaires normalisées pouvait être représentée par la fonction de probabilité [23, 24]. Amato et al. a discuté des modèles dynamiques stochastiques pour les séries chronologiques journalières de la température de l'air et de l'irradiation solaire dans le climat de l'Italie [25]. Hernandez et al. a développé des modèles stochastiques pour prédire les températures minimales quotidiennes de l'air [26]. Macchiato et al. a analysé les températures de l'air froid et chaud enregistrées pour 50 stations dans le sud de l'Italie [27].

De nombreux modèles empiriques ci-dessous ont été utilisés pour déterminer le rayonnement solaire en utilisant des paramètres météorologiques et géographiques tels que: heure d'ensoleillement [28], température de l'air [29], latitude [30], précipitation [31], humidité relative [32, 33] et température maximale et minimale [34]. Bien qu'il soit impossible de fournir des informations précises sur l'avenir dans de nombreux cas, la prévision peut être utile pour aider à faire des plans sur les développements possibles. Par conséquent, il est possible de développer des profils de températures qui représentent avec précision la température ambiante prévue que cet environnement subit pendant la mesure. La température ambiante dans le temps est modélisée sur la base des données Tmin et Tmax précédentes et en utilisant une interpolation de Lagrange. Pour observer la variation complète de la température ambiante, le profil doit être déterminé numériquement [35].

Le but de ce travail est de présenter un nouveau modèle mathématique de la température instantanée de l'air basé sur la pression atmosphérique, le rayonnement solaire global et les données d'humidité relative. Une comparaison est établie entre les résultats obtenus par l'application du modèle proposé avec les données mesurées sur le site de Laghouat, Algérie. Ce travail a été comparé à trois autres modèles publiés dans la littérature: Wave, Idliman et Double cosinus. Les performances du modèle actuel sont testées objectivement en utilisant l'erreur de biais moyen (MBE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur moyenne en pourcentage (MPE) et le coefficient de détermination (R^2). L'avantage de ce modèle est la possibilité de déterminer le rayonnement solaire global

horaire tout en connaissant les paramètres météorologiques dans la même heure du fait que l'application du modèle est simple et nous pouvons l'utiliser ailleurs dans le monde.

3.2.1. Collecte de données et méthodes

Les paramètres météorologiques horaires tels que: la pression atmosphérique, le rayonnement solaire global, l'humidité relative et la température de l'air ont été utilisés pour paramétrer et tester le nouveau modèle proposé (MAT). Ces paramètres météorologiques horaires ont été collectés à partir de la station météorologique automatisée de l'université de Laghouat, Laghouat (Algérie) (latitude: 33 ° 47'59 "N, longitude: 2 ° 51'54" E, altitude: 764 m). La période de cette étude s'étend de janvier 2015 à mars 2016. Les températures maximales (Tmax) et minimales (Tmin) ont été mesurées toutes les heures. Cinq jours ont été choisis au hasard pour chaque mois et quinze jours choisis au hasard de chaque saison de la période de l'étude.

3.2.1. 1. Modèle de Wave

Le premier modèle (WAVE) a été initialement présenté par De Wit et al. [8]. Le modèle WAVE utilise une fonction cosinus pour la période comprise entre le moment de la température minimale et le moment de la température maximale et une autre fonction du cosinus entre le moment de la température maximale et le moment de la température minimale le jour suivant. Le modèle fixe à 14h00 le temps de la température maximale, et au lever du soleil le temps de la température minimale. Les températures horaires sont calculées à partir des équations ci-dessous:

Pour $0 \leq H < \text{RISE}$ et $14\text{h}00 < H \leq 24\text{h}00$:

$$T(H) = T_{AVE} + AMP \left(\cos(\pi H' / (10 + \text{RISE})) \right) T(H) \quad (3-1)$$

Pour $\text{RISE} \leq H \leq 14\text{h}00$:

$$T(H) = T_{AVE} - AMP \left(\cos(\pi(H - \text{RISE}) / (14 - \text{RISE})) \right) \quad (3-2)$$

Où RISE est l'heure du lever du soleil (heures) et T (H) est la température à toute heure, H est l'heure (heures), $H' = H + 10$ si $H < \text{RISE}$, $H' = H - 14$ si $H > 14\text{h}00$ et T_{AVE} et AMP sont définis comme:

$$T_{AVE} = (T_{Min} + T_{Max})/2 \quad (3-3)$$

$$AMP = (T_{Max} - T_{Min})/2 \quad (3-4)$$

3.2.1. 2. Modèle d'Idliman

La température horaire de l'air est déterminée à partir de la température maximale et minimale journalière [36]. Le modèle est donné par les expressions suivantes:

$$T_{ab} = T1 + T2 \cos((14 - tsv)\pi/12) \quad (3-5)$$

$$T1 = (T_{Min} + T_{Max})/2 \quad (3-6)$$

$$T2 = (T_{Max} - T_{Min})/2 \quad (3-7)$$

Avec : tsv est le temps solaire vrai ou local (heure)

3.2.1. 3. Modèle de Double Cosinus (DC)

Ce type de modèle utilise trois segments sinusoïdaux pour relier les temps d'apparition des températures minimales et maximales quotidiennes de l'air [37]. Le modèle est présenté ci-dessous par les équations suivantes:

• $1 \leq t \leq t_{Tmin}$

$$T(y, m, d, t) = T(y, m, d) - \cos \left[\frac{\pi(t_{Tmin} - t)}{24 + t_{min} - t_{Tmax}} \right] \frac{A_T(y, m, d)}{2} \quad (3-8)$$

• $t_{Tmin} \leq t \leq t_{Tmax}$:

$$T(y, m, d, t) = T(y, m, d) + \cos \left[\frac{\pi(t_{Tmax} - t)}{24 + t_{max} - t_{Tmin}} \right] \frac{A_T(y, m, d)}{2} \quad (3-9)$$

• $t_{Tmax} \leq t \leq 24$

$$T(y, m, d, t) = T(y, m, d) - \cos \left[\frac{\pi(24 + t_{Tmin} - t)}{24 + t_{min} - t_{Tmax}} \right] \frac{A_T(y, m, d)}{2} \quad (3-10)$$

Où T (y, m, d) est la température moyenne journalière de l'air, A_T (y, m, d) est l'amplitude thermique journalière ($^{\circ}\text{C}$), $t_{T_{\min}}$ est l'heure à laquelle se produit la température minimale horaire, $t_{T_{\max}}$ est l'heure où la température maximale horaire se produit, et t est l'heure du jour.

3.2.2. Nouveau modèle proposé

Vue la complexité dans l'application des modèles dans la littérature qui ne prennent pas en compte de l'influence directe de certains paramètres météorologiques assemblés en même temps pour une bonne estimation de la température ambiante instantanée de l'air. Dans cette vision, notre modèle proposé vient faire la jonction entre tous ces paramètres.

Le modèle proposé pour la détermination de la température ambiante instantanée de l'air (MAT) est défini par l'expression suivante:

$$T_{air} = T_{min} + \left(1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}\right) \exp\left(\frac{I}{I_o} + \frac{P_{at}}{P_o} + \frac{(1 - RH)}{2}\right) \quad (3-11)$$

Avec T_{air} est la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$);

T_{min} est la température minimale de l'air ($^{\circ}\text{C}$);

T_{max} est la température maximale de l'air ($^{\circ}\text{C}$);

I_o est la constante solaire ($I_o = 1367 \text{ W} / \text{m}^2$);

I est le rayonnement solaire global incident sur une surface horizontale à l'endroit étudié (W / m^2);

P_o est la pression atmosphérique ($P_o = 101.235 \text{ kPa}$);

P_{at} est la pression atmosphérique à l'endroit étudié (kPa);

RH est l'humidité relative (%).

Si $T_{max} \leq 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, l'équation (11) peut être écrite comme l'expression suivante:

$$T_{air} = T_{min} + 0.01 \times \exp\left(\frac{I}{I_o} + \frac{P_{at}}{P_o} + \frac{(1 - RH)}{2}\right) \quad (3-12)$$

Le rayonnement solaire global (I) peut être déduit de l'équation (3-11) comme:

$$I = I_o \times \left[- \left(\frac{P_{at}}{P_o} + \frac{(1 - RH)}{2} \right) + \ln \left(\frac{T_{max} \times (T_{air} - T_{min})}{T_{max} - T_{min}} \right) \right] \quad (3-13)$$

Les résultats obtenus et ainsi leurs discussions sont présentés au chapitre 5.

3.3. Modélisation de la température journalière de l'air

Ainsi, plusieurs applications liées aux systèmes biologiques, aux modèles de physique et de climatologie dépendent de l'évolution de la température ambiante pouvant être obtenue à partir des stations météorologiques. Ils fournissent des informations complètes et importantes sur les données climatologiques et les observations fréquentes du système Terre-atmosphère. Un traitement adéquat de ces données fournit une mine d'informations utiles pour la production d'indices d'énergie solaire, en particulier dans les zones où aucun moyen d'observation traditionnel n'est disponible. Outre leur utilité dans l'ingénierie de l'énergie solaire, elle fournit de nouvelles informations scientifiques et peut être utilisée dans des études climatologiques qui nécessitent des données précises [38].

D'autre part, il existe une forte relation entre la température ambiante et le rayonnement solaire qui se manifeste en énergie (flux de chaleur). C'est propre, renouvelable et bon marché. De nombreux gouvernements partout dans le monde ont été poussés à établir plusieurs programmes pour l'adoption de ce type d'énergie écologique. L'acceptation de modèles pour la prévision du rayonnement solaire sera nécessaire. Dans la plupart des cas, la densité et le nombre de stations de mesure du rayonnement solaire ne peuvent décrire la variabilité nécessaire [39, 40]. Il est donc compréhensible que de nouveaux modèles et des améliorations aux techniques de modélisation existantes soient continuellement proposés, qui visent à améliorer les estimations des valeurs du rayonnement solaire en utilisant des variables météorologiques plus facilement disponibles [41-43]. Foued et al. qui a étudié l'effet du débit massique d'air sur la température de sortie qui est en fonction de la température de l'air [44].

Une simulation numérique d'un alambic solaire sous différents paramètres climatiques a été réalisée. Le système proposé a été modélisé en utilisant les équations de bilan de masse et d'énergie de différentes parties de l'alambic solaire. Le système résultant d'équations algébriques non linéaires a été résolu numériquement et l'effet de divers paramètres, tels que la vitesse du vent, la température de l'air et le rayonnement solaire sur la quantité d'eau distillée produite a été décrit. Les résultats ont montré que la température ambiante et la vitesse du vent n'avaient aucun effet significatif sur la quantité d'eau distillée produite, tandis que la quantité de rayonnement solaire avait un effet direct sur la quantité d'eau distillée produite et la performance du système [45].

Le but de ce travail est de présenter une nouvelle modélisation mathématique de la température journalière de l'air basée sur la pression atmosphérique, le rayonnement solaire global et les données d'humidité relatives. Une comparaison est établie entre les résultats

obtenus par l'application du modèle proposé avec des données mesurées pour différents sites tels que: Laghouat (Algérie), Rome (Italie), Madrid (Espagne), Paris (France) et Riadh (Arabie Saoudite).

La performance du modèle actuel est objectivement testée en utilisant l'erreur de biais moyen (MBE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur moyenne en pourcentage (MPE) et le coefficient de détermination (R^2). Ce modèle donne la possibilité de déterminer le rayonnement solaire global journalier tout en connaissant les paramètres météorologiques dans la même journée.

3.3.1. Collecte de données et méthodes

Les données de température de l'air par jour utilisées pour calibrer et tester le modèle proposé ont été obtenues à partir de cinq emplacements choisis de manière aléatoire telle qu'il est présenté dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Données géographiques des cinq emplacements choisis.

Emplacement	Lat.N	Long.E	Elevation (m)	Année
Laghouat, Algérie	33.797	2.869	771	2004-2005
Rome, Italie	41.902	12.496	62	2004
Madrid, Espagne	40.417	-3.704	665	2004
Paris, France	48.857	2.352	39	2004
Riadh, Arabie Saoudite	24.713	46.675	630	2004

Les valeurs de la moyenne journalière de: température de l'air (maximum et minimum), rayonnement solaire global sur une surface horizontale, la pression atmosphérique et l'humidité relative utilisées dans la présente étude ont été prises du 1er janvier 2004 au 31 décembre 2004 sauf pour le site de Laghouat, l'Algérie était du 1er mars 2004 au 28 février 2005. Quatre mois pour chaque année ont été choisis au hasard pour l'analyse détaillée pour tous les endroits étudiés sauf pour l'emplacement de Laghouat ou nous avons pris quinze mois, respectivement.

Les valeurs de la température mensuelle moyenne de l'air sont estimées à chaque mois. Une comparaison a été établie entre les valeurs théoriques et expérimentales. Les valeurs estimées

et mesurées de la température quotidienne moyenne de l'air ont été analysées en utilisant les tests statistiques de MBE, MAE, MPE, R^2 et RMSE pour les mois étudiés de l'année.

Les données mondiales sur le rayonnement solaire (W / m^2) pour le ciel clair ont été fournies par la base de données de rayonnement solaire v5 dérivée des données satellitaires (HelioClim-3) (<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free>) consultée à la date: 03 juillet 2017. La pression atmosphérique (kPa), l'humidité relative (%), la température quotidienne de l'air minimum ($^{\circ}C$) ou maximum ($^{\circ}C$), et la température de l'air moyenne du jour ($^{\circ}C$) ont été recueillies à partir de la météorologie de surface de la Nasa (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/daily.cgi>) consultée à la date du 15 juin 2017. Les données journalières sur la température de l'air ont été utilisées pour vérifier l'exactitude du modèle proposé en calculant les températures journalières de l'air pour les cinq endroits étudiés.

3.3.2. Nouveau modèle proposé

La connaissance de la température journalière de l'air possède une importance majeure pour le secteur d'agriculture, de tourisme et d'économie. Tenant compte des conditions météorologiques pour un lieu bien déterminé vont contribuer à une bonne planification. Dans cette perspective, notre modèle proposé va tenir en considération de toutes ses variations des paramètres météorologiques pour une réelle estimation de la température journalière de l'air. Le modèle proposé de la température journalière de l'air en fonction des paramètres météorologiques est défini par l'expression suivante:

$$T_{air,m} = T_{min} + exp\left(\frac{I_m}{I_o} + \frac{P_m}{P_o} + \frac{(1 - RH_m)}{2}\right) \quad (3-14)$$

Avec

$T_{air,m}$ est la température moyenne ou quotidienne de l'air ($^{\circ}C$);

T_{min} est la température minimale quotidienne de l'air ($^{\circ}C$);

I_o est la constante solaire ($I_o = 1367 W / m^2$);

I_m est le rayonnement solaire global moyen incident sur une surface horizontale à l'endroit étudié (W / m^2);

P_o est la pression atmosphérique ($P_o = 101.235 kPa$);

P_m est la pression atmosphérique moyenne à l'endroit étudié (kPa);

RH_m est l'humidité relative moyenne (%).

Le rayonnement solaire global moyen (I_m) peut être déduit de l'équation (3-14) comme:

$$I_m = I_o \times \left[- \left(\frac{P_m}{P_o} + \frac{(1 - RH_m)}{2} \right) + \ln(T_{air,m} - T_{min}) \right] \quad (3-15)$$

Les résultats obtenus et ainsi leurs discussions sont présentés au chapitre 5.

3.4. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présentés deux modèles qui permettent la prédiction de la température ambiante instantanée et journalière de l'air tout en se basant sur les paramètres météorologiques collectés tels que : le rayonnement solaire global, la pression atmosphérique et l'humidité relative. Les données de température de l'air par jour utilisées pour calibrer et tester les deux modèles proposés ont été obtenues à partir de plusieurs emplacements choisis de manière aléatoire. Les résultats révèlent une bonne prédiction de la température ambiante instantanée et journalière de l'air dans les sites étudiés.

Références

- [1] **Bunker A., Wildenhain J., Vandenberg A., Henschke N., Rocklöv J., Hajat S., Sauerborn R.,** Effects of air temperature on climate-sensitive mortality and morbidity outcomes in the elderly; a systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. *EBioMedicine*, 6, pp. 258-268, 2016.
- [2] **Deser C., Terray L., Phillips A. S.,** Forced and internal components of winter air temperature trends over North America during the past 50 years: Mechanisms and implications. *J. Clim.*, 29, pp. 2237-2258, 2016.
- [3] **Carson J. E.,** Analysis of soil and air temperature by Fourier techniques. *J. Geophys. Res.*, 68, pp. 2217-2232, 1963.
- [4] **Carson J. E., Moses H.,** The annual and diurnal heat exchange cycle in upper layers of soil. *J. Appl. Meteorol.*, 2(3), pp. 397-406, 1963.
- [5] **Walter A.,** Notes on the utilization of records from third order climatological stations for agricultural purposes. *Agri. Meteorol.*, 4(2), pp. 137-143, 1967.
- [6] **Allen J. C.,** A modified sine wave method for calculating degree days. *Environ. Entomol.*, 5(3), pp. 388-396, 1976.
- [7] **Hansen J. E., Driscoll D. M.,** A mathematical model for the generation of hourly temperatures. *J. Appl. Meteorol.*, 16, pp. 935-948, 1977.

- [8] **De Wit C. T., Goudriaan J., Van Laar H. H.**, Simulation, respiration and transpiration of crops. Pudoc, Wageningen, the Netherlands, 1978.
- [9] **Patron W. J., Logan J. A.**, A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Agric. Meteorol.*, 23, pp. 205-216, 1981.
- [10] **Kline D. E., Reid J. F., Woeste F. E.**, Computer simulation of hourly dry-bulb temperatures. Va. Agric. Exp. Stn. No. 82-5, Virginia Polytech. Inst. & State Univ., Blacksburg, 1982.
- [11] **Wilkerson G. G., Jones J. W., Boote K. J., Ingram K. T., Mishoe J. W.**, Modeling soybean growth for crop management. *Trans. ASAE*, 26, pp. 63-73, 1983.
- [12] **Floyd R. B., Braddock R. D.**, A simple method for fitting average diurnal temperature curves. *Agric. For. Meteorol.*, 32, pp. 107-119, 1984.
- [13] **Wann M., Yen D., Gold H. J.**, Evaluation and calibration of three models for daily cycle of air temperature. *Agric. For. Meteorol.*, 34, pp. 121-128, 1985.
- [14] **Kimball B. A., Bellamy L. A.**, Generation of diurnal solar radiation, temperature, and humidity patterns. *Energy Agric.*, 5(3), pp. 185-197, 1986.
- [15] **Worner S. P.**, Evaluation of diurnal temperature models and thermal summation in New Zealand. *J. Econ. Entomol.*, 81(1), pp. 9-13, 1988.
- [16] **Fernandez C. J.**, Simulation of normal annual and diurnal temperature ascillations in non-mountainous mainland United States. *Agron. J.*, 84, pp. 244-251, 1992.
- [17] **Myrup L. O.**, A numerical model of the urban heat island. *J. Appl. Meteorol.*, 8(6), pp. 908-918, 1969.
- [18] **Goudriaan J., Waggoner P. E.**, Simulating both aerial microclimate and soil temperature from observations above the foliar canopy. *Neth. J. Agric. Sci.*, 20, pp. 104-124, 1972.
- [19] **Bilbao J. A., De Miguel A., Medina J. A., Lopez J. J.**, Model performance tests, CLIMED project Rep. to European Community DGXII. Applied Physics I Dept., Valladolid University, Spain, 1997
- [20] **Bilbao J. A., De Miguel A.**, Air temperature model evaluation in the north Mediterranean belt area. *J. Applied Meteorology*, 41(8), pp. 872-884, 2002.
- [21] **Hollands G. T., D'Andrea L. T., Morrison I. D.**, Effect of random fluctuations in ambient air temperature on solar system performance. *Sol. Energy*, 42, pp. 335-338, 1989.
- [22] **Boland J.**, The importance of the stochastic component of climatic variable in simulating the thermal behavior of domestic dwellings. *Sol. Energy*, 60, pp. 359-370, 1997.

- [23] **Knight K. M., Klein S. A., Duffie J. A.**, A methodology for the synthesis of hourly weather data. *Sol. Energy*, 46(2), pp. 109-120, 1991.
- [24] **Erbs D. G.**, Models and applications for weather statistics related to building heating and cooling loads. Ph.D. thesis, Mechanical Engineering Dept., University of Wisconsin, Madison, 1984.
- [25] **Amato U., Cuomo V., Fontana F., Serio F. C.**, Statistical predictability and parametric models of daily ambient temperature and solar irradiance: An analysis in the Italian climate. *J. App. Meteor.*, 28, pp. 711-721, 1989.
- [26] **Hernandez E., Garcia R., Teso M. T.**, Minimum temperature forecasting by stochastic techniques: An evidence of the heat island effect. *Mausam.*, 41, pp. 161-166, 1991.
- [27] **Macchiato M., Serio C., Lapenna V., La Rotonda L.**, Parametric time series analysis of cold and hot spells in daily temperature: An application in southern Italy. *J. Appl. Meteor.*, 32, pp. 1270-1281, 1993.
- [28] **Bakirci K.**, Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy*, 34(4), pp. 485-501, 2009.
- [29] **Fletcher A. L.**, Estimating daily solar radiation in New Zealand using air temperatures. *New Zealand Journal of Crop Horticultural Science*, 35, pp. 147-157, 2007.
- [30] **Raja I. A.**, Insolation sunshine relation with site elevation and latitude. *Sol. Energy*, 53(1), pp. 53-56, 1994.
- [31] **Rietveld M. R.**, A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agricultural Meteorology*, 19(2-3), pp. 243-252, 1978.
- [32] **Trabea A. A., Shaltout M. A. M.**, Correlation of global solar radiation with meteorological parameters over Egypt. *RenewableEnergy*, 21(2), pp. 297-308, 2000.
- [33] **Kumar R., Umanand L.**, Estimation of global radiation using clearness index model for sizing photovoltaic system. *RenewableEnergy*, 30(15), pp. 2221-2233, 2005.
- [34] **Ododo J. C.**, Prediction of Solar Radiation Using Only Maximum Temperature, and Relative Humidity. *Energy Conversion and Management*, 38(18), pp. 1807-1814, 1997.
- [35] **Chabane F., Moumami N., Brima A., Moumami A.**, Prediction of the theoretical and semi-empirical model of ambient temperature. *Frontiers in Energy*, 10(3), pp. 268-276, 2016.
- [36] **Idliman A.**, Theoretical study of a drying system leather skins for the Marrakech region, consisting of an agricultural greenhouse acting as a hot air solar generator and a conventional dryer. Dissertation for the Master's Degree. National School of Marrakech Morocco, 1990.

- [37] **Aguiar R.**, Séries sintéticas de parâmetros meteorológicos (Synthetic series of meteorological parameters). Ph.D. thesis, Lisbon University, Lisbon, Portugal, 1996.
- [38] **Cano D., Monget J.M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., Wald L.**, A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37, pp.31-39, 1986.
- [39] **Katihar A.K., Pandey C.K.**, A Review of Solar Radiation Models—Part I. *Journal of Renewable Energy*, pp.1-11, 2013.
- [40] **Muneer T., Younes S., Munawwar S.**, Discourses on solar radiation modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp.551-602, 2007.
- [41] **Safi S., Zeroual A., Hassani M.**, Prediction of global daily solar radiation using higher order statistics. *Renewable Energy*, 27, pp.647–666, 2002.
- [42] **Donatelli M., Bellocchi G., Fontana F.**, RadEst3.00: software to estimate daily radiation data from commonly available Meteorological variables. *European Journal of Agronomy*, 18, pp.363–367, 2003.
- [43] **Younes S., Muneer T.**, Improvements in solar radiation models based on cloud data. *Building Services Engineering Research and Technology*, 27, pp.41–54, 2006.
- [44] **Chabane F., Moumni N., Benramache S., Belahssan O., Bensahal D.**, Nusselt number correlation of SAH. *Journal of Power Technologies*, 93, pp.100– 110, 2013.
- [45] **Afrand M., Karimipour A.**, Theoretical analysis of various climatic parameter effects on performance of a basin solar still. *Journal of Power Technologies*, 97, pp.44– 51, 2017.

Chapitre 4

Etude expérimentale

Chapitre 4

Etude expérimentale

4.1. Introduction

L'énergie solaire c'est une énergie diffusée par le rayonnement solaire sur notre globe terrestre. Elle est à l'origine du cycle de la photosynthèse (monde végétale), la production de l'oxygène sur la terre et à la production de l'énergie électrique et thermique. La conversion de l'énergie solaire en énergie thermique se fait par le biais des capteurs solaires qui peuvent être plans ou concentriques. Ces capteurs solaires plans peuvent être utilisés à titre d'exemple dans le chauffage des maisons ou le séchage des aliments et fruits. Le processus de la conversion thermique consiste à faire passer un écoulement d'air entre l'absorbeur et la plaque inférieure qui va se réchauffer sous l'effet du rayonnement solaire et sortir avec une température plus élevée qu'à l'entrée.

Dans cette perspective, nous nous sommes engagé à concevoir notre capteur solaire toute en ayant pour objectif l'optimisation des paramètres de la conversion thermique telles que la température de : l'absorbeur, la plaque inférieure, le Plexiglas, le fluide caloporteur à la sortie et le rendement thermique du capteur solaire à air dans le site de Laghouat. Nous présentons dans ce chapitre notre conception du capteur solaire plan à air et le procédé de fabrication de ce dernier dans l'atelier de mécanique et nous terminerons par exposer les différents instrumentations et appareillages utilisées ainsi les conditions d'expérimentation.

4.2. Conception proposée

La Figure 4.1 montre une vue en perspective du capteur solaire à air conçue sous le logiciel SolidWorks montrant les deux parties principales du capteur : partie supérieure et partie inférieure du capteur. Pour les dessins de définitions et dessins d'ensemble des différents constituants du capteur solaire à air sont présentés dans l'Annexe A.

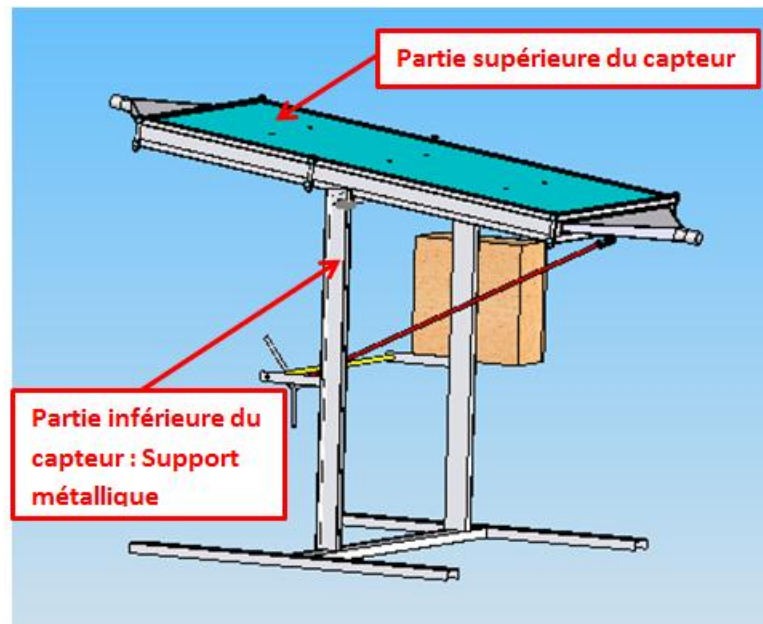


Figure 4.1 : Capteur solaire plan à air.

4.2.1. Support métallique avec un mécanisme de réglage d'angle

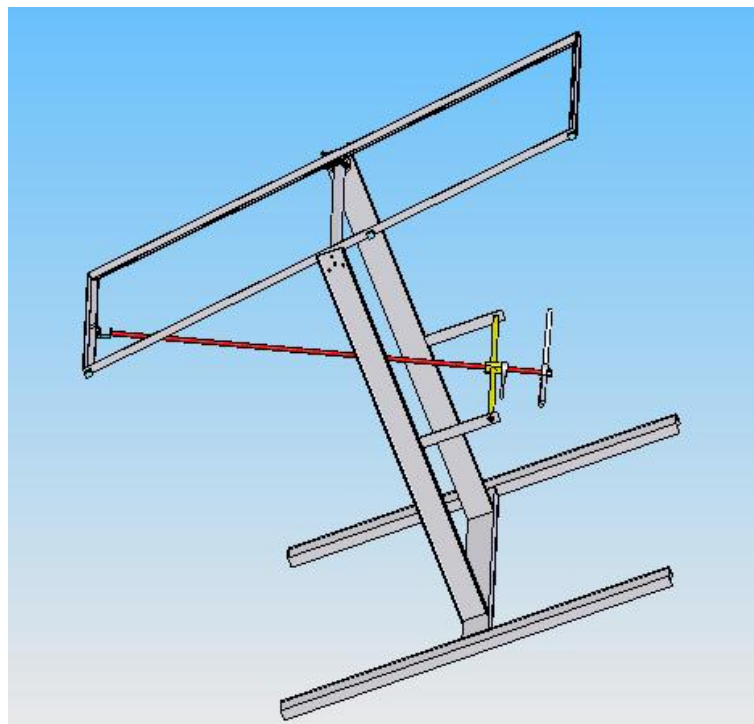


Figure 4.2 : Support métallique avec un mécanisme de réglage d'angle.

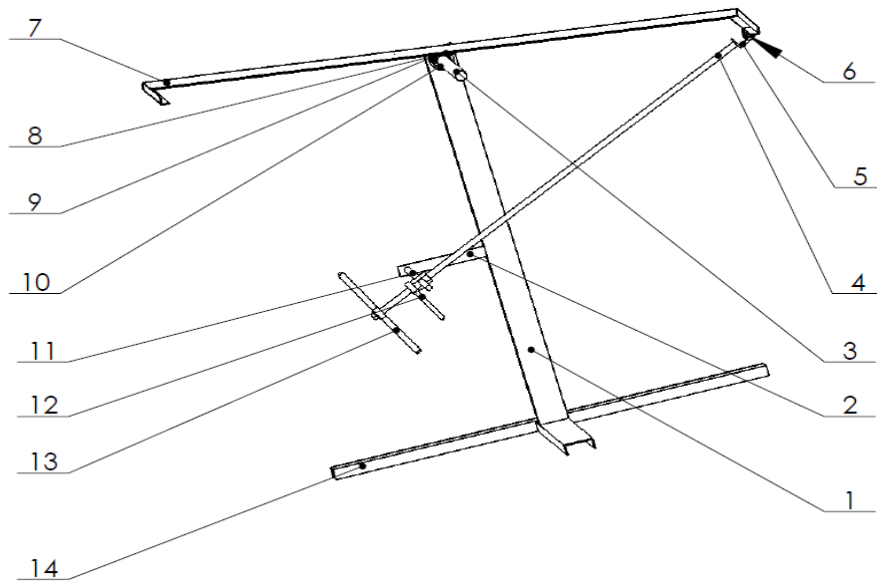


Figure 4.3 : Coupe du support métallique montrant les différents constituants.

Tableau 4.1 : Les éléments constitutifs du support métallique.

Numéro	Désignation
1	Appui vertical
2	Porte tige de guidage
3	Tube rond
4	Tige filetée
5	Porte tige filetée
6	Appui pour la tige de guidage
7	Cadre en cornière
8	Plaque
9	Moyeu d'articulation
10	Axe d'articulation
11	Tige de guidage
12	Bras frein
13	Manivelle
14	Traverse

La Figure 4.2 montre une vue en perspective du support métallique avec son mécanisme de réglage d'angle tandis que la Figure 4.3 montre ses différents constituants qui sont bien présentés dans le Tableau 4.1.

4.2.2. Capteur solaire

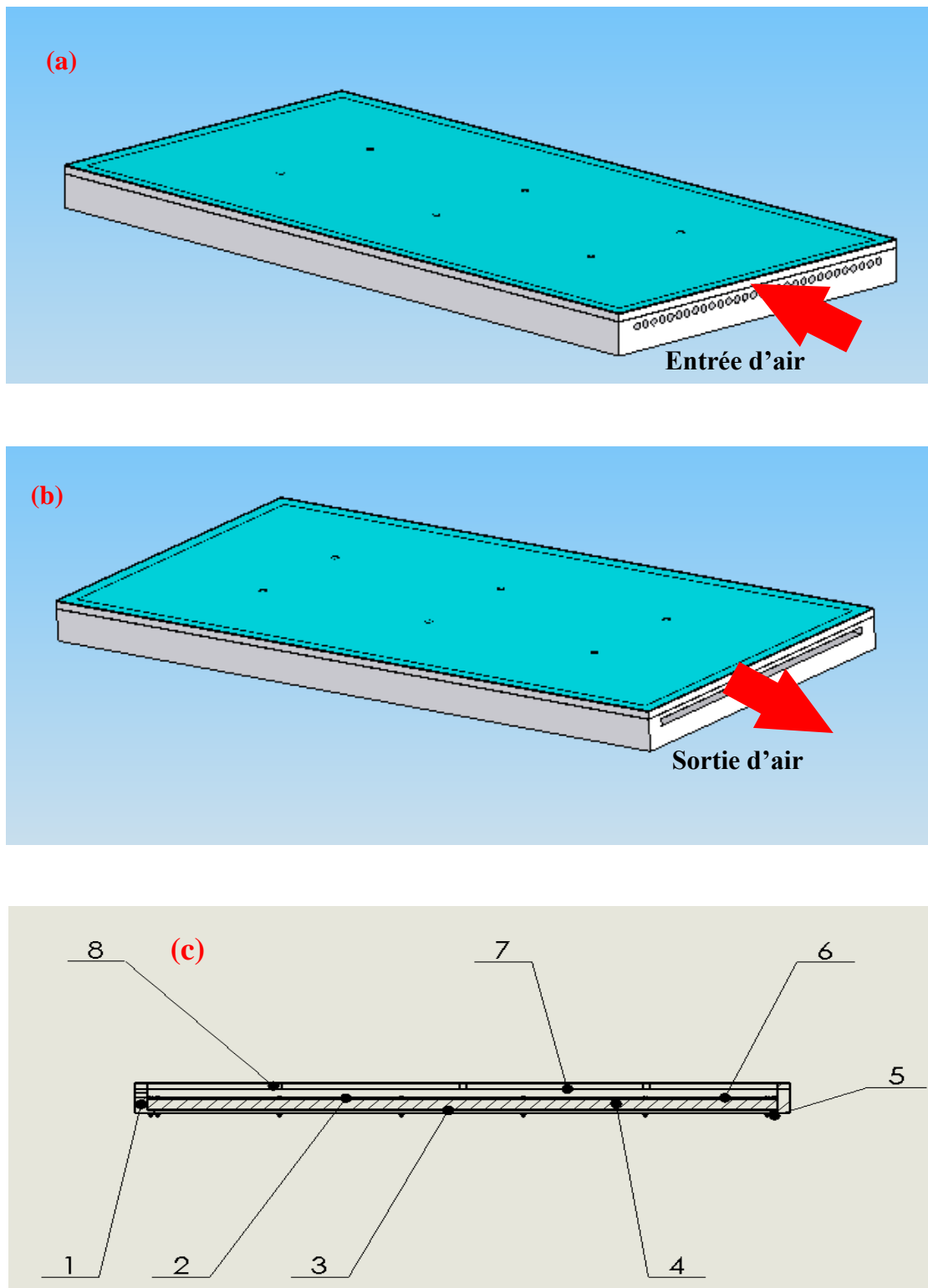


Figure 4.4 : Partie supérieure du capteur solaire : (a) entrée d'air, (b) sortie d'air et (c) Coupe longitudinale montrant les différents constituants.

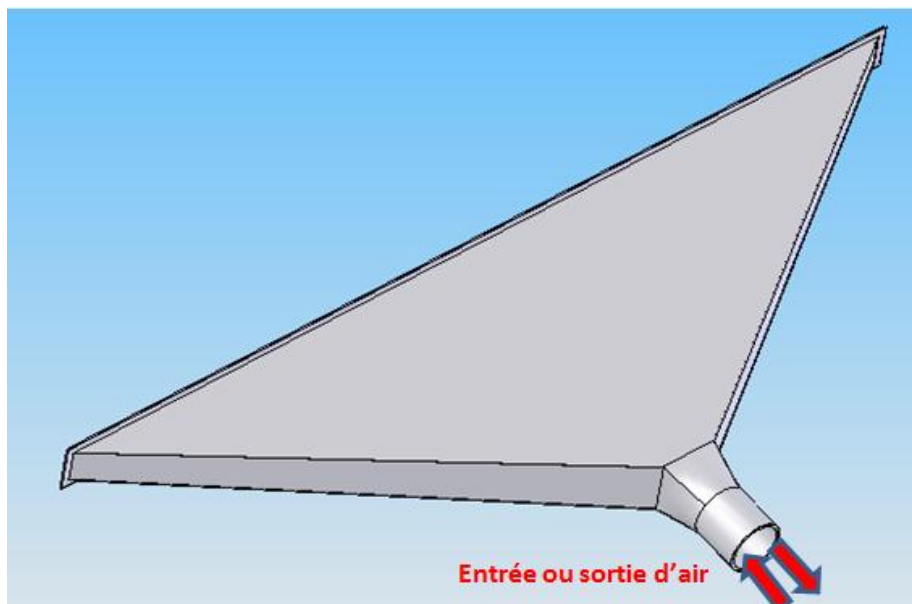
Tableau 4.2 : Les éléments constitutifs de la partie supérieure du capteur solaire.

Numéro	Désignation
1	Cadre en bois
2	Isolant en bois
3	Contreplaquée
4	Polystyrène
5	Vis à tête cylindrique
6	Plaque inférieure
7	Absorbeur
8	Support en bois

La Figure 4.4 montre une vue en perspective de la partie supérieure du capteur solaire à air conçue sous le logiciel SolidWorks montrant la direction d'entrée et sortie d'air. La coupe longitudinale de la partie supérieure renseigne sur ses différents constituants qui sont bien présentés dans le Tableau 4.2.

4.2.3. Collecteur

L'entrée et la sortie d'air se fait par le biais des deux collecteurs l'un pour l'entrée et l'autre pour la sortie comme il est montré sur la Figure 4.1 et la Figure 4.5.

**Figure 4.5** : Collecteur d'entrée ou sortie d'air.

4.2.4. Caisson en bois

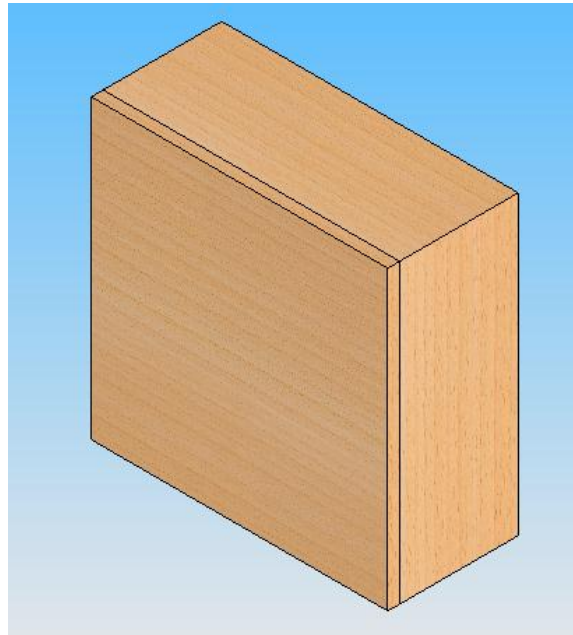


Figure 4.6 : Caisson en bois pour les afficheurs des sondes.

Ce caisson est fabriqué en bois. Il a pour rôle de recevoir tous les afficheurs de températures des sondes implantées dans la partie supérieure du capteur solaire ainsi les fils d'alimentation en électricité. Il joue le rôle de protecteur des afficheurs des températures contre les conditions météorologiques défavorables (voir Figure 4.6).

4.2.5. Dispositif expérimental

La Figure 4.7 montre le capteur solaire en état d'exploitation sur une plateforme située au sein de l'université de Laghouat. Les parties du capteur solaire sont : l'entrée et la sortie d'air, le capteur lui-même (cadre en bois, vitre, absorbeur, plaque inférieure et thermocouples), le support métallique, l'extracteur d'air et le caisson en bois pour les afficheurs des températures.

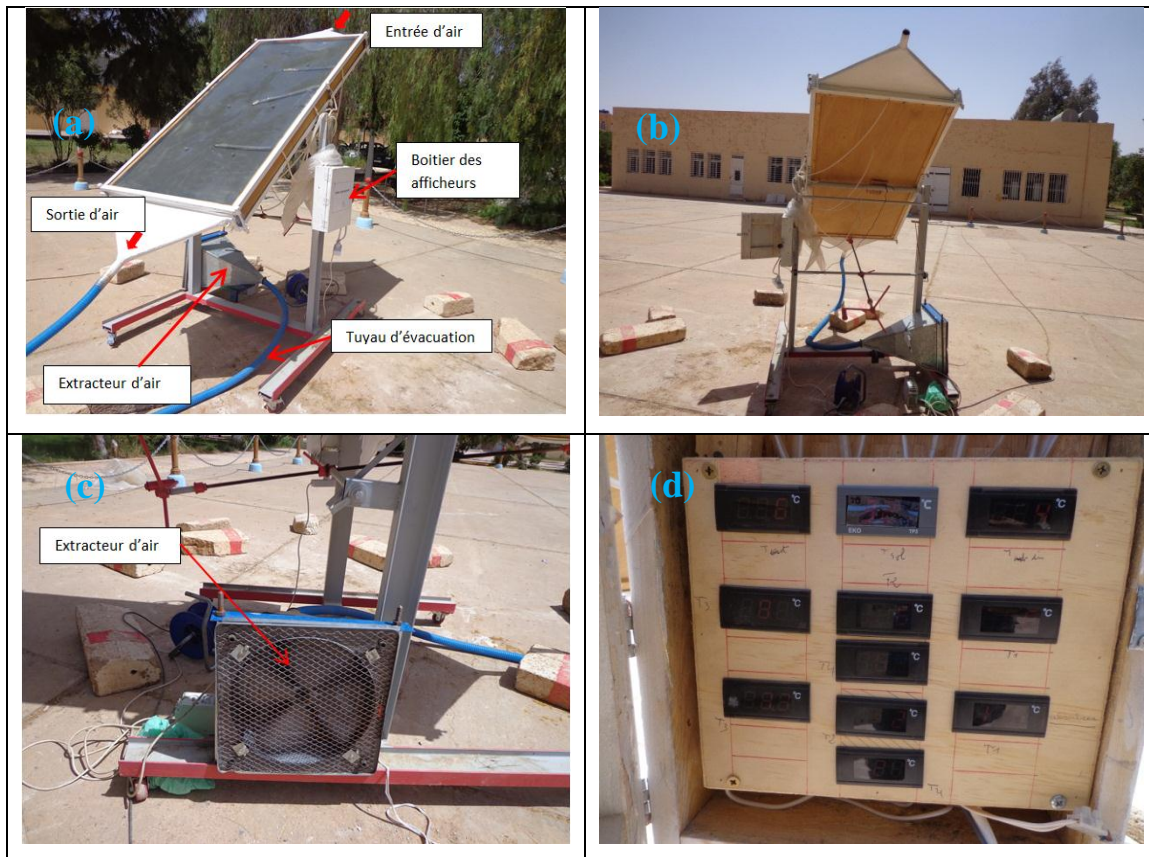


Figure 4.7 : Collecteur solaire à air : (a) vue de dessus, (b) vue de dessous, (c) extracteur d'air, (d) boîtier des afficheurs des températures.

4.3. Distribution des thermocouples sur la plaque d'absorbeur et la plaque inférieure

L'acquisition des températures est faite manuellement grâce à un ensemble de 11 thermocouples (modèle: DC-M02) répartis sur l'absorbeur et la plaque inférieure. Dans la veine d'écoulement d'air, on a installé deux thermocouples le premier à l'entrée et le second à la sortie du fluide caloporteur. Quatre autres thermocouples sont placés sur l'absorbeur et quatre thermocouples sont placés sur la plaque inférieure. Ces thermocouples vont nous permettre de suivre l'évolution de la température du fluide caloporteur s'écoulant dans le capteur de l'entrée, à l'intérieur du capteur et finalement à la sortie comme le montre la Figure 4.8. La température ambiante est également enregistrée. Les prises de températures sur le vitrage se font à l'aide d'un thermomètre infrarouge.

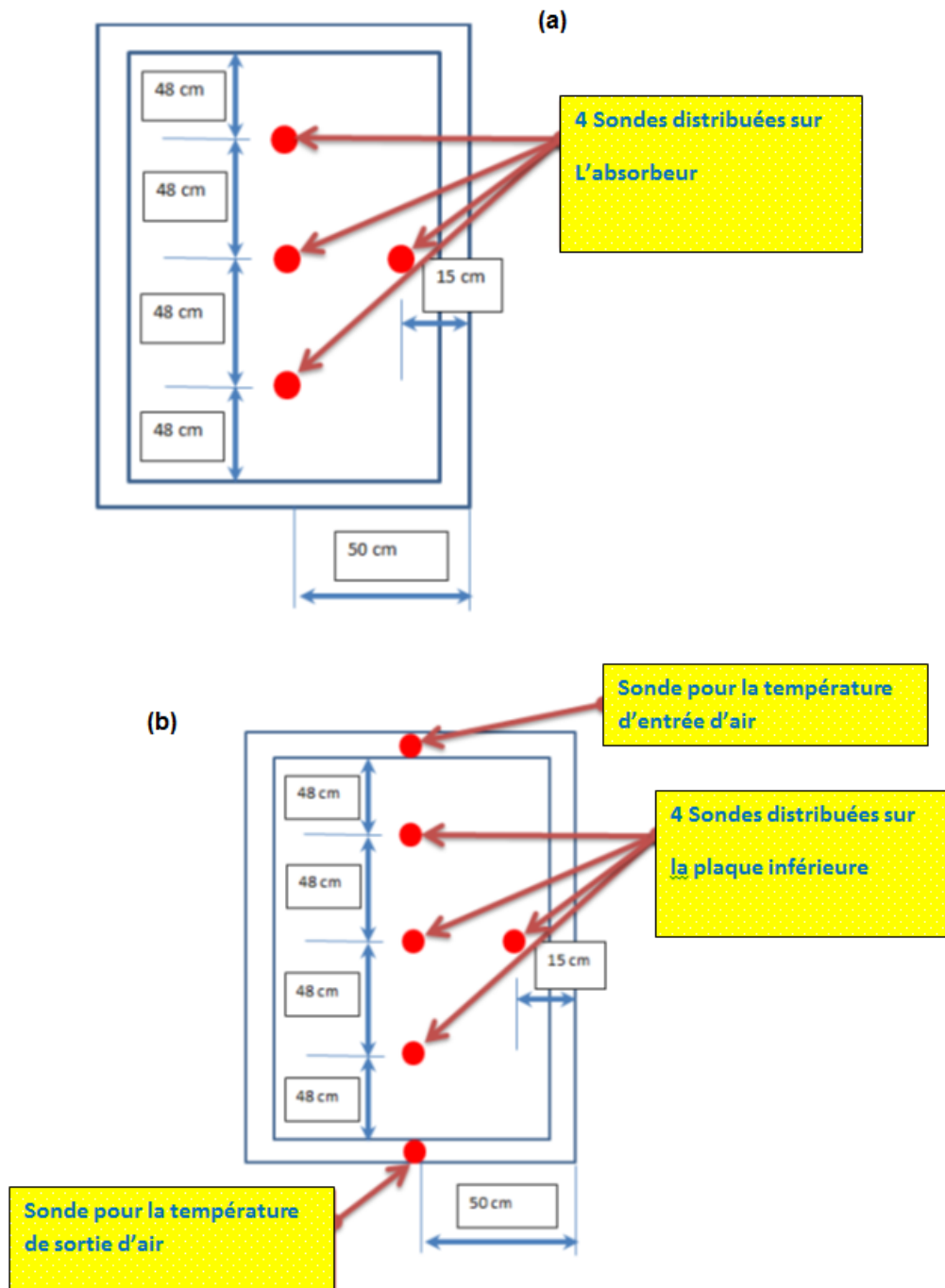
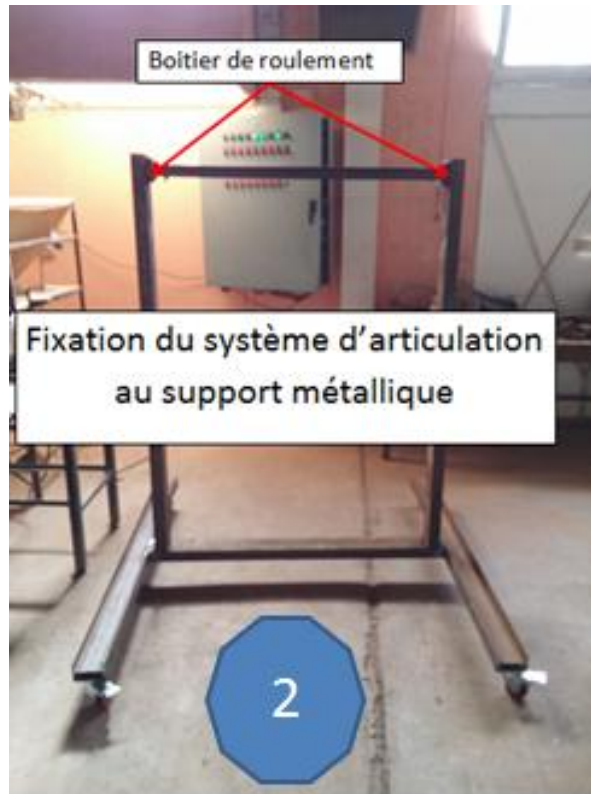


Figure 4.8: Distribution des thermocouples sur: (a) l'absorbeur, (b) la plaque inférieure.

4.4. Les étapes principales de fabrication du capteur solaire





La fixation des thermocouples sur la plaque



Une couche de peinture noir mat sur la face supérieure



Plaque portant les afficheurs en état de service



Dispositif expérimental fini





Figure 4.9 : Les différentes étapes de fabrication du panneau solaire allant de l'étape 1 jusqu'à l'étape 17.

La Figure 4.9 montre les différentes étapes de fabrication du dispositif expérimental :

1. Débutant par le traçage, découpage et soudage à l'arc du support métallique selon les dessins de définitions et d'ensembles (étape 1).
2. Le montage des roues vient après le soudage du cadre qui va donner au support métallique plus de liberté en déplacement (étape 2 et 3).
3. Après cette étape, on entame la fixation du support porte capteur (étape 4).
4. Montage du système de réglage d'angle (étape 5) ;
5. Montage du cadre supérieur par rapport au cadre inférieur (étape 6) ;
6. Montage du cadre en bois et emplacement de la plaque isolante (étape 7) ;
7. La mise en place du Polystyrène dans sa loge (étape 8) ;
8. La mise en place de la plaque isolante en bois (étape 9) ;
9. La mise en place de la plaque métallique (plaque inférieure) (étape 10) ;
10. La fixation de la plaque absorbeur (étape 11) ;
11. La fixation des thermocouples sur les deux plaques (étape 12) ;
12. Une couche de peinture noir mat sur la face supérieure de l'absorbeur (étape 13) ;
13. Montage de : Plexiglass, cadre supérieur et collecteurs d'entrée et sortie d'air (étape 14) ;
14. Montage du caisson portant les afficheurs de températures (étape 15) ;
15. Montage des afficheurs de températures et alimentation en courant électrique

(étape 16) ;

16. Et finalement, le dispositif est prêt à l'exploitation (étape 17).

4.5. Analyse statique du panneau solaire

Pour l'étude statique, trois cas sont considérés pour l'inclinaison du capteur solaire soumis sous les conditions météorologiques sont: 0 deg , 45 deg et 90 deg (voir la Figure 4.10). Dans cette analyse, trois forces ont été ciblées : la première est basse ($V_{vent,1} = 9.35$ m/s), la deuxième est moyenne ($V_{vent,2} = 20.92$ m/s) et la dernière est intense et critique ($V_{vent,3} = 29.59$ m/s) pour différents angles d'inclinaison du panneau solaire (voir le Tableau 4.3 et le Tableau 4.4). On a essayé d'exprimer cette force en fonction de la vitesse, densité de l'air et coefficient aérodynamique de traînée ($C_x = 1$) décrite par l'équation 4.1 suivante :

$$F = 1/2 \cdot \rho_{air} \cdot V^2 \cdot S \quad (4-1)$$

Avec: $\rho_{air} = 1.293$ Kg/m³

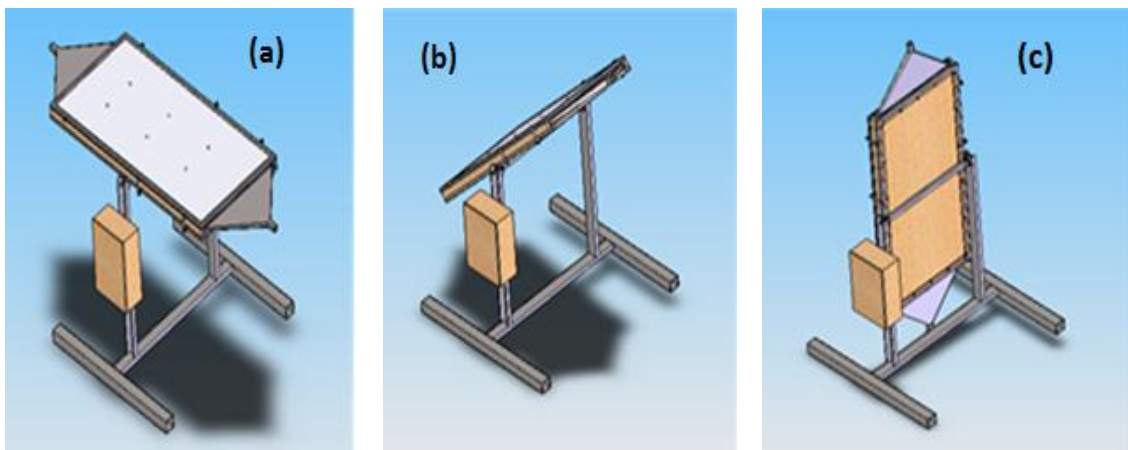


Figure 4.10 : Les trois angles d'inclinaisons prises pour l'étude statique du capteur : (a) 0 deg , (b) 45 deg, (c) 90 deg.

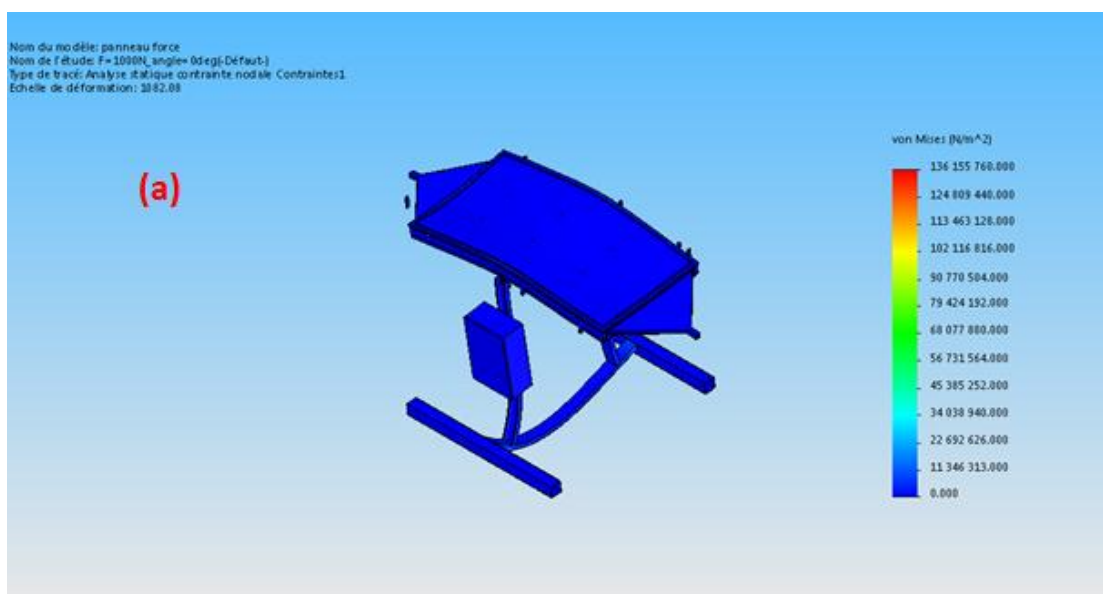
4.5.1. Contraintes de Von Mises pour différentes forces et angles d'inclinaison

Dans cette analyse statique, on vise à voir le comportement du panneau solaire soumis aux différentes conditions météorologiques défavorables et surtout son exposition aux différentes vitesses de vent (voir Tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Résultats des contraintes de Von Mises (N/m^2) pour différentes forces et angles d'inclinaison.

Force(N)	Angle (deg)	Contrainte de Von Mises (N/m^2)	
		Min	Max
100	0	0	1.36771e+007
	45	0	4.71857e+007
	90	0	2.88574e+007
500	0	0	6.80779e+007
	45	0	2.36019e+008
	90	0	1.4405e+008
1000	0	0	1.36156e+008
	45	0	4.71566e+008
	90	0	2.88099e+008

La Figure 4.11 présente les contraintes de Von Mises que le capteur solaire subit lors de l'application de la force $F=1000\text{N}$ pour différents angles d'inclinaison.



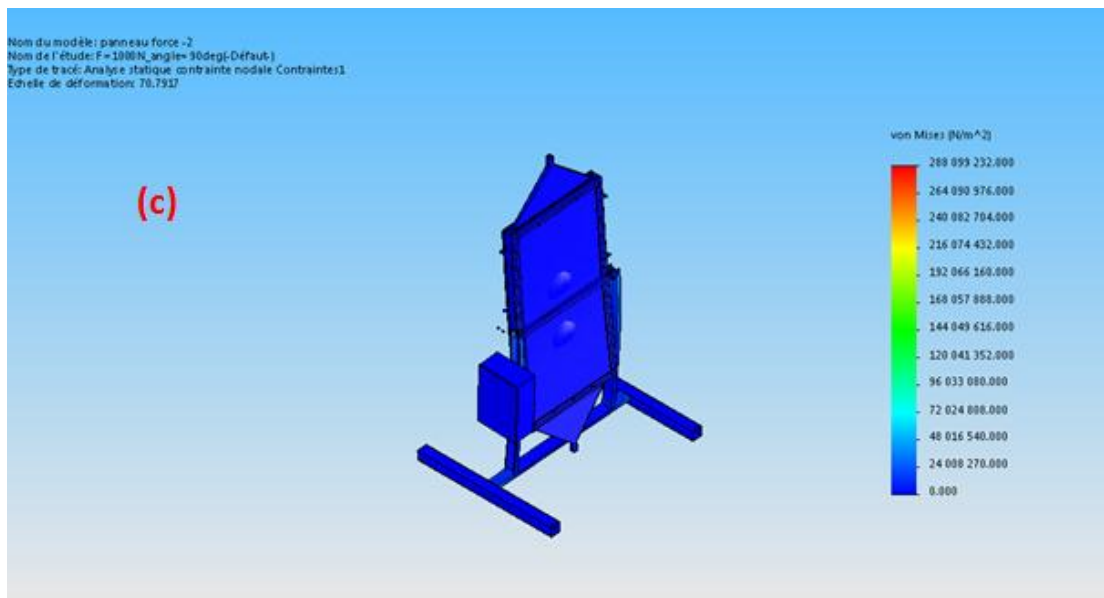
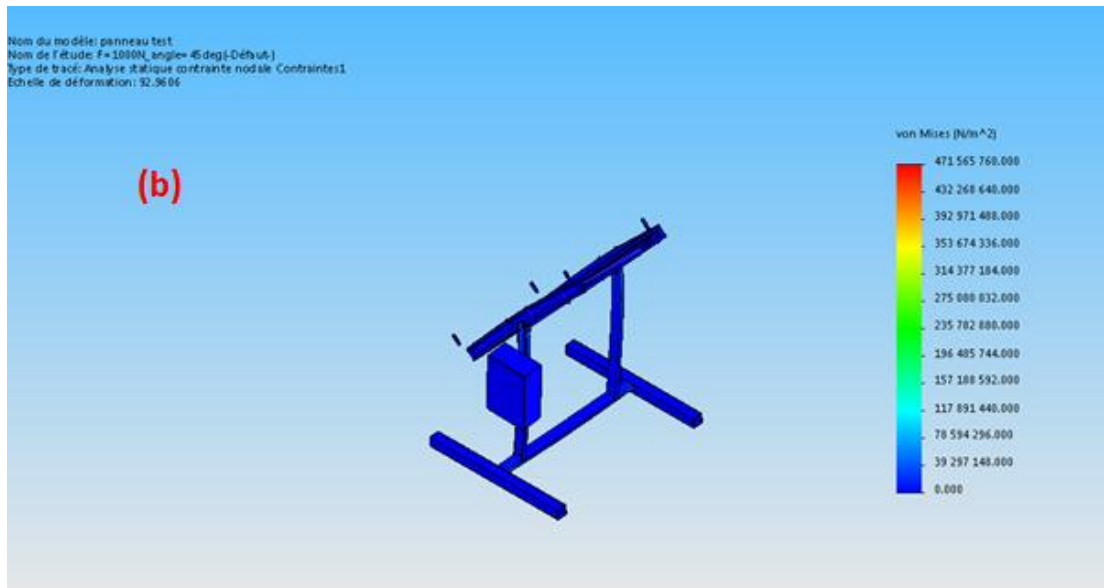


Figure 4.11 : Présentation du contrainte de Von Mises (N/m²) pour une force F=1000N et angle égale à :(a) 0 deg, (b) 45 deg et (c) 90 deg.

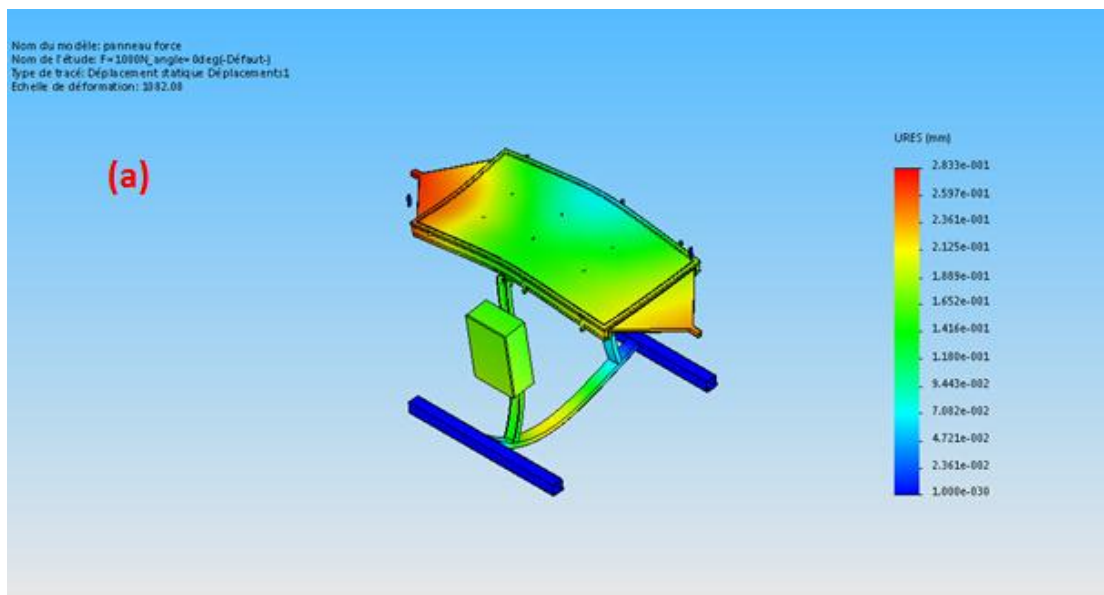
4.5.2. Déplacements pour différents forces et angles d'inclinaison

Le Tableau 4.4 présente les résultats des déplacements pour différentes forces et angles d'inclinaison.

Tableau 4.4 : Résultats des déplacements (mm) pour différentes forces et angles d'inclinaison.

Force(N)	Angle (deg)	Déplacement résultant (mm)	
		Min	Max
100	0	0	0.0282325
	45	0	0.317451
	90	0	0.438203
500	0	0	0.141642
	45	0	1.58726
	90	0	2.19198
1000	0	0	0.283284
	45	0	3.17586
	90	0	4.38395

La Figure 4.12 présente les déplacements causés par l'application de force $F=1000\text{N}$ pour différents angles d'inclinaison.



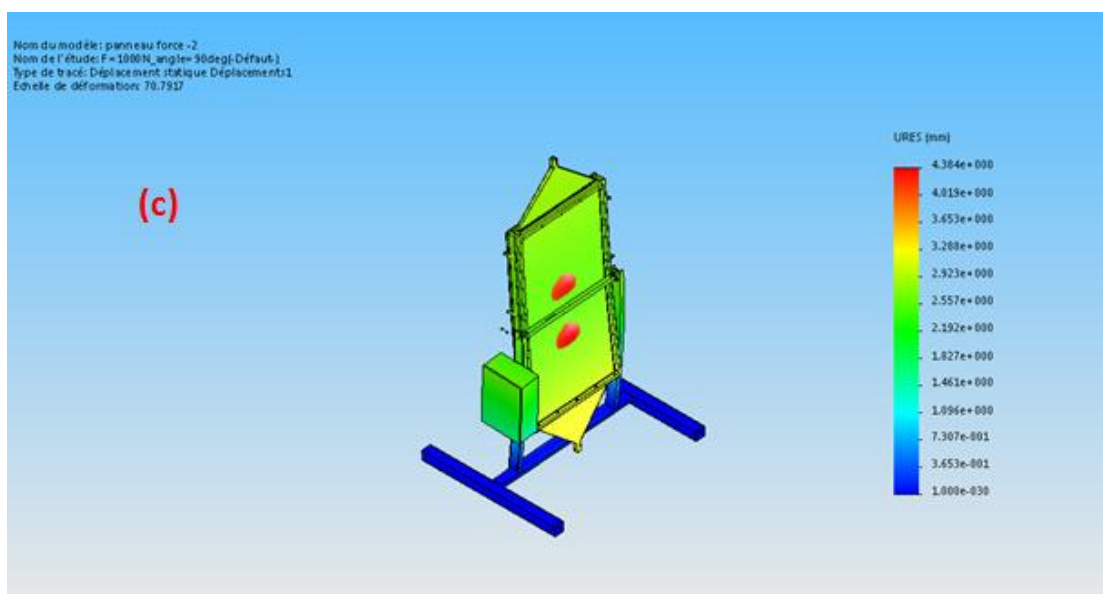
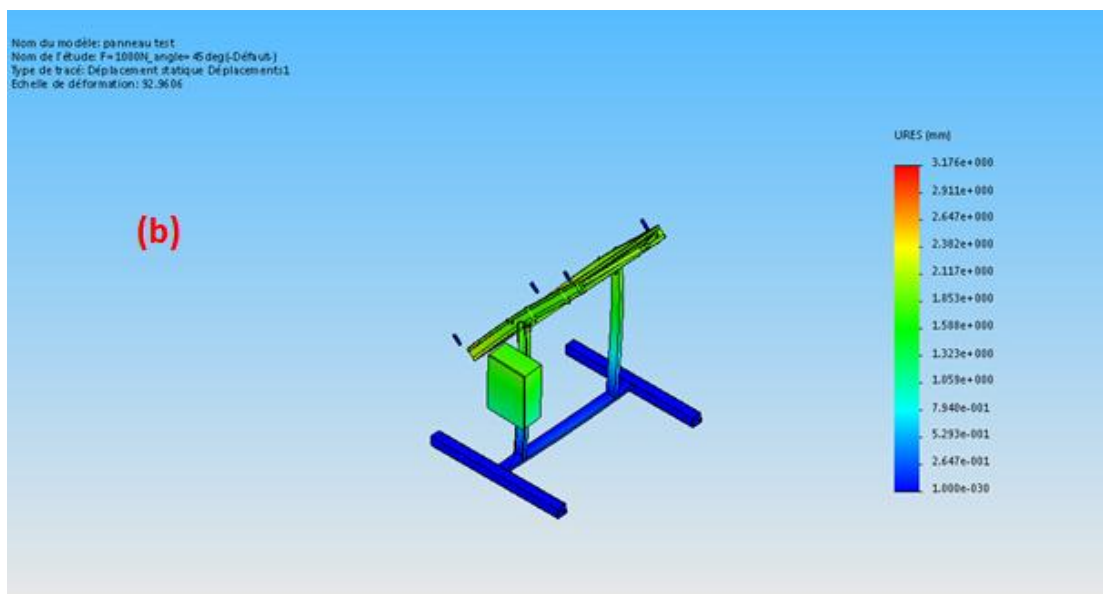


Figure 4.12:Présentation du déplacement (mm) pour une force $F=1000\text{N}$ et angle égale à : (a) 0 deg, (b) 45 deg et (c) 90 deg.

4.6. Matériels et méthodes

4.6.1. Description du dispositif expérimental

On présente dans cette section le prototype d'un capteur solaire à une seule passe d'air qui est fabriqué au sein du département de génie mécanique de l'université de Laghouat en vue de permettre un test expérimental du prototype proposé (voir Figure 4.9 (étape 17)). Ce prototype est constitué précisément de :

1. Une plaque de Plexiglas transparent de 4 mm d'épaisseur, utilisée comme couverture;

2. Tôle d'acier galvanisé de 1.7 mm d'épaisseur, la première pour l'absorbeur de 2 m × 1 m de surface peinte en noir mat et la deuxième pour la plaque inférieure de 1.92 m × 0.92 m;
3. Plaque isolante en polystyrène de 40 mm d'épaisseur pour assurer l'isolation de la surface arrière du capteur solaire;
4. Plaque isolante en bois de 3 mm d'épaisseur pour la protection du polystyrène contre l'endommagement possible causé par l'air chauffé ;
5. Plaque en contreplaqué de 3 mm utilisé comme couverture arrière protégeant le polystyrène contre les agents extérieurs et atmosphériques ;
6. Coffre en bois dur qui assure l'isolation latérale et maintient tous les éléments de l'insolateur solidement ensemble ;
7. La hauteur de la veine d'air mobil est de 40 mm. Le capteur est placé sur un châssis permettant d'avoir une inclinaison variable par rapport à l'horizontale.

A l'entrée du conduit d'écoulement de dimensions 4 cm × 0.92 m × 1.92 m se trouve une rangée de 21 trous de diamètre de 2 cm à travers lesquels l'air ambiant passe à l'intérieur de l'insolateur. L'air chauffé est évacué par la suite à travers une section convergente à la sortie du conduit d'écoulement.

4.6.2. Instrumentation et appareillage





Figure 4.13 : Instrumentation et appareillage:(a) Solarimètre, (b) L'anémomètre à ailettes, (c)Thermomètre digital, (d) Thermomètre infrarouge, (e) Rapporteur d'angle et (f) Variateur de tension.

Pour la mesure de l'intensité du rayonnement solaire global, on a choisi un solarimètre (Kimo SL200) qui a été placé sur le cadre du capteur solaire avec la même inclinaison et la même orientation du capteur solaire à air (Figure 4.13(a)). Le débit d'air a été mesuré par un anémomètre à hélice (Lutron AM-206M)(Figure 4.13(b)). Toutes les températures ont été mesurées en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (Figure 4.13(c)). La température à la surface de la vitre et la température du sol sont mesurées par un thermomètre infrarouge (PCE-777) (Figure 4.13(d)). Pour régler l'inclinaison du capteur solaire, on a utilisé un rapporteur d'angle) (Figure 4.13(e)). Par le biais de l'utilisation d'un variateur de tension, on peut régler la vitesse de

rotation du moteur de l'extracteur (réglage du débit d'air) comme le montre la Figure 4.13 (f). L'exactitude et la plage de mesure est donnée par le Tableau 4.5 des instruments utilisées.

Tableau 4.5: Caractéristiques techniques des appareils de mesure.

Instrument	Plage de mesure	Exactitude	Résolution
Solarimètre	1 à 1300 W/m ²	5%	1 W/m ²
Anémomètre à hélice	0.4 à 35 m/s	± 2 %	0.1 m/s
Thermomètre digital	-50°C à 150 °C	±1°C	0.1 °C
Thermomètre infrarouge	-30°C à 260°C	±2%	0.1 °C

4.6.3. Conditions d'expérimentation

L'expérimentation sur le collecteur solaire à une seule passe d'air s'est déroulée sous des conditions météorologiques normales sous un ciel clair et un vent de vitesse faible pendant la période d'expérimentation. Les tests ont été effectués à l'Université de Laghouat avec des coordonnées géographiques (Latitude : 33°47'59" Nord et Longitude : 2°51'54" Est) et une altitude par rapport au niveau de la mer : 764 m. Le dispositif d'expérimentation a été orienté vers le sud tout en prenant en compte la possibilité de variation de l'angle d'azimut entre + 50 degrés et -50 degrés avec un pas de 10 degrés et une inclinaison variant de 0 degré à 90 degrés par rapport au plan horizontal. Les tests ont aussi compris la variation de la distance entre l'absorbeur et la vitre (20 mm, 27 mm et 34 mm).

L'étude a pris en compte l'utilisation d'un simple ou double vitrage. L'écoulement d'air à l'intérieur du capteur solaire a été assisté par un système de ventilateur d'extraction à régulation qui va nous permettre de fixer les cinq débits volumétriques suivants : 0.0041475 m³/s, 0.00819546 m³/s, 0.01002036 m³/s, 0.01118166 m³/s et 0.0129402 m³/s. Les paramètres de fonctionnement du capteur solaire ont été enregistrés manuellement à chaque demi-heure à partir de 09h00 jusqu'à 16h00 par l'absence d'un système d'acquisition automatique de données. Les paramètres de fonctionnement sont les suivants :

- Température de l'absorbeur,
- Température de la plaque inférieure,
- Température de la vitre,
- Température ambiante,
- Température de sortie du fluide,
- Rayonnement solaire.

Plusieurs études ont été ciblées dont le but de tester le bon fonctionnement du capteur solaire dans le site de Laghouat et collecter des informations qui peuvent être servir par la suite dans l'exploitation du capteur dans différents domaines. Parmi ces études et leurs conditions de déroulement, on a :

4.6.3.1. Variation des débits

Le Tableau 4.6 présente les conditions d'expérimentation pour les différents débits étudiés.

Tableau 4.6 : Les conditions d'expérimentation pour différents débits.

N°	Angle d'inclinaison (°)	Débit volumétrique (m ³ /s)	Etat de ciel	Date
1	36.7	0.0041475	Clair	13.03.2017
2		0.00819546	Clair	09.03.2017
3		0.01002036	Clair	05.02.2017
4		0.01118166	Clair	06.03.2017
5		0.0129402	Clair	03.03.2017

4.6.3.2. Variation de la distance entre l'absorbeur et la vitre

Le Tableau 4.7 présente les conditions d'expérimentation pour les différentes distances étudiées.

Tableau 4.7 : Les conditions d'expérimentation pour les différentes distances étudiées.

Date	Distance H (mm)	Débit volumétrique (m ³ /s)	Angle d'inclinaison (°)	Etat du ciel
02/03/2017	20	0.0129402	30	Clair
12/04/2017	27		30	Clair
08/05/2017	34		30	Partielle

4.6.3.3. Variation des angles d'inclinaison

Le Tableau 4.8 présente les conditions d'expérimentation pour différents angles d'inclinaisons.

Tableau 4.8 : Les conditions d'expérimentation pour différents angles d'inclinaisons.

Date	Débit volumétrique (m ³ /s)	Angle d'inclinaison (°)	Etat du ciel
31/01/2017	0.01002036	0	Clair
01/02/2017		10	Clair
06/02/2017		20	Clair
07/02/2017		30	Clair
08/02/2017		40	Clair
09/02/2017		50	Partiel
11/02/2017		60	Partiel
17/02/2017		70	Clair
18/02/2017		80	Clair
19/03/2017		90	Clair

4.6.3.4. Variation des angles d'azimut

Le Tableau 4.9 présente les conditions d'expérimentation pour différents angles d'azimut.

Tableau 4.9 : Les conditions d'expérimentation pour différents angles d'azimut.

Date	Débit volumétrique (m ³ /s)	Angle d'azimut (°)	Etat du ciel
04/03/2017	0.01002036	-50	Partiel
17/03/2017		-40	Clair
16/03/2017		-30	Partiel
15/03/2017		-20	Clair
14/03/2017		-10	Clair
18/04/2017		0	Clair
06/04/2017		10	Clair
07/04/2017		20	Clair
08/04/2017		30	Clair
14/04/2017		40	Clair

4.6.3.5. Simple et double vitrage

Le Tableau 4.10 et le Tableau 4.11 présentent les conditions d'expérimentation pour les cas simple et double vitrage.

Tableau 4.10 : Les conditions d'expérimentation pour un simple vitrage.

Date	Débit volumétrique (m ³ /s)	Angle d'inclinaison (°)	Etat du ciel
15/02/2018	0.0129402	40	Clair

Tableau 4.11 : Les conditions d'expérimentation pour un double vitrage.

Date	Débit volumétrique (m ³ /s)	Angle d'inclinaison (°)	Etat du ciel
13/03/2018	0.0129402	40	Clair

4.7. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre banc d'essai en exposant tous les éléments constitutifs de la partie supérieure et de la partie inférieure du capteur solaire à air. La distribution des thermocouples sur la plaque d'absorbeur et la plaque inférieure a été aussi donnée pour montrer les différents points où les mesures ont été prises. Nous avons montré les étapes principales de fabrication du capteur solaire de la première phase jusqu'à la dernière étape (produit fini). Les instruments et appareillages utilisées dans la partie expérimentale ont été présentés et finalement, on a terminé par donner les conditions d'expérimentation pour tous les paramètres étudiés.

Chapitre 5

Résultats et discussion

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1. Introduction

L'optimisation des performances des capteurs solaires thermiques dépend essentiellement de leurs conceptions et matériaux utilisés. Connaissant les mécanismes de fonctionnement entrant dans ce processus de transfert, va nous conduire à mieux maîtriser tous les paramètres entrant dans ce processus et par la suite de les optimiser. Dans ce chapitre, nous présenterons nos résultats théoriques et expérimentaux concernant l'application des deux modèles proposés : l'un à la prédiction de la température instantanée de l'air et l'autre à la détermination de la température journalière de l'air toute en se basant sur les paramètres météorologiques tels que : le rayonnement solaire globale, la pression atmosphérique et l'humidité relative. Nous présenterons aussi les différents résultats permettant d'évaluer les performances du capteur et d'optimiser les paramètres suivants : angle d'inclinaison du capteur solaire, angle d'azimut, débit de l'air, hauteur entre l'absorbeur et le Plexiglas et le double vitrage.

5.2. Evolution expérimentale et simulée de la température ambiante de l'air

L'exactitude des modèles considérés a été testée en calculant l'erreur moyenne (MBE), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur moyenne en pourcentage (MPE) et le coefficient de détermination (R^2).

La différence entre les valeurs calculées (ou estimées) et mesurées (ou observées) de la température de l'air est définie comme suit:

$$d_i = T_{i,obs} - T_{i,est} \quad (5-1)$$

Les $T_{i,est}$ et $T_{i,obs}$ sont les valeurs estimées et observées de la température de l'air.

Les paramètres statistiques sont donnés par les relations suivantes:

5.2.1. Méthodes d'analyse des erreurs

5.2.1.1. L'erreur moyenne (MBE)

Le test de MBE fournit des informations sur la performance à long terme des modèles étudiés. Une valeur MBE positive donne la valeur moyenne de la surestimation dans les valeurs calculées et vice versa. En général, un petit MBE est souhaitable comme il est indiqué par Oliveiraa et al. [1].

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_1^N d_i \quad (5-2)$$

5.2.1.2. L'erreur moyenne absolue (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_1^N |d_i| \quad (5-3)$$

5.2.1.3. L'erreur quadratique moyenne (RMSE)

La valeur de RMSE est toujours positive, représentant zéro dans le cas idéal. L'erreur quadratique moyenne donne des informations sur la performance à court terme des corrélations en permettant une comparaison terme par terme de l'écart réel entre les valeurs prédites et mesurées. Plus la valeur étant faible, plus la performance du modèle est meilleure.

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N d_i^2 \right)^{1/2} \quad (5-4)$$

5.2.1.4. Le coefficient de détermination (R^2)

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_1^N d_i^2}{\sum_1^N (Y_{iN} - \bar{Y})^2} \right) \quad (5-5)$$

Avec

$$\bar{Y} = 1/N \times \left(\sum_1^N Y_{obs} \right) \quad (5-6)$$

Où, N est le nombre de mesures ou d'observations.

5.2.1.5. L'erreur moyenne de pourcentage (MPE)

$$MPE(\%) = \frac{1}{n} \sum_1^N \left(\frac{d_i}{T_{i,obs}} \right) \times 100 \quad (5-7)$$

Un pourcentage d'erreur compris entre -10% et + 10% est considéré comme acceptable par Muzathik et al. [2].

5.2.2. Détermination instantanée de la température ambiante de l'air

5.2.2.1. Évaluation du modèle sur des jours choisis au hasard

Plusieurs modèles sont basés sur les températures maximales et minimales quotidiennes de l'air pour prédire les températures horaires de l'air. Pour cette sous-section, quatre jours ont été choisis au hasard entre janvier 2015 et mars 2016 pour voir le comportement des quatre modèles étudiés pour calculer les températures horaires de l'air. Par conséquent, il existe des différences de températures entre les températures observées et estimées pour chaque modèle qui peuvent être discutées en termes de précision du modèle. L'ampleur des erreurs pour chaque modèle varie selon le moment de la journée.

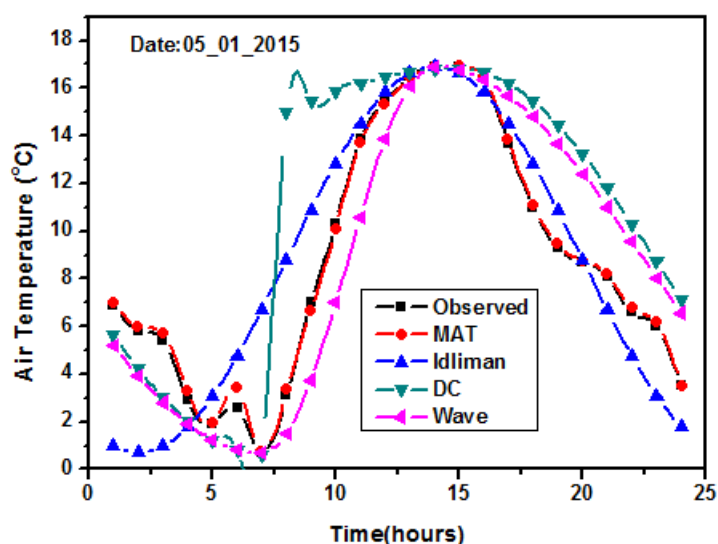


Figure 5.1 : Températures horaires estimées par les quatre modèles en fonction du temps par rapport aux données observées pour la journée: 05-01-2015.

La courbe du modèle MAT a donné une bonne estimation des données observées pendant toute la journée. Le modèle MAT surestime légèrement les données observées (de minuit à 9h00 et de midi à minuit). Le modèle Idliman sous-estime les données observées (de minuit à 4h00 et de 20h00 à minuit) et les surestime dans l'intervalle (de 5h00 à 20h00). Le modèle Double cosinus surestime les données observées (de 8h00 à 24h00) et les sous-estime dans l'intervalle (de minuit à 8h00). Enfin, le modèle Wave surestime les données observées (de midi à 24h00) et les sous-estime (de minuit à midi) comme indiqué sur la Figure 5.1. Des résultats comparables ont été obtenus pour les autres jours tels que présentés dans Figure 5.3, Figure 5.5 et Figure 5.7. La valeur de l'erreur absolue à d'autres moments de la journée (05-

01-2015) était inférieure à $1,2^{\circ}\text{C}$ pour le modèle MAT, $7,7^{\circ}\text{C}$ pour Wave, 12°C pour Idliman et $14,3^{\circ}\text{C}$ pour Double cosinus comme le montre la Figure 5.2.

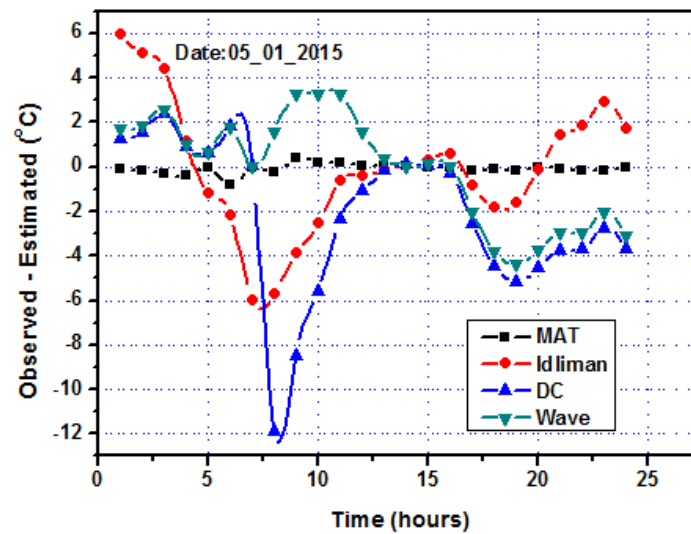


Figure 5.2 : Comparaison des différences des différences entre les températures de l'air observées et estimées en fonction du temps pour les quatre modèles étudiés pour la journée: 05-01-2015.

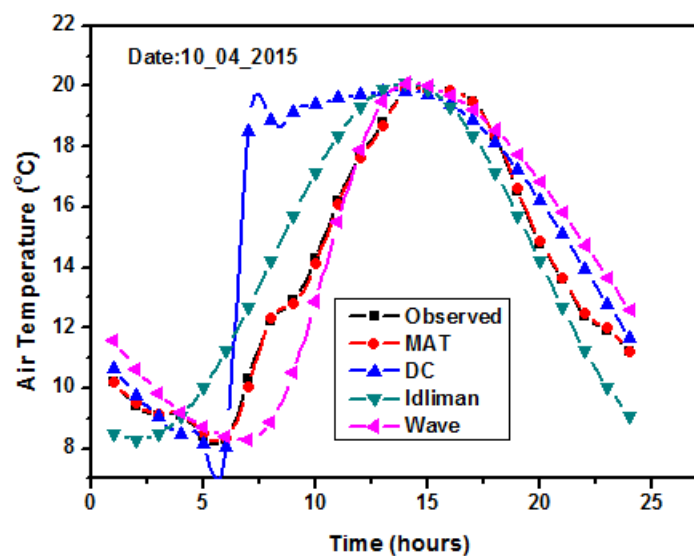


Figure 5.3 : Températures horaires estimées par les quatre modèles en fonction du temps par rapport aux données observées pour la journée: 10-04-2015.

La valeur de l'erreur absolue à un autre moment de la journée (10-04-2015) était inférieure à 0.4°C pour le modèle MAT, mais elle était la plus élevée de 5°C pour Idliman, de 6°C pour Wave et de 9°C pour les modèles Double cosinus comme le montre la Figure 5.4.

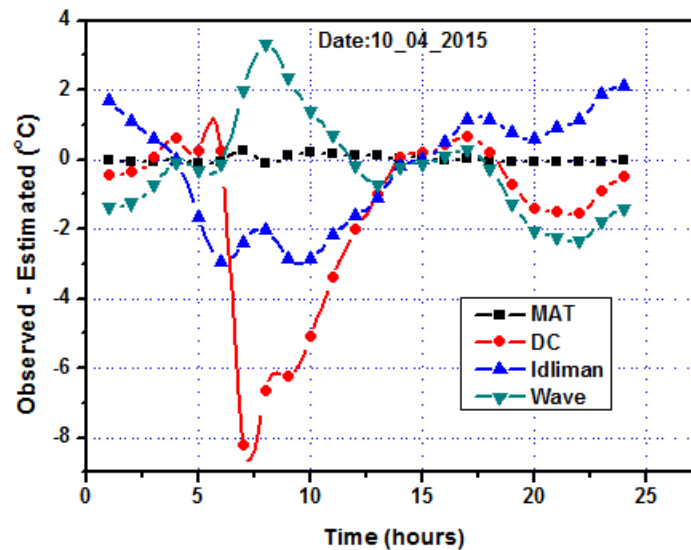


Figure 5.4 : Comparaison des différences entre les températures de l'air observées et estimées en fonction du temps pour les quatre modèles étudiés pour la journée: 10-04-2015.

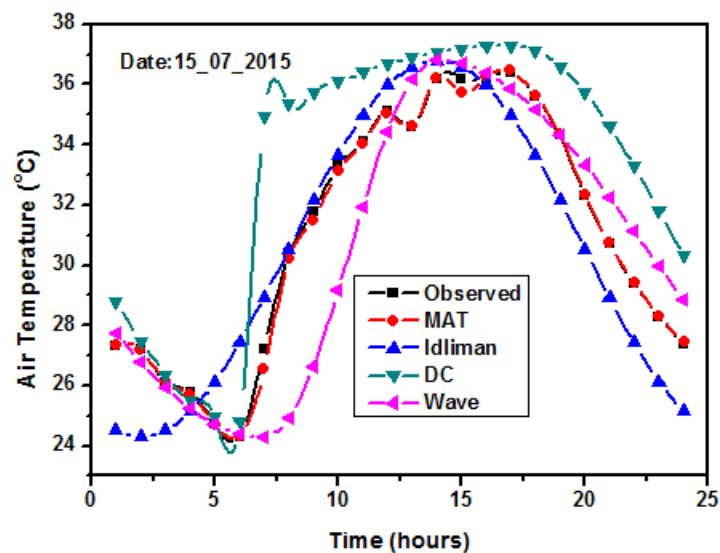


Figure 5.5 : Températures horaires estimées par les quatre modèles en fonction du temps par rapport aux données observées pour la journée: 15-07-2015.

La valeur de l'erreur absolue à un autre moment de la journée (15-07-2015) était inférieure à 1°C pour le modèle MAT, mais elle était la plus grande pour les autres modèles de l'intervalle (de 6 °C à 8 °C) comme le montre la Figure 5.6. La plus petite valeur de la valeur de l'erreur absolue était d'environ 4h00 et 13h.00 pour tous les modèles.

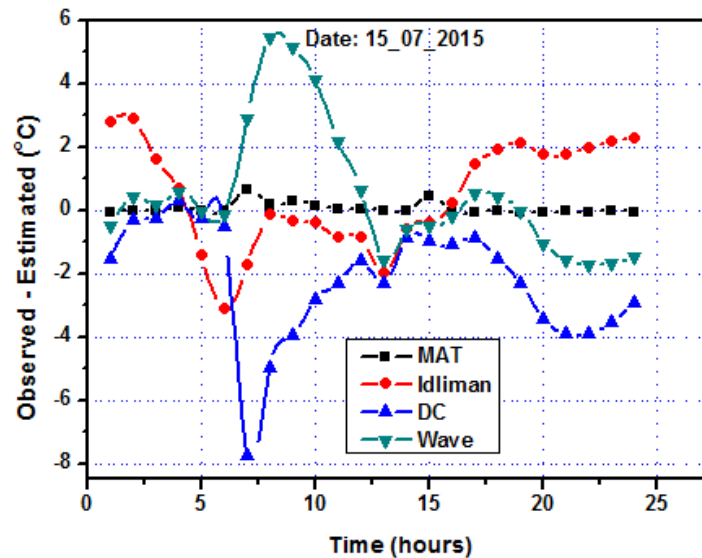


Figure 5.6 : Comparaison des différences entre les températures de l'air observées et estimées en fonction du temps pour les quatre modèles étudiés pour la journée: 15-07-2015.

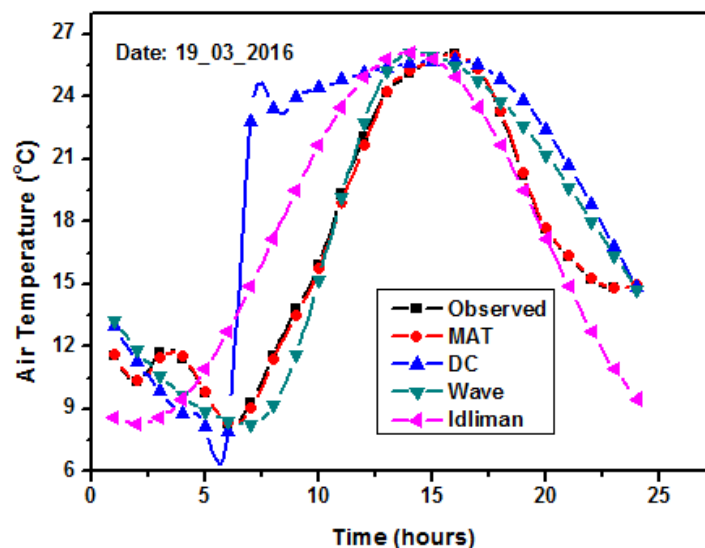


Figure 5.7 : Températures horaires estimées par les quatre modèles en fonction du temps par rapport aux données observées pour la journée: 19-03-2016.

La valeur de l'erreur absolue à un autre moment de la journée (19-03-2016) était inférieure à 0.6°C pour le modèle MAT, mais elle était plus élevée pour les autres modèles dans l'intervalle (de 6°C à 16.5°C) comme il est présenté dans la Figure 5.8.

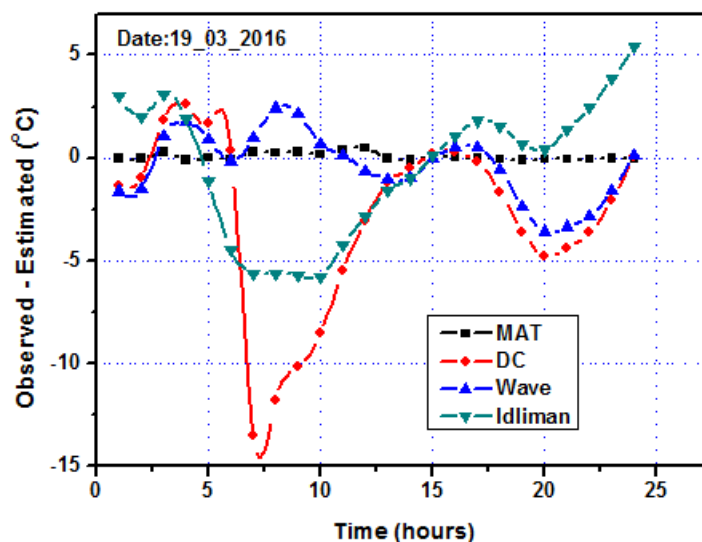


Figure 5.8 : Comparaison des différences entre les températures de l'air observées et estimées en fonction du temps pour les quatre modèles étudiés pour la journée: 19-03-2016.

5.2.2.2. Évaluation du modèle de la moyenne mensuelle de la température journalière de l'air

Du Tableau 5.1 au Tableau 5.4 qui résume la moyenne mensuelle statistique obtenue en comparant les calculs de température horaire de chacun des quatre modèles étudiés aux données de température atmosphérique observées pendant la période (janvier 2015 à mars 2016).

Le Tableau 5.1 résume les résultats de la statistique mensuelle moyenne pour le modèle MAT au cours de la période (de janvier 2015 à mars 2016). Après avoir analysé les résultats, le modèle MAT révèle de meilleurs résultats que les trois autres modèles, avec des valeurs de MBE allant de $-0,032^{\circ}\text{C}$ à $0,107^{\circ}\text{C}$. La paire (MBE, MPE) varie respectivement dans les intervalles ($-0,008^{\circ}\text{C}$, $-0,032^{\circ}\text{C}$) et ($-0,039\%$, $-0,637\%$). Les valeurs sont négatives; cela implique que le modèle MAT surestime la température des données observées. La paire (MBE, MPE) varie dans les intervalles ($0,013^{\circ}\text{C}$, $0,107^{\circ}\text{C}$) et ($0,051\%$, $0,369\%$). Les valeurs sont positives; ceci implique que le modèle MAT sous-prédit la température des données observées comme indiqué dans le tableau 1. Pour les MAE, R^2 et RMSE, les valeurs varient entre les intervalles ($0,075^{\circ}\text{C}$, $0,141^{\circ}\text{C}$), ($0,989$, $0,998$) et ($0,109^{\circ}\text{C}$, $0,213^{\circ}\text{C}$),

respectivement. Les coefficients de détermination sont proches de 1 pour le modèle MAT que pour les trois autres modèles.

Tableau 5.1 : Analyse des erreurs pour la température mensuelle moyenne **mensuelle** de l'air pour le modèle MAT.

Mois	MBE	MAE	RMSE	R ²	MPE
Janvier	-0.032	0.111	0.147	0.998	-0.637
Février	-0.008	0.075	0.134	0.989	-0.146
Mars	0.013	0.081	0.109	0.998	0.080
Avril	0.050	0.102	0.144	0.998	0.232
Mai	0.083	0.125	0.213	0.995	0.335
Juin	0.071	0.107	0.163	0.998	0.263
Juillet	0.079	0.112	0.183	0.998	0.260
Aout	0.107	0.141	0.215	0.996	0.369
Septembre	0.064	0.097	0.144	0.998	0.256
Octobre	0.045	0.083	0.125	0.998	0.244
Novembre	0.036	0.095	0.134	0.998	0.051
Decembre	0.015	0.116	0.152	0.998	-0.068
Janvier	0.013	0.127	0.180	0.997	-0.039
Février	0.028	0.096	0.139	0.997	0.121
Mars	0.032	0.119	0.172	0.997	0.106

Le Tableau 5.2 résume les résultats de la statistique mensuelle moyenne pour le modèle Idliman au cours de la période (de janvier 2015 à mars 2016). Les valeurs de MBE varient de -0.295 °C à 0.664 °C sont plus élevées que le modèle MAT. La paire (MBE, MPE) varie respectivement dans les intervalles (-0.295 °C, -0.022 °C) et (-22.737 %, -0.800 %). Les valeurs sont négatives; cela implique que le modèle Idliman surestime la température des données observées. La paire (MBE, MPE) varie dans les intervalles (0,064 °C, 0,664 °C) et (0,110 %, 9,309 %). Les valeurs sont positives; cela implique que le modèle Idliman sous-estime la température des données observées comme indiqué dans le Tableau 5.2. Pour les MAE, R² et RMSE, les valeurs varient entre les intervalles (1.102 °C, 2.585 °C), (0.010, 0.756) et (1.398 °C, 3,412 °C), respectivement.

Tableau 5.2 : Analyse des erreurs pour la température mensuelle moyenne **mensuelle** de l'air pour le modèle Idliman.

Mois	MBE	MAE	RMSE	R ²	MPE
Janvier	0.485	2.585	3.412	0.010	-22.737
Février	-0.052	1.102	1.398	0.071	9.309
Mars	-0.211	1.595	2.059	0.339	-3.168
Avril	-0.226	1.630	1.970	0.729	-1.381
Mai	0.065	1.328	1.657	0.756	0.110
Juin	0.264	1.991	2.288	0.758	0.866
Juillet	0.664	1.817	2.100	0.737	2.084
Aout	-0.233	2.239	2.852	0.543	-0.895
Septembre	-0.284	1.517	1.881	0.746	-0.800
Octobre	0.064	1.163	1.502	0.738	0.181
Novembre	0.093	1.402	1.868	0.647	1.934
Decembre	-0.295	2.088	2.669	0.295	-7.383
Janvier	0.320	2.292	2.912	0.502	-3.765
Février	-0.041	1.233	1.549	0.725	-1.717
Mars	-0.022	2.268	2.712	0.364	-3.459

Le Tableau 5.3 résume les résultats de la statistique mensuelle moyenne pour le modèle de double cosinus au cours de la période (de janvier 2015 à mars 2016). Les valeurs MBE vont de -2,436 °C à -0,662 °C. Les valeurs de MPE varient respectivement dans l'intervalle (-28,969 %, -7,517 %). Les valeurs sont négatives, ce qui implique que le modèle du double cosinus surestime la température des données observées sauf pour le mois de février 2015 (1,388 °C). Pour les MAE, R² et RMSE, les valeurs varient entre les intervalles (1,672 °C, 3,138 °C), (0,010, 0,356) et (1,449 °C, 4,218 °C), respectivement. La plus faible valeur du coefficient de détermination donne la plus faible précision que les trois autres modèles.

Tableau 5.3 : Analyse des erreurs pour la température mensuelle moyenne **mensuelle** de l'air pour le modèle Double cosinus.

Mois	MBE	MAE	RMSE	R ²	MPE
Janvier	-1.781	2.489	3.308	0.328	-28.969
Février	-0.662	1.072	1.449	0.160	1.388
Mars	-1.238	2.247	2.882	0.010	-14.478
Avril	-1.805	2.140	3.185	0.356	-9.468
Mai	-1.924	2.351	3.330	0.216	-8.256
Juin	-2.349	2.506	3.800	0.314	-9.556
Juillet	-2.323	2.435	3.443	0.292	-7.687
Aout	-2.436	3.138	4.218	0.012	-9.283
Septembre	-1.794	2.235	3.207	0.349	-7.517
Octobre	-1.433	1.672	2.452	0.307	-7.707
Novembre	-1.877	2.359	3.087	0.137	-18.056
Decembre	-1.482	2.198	2.875	0.335	-18.006
Janvier	-1.751	2.482	3.586	0.241	-20.988
Février	-1.372	1.700	2.332	0.312	-14.224
Mars	-2.089	2.818	3.936	0.071	-22.425

Le Tableau 5.4 résume les résultats de la statistique mensuelle moyenne pour le modèle Wave au cours de la période (de janvier 2015 à mars 2016). Après avoir analysé les résultats, le modèle Wave a obtenu de meilleurs résultats que les modèles Idliman et Double cosinus, avec des valeurs de MBE allant de -0,485 °C à 0,664 °C. La paire (MBE, MPE) varie respectivement dans les intervalles (-0,485 °C, -0,022 °C) et (-5,229 %, -0,075 %). Les valeurs sont négatives, ce qui implique que le modèle Wave surestime la température des données observées.

La paire (MBE, MPE) varie dans les intervalles (0,064 °C, 0,664 °C) et (0,068 %, 5,959 %). Les valeurs sont positives; cela implique que le modèle Wave sous-estime la température des données observées comme indiqué dans le Tableau 5.4. Pour les MAE, R² et RMSE, les valeurs varient entre les intervalles (0,823 °C, 2,3 °C), (0,331, 0,847) et (1,048 °C, 2,962 °C), respectivement. Le modèle Wave a une bonne précision par rapport aux modèles d'Idliman et double cosinus car il a une valeur plus élevée pour R² et une valeur plus faible pour RMSE.

Tableau 5.4 : Analyse des erreurs pour la température mensuelle moyenne **mensuelle** de l'air pour le modèle Wave.

Month	MBE	MAE	RMSE	R ²	MPE
Janvier	-0.485	1.770	2.275	0.551	0.068
Février	-0.052	0.823	1.048	0.374	5.959
Mars	-0.211	1.503	1.815	0.331	-3.321
Avril	0.377	1.355	1.770	0.804	1.358
Mai	0.065	1.684	2.193	0.636	-0.075
Juin	0.264	1.288	1.708	0.847	1.053
Juillet	0.664	1.211	1.828	0.798	2.150
Aout	-0.233	2.300	2.962	0.359	-0.952
Septembre	-0.284	1.455	1.901	0.741	-0.725
Octobre	0.064	1.003	1.341	0.773	0.359
Novembre	0.093	1.415	1.835	0.685	2.912
Decembre	-0.440	1.570	2.012	0.588	-5.229
Janvier	0.320	1.435	1.838	0.778	4.889
Février	-0.041	1.103	1.393	0.701	0.135
Mars	-0.022	1.565	2.025	0.429	-1.814

5.2.2.3. Évaluation du modèle du modèle pour les différentes saisons

L'analyse d'erreur pour les quatre modèles pour différentes saisons est également étudiée pour objectif de montrer la précision par saison comme le montre Figure 5.9 à Figure 5.13. Quinze jours de chaque saison ont été choisis au hasard de janvier 2015 à mars 2016. Une fois de plus, le modèle MAT a obtenu de meilleurs résultats que les autres modèles étudiés, les valeurs de MBE étant comprises entre 0,019 °C et 0,086 °C. Les valeurs de MBE et MPE sont des valeurs positives qui indiquent une tendance du modèle MAT à sous-prédire la température des données observées. L'exactitude de toutes les saisons a montré une meilleure performance (R²) qui est comprise entre 0,997 et 0,998.

Pour le modèle Idliman, la précision varie selon la saison. Le R² est compris entre 0,507 et 0,710. La valeur la plus faible de R² est attribuée à l'hiver et la plus élevée à l'automne. La précision du modèle Idliman est meilleure que celle du modèle Double cosinus. Le modèle Wave a la même précision que le modèle Idliman en toutes saisons sauf l'hiver qui présente

une bonne performance que la saison d'hiver du modèle Idliman. Le Double cosinus est moins précis que tous les modèles étudiés. Le R^2 est compris entre 0,141 et 0,296.

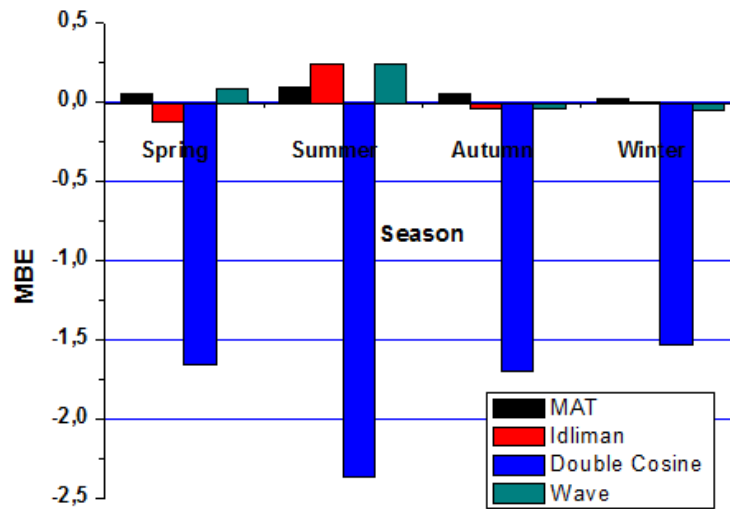


Figure 5.9 : Valeurs statistiques de l'erreur de biais moyenne (MBE) pour la température de l'air estimée à partir des quatre modèles.

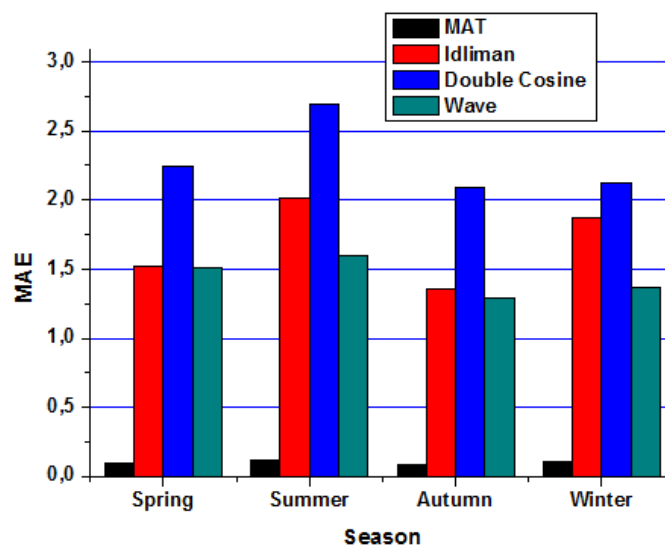


Figure 5.10 : Valeurs statistiques de l'erreur absolue moyenne (MAE) pour la température de l'air estimée à partir des quatre modèles.

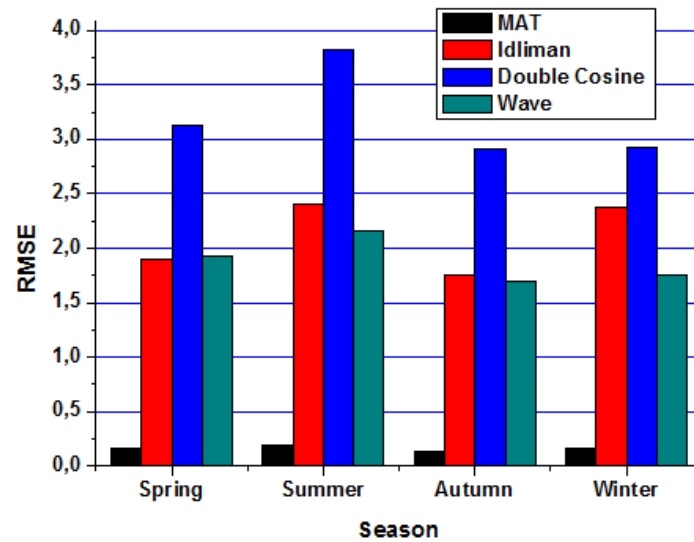


Figure 5.11 : Valeurs statistiques de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour la température de l'air estimée à partir des quatre modèles.

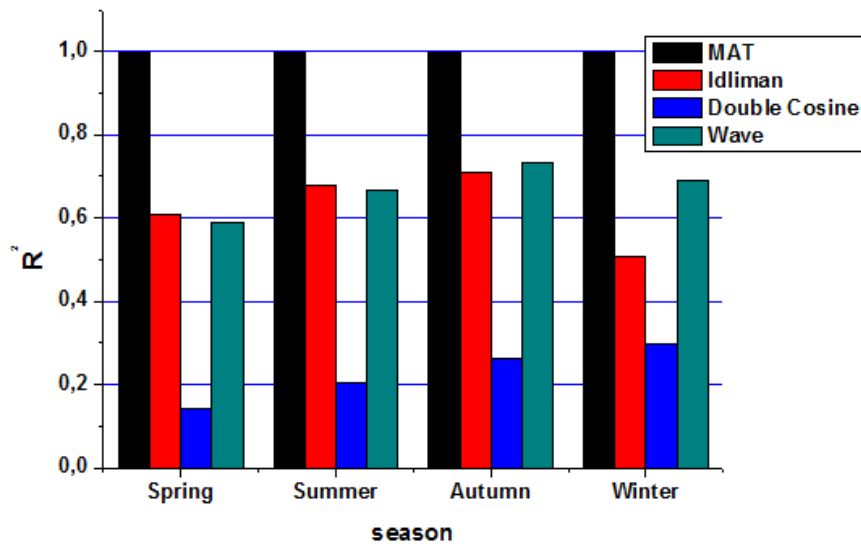


Figure 5.12 : Valeurs statistiques du coefficient de détermination (R^2) pour la température de l'air estimée à partir des quatre modèles.

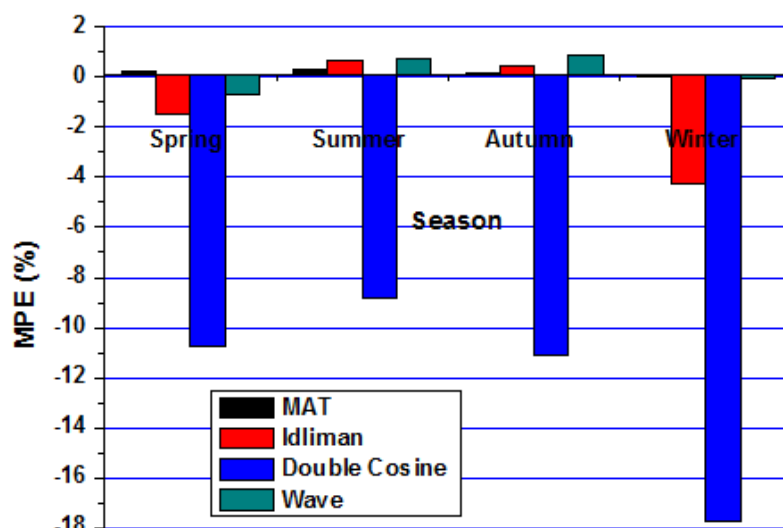


Figure 5.13 : Valeurs statistiques de l'erreur moyenne en pourcentage (MPE) pour la température de l'air estimée à partir des quatre modèles.

5.2.2.4. Valeurs statistiques moyennes présentant les données de températures horaires estimées et observées pour les quatre modèles au cours de la période (janvier 2015-mars 2016).

Selon les résultats des tests statistiques, on peut voir que les valeurs estimées de la température quotidienne moyenne de l'air sont en accord avec les valeurs mesurées de la température moyenne mensuelle de l'air pour tous les modèles sauf le modèle double cosinus.

Tableau 5.5 : Valeurs moyennes des statistiques entre les données de températures instantanées **horaires** estimées et observées pour les quatre modèles au cours de la période (Janvier 2015-Mars 2016).

Modèle	MBE	MAE	RMSE	R ²	MPE
MAT	0.040	0.106	0.157	0.997	0.095
Idliman	0.039	1.750	2.189	0.530	-2.055
Double cosine	-1.751	2.256	3.139	0.229	-13.015
Wave	0.005	1.432	1.863	0.626	0.451

On a trouvé que les erreurs de biais moyennes (MBE) des modèles MAT, Idliman et Wave se situent dans la gamme des valeurs acceptables entre 0,005 °C et 0,040 °C sauf le modèle du double cosinus (-1,751 °C) avec les valeurs RMSE les plus faibles allant de 0,157 °C à 2.189 °C mais le RMSE pour le double cosinus est égal à 3.139 °C. En outre, les valeurs MPE des

modèles MAT et Wave sont très proches de zéro (0,095 %, 0,451%) alors que les valeurs des modèles Idliman et Double cosinus varient dans l'intervalle (-2,055 %, -13,015 %).

La valeur la plus élevée du coefficient de détermination (R^2) est donnée par le modèle MAT (0,997) par rapport aux autres modèles qui vont de 0,229 à 0,626. De plus, les valeurs MAE du modèle MAT sont très proches de zéro (0,106 °C) mais les valeurs des modèles Idliman, Wave et Double cosinus ont été variées dans l'intervalle (1,432 °C, 2,256 °C)(voir Tableau 5.5). Avec des valeurs plus faibles de MBE, MAE et MPE pour le modèle MAT qui indiquent une meilleure performance que les autres modèles au cours de la période d'étude. Les valeurs négatives de MBE et MPE indiquent une tendance à surestimer la température de l'air observée et les valeurs positives indiquent une tendance à sous-prédire la température de l'air observée.

5.2.3. Détermination journalière de la température ambiante de l'air

5.2.3.1. Evaluation du modèle pour des mois choisis au hasard pour la localisation de Laghouat, Algérie

Dans cette sous-section, les mois sont sélectionnés au hasard et sont présentés comme un exemple de manière à montrer le comportement du modèle proposé. Figure 5.14, Figure 5.15, Figure 5.17 et la Figure 5.18 montrent une comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour des mois choisis aléatoirement tels que: Avril 2004, Juin 2004, Novembre 2004 et Janvier 2005 à l'emplacement de Laghouat, Algérie. Les courbes estimées pour tous les mois étudiés ont donné une bonne estimation des températures quotidiennes de l'air durant la période de Mars 2004 à Février 2005. Il y a donc des différences de températures entre les températures observées et estimées pour chaque mois qui peuvent être discutées en termes de précision du modèle. En général, les courbes d'estimation de la température quotidienne de l'air surestiment les données observées pour la première moitié des mois et la sous-estiment pour la seconde moitié des mois sauf pour le mois d'avril, respectivement.

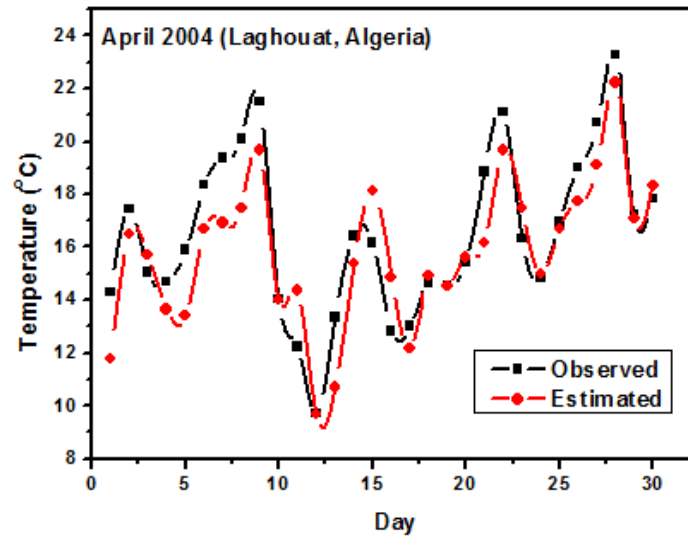


Figure 5.14 : Comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour un mois choisi au hasard Avril 2004 pour une localisation de Laghouat.

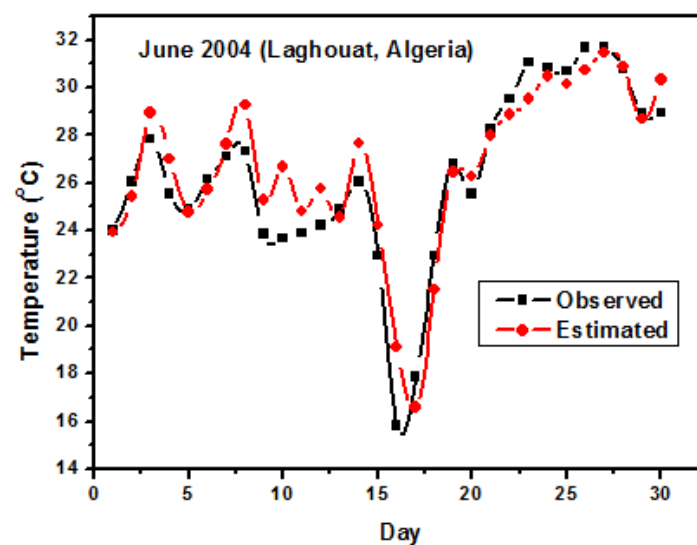


Figure 5.15 : Comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour un mois choisi au hasard Juin 2004 pour une localisation de Laghouat.

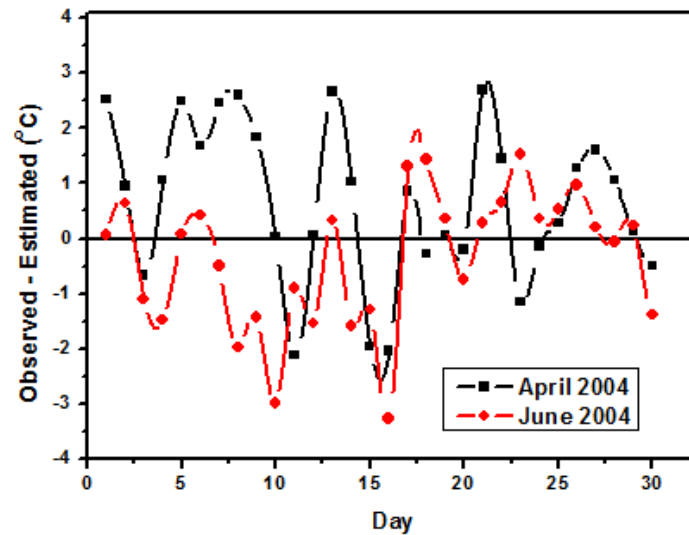


Figure 5.16 : Différences journalières entre les températures de l'air observées et estimées pour avril 2004 et juin 2004 à Laghouat.

La Figure 5.16 montre les différences quotidiennes entre les températures de l'air observées et estimées pour les mois d'avril et de juin 2004 à Laghouat, en Algérie. Les valeurs absolues de l'erreur varient de $-2,11$ °C à $2,53$ °C pour le mois d'avril 2004 et de $-2,98$ °C à $1,53$ °C pour le mois de juin 2004.

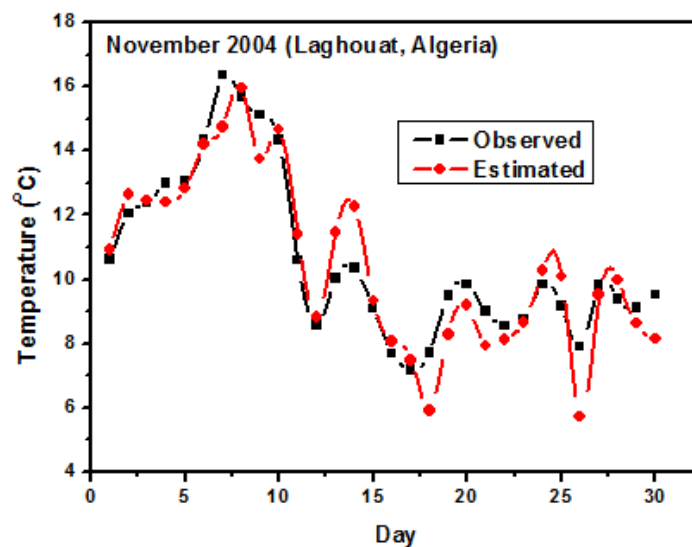


Figure 5.17 : Comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour un mois choisi au hasard Novembre 2004 pour une localisation de Laghouat.

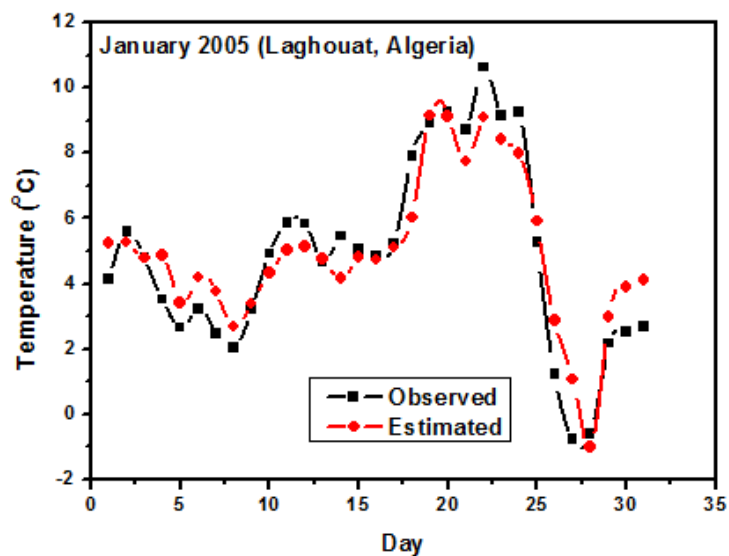


Figure 5.18 : Comparaison entre les températures quotidiennes estimées et observées de l'air pour un mois choisi au hasard Janvier 2005 pour une localisation de Laghouat.

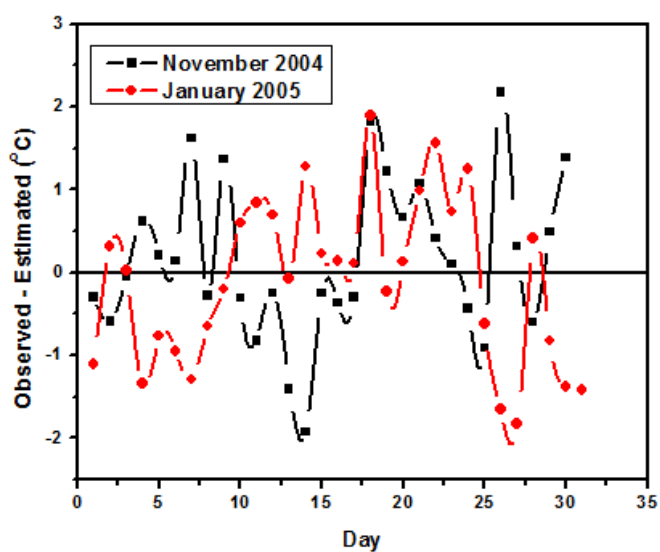


Figure 5.19 : Différences journalières entre les températures de l'air observées et estimées pour novembre 2004 et janvier 2005 à Laghouat.

La Figure 5.19 montre les différences quotidiennes entre les températures de l'air observées et estimées pour novembre 2004 et janvier 2005 à Laghouat, en Algérie. Les valeurs absolues de l'erreur vont de (-1,92 °C à 2,17 °C) pour le mois de novembre 2004 et de (-1,82 °C à 1,88 °C) pour le mois de janvier 2005.

L'analyse d'erreur pour le modèle proposé pendant plusieurs mois est également étudiée pour objectif de montrer l'exactitude par mois comme le montre Figure 5.20 jusqu'à la Figure 5.24. Les valeurs de MBE et de MPE varient par intervalles ($-0,634$ °C, $1,088$ °C) et ($-13,77$ %, $5,90$ %). Les valeurs de MBE et de MPE sont des valeurs positives qui indiquent une tendance du modèle proposé à sous-prédire la température des données observées et les valeurs négatives indiquent une tendance à la surestimer. La précision varie avec les mois. Le R^2 est compris entre 0,61 et 0,88. La plus faible valeur de R^2 est attribuée à Juillet et la plus élevée est à juin 2004 et janvier 2005. Par conséquent, les valeurs de MAE sont comprises entre $0,768$ °C et $1,562$ °C. De plus, les valeurs de RMSE sont comprises entre $0,952$ °C et $1,921$ °C. La plus faible valeur de RMSE est attribuée en novembre et la plus élevée est en mars 2004.

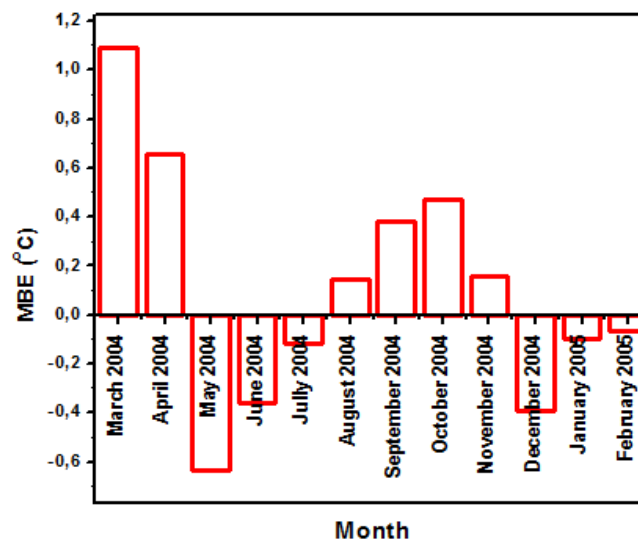


Figure 5.20 : Les valeurs statistiques de l'erreur de biais moyen (MBE) pour la comparaison entre les données quotidiennes de température de l'air observées et estimées pendant la période de Mars 2004 à Février 2005 pour le site de Laghouat, Algérie.

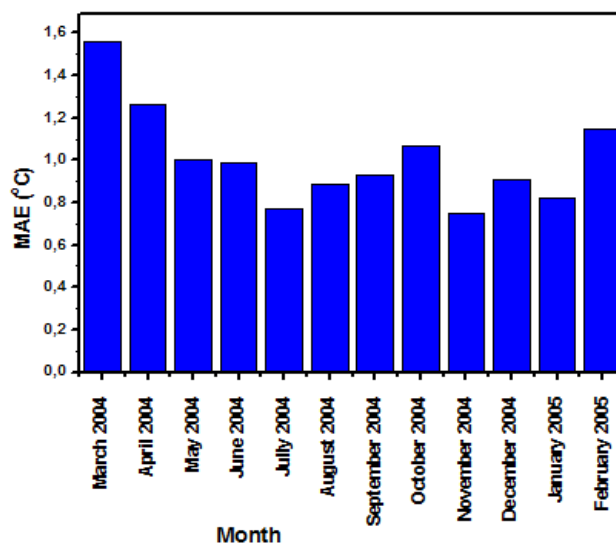


Figure 5.21 : Comparaison des valeurs statistiques de l'erreur absolue moyenne (MAE) entre les données quotidiennes de température de l'air observées et estimées pendant la période de mars 2004 à février 2005 pour une localité de Laghout.

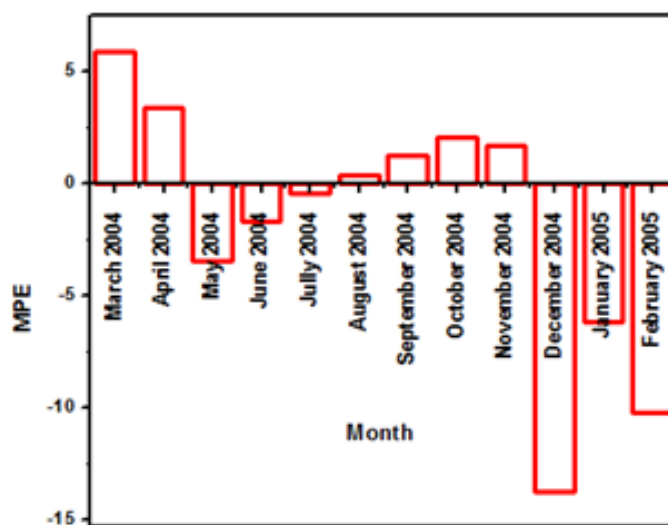


Figure 5.22 : Les valeurs statistiques d'erreur moyenne en pourcentage (MPE) pour la comparaison entre les données quotidiennes et estimées de température de l'air pendant la période de mars 2004 à février 2005 pour une localisation de Laghout.

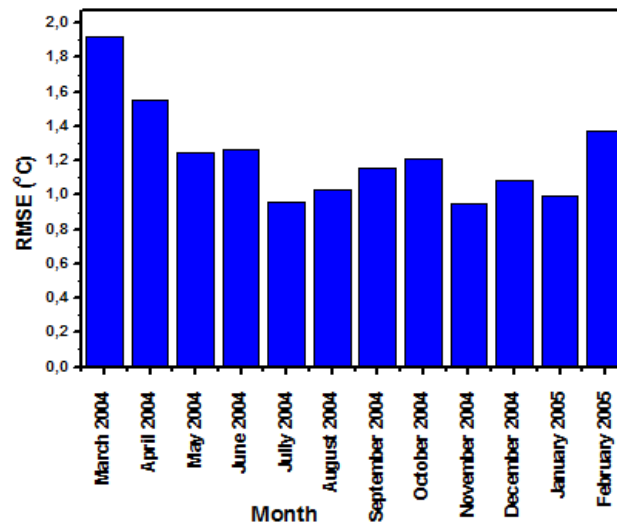


Figure 5.23 : Les valeurs statistiques de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour la comparaison des données quotidiennes et estimées de la température de l'air pendant la période de mars 2004 à février 2005 pour une localisation de Laghouat.

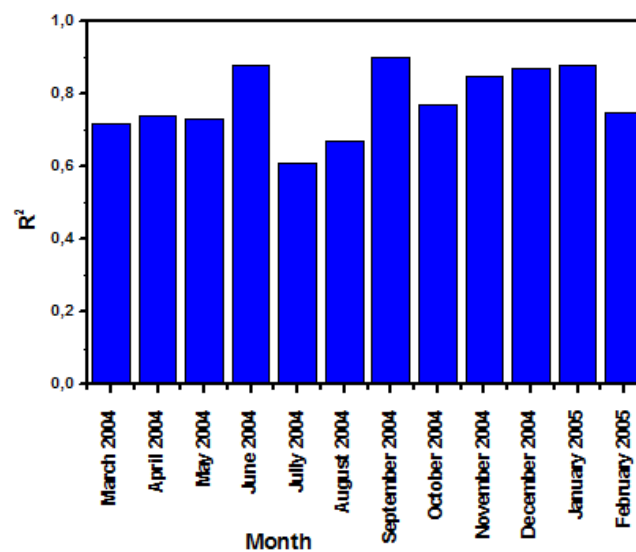


Figure 5.24 : Les valeurs statistiques du coefficient de détermination (R^2) pour la comparaison entre les données quotidiennes de température de l'air observées et estimées pendant la période de mars 2004 à février 2005 pour un emplacement de Laghouat.

Le Tableau 5.6 présente la différence entre la température moyenne quotidienne maximale et minimale de l'air pendant plusieurs mois pour l'emplacement de Laghouat, en Algérie, pendant la période d'étude.

Tableau 5.6 : Différence entre la température moyenne quotidienne maximale et minimale de l'air pour différents mois pour le lieu de Laghouat, Algérie pour les années 2004 et 2005.

No	Mois	Année	Tmax –Tmin
1	Janvier	2005	9.66
2	Février	2005	9.90
3	Mars	2004	12.63
4	Avril	2004	11.70
5	Mai	2004	9.41
6	Juin	2004	10.68
7	Juillet	2004	11.28
8	Aout	2004	11.32
9	Septembre	2004	11.04
10	Octobre	2004	11.22
11	Novembre	2004	9.38
12	Decembre	2004	7.77

5.2.3.2. Évaluation du modèle sur des mois choisis au hasard pour les différents emplacements

Selon les résultats des tests statistiques, on peut voir que les valeurs estimées de la température quotidienne moyenne de l'air sont en accord avec les valeurs mesurées de la température quotidienne moyenne de l'air pour tous les emplacements, comme indiqué dans le Tableau 5.7. On peut voir que les valeurs de MBE et MPE sont négatives ce qui est significatif que le modèle proposé sur-prédite les données quotidiennes de température de l'air pour tous les endroits à l'exception de Riadh (Arabie Saoudite) pour les mois choisis au hasard. La précision varie en fonction des mois et des emplacements. Le R^2 varie de 0,73 à 0,87 pour Rome (Italie), de 0,67 à 0,86 pour Madrid (Espagne), de 0,72 à 0,90 pour Paris (France) et de 0,54 à 0,73 pour Riadh (Arabie Saoudite).

Le MBE et le MPE sont compris entre (-1.101 °C , -1.129 °C) et (-9.17 % à 6.51 %) pour Rome (Italie),(-0.894 °C à 0.211 °C) et (-6.05 % à 0.965 %) pour Madrid (Espagne),(-0.943 °C à -0,052 °C) et (-7,94 % à 6,67 %) pour Paris (France), et (0,167 °C à 1,798 °C) et (0,20 % à 5,77 %) pour Riadh (Arabie Saoudite).

Tableau 5.7 : Paramètres statistiques MBE, MAE, RMSE, MPE et R² avec la différence entre la température quotidienne moyenne de l'air maximale et minimale pour les quatre emplacements pour les mois choisis au hasard à partir de l'année 2004.

emplacement	Mois	MBE	MAE	RMSE	R ²	MPE	Tmax-Tmin
Rome, Italy	Février	-1.129	1.209	1.373	0.87	6.51	6.09
	Avril	-0.207	1.305	1.538	0.70	-2.74	9.27
	Juillet	-0.138	1.122	1.417	0.76	-0.94	9.30
	Octobre	-1.101	1.321	1.558	0.73	-9.17	6.47
Madrid, Spain	Février	0.131	1.133	1.315	0.67	-4.28	8.71
	Avril	0.211	1.287	1.434	0.81	0.96	9.66
	Juillet	-0.894	1.315	1.520	0.77	-3.84	8.59
	Octobre	-0.313	0.884	1.033	0.86	-6.05	7.77
Paris, France	Février	-0.924	1.061	1.216	0.90	6.67	6.09
	Avril	-0.052	1.291	1.490	0.72	-1.16	9.27
	Juillet	-0.055	1.163	1.461	0.74	-0.57	9.30
	Octobre	-0.943	1.243	1.448	0.77	-7.94	6.47
Riadh, Arabie Saoudite	Février	0.871	1.430	1.599	0.54	4.74	12.16
	Avril	0.167	1.447	1.647	0.73	0.20	10.95
	Juillet	1.798	1.825	1.926	0.70	5.24	14.62
	Octobre	1.556	1.577	1.693	0.65	5.77	13.52

Les RMSE et MAE sont compris entre (1,373 °C et 1,558 °C) et (1,122 °C à 1,321 °C) pour Rome (Italie), (1,033 °C à 1,520 °C) et (0,884 °C à 1,315 °C) pour Madrid (Espagne), (1,216 °C à 1,490 °C) et (1,061 °C à 1,291 °C) pour Paris (France) et (1,599 °C à 1,926 °C) et (1,430 °C à 1,825 °C) pour Riadh (Arabie Saoudite)(voir Tableau 5.7). Avec des valeurs plus faibles de MBE, MAE et des valeurs plus élevées de R² qui indiquent de meilleures performances au

cours de la période d'étude. Les valeurs positives de MBE et MAE indiquent une tendance à sous-prédire la température de l'air quotidienne observée.

Tableau 5.8: Les paramètres statistiques moyens MBE, MAE, RMSE, MPE et R^2 par lieu pendant la période d'étude.

emplacement	MBE	MAE	RMSE	R^2	MPE
Laghouat, Algeria	0.102	1.007	1.227	0.781	-1.766
Rome, Italy	0.643	1.239	1.471	0.765	-1.585
Madrid, Spain	-0.216	1.154	1.325	0.777	-3.301
Paris, France	-0.493	1.189	1.403	0.782	-0.750
Riadh, Arabie Saoudite	1.098	1.569	1.716	0.655	3.987

Les valeurs moyennes de R^2 sont comprises entre 0,655 et 0,782, ce qui présente une bonne précision. La valeur moyenne la plus basse de R^2 est attribuée à l'emplacement de Riadh, en Arabie Saoudite et la plus haute est à l'emplacement de Paris, en France. Par conséquent, les valeurs moyennes de MAE sont comprises entre 1,007 °C et 1,569 °C. La valeur moyenne la plus faible du MAE est attribuée à Laghouat, en Algérie, et la plus élevée est celle de Riadh, en Arabie Saoudite. De plus, les valeurs de RMSE et de MPE sont comprises entre (1,227 °C et 1,716 °C) et entre (-3,301 % et 3,987 %). La valeur la plus faible de RMSE est attribuée à Laghouat, en Algérie, et la plus élevée à Rome, en Italie (voir Tableau 5.8).

5.3. Evolution des performances d'un capteur solaire à air sans chicanes

5.3.1. Angle d'inclinaison du capteur solaire

- **Température de sortie**

La Figure 5.25 montre l'évolution de la différence entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps. Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 0° et 40°, on observe que toutes les courbes restent au-dessus de la courbe possédant un angle d'inclinaison 0° de 10h00 à 16h00 avec une valeur maximale de 39.5°C à 14h00.

Pour l'intervalle de temps allant de 9h00 à 9h30, c'est l'inverse qui s'est produit en présentant un écart maximal de valeur -7 °C (voir Figure 5.25 (a)). Plus l'angle croit, plus on distingue un accroissement de l'écart de température. Pour l'intervalle d'angle compris entre 50° et 90°, on observe que toutes les courbes restent aux voisinages les unes à côtés des autres en présentant une différence de température maximale de valeur 47 °C à 16h00 pour l'angle

d'inclinaison égale à 80° à l'exception de l'angle 50° (présence de nuages) (voir Figure 5.25 (b)).

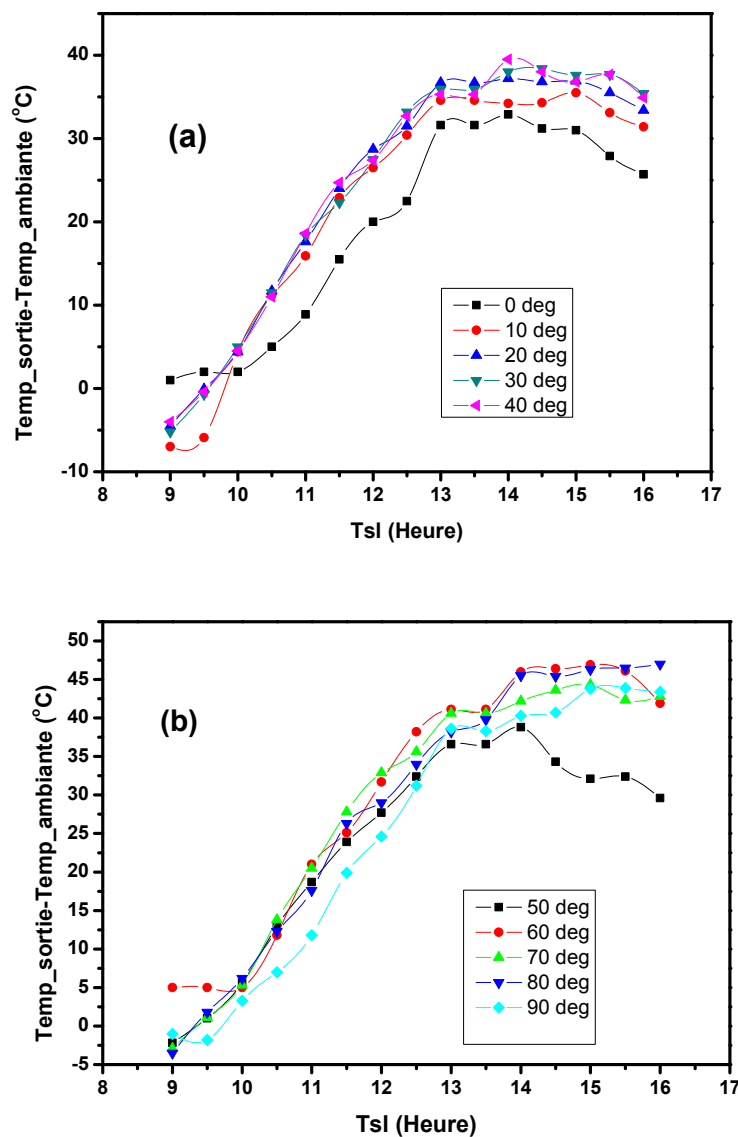


Figure 5.25 : Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'inclinaison variant de : a) 0° à 40° b) 50° à 90° .

- **Température de Plexiglas**

La Figure 5.26 montre l'évolution de l'écart entre la température de Plexiglas et la température ambiante en fonction du temps. Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 0° et 40° , on observe que l'écart croît avec l'accroissement d'angle en présentant une valeur maximale de 41.7°C à 14h00 (voir Figure 5.26a).

Pour l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 50° et 90° , on remarque que toutes les courbes ont la même tendance en présentant une valeur maximale de 49.6°C à 15h00 à l'exception de l'angle d'inclinaison 50° ou la courbe reste éloignée des autres courbes avec une valeur maximale de 44.1°C à 13h00 (voir Figure 5.26(b)).

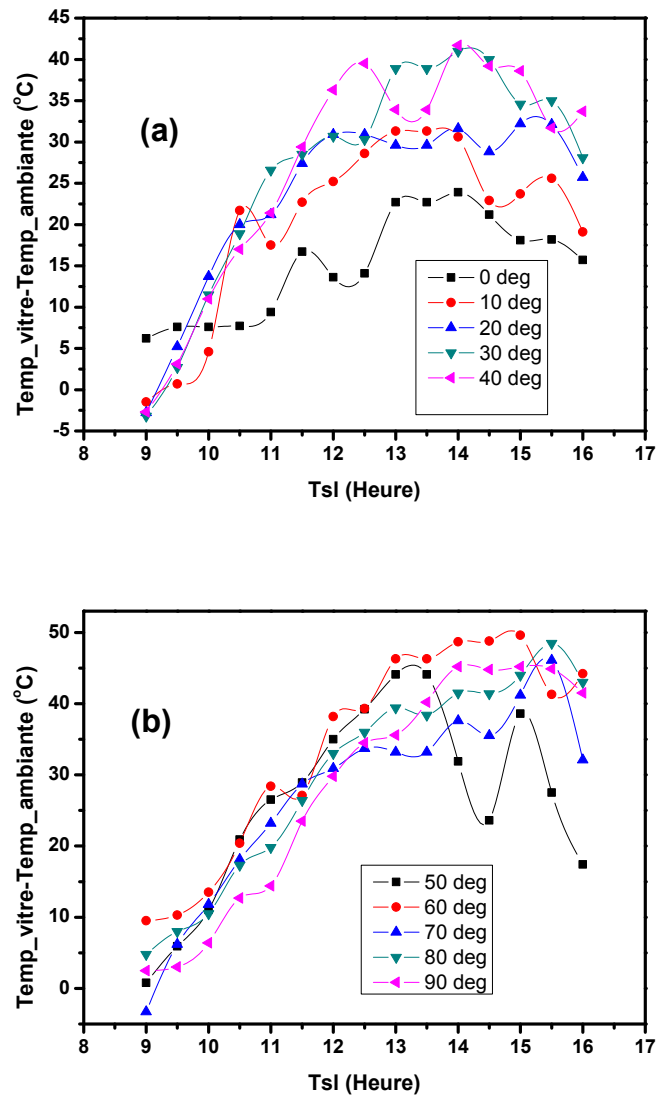


Figure 5.26 : Variation de l'écart entre la température de vitre et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'inclinaison variant de : a) 0° à 40° b) 50° à 90° .

- **Température moyenne de l'absorbeur**

La Figure 5.27 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de l'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps. Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 0° et 40° , on observe que l'écart croît avec l'accroissement d'angle en présentant une

valeur maximale de 96.9 °C à 14h00 (voir Figure 5.27(a)). Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 50° et 90°, on observe c'est l'inverse qui s'y produit c'est-à-dire que l'écart décroît avec l'accroissement d'angle en présentant une valeur maximale de 114.15 °C à 15h00 (voir Figure 5.27(b)).

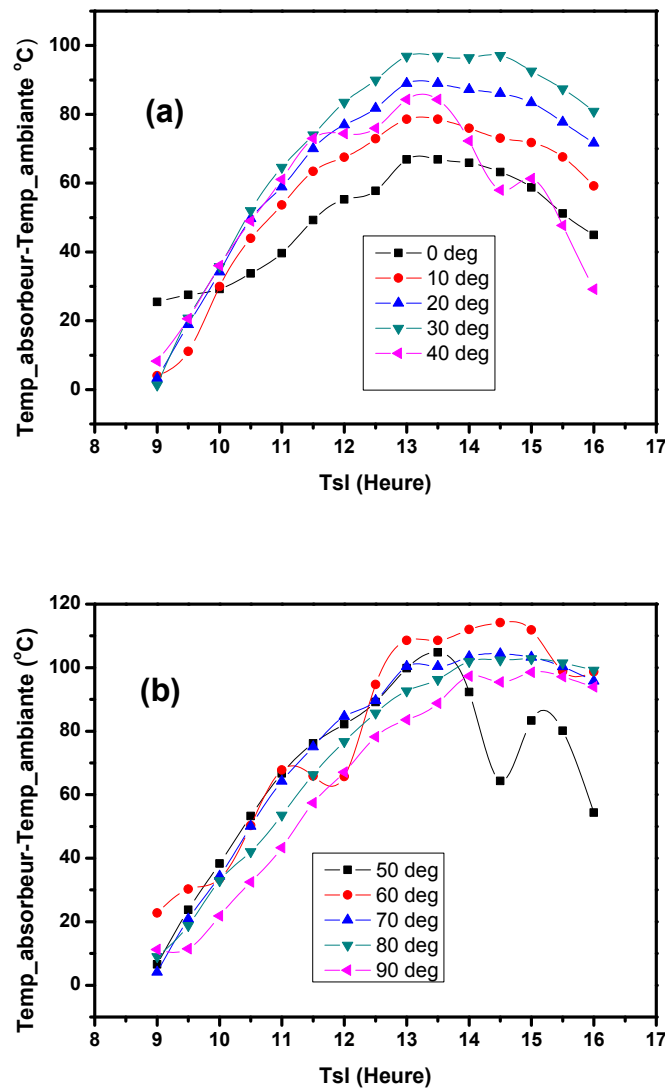


Figure 5.27 : Variation de l'écart entre la température d'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'inclinaison variant de : a) 0° à 40° b) 50° à 90°.

- **Température moyenne de la plaque inférieure**

La Figure 5.28 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps. Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 0° et 40° , on observe que l'écart croît avec l'accroissement d'angle en présentant une valeur maximale de 43.15°C à 13h00 (voir Figure 5.28(a)).

Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 50° et 90° , on observe c'est l'inverse qui s'y produit c'est-à-dire que l'écart décroît avec l'accroissement d'angle en présentant une valeur maximale de 58.65°C à 14h30 (voir Figure 5.28(b)).

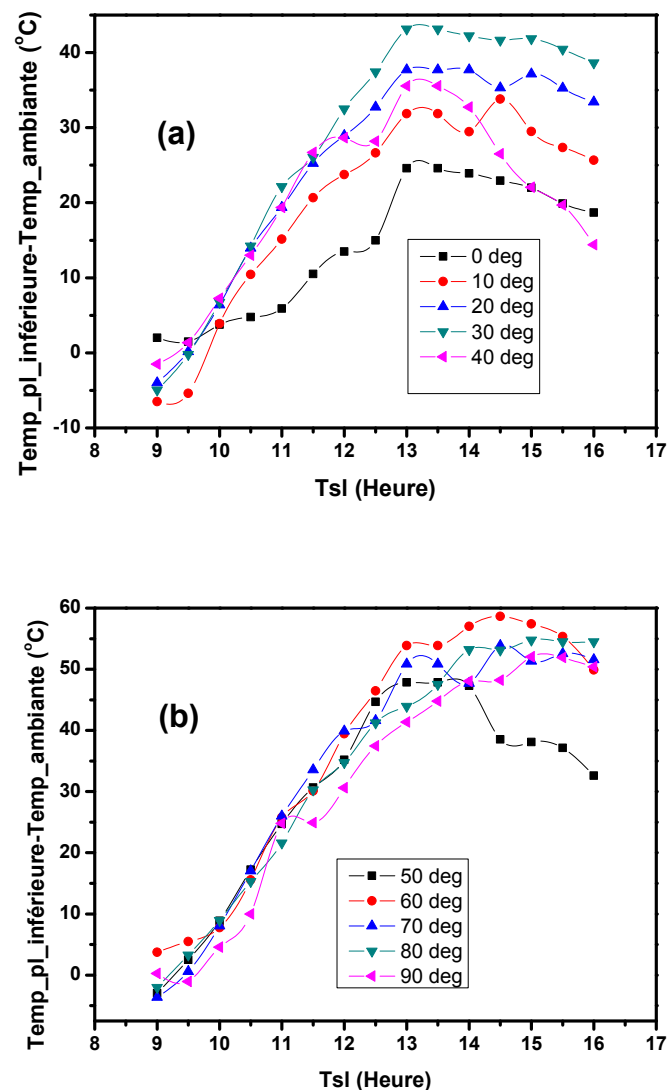


Figure 5.28 : Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'inclinaison variant de :
a) 0° à 40° , b) 50° à 90° .

- **Rayonnement solaire**

La Figure 5.29 montre l'évolution temporelle de l'intensité du rayonnement solaire global pour différents angles d'inclinaison considérés. Les mesures collectés par nos instruments de mesure montrent une augmentation du rayonnement solaire globale qui atteint plus de 1197 W/m^2 à 13h00 pour l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 0° et 40° (voir Figure 5.29(a)) et de valeur 1198 W/m^2 à 13h00 pour l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 50° et 90° puis cette intensité commence à diminuer par la suite (voir Figure 5.29(b)).

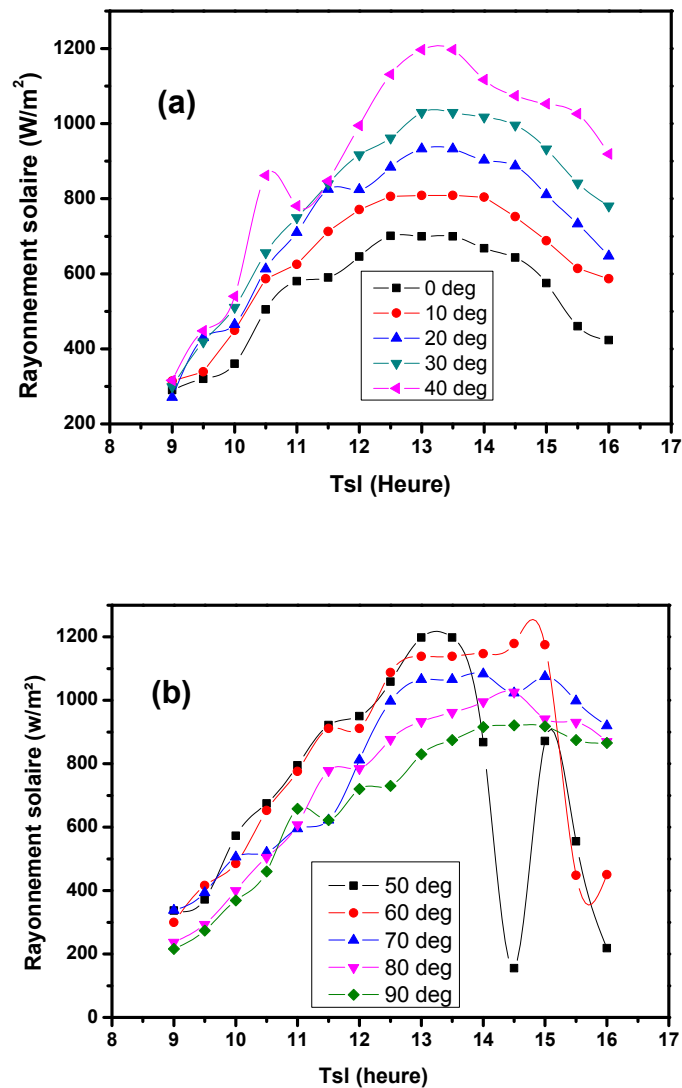


Figure 5.29 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour différents angles d'inclinaison variant de : a) 0° à 40° b) 50° à 90° .

- **Rendement thermique**

La Figure 5.30 montre la variation du rendement thermique à 13h30 en fonction d'angle d'inclinaison. Ce temps est choisi parce que l'intensité du rayonnement solaire atteint sa valeur maximale. Le rendement thermique du panneau présente une valeur minimale 17.4% pour un angle d'inclinaison égal à 40° et une valeur maximale 27.27% pour un angle d'inclinaison égale à 0° (voir Figure 5.30).

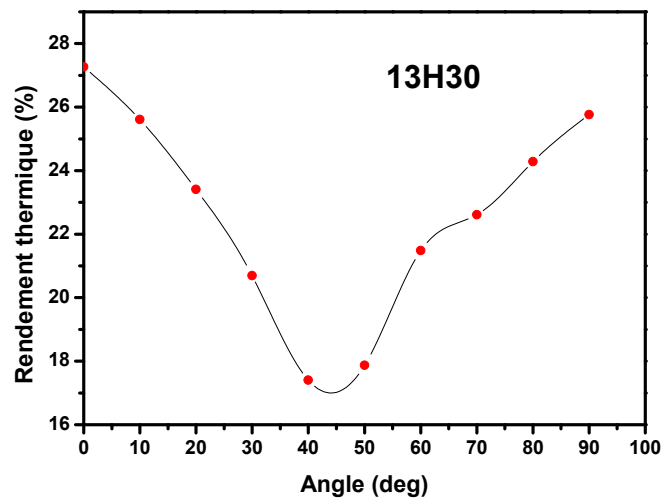


Figure 5.30 : Variation du rendement thermique à 13h30 en fonction d'angle d'inclinaison variant de 0° à 90°.

- **Température ambiante**

La Figure 5.31 montre l'évolution temporelle de la température ambiante en fonction du temps de 9h00 jusqu'à 16h00 pour les différentes journées étudiées. Les valeurs de la température ambiante sont minimales et comprises entre 10 °C et 12 °C à 9h00 tandis que les valeurs maximales sont atteintes au midi solaire et sont comprises entre 19 °C et 27.2 °C (voir Figure 5.31(a)). Les valeurs de la température ambiante sont minimales et comprises entre 5.9 °C et 15.2 °C à 9h00 tandis que les valeurs maximales sont atteintes au midi solaire et sont comprises entre 13.9 °C et 24.4 °C (voir Figure 5.31(b)).

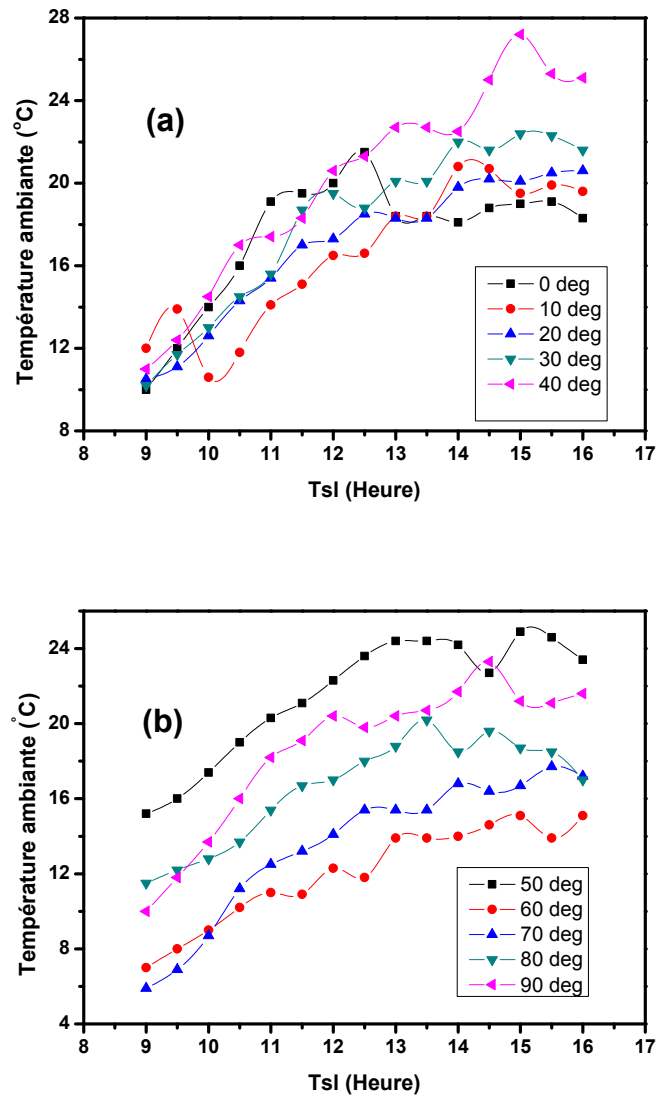


Figure 5.31 : Evolution de la température ambiante en fonction du temps.

5.3.2. Angle d'azimut

- **Température de sortie**

La Figure 5.32 montre l'évolution de la différence entre la température de sortie et la température ambiante. Dans l'intervalle d'angle d'azimut compris entre 0° et 50° , on observe que toutes les courbes restent au-dessous de la courbe possédant un angle d'azimut 0° de 9h00 à 14h00 avec une valeur maximale de 43.3°C à 14h00. Après cette heure, les courbes avec angles d'azimut (10° et 20°) restent toujours au-dessous de la courbe d'azimut 0° tandis que les courbes des autres angles d'azimut comprises entre 30° et 50° deviennent au-dessus de la courbe d'azimut 0° en présentant une valeur maximale de 46°C à 15h00 (voir Figure 5.32a).

Pour l'intervalle d'angle d'azimut (-10° et -50°), on remarque que toutes les courbes ont la même tendance en présentant une valeur maximale de 49°C à 14h00 à l'exception de l'angle d'azimut -50° ou la courbe reste éloignée des autres courbes avec une valeur maximale de 34.6°C à 13h00 comme le montre la Figure 5.32b. Ceci, nous conduit à déduire que les températures de sorties maximales se trouvent au voisinage de la courbe d'angle d'azimut 0° .

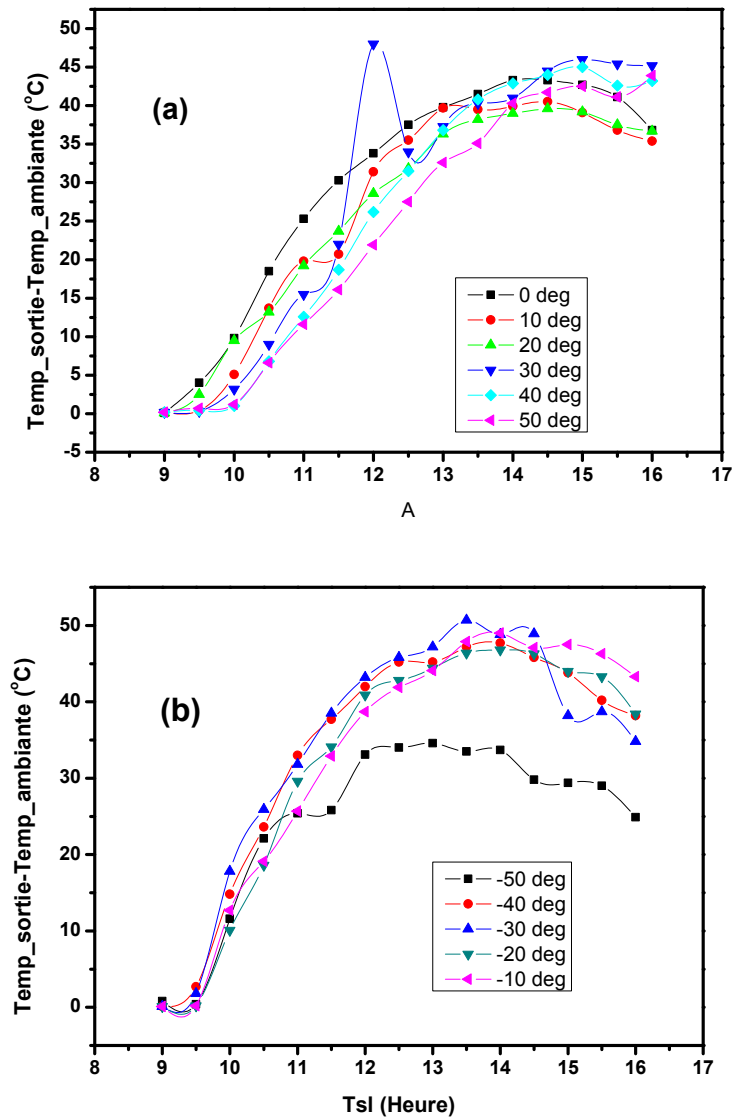


Figure 5.32 : Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50° .

- **Température de Plexiglas**

La Figure 5.33 montre l'évolution de l'écart entre la température de Plexiglas et la température ambiante. Dans l'intervalle d'angle d'azimut compris entre 0° et 50° , on observe

que toutes les courbes restent au-dessous de la courbe possédant un angle d'azimut 0° de 9h00 à 14h00 avec une valeur maximale de 40.3°C à 13h00. Après cette heure, les courbes avec angles d'azimut (10° et 20°) restent toujours au-dessous de la courbe d'azimut 0° tandis que les courbes des autres angles d'azimut comprises entre 30° et 50° deviennent au-dessus de la courbe d'azimut 0° en présentant une valeur maximale de 42.8°C à 14h50 (voir Figure 5.33a). Pour l'intervalle d'angle d'azimut (-10° et -50°), on remarque que toutes les courbes ont la même tendance en présentant une valeur maximale de 51.8°C à 13h00 à l'exception de l'angle d'azimut -50° ou la courbe reste éloignée des autres courbes avec une valeur maximale de 38.6°C à 13h00 (voir Figure 5.33b). La même conclusion citée au-dessus reste valable pour les températures de Plexiglas.

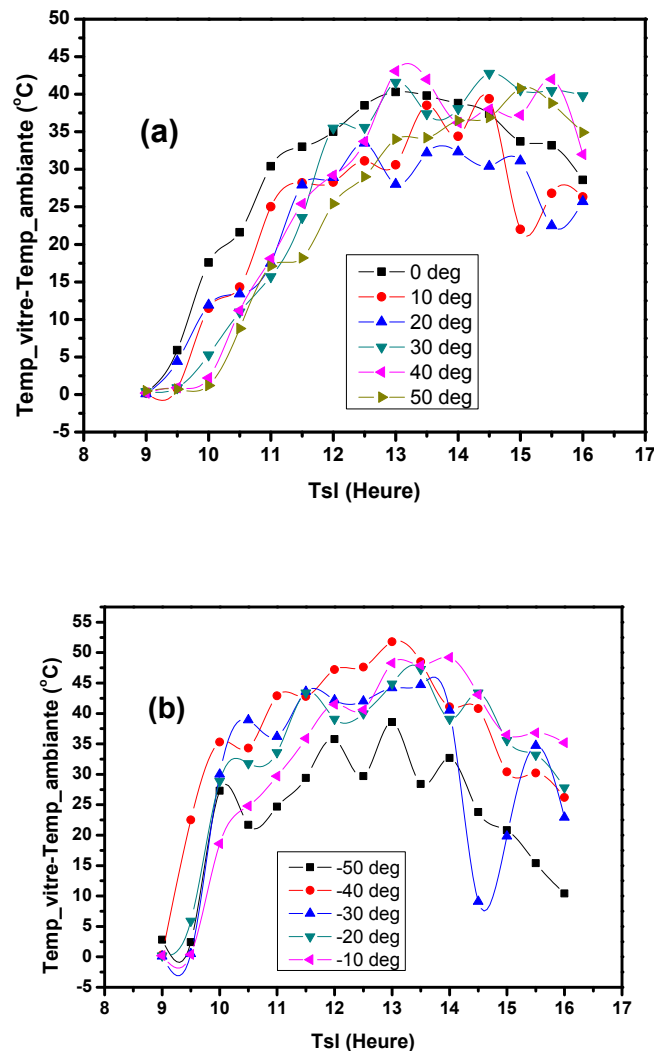


Figure 5.33 : Variation de l'écart entre la température de vitre et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50° .

- **Température moyenne de l'absorbeur**

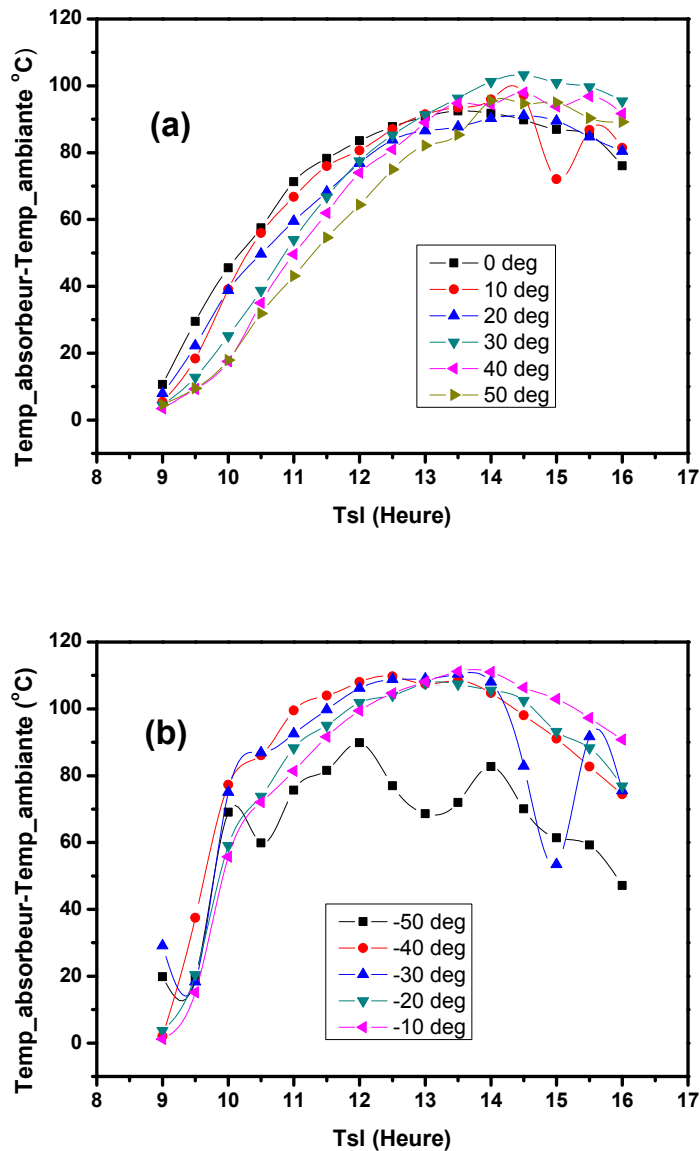


Figure 5.34 : Variation de l'écart entre la température d'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) - 10° à -50°.

La Figure 5.34 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de l'absorbeur et la température ambiante. Dans l'intervalle d'angle d'azimut compris entre 0° et 50°, on observe que toutes les courbes restent au-dessous de la courbe possédant un angle d'azimut 0° de 9h00 à 12h30 avec une valeur maximale de 90.8°C à 12h30. Après cette heure, les courbes avec angles d'azimut (10° à 50°) restent toujours au-dessus de la courbe d'azimut 0° en présentant une valeur maximale de 103.25°C à 14h30 (voir Figure 5.34a).

Pour l'intervalle d'angle d'azimut (-10° et -50°), on remarque que toutes les courbes ont la même tendance en présentant une valeur maximale de 111.15°C à 13h30 à l'exception de l'angle d'azimut -50° ou la courbe reste éloignée des autres courbes avec une valeur maximale de 82.7°C à 14h00 (voir Figure 5.34b). La même conclusion citée au-dessus reste valable pour les températures de l'absorbeur.

- **Température moyenne de la plaque inférieure**

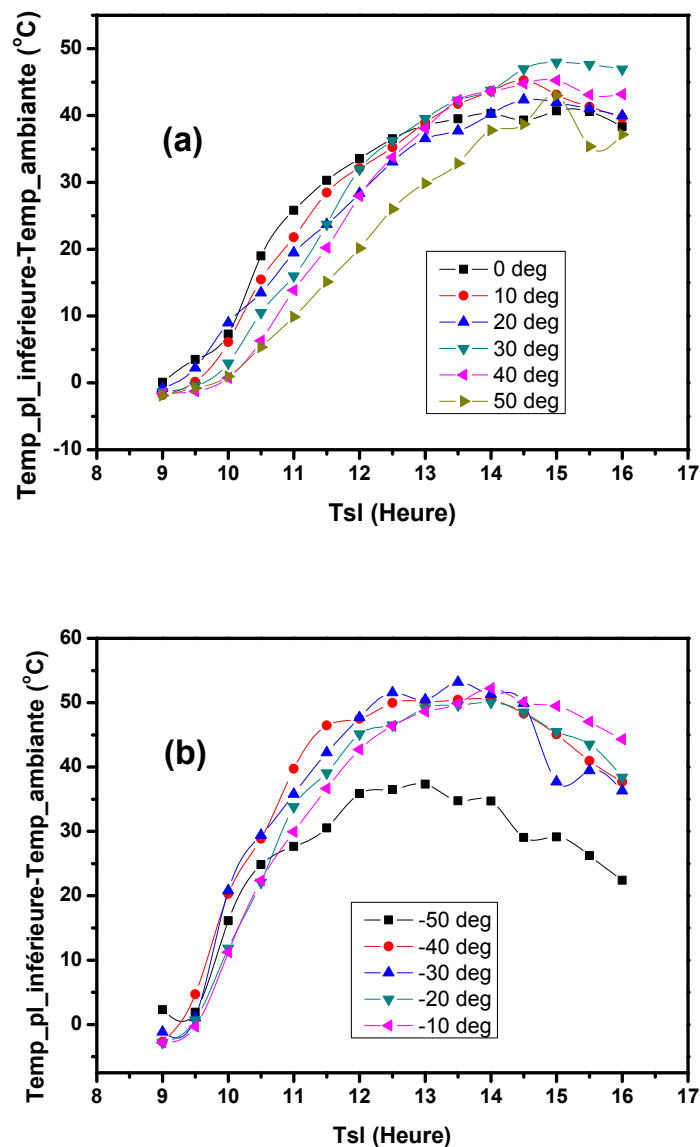


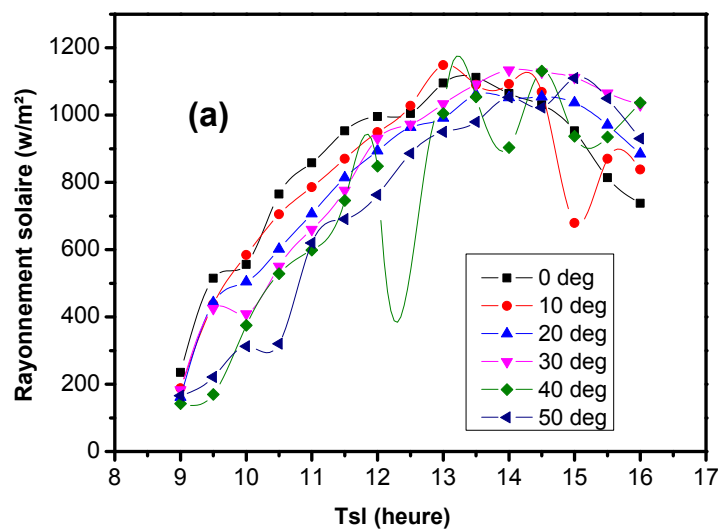
Figure 5.35 : Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50° .

La Figure 5.35 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de la plaque inférieure et la température ambiante. Dans l'intervalle d'angle d'azimut compris entre 0° et 50° , on observe que toutes les courbes restent au-dessous de la courbe possédant un angle d'azimut 0° de 9h00 à 12h30 avec une valeur maximale de 36.5°C à 12h30. Après cette heure, les courbes avec angles d'azimut (10° à 50°) restent toujours au-dessus de la courbe d'azimut 0° en présentant une valeur maximale de 48°C à 15h00 (voir Figure 5.35a).

Pour l'intervalle d'angle d'azimut (-10° et -50°), on remarque que toutes les courbes ont la même tendance en présentant une valeur maximale de 53.2°C à 13h30 à l'exception de l'angle d'azimut -50° ou la courbe reste éloignée des autres courbes avec une valeur maximale de 37.35°C à 13h00 (voir Figure 5.35b). La même conclusion citée au-dessus reste valable pour les températures de la plaque inférieure.

- **Rayonnement solaire**

La Figure 5.36 montre l'évolution temporelle de l'intensité du rayonnement solaire global pour différents angles d'azimut considérés. Les mesures collectés par nos par nos instruments de mesure montrent une augmentation du rayonnement solaire globale qui atteint plus de 1100 W/m^2 à 13h00 puis cette intensité commence à diminuer par la suite.



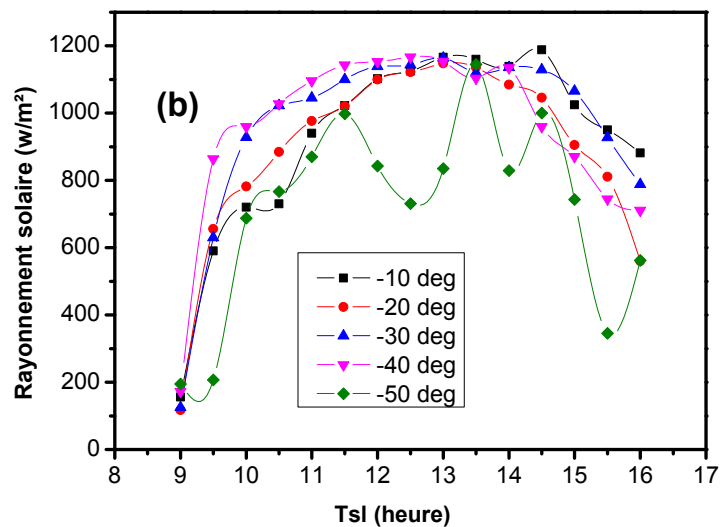


Figure 5.36 : Variation du rayonnement solaire en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50° .

- **Rendement thermique**

La Figure 5.37 montre la variation du rendement thermique à 13h30 en fonction d'angle d'azimut. Ce temps est choisi parce que l'intensité du rayonnement solaire atteint sa valeur maximale. Le rendement thermique du panneau présente une valeur minimale 17.22% pour un angle d'azimut égal à -50° et une valeur maximale 25.9% pour un angle d'azimut -30° .

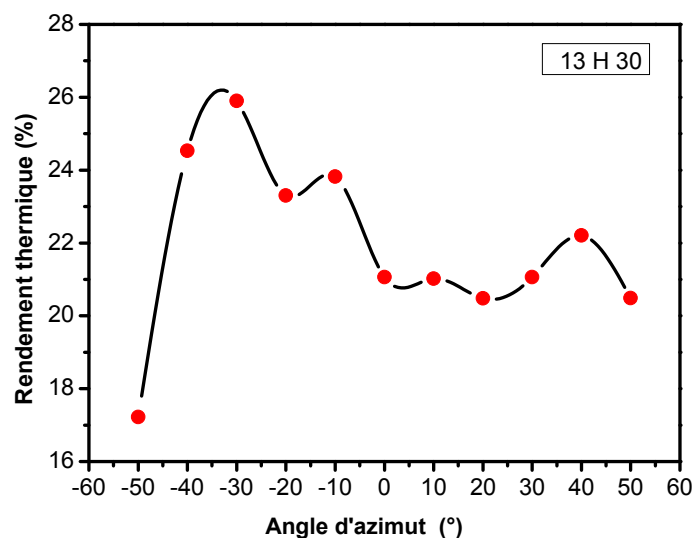


Figure 5.37: Variation du rendement thermique à 13h30 en fonction d'angle d'azimut variant de -50° à 50° .

- **Température ambiante**

La Figure 5.38 montre l'évolution temporelle de la température ambiante en fonction du temps de 9h00 jusqu'à 16h00 pour les différentes journées étudiées. Les valeurs de la température ambiante sont minimales et comprises entre 8 °C et 12 °C à 9h00 tandis que les valeurs maximales sont atteintes au midi solaire et sont comprises entre 26 °C et 32 °C. Toutes ses courbes reconnaissent une croissance continue jusqu'au midi solaire puis reconnaissent une décroissance après ce temps-là.

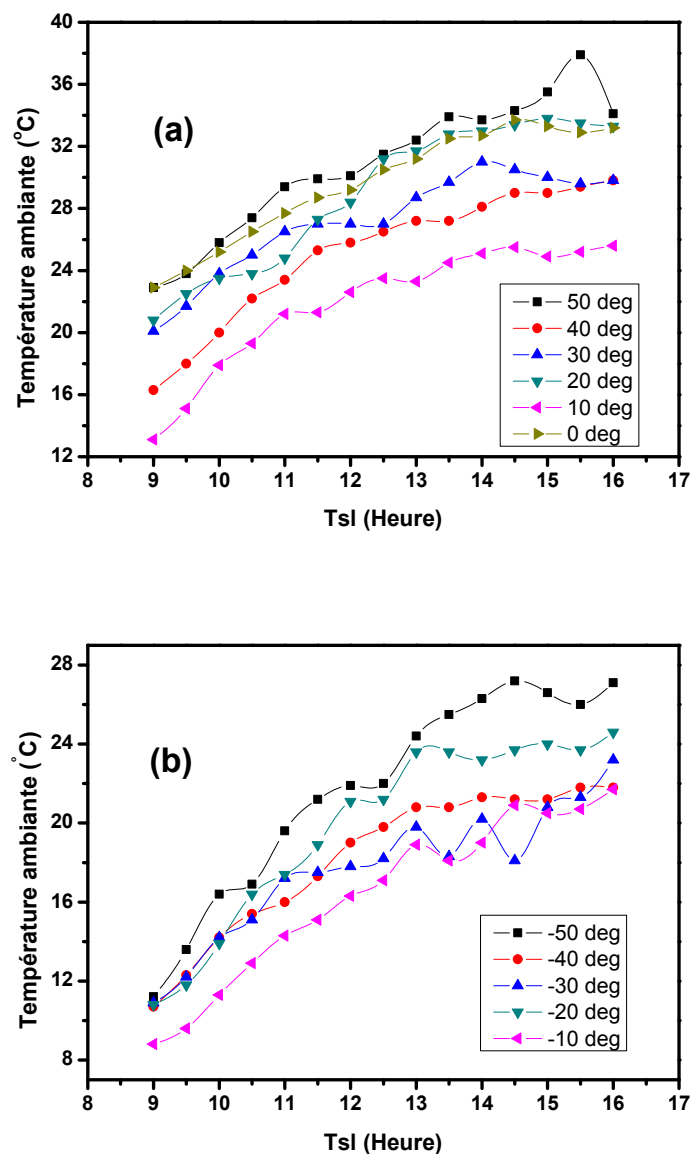


Figure 5.38 : Evolution de la température ambiante en fonction du temps pour différents angles d'azimut variant de : a) 0° à 50° b) -10° à -50°.

5.3.3. Débit de l'air

- **Température de sortie**

La Figure 5.39 montre l'évolution de la différence entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps. Elle montre aussi la croissance de cet écart avec l'augmentation du débit à l'exception des débits 3 et 4 qui représentent des journées partielles.

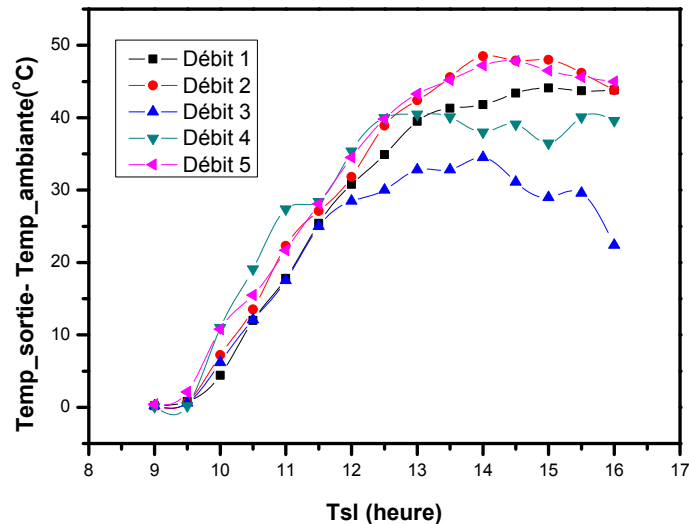


Figure 5.39 : Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour différents débits.

- **Température de Plexiglas**

La Figure 5.40 montre l'évolution de l'écart entre la température de Plexiglas et la température ambiante. Presque toutes les courbes se trouvent au dessous de la courbe présentant le débit 1. Cet écart est maximal 46.7 °C à 13h30. Plus le débit augmente plus cet écart de température décroît.

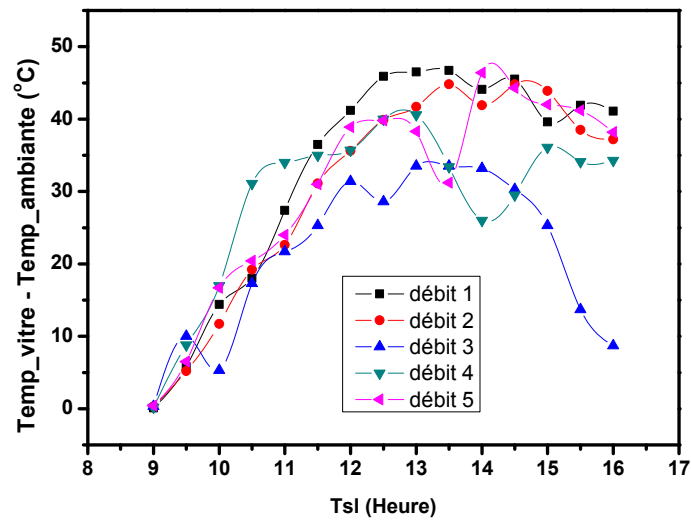


Figure 5.40 : Variation de l'écart entre la température de la vitre et la température ambiante en fonction du temps pour différents débits.

- **Température moyenne de l'absorbeur**

La Figure 5.41 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de l'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps. Presque toutes les courbes se trouvent au-dessous de la courbe présentant le débit 1. Cet écart est maximal 111.8 °C à 13h30. Plus le débit augmente plus cet écart de température décroît.

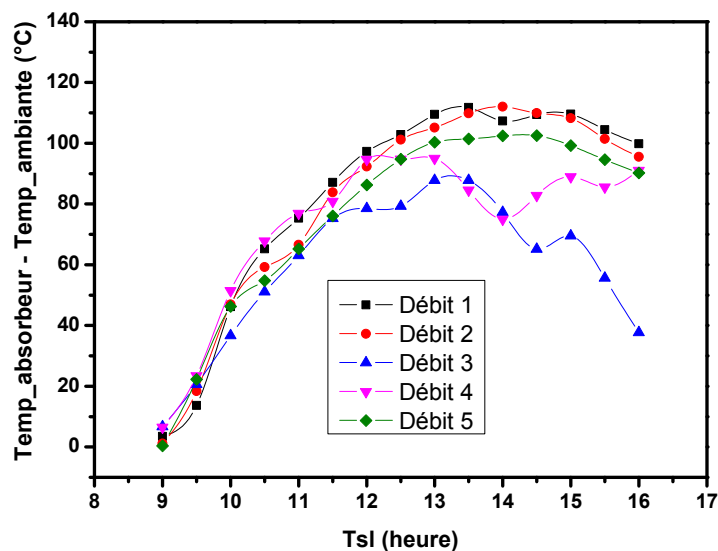


Figure 5.41 : Variation de l'écart entre la température de l'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour différents débits.

- **Température moyenne de la plaque inférieure**

La Figure 5.42 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps. Presque toutes les courbes se trouvent au-dessous de la courbe présentant le débit 1. Cet écart est maximal 57.85 °C à 15h00. Plus le débit augmente plus cet écart de température décroît.

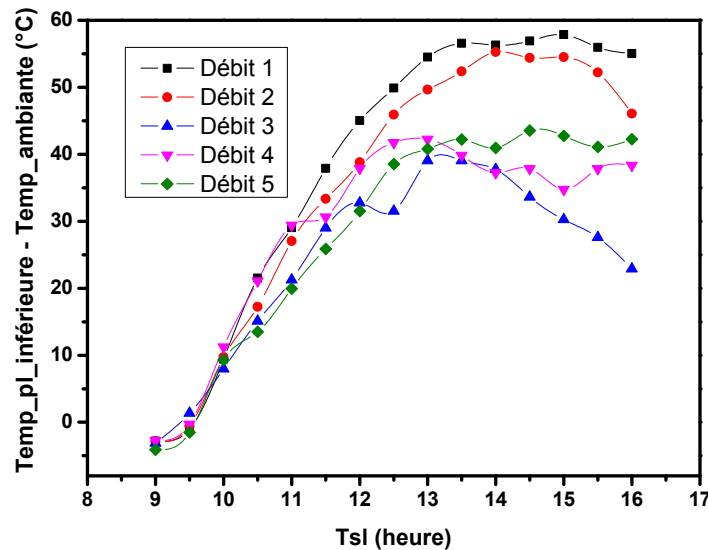


Figure 5.42 : Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour différents débits.

- **Rayonnement solaire**

La Figure 5.43 montre l'évolution temporelle de l'intensité du rayonnement solaire global pour différents débits étudiés. Les mesures collectés par nos instruments de mesure montrent une augmentation du rayonnement solaire globale qui atteint plus de 1164 W/m² à 14h30 puis cette intensité commence à diminuer par la suite.

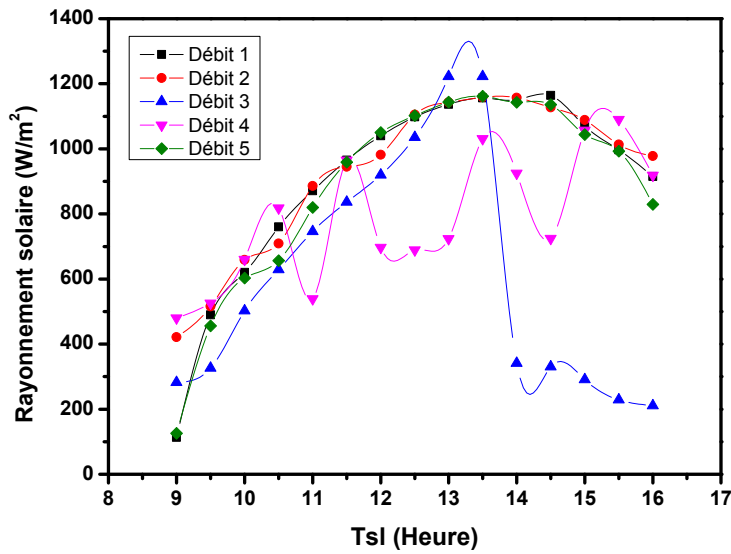


Figure 5.43 : Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps pour les cinq différents débits.

- **Rendement thermique**

La Figure 5.44 montre la variation du rendement thermique du panneau solaire en fonction du temps. Le rendement thermique du panneau a une valeur minimale de 0.16% pour le débit 4 à 9h00 et une valeur maximale de 40.22% pour le débit 5 à 16h00.

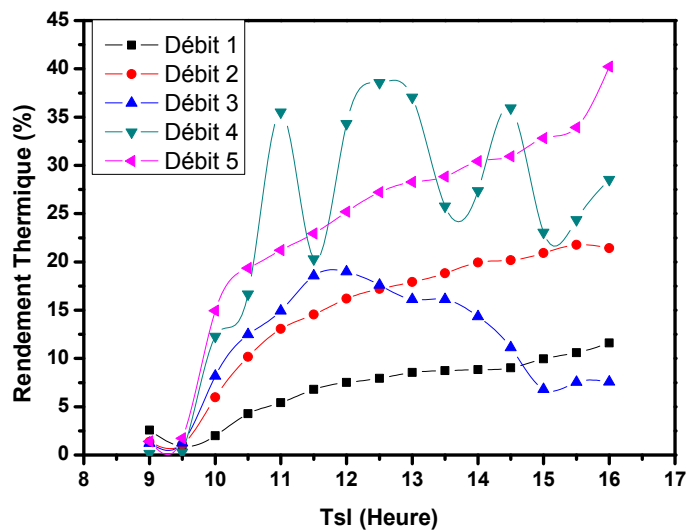


Figure 5.44 : Influence du débit d'air sur le rendement thermique du panneau solaire en fonction du temps pour les cinq différents débits.

- **Température ambiante**

La Figure 5.45 montre l'évolution temporelle de la température ambiante en fonction du temps de 9h00 jusqu'à 16h00 pour les différentes journées étudiées. Les valeurs de la température ambiante sont minimales et comprises entre 6.5 °C et 14.1°C à 9h00 tandis que les valeurs maximales sont atteintes à 15h00 et sont comprises entre 16 °C et 23.5 °C. Toutes ses courbes reconnaissent une croissance continue quand le temps croit.

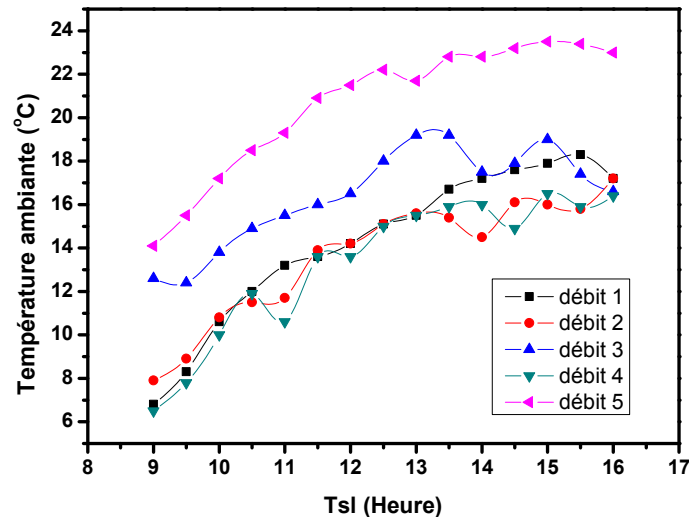


Figure 5.45 : Evolution de la température ambiante en fonction du temps pour les cinq différents débits.

5.3.4. Hauteur entre le Plexiglas et l'absorbeur

- **Température de sortie**

La Figure 5.46 montre l'évolution de la différence entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps. Dans l'intervalle de temps de 10h00 à 12h30, on observe que toutes les courbes restent au-dessus de la courbe possédant une hauteur $H= 20$ mm avec une valeur maximale de 26°C à 12h30. Après cette heure, les courbes pour $H= 27$ mm et $H= 34$ mm ont une tendance de rester toujours au-dessous de la courbe $H= 20$ mm en présentant un écart qui a une valeur maximale de 33.2°C à 15h00.

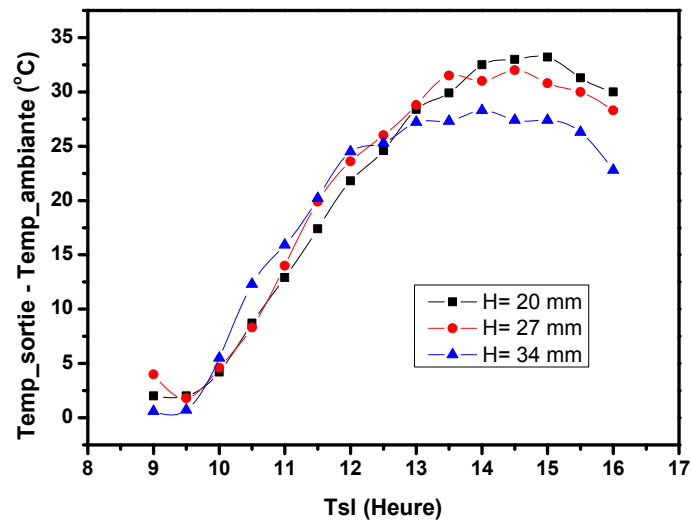


Figure 5.46 : Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour différentes hauteurs.

- **Température de Plexiglas**

La Figure 5.47 montre l'évolution de l'écart entre la température de Plexiglas et la température ambiante en fonction du temps. La courbe (H= 27 mm) reste proche de la courbe (H= 20 mm) en présentant un écart minimale de 0.37 °C à 15h00 et un écart maximale de 4.75 °C à 12h30. Plus cette hauteur est grande (H= 34 mm), plus cet écart augmente aussi en atteignant une valeur maximale de 60.4 °C à 12h30. Cette variation de température a entraîné la déformation du Plexiglas, en présentant des fissures sur la périphérie du vitre jusqu'au cisaillement transversale du Plexiglas (voir Figure 5.47 (b)).

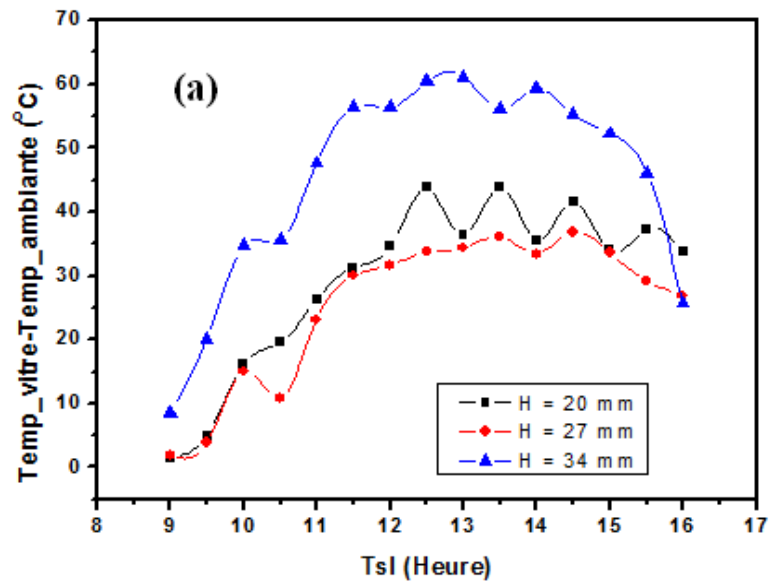


Figure 5.47 : Etat de vitre : (a) Variation de l'écart entre la température de la vitre et la température ambiante en fonction du temps pour différentes hauteurs, (b) cisaillement de la vitre.

- **Température moyenne de l'absorbeur**

La Figure 5.48 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de l'absorbeur et la température ambiante. Elle montre aussi qu'il y a un accroissement de cet écart avec l'augmentation de la hauteur toujours par rapport à la hauteur ($H = 20$ mm) à l'exception pour la troisième hauteur (34 mm) qui reconnaît une décroissance suite à une détérioration de l'état du ciel par condensation des nuages (journée partielle) qui atténuassent le rayonnement solaire dans l'intervalle de temps allant de 12h30 jusqu'à 16h00. Les trois courbes restent plus proche les uns par rapport aux autres. Cela montre que cet écart de température pour l'absorbeur ne s'affecte pas énormément avec l'augmentation de la hauteur.

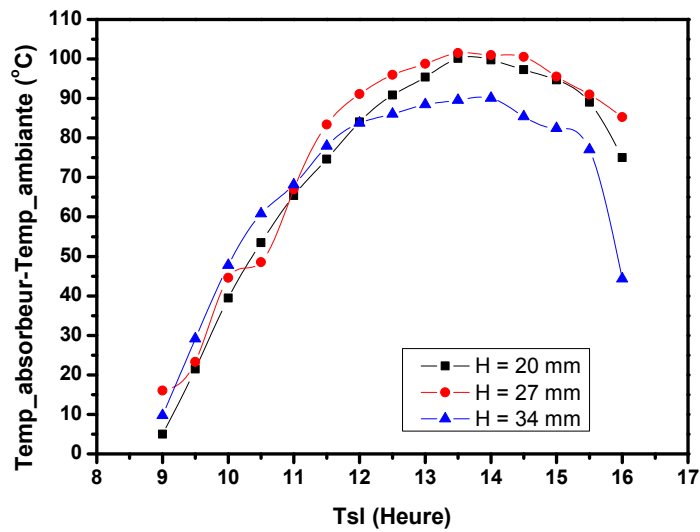


Figure 5.48 : Variation de l'écart entre la température de l'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps pour différentes hauteurs.

- **Température moyenne de la plaque inférieure**

La Figure 5.49 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de la plaque inférieure et la température ambiante. Les mêmes remarques citées pour l'absorbeur restent valables pour la plaque inférieure. L'écart de température maximale pour l'absorbeur est de 101 °C tandis que pour la plaque inférieure est de l'ordre de 53.5 °C.

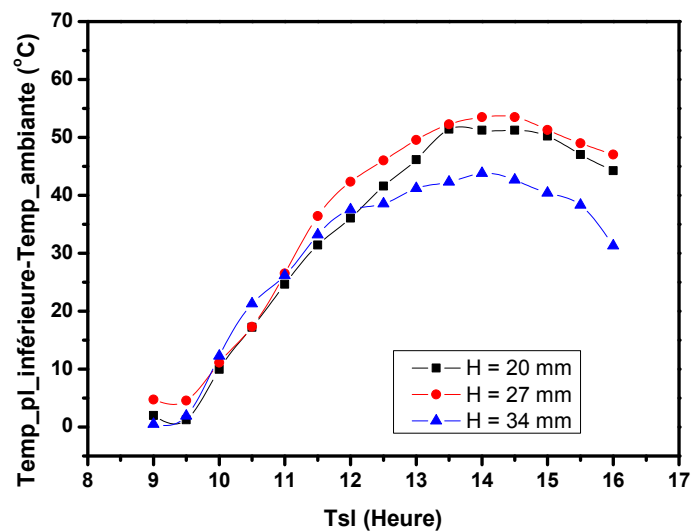


Figure 5.49 : Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour différentes hauteurs.

- **Rayonnement solaire**

La Figure 5.50 montre l'évolution temporelle de l'intensité du rayonnement solaire global pour différentes hauteurs considérées. Les mesures collectés par nos instruments de mesure montrent une augmentation du rayonnement solaire globale qui atteint plus de 1179 W/m^2 à 13h00 puis cette intensité commence à diminuer par la suite. La courbe de rayonnement solaire ($H= 34 \text{ mm}$) présente des fluctuations à partir 12h30 à cause de la présence des nuages (journée partielle).

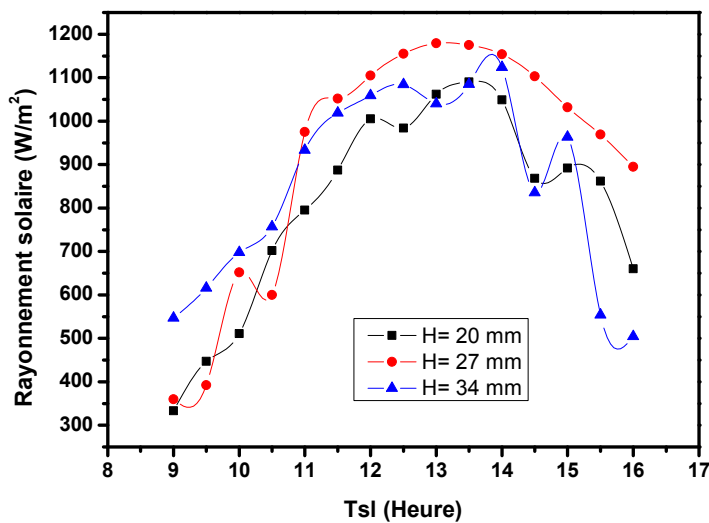


Figure 5.50 : Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps pour les trois différentes hauteurs.

- **Rendement thermique**

La Figure 5.51 montre la variation du rendement thermique pour différentes hauteurs en fonction du temps. Le rendement thermique du panneau présente une valeur minimale 2.44% pour la hauteur ($H= 27 \text{ mm}$) à 9h00 et une valeur maximale 36.17% pour la hauteur ($H= 34 \text{ mm}$) à 16h00.

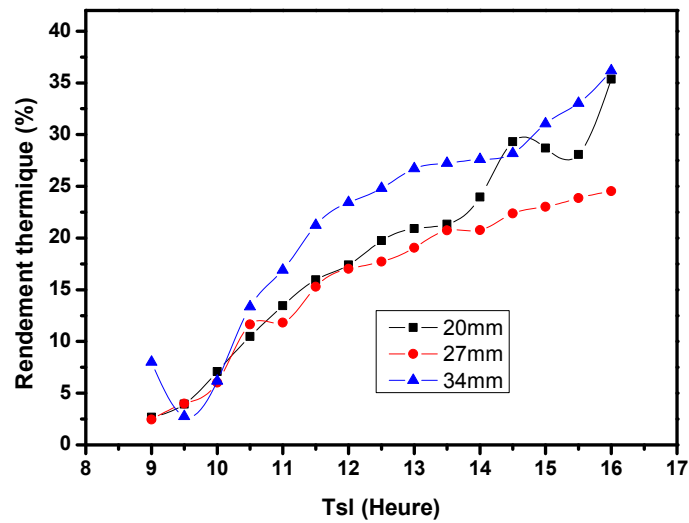


Figure 5.51 : Influence de la hauteur sur le rendement thermique du panneau solaire en fonction du temps.

- **Température ambiante**

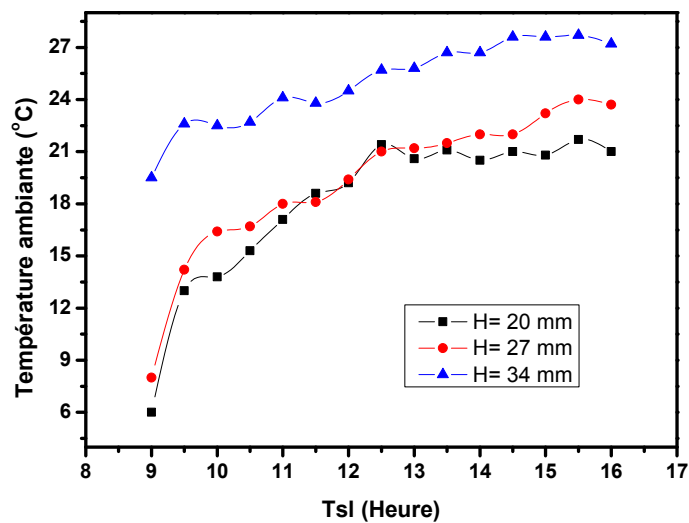


Figure 5.52 : Evolution de la température ambiante en fonction du temps pour les trois hauteurs étudiées.

La Figure 5.52 montre l'évolution temporelle de la température ambiante en fonction du temps de 9h00 jusqu'à 16h00 pour les différentes journées étudiées. Les valeurs de la température ambiante sont minimales et comprises entre 6 °C pour H = 20 mm et 19.5 °C à 9h00 pour H = 34 mm tandis que les valeurs maximales sont atteintes à 15h30 et sont

comprises entre 15.5 °C pour H = 20 mm et 27.7 °C pour H = 34 mm. Toutes ses courbes reconnaissent une croissance continue avec l'accroissement du temps.

5.3.5. Double vitrage

- **Température de sortie**

La Figure 5.53 montre l'évolution de la différence entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps. Dans l'intervalle de temps compris entre 9h00 et 12h00, on observe que toutes les courbes restent plus proche les uns par rapport aux autres. Après cette heure, l'effet du double vitrage est apparent en présentant une valeur maximale de 33,9°C à 15h00.

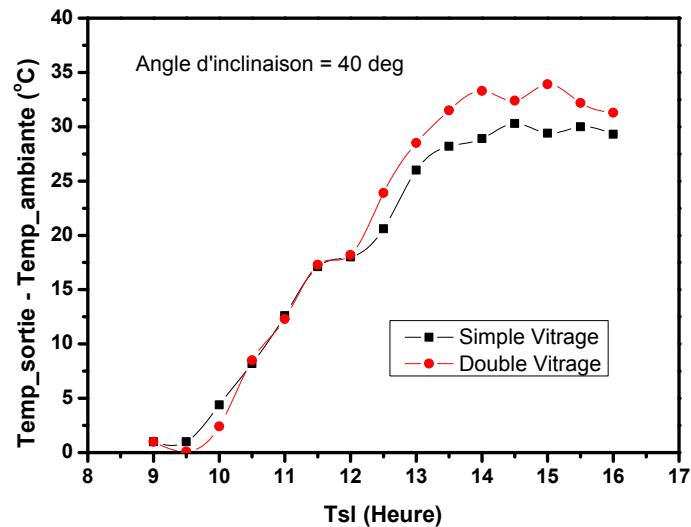


Figure 5.53 : Variation de l'écart entre la température de sortie et la température ambiante en fonction du temps pour simple et double vitrage.

- **Température de Plexiglas**

La Figure 5.54 montre l'évolution de l'écart entre la température de Plexiglas et la température ambiante. Toutefois, l'utilisation du double vitrage a montré une légère variation de l'écart de température toute en restant proche du courbe simple vitrage avec une valeur maximale de 43.5°C (simple vitrage) à 13h00.

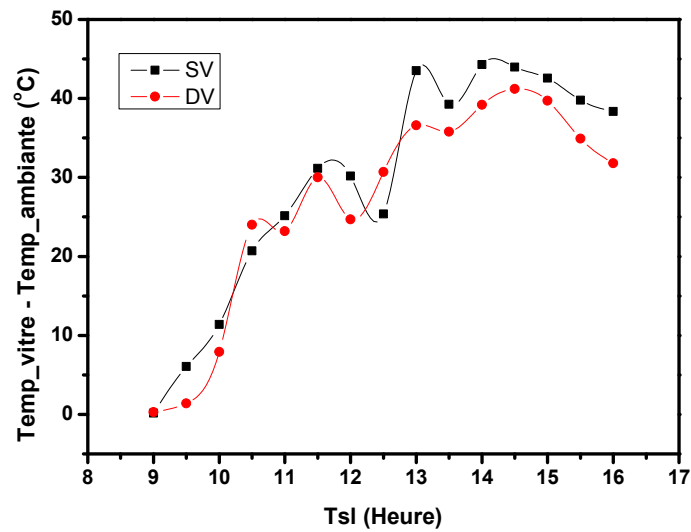


Figure 5.54 : Variation de l'écart entre la température de la vitre et la température ambiante en fonction du temps pour simple et double vitrage.

- **Température moyenne de l'absorbeur**

La Figure 5.55 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de l'absorbeur et la température ambiante en fonction du temps. On remarque deux intervalles : le premier allant de 9h00 jusqu'à 11h00 où la courbe de l'écart simple vitrage est dominante par rapport à la courbe de l'écart double vitrage tout en restant au voisinage l'un par rapport à l'autre avec une différence minimale entre les deux courbes variant de 1.25 °C à 9h00 et une différence maximale de 12.15 °C à 9h30. Le deuxième allant de 11h30 jusqu'à 16h00, c'est l'inverse qui se produit avec une différence minimale de 0.55 °C à 11h00 et une différence maximale de 12 °C à 15h00.

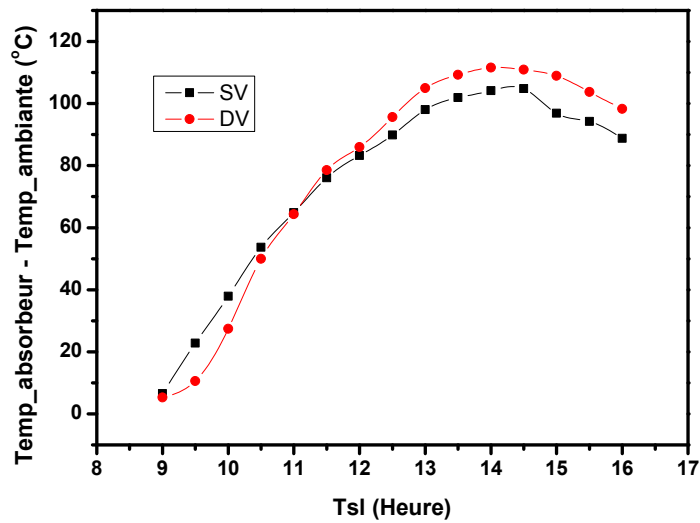


Figure 5.55 : Variation de l'écart entre la température de l'absorbteur et la température ambiante en fonction du temps pour simple et double vitrage.

- **Température moyenne de la plaque inférieure**

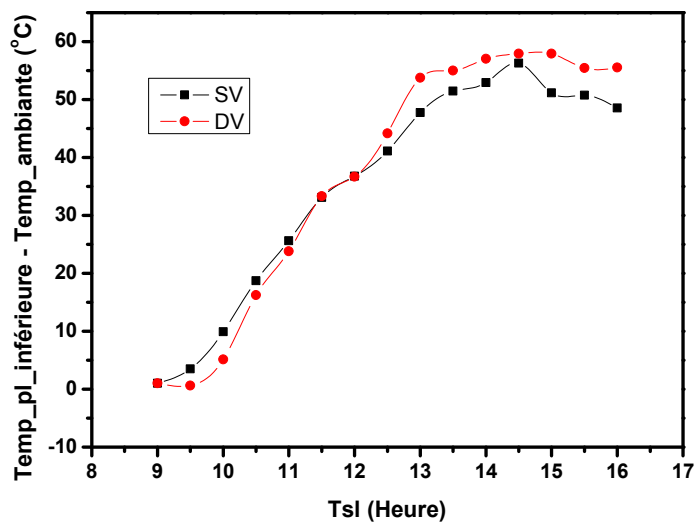


Figure 5.56 : Variation de l'écart entre la température de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps pour simple et double vitrage.

La Figure 5.56 montre l'évolution de l'écart entre la température moyenne de la plaque inférieure et la température ambiante en fonction du temps. On remarque deux intervalles : le premier allant de 9h00 jusqu'à 12h00 où la courbe de l'écart simple vitrage est dominante par rapport à la courbe de l'écart double vitrage tout en restant au voisinage l'un par rapport à

l'autre avec une différence minimale entre les deux courbes variant de 0 °C à 9h00 et une différence maximale de 4.75 °C à 10h00. Le deuxième allant de 11h30 jusqu'à 16h00, c'est l'inverse qui se produit avec une différence minimale de 1.6 °C à 14h30 et une différence maximale de 6.75 °C à 15h00.

- **Rayonnement solaire**

La Figure 5.57 montre l'évolution temporelle de l'intensité du rayonnement solaire global pour différentes journées étudiées. Les mesures collectés par nos instruments de mesure montrent une augmentation du rayonnement solaire globale qui atteint plus de 1137 W/m² à 13h30 pour la courbe double vitrage puis cette intensité commence à diminuer par la suite.

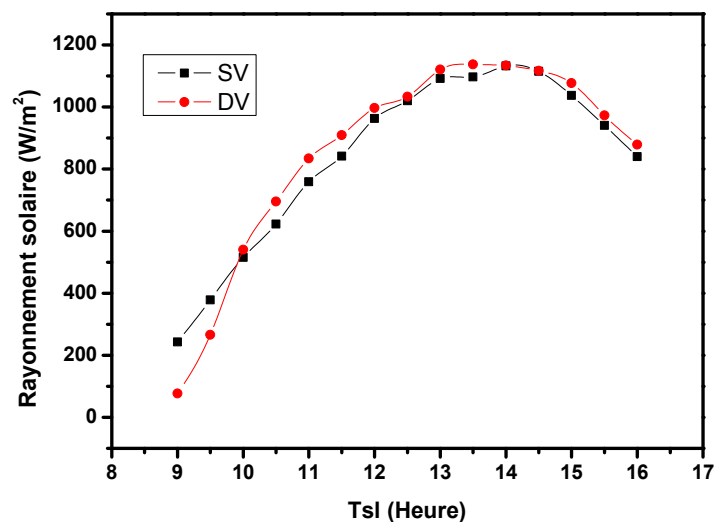


Figure 5.57 : Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps pour simple et double vitrage.

- **Rendement thermique**

La Figure 5.58 montre la variation du rendement thermique du panneau solaire en fonction du temps. On remarque deux intervalles : le premier allant de 9h30 jusqu'à 12h00 où la courbe de rendement simple vitrage est dominante par rapport à la courbe de rendement de double vitrage tout en restant au voisinage l'un par rapport à l'autre avec une différence minimale entre les deux courbes variant de 0.96% à 10h30 et une différence maximale de 3.59% à 10h00. Le deuxième allant de 12h30 jusqu'à 16h00, c'est l'inverse qui se produit avec une différence minimale de 0.28% à 15h30 et une différence maximale de 2.29% à 14h00.

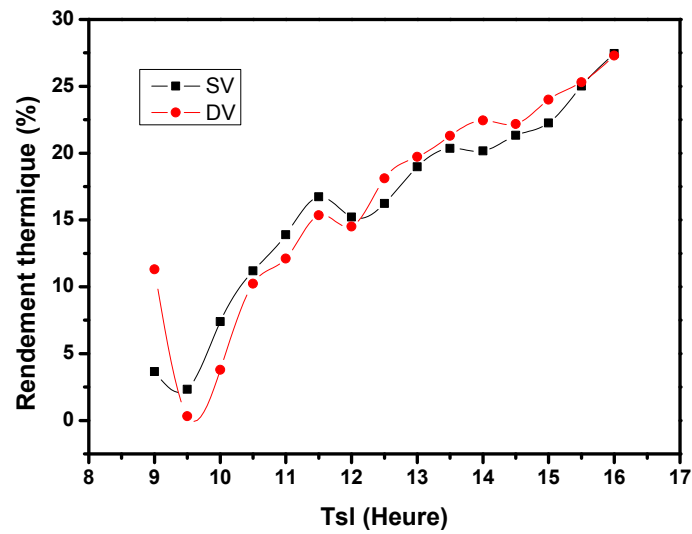


Figure 5.58 : Influence du double vitrage sur le rendement thermique du panneau solaire en fonction du temps.

- **Température ambiante**

La Figure 5.59 montre l'évolution temporelle de la température ambiante en fonction du temps de 9h00 jusqu'à 16h00 pour les différentes journées étudiées. Les valeurs de la température ambiante sont minimales et comprises entre 8 °C et 14 °C à 9h00 tandis que les valeurs maximales sont atteintes au midi solaire et sont comprises entre 19.4 °C et 25.1 °C.

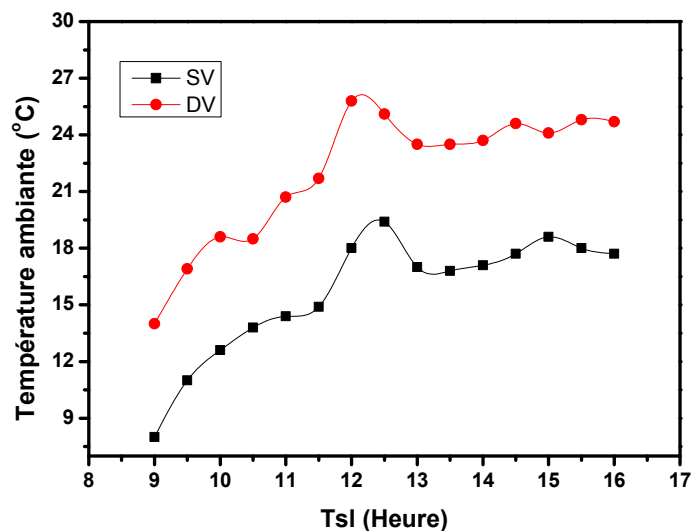


Figure 5.59 : Evolution de la température ambiante pour les cas étudiés simple et double vitrage en fonction du temps.

5.4. Conclusions

Le modèle d'estimation de la température instantanée de l'air (MAT) en utilisant les données météorologiques qui ont été mesurées à Laghouat (Algérie). La température instantanée de l'air définie par le présent modèle peut être calculée à n'importe quel moment de la nuit ou de la période de jour en fonction de la pression atmosphérique, du rayonnement solaire global et des données d'humidité relative. Ce travail a été comparé à trois modèles publiés dans la littérature: Wave, Idliman et Double cosinus. Quinze mois de pression atmosphérique horaire, de rayonnement solaire global, d'humidité relative et de température de l'air collectés au cours de la période (janvier 2015 à mars 2016) ont été utilisés pour tester l'exactitude des différents modèles étudiés. L'analyse des jours choisis au hasard a montré que le modèle MAT donnait un bon ajustement aux données observées. Le RMSE du modèle MAT est inférieur à 0,5 °C pendant toute la période d'étude que les autres modèles étudiés dans l'intervalle (2 °C, 4 °C). Concernant le modèle de température quotidienne de l'air a donné de bons résultats. L'erreur de biais moyen (MBE) était comprise entre -0,493 °C et 1,098 °C et la valeur RMSE la plus basse a été obtenue pour l'emplacement de Laghouat et la plus grande pour l'emplacement de Riadh. Les valeurs du coefficient de détermination (R^2) ont été comprises entre 0,655 pour l'emplacement de Riadh et 0,782 pour l'emplacement de Paris. Les résultats ont montré que le modèle avait une meilleure précision et fonctionnait raisonnablement bien sur différents sites. Nous avons entrepris des études en parallèle pour optimiser les différents paramètres de conversion thermique concernant : l'angle d'inclinaison, angle d'azimut, le débit de l'air, la hauteur entre Plexiglas et l'absorbeur et le cas du double vitrage. Les résultats révèlent une bonne concordance avec celles citées dans la littérature.

Références

- [1] **Oliveiraa A. P., Escobedob J. F., Machadoa A. J., Soaresa J.** Correlation models of diffuse solar radiation applied to the city of Saõ Paulo, Brazil. *Applied Energy*, 71, pp. 59-73, 2002.

- [2] **Muzathik A. M., Nik W. B. W., Ibrahim M. Z., Samo K. B., Sopian K., Alghoul M. A.** Daily global solar radiation estimate based on sunshine hours. *Int. J. of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, 6(1), pp.75-80, 2011.

| Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail entre dans le cadre de contribution dans l'étude des capteurs solaires à air pour une meilleure compréhension du fonctionnement de ces systèmes dans le site de Laghouat.

Dans cette étude menée, nous avons pris les objectifs principaux suivants: la modélisation de la température instantanée de l'air, la modélisation de la température journalière de l'air, la conception du capteur solaire à air et sa réalisation au sein du laboratoire de génie-mécanique et l'optimisation de ses performances thermiques où nous avons ciblé les paramètres suivants : l'angle d'inclinaison, angle d'azimut, débit de l'air, la hauteur entre le Plexiglas et l'absorbeur et finalement le double vitrage tout en tenant compte des coefficients de pertes thermiques.

Deux approches ont été adoptées dans ce travail de thèse:

- **Une approche expérimentale**

Cette approche est basée sur les mesures collectées par nos instruments tels que : le solarimètre pour la mesure de l'intensité du rayonnement solaire et l'anémomètre pour la mesure de la vitesse de vent et le débit d'écoulement. La mesure de la température de l'air est recueillie par des sondes thermiques dotées d'un afficheur à travers lesquelles nous avons pu recueillir des données pendant la période d'essai. L'étude expérimentale a été menée à l'Université de Laghouat. La collection des données expérimentales a débuté à partir de 9h.00 et a terminé à 16h.00 pour tous les jours étudiés.

La réalisation du capteur solaire est faite au sein de l'atelier de génie-mécanique. La manipulation des machines-outils : tour parallèle, fraiseuse et perceuse, était bénéfique dans notre vie professionnelle plus l'expérience acquise dans le domaine de soudage à l'arc.

- ✓ **Une approche de modélisation**

L'approche de modélisation, nous a permis d'établir en premier lieu un premier modèle d'estimation de la température instantanée de l'air ambiant en fonction des paramètres météorologiques. En deuxième lieu, cette approche nous a permis d'établir un deuxième modèle d'estimation de la température journalière de l'air ambiant en fonction des paramètres

météorologiques. Ces modèles peuvent fournir une contribution utile à la compréhension de l'un des paramètres principaux qui améliorent les performances des capteurs.

Résultats Expérimentaux

Le modèle d'estimation de la température instantanée de l'air (MAT) en utilisant les données météorologiques qui ont été mesurées à Laghouat (Algérie). La température instantanée de l'air définie par le présent modèle peut être calculée à n'importe quel moment de la nuit ou du jour en fonction de la pression atmosphérique, du rayonnement solaire global et des données d'humidité relative. Ce travail a été comparé à trois autres modèles publiés dans la littérature: Wave, Idliman et Double cosinus. Quinze mois de collecte de données à chaque heure de pression atmosphérique, de rayonnement solaire global, d'humidité relative et de température de l'air collectés au cours de la période (janvier 2015 à mars 2016) ont été utilisés pour tester les performances des différents modèles étudiés. L'analyse pour les jours choisis au hasard a montré que le modèle MAT a un bon ajustement par rapport aux données observées. Le RMSE du modèle MAT est inférieur à 0,5 °C pendant toute la période d'étude par contre tous les autres modèles étudiés leur RMSE est situé dans l'intervalle (2 °C- 4 °C).

Concernant le modèle proposé de la température quotidienne de l'air a donné de bons résultats. L'erreur de biais moyen (MBE) était comprise entre -0,493 °C et 1,098 °C. Les valeurs moyennes de R^2 sont comprises entre 0,655 et 0,782, ce qui présente une bonne précision. La valeur moyenne la plus basse de R^2 est attribuée à l'emplacement de Riadh, en Arabie Saoudite et la plus haute est à l'emplacement de Paris, en France. Par conséquent, les valeurs moyennes de MAE sont comprises entre 1,007 °C et 1,569°C. La valeur moyenne la plus faible du MAE est attribuée à Laghouat, en Algérie, et la plus élevée est celle de Riadh, en Arabie Saoudite. De plus, les valeurs de RMSE et de MPE sont comprises entre (1,227 °C et 1,716 °C) et entre (-3,301 % et 3,987 %). La valeur la plus faible de RMSE est attribuée à Laghouat, en Algérie, et la plus élevée à Riadh, Arabie Saoudite. Les résultats ont montré que le modèle avait une meilleure précision et fonctionnait raisonnablement bien sur différents sites.

Nous avons entrepris des études en parallèle pour optimiser les différents paramètres de conversion thermique concernant :

✓ **l'angle d'inclinaison**

Les résultats révèlent sur l'évolution de ces paramètres les points suivants :

1. Température de sortie :

Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 0° et 40° , on observe que toutes les courbes restent au-dessus de la courbe possédant un angle d'inclinaison 0° de 10h00 à 16h00 avec une valeur maximale de 39.5°C à 14h00. Pour l'intervalle d'angle compris entre 50° et 90° , on observe que toutes les courbes restent aux voisinages les unes à côtés des autres en présentant une différence de température maximale de valeur 47°C à 16h00 pour l'angle d'inclinaison égale à 80° à l'exception de l'angle 50° (présence de nuages).

2. Température moyenne de l'absorbeur :

Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 0° et 40° , on observe que l'écart croît avec l'accroissement d'angle en présentant une valeur maximale de 96.9°C à 14h00. Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 50° et 90° , on observe que c'est l'inverse qui s'y produit c'est-à-dire que l'écart décroît avec l'accroissement d'angle en présentant une valeur maximale de 114.15°C à 15h00.

3. Température moyenne de la plaque inférieure :

Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 0° et 40° , on observe que l'écart croît avec l'accroissement d'angle en présentant une valeur maximale de 43.15°C à 13h00. Dans l'intervalle d'angle d'inclinaison compris entre 50° et 90° , on observe c'est l'inverse qui s'y produit c'est-à-dire que l'écart décroît avec l'accroissement d'angle en présentant une valeur maximale de 58.65°C à 14h30.

✓ **L'angle d'azimut**

Les températures de sorties maximales se trouvent au voisinage de la courbe d'angle d'azimut 0° . Le rendement thermique du panneau présente une valeur minimale 17.22% pour un angle d'azimut égale à -50° et une valeur maximale 25.9% pour un angle d'azimut -30° .

✓ **Le débit de l'air**

Elle montre aussi la croissance de cet écart (la température de sortie - la température ambiante) avec l'augmentation du débit à l'exception des débits 3 et 4 qui représentent des journées partielles. Le rendement thermique du panneau a une valeur minimale de 0.16% pour le débit 4 à 9h00 et une valeur maximale de 40.22% pour le débit 5 à 16h00.

✓ **La hauteur entre Plexiglas et l'absorbeur**

Dans l'intervalle de temps de 10h00 à 12h30, on observe que toutes les courbes de températures de sorties restent au-dessus de la courbe possédant une hauteur $H= 20$ mm avec une valeur maximale de 26°C à 12h30. Après cette heure, les courbes pour $H= 27$ mm et $H= 34$ mm ont une tendance de rester toujours au-dessous de la courbe $H= 20$ mm en présentant un écart qui a une valeur maximale de 33.2°C à 15h00. Le rendement thermique du panneau présente une valeur minimale 2.44% pour la hauteur ($H= 27$ mm) à 9h00 et une valeur maximale 36.17% pour la hauteur ($H= 34$ mm) à 16h00.

➤ **Double vitrage**

Dans l'intervalle de temps compris entre 9h00 et 12h00, on observe que toutes les courbes restent plus proche les uns par rapport aux autres. Après cette heure, l'effet du double vitrage est apparent en présentant une valeur maximale de 33.9°C à 15h00. On remarque deux intervalles : le premier allant de 9h30 jusqu'à 12h00 où la courbe de rendement simple vitrage est dominante par rapport à la courbe de rendement de double vitrage toute en restant au voisinage l'un par rapport à l'autre avec une différence minimale entre les deux courbes variant de 0.96% à 10h30 et une différence maximale de 3.59% à 10h00. Le deuxième allant de 12h30 jusqu'à 16h00, c'est l'inverse qui se produit avec une différence minimale de 0.28% à 15h30 et une différence maximale de 2.29% à 14h00.

Les résultats révèlent une bonne concordance avec celles citées dans la littérature. L'ensemble des études faites ont fait l'objet de communications et publications nationales et internationales (voir Annexe B).

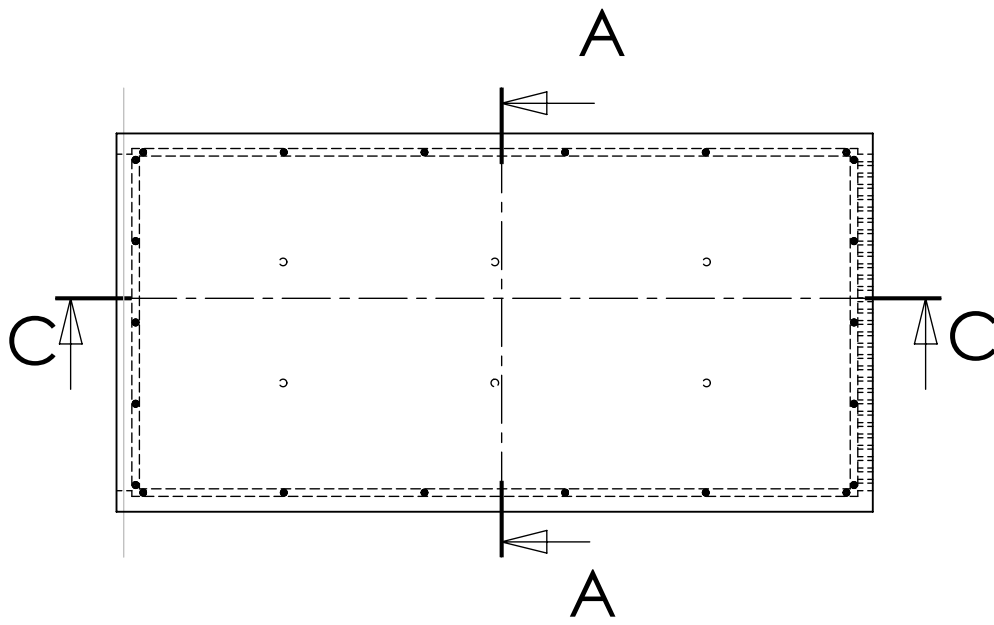
Et comme perspectives, de nouvelles pistes qui nous semblent intéressantes pour de nouvelles contributions sont :

- Il serait intéressant d'étendre cette étude à d'autres types de capteurs solaires à air.
- L'utilisation de plusieurs formes de chicanes qui améliorent de plus en plus les performances des capteurs solaires à air.
- L'application du modèle de rayonnement solaire tirait du modèle de la température ambiante de l'air dans des différents sites pour voir les performances du modèle.
- Conception de nouvelles structures de capteurs mais cette fois dotées de moyens d'enregistrement automatiques ainsi que leurs orientations.

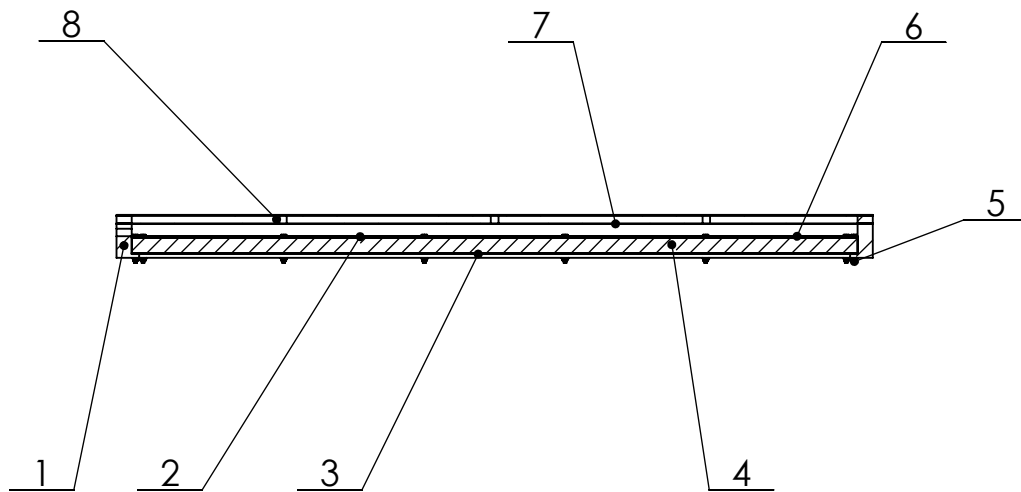
| Annexes

Annexe A

Dessins de définition et d'ensemble



COUPE A-A
EHELLE 1 : 20

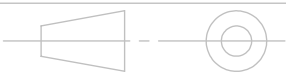


COUPE C-C
EHELLE 1 : 20

Echelle: 1:20

Université Teldji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

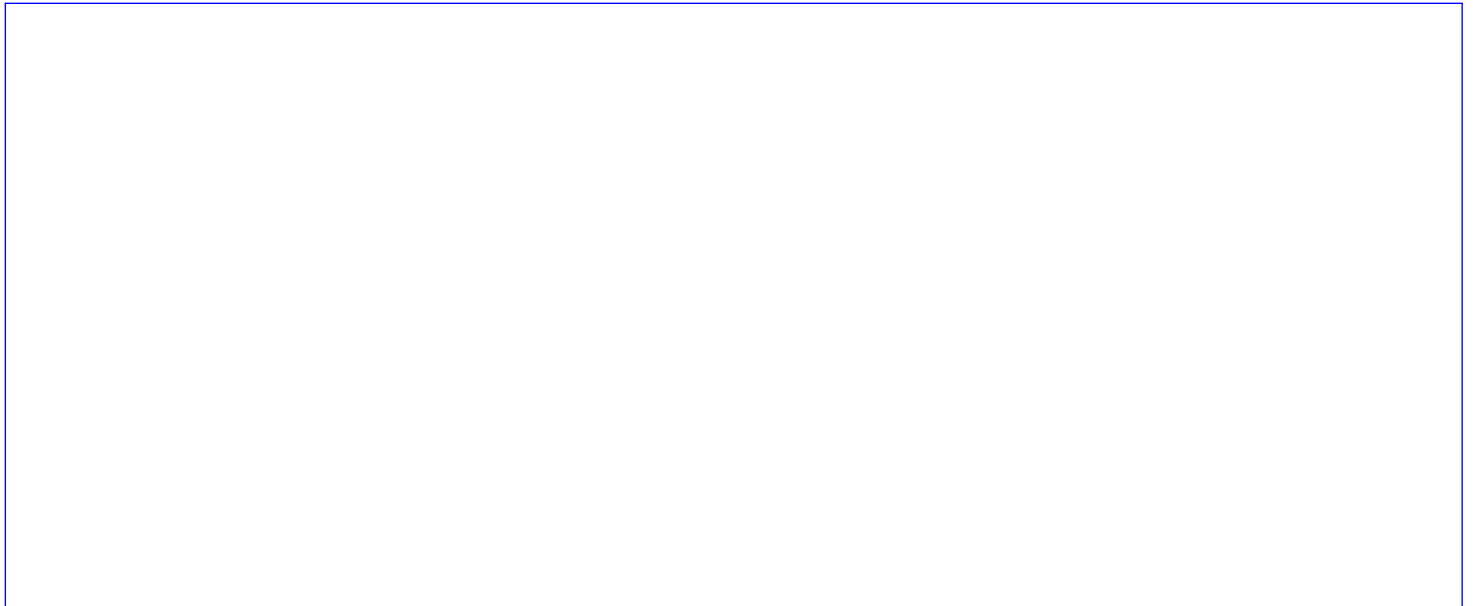


Format: A4

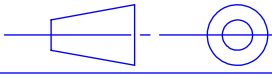
Capteur solaire

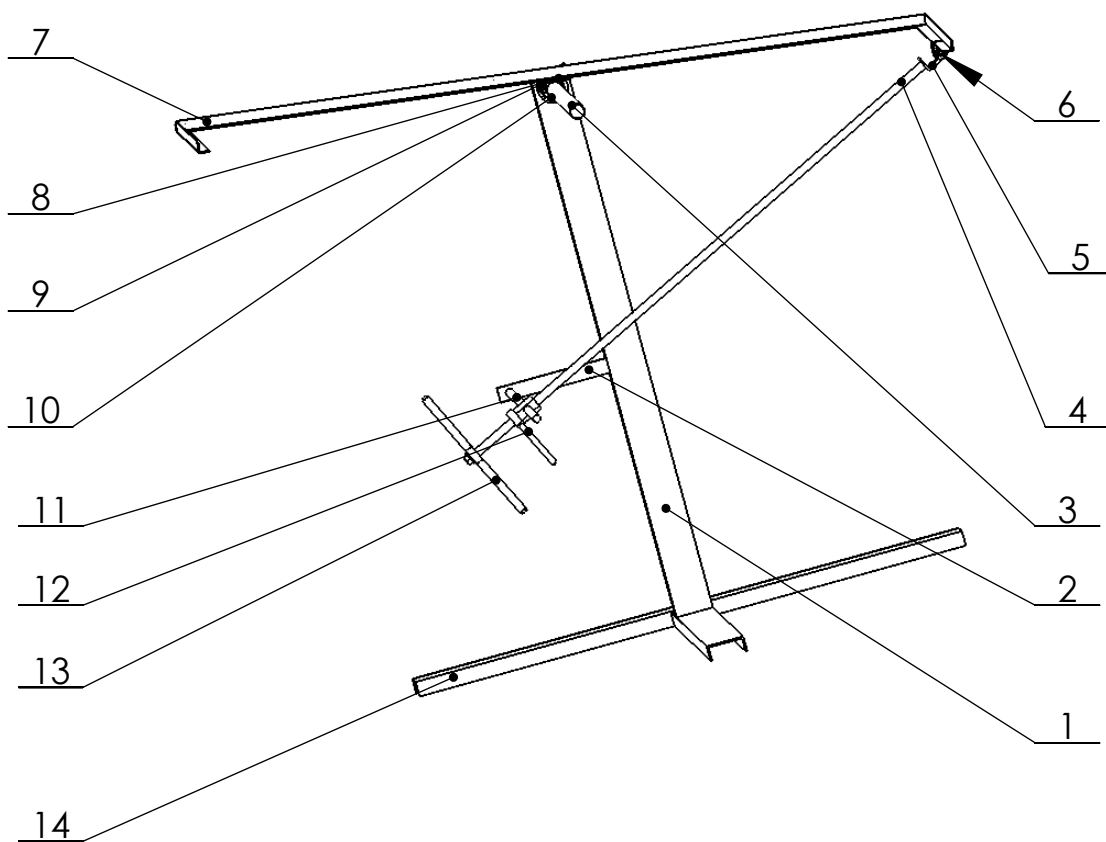
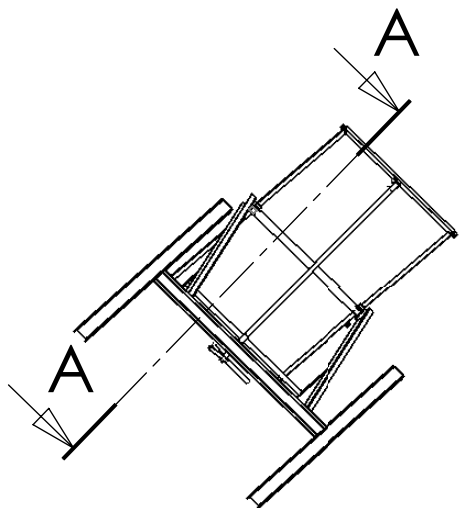
Projet: Capteur
solaire

Numéro : 01



8	6	Support en bois	Bois	
7	1	Absorbeur	Acier galvanisé	
6	1	Plaque inférieure	Acier galvanisé	
5	22	Vis à tete cylindrique ISO 1580 - M8 x 70		
4	1	Polystyrène		
3	1	Contreplaquée	Bois	
2	1	Isolant en bois	Bois	
1	1	Cadre en bois	Bois	
REP	NB.	Désignation	Matière	Observation

Echelle: 1:20	Université Telidji Amar - Laghouat	Dessiné par: Bensahal Djamel
	Capteur solaire	Projet: Capteur solaire
Format: A4		Numéro: 01



COUPE A-A
ECHELLE 1 : 20

Echelle: 1:20

Université Teldji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

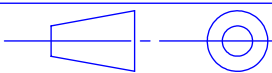


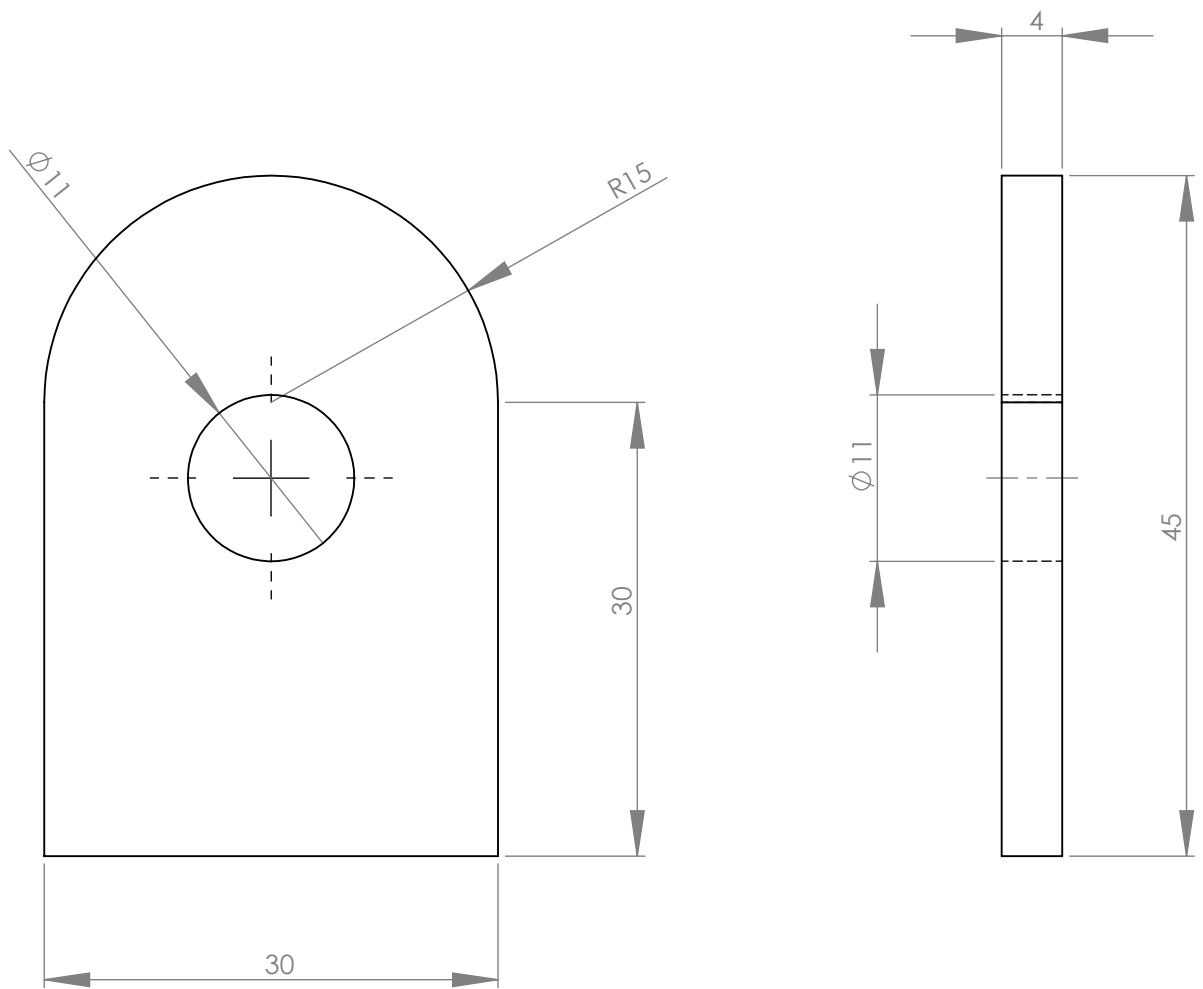
Format: A4

Support métallique

Projet: Capteur
solaire

Numéro: 2

14	3	Traverse	Acier de construction	
13	1	Manivelle	Acier de construction	
12	1	Bras frein	Acier de construction	
11	1	Tige de guidage	Acier de construction	
10	2	Axe d'articulation	Acier de construction	
9	2	Moyeu d'articulation	Acier de construction	
8	2	Plaque	Acier de construction	
7	1	Cadre en cornière	Acier de construction	
6	2	Appui pour la tige de guidage	Acier de construction	
5	1	Porte tige filetée	Acier de construction	
4	1	Tige filetée	Acier de construction	
3	1	Tube rond	Acier de construction	
2	1	Porte tige de guidage	Acier de construction	
1	2	Appui vertical	Acier de construction	
REP	NB.	Désignation	Matière	Observation
Echelle: 1:20		Université Telidji Amar - Laghouat		Dessiné par: Bensahal Djamel
		<h2>Support métallique</h2>		Projet: Capteur solaire
				Numéro: 02
Format: A4				



Tolérances = ± 0.1 sauf indication

Ra 6.3/

Echelle: 2:1

Université Teldji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

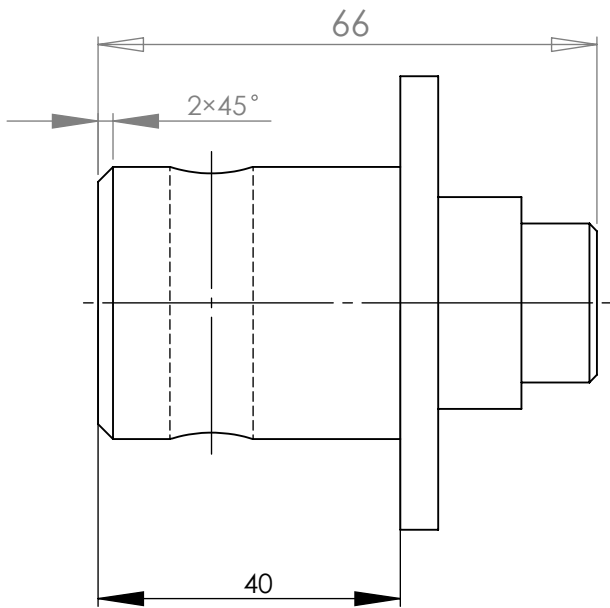
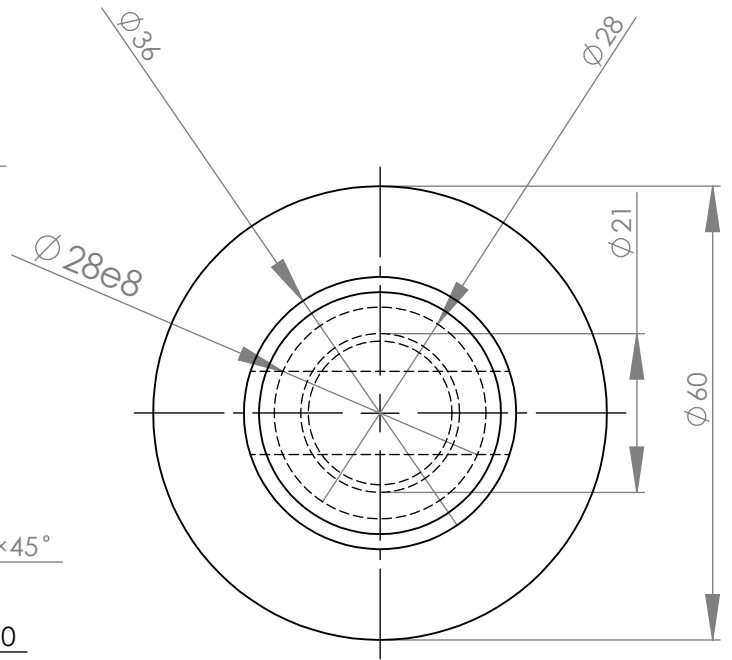
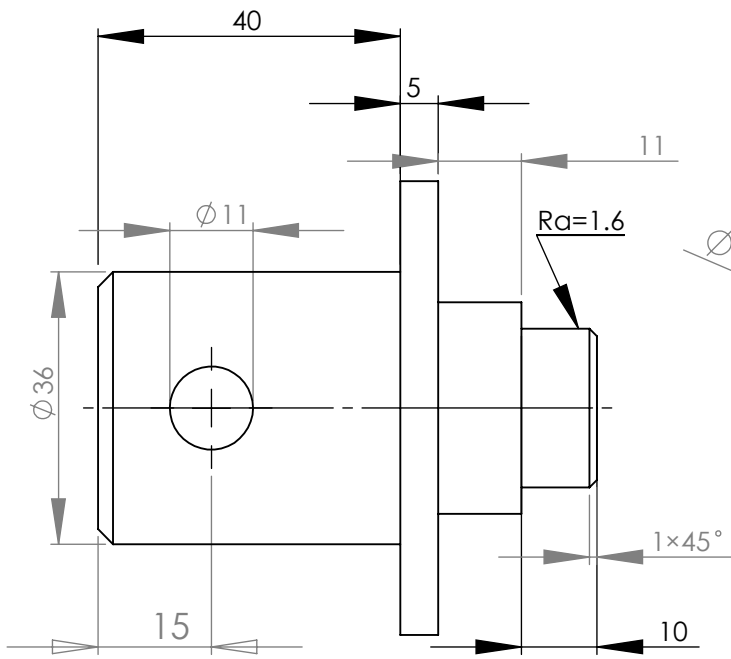


Appui pour la tige de guidage

Projet: Capteur
solaire

Format: A4

Numéro: 03



Tolérance = ± 0.1 sauf indication

$Ra 6.3$

sauf indication

Echelle: 1:1

Université Teldji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

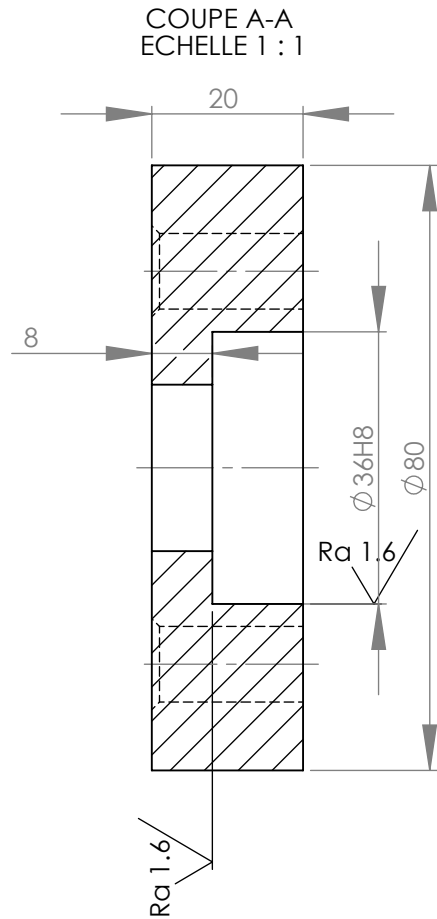
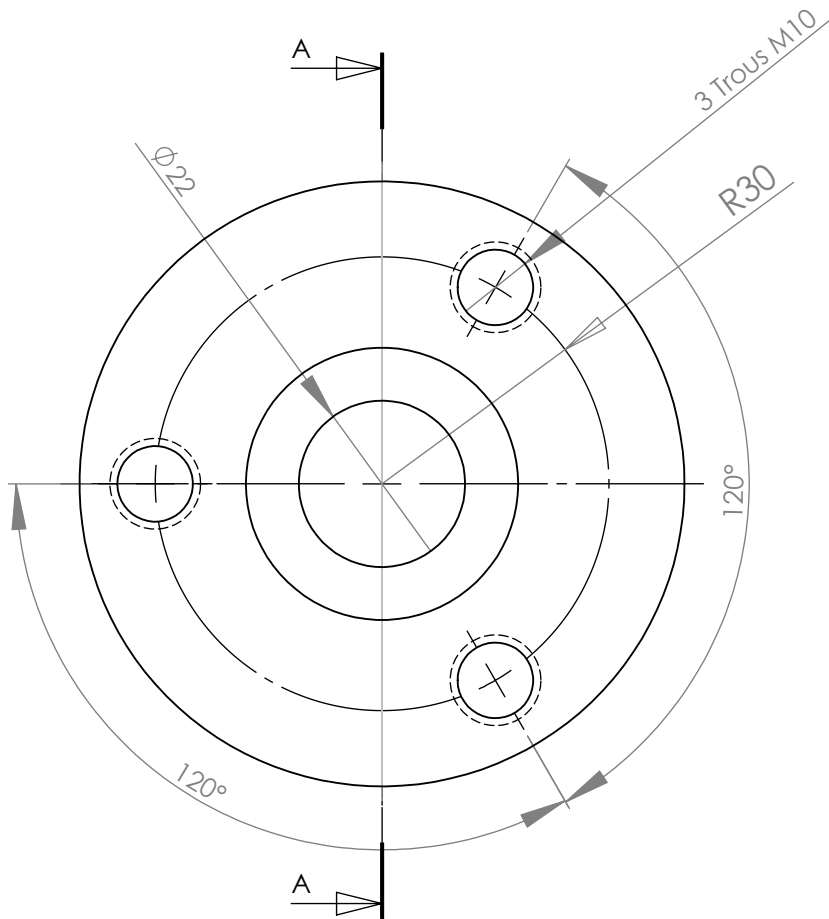
Projet: Capteur
solaire

Numéro:04



Format: A4

Axe d'articulation



Tolérance: ± 0.1 sauf indication

Ra 6.3

Echelle: 1:1

Université Teliidji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

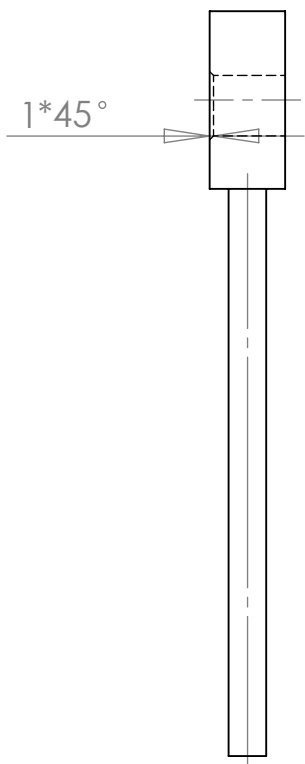
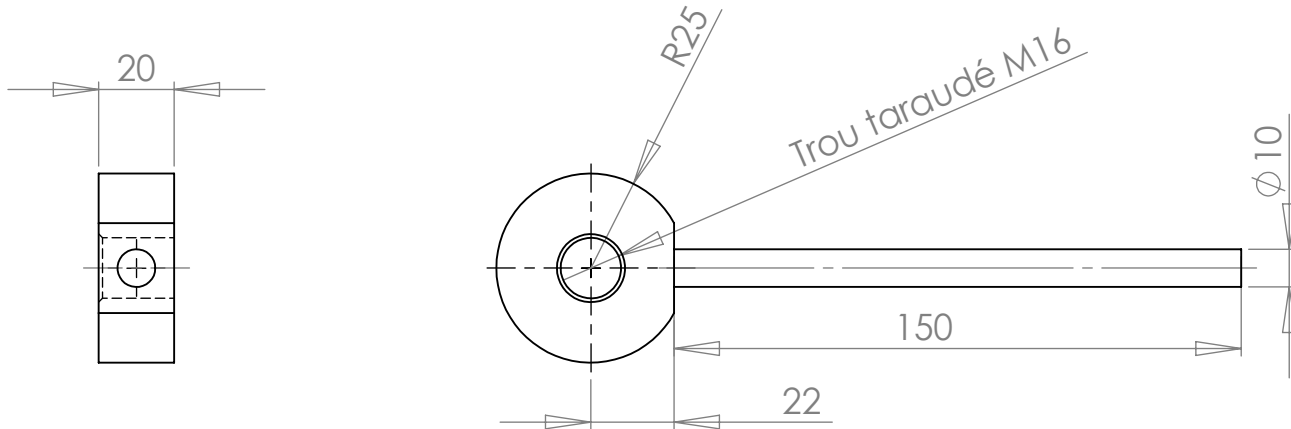


Format: A4

Moyeu d'articulation

Projet: Capteur
solaire

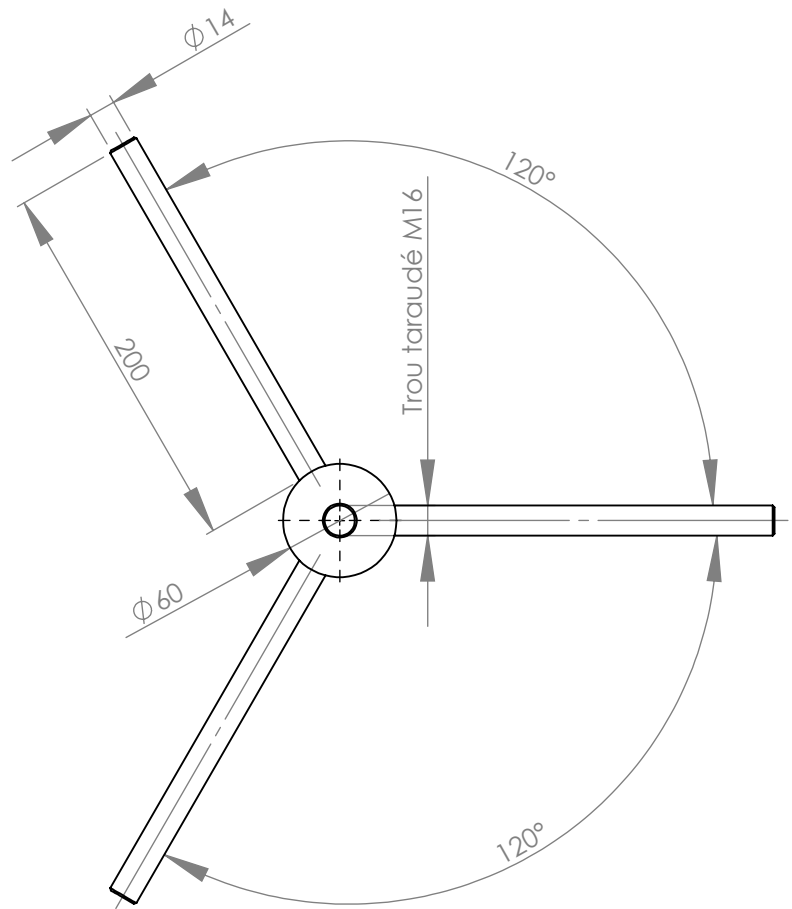
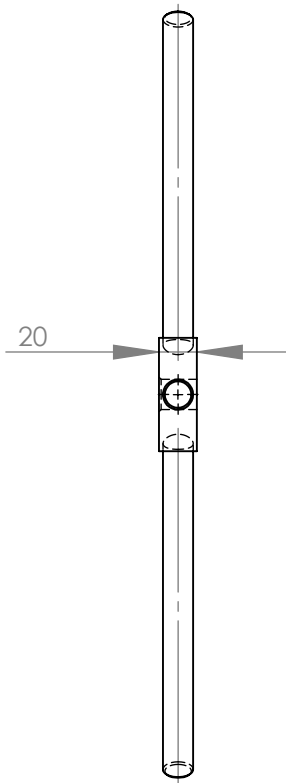
Numéro: 05



Tolérance: ± 0.1 sauf indication

Ra 6.3

Echelle: 1:2	Université Teliidji Amar - Laghouat	Dessiné par: Bensahal Djamel
	<h1>Bras frein</h1>	Projet: Capteur solaire
Format: A4		Numéro: 06



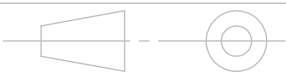
Tolérance: ± 0.1

Ra 6.3

Echelle: 1:4

Université Teliidji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

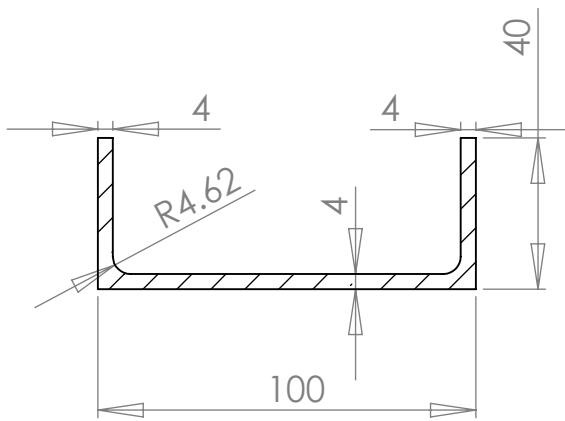


Format: A4

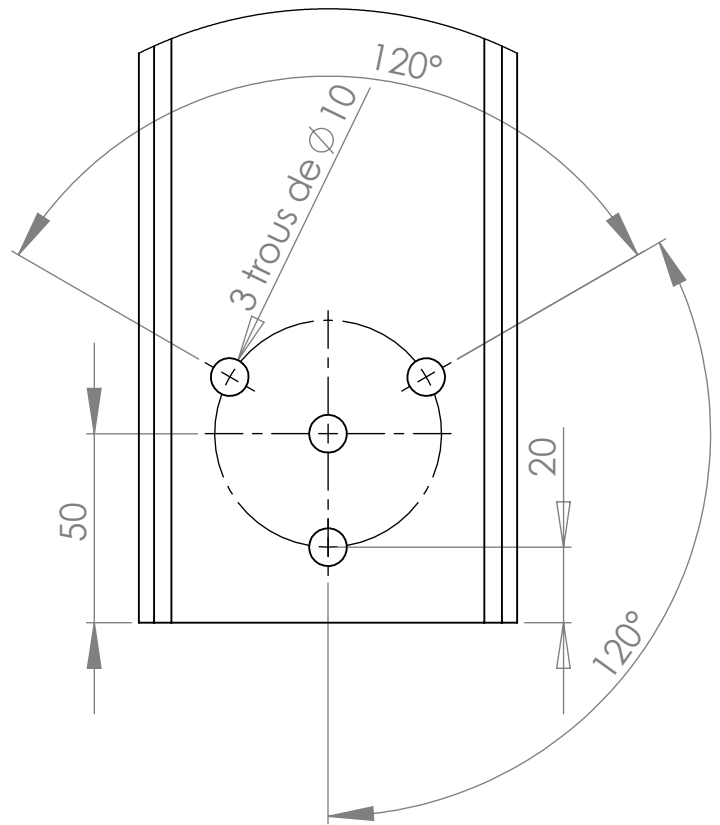
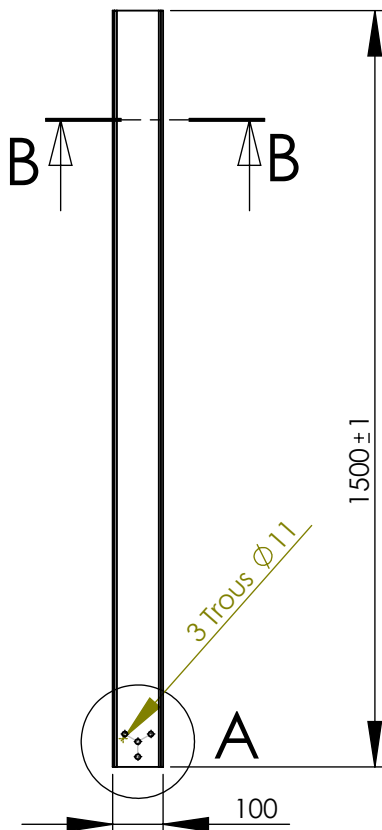
Manivelle

Projet: Capteur
solaire

Numéro: 07



COUPE B-B
ECHELLE 1 : 2



DÉTAIL A
ECHELLE 1 : 2

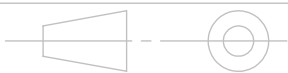
Tolérance: ± 0.1 sauf indication

Ra 6.3

Echelle: 1:15

Université Teldji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

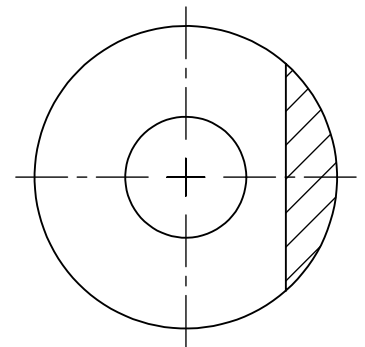
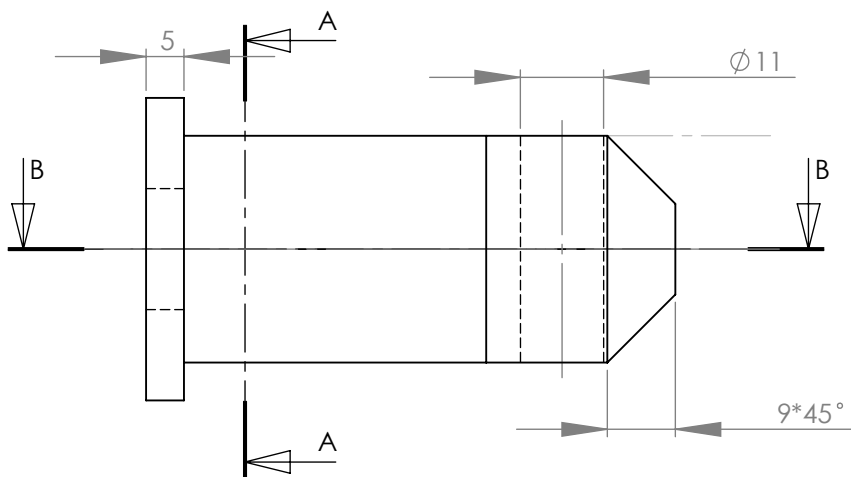
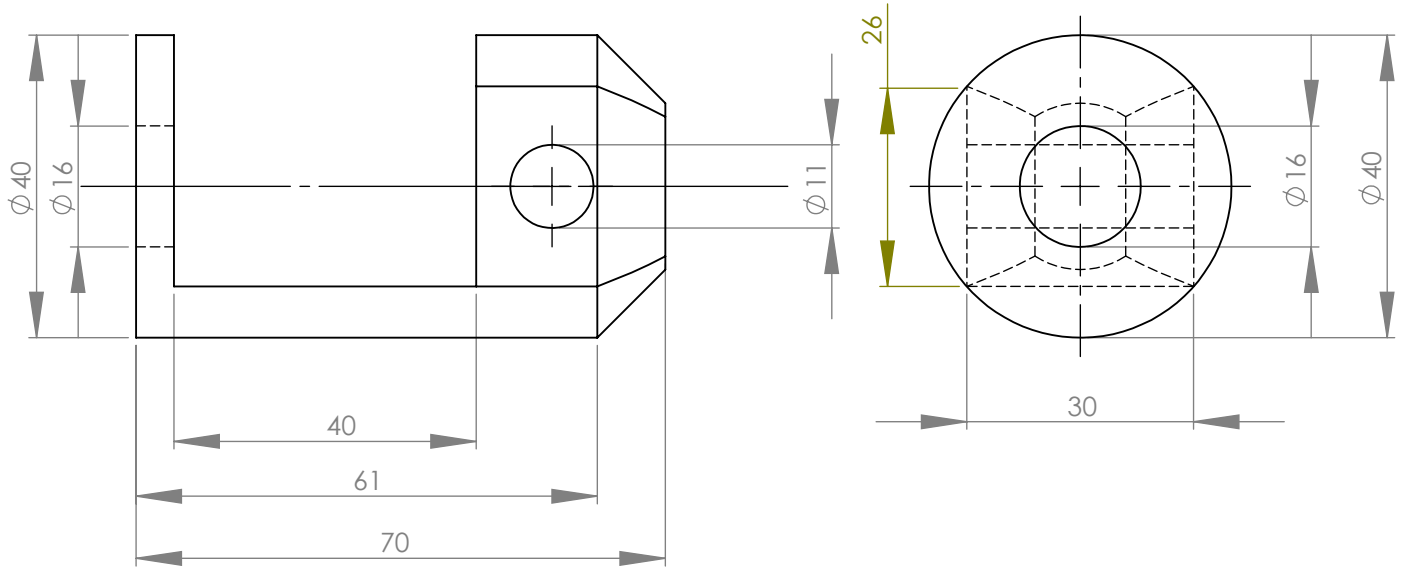


Format: A4

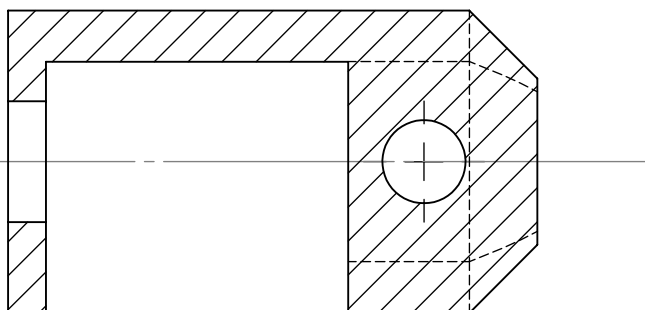
Appui vertical

Projet: Capteur
solaire

Numéro: 08



COUPE A-A



COUPE B-B

Tolérance: ± 0.1

Ra 6.3/

Echelle: 1:1

Université Teldji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

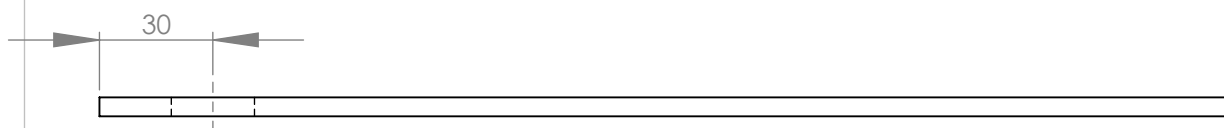
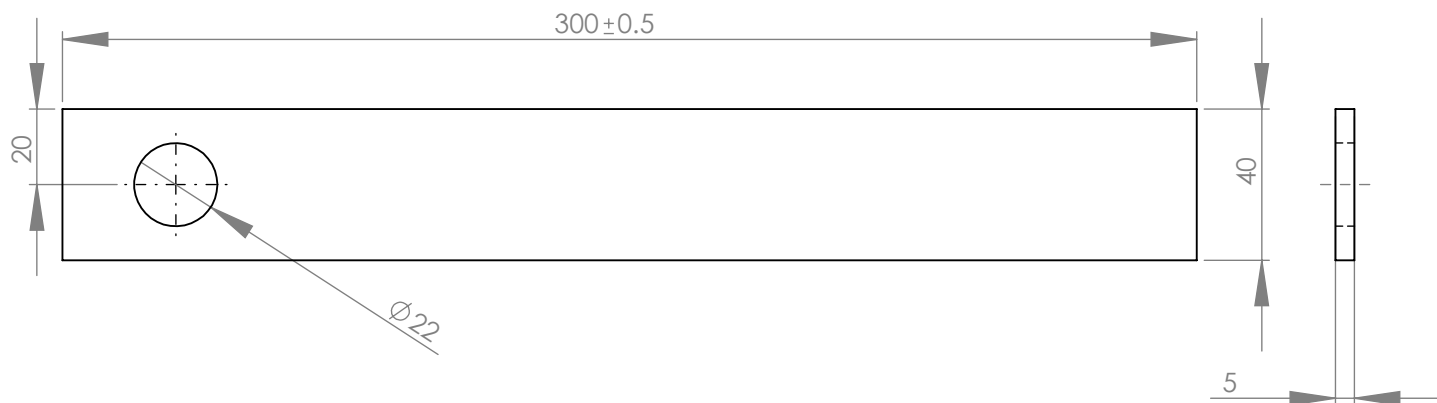
Projet: Capteur
solaire

Format: A4

Porte Tige Fileté

Numéro: 09





Tolérance: ± 0.1 sauf indication

Ra 6.3

Echelle: 1:2

Université Teliidji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

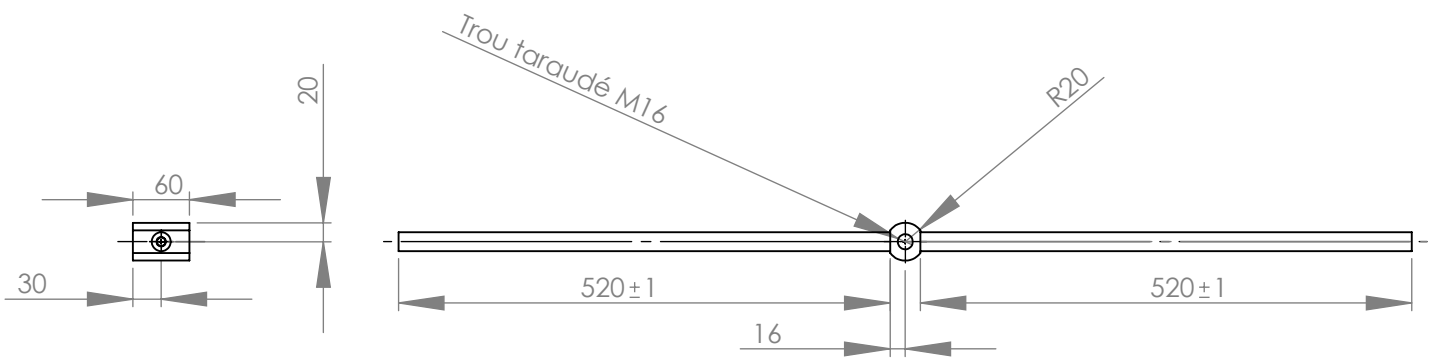


Porte tige de guidage

Projet: Capteur
solaire

Format: A4

Numéro: 10



Tolérance: ± 0.1 sauf indication

Ra 6.3

Echelle: 1:10

Université Teliidji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel

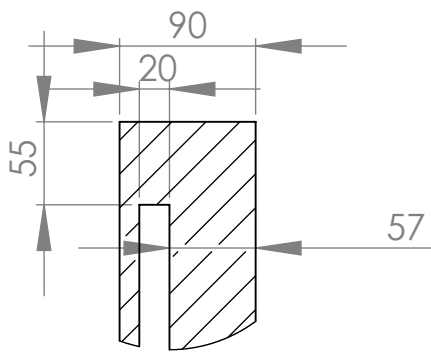
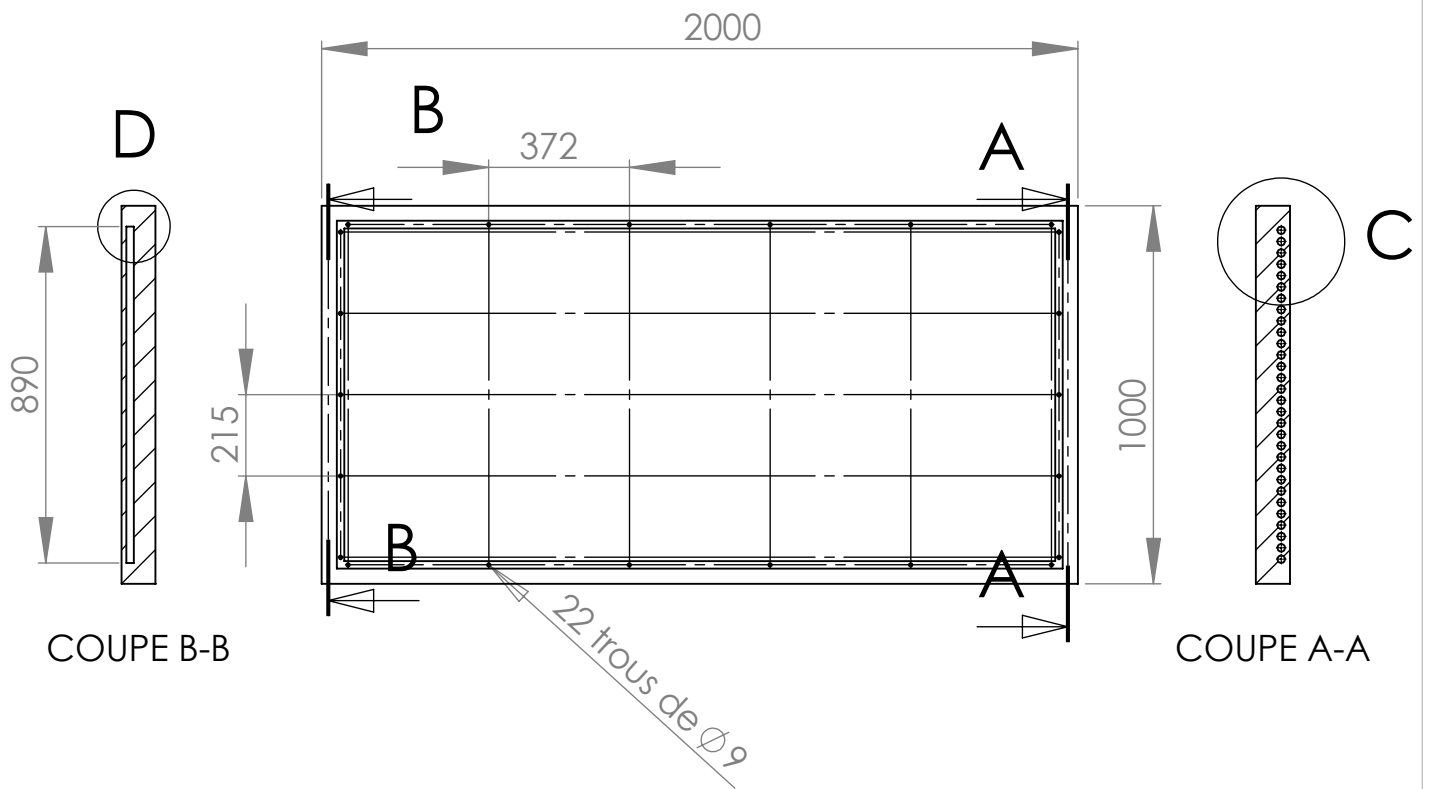


Format: A4

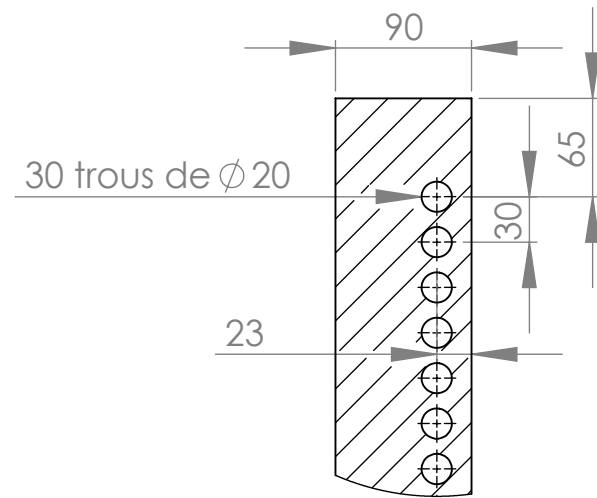
Tige de guidage

Projet: Capteur
solaire

Numéro: 11



DÉTAIL D
ECHELLE 1 : 5



DÉTAIL C
ECHELLE 1 : 5

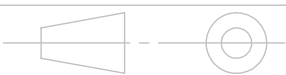
Tolérance: ± 0.1 sauf indication

Ra 6.3

Echelle: 1:20

Université Teldji Amar - Laghouat

Dessiné par:
Bensahal Djamel



Format: A4

Cadre inférieur en bois

Projet: Capteur
solaire

Numéro: 12

Annexe B

Propriétés physiques de quelques matériaux

C.1. Propriétés physiques de quelques matériaux.

Nature	θ	ρ	c_p	λ	Nature	θ	ρ	c_p	λ
	°C	kg m ⁻³	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	W m ⁻¹ °C ⁻¹		°C	kg m ⁻³	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	W m ⁻¹ °C ⁻¹
Métaux, alliages et céramiques					Matériaux de construction				
Acier au carbone	20	7833	465	54	Ardoise	20	2400	879	2,2
	200			48	Basalte	20	2850	881	1,6
	600			35	Béton caverneux	20	1900	879	1,4
Acier inox 15%Cr, 10%Ni	20	7864	460	20	Béton plein	20	2300	878	1,75
Acier inox 18%Cr, 8%Ni	20	7816	460	16,3	Bitume (cartonné)	20	1050	1305	0,23
	600			22	Bois feuillus légers	20	525	3143	0,15
Acier inox 25%Cr, 20%Ni	20	7864	460	13	Bois feuillus mi-lourds	20	675	3156	0,23
Alumine	20			29	Bois feuillus très légers	20	375	3147	0,12
Aluminium	20	2707	896	204	Bois résineux légers	20	375	3147	0,12
	400			249	Bois résineux mi-lourds	20	500	3160	0,15
Argent	20	10525	234	407	Bois résineux très légers	20	375	3147	0,12
Bronze 75%Cu, 25%Sn	20	8666	343	26	Brique terre cuite	20	1800	878	1,15
Carbone	20			147	Calcaire dur	20	2450	882	2,4
Carbure de silicium	20			13	Calcaire tendre	20	1650	879	1
Chrome	20	2118	7160	449	Carrelage	20	2400	875	2,4
Constantan 60% Cu, 40%Ni	20	8922	410	22,7	Contre-plaqué okoumé	20	400	3000	0,12
Cuivre	20	8954	383,1	386	Contre-plaqué pin	20	500	3000	0,15
	400			363	Granite	20	2600	881	3
Duralumin	20	2787	883	164	Gravier (vrac)	20	1800	889	0,7
Etain	20	7304	226	64	Grès	20	2500	880	2,6
Fer	20	7870	452	73	Lave	20	2350	881	1,1
Fonte	20	7849	460	59	Marbre	20	2700	881	2,9
Laiton 70%Cu, 30%Zn	20	8522	385	111	Parquet	20	700	3143	0,2
	400			147	Plâtre	20			0,48
Magnésie	38	270		0,067	Schiste	20	2400	879	2,2
Or	20	1336	19300	129	Matériaux isolants				
Platine	20			72	Balsa	20	85		0,054
Plomb	20	11373	130	35	Copeaux bois	23			0,059
Sodium liquide	100			81,5	Coton	20	80	1300	0,06
Titane	20			16	Kapok	30			0,035
Tungstène	20	19350	134	163	Laine de roche	20	20	880	0,047
Zinc	20	7144	384	112		20	55	880	0,038
Zircon	20			4		20	135	880	0,041

Nature	θ	ρ	c_p	λ	Nature	θ	ρ	c_p	λ
	$^{\circ}\text{C}$	kg m^{-3}	$\text{J kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\text{W m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$		$^{\circ}\text{C}$	kg m^{-3}	$\text{J kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\text{W m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Matériaux divers					Laine de verre	20	8	875	0,051
Amiante	20			0,16		20	10	880	0,045
Asphalte	20	2115	920	0,062		20	15	880	0,041
Caoutchouc (naturel)	20	1150		0,28		20	40	880	0,035
Caoutchouc (vulcanisé)	20	1100	2010	0,13	Liège expansé	20	120	2100	0,044
Carton	20	86	2030	0,048	Moquette	20	200	1300	0,06
Cuir	20	998		0,159	Polyuréthane (mousse rigide)	20	32	1300	0,03
Glace	0	920	2040	1,88		20	50	1360	0,035
Papier	20			0,48		20	85	1300	0,045
Plexiglass	20	1190	1465	0,19	PVC (mousse rigide)	20	30	1300	0,031
Sable	20	1515	800	0,2-1,0		20	40	1300	0,041
Sciure	20				Polystyrène expansé	20	12	1300	0,047
Terre mouillée	20	1900	2000	2		20	14	1300	0,043
Terre sèche	20	1500	1900	1		20	18	1300	0,041
Verre	20	2700	840	0,78		20	28	1300	0,037

Avec :

θ : Température ($^{\circ}\text{C}$) ;

λ : Conductivité thermique ($\text{W/m.}^{\circ}\text{C}$) ;

c_p : Capacité calorifique ($\text{J/kg.}^{\circ}\text{C}$) ;

ρ : Masse volumique (kg/m^3).

Annexe C

Travaux réalisés dans le cadre de cette thèse

B.1. Communications

- D. Bensahal, A. Yousfi, F. Chabane, M. Rahmani. **L'Effet du Débit sur les Paramètres Thermiques d'un Capteur Solaire à Air avec une Seule Passe d'Air.** 6ème congrès Algérien de Mécanique «CAM2017», Constantine (Algérie) du 26 au 30 novembre 2017.
- D. Bensahal, A. Yousfi, F. Chabane, M. Rahmani. **Influence de l'angle d'azimut sur le comportement thermique d'un panneau solaire à air.** SSENAM'3, 02-03 Mai 2018, Mascara.
- D. Bensahal, A. Yousfi, F. Chabane, M. Rahmani. **The Choice of the Appropriate Solar Radiation Model for the Site of Laghouat.** The Fourth International Conference on Fracture Mechanics, FRACT'4, November 26 - 29, 2018, Chlef.
- D. Bensahal, A. Yousfi, F. Chabane, M. Rahmani, **Détermination des performances d'un capteur solaire dans le site de Laghouat.** Journées scientifiques sur les sciences et l'engineering, JSSE'18, Décembre 9-10, 2018, Constantine.

B.2. Publications

- D. Bensahal, A. Yousfi. **The Effect of the Variation of Volume Flow Rate on the Thermal Parameters of a Solar Air collector with a Single Pass of Air: Case Study for Laghouat.** IJE Journal, Vol.31 (1), pp.61-68, 2018.
- D. Bensahal, A. Yousfi. **Performance of an Air Collector Versus the Variation of the Distance between Absorber Plate and the Transparent Cover in the site of Laghouat, Algeria.** Chemical Engineering Transactions, 66, pp.775-780, 2018.
- D. Bensahal, A. Yousfi. **Hourly Air Temperature Modeling Based on Atmospheric Pressure, Global Solar Radiation and Relative Humidity Data.** Iranian Journal of Energy and Environment 9 (2), pp.78-85, 2018.

- F. Chabane , Z. Khadraoui , D. Bensahal, **Prediction of Global Solar Radiation on the Horizontal Area with the Effect of Ambient Temperature Part: II**, TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science, 63 (1), pp.73-77, 2019.
- F. Chabane, I. Laznek, D. Bensahal, **Prediction of global solar radiation on the horizontal area with the effect of relative humidity part: I**. Italian Journal of Engineering Science: Tecnica Italiana, 61+1, No. 2, December, 2018, pp. 115-118.
- F. Chabane, M. A. Ghedhifia, D. Bensahal, A. Brima, N. Moumami, **Forecast of global solar irradiation with a perfect model according to incline angle**, Journal of Power Technologies, 98 (3), (2018), pp. 255-264.