

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : d'architecture
Ref : _____



جامعة محمد خيضر – بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة المعمارية
المرجع : _____

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Magister en : ARCHITECTURE
Option : VILLE ET ARCHITECTURE AU SAHARA

EVALUATION D'UN SYSTEME DE RAFRAICHISSEMENT PASSIF
DANS LES ZONES CHAUDES ET ARIDES PAR L'APPLICATION D'UN
COUPLAGE PUIITS CANADIEN ET CHEMINEE SOLAIRE.

Présenté par :
Younes DAOUADJI

Soutenu publiquement le 16/10/2017

Devant le jury composé de :

Dr. BADA Yacine	Maitre de Conférences 'A'	Président	Université de Biskra
Pr. MOUMMI Nouredine	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Dr. BENCHEIKH Hamida	Maitre de Conférences 'A'	Rapporteur	Université de Laghouat

Avec l'aide et par la grâce de Dieu le tout puissant que ce travail a vu le jour.

Je dédie ce mémoire :

Aux personnes les plus chères au monde, mon père le soleil de ma vie et la lune de ma vie ma mère, qui m'ont soutenu et encouragé tout durant mes études, et qui m'ont apporté leur soutien moral et matériel depuis que j'ai connu mes premiers pas à l'école. Que Dieu me les garde inchallah.

Je le dédie également à :

A mes frères.

A mes très chers grands parents.

A ceux qui ont partagé le plaisir de travailler avec moi.

A mes très chers amis et tous ceux qui me connaissent.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Et à tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Younes

REMERCIEMENT.

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon Dieu de nous avoir guidé et donné la force et la volonté pour élaborer ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au directeur de mémoire Monsieur Hamida BENCHEIKH maître de conférence et chercheur au Laboratoire de génie civil à l'université Amar TELIDJI Laghouat Algérie qui m'a suivi pendant toute la durée de ce travail, j'adresse mes sincères remerciements. Depuis la définition du sujet jusqu'à sa soutenance ; pour sa patience, sa disponibilité et pour ses conseils judicieux et ses discussions qui ont largement contribué à la réalisation de ce projet.

Je remercie également Mr. BADA Yacine maître de conférences, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, qu'il puisse trouver ici l'assurance de mon respectueuse gratitude.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail, et en particulier les membres de jury :

Monsieur MOUMMI Noureddine, Professeur à l'université Mohamed KHIDER ; Biskra. Pour avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Enfin je remercie mes amis: pour leur soutien moral et leur aide, ainsi que tous ce qui m'ont soutenu et aidé tout au long de cette étude.

Le changement climatique percevait dans les canicules répétés en été, un dérèglement du climat (il n'y a plus de saisons), inondations ; sécheresses qui provoquent un écosystème déstabilisé menaçant la sécurité alimentaire et la vie humaine. L'homme moderne s'attache à son bien être ; précisément le confort thermique en épuisant les ressources non renouvelables des énergies fossiles nocives et polluantes. Dans le sud algérien la situation énergétique, le fort taux d'accroissement des aires urbaines, l'inadaptation des techniques de construction avec le climat caractérisé par un climat chaud et aride qui couvre la majorité du territoire. Cette région est riche en ressources énergétiques et de potentialités minières, faiblement habitée et soumise à la maîtrise du climat en été qui conduit à la grande consommation d'énergies non renouvelables par l'utilisation massive de la climatisation qui utilise un gaz très nocif sur le climat.

Les systèmes passifs et le climat torride offrent un grand potentiel pour la démarche bioclimatique et la construction durable notamment sur le plan énergétique pour l'économie de ressources non renouvelables et la protection de l'environnement . Cependant ce potentiel est faiblement exploré. Pour répondre à la problématique deux techniques passives sont couplées admettant le refroidissement naturel et la dissipation de chaleur par ventilation ; le passage de l'air dans un puits canadien permet de le refroidir avant de le souffler dans la cellule. Le mouvement d'air est tiré de l'intérieur de l'espace par une cheminée solaire. Afin de prévoir le comportement du système. Une recherche analytique pour calculer la température du sol à une profondeur de 3,5 m. Après une recherche théorique basée sur la simulation thermique dynamique par le logiciel ENERGYPLUS (8.2.0) de deux cellules identiques de forme cubique de 27 m³ ; deux ouvertures dans chaque cellule pour la ventilation naturelle nocturne ; l'une est équipée par un puits climatique afin de pré-rafraîchir l'air extérieur durant la période chaude de la journée. L'autre est une cellule de référence.

Plusieurs paramètres étaient étudiés afin d'optimiser le système dans les conditions climatiques de la vallée de M'Zab. Le système permet de maintenir les températures intérieures de la cellule au moins de 31 °C.

Les conclusions principales dérivées de l'étude paramétrique du système proposé sont les suivantes:

Le système est journalier ou la température de l'air fournie par le puits est supérieure à la température extérieure durant la nuit et aussi avec l'absence des rayons solaires.

La disposition en rangées donne un rendement continu et permet l'écoulement de l'air dans tous les tubes.

La grande section de collecteur permet un bon écoulement de l'air et la section optimale est de 0,6x0,6 m² un plus grand nombre de tuyaux enterrés devrait être utilisé pour refroidir le flux d'air et satisfaire les besoins thermiques (10 puits).

Lorsque la température ambiante et la demande de refroidissement sont élevées les configurations appropriées peuvent fournir un bon état intérieur même avec un écoulement de vent fort.

Climate change in the heat waves repeated in summer, a disruption of the climate (there are more seasons), floods; drought that causes a destabilized ecosystem threatening food security and human life. Modern man is attached to his wellbeing; precisely thermal comfort by exhausting the non-renewable resources of harmful and polluting fossil fuels. In southern Algeria the energy situation, the high rate of growth of urban areas, the unsuitability of construction techniques with the climate characterized by a hot and arid climate that covers the majority of the territory. This region is rich in energy resources and mineral potential, poorly inhabited and subject to climate control in summer which leads to the large consumption of non-renewable energy through the massive use of air conditioning which uses a very harmful gas on the climate.

Passive systems and the scorching climate offer great potential for the bioclimatic approach and sustainable construction, particularly in terms of energy for the economy of non-renewable resources and the protection of the environment. However this potential is weakly explore. To go back to the problematic two passive techniques are coupled admitting the natural cooling and the dissipation of heat by ventilation; the passage of air in a Canadian well allows it to cool before blowing it into the cell. The movement of air is drawn from inside the space by a solar chimney. To predict the behavior of the system. An analytical research to calculate the soil temperature in a depth of 3.5 m. After a theoretical research based on the dynamic thermal simulation by the ENERGYPLUS software (8.2.0) of two identical cells of cubic form of 27 m³; two openings in each cell for natural night ventilation; one is equipped with a climatic well to pre-cool the outside air during the hot period of the day. the other is a reference cell

Several parameters were studied in order to optimize the system in the climatic conditions of the M'Zab valley. The system maintains the internal temperatures of the cell at least 31 ° C.

The main conclusions derived from the parametric study of the proposed system are as follows:

The system is daily were the temperature of the air supplied by the well is higher than the outside temperature during the nights and also with the absence of solar rays.

The arrangement in rows gives a continuous yield and allows the flow of air in all the tubes.

The large collector section allows a good flow of air and the optimal section is 0.6x0.6 m² a larger number of buried pipes should be used to cool the airflow and meet the thermal needs (10 wells).

When the ambient temperature and the cooling demand are high the appropriate configurations can provide a good internal condition even with a strong wind flow.

ملخص .

تغير المناخ الضاهر في موجات الحرارة المتكررة في الصيف، وتعطل المناخ (لا توجد مواسم)، والفيضانات. الجفاف الذي يسبب نظاما بيئيا متزعزعا يهدد الأمن الغذائي والحياة البشرية. الرجل الحديث تعلق برفاهية. من خلال استنفاد الموارد غير المتجددة للوقود الأحفوري الضارة والملوثة. في جنوب الجزائر وضع الطاقة، ومعدل قوي من نمو المناطق الحضرية، وعدم ملائمة تقنيات البناء مع المناخ الذي يتميز بمناخ ساخن وجاف يغطي غالبية أراضيها. هذه المنطقة غنية بموارد الطاقة والتعدين المحتملة، ضعيفة السكان وتخضع للسيطرة على المناخ في الصيف مما يؤدي إلى استهلاك كبير من الطاقات غير المتجددة من خلال الاستخدام المكثف لمكيفات الهواء الذي يستخدم غازا ضارا جدا على المناخ.

الأنظمة السلبية والمناخ الحار يوفر إمكانات كبيرة للنهج بيوكليماتيك والبناء المستدام، ولا سيما من حيث الطاقة، لاقتصاد الموارد غير المتجددة وحماية البيئة ومع ذلك، فإن هذه الإمكانيات تستكشف ضعفا للإجابة على إشكالية اثنين من التقنيات السلبية اقترنت باعتماد التبريد الطبيعي وتبديد الحرارة عن طريق التهوية. فإن مرور الهواء في بئر كندي يسمح له أن يبرد قبل أن تهب في الخلية. يتم سحب الهواء من داخل الفضاء بواسطة مدخنة شمسية. للنتيئة بسلك النظام بحث تحليلي لحساب درجة حرارة التربة على عمق 3.5 متر، وبحث النظري القائم على محاكاة الحرارية الديناميكية بواسطة برنامج إنيرجي بلوس (8.2.0) اثنين من الخلايا متطابقة مكعبة شكل 27 م³ . فتحتين في كل خلية للتهوية الليلية الطبيعية؛ وقد تم تجهيز واحدة من الخلايا ببئر مناخي من أجل تبريد الهواء الخارجي خلال الفترة الحارة اليومية والآخر هي خلية مرجعية.

تمت دراسة العديد من المعلمات لتحسين النظام في الظروف المناخية للمنطقة وادي ميزاب. يحافظ النظام على درجات الحرارة الداخلية للخلية على الأقل 31 درجة مئوية. وفيما يلي الاستنتاجات الرئيسية المستمدة من الدراسة للنظام المقترح. النظام هو يوميا أين درجة حرارة الهواء الموردة من البئر أعلى من درجة الحرارة الخارجية خلال الليالي وأيضا مع عدم وجود أشعة الشمس (المدخنة لا تعمل). الترتيب في الصفوف يعطي عائد مستمر ويسمح بتدفق الهواء في جميع الأنابيب. مساحة كبيرة لجامع يسمح بتدفق جيد لهواء و القسم الأمثل هو 0.6* 0.6 متر مربع. المزيد من الأنابيب المدفونة ينبغي استخدامها لتبريد تدفق الهواء وتلبية الاحتياجات الحرارية (10 ابار). عندما تكون درجة الحرارة المحيطة والطلب على التبريد مرتفعة التكوينات المناسبة يمكن أن توفر حالة داخلية جيدة حتى مع تدفق الرياح القوية.

INTRODUCTION GENERALE.

1.	Introduction.....	1
2.	Problématique.....	4
3.	Objectifs de la recherche.....	5
4.	Hypothèses.....	5
5.	Méthodologie de recherche.....	5
6.	Structure de mémoire.....	6

CHAPITRE I : METHODES TRADITIONNELLES DE REFROIDISSEMENT DANS
L'ARCHITECTURE DES ZONES CHAUDES ET ARIDES.

I.1.	Introduction.....	7
I.2.	Adaptation à l'échelle urbaine	8
I.2.1.	Morphologie et choix de site d'implantation.....	8
I.2.2.	Compacité du tissu urbain.....	9
I.3.	Adaptation à l'échelle architecturale.....	9
I.3.1.	La forme du bâtiment.....	9
I.3.2.	L'enveloppe du bâtiment.....	10
I.3.3.	L'architecture Troglodyte.....	10
I.3.4.	La forme de toiture.....	12
I.3.5.	Traitement de surfaces extérieures.....	13
I.3.6.	Protection solaire.....	14
I.3.7.	L'humidification.....	16
I.3.8.	La végétation et les surfaces aquatiques.....	18
I.3.9.	L'albédo et rafraichissement radiatif.....	19
I.3.10.	Mouvement aérien.....	19
I.4.	Confort d'été passif	21
I.5.	Conclusion.....	24

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE REFROIDISSEMENT PASSIF DANS LES
BATIMENTS: CONCEPTION ET INTERVENTION ARCHITECTURALE.

I.1.	Introduction.....	25
II.1.	Réduire les gains de chaleur.....	26
II.1.1.	Microclimat.....	26
II.1.2.	Contrôle des gains solaires.....	26
III.	La modération thermique.....	29
IV	La dissipation de chaleur.....	29
IV.1.1.	Ventilation naturelle.....	30
IV.1.2.	Rafraichissement naturel.....	35
V.1.	Conclusion.....	53

CHAPITRE III : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE ET SYNTHÈSE DES
CONNAISSANCES DE Puits CLIMATIQUES COUPLES A LA CHEMINÉE SOLAIRE.

	I. Le puits climatique	55
I.1.	Les principaux éléments d'un puits climatique.....	55
I.1.1.	Bouche d'aspiration de l'air.....	55
I.1.2.	Conduit.....	56
I.1.3.	Système d'évacuation des condensats.....	57
I.1.4.	Le by-pass.....	58
I.1.5.	Connexion du puits au système de ventilation.....	59
I.2.	Caractéristiques physiques du puits climatique.....	59
I.2.1.	Les propriétés thermiques du sol.....	60
I.2.2.	Les propriétés physiques des conduits.....	62
I.2.3.	Les caractéristiques du flux d'air.....	64
I.3.	Bibliographique et connaissances appropriées au puits climatique.....	65
I.3.1.	Paramètres influençant la température du sol.....	67
I.3.2.	Paramètres relatifs au sol.....	67
I.3.3.	Paramètres influençant l'échange thermique air-sol.....	67
I.4.	Des systèmes de refroidissement par puits climatique.....	68
	II. La cheminée solaire	70
II.1.	Principe de fonctionnement de la cheminée solaire.....	71
II.2.	Classification de la cheminée solaire.....	72
II.3.	Bibliographique et connaissances appropriées à la cheminée solaire.....	79
II.3.1.	Hauteur d'absorbeur et la largeur de la cavité.....	80
II.3.2.	La section d'entrée de cheminée.....	80
II.3.3.	L'angle d'inclinaison.....	81
II.3.4.	Propriétés de l'absorbeur.....	81
II.3.5.	Type de vitrage.....	81
II.3.6.	L'intensité solaire et le vent.....	81
III.	Refroidissement passif des bâtiments par l'intégration du puits climatique avec la cheminée solaire.....	82
III.1.	La performance du système a diverses demandes de refroidissement et du rayonnement solaire.....	83
III.2.	Effets de la longueur d'absorbeur sur les performances du système....	84
III.3.	Effets de la longueur de puits climatique sur les performances du système.....	85
III.4.	Effet du diamètre de puits climatique sur les performances du système.....	86
III.5.	Les performances du système sous différentes conditions intérieures et extérieures.....	86
IV.	Conclusion.....	88

CHAPITRE IV : CONCEPTS ET THEORIES DE FONCTIONNEMENT DE PUITES CLIMATIQUES COUPLES A LA CHEMINEE SOLAIRE.

I.	Introduction.....	90
II.	Modélisation de puits climatique.....	91
II.1.	Modélisation de la température du sol.....	91
II.2.	Modélisation de la température de l'air dans le tube.....	96
III.	Modélisation de cheminée solaire.....	99
IV.	Modélisation de la température et de la ventilation de la cellule.....	101

CHAPITRE V : SIMULATION DU SYSTEME DE REFROIDISSEMENT PASSIF PAR L'ACCOUPEMENT DE PUITES CLIMATIQUE A UNE CHEMINEE SOLAIRE.

I.	Introduction.....	104
I.1.	Données climatiques de la vallée de M'Zab.....	104
I.1.1.	La température.....	104
I.1.2.	Les précipitations.....	105
I.1.3.	L'humidité relative et l'évaporation.....	105
I.1.4.	L'insolation.....	106
I.1.5.	Les vents.....	106
I.2.	Outil d'aide à la simulation.....	107
I.3.	Température du sol en fonction de la profondeur.....	108
II	Conception et description du système.....	109
II.1.	Fonctionnement du système.....	110
II.2.	Réalisation du système.....	112
II.3.	Effet de la disposition.....	115
III.	Effet des dimensions du puits climatique.....	118
III.1.	Efficacité du système selon la section, longueur et nombre des puits.....	118
III.2.	Effet de la section du collecteur (sortie du puits climatique).....	123
IV.	Effet de la position de sortie de puits et entrée cheminée.....	125
V.	Effet des dimensions de la cheminée solaire.....	126
V.1.	Effet de la section de l'entrée de cheminée et longueur de l'absorbeur.....	126
V.2.	Effet de l'épaisseur de cheminée, l'isolation de parois latérales et vitrage avec utilisation de l'inertie thermique dans l'absorbeur.....	128
V.3.	Effet du nombre de cheminée.....	129
VI.	Effet de l'orientation sur le comportement et l'efficacité.....	130
VII.	Effet de l'orientation et vitesse du vent.....	131
VIII.	Effet de la réduction de la surface de sortie de la cheminée sous l'impact du vent.....	132
IX.	Conclusion.....	133
	CONCLUSION GENERALE.....	136
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	139
	ANNEXES.....	

Figure.1 :	La consommation finale pour l'Algérie en 2013.....	200
Figure.I.1 :	Répartition des zones arides dans le monde.....	7
Figure.I.2 :	Vue générale sur le ksar de Ghardaïa et sur la vallée de M'Zab.....	8
Figure.I.3 :	Parc national de Mesa Verde (Colorado ; États-Unis).....	8
Figure.I.4 :	Rue étroite et irrégulière (Beni-Isguen ; Algérie).....	9
Figure.I.5 :	Habitat semi-troglodyte latéraux (Ghoufi ; Algérie).....	11
Figure.I.6 :	Maison troglodyte (Matmata ; Tunisie).....	11
Figure.I.7 :	Plafonds en forme de coupes et voutes.....	12
Figure.I.8 :	Plafonds en forme de corne.....	12
Figure.I.9 :	Flux d'air dans un toit en dôme ventilé.....	12
Figure.I.10 :	Un dôme avec des ouvertures, maison des Boroudjerdi(Kashan ; Iran)....	13
Figure.I.11 :	Crépissage des murs (Beni-Isguen ; Algérie).....	14
Figure.I.12 :	Passages couvert et semi couvert (Yazd ; Iran).....	14
Figure.I.13 :	Masrabiya en bois (Assouan ; Égypte).....	15
Figure.I.14 :	Claustra conçu dans la région de la vallée de M'Zab (Ghardaïa ; Algérie)...	15
Figure.I.15 :	Iwan dans la mosquée d'Ispahan (Ispahan ; Iran).....	16
Figure.I.16 :	Galeries d'arcade et des murs acrotère (Ghardaïa ; Algérie).....	16
Figure.I.17 :	Végétation et surface d'eau, maison des Boroudjerdi(Kashan ; Iran).....	17
Figure.I.18 :	Gargoulettes et semi enterrement de la maison pour l'inertie du sol.....	17
Figure.I.19 :	Maisons d'été dans la palmeraie ; La vallée de M'Zab.....	18
Figure.I.20 :	Vue aérienne sur les terrasses ; la vallée de M'Zab.....	19
Figure.I.21 :	Tour à vent combine avec une rivière souterraine.....	20
Figure.I.22 :	Le mouvement d'air pendant la journée et la nuit par effet de cheminée...	20
Figure.I.23 :	Tours de vent (Yazd ; Iran).....	21
Figure.I.24 :	Corrélation entre la température de confort et la température extérieure	22
Figure.I.25 :	La température opérative en fonction de la température moyenne extérieure mensuelle.....	22
Figure.I.26 :	Effet de la vitesse de l'air sur la plage de confort sur le diagramme psychométrique.....	23
Figure.I.27 :	Diagramme bioclimatique du bâtiment.....	24
Figure.II.1 :	Différents types de dispositifs d'ombrage.....	28
Figure.II.2 :	Ombrage de toit par une cache solide.....	28
Figure.II.3 :	Ombrage de toit par une cache mobile.....	29
Figure.II.4 :	Ventilation mono-exposée ; ouverture simple.....	30
Figure.II.5 :	Configuration de modèle pour différentes directions du vent.....	31
Figure.II.6 :	Le taux de ventilation contre la direction de vent pour les trois cas étudiés.....	31
Figure.II.7 :	Ventilation transversale.....	32
Figure.II.8 :	Ventilation transversale par by-pass.....	32
Figure.II.9 :	Principe de ventilation dans l'atrium.....	33
Figure.II.10 :	Coupe schématique sur le système de cheminé solaire.....	34
Figure.II.11 :	Principe du toit Venturi.....	34
Figure.II.12 :	Comparaison de processus psychométriques.....	35
Figure.II.13 :	refroidissement par évaporation de point de rosée.....	36
Figure.II.14 :	Comparaison des résultats de simulation avec des données expérimentales pour l'état de sortie d'air pour différentes conditions d'arrivée d'air.....	36

TABLE DES ILLUSTRATIONS.

Figure.II.15 :	Base métallique avec un tube en aluminium plié.....	38
Figure.II.16 :	Température de l'air à la sortie du radiateur pendant 10 (émissivité 0,71).	40
Figure.II.17 :	Température de l'air à la sortie du radiateur pendant 10 (émissivité 0,93)	40
Figure.II.18 :	Variation des valeurs de température de l'air intérieur dans les deux chambres.....	41
Figure.II.19 :	Schéma de la cellule avec la toiture radio-évaporatoire.....	42
Figure.II.20 :	Comparaison entre la température intérieure mesurée dans les cellules (A) et (B). Sans ventilation naturelle nocturne.....	42
Figure.II.21 :	Comparaison entre la température intérieure mesurée dans les cellules (A) et (B). Avec ventilation naturelle nocturne.....	43
Figure.II.22 :	Types d'échangeur géothermique : les pieux, les sondes et les nappes.....	45
Figure.II.23 :	Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur.....	47
Figure.II.24 :	Système de refroidissement intégrant le puits canadien avec le rafraîchissement par évaporation indirecte.....	48
Figure.II.25 :	diagramme schématique du système pour refroidissement par évaporation indirecte.....	48
Figure.II.26 :	Température de l'air à la sortie de chaque section sou condition de Téhéran.....	49
Figure.II.27 :	Le processus de refroidissement sur un diagramme psychrométrique.....	49
Figure.II.28 :	Un diagramme schématique du système a deux étapes de refroidissement radiatif, Serpentin de refroidissement et un refroidisseur par évaporation indirect.....	50
Figure.II.29 :	Structures schématiques pour les trois sources qui fournissent de l'air secondaire.....	51
Figure.II.30 :	les différentes températures ; au pré-rafraîchissement de l'air dans l'unité de serpentin et après le refroidissement pour les trois modèles de l'air secondaire A, B et C.....	52
Figure.II.31 :	Le processus de refroidissement à deux étages sur un tableau psychrométrique pour les conditions de Téhéran.....	52
Figure.II.32 :	Schéma de puits climatique intégré à la cheminée solaire.....	53
Figure.III.1 :	Schéma de principe d'un puits climatique.....	55
Figure.III.2 :	Schéma d'installation d'une bouche d'aspiration de l'air pour le puits climatique.....	56
Figure.III.3 :	Les manières d'installation.....	56
Figure.III.4 :	Système pour évacuation du condensat.....	58
Figure.III.5 :	Schéma de fonctionnement du by- pass.....	58
Figure.III.6 :	Puits raccordé à un dispositif de ventilation mécanique double-flux centralisée.....	59
Figure.III.7 :	la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau.....	60
Figure.III.8 :	Amortissement thermique du sol en fonction du mois de l'année (France).....	62
Figure.III.9 :	Flux thermique récupérable dans un puits climatique en fonction du débit et du diamètre de la conduite.....	64
Figure.III.10 :	Quatre configurations de systèmes solaires passifs de façade.....	70
Figure.III.11 :	Cheminée solaire utilisé dans la ventilation du bâtiment.....	71
Figure.III.12 :	Schéma montrant stratégies ombrage, de refroidissement et de ventilation intégrés. (Ateliers Lion).....	72

TABLE DES ILLUSTRATIONS.

Figure.III.13 :	Schéma de système, la tour a vent et la cheminée solaire.....	73
Figure.III.14 :	Quatre configurations différentes des toits collecteurs (capteur) solaires.	74
Figure.III.15 :	Système de refroidissement par évaporation entraînée par cheminée solaire intégré au le plafond.....	74
Figure.III.16 :	Toit capteur solaire.....	75
Figure.III.17 :	Modèle 1.....	76
Figure.III.18 :	Modèle 1.....	77
Figure.III.19 :	Résultat de la simulation CFD de ventilation par énergie solaire.....	78
Figure.III.20 :	Schéma de principe de combinaison puits climatique avec cheminée solaire.....	82
Figure.IV.1 :	Diagramme schématique du puits climatique combiné à la cheminée solaire pour le refroidissement de l'air.....	90
Figure.IV.2 :	représentation schématique d'échange thermique dans un sol peu profond.....	92
Figure.IV.3 :	la température du sol calculé en fonction de la profondeur. (région de Ghardaïa).....	96
Figure.IV.4 :	Positionnement et géométrie du puits.....	97
Figure.IV.5 :	Schéma représente le transfert de chaleur dans un élément de la cheminée solaire.....	99
Figure.V.1 :	Graphe des températures de l'air minimales et maximales mensuelles moyennes entre [2010-2014]. (stations météorologiques Ghardaïa).....	104
Figure.V.2 :	Graphe des précipitations mensuelles entre [2010-2014]. (stations météorologiques Ghardaïa).....	105
Figure.V.3 :	Représentation graphique de l'humidité relative mensuelle de l'air et l'évaporation mensuelle durant la période [2010-2014]. (stations météorologiques Ghardaïa).....	105
Figure.V.4 :	Durée mensuelle d'isolation durant la période [2010-2014]. (stations météorologiques Ghardaïa).....	106
Figure.V.5 :	Vitesse des vents enregistrés entre [2000-2012]. (weatherspark.com).....	106
Figure.V.6 :	La moyenne de la direction du vent durant une année enregistré entre [2000-2012]. (weatherspark.com).....	107
Figure.V.7 :	Fraction du temps passé avec différentes directions de vent enregistré entre [2000-2012]. (weatherspark.com).....	107
Figure.V.8 :	Température du sol calculé en fonction de la profondeur.....	109
Figure.V.9 :	Diagramme schématique du puits climatique combiné à la cheminée solaire pour le refroidissement de l'air.....	110
Figure.V.10 :	Réalisation des deux cellules pour la simulation.....	113
Figure.V.11 :	La température de l'air dans les différentes zones sans ventilation (journalière et nocturne) et sans fonctionnement du système.....	113
Figure.V.12 :	La température de l'air dans les différentes zones sans ventilation (journalier et nocturne) et avec fonctionnement du système.....	114
Figure.V.13 :	La température de l'air dans les différentes zones avec ventilation nocturne et avec fonctionnement du système.....	115
Figure.V.14 :	Représentation de deux types de dispositions.....	115
Figure.V.15 :	Le comportement du système ou le puits climatique est disposé en linéaire.....	116
Figure.V.16 :	Le comportement du système ou le puits climatique est disposé en rangées.....	117
Figure.V.17 :	Gain de température engendré par le système pour deux types de disposition.....	118

TABLE DES ILLUSTRATIONS.

Figure.V.18 :	Le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$	119
Figure.V.19 :	Le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$	120
Figure.V.20 :	Le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de $0.7 \times 0.7 \text{ m}^2$	121
Figure.V.21 :	Le rendement du système en fonction de la section, la longueur et le nombre des puits.....	122
Figure.V.22 :	Représentation du système ou la section de collecteur est $1,00 \times 1,00 \text{ m}^2$ pour dix puits de section de $0,60 \times 0,60 \text{ m}^2$	123
Figure.V.23 :	Le rendement du système en fonction des sections des puits avec la section de collecteur et sortie du puits climatique.....	124
Figure.V.24 :	Représente les différentes dispositions de sortie de puits et entrée cheminée.....	125
Figure.V.25 :	Effet sur le rendement de la position de la sortie de puits climatique et entrée de cheminée solaire.....	126
Figure.V.26 :	Représentation des différentes longueurs et avec section de entrée de la cheminée solaire.....	126
Figure.V.27 :	Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de $3+1,41 \text{ m}$	127
Figure.V.28 :	Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de $3+2,84 \text{ m}$	127
Figure.V.29 :	Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de $3+4,24 \text{ m}$	128
Figure.V.30 :	Effet de l'épaisseur de cheminée et l'isolation des parois latéraux et vitrage.....	128
Figure.V.31 :	Effet de l'inertie thermique dans l'absorbeur.....	129
Figure.V.32 :	L'effet du nombre de cheminée sur le rendement du système.....	129
Figure.V.33 :	Comparaison entre les différents rendements du système selon l'orientation des cheminées.....	130
Figure.V.34 :	Direction et vitesse de vent.....	131
Figure.V.35 :	Le comportement du système dans les différents composants pour des vitesses et des orientations de vent différentes.....	131
Figure.V.36 :	Le comportement du système sous effet du vent en réduisant la section de sortie de cheminée solaire.....	132
Figure.V.37 :	Comparaison entre deux sections de sortie de cheminée sous effet de vent.	133

Tableau : III.1.	Dispositions des tubes, avantages et inconvénients.....	57
Tableau : III.2.	Propriétés thermiques des matériaux constituant le sol.....	61
Tableau : III.3.	Longueur (en mètres) de conduite nécessaire pour obtenir un échange thermique de 80 %.....	63
Tableau : III.4.	La performance du système pour diverses demandes de refroidissement et le rayonnement solaire.....	83
Tableau : III.5.	Effets de la longueur d'absorbeur sur les performances du système.	84
Tableau : III.6.	effets de la longueur de puits climatique sur les performances du système.....	85
Tableau : III.7.	effet du diamètre de puits climatique sur les performances du système.....	86
Tableau : III.8.	les performances du système sous différentes conditions intérieures et extérieures.....	87
Tableau : IV.1.	Les données climatiques de la ville de Ghardaïa.....	95
Tableau : IV.2.	Les caractéristiques d'un sol à Ghardaïa (sol d'installation de puits).....	96
Tableau : IV.3.	température mensuelle calculé du sol a une profondeur z pour une période estivale.....	96
Tableau V.1 :	la température calculée pour la saison estivale pour trois profondeurs différentes.....	108
Tableau V.2 :	Caractéristique des matériaux utilisés.....	111
Tableau V.3 :	Les dimensions des éléments principaux du système.....	112
Tableau V.4 :	rendements maximales du système pour une section du tube de 0,3x0,3m ²	118
Tableau V.5 :	rendements maximales du système pour une section du tube de 0,5x0,5m ²	119
Tableau V.6 :	rendements maximales du système pour une section du tube de 0,7x0,7m ²	120
Tableau V.7 :	les rendements maximaux pour les différentes sections des puits selon la section du collecteur.....	123

Symboles latins :

a :	Diffusivité thermique du sol.....	[m ² /s]
a_{lat} :	103	[Pa/K]
A_X :	Amplitude d'un signal X quelconque	
alb :	albédo de la surface du sol	
b_{lat} :	609.....	[Pa]
C :	Capacité calorifique massique.....	[J/kg.K]
c_i :	Coefficient de perte de pression des raccords i	
c_{lat} :	0,0168	[K/Pa]
D :	Diamètre.....	[m]
e :	Epaisseur.....	[m]
f :	Paramètre empirique.....	
g :	Accélération gravitationnelle.....	[m/s ²]
G :	Rayonnement solaire incident.....	[w/m ²]
G_{vitr}	Flux de chaleur de radiation solaire absorbée par le vitrage.....	[w/m ²]
geo :	Norme du gradient géothermique.....	[K/m]
h :	Coefficient d'échange thermique convectif.....	[w/m ² .K]
hr :	Coefficient d'échange thermique radiatif.....	[w/m ² .K]
I :	Rayonnement solaire incident sur la surface inclinée sud.....	[w/m ²]
L :	Longueur.....	[m]
\dot{m} :	Débit massique de l'air.....	[kg/s]
R :	Résistance thermique.....	[m ² .K/w]
r_a :	Humidité relative de l'air.....	
S :	Surface.....	[m ²]
T :	Température.....	[K]
t :	Temps.....	[s]
U :	Coefficient global de transfert de chaleur.....	[W/m ² .K]
V :	Volume.....	[m ³]
v_{vent}	Vitesse du vent au niveau du sol.....	[m/s]
\bar{X} :	Moyenne annuelle pour une variable X quelconque.....	
Z :	Profondeur sous la surface du sol.....	[m]

Termes adimensionnels :

Gr :	nombre de Grashof $g \cdot \beta(T - T_{air})L^3 / \nu^2$
Nu :	nombre de Nusselt $(h \cdot L / \mu)$
Pr :	nombre de Prandtl $(C \cdot \mu / \lambda)$
Re :	nombre de Reynolds $(v \cdot D / \nu)$

Symboles grecs :

α :	coefficient d'absorption.....	
β :	coefficient volumétrique d'expansion.....	K^{-1}
δ :	Profondeur de pénétration de la chaleur.....	[m]
ε :	Emissivité.....	
θ :	Angle	
φ :	Déphasages.....	[rad]
μ :	Viscosité.....	[kg/s.m]
ν :	Viscosité cinématique.....	[m ² /s]
Φ :	flux thermique.....	[w/m ²]
σ :	Constante de Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$	[w/m ² K ⁴]
ξ :	Coefficient de frottement.....	
λ :	Conductivité thermique.....	[w/m.K]
ρ :	Masse volumique.....	[kg/m ³]
γ :	Constante.....	
ω :	Pulsation d'oscillation.....	[rad/s]

Les indices :

<i>a_tube</i> :	flux d'air dans le tuyau
<i>abs</i> :	absorbeur
<i>ae</i> :	l'air extérieur
<i>ai</i> :	l'air intérieur
<i>ap</i> :	l'air du puits
<i>cel</i> :	cellule
<i>cond</i> :	conductif
<i>conv_lat</i> :	convection latente
<i>conv_sens</i> :	convection sensible
<i>cs</i> :	cheminée solaire
<i>eq</i> :	équivalente
<i>hyd</i> :	hydraulique
<i>in</i> :	intérieur, entrée
<i>isol</i> :	isolation
<i>o</i> :	sortie
<i>rad_r</i> :	rayonnement solaire reçu
<i>rad_sc</i> :	rayonnement terrestre émis vers le ciel
<i>sol</i> :	le sol
<i>surf</i> :	surface
<i>tube</i> :	le tuyau
<i>vent</i> :	le vent
<i>vitr</i> :	vitrage

INTRODUCTION
GENERALE .

1. INTRODUCTION.

Pendant le 20^{ème} siècle la rapidité de la croissance urbaine dans le monde, a provoqué une surpopulation et une pression insupportable sur les villes. Les Nations unies évaluent aujourd'hui 54 % de la population urbaine et plus de 60% en 2050¹. Cette croissance a un impact négatif sur l'environnement et le bien être des concitoyens. L'aménagement et la gestion des villes deviennent de plus en plus compliqués en termes des infrastructures, des équipements, des transports, le logement et les besoins primitifs de la population. Pour des villes saines et qui assurent le bien être urbain, elles doivent être modernes suivant l'actualité et propres qui assurent l'hygiène ; où les principes de durabilité et la santé publique doivent être l'un des principes fondamentaux de l'aménagement urbain et la conception architecturale.

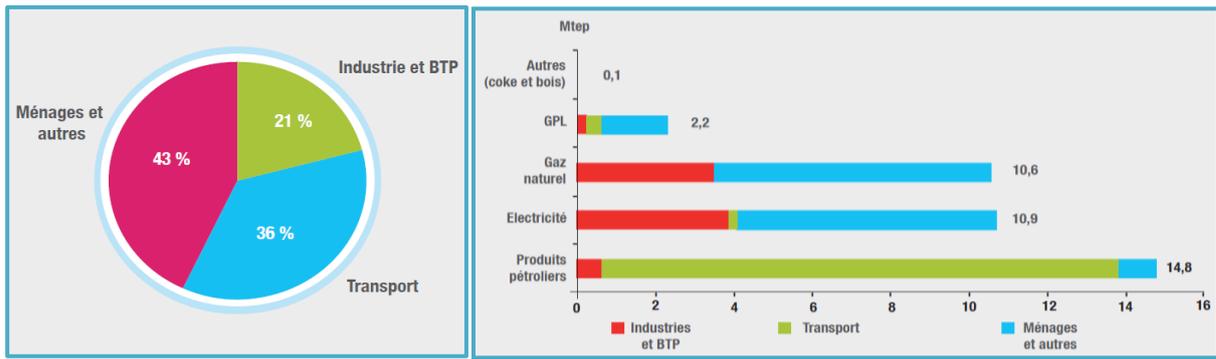
Les zones urbaines sont responsables de 70% de la consommation de l'énergie mondiale et la construction est responsable dans la même proportion des émissions de CO₂¹. L'architecte doit faire face à cette menace par la réduction de l'impact de ses réalisations sur l'environnement par l'intégration de tous les éléments relatifs à la conception verte et durable : L'efficacité énergétique, la qualité de l'environnement intérieur, le traitement et la gestion durable du site, des matériaux (renouvelables ou recyclables), le traitement de l'eau et l'innovation. Ceci afin de garantir l'équilibre écologique et attendre l'objectif zéro émission en 2050. Les solutions technologiques ne sont pas nécessairement les plus adaptées. Les conceptions passives et l'implantation du bâtiment en fonction du site sont fondamentales pour tirer un profit maximum des apports bénéfiques des climats et microclimats.

Les gouvernements du monde abordent COP21, pour des négociations en vue d'un traité international sur le climat à la fin d'année 2015, où l'architecture et l'urbanisme ont un rôle essentiel dans la réduction des gaz à effet de serre et un énorme potentiel face aux changements climatique mondiaux.

Le contexte algérien est préoccupant après la chute du prix du pétrole, où les nouvelles mutations énergétiques mondiales ont un impact stratégique sur le devenir de l'Algérie, le projet South Stream est destiné à livrer du gaz russe à l'union européenne via la mer Noire en 2015, les USA avec la révolution du gaz de schiste devrait être exportateur de pétrole vers 2017 et de gaz à l'horizon 2020 concurrençant sérieusement les leaders et la levée des sanctions contre l'Iran ; ce choc externe extrêmement violent pousse l'Algérie à l'épuisement de ses ressources énergétiques pour l'exportation (98% d'exportation d'hydrocarbures) et la consommation locale. La production d'énergie est la cause principale des risques de changement climatique dus à une augmentation des gaz à effet de serre et déstabilisation de l'écosystème local. Ce phénomène est clairement corrélé à l'activité humaine. La figure (1) représente la consommation d'énergie en Algérie pour l'année 2013².

¹ Message du Président de l'UIA pour la journée mondial de l'architecture 2014 (ESA MOHAMED)

² Bilan énergétique national de l'année 2013, Ministère de l'Energie.



Structure de la consommation finale par secteur d'activité

Répartition de la consommation finale par produit et par secteur d'activité.

Fig. 1 : La consommation finale pour l'Algérie en 2013.
(Bilan énergétique national de l'année 2013, Ministère de l'Energie)

- La consommation du secteur «Industries et BTP» a connu une hausse de 3,7% pour atteindre 8,2 Mtep³, tirée par la consommation des industries manufacturières 7,0% et des matériaux de construction 5,3%.

- La consommation du secteur des «transports» a augmenté de 3,9% en 2013, pour atteindre 13,9 Mtep, due essentiellement à la croissance de la consommation du transport routier 4% qui représente 90% des produits pétroliers.

- La consommation des «Ménages et autres» a atteint 16,4 Mtep en 2013, reflétant une forte hausse de 9% (la plus importante par rapport à autre secteur), tirée par l'accroissement de la consommation du résidentiel. (62% de l'électricité est consommée, 67% du gaz naturel, 77% d'utilisation du GPL)

- La consommation du secteur agricole a connu en 2013 une forte baisse de (-33,6%) passant à 248 Ktep.

Dans le SUD Algérien, en matière de confort thermique la construction des bâtiments standards qui sont énergivore (chauffage et climatisation) ou le cout de l'énergie est très bas avec le souci de construire rapidement et en grande quantité à cause de la croissance démographique, a favorisé ce modèle de bâtisse dans le pays qui est caractérisé par un climat chaud et aride. Dans la plupart des cas ce type de construction est relativement économique et simple, les bâtiments sont très peu isolés menant à une grande perte énergétique. La chaleur externe chauffe trop facilement le bâtiment et en retour le froid fourni par les climatiseurs sort trop facilement. Cette situation est souvent présente également dans notre pays ou la consommation énergétique a augmenté aux tours de ces deux dernières décennies d'une façon extraordinaire.

³ Mtep : La tonne d'équivalent pétrole est une unité d'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut, selon les conventions, 41,868 GJ parfois arrondi à 42 GJ, ce qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole "moyenne".

La réflexion sur la physique des bâtiments en rapport aux conditions climatiques locales semble trop rarement prise en compte. Quand elle a lieu, une recherche sur les caractéristiques des matériaux disponibles pour améliorer l'enveloppe thermique de la construction est trop souvent vite bouclée. Le maître d'œuvre ou l'architecte se tournant rapidement vers des choix d'appareils permettant un contrôle total du climat intérieur quelle que soit la situation extérieure, qui dépend sur l'énergie fossile (électricité ou gaz) pour satisfaire le confort thermique de l'homme on tournant le dos aux enseignements de l'architecture traditionnelle riche en matière d'adaptation environnementale.

Ce développement rapide au niveau de construction s'est fait sans considérer la question d'intégration climatique occasionnant une consommation importante d'énergie, provoquant des crises de l'électricité dans le sud algérien en périodes estivales, qui est une conséquence directe du changement des habitudes de consommation, notamment du fait de l'utilisation de plus en plus répandue de la climatisation ou la période estivale est bien plus longue que celle du chauffage pour prévoir le confort voulu, aussi avec la croissance urbaine dans le Sahara.

Cette croissance conduit au développement (vertical et horizontal) des bâtiments qui a besoin d'une bonne ventilation et d'éclairage de jour. Le système de ventilation naturelle de l'air n'est pas significatif aux bâtiments classiques particulièrement dans le climat chaud et aride ; donc les ventilateurs et les climatiseurs sont obligatoires pour répondre à la ventilation et la climatisation des locaux appropriés. Le refroidissement actif des systèmes conventionnels de climatisation peut être remplacé (ou réduit) par une méthode de rafraîchissement passif utilisant les ressources naturelles environnantes. Des économies sont ainsi obtenues sur le gaz réfrigérant (dans la grande majorité, des gaz fluorés 1000 à 10000 fois plus nocifs pour le climat que le CO₂), mais également sur l'énergie requise pour l'exploitation et l'investissement en technologie et en industrie.

L'homme de 21 siècles s'est habitué aux exigences de la vie moderne et il s'accroche de plus en plus; il se sent souvent dans la modernité en se forçant à une rupture vis-à-vis de la nature. Négliger l'environnement, glorifier la technologie, gaspillage, rejeter ce qui est ancien, oublier la simplicité et l'humilité, mépriser la mémoire architecturale collective de l'humanité sont malheureusement souvent ses lignes de conduite.

Pour faire face à la croissance de demande d'énergie, ou l'Algérie possède de grandes potentialités en matière des énergies propres et inépuisables mais restent peu développées et négliger; comme : énergie solaire, énergie éolienne, énergie géothermique, énergie hydraulique, les déchets urbains et la biomasse. Plusieurs techniques sont disponibles et applicables dans le neuf et la rénovation. Plus d'économique concernant le cycle de vie, la durabilité, leur épuration et la protection de l'écosystème saharien.

Les enjeux à remettre sont de maîtriser la consommation de l'énergie épuisable et polluante, minimiser les émissions des gaz à effet de serre et les gaz fluorés qui dégradent la couche stratosphérique d'ozone ; attirer la population concentrée dans le NORD du pays (climat favorable) et la redistribuer sur le territoire vers le SUD qui connaît des richesses économiques, ceci dépend principalement au contrôle du climat extrême (chaud et aride) dans les bâtiments et la ville. Le recours au système **PASSIF** qui a des avantages à savoir :

- la tendance mondiale pour réduire les émissions de carbone.
- Les nouvelles constructions seront plus éconergétiques et les bâtiments existants seront modernisés et moins énergivores.
- Permettre de développer la conscience chez les citoyens et consommer moins d'énergies fournis par les énergies renouvelables.
- Faire gagner de l'argent sur le long terme, rapport investissement initiale/cout d'énergie consommée.

L'utilisation de techniques de rafraîchissement passives, combinées avec des charges de rafraîchissements réduites peuvent non seulement aboutir à un bon confort thermique d'été mais économise la consommation d'énergie. Les deux techniques de rafraîchissement passives intéressantes et prometteuses sont : la ventilation naturelle de jour et l'échangeur air-sol (puits climatique). La ventilation naturelle est d'habitude employée dans une région avec le climat doux et dans des espaces où une petite variation dans le climat intérieur est tolérable. D'autre part une cheminée solaire, est une bonne configuration pour mettre en œuvre la ventilation naturelle dans des bâtiments où l'énergie solaire est disponible. Le puits climatique est applicable pour améliorer la ventilation naturelle par un effet porté par l'inertie du sol, qui peut aussi contribuer pour diminuer la température dans le bâtiment.

2. PROBLEMATIQUE .

L'objectif de cette étude est lié à la problématique de rafraichissement passif (sans recours à l'énergie) a intérieur dans les zones chaudes et arides par la combinaison de deux systèmes passives qui cultivent le rayonnement solaire et l'énergie géothermique peu profonde, l'étude est cernée dans les questionnements suivants :

- Quels sont les paramètres influant sur le rendement du système ?
 - L'utilisation de système combiné entre un puits climatique et une cheminée solaire dans une conception architectural peuvent-ils obtenir un refroidissement et un renouvellement d'air suffisant ? et remplace-t-il le système de rafraîchissement conventionnel ?
 - Quelle est la capacité de la cheminée solaire d'extraire l'air intérieur refroidit par le puits climatique dans un climat chaud et aride ?
 - Quelle est la capacité d'un puits climatique de réduire la température extérieure sans aucun soutien mécanique durant la période de climatisation ?
 - Quelle est le scénario optimal pour le fonctionnement du système ?
-

3. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE .

Le renouvellement d'air et le confort thermique sont les exigences de la vie moderne. Le système de refroidissement passif qui combine le puits climatique et la cheminée solaire doit être évalué et optimisé. Les objectifs sont de déterminer les paramètres conceptuels et physiques afin d'atteindre la performance du système et connaître ces limites de rendement et sortir par des recommandations et solutions dans un climat extrême ; chaud et aride en Algérie exactement proposé a Ghardaïa (32° 29' 00" Nord, 3° 41' 00" Est)

4. HYPOTHESES.

Comme des hypothèses ; l'utilisation de l'inertie thermique du sol pour prétraiter l'air ventilant des bâtiments ou la température du sol à 2 m de profondeur est beaucoup plus fraîche que la température extérieure durant la période estivale et l'intensité du rayonnement solaire est plus forte pour assurer l'extraction de l'air par une cheminée solaire donc les hypothèses dégagées sont ;

- les dimensions conceptuelles (géométriques) du puits climatique et la cheminée solaire déterminent le pouvoir de refroidissement durant l'été dans un climat chaud et aride.

- les paramètres physiques du sol et du système influent sur le rendement de refroidissement.

- Le système de refroidissement sous forme d'un échangeur air-sol combiné à une cheminée solaire assure un rendement efficace pour un refroidissement purement passif pour la climatisation et la ventilation intérieure.

- Les matériaux de grande inertie thermique introduite dans la cheminée solaire garantissent le fonctionnement du système et le rend plus efficace.

- Les conditions climatiques agissent sur le rendement du système.

5. METHODOLOGIE DE RECHERCHE .

La combinaison de deux systèmes, le premier de ventilation naturelle et le deuxième de refroidissement. La ventilation va être assurée par l'intensité solaire incidente sur la cheminée solaire ou le gisement solaire algérien et l'un des plus importants au monde et le rafraîchissement par un puits climatique afin de profiter de la géothermie, au but d'assurer un confort thermique intérieur abordable et réduire au maximum la dépendance au système de climatisation conventionnelle dans un climat chaud et aride.

La recherche est basée sur un travail théorique par simulation numérique vise à établir les causes qui influent sur le refroidissement d'un système combiné, à travers des techniques simulées qui permettent de calculer le rapport d'influence des paramètres du

système sur le refroidissement. Pour arriver aux objectifs une modélisation et simulation dans les quotidiens climatique de la ville de Ghardaïa ; de deux cellules identiques, la première (A) équipé par le système étudié, la deuxième (B) c'est une cellule de référence. Afin de connaître le rendement du système par l'évaluation:

- De la température intérieure par rapport la température extérieur et la température de la cellule de référence.
- Comparée les résultats avec d'autres recherches précédentes.

6. STRUCTURE DE MEMOIRE .

Pour atteindre les objectifs ; le mémoire est composé de cinq chapitres plus une introduction générale, et une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à approfondir les connaissances sur les méthodes traditionnelles de refroidissement et les principes de conception dans l'architecture des zones chaudes et arides, ces conditions climatiques et leur influence sur le confort intérieur afin d'admettre ces paramètres qu'iront prendre pour l'évaluation du confort thermique intérieur.

Le deuxième chapitre traite les techniques de refroidissements passifs, leur principe de fonctionnements, les paramètres qui ont une influence, leur rendement et à la fin leur potentielle de refroidissement pour résulter un système qui génère le refroidissement passif, l'économie, la durabilité et la protection de l'environnement dans des conditions climatiques sahariennes.

Le troisième chapitre conduit à connaître les principes d'installation et le rendement du système à l'aide d'une étude bibliographique des recherches scientifiques antérieures concernant les deux systèmes puits climatique et cheminée solaire avec présentation des résultats obtenues pour valider les résultats théoriques.

Le quatrième chapitre est consisté à exposer les phénomènes d'échange thermique. Une étude analytique sur l'échange thermique dans le sol pour calculer la température du sol pour différente périodes et profondeurs par un model analytique. Les échanges apportés dans le puits afin de pré-rafraichir l'air, le fonctionnement de la cheminée solaire el le pouvoir de tirage et le calcul de la température de la cellule rafraichie.

A la fin le cas d'étude et méthodologie appliqués, plus une présentation et interprétation des résultats fournies par la combinaison des deux systèmes de rafraichissement de l'air intérieur, pour optimiser et déterminer l'efficacité du système suivi par des recommandations pour le bon rendement sont présentés dans le cinquième chapitre.

Chapitre I.

Méthodes traditionnelles de
refroidissement dans
l'architecture des zones
chaudes et arides.

I.1. INTRODUCTION.

Pour plusieurs milliers d'années, l'homme a accumulé une longue expérience de l'architecture ; ou il s'est concentré sur l'objectif unique du bâtiment : le confort humain. De longs siècles d'expérimentations, d'échecs et d'amélioration des techniques lui ont permis, de mettre au point avec les moyens dont il disposait des constructions répondant de façon la plus simple possible aux contraintes qui se posaient.

La technologie a ses limites, les bâtiments modernes sont très énergivores grand renfort de pétrole et de gaz en hiver et d'électricité en été, on arrive à peine à dépasser la qualité de confort que peuvent offrir l'architecture vernaculaire qui n'utilise quasiment aucune énergie.

Morphologie, densité, disposition, circulation, forme de toit, surface, ouvertures, dispositif d'ombre et matériaux sont les vrais principes et éléments architecturaux dans les différents climats. Le but est d'identifier des stratégies qui rapprochent au confort dans les espaces intérieurs pour les habitants dans un climat extrême, comme ils l'ont été pendant de nombreux millénaires.

Les exigences et effet de la vie moderne ont permis le développement et le grandissement des villes particulièrement dans les villes du sud algérien. L'effet d'îlot de chaleur urbain en pleine canicule avec la dépendance au système de refroidissement énergivore et polluant. Le but est d'identifier les stratégies qui créeraient des espaces intérieurs confortables bio-climatiquement pour les occupants, comme ils ont été pour beaucoup de millénaires. Dans les régions chaudes et arides ou semi-arides, le climat a influencé la formation du tissu urbain des villes. Certains des règlements existant datent de la préhistoire, certains ont des racines dans l'antiquité et d'autres ont été planifiés dans le présent.

Les zones arides occupent environ 43 % de la surface terrestre, soit près de 6,45 milliards d'hectares, réparties dans 100 pays et touchant une population estimée à 900 millions de personnes soit, 20 % de la population mondiale. La figure (I.1) présente la répartition des zones arides dans le monde.

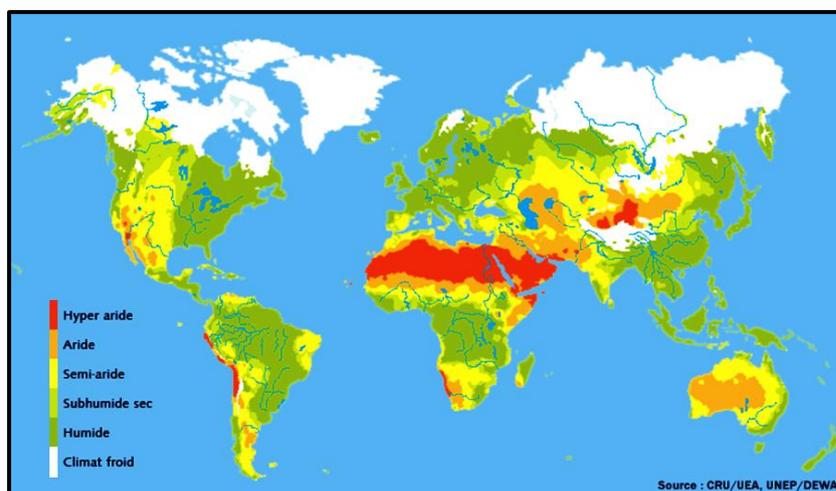


Fig. I.1 : Répartition des zones arides dans le monde.

(<http://fr.mapsofworld.com/world-maps/world-climate-map.html>, octobre 2015)

I.2. ADAPTATION A L'ECHELLE URBAINE .

I.2.1. MORPHOLOGIE ET CHOIX DE SITE D'IMPLANTATION .

Le creux de oued M'Zab en Algérie, sur des pitons rocheux donne un exemple comme plusieurs agglomération dans les milieux chaud et aride ; cette région est marquée par une grande amplitude plus de 15°C entre les températures maximale et minimale de jour et de nuit. Le creux de la vallée protège contre les vents chauds et permet de garder l'air rafraîchi les nuits et retarde sont réchauffement et le cesse entre deux à trois heures avant le lever et le coucher du soleil. Cette réduction en isolation est causée par l'ombre porté par les pitons rocheux et la topographie du ksar montré dans la figure (I.2). (Ben Cheikh, 2007)



Fig. I.2 : Vue générale sur le ksar de Ghardaïa et sur la vallée de M'Zab montre la portée d'ombre sur les habitations.

Le choix du site d'implantation pour l'effet de l'ombre se reproduise dans d'autres régions comme le vestige du Mesa Verde a Colorado États-Unis présenté dans la figure (I.3).

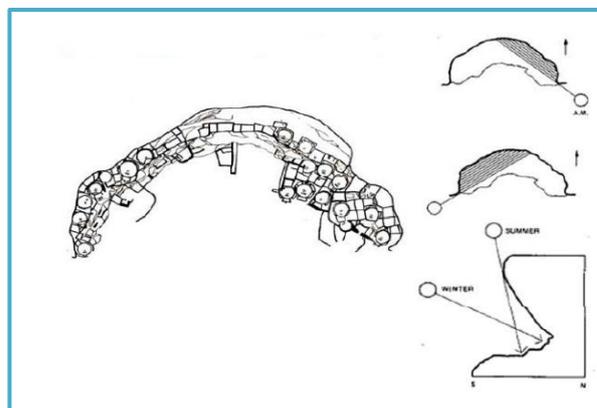
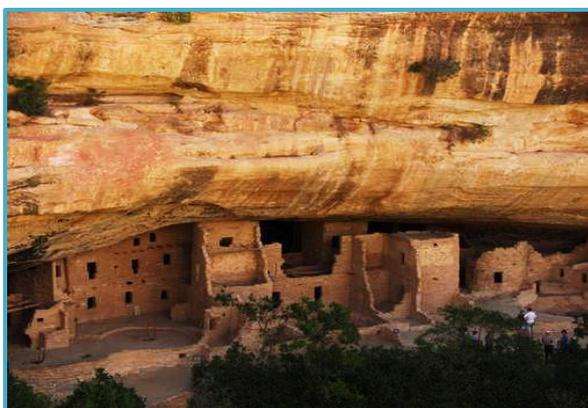


Fig. I.3 : Mesa Verde implantation d'habitation pour la protection du soleil entre le lever et et coucher aussi entre les deux saisons l'été et l'hiver. (Peron, 2015)

I.2.2. COMPACITE DU TISSUE URBAIN.

La configuration des maisons compactes avec espace ouvert interne était essentielle dans les agglomérations à climat chaud et aride pour réduire les surfaces extérieures de la maison (cellule) en proportion du volume intérieur afin de réduire les charges extérieures entre l'environnement et la cellule ou les vents chaudes (l'air est plus statique à l'intérieur qu'à l'extérieur de la ville) se présentent et pour réduire l'impact de l'insolation. Cette composition pousse à avoir une morphologie de construction introvertie d'une cour et patio en différentes formes généralement d'une section petite qui permette d'avoir l'éclairage et la ventilation. Ainsi les ruelles étroites avec la distance entre la construction permettent d'avoir des zones ombragées extérieurs. La figure (I.4) représente un exemple d'un tissu urbain compacte. (Taleghani, 2010)



Fig. I.4 : Rue étroite et irrégulière dans la texture urbaine compacte du ksar de Beni-Isguen, Algérie. (Yann-Arthus Bertrand, <http://www.yannarthusbertrand.org/fr>, 9 mars 2015)

I.3. ADAPTATION A L'ECHELLE ARCHITECTURALE.

I.3.1. LA FORME DU BATIMENT.

Dans un climat chaud et sec, l'arrangement de maison proche autour de la cour pour l'effet de drainage de l'air frais pendant la nuit afin d'augmenter les espaces rafraîchis pendant la période diurne (stocké la nuit) aussi pour minimiser les surfaces affectées par la radiation solaire, ces formes compactes sont choisies. En arrangeant ces formes des zones ombragées peuvent être obtenues. Dans des cours, avec l'aide d'eau et de la végétation pour le rafraîchissement par évaporation, la température de plancher peut être minimisée par les hauts murs entourant la cour et la terrasse. (Taleghani, 2010)

I.3.2. L'ENVELOPPE DU BATIMENT .

La durabilité et le rendement énergétique sont grandement affectés par la peau d'une construction. Dans les climats torrides les constructions sont construites en formes cubiques ou les bâtisseurs ont essayé de minimiser le ratio des surfaces extérieures du bâtiment à l'espace exigé au lieu de cela pour l'habitation. Ces formes cubiques aident à avoir une exposition inférieure aux facteurs météorologiques chauds que les formes linéaires. Le volume des espaces est très rationnel afin de pouvoir minimiser le besoin en rafraîchissement et en chauffage. La notion de déphasage, inertie et l'isolation ou l'utilisation des matériaux locaux pour réduire des dépenses énergétiques pendant l'occupation est une décision sage puisqu'il réduira aussi l'énergie gris et le cout.

Dans l'exemple de la maison mozabites, les murs sont en briques d'argile crue séchées au soleil, sur une base carrée ou légèrement rectangulaire ; dans autres agglomérations les murs se composent de boue et ses dérivées dans de telles régions, on ne peut pas trouver des autres matériaux de construction sauf des briques non cuites et la boue qui résiste fortement aux rayons solaires incessantes dans les mois très chauds. En attendant pendant le froid les chambres sont réchauffées avec très peu de chaleur supplémentaire. (Dutreix, 2010)

Dans la période estivale, les matériaux de construction absorbent la chaleur du soleil et le rendent disponible plus tard quand le soleil couche. Autrement dit, cette énergie est conservée dans les murs environ 8 heures et les autres parties de l'enveloppe du bâtiment et est progressivement transférée aux compartiments intérieurs. Une telle qualité fournit mène à deux alternatives dans le froid et des saisons chaudes. Dans le froid relève la température absorbée sert d'une barrière d'isolement qui protège l'air intérieur d'être affecté par le climat de désert froid d'hiver particulièrement en nuits parce que pendant le jour la température est absorbée par les murs et la construction et bien que l'air soit froid à l'extérieur, l'intérieur de la maison reste chaud. Pendant des saisons chaudes la température absorbée cause des problèmes et les conditions à l'intérieur de la construction empêchent le confort plein pour les résidents. En conséquence pendant les nuits les gens préfèrent dormir sur les toits à cause de la chute de la température extérieur et profité du rayons froides de la voute céleste. (Taleghani, 2010)

I.3.3. L'ARCHITECTURE TROGLODYTE .

L'habitat souterrain, troglodytique prend l'avantage d'une large capacité de stockage thermique de la terre avec une grande épaisseur de terre au-dessus de la construction, ce qui rend l'espace intérieur fortement isolé et la température presque constante où légèrement variable. Exemple les sous-sols des habitations du M'Zab. (Ben Cheikh, 2007)

Les balcons de Ghoufi ses maisons accrochées aux flancs des canyons, bâties en gradin en adossant son habitat à la roche (semi-troglodyte), voire la figure (I.5), ou la terre profonde est généralement proche de la température annuelle moyenne de la région, qui, dans de nombreux cas, est assez fraîche pour agir comme un dissipateur de chaleur pendant les jours d'été.



Fig. I.5: Habitat semi-troglodyte latéraux ; Canyon de Ghoufi Algérie.
<http://kahinaphotos.canalblog.com/archives/2009/06/13/13989393.html> 12 mars 2015)

A Matmata, Tunisie et Gharyan, Libye ; des habitations creusées dans les flancs de la montagne autour d'un vaste puits habituellement circulaire ; cet aménagement particulier de l'habitat permet de faire pénétrer la lumière dans les pièces souterraines tout en y maintenant de la fraîcheur aux plus chauds jours de l'été. Bien que la température intérieure de ces habitations ne soit pas constante durant toute l'année, comme dans une grotte, les amplitudes thermiques entre l'hiver et l'été y sont assez réduites : une quinzaine de degrés en janvier et 23 à 25 degrés en juillet (Khair-Al-Din, 1991). La figure (I.6) montre une maison troglodyte a Matmata ; tunisie.

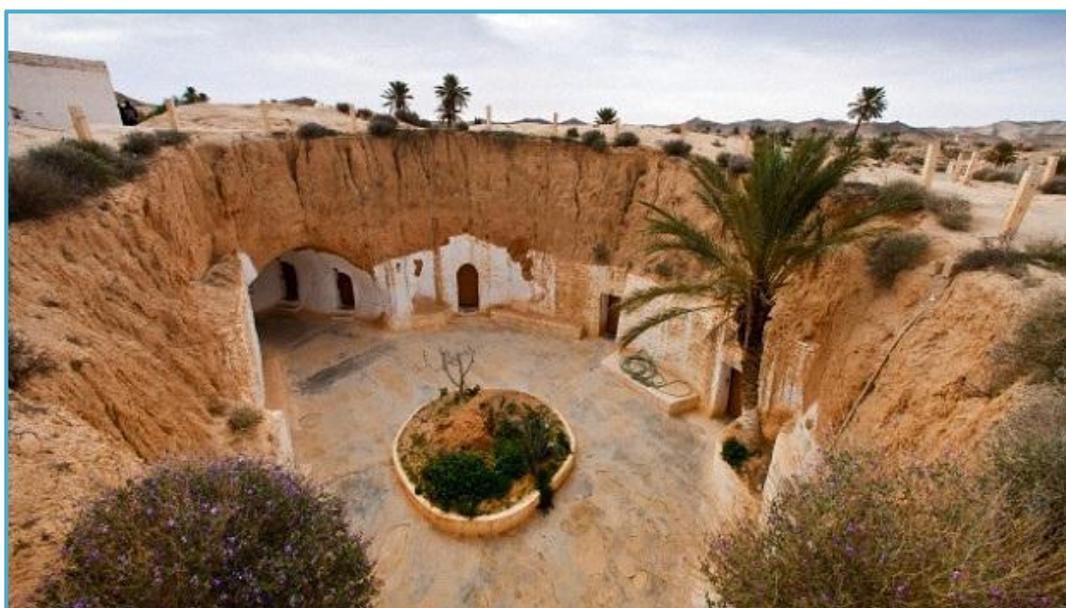


Fig. I.6 : Pièces creusées dans la montagne en forme d'un puits.
Maison troglodyte. Matmata ; Tunisie.

(<http://maison-monde.com/les-maisons-troglodytes-de-matmata/> . 12 mars 2015)

I.3.4. LA FORME DE TOITURE .

Les toits en forme de dômes et de voûtes pour les espaces fermés et semi-ouverts ont une caractéristique commune afin de réduire l'effet de l'insolation, de créer plus d'ombre, et d'augmenter le contact avec les vents de plein air et le contact d'échange par rayonnement avec la voûte céleste. Ce type de toit a fourni un confort thermique en raison du plafond plus haut. Ses hauts plafonds fournissent plus d'espaces où la stratification d'air permet aux occupants d'habiter les niveaux inférieurs plus frais présenté comme exemple dans le Souf en Algérie et Apulia, Italie. dans les figures (I.7) et (I.8). (Ben Cheikh, 2007)

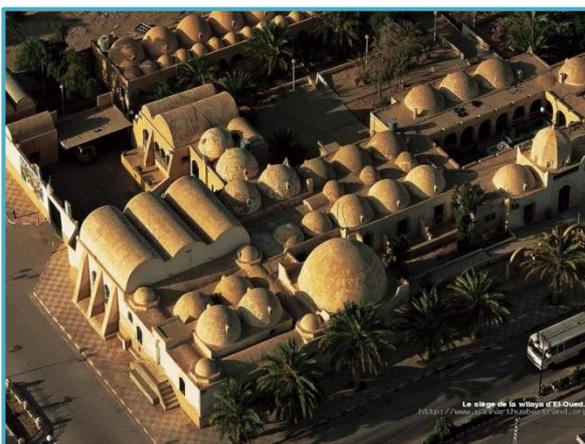


Fig. I.7 : La ville aux mille coupoles EL OUED ; ou les plafonds sont couvertes de coupoles et voûtes.
(Yann-Arthus Bertrand,
<http://www.yannarthusbertrand.org/fr>, 9 mars 2015)



Fig.I.8 : Les grandes masses et hauts plafonds de maisons ; Apulia, Italie.
(<http://www.italia.it/en/discover-italy/apulia.html>,
15 mars 2015)

Parfois des ouvertures ont été placées en haut pour améliorer la ventilation. Les augmentations de vitesse et les diminutions de pression au sommet de la surface. La diminution dans la pression au sommet du toit en forme de dôme incite l'air chaud sous le toit à couler par les ouvertures; voir figure (I.9). (Taleghani, 2010)

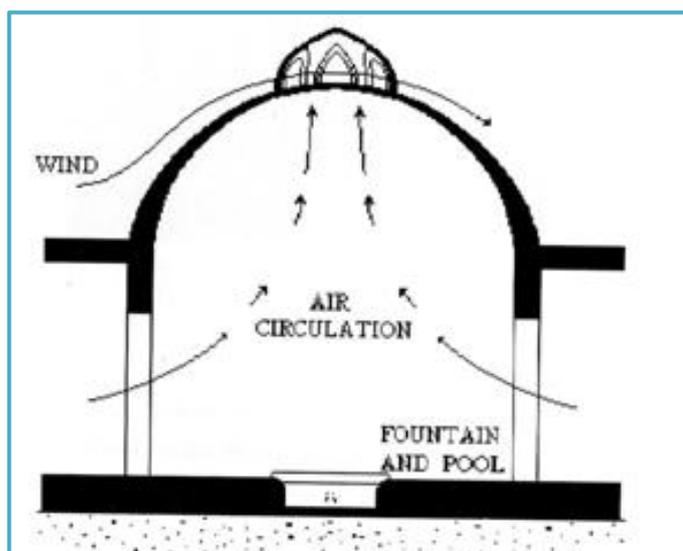


Fig. I.9 : Flux d'air dans un toit en dôme ventilé.

Les ouvertures dans les dômes améliorent aussi la lumière appropriée fournie sans pénétration directe des rayons solaires. L'autre avantage des dômes est pendant la journée il reçoit moins de radiation solaire que le toit plat. Tandis que le rafraîchissement par radiation la nuit le dôme était plus efficace que les plafonds plats (depuis l'hémisphère plein, la plus large zone, a vu le ciel nocturne). Ainsi, le chauffage par rayonnement est minimisé tandis que le rafraîchissement radiant est maximisé. Ou l'exemple le plus dramatique de cette sorte de dôme est la maison des Boroudjerdi, en Iran ; Figure (I.10). (Taleghani, 2010)

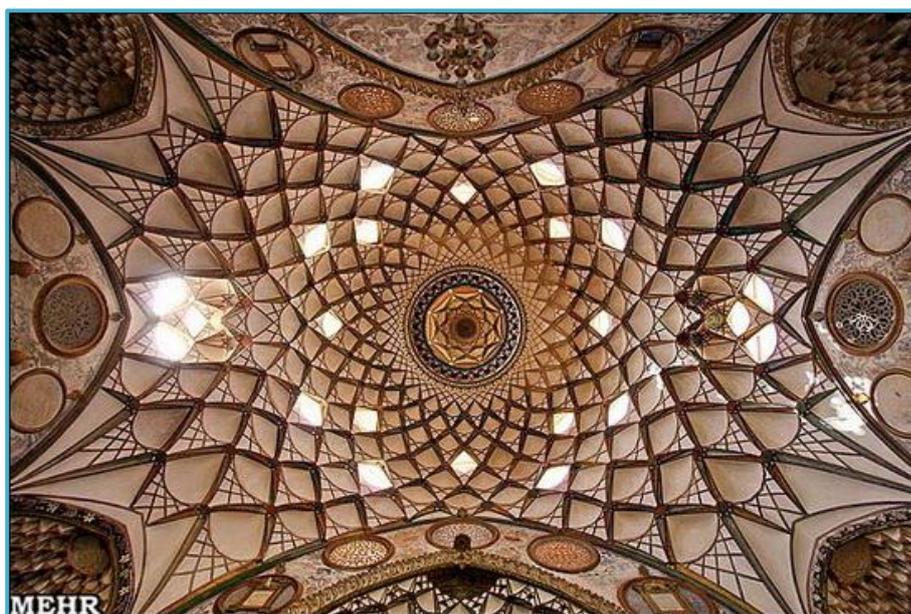


Fig. I.10 : La conception spécifique du toit en dôme avec des ouvertures, la maison des Boroudjerdi ; Kashan. Iran

(<http://www.iranreview.org/content/Documents/Boroujerdi-Historical-House-UNESCO-Top-Choice-in-2015.htm>
18 mars 2015)

I.3.5. TRAITEMENT DE SURFACES EXTERIEURES

Dans un tissu urbain compacte la surface du plafond reçoit la majorité du rayon solaire incident. Les murs et les terrasses extérieurs sont recouverts de tons pastel afin de limiter la réverbération du soleil et avec une absorptivité faible (inférieur de 0.3) ses couleurs sont appliquées généralement sur les toits qui jouent sur le développement de la température de la surface extérieure (Dutreix, 2010), Représenté précédemment sur la figure (I.4).

Les surfaces de construction crépi sont appliquées pour réduire le gain de chaleur, pour augmenter le contact avec le mouvement de l'air, afin de réduire l'exposition du soleil sur les surfaces par effet de l'ombrage, et de créer un refroidissement plus efficace (Dutreix, 2010). Exemple vivant dans la figure (I.11)



Fig. I.11 : Traitement de la surface des maisons crépi dans le ksar de ben-Isgan.

(<http://www.routard.com/photos/algerie/80365-ghardaia> .htm, 21 mars 2015)

I.3.6. PROTECTION SOLAIRE .

Dans les agglomérations urbaines au milieu chaud et aride. La minimisation de la surface des fenêtres afin de réduire l'isolation et la lumière éblouissante intérieure. Les ruelles sont étroites ou le rapport hauteur et largeur est entre 4 à 6 et en forme lacet, afin de briser le vent des tempêtes de sable et limiter au maximum la violence solaire sur les murs et les sols ; Les ruelles sont semi couvert pour protéger du soleil représenté dans le ksar de Ghardaïa figure (I.11) et les deux passages à Yazd ; Iran figure (I.12). (Mofidi, 2007)

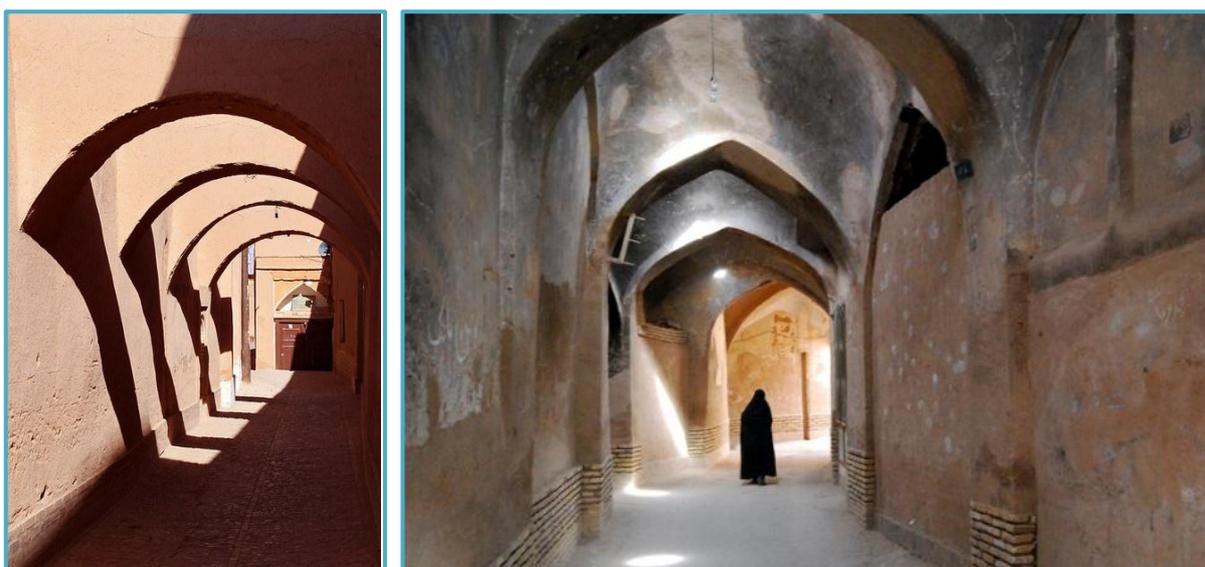


Fig. I.12 : deux passages dans la ville de Yazd en Iran ou le passage est couvert et semi couvert pour la protection des piétons de insolation intensive.

(Moossavi, 2011)

Moucharabiehs sont des systèmes offrant trois faces, en saillie sur la paroi du bâtiment ; sa fonction a été dissimulée par l'art riche d'un savoir-faire sculptural ou une partie émerge une solution de rafraîchissement pratiqué dans les zones chaud et aride (refroidissement par des jarres d'eau en terre poreuse afin de provoqué un rafraîchissement d'air par évaporation). Cette paroi à trois faces en bois épais, située généralement en hauteur, perforée d'une infinité d'ouvertures permettant la circulation de l'air, tout en interdisant au soleil de la traverser, n'est donc en aucune façon une fenêtre permettant de voir sans être vu ou il assure une intimité totale. Généralement réalisé en bois ou en plâtre et en pierre. (Dutreix, 2010).

Deux exemples sont présentés la figure (I.13) dans la région du moyen orient en Egypte des moucharabiehs en bois et la figure (I.14) Claustres pour des protections solaire sur les ouvertures été conçue en cohérence avec les traditions ; principalement conduites par le climat par ANDRÉ RAVÉREAU dans la vallée de M'Zab.



Fig. I.13 : Un masrabiya ; dans la région d'Assouan en Égypte. (Dutreix, 2010.)

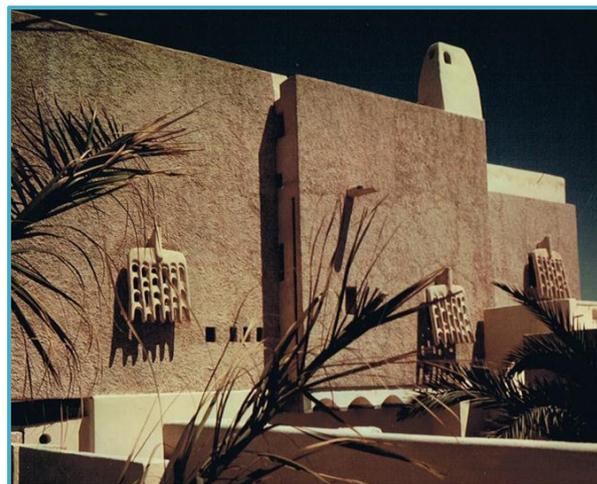


Fig. I.14 : exemple de claustra conçu dans la région de la vallée de M'Zab.

Des espaces semi ouverts sont utilisés pour créer des espaces vitaux ombragés et cools pendant la journée comme Iwan et Rewak. À l'Iran un passage couvre les pièces de trois cotés permet une vie commune à l'intérieur ; une salle de séjour ouverte à l'intérieur de la maison. D'habitude ils sont orientés au Sud et l'Est. Les Iwans sont très rafraîchissant et fournissent des endroits ombragés pendant après-midis d'été .Le Rewak la colonnade semi-ouverte arrangée dans la cour fournit toujours des zones ombragées ; voir figure (I.15). Dans la vallée de M'Zab la terrasse est entourée de hauts murs assurant l'intimité et l'ombre, permet d'y dormir lors des chaudes nuits d'été exemple dans la figure (I.16). (Taleghani, 2010)



Fig. I.15 : Iwan dans la mosquée d'Ispahan Iran ou montre l'exemple l'effet d'ombre qui protège la bâtisse de rayon solaire.

(Moossavi, 2011)



Fig. I.16 : Les galeries d'arcade et des murs acrotère assure l'intimité et une protection de rayon solaire dans l'architecture mozabite.

(<http://www.aladar-assoc.fr/le-climat-mediterraneen/> 02 avril 2015)

I.3.7. L'HUMIDIFICATION .

Lorsque l'eau s'évapore, la réaction chimique ou la rupture des liaisons hydrogène consomme beaucoup de chaleur; cette chaleur est absorbée de l'environnement immédiat. Deux grammes d'eau absorbent plus de 1 kcal de l'air ambiant lorsqu'ils passent de l'état liquide à l'état gazeux. Cette évaporation dans un lieu ombragé, plus la réaction absorbe de chaleur. Dans l'architecture vernaculaire des zones chaudes et arides ou l'objectif est de présenter l'humidité par des tirants d'air (patio, cours, tour à vent...ext), pour lesquels il est nécessaire de considérer que le mouvement aérien dominant conditionne l'intérieur pour fournir l'humidité aux pièces environnantes. (Dutreix, 2010).

Les stratégies les plus fréquentes incluent la présence de végétation près ou dans la construction (dans un patio) des surfaces d'eau ou des fontaines. Voir la figure (I.17).

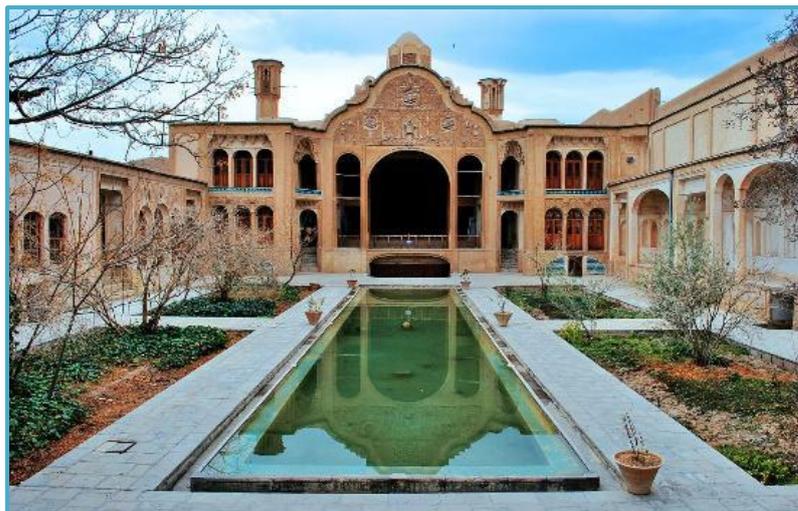


Fig. I.17 : La végétation est pressante avec une surface d'eau pour l'humidification de l'air. Patio de la maison des Boroudjerdi Kashan.

(<http://www.iranreview.org/content/Documents/Boroujerdi-Historical-House-UNESCO-Top-Choice-in-2015.htm>

18 mars 2015)

Les constructions du M'Zab qui utilisent une jarre d'eau positionnée devant les entrées d'air. Cette jarre d'eau en terre poreuse s'appelle un misraba ; elle est placée derrière une paroi perforée, en bois sculpté, le masrabiya (emplacement de la cruche à eau) afin d'assurer l'ombre totale. C'est un système de climatisation par évapotranspiration, puis de rafraîchissement de l'eau, le fonctionnement de ce système est d'aspirer l'air chaud qui s'échappe par le haut (patio, dôme) ou il lèche la terre poreuse de la jarre et évapore l'eau qui y suinte (transpire), en se refroidissant au passage. L'humidité va être absorbée, se condenser; puis s'évaporer de nouveau à l'extérieur après le transfert à travers l'enveloppe ; L'ensoleillement extérieur des murs permet à l'eau en surplus de s'évaporer de nouveau, limitant la surchauffe des murs. Cette technique permet de rafraîchir l'air sans apport thermique. La figure (I.18) montre un exemple de jarres utilisé pour le rafraîchissement. (Dutreix, 2010).



Fig.1.18 : Maison en Égypte, dans la région d'Assouan. Les deux gargoulettes sont positionnées sous la fenêtre, au niveau du flux d'air. Le sol enterré par rapport à l'extérieur, pour valoriser la fraîcheur de l'inertie terrestre.

(Dutreix, 2010)

I.3.8. LA VEGETATION ET LES SURFACES AQUATIQUES .

Dans les agglomérations urbaines des milieux chauds et arides ; la végétation joue un rôle essentiel de protection contre la chaleur grâce au phénomène d'évapotranspiration et d'ombrage des sols et des bâtiments, qui permet à l'air ambiant de se refroidir. Le pouvoir réfléchissant d'une surface végétale (albédo) est entre 0,2 à 0,23 elle reflète peu de lumière alentour (moins de chaleur réfléchi) ; l'exemple vivants de l'architecture mozabite dans les maisons d'été dans la palmeraie ; voir figure (I.19). L'étude menée sur l'effet des palmeraies sur le microclimat dans les zones chaudes et arides, montre que le phénomène est essentiellement nocturne et les températures extérieures dans le centre de site oasis étaient inférieures par 5 ° à 10°C en comparaison des autres sites étudiés ; comme le vieux ksar (compacité et ruelles étroites), le deuxième nouveau ksar (des voies plus larges adaptés à l'automobile et les équipements techniques) le troisième une maison dans un site ouvert et finalement le quatrième une station de météo comme une référence. D'autres mesures ont été prises entre la limite extérieure et le centre de l'oasis ; la température de l'air extérieure est plus haute par 2 à 4°C que la température dans le centre de la végétation, en raison de la densité des palmiers qui donne un environnement bien ombragé. (Ben Chikh et Rachid, 2012)

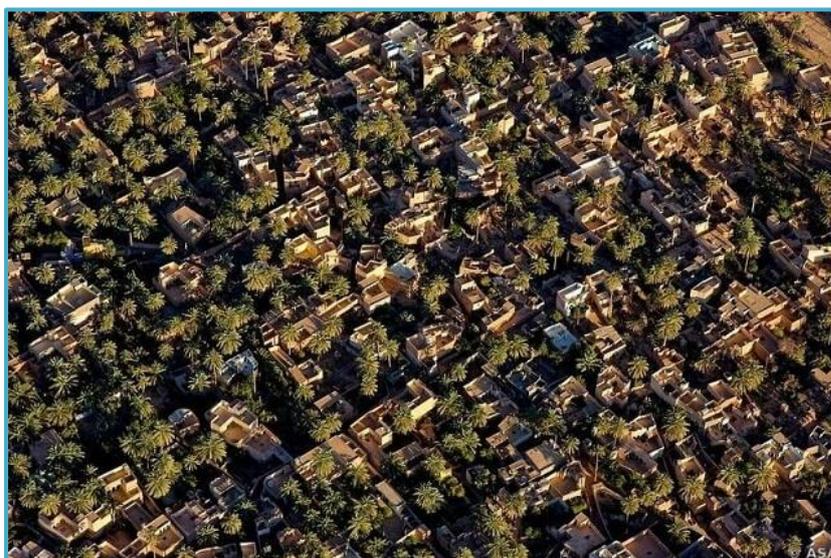


Fig. I.19 : Maisons d'été dans la palmeraie ; La vallée de M'Zab.

<http://georgesteinmetz.com/collections/desert-air-collection/>. 19 Mai 2015

Les historiens pensent que la plupart des civilisations urbaines plus anciennes du monde a émergé dans les zones arides ou semi-arides, principalement dans le croissant fertile du Moyen-Orient et dans la région du Nil où l'eau constitue une source de fraîcheur grâce au phénomène d'évaporation. Au cours de ce processus, l'air ambiant se rafraîchit en cédant une partie de sa chaleur pour permettre l'évaporation. (Mofidi, 2007)

Les dispositifs de gestion des eaux de pluies et zones humides, les fontaines, qui permettent la dispersion de l'humidité sous l'action du vent, les plans d'eau et les rivières sont essentiels dans les mécanismes de rafraîchissement de la ville.

I.3.9. L'ALBEDO ET RAFRAICHISSEMENT RADIATIF .

L'accumulation de toits sombres et de surfaces goudronnées crée d'immenses îlots de chaleur dans nos villes modernes (3 à 8°C, en été). L'hyper sédentarisation des humains et l'utilisation des goudrons ont un impact plus important sur le réchauffement de notre planète que leurs émissions de CO_2 ! Steven Chu, prix Nobel de physique et secrétaire général à l'énergie du gouvernement Obama, a démontré que, si l'on peignait les toitures, trottoirs et parkings en blanc, on refroidirait plus la terre en un an que les rejets de tous les véhicules du monde ne réchauffent la planète en onze ans. (Olivier et Colleu, 2016)

Le toit d'une construction peut être utilisé comme un radiateur nocturne et aussi comme un entrepôt frigorifique. C'est souvent une solution rentable. Pendant la nuit le toit est exposé au ciel nocturne, perdant la chaleur par la radiation grandes ondes et aussi par la convection. Dans l'architecture mozabite le matériau employé est la terre crue, renforcée par le bois de palmier pour les plans horizontaux. Elle présente une très forte inertie thermique, mais assure aussi une continuité thermique totale entre tous les volumes construits. (Dutreix, 2010). La figure (I.20) montre une vue sur les terrasses des maisons de ksar de Ghardaïa.



Fig. I.20 : Vue aérienne sur les terrasses des maisons dans le vieux ksar de Ghardaïa.

<http://georgesteinmetz.com/collections/desert-air-collection/>. 19 Mai 2015

I.3.10. MOUVEMENT AERIEN .

a. TOUR A VENT .

Une tour à vent comprend une source d'eau et une tour aérodynamique. La source d'humidité se limite à un bassin d'eau au pied de la tour à vent ; par contre dans les exemples plus sophistiqués, la colonne d'entrée d'air se situe à distance et circule dans une canalisation enterrée dans laquelle se trouve de l'eau ; voir figure (I.21).

L'air circulait alors à travers les conduites enterrées d'amenée d'eau potable. La partie supérieure est divisée dans plusieurs espaces aériens verticaux se finissant par des ouvertures dans les côtés de la tour.

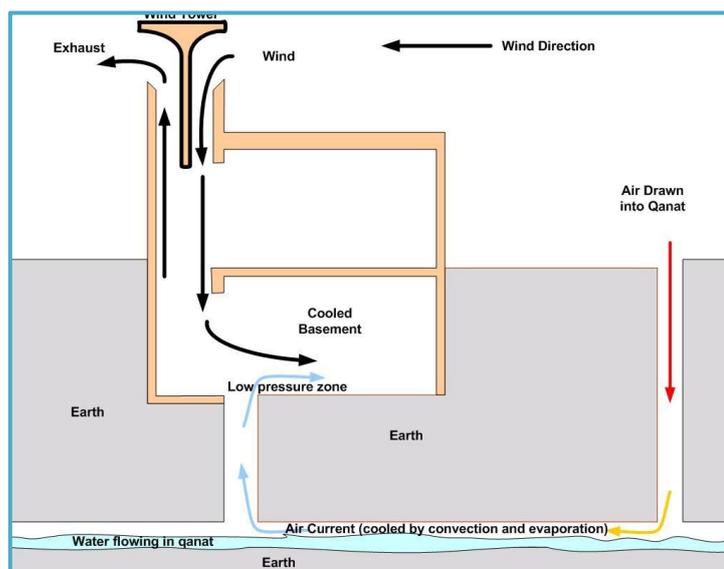


Fig.I.21 : Tour à vent combine avec une rivière souterraine.

(<http://www.fiabitat.com/introduction-au-puits-canadien/>). 13 avril 2015

En l'absence de vent, l'air chaud de l'habitation remonte lentement par effet cheminée, la partie extérieure de la tour, sur-chauffée en journée par le soleil, participant pleinement à la ventilation naturelle. En présence de vent, l'entrée face au vent se retrouve en surpression alors que celle qui est dos au vent est en dépression. Ce différentiel de pression crée un flux continu d'air sec au pied de la tour, qui brasse l'air intérieur par la turbulence créée, sans le renouveler fondamentalement, mais en lui empruntant son humidité et le rafraichir. L'inertie thermique de la tour participe au rafraichissement du flux d'air journalier et surtout nocturne. L'air chaud de l'habitation s'échappe à travers la tour et crée une dépression dans la construction qui aspire l'air frais nocturne à travers le puits, même en l'absence de vent. Représenté dans la figure (I.22). (Dutreix, 2010)

De jour, l'air intérieur se recharge en humidité et se refroidit sous cette action, puis se dissipe par turbulence naturelle dans l'habitation en la rafraichissant. L'humidité est absorbée par les murs en terre crue, où elle condense en y transférant la chaleur intérieure,

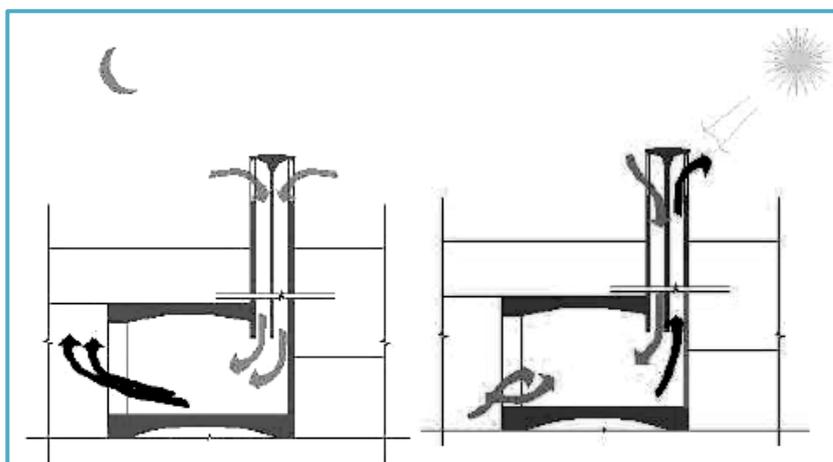


Fig.I.22 : Le mouvement d'air pendant la journée et la nuit par effet de cheminée.

(Moossavi, 2011)

puis s'évapore à nouveau à l'extérieur sous l'effet du soleil. Il ne reste plus qu'évacuer la nuit la chaleur accumulée dans les murs le jour. Des parois extérieures non étanches à la vapeur d'eau et offrant un déphasage journalier sont donc indispensables pour que l'ensemble fonctionne bien. Ce système de rafraîchissement ne peut évidemment fonctionner efficacement que dans les régions chaudes, ventées et présentant un air sec ; La figure (I.23) un exemple de l'utilisation de tour à vent dans l'architecture traditionnelle iranienne a Yazd. (Dutreix, 2010)



Fig.I.23 : tours a vent dans les bâtiments passivement dans l'architecture Iranienne.
(<http://www.petitfute.com/p174-iran/guide-touristique/c113114-arts-et-culture.html>) 13 avril 2015

b. LE PATIO .

Dans les zones chaudes et arides ; l'introvertie s'impose au tour d'une cour. En raison de rayonnement solaire incident dans la cour, l'air dans la cour devient plus chaud et se lève. Pour le remplacer, l'air frais au niveau du sol coule par les ouvertures de la pièce produisant un écoulement d'air ; au cours de la nuit, le processus est inversé. Comme la surface de toit chaude est rafraîchie par la convection et la radiation, une étape est atteinte quand sa température superficielle égale la température sèche de l'air ambiant ; l'air rafraîchi coule dans la cour et entre dans les espaces par les ouvertures basses et sort par les ouvertures plus hautes, il est nécessaire d'assurer que la cour reçoit un rayonnement suffisant.

I.4. CONFORT D'ETE PASSIF .

Il y a sept effets de rafraîchissement physiques fondamentaux utilisés pour garder la fraîcheur dans les saisons de chaleur extrême: mouvement aérien, ombres, évaporation, réflectance, conduction, radiation et le géocooling.

Le confort thermique est défini comme "un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique", comme il peut être défini par son contraire l'inconfort.

Au début des années 2000, des travaux de l'ASHRAE montrent que le modèle de Fanger est valable, en été, pour les bâtiments climatisés mais pas du tout dans les bâtiments ventilés naturellement. La perception du confort thermique découle aussi d'une appréciation affective d'un ressenti, et pas seulement d'un déterminisme entre confort et conditions comportementales et d'ambiance. La figure (I.24) montre les deux plages de perception du confort thermique pour un bâtiment conditionnée et un autre naturellement ventilé.

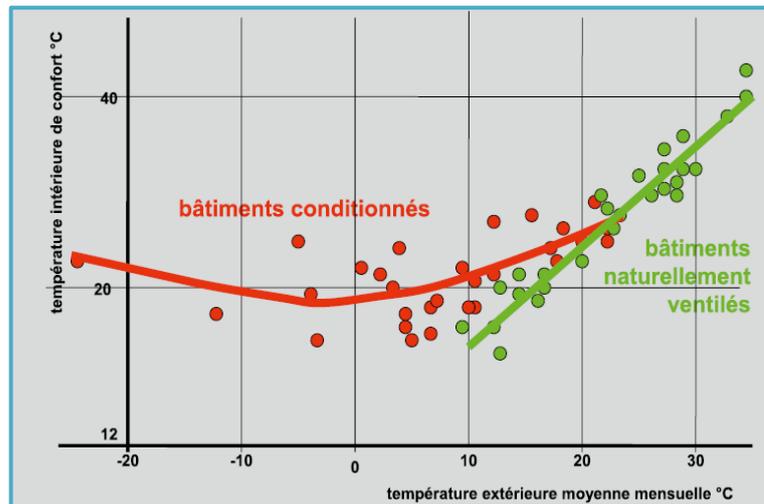


Fig.I.24 : Corrélation entre la température de confort et la température extérieure. (ICEB. Bornarel, 2014).

Cette approche, dite du « confort adaptatif », démontre que la sensation de confort dépend aussi de l'adaptation d'un individu à son environnement. Ces travaux ont notamment montré que, dans les bâtiments ventilés naturellement, la température extérieure, quand elle est plus élevée en été, prédispose les individus à une faculté d'adaptation accrue. L'ASHRAE propose, en 2004, une correction de la zone de confort en fonction de la température extérieure moyenne mensuelle. Voir la figure (I.25).

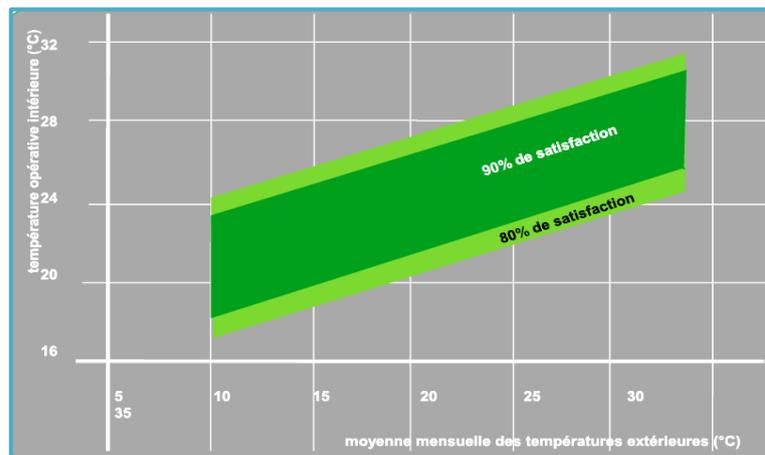


Fig.I.25 : la température opérative en fonction de la température moyenne extérieure mensuelle. (ICEB. Bornarel, 2014).

Les règles ASHRAE de 2004 ont récemment évolué, en 2009, en intégrant la prise en compte de la vitesse d'air dans la détermination du confort thermique pour les bâtiments non climatisés. Voir la figure (I.26).

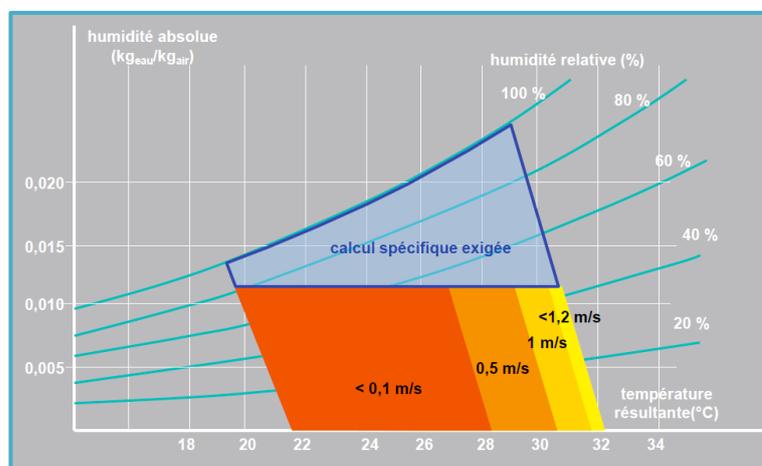


Fig.I.26 : effet de la vitesse de l'air sur la plage de confort sur le diagramme psychrométrique. (ICEB. Bornarel, 2014).

Selon ABC (2016) : Les précédents aspects sont les pièces qui sont réunies pour fournir un diagramme de ligne directrice indiquant l'effet de climat sur la configuration architecturale. Le diagramme bioclimatique est construit sur un diagramme psychrométrique qui peut assembler :

La zone de confort hygrothermique tracée pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale (en général 0,1 m/s) et les tenues vestimentaires moyennes d'hiver et d'été.

L'extension de la zone de confort hygrothermique due à la ventilation par augmentation de la vitesse d'air de 0,1 à 1,5m/s.

La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire et à l'utilisation d'enduits clairs.

La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire et à l'utilisation d'enduits clairs que l'on cumule avec une ventilation nocturne.

La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation.

La zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent l'humidification de l'air.

La zone des conditions hygrothermiques compensables par une conception solaire passive du bâtiment.

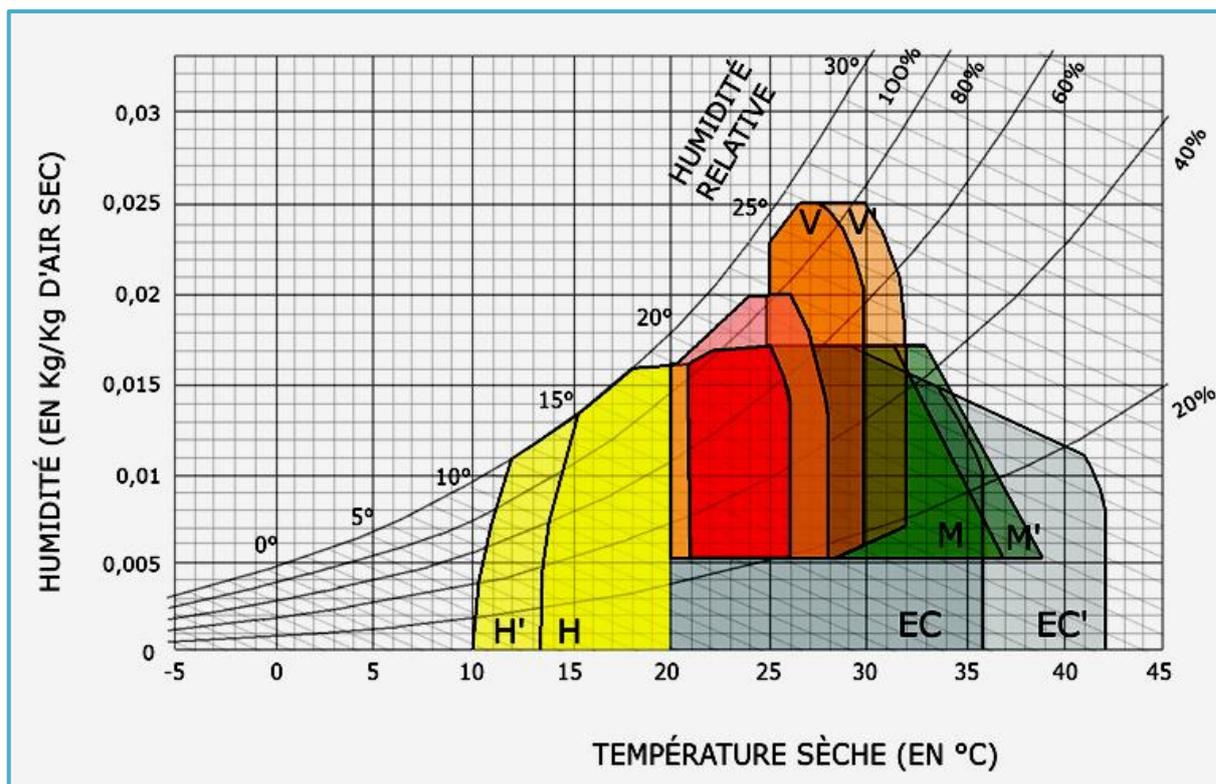


Fig.I.27 : Diagramme bioclimatique du bâtiment

Limites de la zone du confort thermique (rose), de la zone d'influence de la ventilation à 0,5m/s (VV' orangé) et de l'inertie thermique (MM' vert), de la zone d'influence du refroidissement évaporatif (EC et EC' gris), de la zone de non-chauffage par la conception solaire passive (H et H' jaune).

(ABC, 2006)

I.5. CONCLUSION.

Les enseignements retirés de l'architecture vernaculaire des zones chaudes et arides admettent de réduire l'impact de climat extrême à l'intérieur des bâtiments et se rapprochent de la zone du confort humain pour des exigences des mois torrides, par contre dans des conditions agressives ces méthodes traditionnelles n'assure pas un vrai milieu confortable ou l'homme moderne tourne le dos et dépend de système actif de climatisation utilisé dans les bâtiments administratifs ou résidentiels au Sahara algérien, cette utilisation non rationnelle des ressources non renouvelables de l'énergie fossile et la forte consommation avec le gaspillage qui devient un grand excédent pour le pays (énergie conventionnelle) et au citoyens (pouvoir d'achat).

Pour répondre aux revendications de la vie contemporaine d'autres systèmes passifs étaient développés qui s'intègrent à l'architecture actuelle afin d'assurer ou minimiser la consommation énergétique et ces effets polluants qui vont être développés dans le chapitre suivants en étudiant les utilisations, rendements et avantages.

Chapitre II .

Techniques de
refroidissement passif dans
les bâtiments: Conception et
intervention architecturale

I.1. INTRODUCTION.

Le terme « systèmes de refroidissement passif » sont des techniques simples qui permettent d'abaisser la température intérieure de bâtiment par l'utilisation de sources d'énergie naturelles et l'énergie renouvelable ainsi que des systèmes de basse énergie en consommant beaucoup moins d'électricité que la climatisation conventionnelle. Le terme « passif » n'exclut pas l'utilisation de ventilateur ou de pompe quand leur application qui peut améliorer les performances. Dans la plupart des cas, les collecteurs de froid et les éléments de stockage d'un tel système font partie intégrante de la construction elle-même comme le toit, l'enveloppe, les matériaux de structure et le sol sous le bâtiment. Les dispositifs mécaniques sont utilisés ou leur coefficient de performance (COP) à un apport d'énergie par unité de bâtiment du refroidissement qui est obtenu dans le bâtiment est beaucoup plus élevé que la valeur commune de climatisation, généralement la COP est au-dessus de cinq et est souvent au-dessus de dix. (Givoni, 1994)

Les bases de refroidissement passif :

- La ventilation naturelle intensive de jour et de nuit permet de rafraîchir le bâtiment par convection (du jour offrant un confort humaine directe, de nuit permettre de refroidir la masse intérieur du bâtiment et de fermer le bâtiment durant la journée permet d'abaisser la température de jour).
- Le rayonnement durant la nuit vers la voute céleste permet de rafraîchir le bâtiment par radiation).
- L'évaporation directe ou indirecte de l'eau permet de rafraichir le bâtiment par humidification.
- La géothermie est de rafraîchir le bâtiment par inertie thermique du sol en contacte directe comme les caves et l'habitat troglodyte ou indirecte par des conduits enterrés dans le sol.

Ces bases sont développées dans plusieurs systèmes afin de produire un rafraîchissement passif à travers la définition de leur principe de fonctionnement, l'influence de différents facteurs sur le rendement du système et la comparaison entre eux afin de combiner et d'évaluer un système de rafraîchissement économique et écologique pour les conditions climatiques des zones chaudes et arides.

Le rafraîchissement passif des bâtiments est largement catégorisé sous trois sections :

- La prévention/réduction de chaleur, (Réduire les gains de chaleur).
- La modération thermique (Modifier des gains de chaleur ou technique d'amortissement).
- La dissipation de chaleur (évacuation de la chaleur interne).

II.1. REDUIRE LES GAINS DE CHALEUR.

II.1.1. MICROCLIMAT.

Le climat est la moyenne des conditions atmosphériques pendant une période prolongée sur une grande région. Le microclimat est la résultante de l'influence de la topographie, la structure du sol et les formes urbaines. Le climat des villes diffère du climat des zones rurales, principalement en raison de la structure des villes et la chaleur dégagée par les véhicules. En général, le climat dans les villes se caractérise par des températures ambiantes, l'humidité relative réduite, une vitesse du vent réduite et rayonnement solaire direct reçu réduit.

La première étape dans la gestion des températures internes plus élevées dans les bâtiments est d'essayer de rendre l'air extérieur aussi frais que possible. Dans l'environnement bâti cela implique l'amélioration de l'infrastructure verte et bleue des parcs, des arbres, des espaces ouverts, l'eau libre. Il y a un intérêt croissant pour l'utilisation de jardins sur les toits, les murs verts et toits verts pour leur effet de refroidissement (Liu et Baskaran, 2003). Les parcs et autres espaces verts peuvent être bénéfiques à travers leurs effets de refroidissement en été, grâce à l'ombrage et la transpiration, et un meilleur accès pour la ventilation poussée par le vent naturel. En outre, la présence d'eau, les plantes et les arbres contribuent au refroidissement microclimat, et sont une source importante d'humidité dans l'environnement urbain principalement aride. Les surfaces urbaines devraient être réfléchissantes pour limiter le gain solaire (Gill et al, 2007).

II.1.2. CONTROLE DES GAINS SOLAIRES.

Le rayonnement solaire atteint les surfaces extérieures du bâtiment en forme directe, diffuse et réfléchi et pénètre à l'intérieur à travers le vitrage. En général, le rayonnement incident varie selon la latitude géographique, l'altitude au-dessus du niveau de la mer, les conditions atmosphériques générales, le jour de l'année, et le moment de la journée. Pour une surface donnée, le rayonnement incident varie avec l'orientation et l'angle de la surface par rapport au plan horizontal.

L'entrée du rayonnement solaire dans un espace intérieur peut provoquer des problèmes, tels que les surchauffe intérieur, l'inconfort thermique et visuel des occupants, des dommages aux biens et de meubles sensibles. Ainsi, il est d'une importance vitale que le rayonnement solaire doit être contrôlé. Contrôle solaire désigne l'exclusion totale ou partielle, permanente ou temporaire du rayonnement solaire sur des surfaces de construction ou des espaces intérieurs ou environnants. Le contrôle solaire peut être réalisé par les techniques suivantes :

a. LES OUVERTURES .

La combinaison appropriée de l'orientation, la taille et l'inclinaison des différentes ouvertures sur l'enveloppe du bâtiment est une importance vitale. En effet, ces paramètres affectent la vue de la surface du soleil et du ciel au cours des cycles quotidiens et mensuels.

b. LE VITRAGE .

Les propriétés thermiques des surfaces vitrées d'un bâtiment affectent la pénétration du rayonnement solaire à l'intérieur. Les influences des dimensions des ouvertures d'entrée et de sortie affectent le processus de convection et par conséquent, affecte le rendement global de chauffage (ou climatisation). La recherche dans le domaine de la technologie du système de vitrage a reçu un coup de pouce, passant de simple vitrage à des systèmes de fenêtres faible émissivité, et encore à faible coefficient de transmission thermique, vitrages sous vide, fenêtres électro-chromiques (transmission variable de lumière), Le vitrage à cristaux liquides afin de réduire l'effet des baies vitrées.

c. ISOLATION .

L'effet de l'isolation est de réduire le gain de chaleur et la perte de chaleur. Plus on met d'isolant dans l'enveloppe extérieure du bâtiment, moins de chaleur est transférée vers ou en dehors du bâtiment. L'isolation contrôle également la température moyenne de rayonnement intérieur en isolant les surfaces intérieures de l'influence des conditions extérieures, et réduit également les courants d'air produits par des différences de température entre les parois et l'air. Dans les climats chauds, l'isolation est placée sur la face extérieure de la paroi ou le toit ; de telle sorte que la masse thermique de la paroi est faiblement en contact à la source externe et fortement couplé à l'intérieur. (Kamal, 2012)

d. L'OMBRAGE .

- L'ombrage par des brise solaire, des persiennes et stores : Bien conçu pour le contrôle du soleil, les dispositifs d'ombrage, soit en tant que parties d'un bâtiment ou séparément placés sur la façade, peuvent réduire considérablement le gain de chaleur de pointe et les exigences de refroidissement et d'améliorer la qualité de l'éclairage naturel de l'intérieur des bâtiments. La conception des dispositifs d'ombrage efficaces dépendra de l'orientation solaire d'une façade de bâtiment en particulier. Par exemple, des auvents fixes simples sont très efficaces à l'ombrage des fenêtres orientées vers le sud en été, quand l'angle du soleil est élevé. Cependant, le même dispositif horizontal est inefficace à bloquer le soleil bas de l'après-midi à partir de la face ouest entrant les fenêtres pendant les périodes de gain de chaleur de pointe en été. Voir la figure (II.1) représente les différents types de dispositifs d'ombrage (Kamel, 2010).

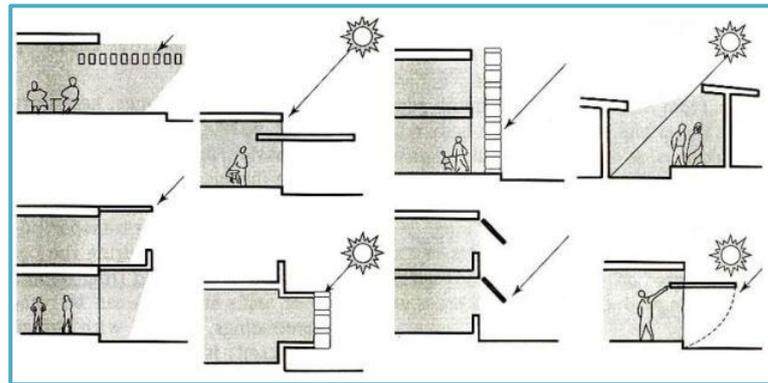


Fig. II.1 : Différents types de dispositifs d'ombrage. (Kamel, 2010)

- l'ombrage du toit : C'est une méthode importante pour réduire le gain de chaleur. Les toits peuvent être ombrés en fournissant une couverture de toit en béton ou des plantes ou de la toile ou des pots de terre, etc. l'ombrage fourni par des moyens extérieurs, il ne doit pas être interférer avec le refroidissement nocturne. Une couverture sur le toit, fait de feuilles en béton ou en fer galvanisé, offre une protection contre le rayonnement direct. L'inconvénient de ce système est qu'il ne permet pas échapper de la chaleur vers le ciel pendant la nuit (Kamel, 2012). Voir la figure (II.2).

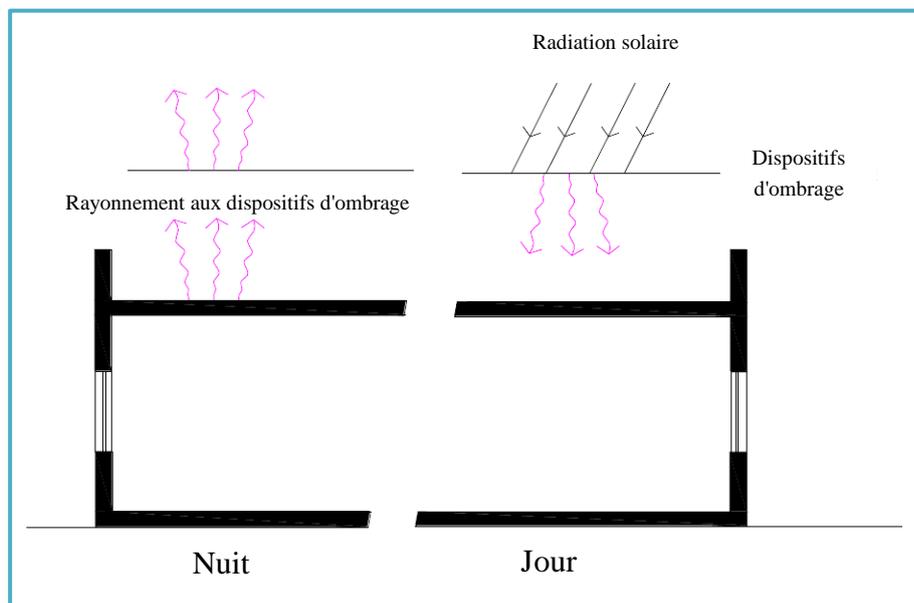


Fig. II.2 : Ombrage de toit par une cache solide. (Kamel, 2012)

Un autre dispositif peu coûteux et efficace est une bâche amovible monté près du toit. Pendant la journée, il empêche l'entrée de la chaleur durant la journée et de son élimination dans la nuit pour le refroidissement radiatif. La figure (II.3) montre le principe de fonctionnement de toit amovible. Peinture blanche du bâche (toit) minimise le gain de chaleur par rayonnement et conduction. (kamel, 2012)

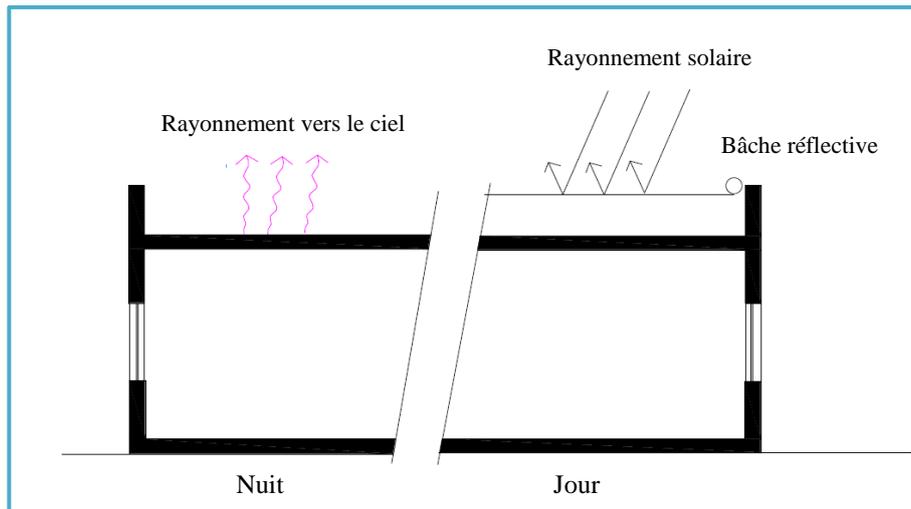


Fig. II.3 : Ombrage de toit par une cache mobile. (Kamel, 2012)

III.1. LA MODERATION THERMIQUE .

La gestion thermique d'un bâtiment peut être réalisée par deux méthodes. Dans la première méthode, la masse thermique d'un bâtiment (dans les murs, les planchers, les cloisons - constituées de matériaux ayant une grande capacité thermique) absorbe la chaleur pendant la journée et régule l'ampleur des fluctuations de température intérieure, réduit la charge de refroidissement de pointe et transfère une partie de la chaleur absorbée à la température environnante pendant les heures de nuit. La charge de refroidissement restant peut ensuite être couverte par des techniques de refroidissement passif. Dans la deuxième méthode, le bâtiment inoccupé est pré-refroidi pendant la nuit par ventilation nocturne, et ce sang-froid stocké est transféré dans les premières heures du matin du jour suivant, réduisant ainsi la consommation d'énergie pour le refroidissement de près de 20%. La masse thermique d'un bâtiment peut être réalisée soit par l'utilisation de matériaux de construction volumineux ou par l'utilisation d'énergie supplémentaire de matériau à changement de phase intensive dans le système de construction (Balaras, 1996).

IV.1. LA DISSIPATION DE CHALEUR .

Dans de nombreux cas, la prévention et la modulation des gains de chaleur ne peuvent pas maintenir la température intérieure à un niveau de contrôle. Une stratégie de refroidissement plus avancé comprend la chaleur de rejet aux puits de chaleur, tels que l'air extérieur et le ciel, par les processus naturels de transfert de chaleur. La conception d'un bâtiment est un facteur très important qui influe sur le potentiel de refroidissement d'une technique de refroidissement naturel. Le refroidissement naturel se réfère à l'utilisation de : la ventilation naturelle, le refroidissement par évaporation, le refroidissement du sol et le refroidissement radiatif, ainsi que l'utilisation d'un système à base d'un matériau à changement de phase.

IV.1.1. VENTILATION NATURELLE.

La ventilation naturelle est la technique la plus importante de refroidissement passif. D'une manière générale, la ventilation des espaces intérieurs est également nécessaire de maintenir les niveaux d'oxygène et de qualité de l'air dans un espace requis. Traditionnellement, les exigences de ventilation ont été obtenues par des moyens naturels (infiltration et ouvertures extérieurs). L'architecture moderne et la conception éco-énergétique des bâtiments ont réduit l'infiltration d'air au minimum, dans une tentative de réduire son impact sur le refroidissement ou le chauffage. Une meilleure construction a donné lieu à des bâtiments étant fermés de l'environnement extérieur. La conception réussie d'un bâtiment ventilé naturellement nécessite une bonne compréhension des modèles d'écoulement de l'air autour de lui et l'effet des bâtiments voisins. L'objectif est de ventiler la plus grande partie possible de l'espace intérieur. La réalisation de cet objectif dépend des caractéristiques d'emplacements de la fenêtre, design d'intérieur et de vent.

a. TECHNIQUES ENTRAINEES PAR LE VENT.

- Ventilation mono exposé : elle est affectée à la fois par l'effet de tirage et par le vent. L'effet de tirage se produit dans toute différence de hauteur où partiellement un gain de chaleur de l'air se produit. Ce qui signifie que, même sur une petite échelle dans une seule pièce, le débit d'air peut se produire quand il y a deux ouvertures sur différentes hauteurs. En ce qui concerne l'efficacité lors de l'application que les deux ouvertures doivent être aussi loin que possible, de préférence juste au-dessus du sol et au-dessous du plafond. La même idée s'applique à travers la ventilation dans une pièce avec une différence de hauteur entre les ouvertures. La différence de hauteur et de pression qui résulte n'est pas si grande qui influe sur l'écoulement d'air. L'il faut se limiter, en général, à une profondeur de la pièce inférieure ou égale à 2 fois la hauteur sous plafond. Voir figure (II.4). (Sellier et al, 2012).

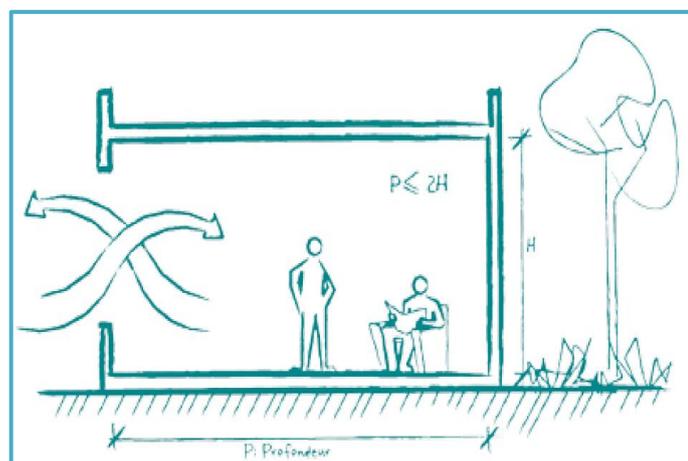


Fig. II.4 : Ventilation mono-exposée ; ouverture simple. (Sellier et al, 2012)

Les flux de vent ont une grande influence sur la ventilation à un seul côté. Les ouvertures devraient non seulement être divisées verticalement, mais devraient aussi avoir une large division spatiale pour se servir de la différence dans des pressions de vent sur la façade. La distribution de pression par le vent n'est jamais la même, qui causera un flux d'air intérieur entre deux ouvertures qui sont sous une pression différente. L'efficacité peut être augmentée en construisant dans la façade comme des ailes ; voir la figure (II.5). En ajoutant un élément à la façade qui sépare les ouvertures et redirige le vent, Une grande et une faible pression ont été crié dans les deux côtés de l'élément assurant un flux d'air plus facile ; La meilleure performance est à l'angle de vent environ 45 ° (Mac, 2010). Voir la figure (II.6).

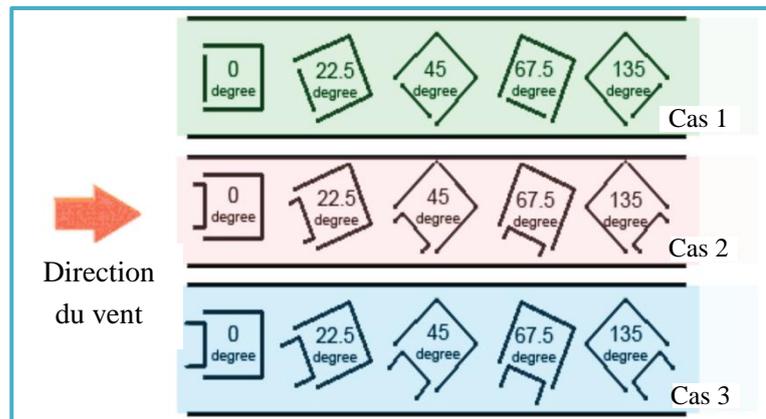


Fig. II.5 : Configuration de modèle pour différentes directions du vent. (Mac, 2010)

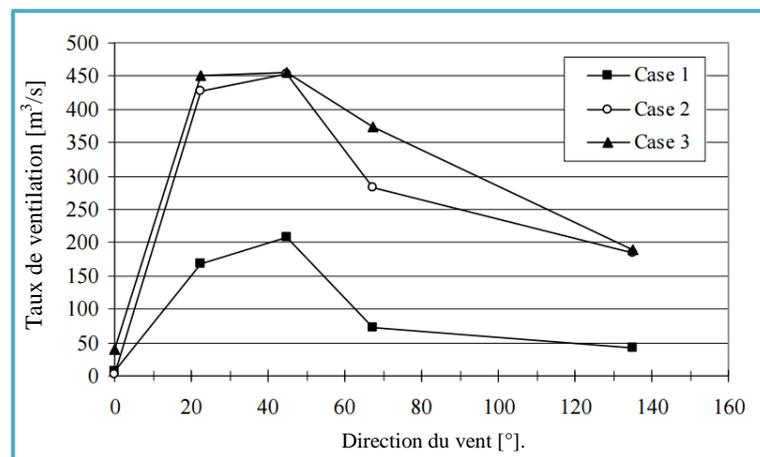


Fig. II.6 : Le taux de ventilation contre la direction de vent pour les trois cas étudiés. (Mac, 2010)

- Ventilation transversale : c'est la forme la plus simple pour induire le vent par le déplacement obligatoire d'air intérieur. Il est basé sur la surpression sur la façade au vent et sous pression sur la façade sous le vent, qui forcera à l'air à couler d'un côté à l'autre. Pour satisfaire ce flux d'air chaque espace doit avoir une ouverture des deux côtés, qui peut être une fenêtre ou une porte. La règle est de se limiter à une profondeur inférieure à 5 fois la hauteur sous plafond afin que le différentiel de pression entre l'entrée et la sortie d'air est

certes plus important que pour le cas de la ventilation mono-exposée, mais reste faible, et une profondeur trop grande augmentera la perte de charge et diminuera donc le débit de ventilation. De plus, une trop grande profondeur fera que les occupants du côté de la sortie d'air n'auront pas un air « neuf » mais un air déjà vicié. Voir la figure (II.7). (Sellier et al, 2012)

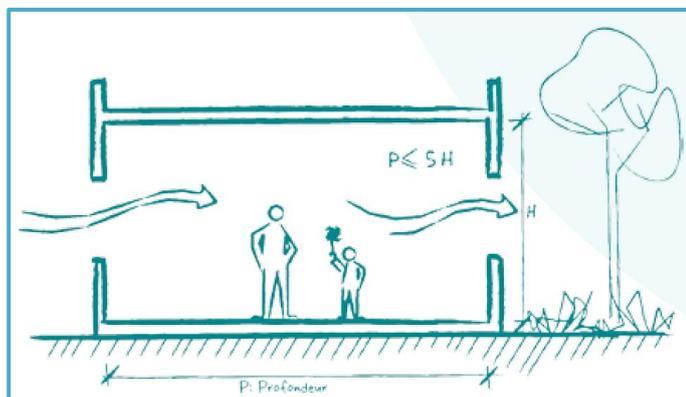


Fig. II.7 : ventilation transversale. (Sellier et al, 2012)

Les espaces adjacents peuvent causer des difficultés pour le flux d'air dégagé ou pour la qualité de l'air d'extraction d'un espace à un autre. Ceci peut être résolu en ajoutant un contournement au système, sous le plancher, comme dans la figure (II.8), ou au-dessus d'un plafond baissé. Le dimensionnement des ouvrants plus particulièrement devra être fait en tenant compte des deux modes, transversal et mono exposé. Dans les cas où la ventilation repasse en mode mono-exposé. (Macquoy, 2014)

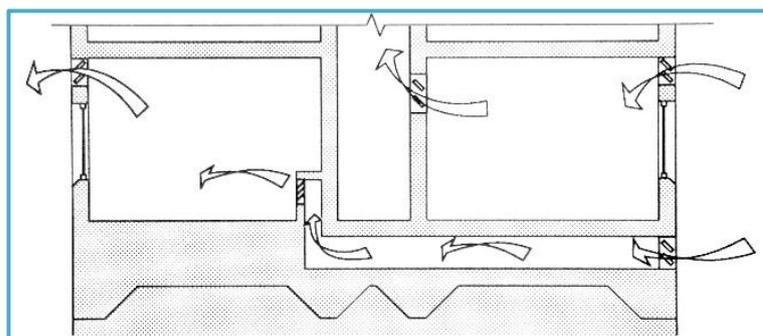


Fig. II.8 : Ventilation transversale par by-pass. (Macquoy, 2014)

- Ventilation par convection : par tirage thermique naturel comme Archimède l'a expliqué, l'air chaud a tendance à monter et l'air froid à descendre. À condition d'offrir au flux d'air une ouverture de renouvellement par le bas et une ouverture d'échappement par le haut, ce système est plus efficace, car il ne nécessite aucun vent, il ne dépend donc ni des variations locales de la météo ni des obstacles environnants au vent. Une cheminée ou un atrium sont fréquemment utilisés pour produire des forces de flottabilité suffisantes pour réaliser le flux nécessaire. Cependant, même le vent le plus petit incitera des distributions de pression sur l'enveloppe du bâtiment qui agira aussi pour conduire le flux d'air.

L'atrium : il peut générer la flottabilité thermique pour la ventilation naturelle représenté sur la figure (II.9). L'air chaud dans les chambres adjacentes échappe à l'espace haut de l'atrium où l'effet de cheminée se produit et le flux d'air continu est généré. L'infiltration a lieu localement dans les façades des espaces. L'effet peut être amélioré avec le gain de chaleur du rayonnement solaire en faisant un atrium avec une façade en verre ou un couvercle de verre étendu sur le toit. (Ji et Cook, 2005)

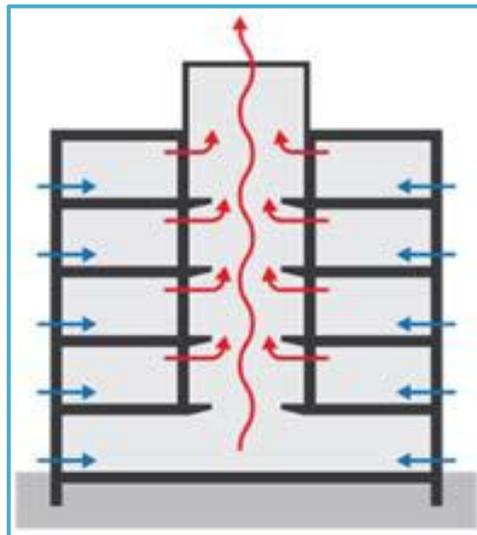


Fig. II.9 : Principe de ventilation dans l'atrium. (Macquoy, 2014)

La cheminée solaire : c'est un dispositif moderne qui induit une ventilation naturelle par l'effet de flottabilité. La structure de la cheminée absorbe l'énergie solaire pendant la journée, de manière à chauffer l'air enfermé à l'intérieur et l'amenant à se lever. Ainsi, l'air est aspiré à partir de la construction dans une ouverture proche du fond de la cheminée. L'air évacué de la maison, par la cheminée, est remplacé par l'air ambiant. Toutefois, si ce dernier est plus chaud que l'air intérieur de la maison, car il est généralement au cours de la journée. Dans les climats chauds, l'utilisation continue de la cheminée solaire commencera alors à chauffer la structure du bâtiment préalablement refroidi durant la nuit. Bouchair (1989) a étudié une cheminée solaire dans une cellule expérimenté en laboratoire sur des conditions climatiques artificielles similaire aux zones arides et chaudes cette cheminée a une épaisseur variable et elle est fermée pendant la journée ($T_{ae} \geq T_{ai}$) et ouverte durant la nuit ($T_{ae} \leq T_{ai}$) motorisé par l'inertie thermique stocké durant la journée. La cheminée solaire est utilisée pour évacuer l'air chaud du bâtiment à un rythme rapide, améliorant ainsi le potentiel de refroidissement de l'air entrant par d'autres ouvertures. Voir figure (II.10).

Les cheminées solaires ayant un coût de construction relativement faible, peuvent déplacer l'air sans qu'il soit nécessaire pour les dépenses des formes conventionnelles d'énergie, et peuvent aider à atteindre le confort en refroidissant la structure du bâtiment durant la nuit. Ils peuvent également améliorer le confort des habitants pendant la journée si elles sont combinées avec d'autres dispositifs de refroidissement.

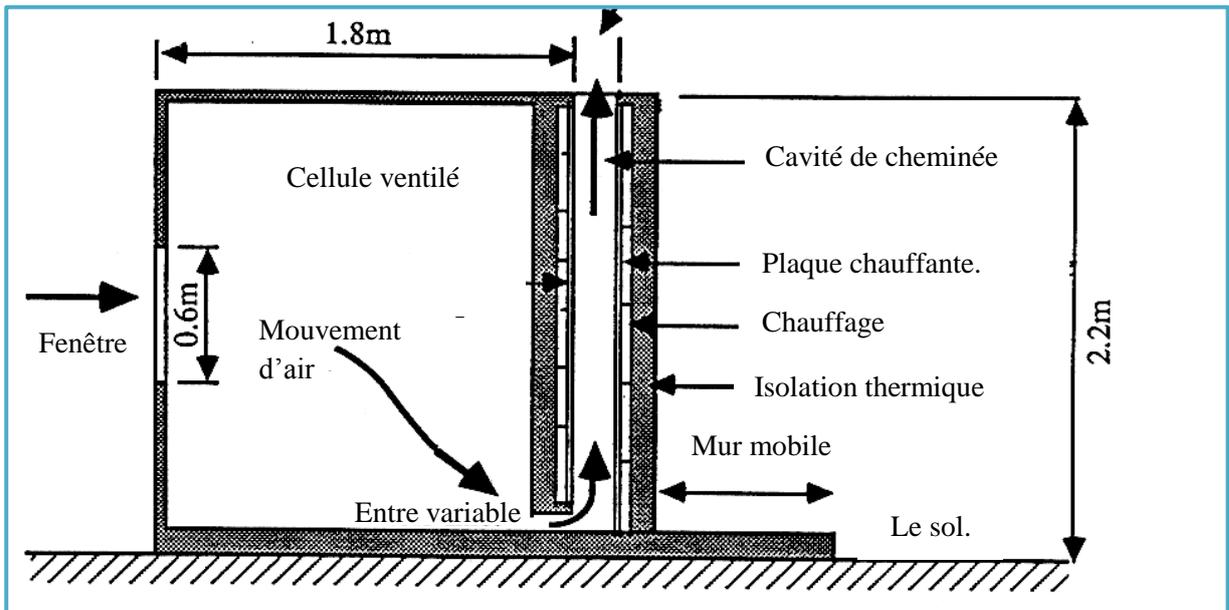


Fig. II.10 : coupe schématique sur le système de cheminée solaire. (Bouchair, 1989)

Le toit Venturi : Le toit Venturi utilise l'effet Venturi comme une force motrice pour un système d'extraction de ventilation centrale. Selon les lois de la dynamique des fluides, la vitesse d'un fluide augmente quand il passe à travers une contraction tandis que la pression diminue. Dans un système fermé, le fluide n'a pas d'autre choix que de circuler à travers la contraction, mais dans un système d'air, si l'obstacle est trop grand, l'air sera plus facilement à circuler autour d'elle. La figure (II.11) montre le principe de fonctionnement. (Hooff, 2011) sur une étude de toit venturi par ventilation naturelle par le vent pour les bâtiments dans une soufflerie et par CFD pour l'évaluation des différentes configurations de conception. Ces essais ou le rétrécissement dans le centre est cinq fois moins que la hauteur de l'espace d'entrée de l'air du toit venturi ont montré que les ailettes directrices ont un impact négatif. La raison est cet ajout des ailettes augmentent fortement la résistance de flux d'air. Ce phénomène a été appelé l'effet bloquant de vent. (Hooff, 2011)

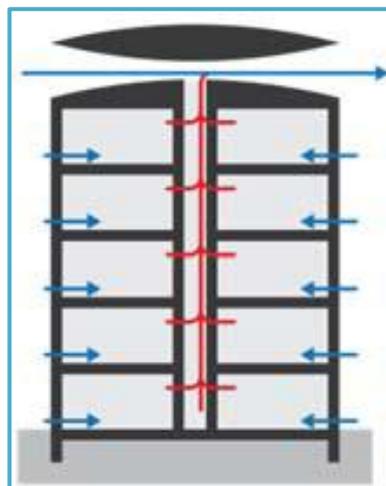


Fig. II.11 : principe du toit Venturi. (Macquoy, 2014)

IV.1.2. RAFRAICHISSEMENT NATUREL .

a. REFROIDISSEMENT PAR EVAPORATION .

C'est une méthode de rafraîchissement d'air basée sur l'évaporation de l'eau. Le principe est simple; l'air chaud et sec qui passe à travers un échangeur humide se refroidit naturellement. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est extraite de l'air qui en conséquence se refroidit. Ce système gagne en efficacité avec l'augmentation de la température extérieure. Au-delà de 30°C, l'air peut se refroidir de plus 10°C ce qui se traduit par un rendement de rafraîchissement très efficace.

Pour que ce système fonctionne correctement les bâtiments doivent être bien ventilés afin de pouvoir rapidement évacuer l'humidité engendrée par le système. Les appareils sont le plus souvent installés à l'extérieur. Un système de gaine permet d'amener l'air dans la zone à rafraîchir avant d'être évacuée par les ouvertures naturelles ou par des systèmes d'extraction. Ce type de rafraîchissement convient particulièrement aux grands volumes ainsi qu'à tout bâtiment où les apports thermiques sont importants. Il consiste à diminuer la chaleur que nous percevons (chaleur perceptible) et augmenter la chaleur que nous ne percevons pas et que nous évacuons par ventilation (chaleur latente). Un processus qui ne demande pas de variation de chaleur. Il y a deux types de classification pour le refroidissement en évaporation représenté dans la figure (II.12) ou l'air soufflé est refroidi par un contacte directe ou indirecte avec la surface de l'eau.

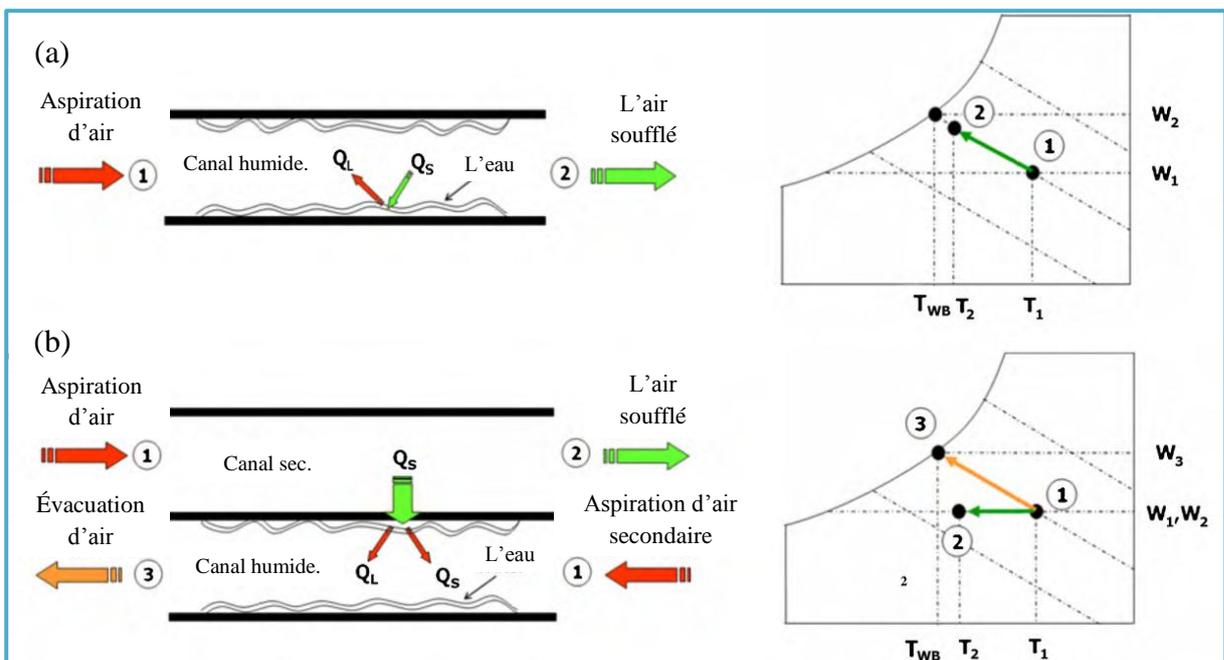


Fig. II.12 : Comparaison de processus psychométriques :

(a) le rafraîchissement par évaporation directe.

(b) le rafraîchissement évaporation indirect.

(Riangvilaikul et Kumar, 2010)

Riangvilaikul et Kumar (2010) ont étudié un système refroidissement par évaporation de point de rosée, la figure (II.13) montre une configuration et un processus psychométrique de point de rosée pour le refroidissement évaporatoire. Le principe psychométrique. Du système peut expliquer comme suit : l'air aspiré (1) coule le long du côté sec pour perdre sa chaleur sensible sur le côté humide. L'air soufflé (2) est ce refroidisseur sans changement d'humidité. Une certaine fraction de l'air soufflé, appelé l'air utilisé, est détourné dans le canal humide au côté bas du dispositif. La chaleur et le transfert de masse de l'évaporation de l'eau a lieu le long du chemin d'écoulement de l'air utilisé dans le canal humide. Finalement, l'air de travail est évacué à l'extérieur (3).

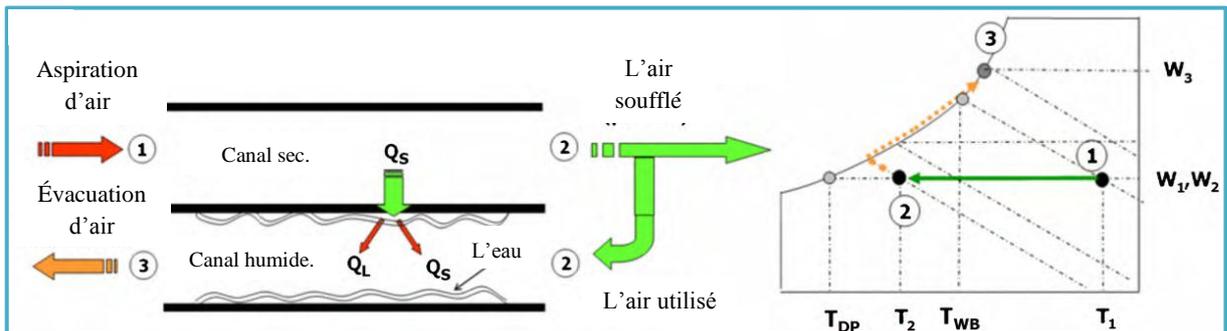


Fig. II.13 : refroidissement par évaporation de point de rosée.
(Riangvilaikul et Kumar, 2010)

La performance du système sous l'influence des conditions d'entrée d'air. Les conditions de l'air d'entrée couvrant un climat sec, modérée et humide (entre 25-45 °C et 6,9 à 26,4 g / kg de taux d'humidité) ont été fournis à la partie d'aspiration du système de refroidissement par évaporation de point de rosé les résultats sont représenté dans la figure (II.14). Pour des conditions stable (vitesse d'aspiration 2,4 m/s, épaisseur du canal 0.005 m, longueur du canal 1.2 m, ratio de l'air utilisé a l'air aspiré 0.33 kg/kg, température de l'eau 28°C).

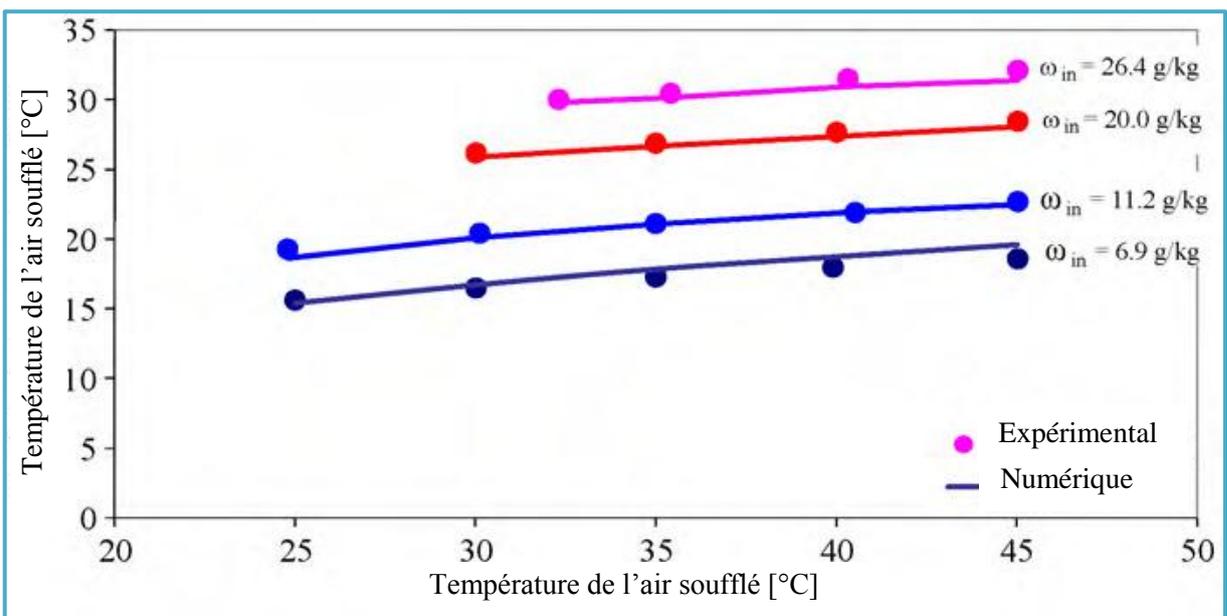


Fig. II.14 : Comparaison des résultats de simulation avec des données expérimentales pour l'état de sortie d'air pour différentes conditions d'arrivée d'air.
(Riangvilaikul et Kumar, 2010)

L'augmentation de la température et humidité de l'air d'entré conduit à l'augmentation de l'air de soufflage. Le changement de 10 g / kg d'humidité entré peut fournir 6,8 °C de variation de la température de sortie alors que le changement de 10 °C de la température de l'air d'entrée donne environ 1,6 °C de différence. Par conséquent, le facteur significatif majeur affectant la condition de sortie d'air est l'humidité de l'air d'entrée. La plus faible humidité de l'air donne une plus grande capacité de cet air pour absorber plus d'humidité lorsqu'elles sont détournées dans le canal humide qui permettre plus de refroidissement de l'air dans le canal humide.

L'étude pour l'amélioration de la chaleur et le transfert de masse sont dans le système de refroidissement par évaporation de point de rosé opérant sous différentes conditions climatiques. Le modèle présenté peut fournir des profils ainsi que des conditions de sortie du processus, la température de l'air, l'humidité et d'autres paramètres dans le canal sec et humide, des paramètres de système. Les paramètres majors affectent essentiellement sur l'efficacité de refroidissement sont : l'humidité de l'air aspiré, la température de l'air aspiré, la vitesse d'entrée d'air, l'écart de canal, la longueur du canal.

La vitesse de l'air affecte sur le transfert de chaleur et l'humidité entre le coté sec et humide qui entraine une variation de performance. La température diminue lorsque la vitesse diminue et pour la même vitesse avec l'augmentation de l'humidité de l'air d'entré permettre d'augmenté la température de soufflage.

Les valeurs d'efficacité varient inversement avec l'épaisseur de canal. Pour obtenir l'efficacité de refroidissement élevée du système, l'épaisseur de canal doit être sélectionnée en dessous de 5 mm pour obtenir l'efficacité de température humide supérieure à 100%.

L'augmentation de la longueur peut conduire à l'amélioration des processus de transfert de chaleur et de masse en augmentant le temps de contact et de la zone. Cependant, le coût initial (plus grande taille) et les coûts de fonctionnement (plus de perte charge) doivent être pris en compte pour l'optimisation du système. La longueur supérieure à 1m peut fournir l'efficacité de température humide supérieure à 100% pour toutes les conditions de l'air.

Sur la base de l'analyse des paramètres influents sur la performance du système, le système doit être conçu et exploité à: vitesse d'air d'admission inférieure à 2,5 m / s, l'écart de canal soit inférieure à 5 mm, la longueur du canal doit être supérieur à 1 m et le rapport de l'air utilisé à l'air d'aspiration entre 35-60%, pour une efficacité de refroidissement de température humide supérieur à 100%.

b. REFROIDISSEMENT RADIATIF .

Le refroidissement radiatif est basé sur la perte de chaleur par émission de rayon de longue onde d'un corps vers un autre corps d'une température inférieure. Dans le cas de bâtiments le corps a refroidir est le bâtiment et le dissipateur de chaleur est le ciel, c'est à partir ou la température du ciel est inférieure aux températures de la plupart des objets sur terre ; ceci est le mécanisme qui permet à la terre de dissiper la chaleur reçue du soleil, d'une manière à maintenir son équilibre thermique, Il existe deux méthodes d'application d'un refroidissement radiatif dans les bâtiments: le refroidissement radiatif direct, ou passive, et le refroidissement radiatif hybride. Dans la première, l'enveloppe du bâtiment rayonne vers le ciel et se refroidit. Produisant une perte de chaleur depuis l'intérieur du bâtiment. Dans le deuxième cas, le radiateur n'est pas l'enveloppe du bâtiment, mais habituellement une plaque métallique. Le fonctionnement d'un tel radiateur est à l'opposé d'une plaque plane d'un capteur solaire thermique à air ou l'air est refroidi en faisant circuler l'air sous la plaque métallique, avant qu'il ne soit injecté dans le bâtiment.

Plusieurs études réalisées par des chercheurs sur le refroidissement radiatif, La technique la plus simple de refroidissement radiatif passive est de peindre le toit en blanc. La peinture blanche ne modifie pas significativement le taux de rayonnement dans la nuit, puisque les deux peintures blanches et noires ont presque la même émissivité dans la gamme des ondes longues. L'avantage d'un toit peint en blanc est que, en réfléchissant le rayonnement solaire pendant le jour, la température du toit reste inférieure et peut être facilement refroidi par rayonnement pendant la nuit.

Mihalakakou et Bagiorgas (2013) : ont étudiée un radiateur nocturne léger est placé sur le toit d'une hauteur de 10 m du bâtiment de l'environnement et de la gestion des ressources naturelles ; Département de l'Université de Patras, à Agrinio (Grèce occidentale). En tant que première étape de la construction du panneau métallique du radiateur, ils ont utilisé un long tube d'aluminium plié, peint avec une peinture blanche appropriée de haute émissivité, voir la figure (II.15).



Fig.II.15 : base métallique avec un tube en aluminium plié.

(Mihalakakou et Bagiorgas, 2013)

Puis le tube précité est pressé à la fois en haut et en bas des surfaces, afin d'obtenir un aspect plat (au lieu de la forme cylindrique), une extrémité du tube est située à un coin de la forme du panneau rectangulaire. Portant un petit ventilateur, durant le fonctionnement entraîne des masses d'air à travers les tubes parallèles. Le ventilateur est relié à l'alimentation électrique par un démarreur a temps pour le fonctionnement nocturne entre 22 heures et 6 heures. L'autre extrémité du tube est adaptée à une ouverture de fenêtre ; l'utilisation de la colle de silicone maintient le puits tubulaire monté sur l'ouverture de fenêtre.

La masse d'air à travers le radiateur perd de la chaleur par convection à la surface métallique ci-dessus, devient plus frais et, enfin, est transférée dans l'intérieur du bâtiment, dans un bureau dans un bâtiment à l'université, entraînée par le ventilateur. Le même dispositif été réalisé mais avec une émissivité plus élevé a fin de décrire et analyser une performance expérimentale d'un radiateur métallique nocturne placer sur le toit et pour comparer les données expérimentales avec celles calculées en utilisant un modèle mathématique qui peut simuler les performances thermiques du radiateur.

Cette procédure a été effectuée pendant une assez longue période d'essai, afin d'obtenir des résultats sûrs. Au cours de ces intervalles de temps, la température à la sortie du radiateur a été surveillée en continu avec un capteur auto-enregistré, placé à la sortie du tube. Afin d'estimer l'effet de refroidissement du radiateur à la peinture la plus efficace, la température intérieure du bureau relié au radiateur a été contrôlée, ainsi que la température d'un bureau voisin, avec les mêmes caractéristiques structurales et de taille sans aucun système de refroidissement en fonctionnement.

La figure (II.16) montre la variation temporelle pour toutes les heures pour des valeurs théoriques et expérimentales de température de l'air à la sortie du radiateur peint avec une peinture d'émissivité 0,71 ; durant la période nocturne (22 heures à 6 heures) comme la figure montre, les valeurs calculées fonctionnent bien avec celles expérimentales pour chaque intervalle de temps de ces 10 jours de démonstration.

La figure (II.17) montre la variation temporelle pour toutes les heures pour des valeurs théoriques et expérimentales de température de l'air à la sortie du radiateur peint avec une peinture d'émissivité 0,93 ; durant la période nocturne (22 heures à 6 heures) comme la figure montre, les valeurs calculées fonctionnent bien avec celles expérimentales pour chaque intervalle de temps de ces 10 jours de démonstration.

Le radiateur avec la peinture de 0,71 d'émissivité est moins efficace dans la réalisation des températures plus basses que le radiateur avec la peinture de 0,93 d'émissivité. Comme cela est représenté sur les figures (II.16) et (II.17). L'analyse montre que l'émissivité du radiateur a une influence significative sur l'efficacité du système.

Ensuite, l'air refroidi par le radiateur nocturne a été transféré comme une ventilation dans un bureau du bâtiment expérimenté afin d'assurer le refroidissement de l'espace. Le radiateur utilisé est celui de la peinture plus efficace (0,93).

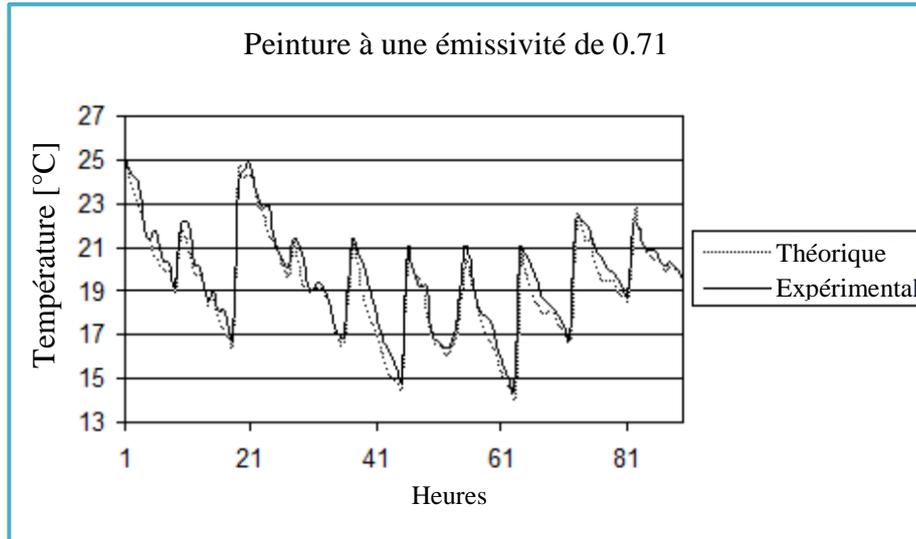


Fig.II.16 : La variation temporelle résultats (expérimentale et théorique) de température de l'air à la sortie du radiateur pendant 10 jours sélectionnés, lorsque le radiateur est peint avec une peinture d'émissivité 0,71. (Mihalakakou et Bagiorgas, 2013)

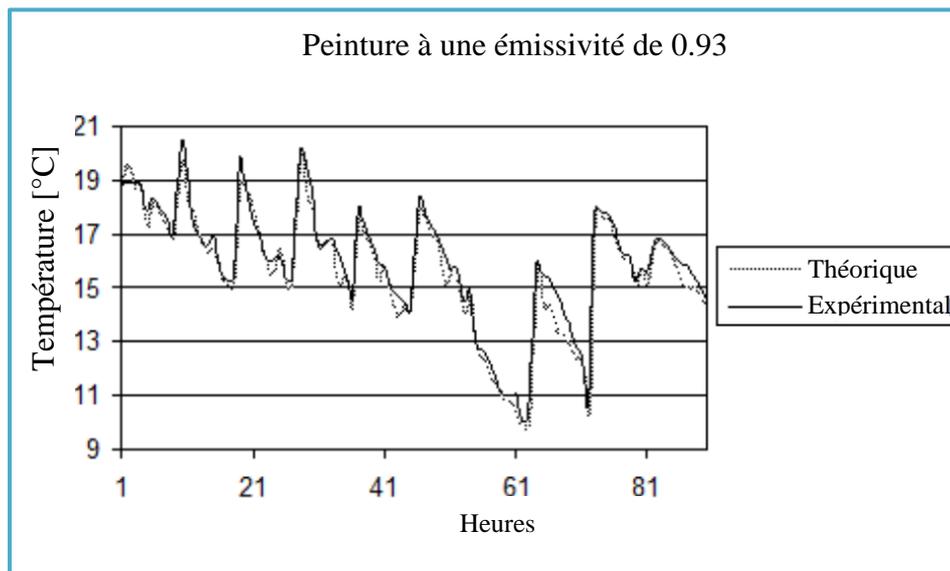


Fig.II.17 : La variation temporelle résultats (expérimentale et théorique) de température de l'air à la sortie du radiateur pendant 10 jours sélectionnés, lorsque le radiateur est peint avec une peinture d'émissivité 0,93. (Mihalakakou et Bagiorgas, 2013)

La température de l'air intérieur à l'intérieur du bureau aéré a été surveillée pendant la période expérimentale sur une base de 24 heures. En outre, la température de l'air intérieur d'un bureau voisin, avec la même orientation, les éléments de construction et les gains internes, a été mesurée sur une base de 24 heures aussi, afin d'estimer la capacité de refroidissement du système. Au cours de la période expérimentale, il n'y avait pas de système de refroidissement fonctionnant dans le deuxième bureau.

La figure (II.18) montre la variation temporelle sur une base de 24 heures ; pour les valeurs de température de l'air intérieur dans les deux chambres, la chambre reliée au radiateur nocturne et qui ne dispose aucun système de refroidissement pendant 5 jours choisis au hasard ; 120 heures (à partir du 15 Septembre à 22h00 au 20 Septembre à 22h00).

Comme la figure (II.18) le montre, la différence de température entre les deux bureaux a fluctué entre 4 °C à la fin des heures nocturnes et 2,5 °C à des heures diurne. Cette différence de température quotidienne est remarquable, malgré le fait que le radiateur ne fonctionne pas et est due à l'inertie thermique du bâtiment. Surtout, pour chaque nuit cette différence prend sa valeur la plus élevée à la dernière observation (à 06h00), lorsque le ventilateur fonctionne toujours et la température extérieure et la température de sortie du radiateur prendre ses valeurs les plus basses.

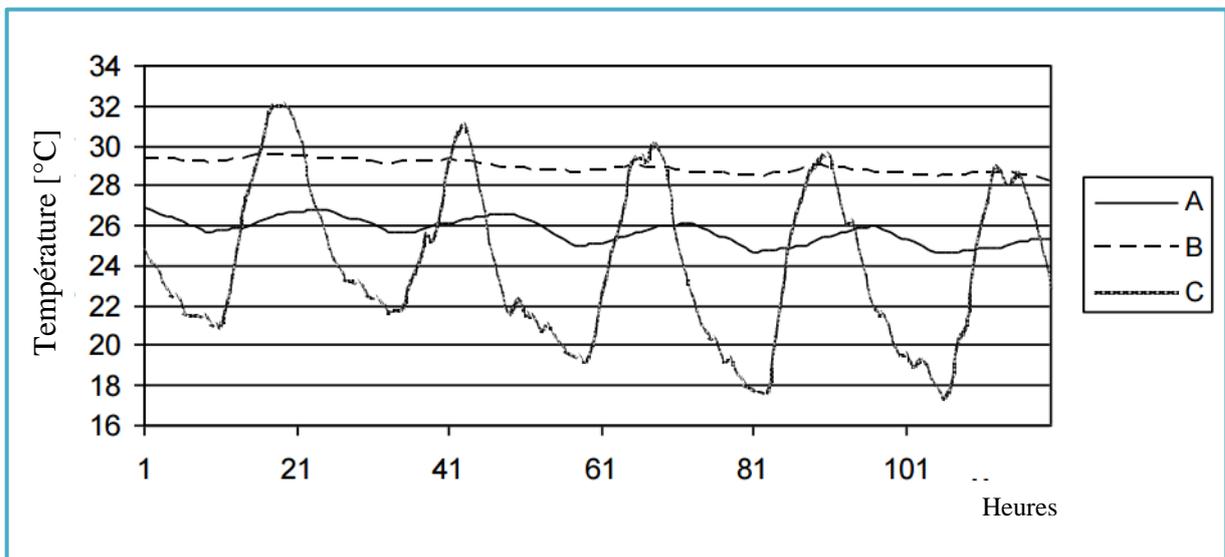


Fig.II.18 : Variation temporelle des valeurs de température de l'air intérieur dans les deux chambres.

A : température de l'air du bureau relié au radiateur nocturne.

B : température de l'air du bureau sans aucun système de refroidissement.

C : température de l'air extérieur.

(Mihalakakou et Bagiorgas, 2013)

Une autre étude menée sur le refroidissement par rayonnement par Ben Cheikh et Bouchair (2008) ; en introduisant sur la toiture un bassin remplie de roche à grande inertie avec une quantité d'eau ; ce bassin est fermé (étanche) par une tôle en aluminium de couleur blanche, sur une méthode expérimental par la réalisation de deux cellules identiques (A) et (B) fabriquées par une structure métallique ont une démentions de $0,70 \times 0,70 \times 0,90 \text{ m}^3$. Les cellules sont élevées de 50 cm sur la terre par des pieds métalliques ; deux ouvertures sont prévues une au nord de $0,30 \times 0,60 \text{ m}^2$ et une au sud de $35 \times 37 \text{ m}^2$ utilisé pour la ventilation nocturne. L'enveloppe des cellules sont isolé par 4 cm de polystyrène sauf la toiture, la toiture de la cellule (A) est équipée de la toiture radio-évaporatoire voir le schéma de la cellule avec système de refroidissement passif dans la figure (II.19).

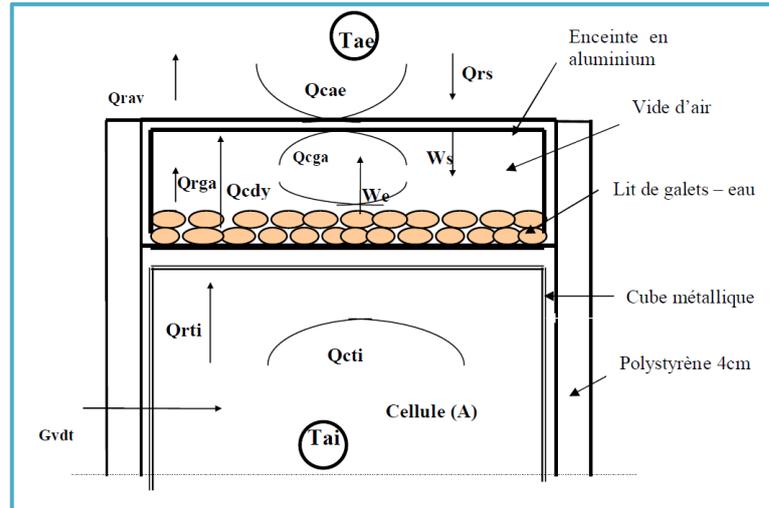


Fig.II.19 : Schéma de la cellule avec la toiture radio-évaporatoire.
(Ben Cheikh et Bouchair, 2008)

La figure (II.20) montre une comparaison des températures de l'air de la cellule (A) avec le système de refroidissement dans le toit et la cellule (B) avec un toit nu (toit conventionnelle) sans ventilation naturelle. On peut voir sur cette figure que le toit radio-évaporatoire peut réduire les températures de l'air de cellule interne au cours de la journée à 10 °C par rapport aux températures de l'air intérieur d'un toit simple.

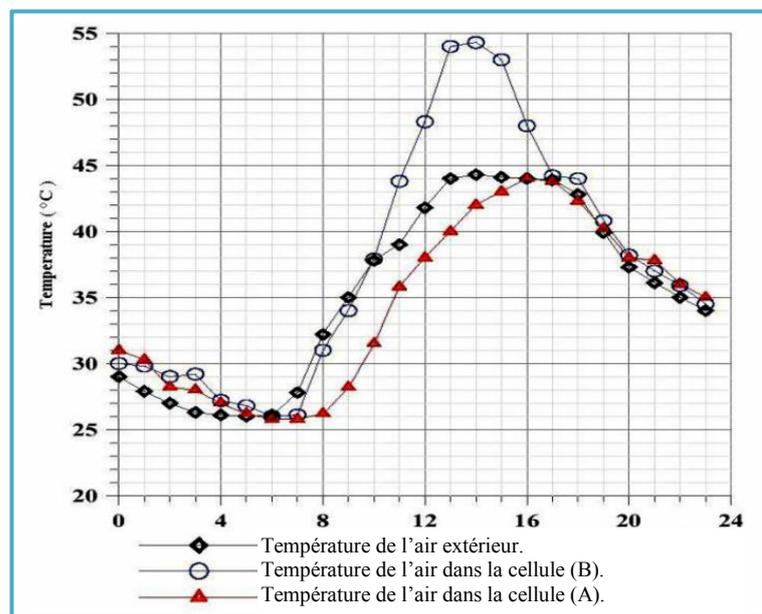


Fig.II.20 : Comparaison entre la température intérieure mesurée dans les cellules (A) et (B).
Sans ventilation naturelle nocturne. (Ben Cheikh et Bouchair, 2008)

La figure (II.21) montre une comparaison des températures de l'air de la pièce avec le système de refroidissement du toit et avec toit nu quand la nuit en chambre ventilation naturelle est autorisée. La ventilation a été autorisée à partir de 20 heures jusqu'à 9 heures, une période où la température de l'air extérieur est relativement faible.

Les résultats ont montré que le refroidissement des bâtiments à l'intérieur peut être amélioré par l'application d'une telle conception de refroidissement. Il a également été observé que la combinaison de toit réfléchissant par évaporation avec ventilation nocturne augmente le refroidissement, de manière plus significative.

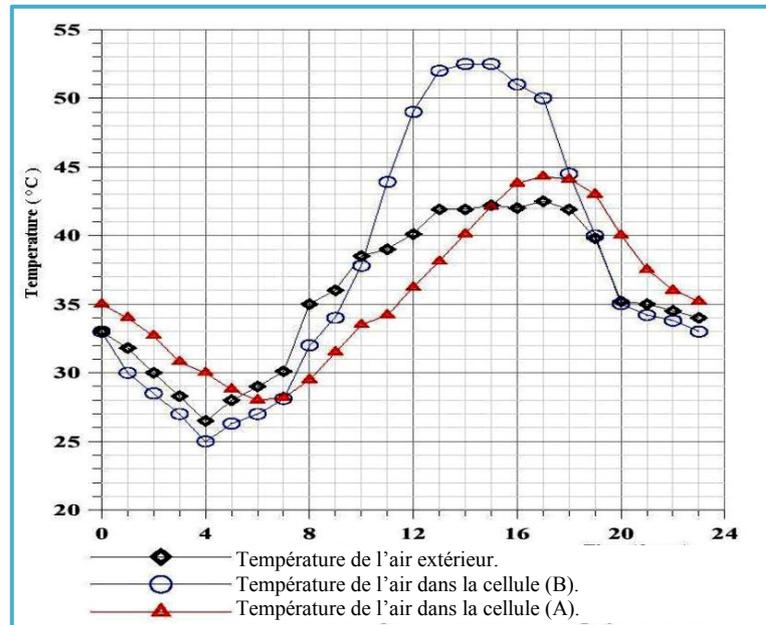


Fig.II.21 : Comparaison entre la température intérieure mesurée dans les cellules (A) et (B). Avec ventilation naturelle nocturne. Ben Cheikh et Bouchair (2008)

c. GEOCOOLING.

Le concept de refroidissement par le sol est basé sur la dissipation de chaleur à partir d'un bâtiment sur le sol, qui, pendant la saison de refroidissement a une température inférieure à l'air extérieur. Cette dissipation peut être réalisée soit par contact direct d'une partie importante de l'enveloppe du bâtiment avec le sol, ou en injectant de l'air qui a déjà été distribué sous terre dans le bâtiment au moyen d'échangeurs de chaleur terre-air.

Un échange de renforcement de la chaleur avec l'environnement par conduction, convection et rayonnement. Pour un bâtiment ordinaire, le mécanisme principal est la convection, puisque la plupart de l'enveloppe du bâtiment est en contact avec l'air ambiant. Vient ensuite le rayonnement et, enfin, la conduction, étant donné que la surface de l'enveloppe du bâtiment en contact avec le sol est la plus petite. Le principe de la terre de refroidissement par contact direct est d'augmenter l'échange de chaleur par conduction. La température du bâtiment diminue, parce que le sol est à une température inférieure à l'air pendant la période de refroidissement.

Refroidissement en été et chauffage en hiver sont semblables. En effet, l'extraction de froid du sol en été ; le sol se réchauffe progressivement. Si cette opération se répète d'année en année sans arrêt ou perturbation, la température moyenne du sol augmente ou son utilisation devient presque non exploitable. Ce phénomène doit être évité par régénérer (rétablir) le sol chaque hiver en extrayant la chaleur accumulée en été par inversement du système ou le sol devient une source de chaleur stable et élevée par rapport la température extérieure.

Plus on descend dans les profondeurs de la terre, plus il y a de chaleur. En Allemagne, la température augmente en moyenne de trois degrés (Kelvin) par 100 m. On appelle gradient géothermique l'augmentation de température constatée par tranche de profondeur de forage. Il s'exprime en mK par m. Ce gradient est dû au flux de chaleur remontant des profondeurs vers la surface de la terre. La température des premiers mètres sous la surface du sol est aussi influencée par le rayonnement solaire et les précipitations.

En fonction de la profondeur de forage, on distingue la géothermie profonde (> 400 m) et la géothermie de surface (< 400 m) : (renewables – Made in Germany)

- Géothermie profonde : Grâce à la géothermie profonde, on peut à la fois produire de l'électricité en centrale et de la chaleur dans des réseaux de chaleur plus vastes pour la production industrielle ou l'approvisionnement en chaleur des bâtiments. Par rapport aux autres énergies renouvelables, la géothermie profonde présente l'avantage de ne pas être soumise aux variations saisonnières ou journalières, et est donc à disposition en permanence.

- Géothermie de surface : la géothermie de surface utilise des forages jusqu'à environ 400 m de profondeur et des températures allant jusqu'à 25 °C pour chauffer et refroidir les bâtiments, les installations techniques ou les infrastructures ainsi que pour produire de l'eau chaude. Il est possible de l'utiliser dans de nombreuses régions à travers le monde et elle convient particulièrement pour les habitats individuels et collectifs, les immeubles, les établissements publics, les administrations, les hôpitaux, les écoles...ex. L'énergie présente dans ces couches repose sur la chaleur irradiée par le soleil et sur le flux de chaleur circulant de l'intérieur vers la surface de la terre. Jusqu'à une profondeur d'environ 20 m (40 m maximum en fonction des particularités géologiques), la température des couches terrestres supérieures est soumise aux variations saisonnières. À des profondeurs plus importantes, la température n'est plus tributaire des fluctuations des températures saisonnières de l'air extérieur. La température annuelle moyenne correspondante est différente en fonction du site de production.

- Exploitation thermique des gisements : pour exploiter les gisements géothermiques, on utilise généralement des sondes et collecteurs géothermiques ou des pieux énergétiques : (renewables – Made in Germany)

- Pieux énergétiques : Il s'agit de pieux en béton atteignant de grandes profondeurs, de parois moulées ou autres éléments en béton avec tubes en plastique installés dans le sous-sol qui sont nécessaires pour l'équilibre statique. L'eau sert d'agent principal pour exploiter la chaleur géothermique. L'eau froide se réchauffe dans les pieux en béton par action géothermique. L'eau chaude réchauffe le bâtiment par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur. En été, les sondes, les collecteurs géothermiques ainsi que les pieux énergétiques peuvent aussi être utilisés pour un rafraîchissement. voir figure (II.22).
- Sondes géothermiques : Les sondes géothermiques sont utilisées à 50 – 250 m de profondeur. Elles sont largement répandues en Europe centrale et septentrionale. Elles ne nécessitent que peu de surface et utilisent un niveau de température constant. Les sondes sont le plus souvent utilisées comme forages verticaux où sont installés les tuyaux en plastique (PEHD). À l'intérieur circule un fluide caloporteur qui absorbe la chaleur du sol environnant et la transmet à la pompe à chaleur. C'est cette technique qui permet de fournir en chaleur ou en froid des installations de différentes tailles, des petites unités d'habitation à des zones résidentielles complètes en passant par des complexes de bureaux. voir figure (II.22).
- Collecteurs géothermiques (nappe) : Des collecteurs géothermiques sont posés à l'horizontale à une profondeur de 80 à 160 cm et sont fortement soumis, d'un point de vue thermique, aux influences atmosphériques prédominantes à la surface. Pour une maison individuelle, le besoin en surface est d'environ 200 – 250 m². Le caloporteur circulant par la boucle tubulaire transporte l'énergie extraite de la terre jusqu'à la pompe à chaleur. Les collecteurs géothermiques sont plus abordables que les sondes, mais offrent un moins bon rendement en raison de leur plus faible profondeur. voir figure (II.22).



Fig.II.22 : types d'échangeur géothermique : les pieux, les sondes et les nappes.

(<http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18273>) 19 avril 2015

○ Eau souterraine : La nappe phréatique peut également fournir de la chaleur dans certaines conditions bien précises. En Allemagne et en fonction de la région, de la profondeur et de la saison, la température de la nappe phréatique oscille entre 7 et 14 °C. Entre 20 et 30 m, elle est à une température constante qui avoisine les 10 °C. C'est ainsi que, même en cas d'hiver rude, la nappe phréatique fournit suffisamment de chaleur pour réchauffer une maison. Pour l'exploiter, on a besoin de deux puits. Dans le puits de production, l'eau souterraine est transportée vers la surface. Là, elle cède une partie de sa chaleur à un échangeur thermique. L'eau souterraine refroidie retourne ensuite dans la terre via le puits de réinjection, où elle est à nouveau réchauffée. Des systèmes alternatifs fonctionnent avec un seul puits. L'eau souterraine est alors renvoyée dans une couche qui est située plus haut que celle dans laquelle elle a été extraite. Cela peut être utilisé pour le refroidissement dans les pays à climat chaud.

○ Exploitation de la géothermie de surface et de l'air ambiant au moyen de pompes à chaleur : les pompes à chaleur, associées aux pieux énergétiques, collecteurs géothermiques, sondes géothermiques ou autres éléments de construction en béton en contact avec la terre, permettent l'exploitation géothermique des couches de surface. Une pompe à chaleur a besoin d'électricité – rarement de gaz – comme énergie motrice. Le rendement des systèmes à pompe à chaleur résulte du rapport entre la température exploitable du gisement et la température de départ nécessaire du système de chauffage. Une évaluation énergétique préalable n'est donc pas inutile. Configurée de manière optimale, une pompe à chaleur peut améliorer l'atmosphère d'une pièce et réduire les coûts énergétiques pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Les coûts annuels peuvent en général baisser d'environ 50 % par rapport énergie fossile.

Une pompe à chaleur est une machine dont le but est de valoriser la chaleur gratuite présente dans l'environnement : celle présente dans l'air extérieur, les rivières, le sol. En effet, tout corps, même "froid" contient une quantité importante d'énergie qui peut être récupérée. Pratiquement, grâce à un fluide décrivant un cycle thermodynamique, la pompe à chaleur retire de la chaleur à une source dite "froide" et la rejette dans une source dite "chaude". Ce transfert fait appel à un processus forcé, puisque chacun sait que la chaleur se déplace de façon naturelle d'une zone chaude vers une zone froide. C'est pourquoi, la pompe à chaleur doit être entraînée par un compresseur qui lui amènera l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

○ Puits canadien : l'utilisation de la terre comme un dissipateur de chaleur ou d'une source d'air de refroidissement ou chauffage dans des tuyaux enterrés ou les tunnels souterrains a été un témoignage de l'architecture islamique et persane. L'air passant à travers un tunnel ou un tuyau enterré à une profondeur de quelques mètres se refroidit en été et chauffée en hiver. (Ce système est exploité dans les chapitres suivants). Les paramètres tels

que la surface des tubes, la longueur et la profondeur du puits au sous-sol, l'humidité de la terre, l'humidité de la vitesse d'entrée d'air, la nature de surface du sol ; affectent l'échange de chaleur entre l'air et le sol environnant. Selon Moumami et al (2010) sur une étude expérimentale dans la région de Biskra en Algérie a un climat chaud et aride d'un puits canadien (puits climatique) d'une longueur de 60m avec un diamètre de 110mm et une profondeur de 3m ; le puits a une forme d'un serpentín sur un espacement de 2 m entre axe. Les tests sont effectués le 28 juin 2009. selon la figure (II.23) écart entre l'air dans le puits et de l'air extérieure diminue progressivement jusqu'à ce que la température de l'air tende vers la température du sol. Pour une longueur de 35m et plus le puits donne 10°C de gain de température de rafraîchissement par rapport à la température extérieure durant la saison estivale.

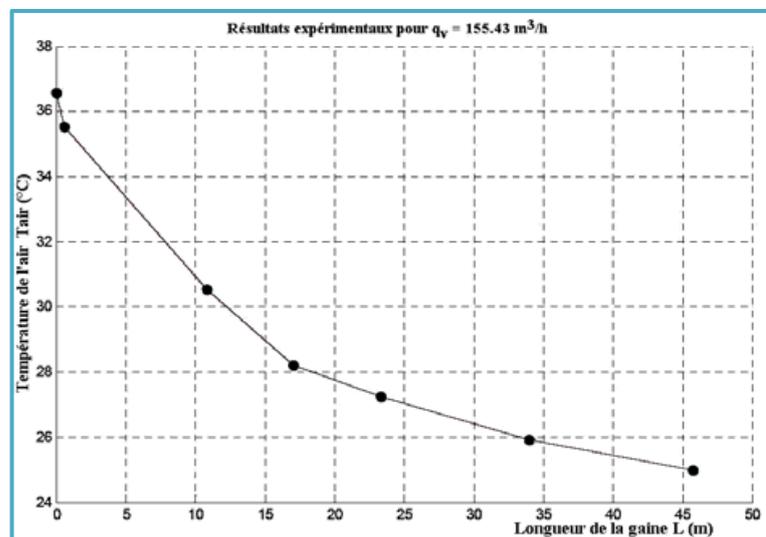


Fig.II.23 : Variation de la température de l'air en fonction de la longueur de l'échangeur. (Moumami et al, 2010)

d. LES PRINCIPES DE REFROIDISSEMENT COMBINÉS.

Au cours des dernières années, afin d'obtenir un rendement plus élevé en refroidissement, le dessus desdits principes de refroidissement ont été combinés en un seul système et leurs performances ont été étudiés par plusieurs chercheurs. Certaines études récentes menées sont présentés dans cette section.

Khalajzadeh et al (2012) ont développé un système de refroidissement hybride est constitué d'un échangeur thermique couplé à la terre. Quatre sondes reliées entre elles ; elles ont la forme U à une profondeur de 45m, qui est intégré à un système de refroidissement par évaporation indirecte. Le fluide passe par l'échangeur thermique couplé à la terre qui rejette sa chaleur au sol environnant. Voir la figure (II.24).

Lorsque le fluide circulant quitte l'échangeur thermique couplé à la terre ; il devient plus frais et pénètre dans l'unité de serpentín de refroidissement. D'un autre côté, l'air ambiant pénètre à l'unité de serpentín de refroidissement et transfère sa chaleur à l'eau froide circulant.

L'air refroidit pénètre ensuite dans le système de refroidissement par évaporation indirecte et enfin, après le processus d'évaporation, il se refroidit et quitte le système de refroidissement par évaporation indirecte.

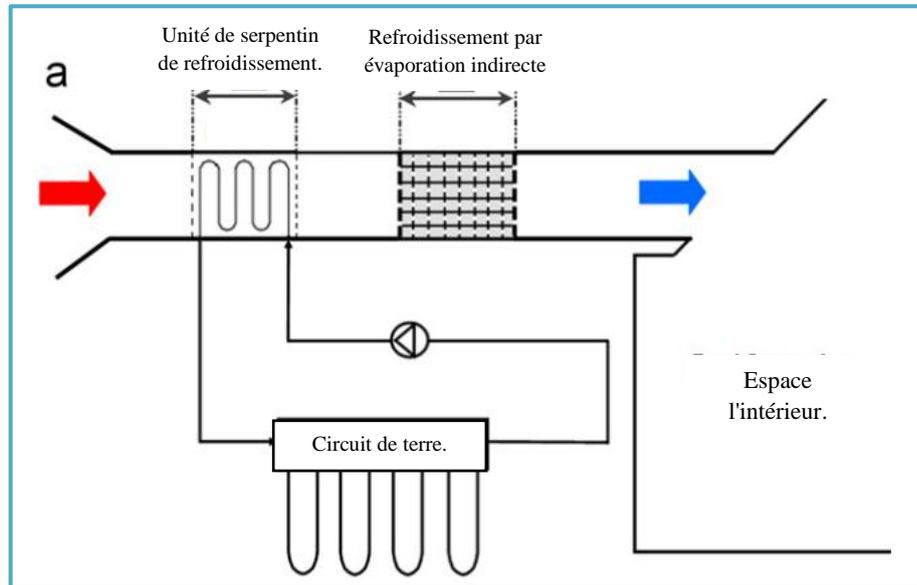


Fig.II.24 : Système de refroidissement intégrant le puits canadien avec le rafraîchissement par évaporation indirecte. (Khalajzadeh et al, 2012)

Un système de refroidissement par évaporation indirecte est constitué de deux passages d'air séparés imperméables; des passages d'air primaire et secondaire, qui sont secs et humides, respectivement voir figure (II.25).

Il est à noter que la largeur et la hauteur des passages sont égales aux dimensions du serpentin de refroidissement. En d'autres termes, l'air passe à travers le même canal.

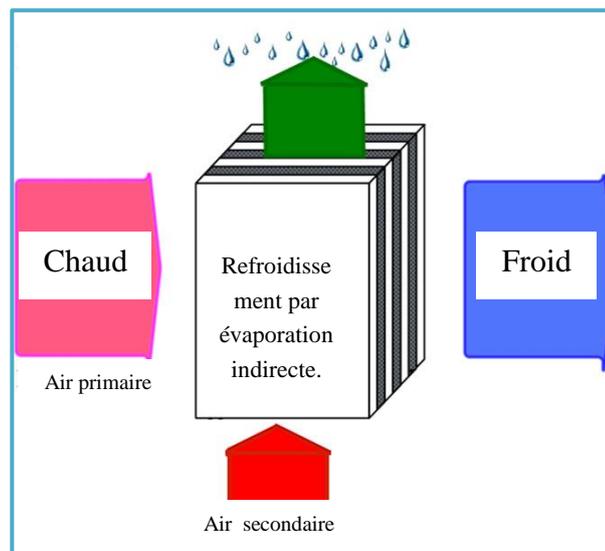


Fig.II.25 : diagramme schématique du système pour refroidissement par évaporation indirecte. (Khalajzadeh et al, 2012)

Comme il est représenté sur la Figure (II.26), la différence entre la température de l'air ambiant entre l'entrée et la sortie de l'unité de serpentin de refroidissement est d'environ 8 à 11 °C. Ainsi, l'air ambiant est entré au système de refroidissement par évaporation indirecte avec une température humide inférieure. Ce processus, pré-refroidissement permet à l'unité de système de refroidissement par évaporation indirecte d'avoir une performance supérieure.

La figure (II.27) le dernier point de la figure. II.26 est représenté sur le graphique psychrométrique. Sur la base de la Fig. (II.27) le système hybride proposé est en effet en mesure de fournir les conditions de confort.

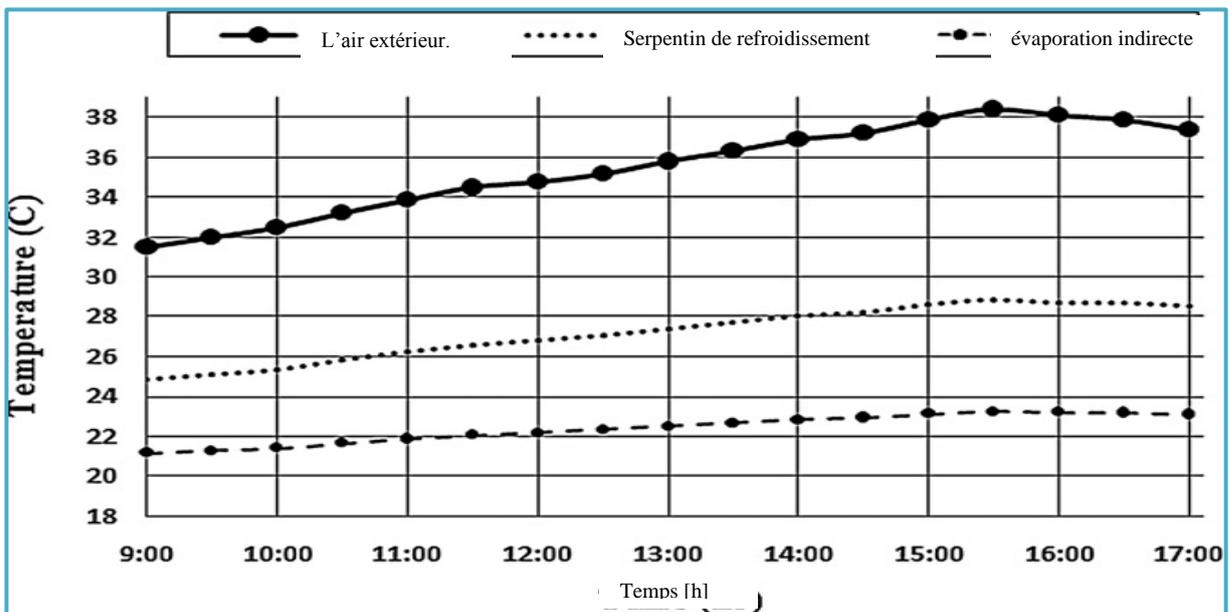


Fig.II.26 : Température de l'air à la sortie de chaque section sou condition de Téhéran.

(Khalajzadeh et al, 2012)

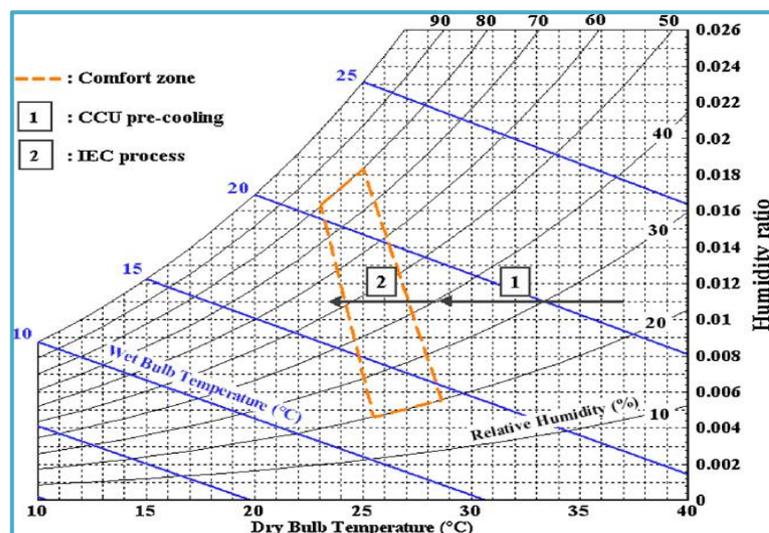


Fig.II.27 : Le processus de refroidissement sur un diagramme psychrométrique.

(Khalajzadeh et al, 2012)

Farmahini-Farahani et al (2010): ont développé un système qui combine le refroidissement radiatif nocturne avec le refroidissement par évaporation indirecte ; voir la figure (II.28) qui montre, le système à deux étapes se compose de quatre parties: radiateurs, un réservoir de stockage, une unité de serpentin de refroidissement, et une unité de refroidissement par évaporation indirecte. En raison du faible débit de masse pendant la nuit (pour le refroidissement radiatif) les couches de température de l'eau sont stratifiées dans le réservoir. Afin de rendre le processus de refroidissement plus efficace, au cours de la nuit. L'eau sort de la partie supérieure du réservoir ou il est chaud et entre par la partie inférieure du réservoir ou il est le plus froid ; ça c'est pour le refroidissement radiatif. Pour l'unité de serpentin de refroidissement, l'eau sort de la partie inférieure ou il est plus froid et entre par la partie supérieure ou il est plus chaud.

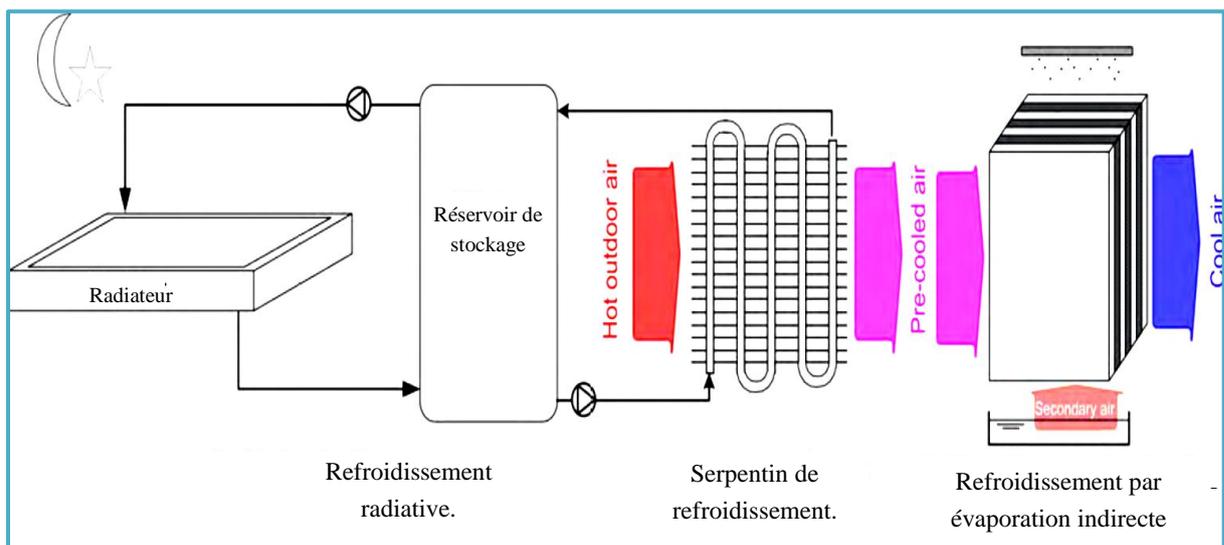


Fig.II.28 : Un diagramme schématique du système a deux étapes de refroidissement radiatif, Serpentin de refroidissement et un refroidisseur par évaporation indirecte. (Farmahini-Farahani et al, 2010)

Le débit d'air pré-rafraîchi dans l'unité de serpentin de refroidissement est le même pour le refroidissement par évaporation indirect. Le débit massique de l'air secondaire dépend de ses sources ; ou trois sources d'approvisionnement en air secondaire sont évaluées: l'air extérieur (modèle A), l'air sortant du serpentin de refroidissement (modèle B), et l'air sortant de la scène indirecte (modèle C). Le modèle C est également connu comme un cycle de régénération. La figure (II.29) montre la structure schématique des trois modèles.

La première partie du système est le refroidissement radiatif nocturne qui fournit de l'eau froide pour l'unité de serpentin de refroidissement. L'eau froide, qui est obtenu et enregistré au cours de la nuit est utilisée pendant les huit heures de lendemain, de l'eau glacée dans l'unité de serpentin de refroidissement pour réduire la température de l'air extérieur. Ces huit heures sont les heures de bureau habituelles 09:00-17h00. Voir la Figure (II.30) qui représente la température de sortie de l'unité de serpentin de refroidissement et les trois modèles de l'air secondaire pour les conditions de Téhéran.

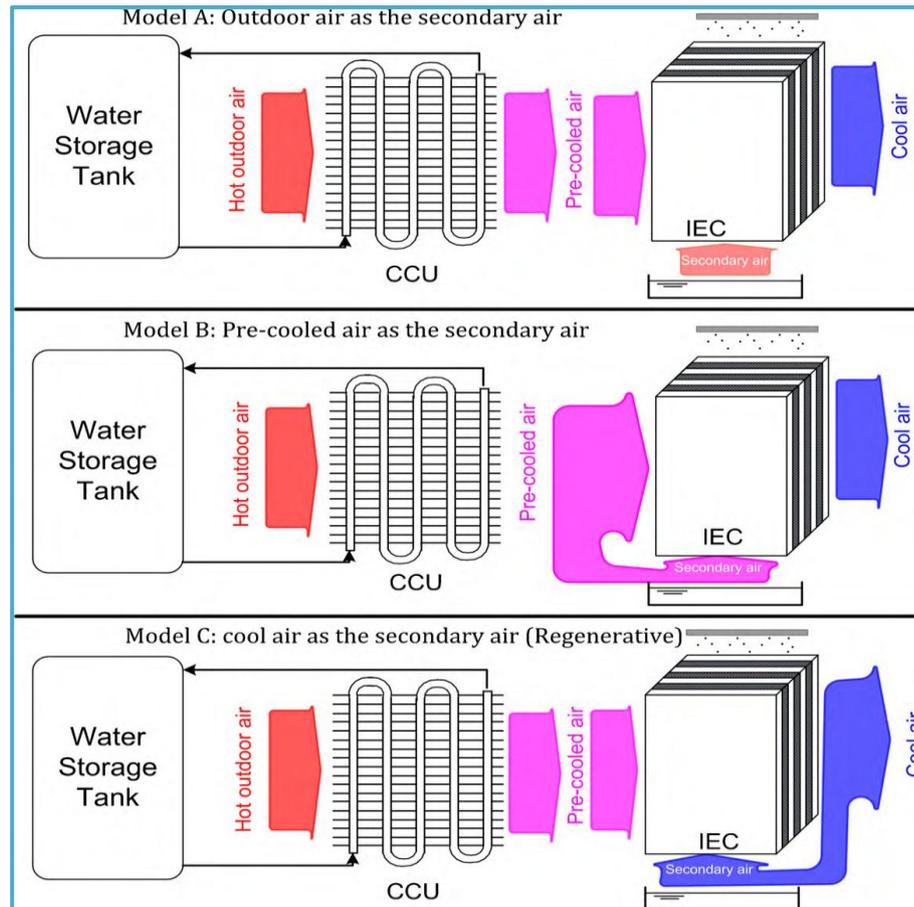


Fig.II.29 : Structures schématiques pour les trois sources qui fournissent de l'air secondaire.
(Farmahini-Farahani et al, 2010)

La figure (II.30) montre que l'air extérieur chaud est pré-refroidi au moyen de l'unité de serpentin de refroidissement et ensuite, l'air pré-refroidi circule à travers les passages de refroidisseur par évaporation indirect. La différence de température moyenne de l'air entrant et quittant l'unité de serpentin de refroidissement est 8.26 °C. Grâce au processus de refroidissement par évaporation indirecte, l'humidité spécifique de l'air est constante, mais sa température sensible baisse. Pour les conditions à Téhéran, la différence de température moyenne pour l'air entrant et en laissant le refroidissement par évaporation indirect pour le modèle A, le modèle B et modèle C sont 4,38 °C, 6,46 °C et 8,3 °C, respectivement. Comme on le voit sur la Figure (II.30), la température de l'air diminue plus dans le modèle C que les autres modèles. En raison de l'augmentation de la température de l'air extérieur et de l'eau dans le réservoir de stockage, la température de l'air soufflé augmente, mais reste encore satisfait aux conditions de confort. La figure (II.31) illustre quatre derniers points de la figure (II.30) sur le graphique psychrométrique.

Comme on le voit sur la figure (II.31), le système à deux étapes peut répondre à la condition de confort pour des conditions climatiques de Téhéran. Profitant du ciel comme une source renouvelable de refroidissement passif, le système de refroidissement hybride peut être considéré comme un système respectueux de l'environnement et économe en énergie.

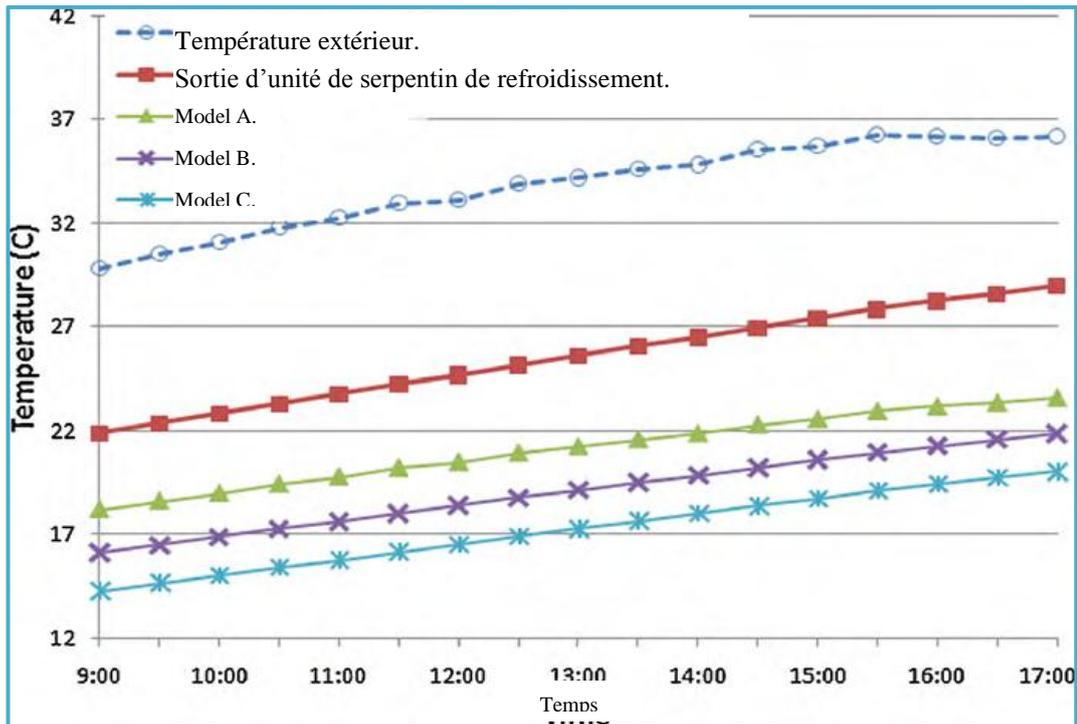


Fig.II.30 : les différentes températures ; au pré-rafraîchissement de l'air dans l'unité de serpentin et après le refroidissement pour les trois modèles de l'air secondaire A, B et C. (Farmahini-Farahani et al, 2010)

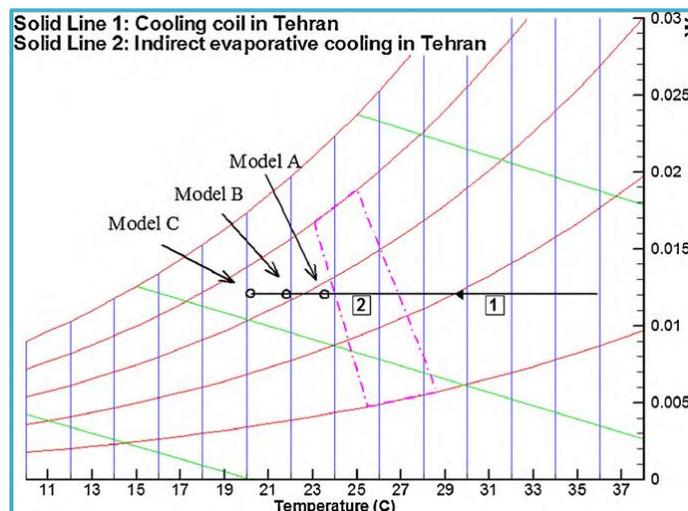


Fig.II.31 : Le processus de refroidissement à deux étages sur un tableau psychrométrique pour les conditions de Téhéran. (Farmahini-Farahani et al, 2010)

Maerefat et Haghghi (2010) ont étudié un système passif de refroidissement (cheminée solaire avec puits canadien) pour évacuer la chaleur intérieure indésirable d'un bâtiment dans les saisons chaudes. Il a constaté qu'il est possible d'utiliser la cheminée solaire pour alimenter le système de refroidissement de puits climatique au cours de la journée, sans qu'il soit nécessaire de l'électricité. En outre, ce système avec une bonne conception peut également fournir un environnement intérieur thermiquement confortable pour un grand nombre d'heures pendant les jours d'été torride. Voir figure (II.32).

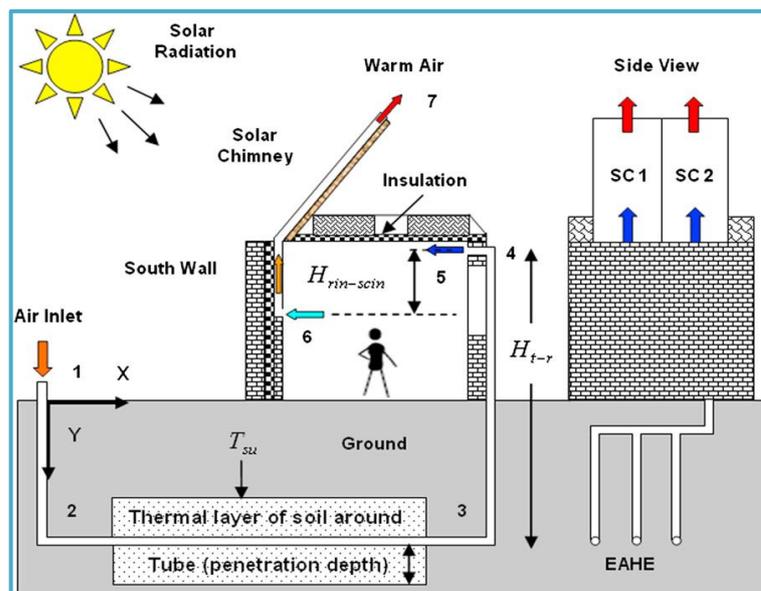


Fig.II.32 : Schéma de puits climatique intégré à la cheminée solaire.
(Maerefat et Haghighi, 2010)

II.5. CONCLUSION.

Les systèmes de refroidissement passif ont montré leur performance dans le rafraîchissement des bâtiments par des manières naturelles comme l'air extérieur, le ciel, l'eau, le sol, qu'ils sont le moteur générateur de froid qui peuvent être utilisés dans plusieurs systèmes ou ces systèmes sont basés sur des principes et groupés sous trois grandes familles : **la réduction des gains de chaleur, la modération thermique et la dissipation de chaleur.** Les différentes méthodes adoptées pour chacun de ceux-ci, sont classifiées et données à la Figure. (II.33).

L'application de ces systèmes dans le bâtiment dépend de sa conception, son type, la source du froid et le climat extérieur.

Pour le rafraîchissement par ventilation naturelle dans un climat chaud et aride n'est pas permanente (la température extérieure diminue seulement durant la nuit et dans les périodes de canicule la température MIN dépasse les 20°C) qui pousse à l'utilisation de la masse thermique pour le stockage de froid ; cette technique ne permet pas de rafraîchir l'espace intérieur durant la journée.

Le refroidissement par évaporation que ce soit directe ou indirecte ou à point de rosé son inconvénient est la grande consommation d'eau. Dans les zones chaudes et arides l'eau est précieuse et rare ; sans oublier l'utilisation du courant électrique essentielle pour le fonctionnement du système de refroidissement par évaporation.

Le refroidissement par radiation dépend de l'état du ciel durant la nuit qui nécessite une grande surface du toit (pour l'échange radiative avec la voute céleste) et qui est employé seulement durant la nuit ou ce rafraîchissement soit stocker pour être utilisé durant la période chaude de la journée ; généralement le refroidissement radiative est utilisé dans des bâtiments à faible hauteur.

Le geocooling a des performances dans le rafraîchissement du bâtiment l'utilisation de l'inertie du sol directe comme la maison troglodyte ou indirecte par le passage de l'air extérieur dans un conduit avant d'être soufflé dans le bâtiment, ce type de système permet de pre-rafraichir l'air extérieur et de renouvelé l'air durant la journée mais il dépend d'une installation couteuse et une grande surface du sol (pour un ancien bâtiment) avec l'utilisation des ventilateur pour extraire l'air refroidi dans les conduits.

Afin d'attendre une grande efficacité énergétique et en matière de refroidissement la combinaison des principes de refroidissement dans un seul système pousse a valorisé l'inertie du sol par un puits climatique et la ventilation par convection par une cheminée solaire dans un seul système ou le Sahara algérienne est riche en matière de géothermie et un gisement solaire important qui reste rarement exploité.

Le chapitre suivant permettre le développement l'état de l'art des connaissances sur le puits climatique et la cheminée solaire (système ; méthodes de recherche, utilisation et paramètres influant le rendement et résultat .

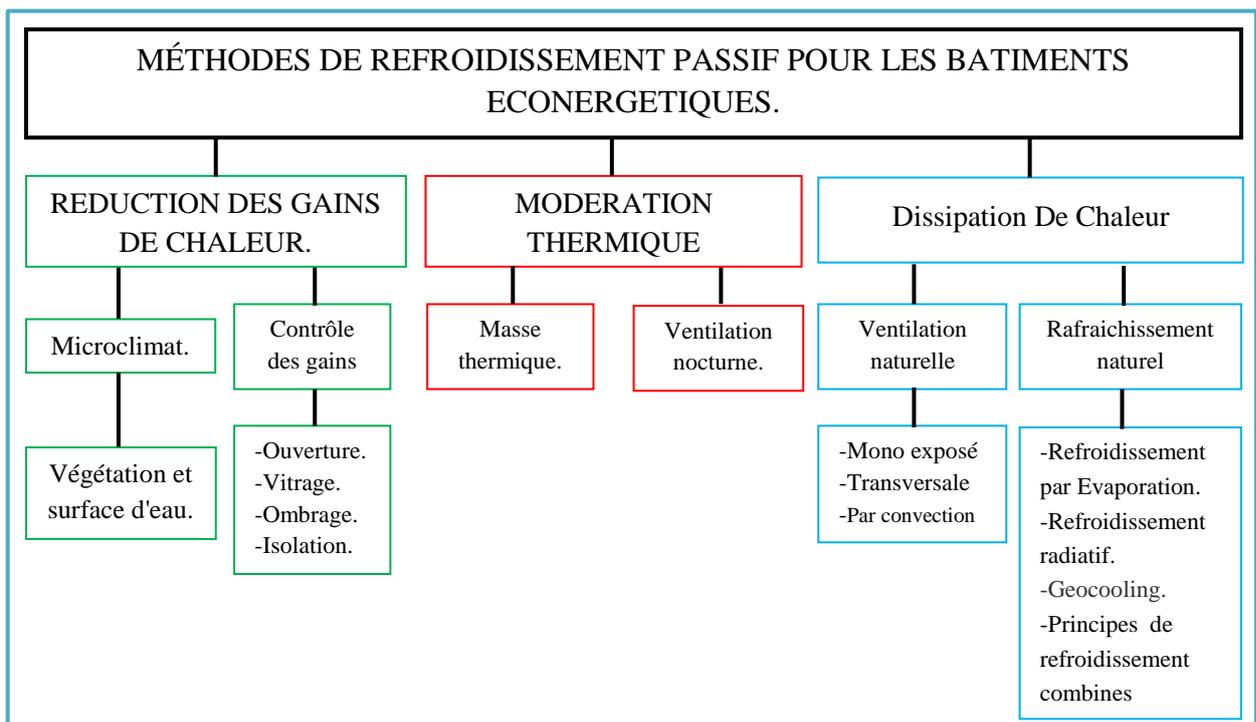


Fig.II.33 : Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments.

Chapitre III .

Analyse bibliographique et
synthèse des connaissances
de puits climatique couplés
à la cheminée solaire.

I. LE PUIT CLIMATIQUE .

En fonction des conditions atmosphériques, du jour et de la saison, l'air extérieur subit de fortes variations de température. À l'opposé, le sol, à quelques mètres sous sa surface, présente une température peu variable en raison de sa grande inertie thermique. Donc L'objectif du puits climatique est de réduire les besoins de chauffage en hiver et du refroidissement en été. C'est un système géothermique dit de surface qui consiste à utiliser l'inertie thermique du sol pour prétraiter une partie de l'air neuf de renouvellement des bâtiments. Il suffit d'enterrer un ou plusieurs tuyaux sur un trajet suffisamment long et d'y faire circuler l'air de renouvellement. L'air extérieur transite dans ce réseau de gaines par convection forcée, se réchauffe en hiver ou se refroidit en été, avant d'être soufflé dans le bâtiment. (Thiers, 2008)

I.1. LES PRINCIPAUX ELEMENTS D'UN PUIT CLIMATIQUE .

Un puits climatique comporte ces différents éléments; voir figure (III.1) : Entrée d'air neuf, conduit, by-pass, système d'évacuation des condensats, le ventilateur et le système de régulation du puits. (Herzog, 2010)

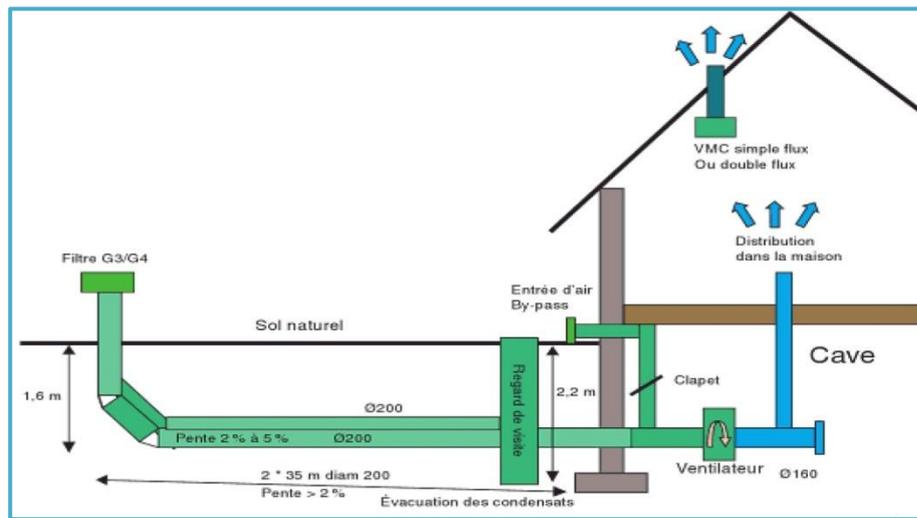


Fig. III.1 : schéma de principe d'un puits climatique. (Herzog, 2010)

I.1.1. BOUCHE D'ASPIRATION DE L'AIR .

Pourvue d'un chapeau et d'ailettes empêchant l'eau de pluie de pénétrer dans le puits. La prise d'air est généralement placée légèrement en hauteur de manière à ne pas capter trop de poussières ou insectes Avec une grille fine et un filtre (10 microns). Elle est fixée dans le sol par socle béton. La surface du filtre doit être suffisante afin de minimisée les pertes de charge ; voir la figure (III.2) qui représente un schéma d'installation de la bouche d'aspiration. (Loyau, F)

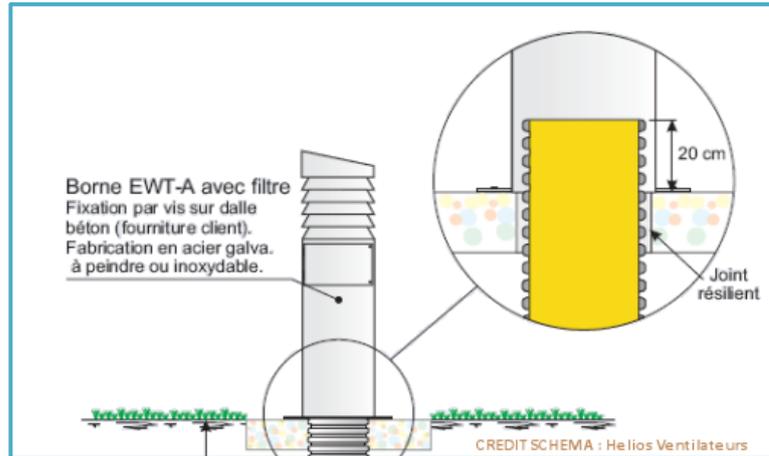


Fig. III.2 : schéma d'installation d'une bouche d'aspiration de l'air pour le puits climatique. (Loyau, F)

I.1.2. CONDUIT.

Un ou plusieurs tuyaux de qualité alimentaire pour le passage de l'air, pour permettre les échanges thermiques entre l'air et le sol et assurer la tenue mécanique de la cavité avec une pente supérieure à 2%, afin d'éviter les risques de moisissure, d'humidité résiduelle et l'évacuation des condensant. Le conduit est principalement caractérisé par ses démentions (diamètre, longueur, épaisseur) et le matériau (la conductivité thermique). Il existe trois manières d'installation des conduits (sous le bâtiment, dans les fouilles du bâtiment et dans le terrain) ; voir figure (III.3). Techniquement, ces variantes sont équivalentes, la différence se situe au niveau des coûts de terrassement, la deuxième variante étant la plus intéressante financièrement, aucun terrassement supplémentaire. (Herzog, 2010)

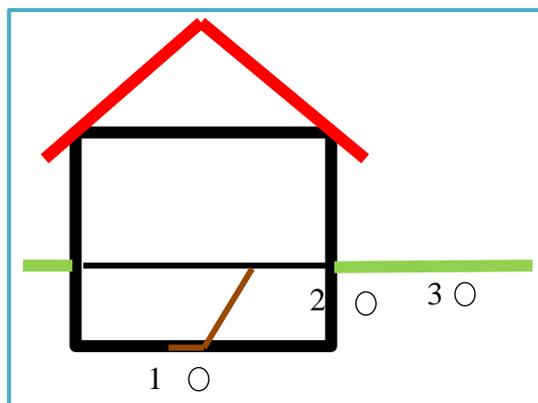
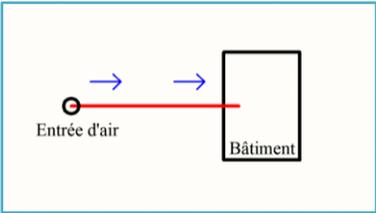
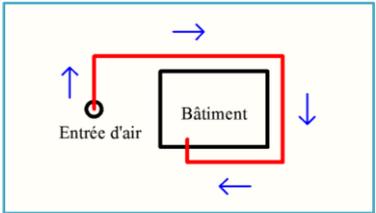
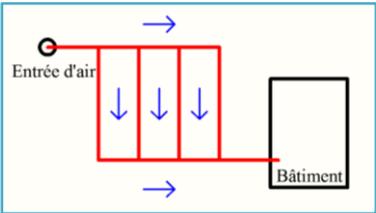
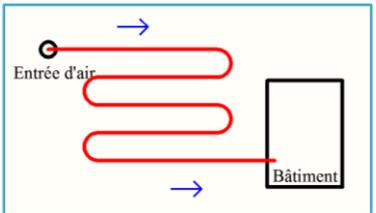


Fig. III.3 : les manières d'installation. (Herzog, 2010)

Il existe plusieurs types de disposition du ou des conduits selon les besoins et surtout les contraintes de mise en œuvre (surface disponible, tranchées existantes et nature du sol). Résumé dans le tableau (III.1).

Tableau III.1 : Dispositions des tubes, avantages et inconvénients. (CETIAT, 2008)

Configuration	Avantages	Inconvénients
 <p>dispose en linéaire.</p>	<p>Perte de charge réduite. Montage et maintenance facile.</p>	<p>Dépense un terrain spacieux.</p>
 <p>dispose en boucle.</p>	<p>Considération quand la place manque autour de la maison.</p>	<p>Influence thermique de bâtiment sur l'efficacité de système.</p>
 <p>dispose en rangées.</p>	<p>Surface d'échange Importante.</p>	<p>Perte de charge Considérable.</p>
 <p>dispose en méandres.</p>	<p>La plus importante surface d'échange.</p>	<p>Perte de charge considérable.</p>

I.1.3. SYSTEME D'EVACUATION DES CONDENSATS .

La vapeur d'eau contenue dans l'air qui circule dans le conduit enterré peut se condenser en fines gouttelettes lorsque celui-ci est en contact avec les parois intérieures froides du puits. La stagnation de cette eau de condensation au sein du puits favorise le développement de bactéries, peut perturber la circulation et altérer la qualité de l'air neuf dans le puits. Afin d'éviter ces phénomènes, les conduits sont inclinés, qui doit être impérativement muni d'un système d'évacuation des condensats. (Loyau, F)

La structure de ce système dépend de la présence ou non d'un sous-sol, représenté dans la figure (III.4).

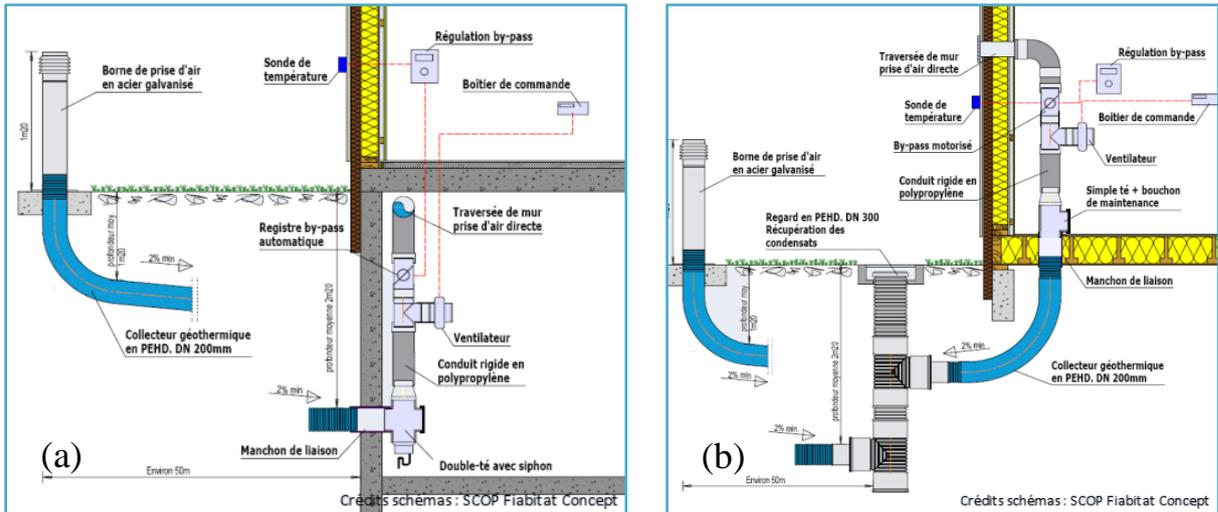


Fig. III.4 : système pour évacuation du condensat (Loyau, F) ;

- a- : Système puits canadien avec siphon pour récupération des condensats pour la présence du sous-sol ou un vide sanitaire dans le bâtiment.
- b- : Système puits canadien avec regard pour récupération des condensats cas d'absence de niveau du sous-sol.

I.1.4. LE BY-PASS

C'est un mécanisme relié au puits canadien disposant d'une prise d'air directe à l'extérieur, afin de délivrer la température d'air la plus adéquate selon la période de l'année. Il choisit de façon automatique entre l'air extérieur et l'air du puits canadien en fonction de la température extérieure (entre 18-24°C). En été, le by-pass optera pour la température la plus fraîche et en hiver, pour la température la plus chaude. Il est en général piloté par un servomoteur couplé à un thermostat posé à l'extérieur du bâtiment. Le flux d'air doit être maintenu tout l'année dans un puits climatique pour éviter le développement des odeurs, des bactéries ou de champignons. En ouvrant un clapet avec un conduit donnant directement sur l'air extérieur, une majeure partie de l'air passera par ce chemin (by-pass), car la perte de charge y sera largement inférieure à celle des conduits du puits il subsistera tout de même un léger flux d'air permettant de maintenir le puits en fonction toute l'année (Herzog, 2010) ; le principe et mentionné dans la figure (III.5).

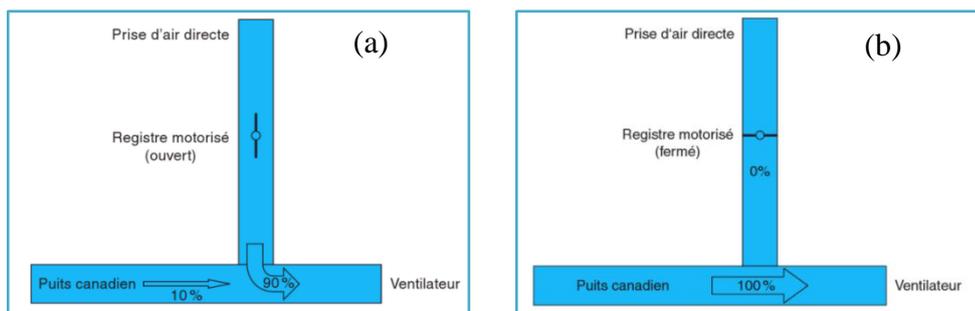


Fig. III.5 : schéma de fonctionnement du by-pass (Herzog, 2010) :

- a : by-pass ouvert : 90% de l'air passe par la prise d'air directe.
- b : by-pass fermé : 100% de l'air passe par le puits climatique.

I.1.5. CONNEXION DU PUITTS AU SYSTEME DE VENTILATION.

Le fonctionnement du puits climatique doit être maintenu grâce à un ventilateur qui garantit le flux d'air traité et les pertes de charges de l'installation ou la simple mise en dépression dans un bâtiment qui n'affirme pas un bon écoulement d'air dans un puits climatique particulièrement dans la saison estivale où l'air est plus frais donc plus lourd que l'air extérieur qui devient plus difficile à extraire, par contre la combinaison entre un puits climatique et le VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée, simple ou double flux) en fonctionnant à un débit légèrement inférieur à celui du puits qui assure l'optimisation du système. (CETIAT, 2008) La diffusion de l'air du puits climatique peut être d'un seul point, ou de plusieurs par l'installation d'un réseau de conduits isolés. Pour la perfection de ce système de diffusion il faut éviter les coudes, afin de minimiser les pertes de charge qui doivent être compensées par l'augmentation de la puissance du ventilateur. Le recours à un échangeur double flux permet de récupérer l'énergie contenue dans l'air extrait ; voir figure (III.6).

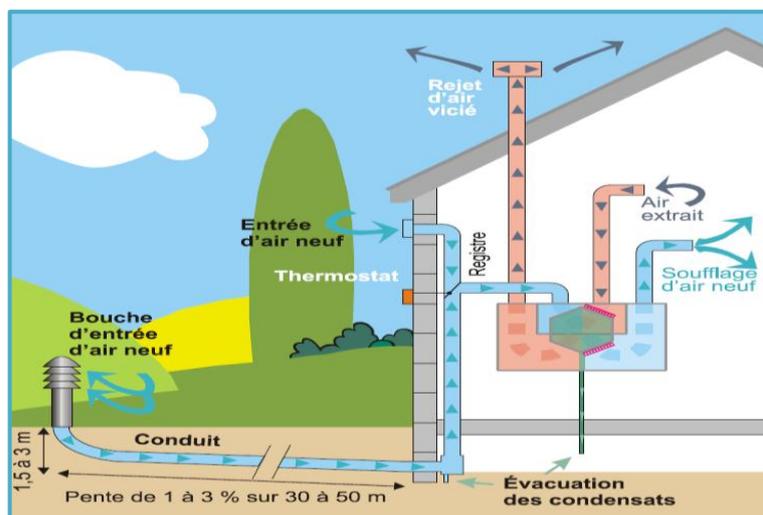


Fig. III.6 : Puits raccordé à un dispositif de ventilation mécanique double-flux centralisé. (CETIAT, 2008)

I.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU PUITTS CLIMATIQUE.

Les performances du puits climatique dépendent de nombreux paramètres physiques relatifs à la canalisation elle-même, au flux d'air et au sol.

- Température du sol (Température moyenne et amplitude des oscillations journalières et annuelles), en fonction de la profondeur des canalisations et condition climatiques.

- Propriétés thermiques du sol.
- Longueur du tube.
- Section du tube.
- Capacité d'échange du tube (surface d'échange).
- Vitesse d'air.

I.2.1. LES PROPRIETES THERMIQUES DU SOL .

Le puits climatique est enterré dans le sol. L'air qui circule dans les canalisations échange des calories avec ce milieu. Il est donc important de déterminer la température du sol et ce en fonction de plusieurs paramètres :

- La nature du sol.
- L'exposition de la surface.
- La profondeur à laquelle sont enterrées les canalisations.

a- LA NATURE DU SOL .

C'est un des principaux éléments à prendre en compte lors de la conception d'un puits climatique. Les performances du puits sont directement liées à la **capacité calorifique** et à la **conductivité thermique** du sol.

Conductivité thermique du sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules ainsi que de sa teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide. La conductivité thermique d'un sol peut donc varier dans le temps, notamment en fonction des évolutions de sa teneur en eau dues aux variations climatiques et au changement de saison. (Hollmuller , 2002) La figure (III.7) montre la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau.

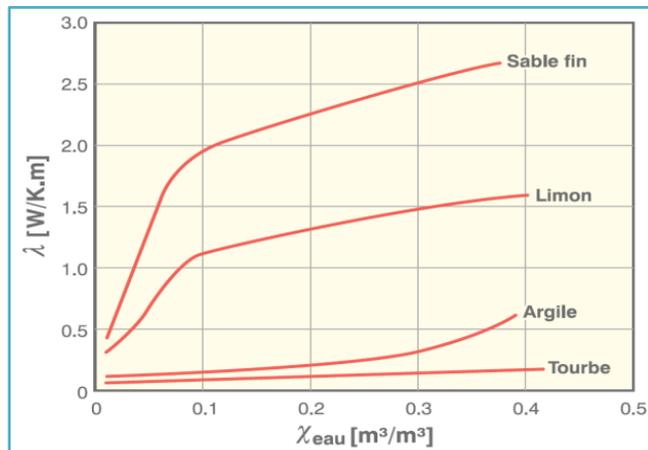


Fig. III.7: la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau. (Hollmuller, 2002)

Capacité calorifique du sol La capacité calorifique C_s d'un sol s'exprime par la moyenne pondérée des capacités calorifiques de ses constituants : minéraux, matière organique, eau, air :

$$C_s = \sum_i \chi_i \cdot \rho_i \cdot c_i \quad (1)$$

Où χ_i , ρ_i , c_i , représentent respectivement la teneur du matériau (m^3 de matériau/ m^3 de sol), sa masse volumique et sa capacité calorifique. L'eau et la matière organique ont une capacité calorifique supérieure à celle des éléments minéraux, un sol humide et riche en matière organique stockera mieux la chaleur qu'un sol sec, riche en minéraux. (Hollmuller, 2002). Le tableau (III.2) un exemple de : Propriétés thermiques des matériaux constituant le sol.

Tableau III.2 : Propriétés thermiques des matériaux constituant le sol. (Dutreix, 2010)

	Masse volumique ρ : kg/m ³	Capacité thermique C : kJ/kg.K	Conductivité λ : W/m.K
Minéraux	2650	0,8	2,90
Sable et gravier	1700 à 2200	0,91 à 1,18	2,00
Argile et limon	1200 à 1800	1,69 à 2,50	1,50
Terre arable	1300	1,90	0,25
Eau	1000	4,20	0,59
Glace	920	2,10	2,20
Air	1,250	1,00	0,02

La meilleure matière d'échange au niveau du sol est le **sable fin, le plus humide possible (au moins 10 % d'eau en volume)**, à la rigueur le limon. Il faut éviter autant que possible l'argile et encore plus la terre arable ou la tourbe pour ce qui concerne le contact avec le tube du puits. À l'inverse, la meilleure matière pour le stockage thermique est, après l'eau, l'argile. Un puits efficace sera de préférence réalisé dans un sol **argilo-marneux ou argilo-sableux humide**, construit dans un lit de sable pour améliorer les échanges thermiques. Si le sol est très sablonneux, il faudra prévoir un lit étanche en cuvette afin de retenir l'eau, bâti à partir de glaise. (Dutreix, 2010)

La variation de teneur en eau par migration et existence d'une nappe phréatique agisse sur la conductivité thermique qui varie dans le temps et l'espace, cela permet de accélérer l'échange par effet convectif. (Hollmuller, 2002)

b- L'EXPOSITION DE LA SURFACE DU SOL .

La température du sol est sensible à l'effet du rayonnement solaire sur la surface de la terre. Si on suppose que les canalisations sont enterrées en dehors de l'emprise du bâtiment, le sol en contact avec le puits est soumis aux contraintes climatiques (échanges convectifs dus au vent et rayonnement solaire). Ces phénomènes étant périodiques, il est logique que la température du sol subisse des variations périodiques. La protection pourra être par la végétation dense au-dessus du parcours du puits, qui protège le sol de la neige en hiver que du soleil l'été ; Ou de positionner les conduits sous la construction (plancher bas isolé afin de limiter l'apport du bâtiment sur le fonctionnement du puits).

Pour les grosses installations, Le plus important est d'assurer une totale étanchéité à la pluie, afin de défendre le dysfonctionnement thermique du puits climatique par l'eau d'infiltration et de mettre un drainage dans le champ de puits . (Dutreix, 2010)

c- LA PROFONDEUR DU SOL .

La température d'équilibre du sous-sol ou régime permanent se situe, entre cinq et neuf mètres de profondeur. Dès deux mètres, cette température varie peu, le sous-sol est plus frais que l'air extérieur en l'été, et inversement en l'hiver. La température du sol aux profondeurs n'est pas sensible aux variations de température jour/nuit. (Dutreix, 2010) La figure (II.8) montre que plus la profondeur augmente, plus la température du sol est stable.

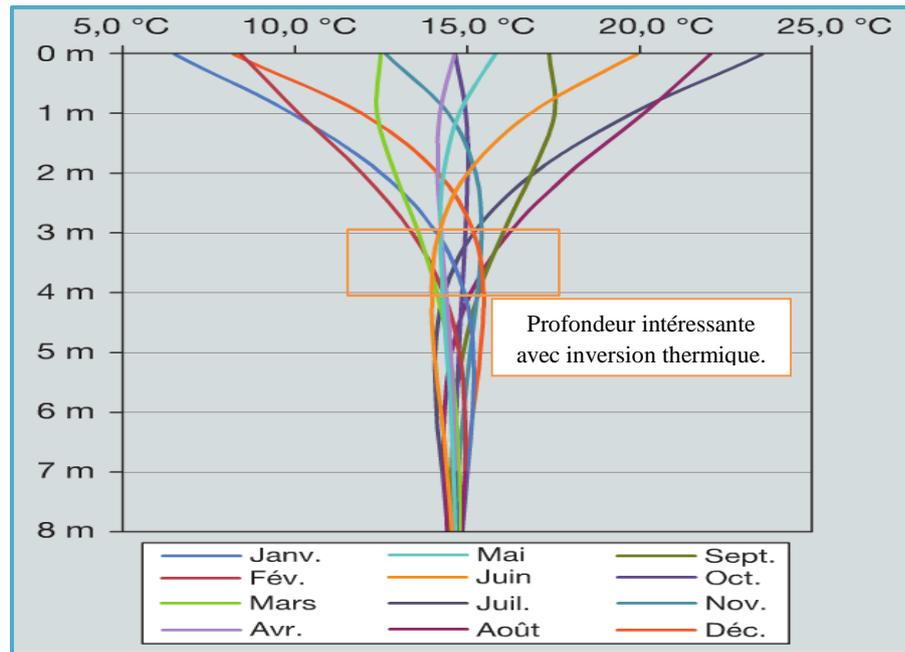


Fig. III.8 : Amortissement thermique du sol en fonction du mois de l'année (France). (Dutreix, 2010)

En effet, en hiver, on a besoin de préchauffer l'air, la température du sol doit être la plus élevée possible. En été, le sol doit être le plus frais possible. Ces exigences correspondent à **l'inverse du phénomène physique** observé. On observe sur la figure (II.8) que la température du sol est plus faible pendant les mois les plus chauds. Donc on a tout intérêt à réduire au maximum l'amplitude des oscillations afin que le sol ne se refroidisse pas trop en hiver ni se réchauffe excessivement en été. (Dutreix, 2010)

1.2.2. LES PROPRIETES PHYSIQUES DES CONDUITS.

a- LA LONGUEUR DU CONDUIT.

La longueur doit s'accorder aux dimensions que permet le terrain. Il semble difficile de mettre en œuvre un puits plus long. Quand la longueur augmente, la température de sortie de l'air se stabilise. Ceci s'explique très logiquement par le fait qu'augmenter la longueur revient à augmenter la surface d'échange, donc les échanges thermiques. La température de l'air en sortie du puits tend à rejoindre la température de la terre.

Le ratio à respecter est que $12 \leq L/V \leq 18$ (longueur du conduit / vitesse de l'air), donc la longueur optimale du puits va dépendre du débit dans les canalisations, pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échangeur ne tempère plus l'air, il a atteint sa limite d'efficacité.

Pour limiter les pertes de charge, la longueur des conduits ne doit pas dépasser 30 mètres. Si la longueur de conduits doit être supérieure, il est nécessaire de créer un réseau en augmentant le nombre de conduits. Dans ce cas, les conduits doivent être espacés entre eux d'une distance d'environ 5 fois leur diamètre pour un bon échange thermique de chaque tube avec le sol. (Herzog, 2010)

b- LA SECTION DES CONDUITS .

Le diamètre du tube induit une surface d'échange. Pour limiter les pertes de charge (freinage de l'air par frottements) on évitera les coudes à angle droit serré. Pour la même raison, il faudra utiliser du gros diamètre (20 centimètres étant un bon compromis coût / performance) ce qui augmentera la surface d'échange et le transfert thermique. Dans certains cas le diamètre de la canalisation n'est pas un paramètre mais une hypothèse de départ. Le choix du matériau est également important ; le PVC est le produit le moins coûteux et le plus utilisé, mais il n'est cependant pas écologique. On lui préférera le polyéthylène (PE) : matériau le plus écologique, il reste assez cher. Les conduites en béton ou en grès peuvent être utilisées pour des diamètres supérieurs à 300 mm, toutefois leur raccords sont difficiles à étanchéifier et ces produits sont perméables au radon¹ présent dans le sol. (Herzog, 2010) Le tableau (III.3) donne un exemple entre le débit d'air et la section de conduits afin d'avoir un rendement de 80 % sur une longueur de conduits optimale.

Au-delà d'un certain diamètre, on peut même constater une baisse de l'échange thermique et en cas de besoin important de débit, et à limiter la vitesse de l'air afin de ne pas exploser les pertes de charge. Il faut éviter de dépasser une vitesse de l'air supérieure à 3 m/s (augmenter le nombre de conduits). Le bon ratio entre la surface d'échange en mètres carrés et le débit horaire en mètres cubes par heure doit être de l'ordre de 1/10 à 1/20. (Dutreix, 2010)

Tableau. III.3 : Longueur (en mètres) de conduite nécessaire pour obtenir un échange thermique de 80 %. (IBEG, 2007)

Débit par conduite [m ³ /h]	Diamètre 100 mm	Diamètre 150 mm	Diamètre 200 mm	Diamètre 250 mm	Diamètre 300 mm
100	10,6	11,7	13,3		
200	11,3	12,7	14,3	15,9	17,2
300		13,1	15,1	17,2	19
400		13,7	15,9	17,7	20,4
500		14,1	16,4	19	21,6
600		14,7	16,9	19,8	22,5
700			17,7	20,2	23,6
800			18,3	21	24,6
900			18,5	21,5	25,1
1000			18,6	21,8	25,8

¹ Un gaz radioactif naturel est présent partout à la surface de la planète, provient des sous-sols granitiques et volcaniques. C'est un des agents du cancer du poumon il peut s'accumuler dans les maisons en s'infiltrant par des fissures ou des canalisations.

I.2.3. LES CARACTERISTIQUES DU FLUX D'AIR.a- LE DEBIT D'AIR NECESSAIRE.

Les règlements sanitaires imposent un renouvellement de $15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{personne}$ (mais le Code du travail demande $25 \text{ m}^3/\text{h}/\text{personne}$).

(Olivier et Colleu, 2016) Plus simple le volume du bâtiment combiné aux débits réglementaires est déterminant pour connaître le débit d'air nécessaire. En été, un rafraîchissement significatif peut être obtenu avec des débits faibles de l'ordre de **2 vol/h** dans un très grand volume (atrium, halle...), de l'ordre de **4 à 6 vol/h** dans des espaces intermédiaires (classe, restaurant..), et de 4 à 8 vol/h dans des pièces ou des logements.

b- LA VITESSE DE L'AIR.

La vitesse de l'air dans les tuyaux a une influence importante sur l'échange. La circulation de l'air dans le tube doit rester turbulente afin d'assurer un bon échange avec les parois ; dans le même temps, le flux augmente, donc le fluide dispose de moins de temps de contact avec les parois ou l'échange est diminué. Il y a alors opposition entre ces deux paramètres. Pour augmenter les échanges terre/air, la vitesse devrait être la plus faible possible, mais cette contrainte est dictée par la norme de ventilation.

Pour faire fonctionner un puits climatique, le tirage (ventilateur) doit posséder deux vitesses: pour garantir un bon préchauffage de l'air en hiver, il est préférable de favoriser un échange thermique maximum en faisant circuler l'air à une vitesse moyenne de 1 m/s . L'objectif étant le rafraîchissement en été, un maximum d'efficacité sera obtenu avec un débit d'air proche de 3 m/s . En intersaison, le puits canadien est beaucoup moins intéressant, il est donc souhaitable de pouvoir le contourner (by-pass) sur une prise direct

Lors du rafraîchissement d'été, le débit doit être plus élevé que lors du préchauffage d'hiver (où seul le débit hygiénique est nécessaire). La figure (III.9) montre la relation entre le diamètre la longueur et le débit de l'air sur le flux thermique généré par le puits climatique.

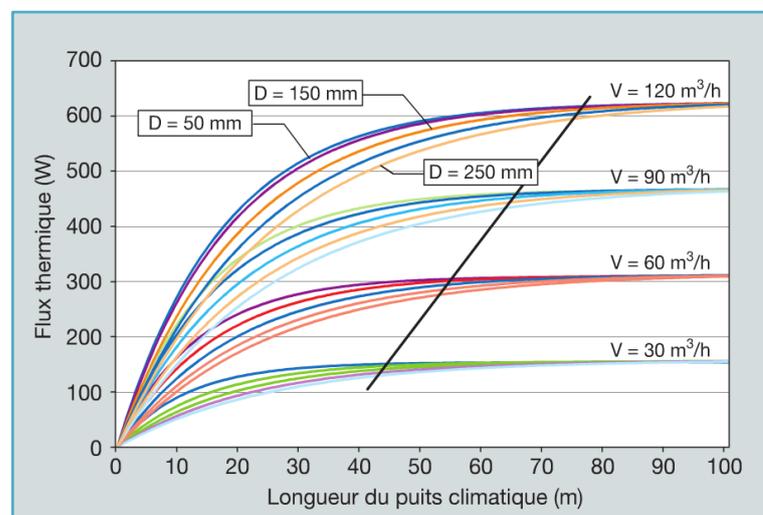


Fig. III.9 : Flux thermique récupérable dans un puits climatique en fonction du débit et du diamètre de la conduite. (Dutreix, 2010)

I.3. BIBLIOGRAPHIQUE ET CONNAISSANCES APPROPRIÉES AU PUITTS CLIMATIQUE.

Pendant quelques décennies passées des nombreuses études de recherche ont été exécutées sur le concept du puits climatique, afin d'approfondir la connaissance sur les paramètres qui affectent la performance et l'applicabilité du système. Profitant de la haute inertie du sol, la température à une certaine profondeur est presque constante tout au long de l'année, qui tient compte de son utilisation ; pour le pré-rafraîchissement de l'air en été et le préchauffage en l'hiver avant d'être soufflé dans le bâtiment. Les études peuvent tomber sous des larges catégories d'études de modélisation expérimentales, analytiques et numériques. Une vue d'ensemble générale d'études précédentes basées sur la susdite catégorisation sera présentée initialement.

L'impression générale des sujets de recherche divers et les approches ; La thèse faite par Hollmuller, (2002) ; il traite des échangeurs air-sol en général et des puits canadiens. La première partie décrit l'ensemble des projets étudiés. Les projets relatifs à l'utilisation de puits canadiens serviront pour la validation du modèle théorique. La partie centrale de la thèse est consacrée au calcul analytique des échangeurs air-sol. La réponse du sol est évaluée dans le cas d'une excitation journalière ou annuelle. Les résultats du calcul permettent le dimensionnement des puits canadiens en fonction de leur utilisation. L'intérêt du calcul analytique permet d'étudier d'autres configurations et modes de fonctionnements pour les puits climatique. La modélisation numérique est implémentée sur TRNSYS. Qui peut ainsi être couplé à n'importe quel bâtiment modélisé sous ce logiciel. Le modèle numérique ainsi construit est validé à la fois de manière théorique par comparaison avec la solution analytique et par deux expériences : CAROUBIER où l'écart entre le modèle et les mesures est de 3% et SCHWERZENBASHERHOF où l'écart est de 4% en période estivale et de 10% en décharge hivernale (possibilité infiltration d'eau). L'approche adoptée dans cette thèse apporte de nombreux éclairages sur les puits canadiens en choisissant un cadre théorique large et grâce à l'exploitation de plusieurs expériences et du modèle numérique construit.

Une autre thèse faite par Thiers, (2008) sur le puits climatique. Le bilan thermique établi pour le calcul de la température de surface du sol permet de simuler le comportement de tout type de sol pour toute situation géographique et climatique. Il donne la température du sol à tout instant et à toute profondeur, il compte de trois phénomènes la conduction dans le sol du signal de température provenant de la surface du sol (effet des conditions atmosphériques), la conduction du flux thermique provenant d'un bâtiment situé à proximité de la portion de sol considérée (influence du bâtiment sur la température du sol) et la conduction d'un flux thermique en provenance du sous-sol (flux géothermique). L'auteur a choisi la méthode des différences finies pour l'appliquer sur un modèle comportant 80 mailles pour un puits composé de quatre tubes ; prenant en compte la circulation de l'air dans les tubes pour la résolution du modèle numérique l'auteur a utilisé l'outil informatique appelé COMFIE.

Le modèle du puits climatique et de gestion de la ventilation conçu est capable de représenter diverses configurations du système de ventilation (puits climatique seul, échangeur sur air vicié seul, couplage des deux systèmes, ventilation naturelle). De nombreux paramètres (conditions climatiques, propriétés physiques du sol et des tubes du puits climatique, configuration géométrique du puits, rendement de puits sur air vicié et du ventilateur) permettent la prise en compte de phénomènes qui vont déterminer ses performances.

Dans un contexte saharien le puits climatique est destiné pour le refroidissement de l'air ou la période chaude s'étale sur une grande partie de l'année.

Moumimi et al (2010) ils ont évalué les performances d'un puits climatique, à travers un travail analytique et expérimentale d'une longueur de 60 m et diamètre de 110 mm a une profondeur de 3 m a Biskra. à la fin une comparaison des résultats a été faite. Examinant l'influence des propriétés du sol, la nature du conduit et le contexte sur le changement de la température de l'air dans le puits et à la sortie afin de l'exploitation pour le refroidissement (été). Mebarki et al (2012) : ils ont étudié les performances d'un puits climatique par voie de modélisation analytique après la validation du modèle de la température du sol et la température de l'air le long de l'échangeur afin d'évaluer le fonctionnement en période estivale sur la profondeur, le diamètre et la longueur ; dans des conditions météorologiques de Béchar. L'étude théorique introduite par Benhammou et Draoui, (2012) : dans le site de Adrar pour examinations du puits climatique pour la capacité de refroidissement durant la période estivale d'une manière que chaque mois soit représenté par sa journée type en examinant la température fournie par le puits influée par la température extérieur et la température du sol avec l'évaluation des paramètres influant sur le phénomène par la variation de la température de l'air refroidi et l'efficacité moyenne du profondeur, longueur, diamètre et vitesse. Baali et al (2014) a étudié un système inspiré d'un ancien système d'irrigation « la foggara » très proche de puits climatique dans la ville de Béni Abbés, l'étude était structurée sur des mesures in situ (expérimentale) ils ont mis trois étapes de fonctionnement, le premier est de fermer les ouvertures et mettre l'extracteur de puits en marche, la deuxième est d'ouvrir les ouverture la nuit pour connaître l'effet de la ventilation nocturne, la dernière consiste à faire fonctionner le système sans l'extracteur de puits avec ventilation nocturne a fin de connaître l'indépendance de fonctionnement sans le recours à l'extracteur du puits. Une étude analytique pour le calcul de la température à la sortie du système et à la fin l'optimisation du système par la simulation à l'aide du logiciel GAEA. Woodson et al (2012) sur une étude numérique et expérimental dans le site de Ouagadougou à Burkina-Faso, après l'évaluation de la température du sol sur 0,5 m, 1 m et 1.5 m de profondeur ; il a évaluée le rendement d'un puits de 25 m de longueur, 1,5 m de profondeur, 125 mm de diamètre étudié pour le refroidissement de l'air sur 52 heures entre le 12 et le 14 mai.

Dans le même contexte une étude expérimentale faite à Marrakech au Maroc par KHABBAZ. M et al (2014) afin de connaître ces performances ; le puits est constitué de 3 tubes en PVC de 77 m de longueur implanté à une profondeur entre 2.2 à 3.5 m, 150 mm de diamètre intérieur et 160 mm de diamètre extérieur pour le refroidissement d'une maison.

I.3.1. PARAMETRES INFLUENÇANT LA TEMPERATURE DU SOL.

Selon le bilan thermique établi par Thiers (2008) la température du sol est influée par :

- Rayonnement solaire à la surface du sol ; la négligence de rayonnement solaire entraîne une erreur qui peut être importante (cas de rayonnement intense).
- Influence d'un bâtiment proche ; la température du sol est fortement liée à ce paramètre et il a une influence sur la température de l'air en sortie du puits (distance, surface, température moyenne, et la résistance thermique du bâtiment).
- Exposition au vent de la surface du sol ; il joue sur la température moyenne du sol. Un sol exposé au vent la température du sol sera plus faible que pour un sol abrité du vent.
- Absorptivité de la surface du sol (albédo) ; la nature de sa surface joue un rôle remarquable sur la température du sol. un sol très absorbant sa température du sol sera plus élevée que si le sol était peu absorbant.
- Humidité à la surface du sol ; intervient sur les échanges latents entre l'air extérieur et la surface du sol, ce paramètre est peu influant par rapport l'échange par convection ou par rayonnement.

I.3.2. PARAMETRES RELATIFS AU SOL.

Selon le bilan thermique établi par Thiers (2008) la conduction de chaleur dans le sol est dépendante de :

- Conductivité thermique du sol ; elle influence sur l'efficacité et la profondeur du puits climatique et le comportement thermique du sol dû aux conditions climatiques extérieures, plus le sol est conducteur plus le puits climatique transmette la chaleur à l'air soufflé.
- Capacité calorifique du sol ; permet de limiter les effets d'une variation "rapide" de la température extérieure par un déphasage et amortissement de l'amplitude entre les saisons hivernales et estivales qui influencent directement sur le comportement thermique du puits climatique. Un sol de grande inertie est préférable pour stocker la chaleur d'été pour l'hiver et vice versa pour le rafraîchissement en été.
- Taux d'humidité du sol ; le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide et plus inerte qu'un sol sec, donc la transmission de la chaleur et de la fraîcheur est facile à l'air soufflé du puits climatique.

I.3.3. PARAMETRES INFLUENÇANT L'ECHANGE THERMIQUE AIR-SOL.

Selon Hollmuller (2002) et Thiers (2008) et le dimensionnement compte :

- Conductivité thermique des tubes ; Une faible conductivité thermique des tubes réduit l'échange thermique entre l'air et le sol, l'inertie thermique du sol est moins sollicitée donc la température extérieure sont moins amorties.

- Capacité thermique des tubes ; pour une faible épaisseur des conduits n'a aucun impact sur la performance et la température de l'air en sortie du puits.
- Débit de ventilation de l'échangeur air-sol ; l'efficacité de l'échangeur diminue pour un débit plus élevé (l'air passe vite sans échange avec l'inertie du sol), par contre la vitesse augmente l'échange (turbulence) par convection entre l'air et le tube.
- Longueur des tubes : dépend du débit dans les canalisations. Pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échangeur ne tempère plus l'air : il a atteint sa limite d'efficacité. Par contre, plus le débit augmente plus cette longueur augmente.
- Diamètre des tubes : Une augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais n'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au-delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement de l'air ou l'air circulant au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol. Cet optimum est indépendant aussi de la longueur de la canalisation. (en général entre 160 et 250 mm à l'intérieur parce que un diamètre supérieur ne permet pas un échange uniforme, bon en périphérie mais mauvais au centre).
- Rugosité intérieure des tubes : elle favorise le transfert convectif en créant de la turbulence par contre elle induit des pertes de charges et risque d'entraîner des accumulations d'eau stagnante.
- Profondeur des tubes ; une profondeur plus grande améliore l'amortissement et le déphasage de la température de l'air extérieur par le sol.
- Distance entre les tubes et géométrie du puits ; L'échangeur est généralement constitué d'une nappe de tubes placés parallèlement et regroupés en entrée et en sortie par des collecteurs. Les coudes, les bifurcations induisent des pertes de charges à éviter et assurer une distance suffisante entre les tubes pour minimiser l'interaction entre les tubes proches.

Peu de règles de dimensionnement simples existant pour un puits climatique est définie par Hollmuller (2002) basée sur une solution analytique développée à partir des équations de chaleur. Les paramètres nécessaires pour cette règle sont : le débit d'air en m^3/h , la surface d'échange en m^2 et la fréquence journalière ou annuelle (le puits étant dimensionné pour une utilisation journalière ou annuelle). Le dimensionnement des puits canadiens et l'influence de tous ces paramètres ont été étudiés numériquement afin de quantifier l'importance de chacun par rapport à l'économie d'énergie engendrée.

I.4. DES SYSTEMES DE REFROIDISSEMENT PAR PUIITS CLIMATIQUE.

La présentation de quelques recherches expérimentales à fin d'évaluer le refroidissement par le puits canadien et comparer les résultats obtenus avec la présente recherche.

Un puits climatique étudié par Moumimi et al (2010) durant le 28 juin 2009 a Biskra. Il a une longueur de 60 m, diamètre intérieur de 110 mm est placé à une profondeur de 3 m. c'est un réseau de quatre traçons espacés les uns des autres d'une distance entre axes de 2 m. équipé par un extracteur placé à l'entrée du puits d'un débit variable. Les résultats montrent que la chute de la température de l'entrée jusqu'à la sortie tend vers la température du sol. Pour trois débits $121.52 \text{ m}^3/\text{h}$, $135.65 \text{ m}^3/\text{h}$ et $155.43 \text{ m}^3/\text{h}$ à une température extérieure de $36.5 \text{ }^\circ\text{C}$ et à 45 m la température était refroidie jusqu'à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ soit une défiance de température de $11.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Woodson et al (2012) examinent le gradient de température du sol et de la performance du rendement de puits canadien à Burkina Faso. Des mesures de température du sol ont été faites à des profondeurs de 0,5 m, 1,0 m et 1,5 m. Le puits climatique était de 25 m de long, 1,5 m de profondeur, 125 mm de diamètre en PVC et a utilisé un ventilateur de $95 \text{ m}^3 / \text{h}$. Il était capable de refroidir l'air aspiré à partir de l'extérieur par $7,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ou la température extérieure est $39,0 \text{ }^\circ\text{C}$. L'extracteur de l'air fonctionne durant la période diurne entre 10 h 00 à 16 h 30 dans une période chaude du 12 mai à 19 mai 2009. Les effets de refroidissement sont moins prononcés le matin parce que l'air extérieur est déjà frais et durant le moment le plus frais entre 06 h 00 et 07 h 30 la température du sol était la plus chaude contrairement durant 11 h 45 à 15 h 00 la température extérieure marque le pique et la température du sol était la plus fraîche. L'auteur remarque que la température à la sortie du puits est plus chaude que la température à l'intérieure du conduits à une distance de 20 m, cela montre que l'air se réchauffe dans le conduits vertical qui relie le puits à la chambre expérimentale par $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

KHABBAZ et al (2014) ils ont réalisé une étude expérimentale sur les performances thermiques d'un puits climatique couplé avec une maison située dans la banlieue de Marrakech ($31^\circ 37' \text{N}$ de latitude et de longitude $8^\circ 2' \text{W}$). Le puits canadien étudié est constitué de 3 tubes en PVC parallèles et identiques de 77,7 m de longueur chacun, de 15 cm diamètre intérieur et 16 cm diamètre extérieur. Ces tubes sont à une profondeur de 2.2 à 3.5 m. Chacun des tubes est muni, à son entrée, d'un ventilateur poussant l'air à travers le tube pour le rafraichir avant de le souffler dans la maison. Une surveillance été réalisé durant l'été 2013 à travers un suivi des températures et humidités durant 39 jours ; un des trois tubes été instrumenté avec des capteurs de température afin d'en suivre les performances énergétique sachent que les données métrologiques ont été prise sur site. Entre le 15/07 au 23/07 la température du soufflage varie entre $25,4^\circ\text{C}$ et $23,5^\circ\text{C}$ pour une température extérieure oscille entre $40,8 \text{ }^\circ\text{C}$ et $22,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour une journée typique pour la Variation horaire de la température extérieure et celle du soufflage montre deux périodes durant la nuit le puits fournie une température supérieure à la température extérieure entre 01 h 00 et 10 h 00 et il amortie l'oscillation de température durant la journée ou il oscille la température de $37 \text{ }^\circ\text{C}$ à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ soit une défiance de température de $12 \text{ }^\circ\text{C}$.

II. LA CHEMINEE SOLAIRE .

Les systèmes solaires passifs de façade correspondent à des systèmes ou dispositions constructives situés en façades de bâtiment, dont le fonctionnement s'appuie sur l'énergie solaire. Dans un climat chaud et aride l'objectif est d'assurer le rafraîchissement par ventilation avec renouvellement d'air pour le bâtiment. (Dugue, 2013)

Le fonctionnement de la plupart de ces systèmes s'appuie sur un mouvement de convection naturelle de l'air, ce qui se traduit par un transport d'énergie. Ils mettant en jeu un phénomène de convection naturelle peut être regroupé en quatre catégories, représenté sur la figure (II.10).

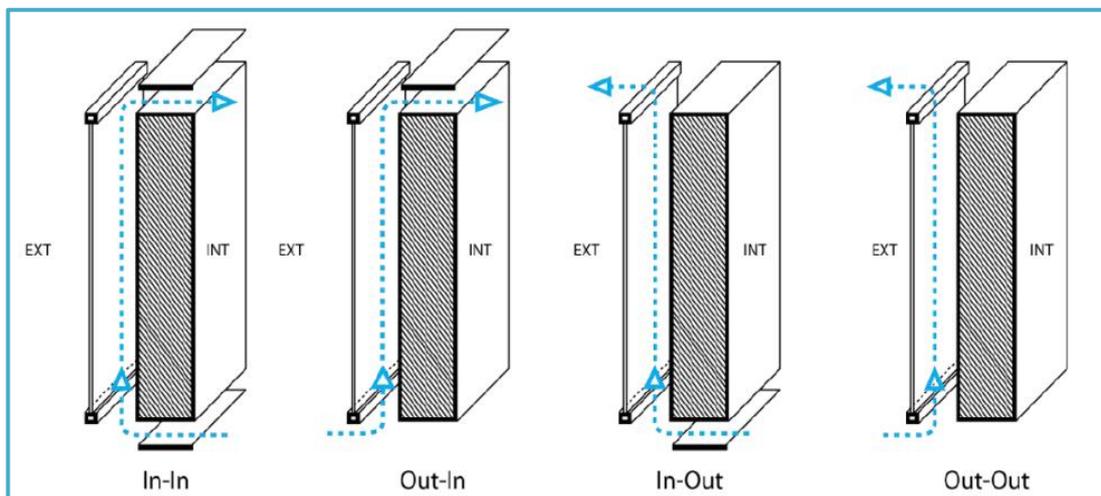


Fig.II.10 : Quatre configurations de systèmes solaires passifs de façade.

In – In : l'air chauffé dans la lame d'air, entraîne un mouvement de convection, depuis le bas vers le haut. L'air neuf qui provient du bâtiment, entre en partie basse de la cavité, il est chauffé par convection avec les parois de la cavité, et en ressort vers le bâtiment. L'énergie récupérée par le passage, permet le chauffage passif du bâtiment. Il n'y a pas de renouvellement d'air pour le bâtiment.

Out – In : L'air chauffé dans la cavité entraîne un écoulement ascendant. L'air neuf, provient de l'extérieur, et est chauffé dans la lame d'air. Il est alors aspiré vers l'intérieur du bâtiment. Il y a donc renouvellement d'air du bâtiment, avec de l'air qui est préchauffé par son passage dans la lame d'air.

In – Out : L'air chauffé dans la lame d'air entraîne un écoulement de l'intérieur vers l'extérieur. L'air du bâtiment, entre en partie basse et est évacué vers l'extérieur en partie haute. Complété par une autre entrée d'air pour le bâtiment, ce système permet le renouvellement d'air passif du bâtiment, c'est-à-dire de la ventilation naturelle.

Out – Out : L'air extérieur entre en partie basse, s'échauffe dans la lame d'air et ressort vers l'extérieur. Le passage de l'air permet l'évacuation d'une partie de l'énergie solaire incidente, et limite ainsi les apports de chaleur vers le bâtiment.

II.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CHEMINÉE SOLAIRE .

La cheminée solaire est l'une des technologies qui travaille sur le principe de la flottabilité, où l'air est chauffé grâce à l'effet de serre généré par les rayonnements solaires (énergie thermique). De nombreuses techniques peuvent être utilisées pour le refroidissement des bâtiments.

La cheminée solaire peut être utilisée au niveau du toit ou à l'intérieur du mur. Les cheminées solaires sont des systèmes de ventilation solaires passifs (sans appuis mécanique). La chaleur est conduite à travers le principe de refroidissement par convection. La cheminée solaire est conçue sur la base du fait que l'air chaud monte vers le haut; ils réduisent la chaleur indésirable pendant la journée et d'échanger l'air intérieur (chaud, polluer) par l'air extérieur (froid, pur). La cheminée solaire principalement constituée d'une cavité couverte de l'extérieur par un vitrage exposé au rayonnements solaires et une masse thermique peinte en noire appelé absorbeur avec deux ouvertures, une au sommet pour la sortie l'air chaud et l'autre au pied pour extraire l'air de l'espace. L'air passe à travers la chambre et il sort par la partie supérieure de la cheminée. La figure (III.11) montre le fonctionnement de la cheminée durant les deux périodes diurne et nocturne.

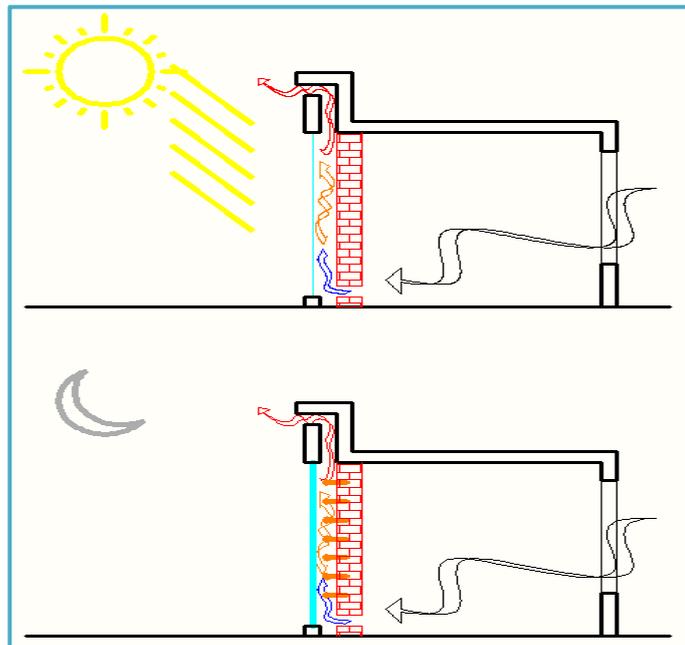


Fig. III.11 : Cheminée solaire utilisé dans la ventilation du bâtiment.

Les avantages de la cheminée solaire qu'il n'y a aucune partie mécanique, peu d'entretien, aucune consommation électrique, aucun réchauffement climatique, aucune pollution et il peut être utilisé tant pour le chauffage que pour le rafraîchissement. Le seul inconvénient est dû aux augmentations du coût du bâtiment.

La figure (III.12) montre un exemple d'utilisation de la cheminée solaire avec le refroidissement par évaporation (végétation et arrosage) et rafraîchissement par géothermie sous le bâtiment, protection de la toiture des rayonnements solaire par toiture ventilée à la fin la ventilation par cheminée solaire pour l'évacuation de l'air chaud dans un lycée à Damas.

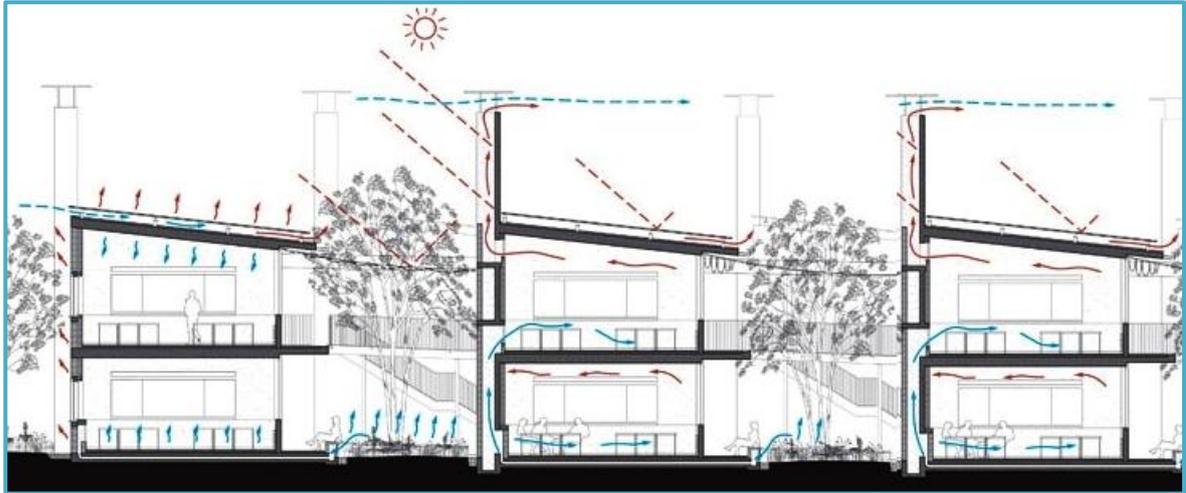


Fig.III.12 : Schéma montrant stratégies ombrage, de refroidissement et de ventilation intégrés.
(Ateliers Lion) <http://www.carboun.com/sustainable-design/a-damascus-school-revives-traditional-cooling-techniques/>

II.2. CLASSIFICATION DE LA CHEMINÉE SOLAIRE .

La cheminée solaire est essentiellement un système de chauffage aérien solaire, sa position peut être verticale ou horizontale et selon la position ce sera une partie d'un mur ou d'un toit.

Une cheminée peut être classée comme cheminée verticale ou inclinée.

La classification de la cheminée sur la ventilation de bâtiment a forme de mur cheminée, mur Trombe, toit cheminée solaire ou un système combiné entre les deux dispositions d'une intégration entre mur cheminée et toit cheminée.

L'utilisation de la cheminée joue un rôle sur sa conception soit pour la ventilation et circulation de l'air dans le bâtiment ou le chauffage.

La cheminée solaire peut être associée avec d'autre système comme le refroidissement par évaporation, puits climatique et rafraîchissement par absorbant et d'adsorption.

En vue d'améliorer la ventilation naturelle, différentes configurations de la cheminée ont été étudiées et expérimentées. La présente partie décrit ces différentes configurations, les conditions expérimentales et les différents résultats atteints, par certains chercheurs.

Bansal et al. (1993): par modélisation mathématique de la cheminée solaire, ils ont rapporté que l'augmentation du débit d'air en augmentant le rayonnement solaire. La ventilation fournie par la cheminée solaire n'est pas suffisante pour les grands bâtiments mais elle a amélioré le taux de ventilation jusqu'à une certaine mesure.) Ils ont optimisé la surface d'absorbeur de cheminée solaire pour un volume de la chambre de 64 m^3 et 3 à 6 ACH (changement d'air par heure) et signalé 2.25 m^2 surface d'absorbeur optimale et vitesse $0,233 \text{ m / s}$ air.

Macias et al (2009) : La ventilation naturelle est renforcée avec l'aide de la cheminée solaire et l'air frais est refroidi par circulation dans le vide sanitaire. L'application de ce système pour les pièces de vie d'un bâtiment résidentiel à faible coût a été évaluée et mis en œuvre. Un modèle a été développé pour permettre de prévoir la température de l'air dans la salle de séjour. La performance du système de refroidissement passif a été évaluée sur la base du bilan énergétique pour une journée d'été typique. il a un rendement énergétique de 50%.

Bansal et al (1994) : L'effet de cheminée solaire peut être utilisé pour constructions à plusieurs étages en utilisant les tours à vent pour entrer l'air dans les chambres et la cheminée solaire à d'autres visages pour chaque étage a été suggérée pour extraire l'air. Présenté sur la figure (III.13) ces cheminées solaire ayant une surface de collecteur 3 m^2 et à 30° angle d'inclinaison chacune, avec une tour à vent d'une hauteur plus que le bâtiment suggéré. Pour une vitesse du vent de $1,0 \text{ m/s}$, la tour du vent seule crée un taux de $0,75 \text{ kg/s}$ de débit massique seulement, alors que le système assisté de cheminée solaire est capable de créer un flux d'air jusqu'à $1,4 \text{ kg/s}$ à 700 W/m^2 de rayonnement solaire l'incident.

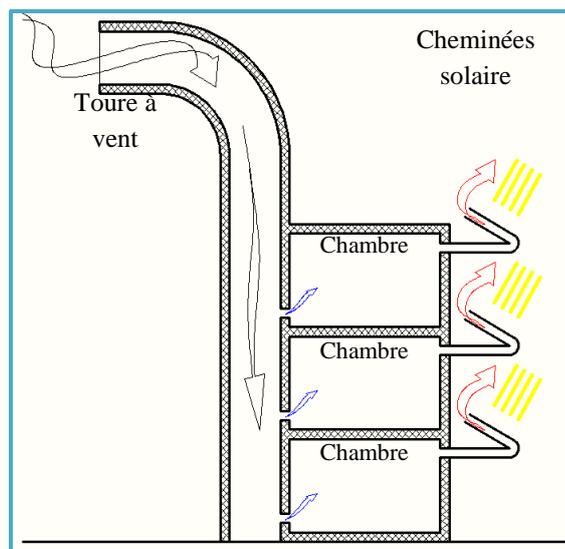


Fig.III.13 : Schéma de système, la tour a vent et la cheminée solaire. (Bansal et al, 1994)

Hirunlabh et al (2001) : ont développé de nouvelles configurations d'un capteur solaire sur le toit pour augmenter la ventilation naturelle utilisée pour le confort thermique des bâtiments. Ils ont suggéré une configuration spéciale, comme indiqué dans la figure (III.14) Pour un débit d'air maximal. Plusieurs capteurs solaires à angles fixes et variables présentées dans la figure (III.14, b, d) et rapporté que les trois collecteurs solaires à des angles différents de $30, 45, 60$ degrés donnent les meilleures performances.

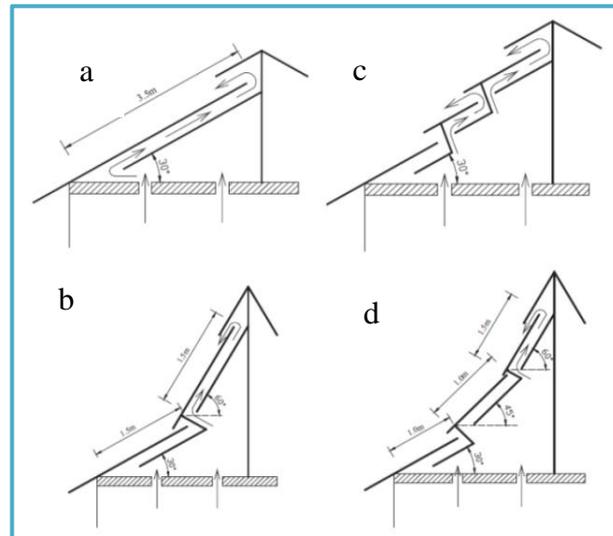


Fig. III.14 : Quatre configurations différentes des toits collecteurs (capteur) solaires. (Hirunlabh et al, 2001)

[T. Miyazaki et al. 2011] ont étudiée une cheminée solaire a été accompagnée par un refroidisseur par évaporation du point de rosée qui a été intégré au plafond du bâtiment. Le flux d'air induit par la cheminée solaire a été prédit par la simulation, et l'effet de refroidissement du point de rosée a également été analysé par la chaleur et la simulation de transfert de masse. Les résultats ont montré que le système était capable de faire face à des gains de chaleurs internes d'un immeuble de bureaux ordinaires. Le système utilisé est capable de fournir $40-50W / m^2$ de charge de refroidissement radiatif. Présenté sur la figure (III.15)

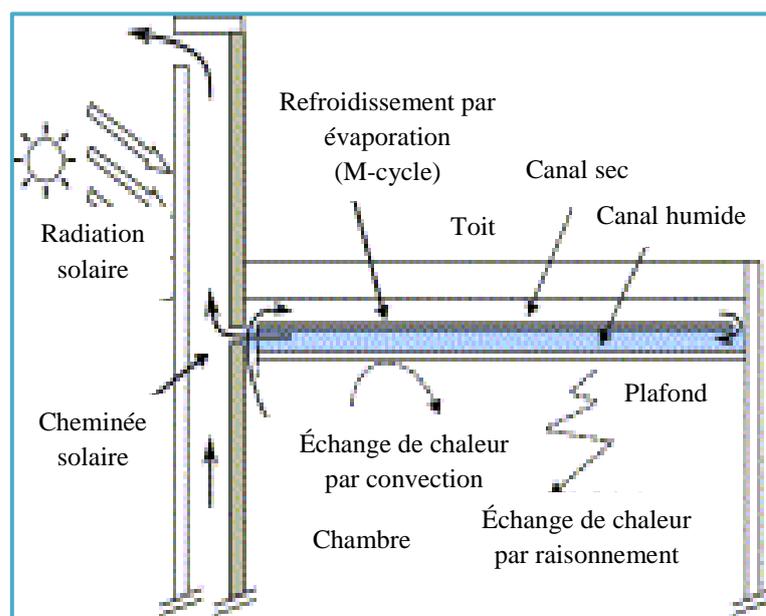
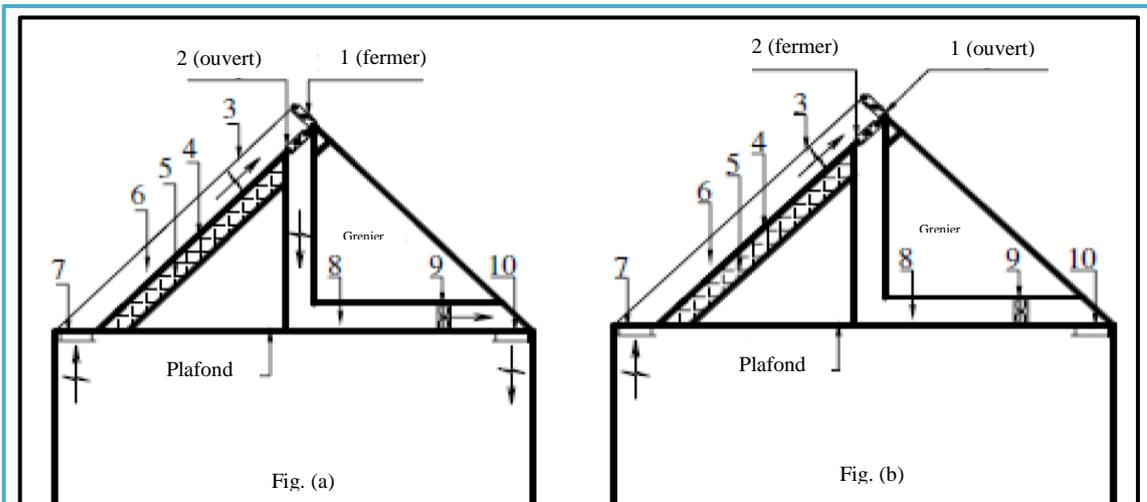


Fig. III.15 : Système de refroidissement par évaporation entraînée par cheminée solaire intégré au plafond. (Miyazaki et al, 2011)

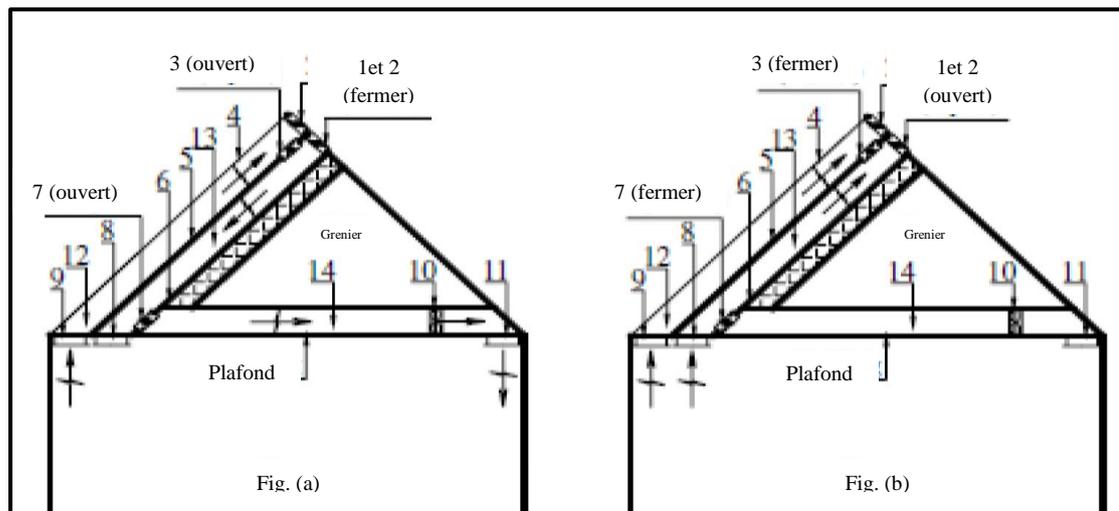
Zhai et al (2005) : Ont suggéré un seul passage et double passage pour le toit capteurs solaires dans deux modes, le chauffage des locaux et la ventilation naturelle comme il est montré dans la Figure (III.16) : (A) simple passage et (B) double passage, les clapets sont utilisé pour contrôler le mouvement d'air. (1) : fermer (2) ouvert les positions représentées sur la figure (III.16. A. a) l'air chaud est distribué dans la pièce c'est le mode de chauffage et pour la ventilation naturelle position les clapets seront inversée qui est montré dans la Fig. (III.16. A. b). Le rendement de double passage du toit capteurs solaires trouvé environ 10% plus efficace pour le chauffage en hiver et pour la ventilation naturelle dans d'autres saisons plus élevé que le simple passage. Un programme d'ordinateur (FORTRAN) a été développé pour valider les résultats expérimentaux.



(A) Structure de toit capteur solaire à un seul passage.

(a) mode de chauffage de l'espace. (b) mode de ventilation naturelle.

1 et 2 : clapets ; 3 : couvercle en verre ; 4 : plaque d'absorbeur ; 5 : plaque d'isolation ; 6 : lame d'air, canal d'air ; 7 : bouche ; 8 : conduit d'air ; 9 : ventilateur ; 10 : bouche.



(B) Structure de toit capteur solaire à double passage.

(a) mode de chauffage de l'espace. (b) mode de ventilation naturelle.

1, 2, 3 et 7 : clapets ; 4 : couvercle en verre ; 5 : plaque d'absorbeur ; 6 : plaque d'isolation ; 8, 9 et 11 : bouches ; 10 : ventilateur ; 12 : lame d'air ; 13 : lame d'air 2 ; 14 : conduit d'air

Fig. III.16 : toit capteur solaire. Zhai et al (2005)

Raman et al (2001) : ont proposé deux modèles passifs pour l'hiver et l'été présenté sur les deux figures (III.17) pour le premier modèle et figure (III.18) pour le deuxième modèle. La section dans la figure (III.17.b) montre que l'eau est utilisée pour le refroidissement en été seulement. Le toit a été isolé par des blocs de bois prévus pour réduire le transfert de chaleur. La combinaison de mur Trombe et toit cheminée solaire ont été utilisés pour augmenter le changement d'air par heure. Le coût de la chambre augmente jusqu'à 20%, mais le concept va réduire la consommation d'énergie. Il a un bon potentiel pour le confort thermique et il sera bénéfique à long terme.

Le modèle passif 1 constitué d'un ensemble de deux cheminées solaires, un refroidisseur par évaporation (pour l'été) et l'isolation des murs ajoutée, c'est bien pour l'hiver, mais le refroidissement d'été n'était pas adéquat.

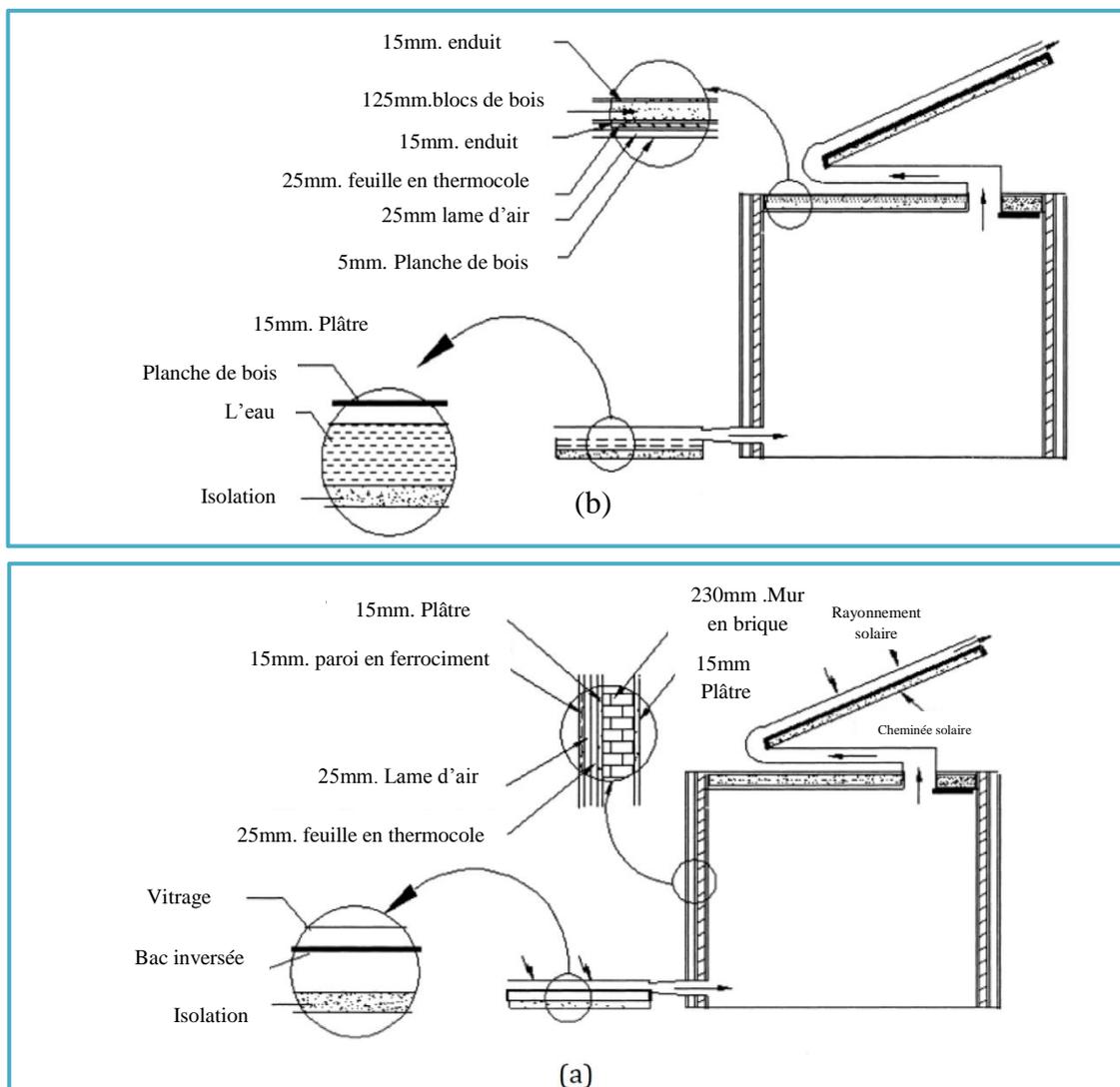


Fig. III.17 : modèle 1

(a) principe de système passif pour le fonctionnement en l'hiver.

(b) principe de système passif pour le fonctionnement en l'été.

(Raman et al, 2001)

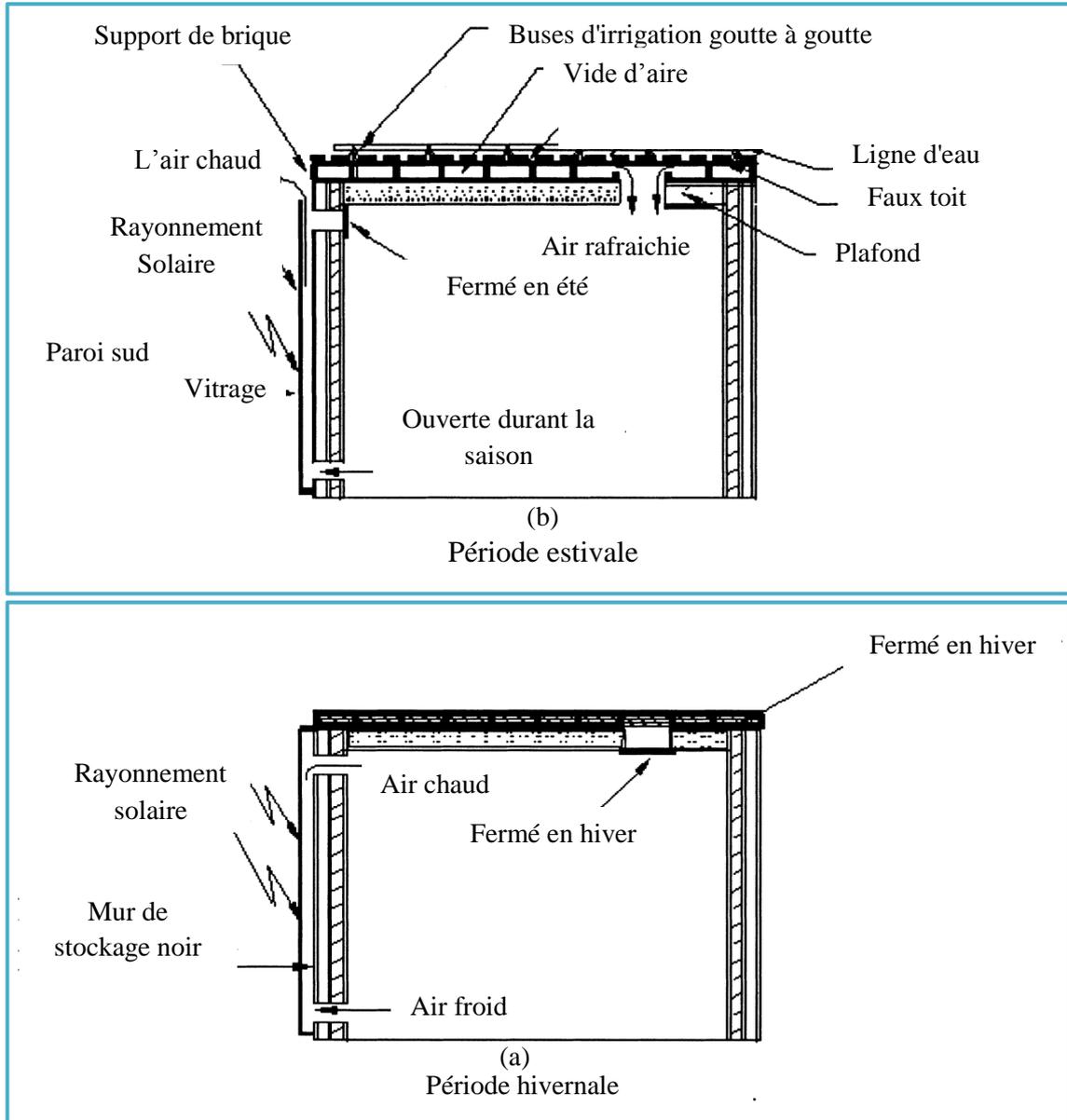


Fig. III.18 : modèle 2 (Raman et al, 2001)

(a) principe de système passif pour le fonctionnement en l'hiver.

(b) principe de système passif pour le fonctionnement en été.

(Raman et al, 2001)

En conséquence, un second modèle passif 2, qui est composée d'une collection de paroi sud et une traversée de toit refroidi par le haut par un système de refroidissement par évaporation de tissu du sac a été construit et contrôlé pendant 1 an. La performance thermique du modèle passif 2 était nettement meilleure que celle de modèle 1.

Nugroho et Hamdan bin Ahmad (2005) : ils ont évalué la performance des stratégies de ventilation de cheminée solaire sur une chambre expérimentale dans les conditions climatiques de la Malaisie. L'utilisation de l'énergie solaire peut induire des stratégies de ventilation dans les bâtiments en utilisant CFD FloVent.

L'effet de cheminée solaire, mur solaire, et le toit solaire ont été simulés afin de déterminer la meilleure option pour une stratégie de ventilation tropicale. Les résultats ont montré que la cheminée solaire peut augmenter la vitesse de l'air dans la chambre, mais également d'augmenter le gain de chaleur dans la chambre. Les résultats indiquent également que toit solaire réduit le gain de chaleur mais conduit à faible vitesse de l'air. L'utilisation de mur solaire peut augmenter la vitesse de l'air dans la chambre en fonction de l'orientation de la paroi solaire. Faire Combiner cheminée solaire et toit solaire sera utilisé pour améliorer la ventilation et la température intérieur de chambre. Les résultats sont représenté sur la figure (III.19).

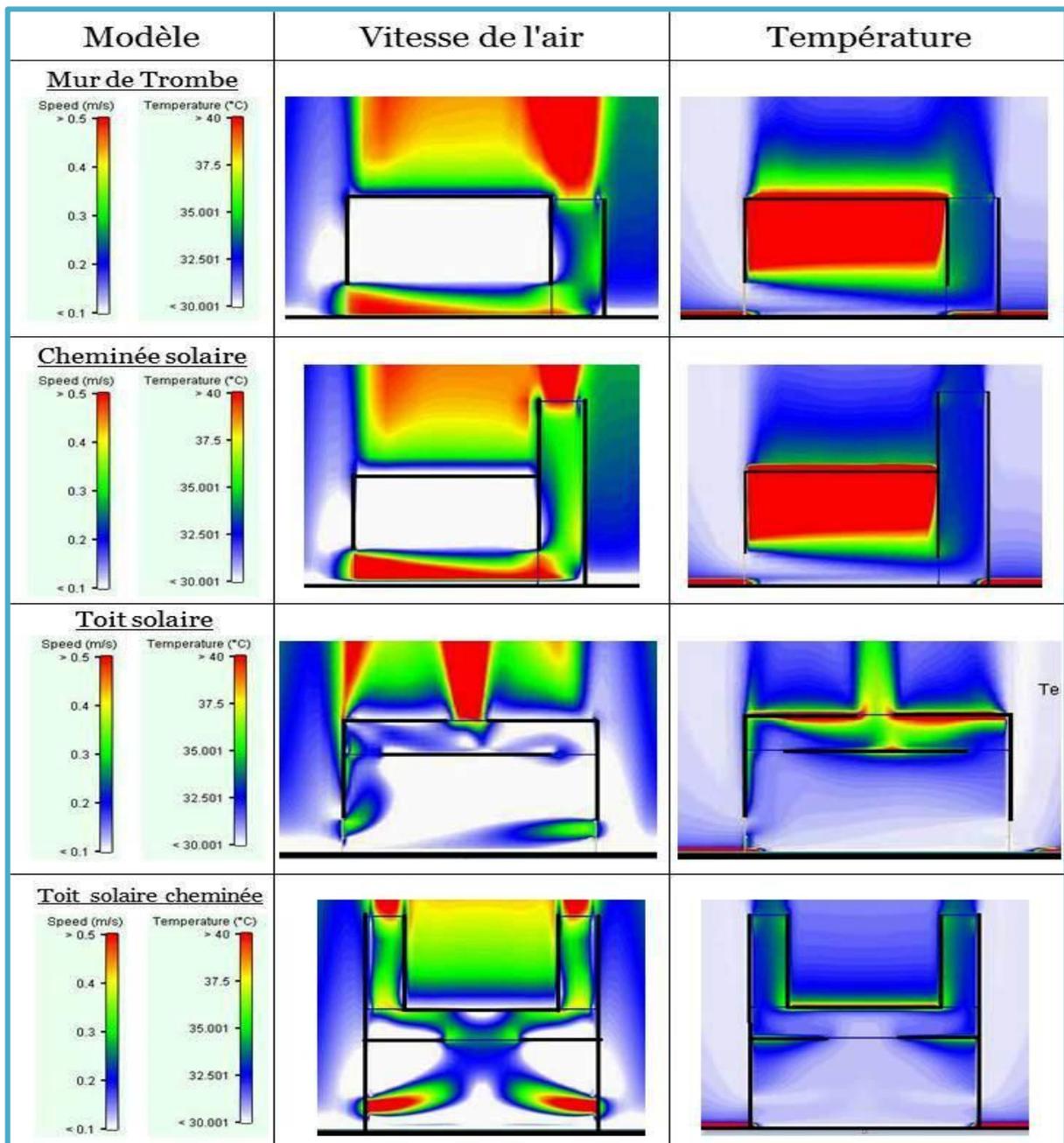


Fig. III.19 : Résultat de la simulation CFD de ventilation par énergie solaire .
(Nugroho et Hamdan bin Ahmad, 2005)

II.3. BIBLIOGRAPHIQUE ET CONNAISSANCES APPROPRIÉES A LA CHEMINÉE SOLAIRE .

Avec l'augmentation d'intérêts dans la recherche de cheminée solaire, diverses recherches théoriques, expérimentales et informatiques à travers des conditions météorologiques différentes ont été examinées. Comme différents chercheurs ont défini leur domaine en utilisant des notations différentes, la conception et divers paramètres ont été normalisés.

Les études expérimentales en forme des enquêtes sur le terrain concernant la ventilation induite par des configurations de cheminée solaire dans une maison de chambre individuelle à petite échelle ont été exécutées en Thaïlande par Khedari et al (2000). Khedari et al (2003) ont étudié la performance du système cheminée solaire installé sur le toit et les murs dans une maison de 25m³ climatisée. Hirunlabh et al (1999) ont exécuté une étude semblable pour un 31m³ de volume d'une maison où un mur solaire métallique a été placé sur la façade du sud. Des expériences en laboratoire sur des modèles à petite échelle, où la distribution de la température de l'air, le profil de vitesse dans la cavité de la cheminée et l'ampleur des taux d'écoulement d'air a été étudiée, en association avec l'analyse paramétrique (Burek et Habeb 2007). La performance de 2m de hauteur d'une cheminée qui faisait partie d'un 12m³ de volume, a été étudiée dans des conditions de laboratoire par Bouchair (1989). Dans un certain nombre d'études analytiques les modèles mathématiques ont été développés pour la prédiction de la performance des cheminées solaires. Les expériences étaient d'habitude exécutées, pour valider les modèles. Bansal et al. (1993) ont développé un modèle mathématique stationnaire pour calculer les taux d'écoulement d'air moyens et les températures d'une cheminée solaire. La température murale a été assumée uniforme. Un modèle mathématique stationnaire a été aussi développé par Bassiouny et Koura (2008) pour prévoir les changements aériens par heure (ACH) induit dans une chambre par la cheminée. Un autre modèle développé par Maerefat et Haghighi (2010) sur la basse de conservation d'énergie par le coefficient de perte de chaleur générale sur des hypothèses que l'entrée d'air vers la cheminée est considéré comme ayant la même température moyenne de l'air intérieure, Seule la force de flottabilité est considérée, aucune ventilation naturelle ou infiltration, les flux dans les canaux sont hydro dynamiquement et thermiquement pleinement développés, les capacités thermiques du verre et du mur absorbeur sont négligeables, toutes les propriétés thermodynamiques sont constamment évaluées à une température moyenne.

Dans certaines études, la modélisation numérique a été employée pour exécuter l'analyse paramétrique sur le système de cheminée solaire. Les effets de gain de chaleur solaire et le type de vitrage, et la largeur de cavité (Gan, 2006) ; l'inclination et faible émissivité de revêtement (Harris et Helwig, 2007) dans plusieurs publications examinées, en utilisant la modélisation par CFD. Une analyse paramétrique vaste pour une cheminée solaire intégrée dans un immeuble d'habitation de prototype a été exécutée par Lee Ho et Strand (2009), utilisant la modélisation numérique dans le programme Energy Plus.

Dans l'analyse paramétrique, les paramètres sont variés un à un pour déterminer la sensibilité de la performance du système contre chacun de ces paramètres. Il a été employé dans la grande majorité d'études et a joué un rôle substantiel dans la compréhension des mécanismes contrôlant la performance de la cheminée solaire et leurs interactions. Le plus influent des paramètres peuvent tomber sous la catégorie de géométriques, la construction (type de verre, l'isolation) et climatique (la radiation solaire, le vent). Quelques résultats indicatifs seront présentés dans cette section, quant à l'effet de ces paramètres sur la performance du système.

II.3.1. HAUTEUR D'ABSORBEUR ET LA LARGEUR DE LA CAVITE .

L'effet de l'hauteur de l'absorbeur et la largeur de la cavité a dans quelques cas été étudiés et exprimés séparément, en termes du ratio d'aspect de hauteur-à-largeur (a aussi mentionné comme le ratio de hauteur-à-écart). L'écoulement d'air augmente avec la hauteur, depuis l'augmentation de gains de chaleur de l'arrière mur : dans une étude paramétrique sur des murs Trombe, Gan (1998) a constaté qu'une augmentation de la hauteur d'absorbeur par un trimestre est équivalente à une augmentation de gains de chaleur par trois trimestres. Dans l'étude de Lee Ho et Strand (2009) les taux d'écoulement d'air ont augmenté dans tous les trois emplacements assumés du bâtiment, de 73 % quand la hauteur a augmenté de 3.5 à 9.5m (a considéré une largeur de cavité de 0.3m).

En ce qui concerne la largeur de cavité, il a été trouvé que le débit augmente avec la largeur croissante. Dans l'étude analytique d'Ong et Chow (2003) ils ont évalué une large cavité de 0.3m qui a incité un débit plus haut de 56 % qu'un de 0.1m. De même selon le modèle de Bassiouny et Koura (2008) une augmentation triple de la largeur de cavité cause une augmentation d'ACH de 25 %.

Dans quelques études une largeur de cavité optimum (ou le ratio de hauteur-à-largeur optimum) a été rapportée; pour cette largeur optimum le débit est devenu maximal, Tandis que pour des écarts plus importants, il s'est produit un écoulement inverse qui a réduit le débit moyen à travers la cheminée. Cette divergence entre les études est attribuée aux gammes différentes de ratios de hauteur-à-largeur examinés et à l'influence de la taille d'entrée de cheminée. Dans le cas où les augmentations de taille d'entrée avec la largeur de cavité, une chute de pression inférieure dans l'entrée peut contrebalancer la réduction du débit causé par le flux inverse, pour qu'aucune largeur optimum ne soit trouvée (Gan 1998). Gan (2006) : a rapporté plus tard une largeur optimum de 0.55m pour un 6m de hauteur de cheminée et a soutenu les augmentations de largeur optimums avec la hauteur.

II.3.2. LA SECTION D'ENTREE DE CHEMINEE .

L'effet de taille d'entrée de cheminée a été aussi exploré dans quelques études et a été trouvé que la performance comparée à celui de la largeur de cavité est plus faible. Gan (1998) a revendiqué la hausse des taux d'écoulement d'air pour la largeur de la cavité au-delà de 0.3m, tant que la taille d'entré à la même taille que la largeur.

II.3.3. L'ANGLE D'INCLINAISON .

Le profil aérien de vitesse à travers la largeur de cavité révélait être plus uniforme quand la cheminée a été inclinée, menant à des chutes de pression à l'entrée et à la sortie et ainsi un taux de flux d'air plus hauts (le taux de flux d'air le plus haut de 45 % a été trouvé pour l'angle de 45°). Harris et Helwig (2007) ont numériquement étudié les conséquences d'incliner la cheminée le long de la ligne de toit de bâtiments (pour la latitude d'Édimbourg, l'Écosse). Ils ont soutenu que bien que les gains de chaleur puissent être favorisés en raison de l'inclinaison, le transfert de chaleur entre l'air et le vitrage est plus élevé, entraînant des pertes de chaleur plus élevées qui pourraient diminuer la performance. Des débits plus élevés de 11% ont été trouvés (pour l'angle optimal de 67,5), alors que la performance à 45 ° l'angle était presque la même que celle du cheminée solaire verticale. Il est implicite que l'impact de l'inclinaison est très dépendant de la latitude du lieu. Mathur et Mathur (2006) ont déterminé l'angle optimal de 45 degrés à 27 degrés de latitude Nord et optimiser les angles d'inclinaison pour les latitudes de 0 à 65°N, pour les latitudes de 20° à 30° l'angle d'inclinaison est 45°, et pour les latitudes de 35° à 40° l'angle est 50°.

II.3.4. PROPRIETES DE L'ABSORBEUR .

L'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur (masse thermique) favorise la ventilation nocturne (Charvat et al, 2004). L'isolation de côté arrière de l'absorbeur est impérative pour éviter les pertes de chaleur de la cheminée solaire (ainsi que la surchauffe des espaces adjacents). Gan (1998) a rapporté que 40% des gains de chaleur disponibles seraient perdus par un dos non isolé, dans cette étude, la température de surface de la paroi de fond a augmenté de 9°C lorsque l'isolant a été appliqué. L'absorptivité de mur arrière doit être aussi élevée que possible pour maximiser le gain de chaleur solaire.

L'émissivité de la paroi doit être aussi faible que possible pour limiter les pertes de chaleur radiative; quand un revêtement à faible émissivité a été appliqué à la paroi arrière, des débits d'air ont augmenté de 10% d'après Harris et Helwig (2007).

II.3.5. TYPE DE VITRAGE .

L'utilisation d'un double vitrage peut augmenter les débits d'air induits jusqu'à 17% lorsqu'il est appliqué à un mur Trombe utilisée pour la ventilation passive en été (Gan, 1998). Harris et Helwig (2007) ont fait valoir que le double vitrage améliore les performances d'une cheminée solaire mais seulement légèrement, de sorte que ce n'est pas une mesure de rapport coût-efficacité (seulement les conditions estivales ont été prises en compte).

II.3.6. L'INTENSITE SOLAIRE ET LE VENT .

L'intensité du flux solaire thermique est la force motrice pour le fonctionnement de la cheminée solaire et est donc le facteur le plus déterminant de sa performance.

Bansal et al (1993) ont estimé que la cheminée solaire avec une surface de 2.25m^2 , induirait $100\text{ m}^3/\text{h}$ et $350\text{ m}^3/\text{h}$ pour un rayonnement solaire de 100 W/m^2 et 1000 W/m^2 , respectivement.

Le vent est le deuxième paramètre climatique le plus influent, car il peut créer des pressions positives ou négatives à la sortie de la cheminée solaire et donc d'entraver ou d'améliorer le flux d'air. Dans les expériences a plein air par Arce et al (2009) sur une cheminée solaire à grande échelle, les débits d'air plus élevés coïncident avec la plus grande vitesse de vent enregistrée.

Dans l'étude analytique de Mathur et al. (2006), la grande erreur de 23% a été attribuée aux effets du vent, qui ont été négligés dans le modèle. Dans la pratique, les appareils peuvent être incorporés à la sortie de la cheminée afin que le vent de toutes les directions crée des pressions négatives.

III. REFROIDISSEMENT PASSIF DES BATIMENTS PAR L'INTEGRATION DU PUIS CLIMATIQUE AVEC LA CHEMINÉE SOLAIRE.

L'accouplement de la cheminée solaire et le puits climatique, il dépend de la température extérieure, le rayonnement solaire, la cheminée solaire et les dimensions des tuyaux souterrains, et la demande de refroidissement. Pour que ce système fonctionne et de fournir une ventilation naturelle intérieure désirée, une étude paramétrique est effectuée pour trouver les effets des dimensions géométriques de la cheminée solaire et du puits climatique avec les conditions environnementales extérieures. La figure (III.20) montre le schéma de principe de ce modèle.

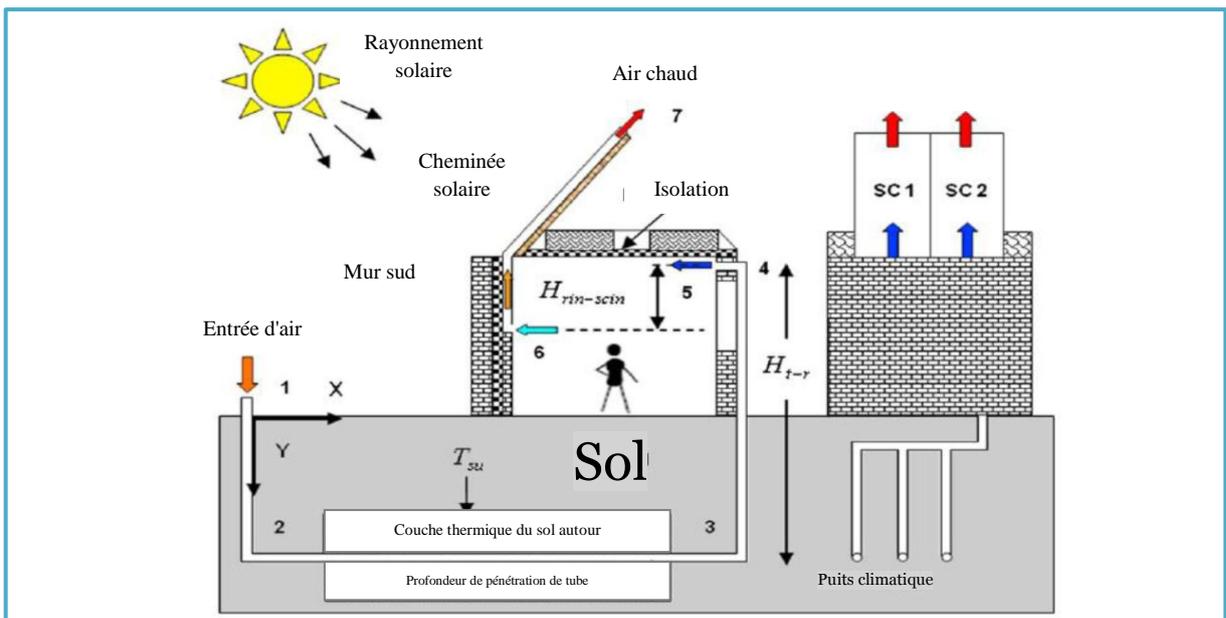


Fig. III.20: Schéma de principe de combinaison puits climatique avec cheminée solaire (Maerefat and Haghghi, 2010)

Les dimensions et les caractéristiques suivantes sont utilisées dans ce modèle schématique:

La taille de la pièce est $4 \times 4 \times 3,125 \text{ m}^3$ sans infiltration d'air et a une demande de refroidissement minimum de $Q = 116\text{W}$. La taille de la cheminée solaire à une longueur de 4 m, largeur 1 m, l'épaisseur de la cavité de 0,3 m et d'une entrée de cheminée de $0,4 \times 0,4 \text{ m}$ est considéré. Le puits climatique est en PVC de 25 m de longueur, 0,01 m d'épaisseur et le diamètre intérieur de 0,5 m et est enterré 3,0 m au-dessous de la surface du sol ou la température est proche de 19°C pour un état de surface du sol sec et ombragé. Ces dimensions ont un effet significatif sur la charge de refroidissement. Dans cette étude, la sortie de puits et l'entrée de la cheminée solaire sont placés dans le mur opposé les uns des autres. L'entrée de cheminée est abaissée de 0,7 m au-dessous de la sortie du puits. La température extérieure est de 34°C .

III.1. LA PERFORMANCE DU SYSTEME A DIVERSES DEMANDES DE REFROIDISSEMENT ET DU RAYONNEMENT SOLAIRE .

Le tableau (III.4) montre comment ce système fonctionne sous diverses quantités d'énergie solaire rayonnante et besoin de refroidissement. Les résultats montrent que quelques cheminées solaires intégrées avec deux tuyaux de puits peuvent générer une gamme température acceptable de confort intérieur.

Selon le tableau (III.4), afin de fournir des températures intérieures plus froides, Des tuyaux de refroidissements plus longs et plus nombreux sont recommandées. Par exemple, dans le refroidissement la demande de 116 W et un rayonnement solaire de $600 \text{ W} / \text{m}^2$, si la longueur de la canalisation souterraine est de 25 m, avec une cheminée solaire et d'une canalisation souterraine, ce système est capable de fournir une température de confort intérieur de $28,14^\circ \text{C}$ alors que la température extérieure est d'environ 34°C .

Tableau III.4 : La performance du système pour diverses demandes de refroidissement et le rayonnement solaire.

Demande de refroidissement (W)	Radiation solaire (W/m^2)	Longueur du puits (m)	ACH	Température de la cellule ($^\circ\text{C}$)	Nombre de cheminée	Nombre de puits
116	400	25	6,34	28,53	2	1
	600		4,03	28,14	1	
	800		5,06	28,31	1	
	1000		5,84	28,44	1	
200	400	25	6,30	29,35	2	1
	600		3,56	28,73	1	
	800		4,81	29,35	1	
	1000		5,65	29,33	1	

400	400	30	5,69	29,92	2	1
	600		7,90	30,15	2	
	800		3,88	29,51	1	
	1000		4,87	30,62	1	
600	400	40	4,67	28,27	2	1
	600		7,21	30,42	2	
	800		3,09	27,77	1	
	1000		4,00	29,02	1	
800	400	40	5,20	28,13	3	2
	600		4,21	27,64	2	
	800		5,33	29,03	2	
	1000		6,27	30,14	2	

III.2. EFFETS DE LA LONGUEUR D'ABSORBEUR SUR LES PERFORMANCES DU SYSTEME .

Les dimensions de l'entrée de la cheminée solaire et la surface de la cheminée influent sur la vitesse de l'écoulement dans une certaine mesure.

La surface de la cheminée qui absorbe l'énergie solaire pour fournir un effet de cheminée et la surface de refroidissement des tuyaux souterrains, ce qui permet d'évacuer la chaleur du flux d'air vers le sol, ont d'importants effets sur les performances du système. Pour augmenter l'effet de refroidissement de la surface des tubes, le diamètre et la longueur du tube doit être augmenté.

Le tableau (III.5) montre que, en augmentant la longueur de la cheminée solaire, la surface d'absorbeur augmente et le débit de ventilation supérieur sera généré. Mais un taux de ventilation plus élevée génère des températures intérieures plus élevées; par conséquent, plus des canalisations souterraines seront nécessaires pour le refroidissement.

Tableau III.5 : Effets de la longueur d'absorbeur sur les performances du système.

Demande de refroidissement (W)	longueur Absorbeur (m)	ACH	Température de la cellule (°C)	Nombre de cheminée	Nombre de puits
116	3	4,40	28,22	1	1
	4	5,83	28,44	1	1
	5	4,06	28,66	1	1
	6	8,18	28,86	1	1
800	3	2,36	28,94	2	3
	4	5,10	30,98	2	3
	5	6,62	32,38	2	3
	6	8,29	33,63	2	3

800	3	3,12	29,24	3	5
	4	3,05	29,41	2	4
	5	3,51	29,81	2	5
	6	3,84	30,19	2	6

Note : température extérieure 34°C. Radiation solaire 1000 W/m².

III.3. EFFETS DE LA LONGUEUR DE Puits CLIMATIQUE SUR LES PERFORMANCES DU SYSTEME .

Le tableau (III.6) montre, à la température extérieure de 40° C et à la demande de refroidissement de 800 W, avec le rayonnement solaire absorbée de 400 W / m² et la longueur de puits climatique de 15m, la température de refroidissement acceptable ne peut pas être fourni. Mais dans le même état, si la longueur puits climatique augmente de 15 m à 25 m et avec un ensemble de deux cheminées solaires et six tuyaux souterrains (ce qui est un total de 25 x 6 = 150 m de tuyaux), le système est capable de fournir une température de 29°C, ce qui est 10°C inférieure à la température extérieure.

Tableau III.6: effets de la longueur de puits climatique sur les performances du système.

Demande de refroidissement (W)	Température extérieure (°C)	Radiation solaire (W/m ²)	Longueur de puits (m)	ACH	Température de la cellule (°C)	Nombre de cheminée	Nombre de puits
116	40	400	15	3,47	29,68	4	10
			25	6,02	29,72	3	2
			35	5,17	27,00	3	2
			45	5,79	28,61	3	1
116	40	1000	15	3,47	29,87	2	9
			25	6,49	28,72	2	3
			35	4,65	28,77	1	1
			45	3,56	26,33	1	1
800	40	400	15	Le confort thermique ne peut être fourni.			
			25	3,14	29,00	3	5
			35	4,54	29,50	3	2
			45	4,27	27,00	3	2
800	40	1000	15	Le confort thermique ne peut être fourni.			
			25	3,35	29,38	2	6
			35	7,42	29,52	2	3
			45	5,59	29,26	2	2

III.4. EFFET DU DIAMETRE DE PUIITS CLIMATIQUE SUR LES PERFORMANCES DU SYSTEME .

Dans le tableau (III.7) montre le diamètre optimal de 0,5 m, un nombre minimum de tuyaux et cheminées solaires sont nécessaires pour le refroidissement.

Tableau (III.7): effet du diamètre de puits climatique sur les performances du système.

Demande de refroidissement (W)	Température extérieure (°C)	Radiation solaire (W/m ²)	Diamètre de puits (m)	ACH	Température de la cellule (°C)	Nombre de cheminée	Nombre de puits
116	40	400	0,3	4,30	29,96	3	2
			0,5	6,02	29,72	3	2
			0,7	3,01	29,89	3	4
			0,9	4,76	29,98	4	8
116	40	1000	0,3	5,07	27,70	3	2
			0,5	6,49	28,72	2	3
			0,7	8,67	29,96	2	4
			0,9	7,85	29,80	2	8
800	40	400	0,3	Le confort thermique ne peut être fourni.			
			0,5	3,14	29,00	3	5
			0,7	4,43	29,86	4	7
			0,9	Le confort thermique ne peut être fourni.			
800	40	1000	0,3	Le confort thermique ne peut être fourni.			
			0,5	3,35	29,38	2	6
			0,7	3,21	29,31	2	7
			0,9	3,71	29,94	2	12

III.5. LES PERFORMANCES DU SYSTEME SOUS DIFFERENTES CONDITIONS INTERIEURES ET EXTERIEURES .

Les effets des conditions environnementales, y compris l'énergie solaire et de la température extérieure, sur la performance du système. Voir Tableau (III.8)

L'augmentation de l'intensité solaire provoque un effet de cheminée plus fort et un taux de changement d'air (ACH) supérieur. Par conséquent, moins de cheminées solaires sont nécessaires pour conduire l'air frais à travers les conduits de puits climatique et d'équilibrer la baisse de pression.

En raison d'augmentation de l'ACH causé par l'intensité solaire, la température de l'air intérieur augmente aussi, et, afin de créer une condition de confort thermique, plus de tuyaux dans le puits climatique sont nécessaires. A l'inverse, lorsque la température extérieure augmente, l'effet de cheminée diminue donc plusieurs cheminées solaires sont nécessaires pour la circulation d'air et la ventilation.

Les résultats montrent que, même avec une température extérieure chaude de 45 °C et du rayonnement solaire inférieure de 100 W/m², ce système peut fournir une condition intérieure presque confortable de 31°C et 4 ACH par 8 cheminées solaires et 6 tuyaux de puits climatique. Si la température extérieure monte à plus de 50°C et la demande refroidissement augmente à 1500 W, le confort thermique ne peut être fourni et la cheminée solaire ne peut pas générer un effet de cheminée.

Tableau III.8 : les performances du système sous différentes conditions intérieures et extérieures.

Demande de refroidissement (W)	Température extérieur (°C)	Radiation solaire (W/m ²)	ACH	Température de la cellule (°C)	Nombre de cheminée	Nombre de puits
500	40	100	3,28	29,61	5	3
		500	5,16	31,13	3	3
		900	4,83	31,40	2	3
500	45	100	3,01	30,92	6	4
		500	4,30	31,12	3	4
		900	4,02	31,27	2	4
500	50	100	3,05	31,02	6	6
		500	3,45	31,62	3	5
		900	3,06	31,52	2	5
1000	40	100	4,98	30,51	8	6
		500	4,10	31,95	2	2
		900	3,63	30,69	2	4
1000	45	100	4,15	30,00	8	6
		500	3,27	31,15	3	5
		900	3,00	30,90	2	5
1000	50	100	4,18	31,95	8	7
		500	3,05	31,98	3	6
		900	3,15	31,53	3	12
1500	40	100	5,20	31,36	8	4
		500	3,29	30,61	3	5
		900	3,00	30,35	2	5
1500	45	100	3,95	31,00	9	9
		500	3,62	31,70	4	9
		900	3,17	31,60	3	12
1500	50	100	Le confort thermique ne peut être fourni			
		500				
		900				

Cette étude montre que le système proposé de ventilation solaire passif, qui est relié à un puits climatique, peut créer un mouvement d'air naturel pour fournir des conditions thermiques confortables. La quantité de rayonnement solaire, la température extérieure, et l'agencement des dimensions des cheminées solaires et du puits climatique sont cruciales pour la performance de ce système.

Comme les résultats montrent, en utilisant les cheminées solaires de grande taille pour absorber plus de rayonnement solaire cela signifie que moins de cheminées solaires seront nécessaires. Cependant, parce que les cheminées solaires de grande taille créent un inconfort thermique, plusieurs conduits souterrains seront nécessaires pour refroidir le flux d'air et de fournir un niveau de confort.

Sur la base de l'étude du diamètre de tuyau, un diamètre optimal de 0,5m donnera le nombre minimum requis de cheminées solaires et de tubes de puits climatique. En outre, cette étude a révélé que d'une longueur de plus de 20m devrait être utilisé pour fournir les conditions idéales de confort thermique. L'étude montre que lorsque la température extérieure est supérieure à 45°C, la création des conditions de confort thermique d'une façon passive devient difficile, mais avec une configuration correcte, même à des températures aussi élevées que 50°C et une intensité solaire pauvre de 100 W / m², le système peut encore fournir des conditions souhaitables et minimise le coût de refroidissement.

IV. CONCLUSION.

Les méthodes sont prouvées par leur proximité de résultats pour les études de mesure, analytique et simulation ou cette combinaison a montré son efficacité ((Maerefat and Haghghi, 2010)

Le type, la classification, l'application et les méthodologies de la technologie disponible de cheminée solaire pour la ventilation et le refroidissement par puits climatique du bâtiment ont été examinées. Les différents facteurs de performance dans les modèles disponibles pour l'application passive en refroidissement dans les bâtiments également présentés. Le rendement dépend essentiellement des différences de température et de pression.

Le système de climatisation classique peut être totalement remplacé par l'adoption de ces techniques intégrées pour la construction de l'espace conditionné, il réduit la charge énergétique du bâtiment et augmente la notion de la durabilité. Le coût de la construction conventionnelle augmente légèrement par l'utilisation de la cheminée solaire et le puits climatique, mais dans le long terme, il sera bénéfique.

Le refroidissement passif est employé comme une technique consommant peu d'énergie pour évacuer la chaleur intérieure indésirable d'un bâtiment dans les saisons chaudes. Il existe de nombreuses façons de promouvoir cette technique de refroidissement, ou l'utilisation de cheminée solaire conjointement avec le puits climatique sera introduite.

La piste de la recherche est tracée sur une recherche expérimentale par simulation utilisant le programme EnergyPlus afin de connaître l'influence de différents paramètres vus dans la littérature. Mais premièrement il faut connaître la température du sol qui a une grande influence sur le rendement du système. Ensuite la modélisation de deux cellules identiques la première sera équipée par le système combiné de cheminée solaire et puits climatique et la deuxième sera comme une cellule de référence (sans système passif) avec l'application de la ventilation nocturne.

Il convient de noter que le concept adapté à un endroit peut ne pas convenir à un autre, si les conditions climatiques sont différentes. Par conséquent, étant très spécifique du lieu, sur la base des zones climatiques comme chaud et sec, chaud et humide, froid et ensoleillé, etc., le choix du mariage entre la cheminée solaire et le puits climatique a été étudié dans les conditions climatiques dans le Sahara algérien ; exactement la région de la vallée de M'zab riche en architecture vernaculaire et ces leçons d'adaptation du bâtiment au climat

Le concept récent de l'efficacité énergétique des bâtiments verts a attiré tous les scientifiques et les architectes du bâtiment pour passer au-dessus de la pratique actuelle de refroidissement mécanique aux méthodes anciennes de refroidissement passif d'une manière moderne et efficace.

Chapitre IV.

Concepts et théories de
fonctionnement de puits
climatique couplés à la
cheminée solaire

I. INTRODUCTION..

Le système de refroidissement passif étudié, consiste d'assurer le tirage de l'air refroidit par le puits climatique par la cheminée solaire afin d'évacuer la chaleur indésirable à l'intérieur du bâtiment dans les saisons chaudes ; voir figure (IV.1).

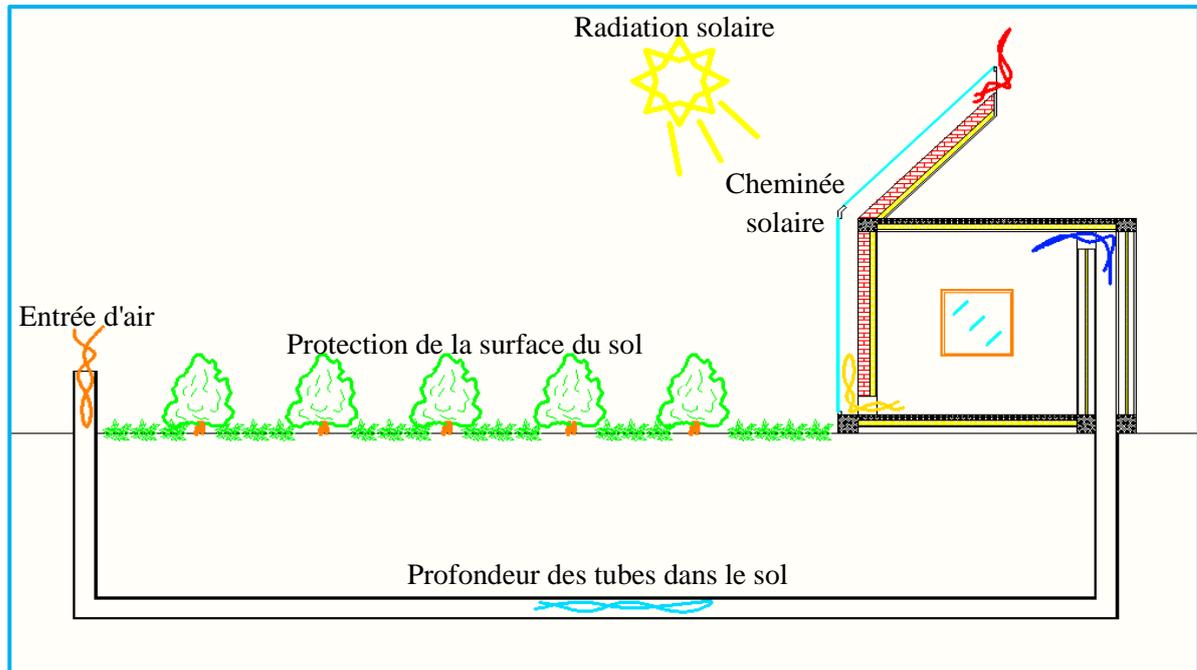


Fig. IV.1 : Diagramme schématique du puits climatique combiné à la cheminée solaire pour le refroidissement de l'air.

La modélisation mathématique pour l'évaluation du système du refroidissement passif afin d'assurer un refroidissement et renouvellement d'air à l'intérieur. Il est intégré dans une cellule cubique de 27 m^3 . Elle peut être répartie sur trois :

- Modélisation mathématique de puits climatique.
- Modélisation mathématique de cheminée solaire.
- Modélisation mathématique de la température et la ventilation de la cellule.

Le fonctionnement du système sera de pré-rafraichir l'air si la température de l'air extérieur est supérieur à la température de l'air du puits ($T_{ae} > T_{ap}$) par les tubes enfouis dans le sol et soufflaient l'air dans la cellule. Le soufflage de l'air refroidi est motivé par la dépression créée par le fonctionnement de la cheminée solaire qui assure le tirage de l'air par effet de cheminée durant le jour par le rayonnement solaire et dans la période nocturne par la chaleur stockée dans la masse thermique de la cheminée. Par contre la ventilation naturelle est prouvée par deux ouvertures (fenêtre de $1 \times 1 \text{ m}^2$) si la température de l'air extérieur est inférieur de la température intérieure de la cellule (si $T_{ae} \leq T_{ai}$).

II. MODELISATION DE PUIITS CLIMATIQUE .

La modélisation de la température de l'air de soufflage (T_{ap}) dépendant des paramètres relatifs au sol et les paramètres relatifs au puits, donc elle sera répartie en deux :

- Modélisation de la température du sol.
- Modélisation de la température de l'air dans le tube.

II.1. MODELISATION DE LA TEMPERATURE DU SOL . [Thiers, 2008]

Le sol y est considéré comme un milieu homogène et invariable, caractérisé par une conductivité thermique (λ_{sol}), une masse volumique (ρ_{sol}) et une capacité calorifique massique (C_{sol}). La variation temporelle du taux d'humidité du sol due à l'infiltration d'eau est négligée et aucune nappe phréatique n'est prise en compte sous la zone d'implantation du puits climatique.

Le sol est considéré comme un massif semi-infini. Exposé sur sa surface par des fluctuations des températures d'un signal sinusoïdal, donc le modèle expose des solutions sinusoïdales lors de l'excitation ou les amplitudes, valeurs moyennes et déphasages varient en fonction de la profondeur considérée. Plus la profondeur est grande plus la fluctuation est amorti et retarder.

Le signal de température sinusoïdal, de pulsation ω , appliqué à la surface d'un massif semi-infini ; est donné par la relation :

$$T_{surf} = \overline{T_{surf}} + A_{surf} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_{surf}) \quad (1).$$

L'équation de la chaleur $\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ appliquée sur le sol, donne la solution suivante :

$$T(z, t) = \overline{T_{surf}} + A_{surf} \cdot \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \varphi_{surf} - \frac{z}{\delta}\right) \quad (2)$$

Avec :

$$\delta = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} : \text{Profondeur de pénétration de la chaleur en [m].} \quad (3)$$

$$a = \frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol} c_{sol}} : \text{Diffusivité thermique du sol en [m}^2\text{/s].} \quad (4)$$

Pour être appliqué au cas du sol, cette solution nécessite la connaissance de la température de surface du sol en fonction du temps ; la période temporelle d'étude nécessaire est d'une année. Pour évaluer cette température, un bilan thermique est réalisé à la surface du sol. Les échanges thermiques sont multiples; premièrement au niveau de la surface du sol l'échange avec l'atmosphère (convection sensible due au vent et latente due à l'évaporation) et l'échange avec l'hémisphère (rayonnement solaire reçu et le rayonnement terrestre émis vers le ciel).

Deuxièmement à l'intérieur de la couche de sol, les échanges conductifs sont dominants sur les échanges convectifs (infiltration d'eau, nappe phréatique) et radiatifs (milieu dense et opaque). Enfin, la puissance géothermique provenant du manteau terrestre, sera négligée en première approximation ou cette puissance pourra être ajoutée au modèle. Voir figure (III.2).

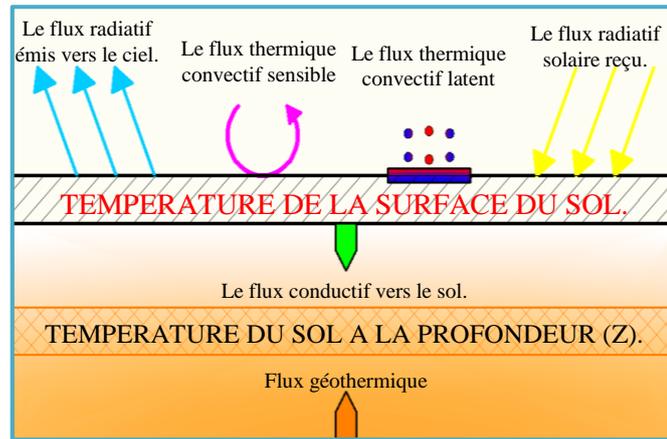


Fig. III.2 : représentation schématique d'échange thermique dans un sol peu profond.

$$\Phi_{cond} = (\Phi_{rad_r} - \Phi_{rad_{sc}}) + (\Phi_{conv_{sens}} - \Phi_{conv_{lat}}) \quad (5)$$

$$\Phi_{cond} = -\lambda_{sol} \frac{dT_{sol}}{dz} \Big|_0 \quad (6)$$

$$\Phi_{rad_r} = (1 - alb)G \quad (7)$$

$$\Phi_{rad_{sc}} = \epsilon_{sol} \cdot \sigma \cdot (T_{surf_{sol}}^4 - T_{ciel}^4) \quad (8)$$

$$\Phi_{cov_{sens}} = h_{surf} \cdot (T_{ae} - T_{surf_{sol}}) \quad (9)$$

$$\Phi_{conv_{lat}} = c_{lat} \cdot f \cdot h_{surf} \cdot [(a_{lat} \cdot T_{surf_{sol}} + b_{lat}) - r_a(a_{lat} \cdot T_{ae} + b_{lat})] \quad (10)$$

Le bilan est simplifié :

$$\Phi_{conv_sens} - \Phi_{rad_sc} = h_{eq}(T_{ae} - T_{surf_sol}) \quad (11)$$

alb : Albédo de la surface du sol.

$$a_{lat} = 103 \text{ Pa/K}$$

$$b_{lat} = 609 \text{ Pa}$$

$$c_{lat} = 0,0168 \text{ K/Pa}$$

f : Un paramètre empirique sans unité. Pour un sol nu : saturé : $f = 1$; humide $f = 0,6$ à $0,8$; sec : $f = 0,4$ à $0,5$; aride : $f = 0,1$ à $0,2$. Pour un sol couvert de végétation, cette valeur doit être multipliée par $0,7$.

h_{surf} : Le coefficient d'échange par convection du sol avec l'air calculé est par la formule : $h_{surf} = 0,5 + 1,2\sqrt{\bar{v}_{vent}}$

v_{vent} : Vitesse du vent au niveau du sol.

r_a : Humidité relative de l'air.

L'expression des solutions de ce bilan fait appel aux deux coefficients d'échange suivants :

$$h_e = h_{eq} + h_{surf} \cdot c_{lat} \cdot a_{lat} \cdot f \quad (12)$$

$$h_r = h_{eq} + h_{surf} \cdot c_{lat} \cdot a_{lat} \cdot f \cdot r_a \quad (13)$$

h_{eq} : vaut $12,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour un sol abrité du vent, $20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour un sol moyennement exposé au vent et $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour un sol particulièrement exposé au vent.

Ces paramètres sont tous considérés comme des valeurs moyennes annuelles.

À partir d'une décomposition en série de Fourier des sollicitations météorologiques (rayonnement solaire G , température de l'air T_{ae}) sur une période fondamentale d'un an, ce bilan permet d'exprimer la température de surface du sol comme une somme de fonctions sinusoïdales du temps.

$$X(t) = \bar{X} + \sum_{n=1}^N a_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^N b_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) \quad (14)$$

En se limitant au fondamental ($N=1$), appliqué sur $T_{ae}(t)$ et $G(t)$.

$$T_{ae}(t) = \bar{T}_{ae} + a_T \cdot \sin(\omega \cdot t) + b_T \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (15)$$

$$G(t) = \bar{G} + a_G \cdot \sin(\omega \cdot t) + b_G \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (16)$$

Ou, moyenne annuelle de température (\bar{T}_{ae}) et moyenne annuelle du rayonnement solaire incident (\bar{G}) .

$$\bar{T}_{ae} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{ae}(i) \quad (17)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} G(i) \quad (18)$$

a_T, b_T, a_G et b_G sont :

$$a_T = \frac{2}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{ae}(i) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12} \cdot i\right) \quad (19)$$

$$b_T = \frac{2}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{ae}(i) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12} \cdot i\right) \quad (20)$$

$$a_G = \frac{2}{12} \sum_{i=1}^{12} G(i) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12} \cdot i\right) \quad (21)$$

$$b_G = \frac{2}{12} \sum_{i=1}^{12} G(i) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12} \cdot i\right) \quad (22)$$

Les paramètres des amplitudes et les déphasages de $T_{ae}(t)$ et $G(t)$.

$$A_T = \sqrt{a_T^2 + b_T^2} \quad (23)$$

$$A_G = \sqrt{a_G^2 + b_G^2} \quad (24)$$

$$\varphi_T = \cos^{-1}\left(\frac{a_T}{A_T}\right) \quad (25)$$

$$\varphi_G = \cos^{-1}\left(\frac{a_G}{A_G}\right) \quad (26)$$

$$T_{surf_sol}(t) = \bar{T}_{surf_sol} + A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_T) + A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_G) \quad (27)$$

$$\bar{T}_{surf_sol} = \frac{(1 - alb) \cdot \bar{G} + h_r \cdot \bar{T}_{ae} + (h_r - h_e) \cdot \frac{b_{lat}}{a_{lat}}}{h_e} \quad (28)$$

$$A_1 = \frac{h_r \cdot A_T}{h_e} \quad (29)$$

$$A_2 = \frac{(1 - alb) \cdot A_G}{h_e} \quad (30)$$

ω : Pulsation d'oscillation en [rad/s].

$$\omega = \frac{2\pi}{\text{période}} \quad (31)$$

L'équation de chaleur aura la solution qui donne la température du sol à toute profondeur et à tout instant :

$$T_{sol}(z, t) = \bar{T}_{surf_sol} + A_1 \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \sin\left(\omega t - \varphi_T - \frac{z}{\delta}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \sin\left(\omega t - \varphi_G - \frac{z}{\delta}\right) \quad (32)$$

En pratique, l'effet géothermique peut être représenté par une fonction linéaire, indépendante du sol : $Geo(z) = geo \cdot z$ avec geo , le gradient thermique en K/m. Ce coefficient pourra être pris égal à 0,2 K/m, compte tenu des mesures réalisées par l'INSA de Toulouse (INSA, 2004). En raison de la faible profondeur d'enfouissement d'un puits climatique, ce terme aura un effet assez réduit sur la température du sol. Cette modélisation rend possible le calcul de la température du sol pour toute profondeur, à toute heure de l'année.

L'expression finale de la température du sol est :

$$T_{sol}(z, t) = \bar{T}_{surf_sol} + A_1 \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \sin\left(\omega t - \varphi_T - \frac{z}{\delta}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \sin\left(\omega t - \varphi_G - \frac{z}{\delta}\right) + 0.2 \cdot z \quad (33)$$

Tableau.IV.1 : Les données climatiques de la ville de Ghardaïa.

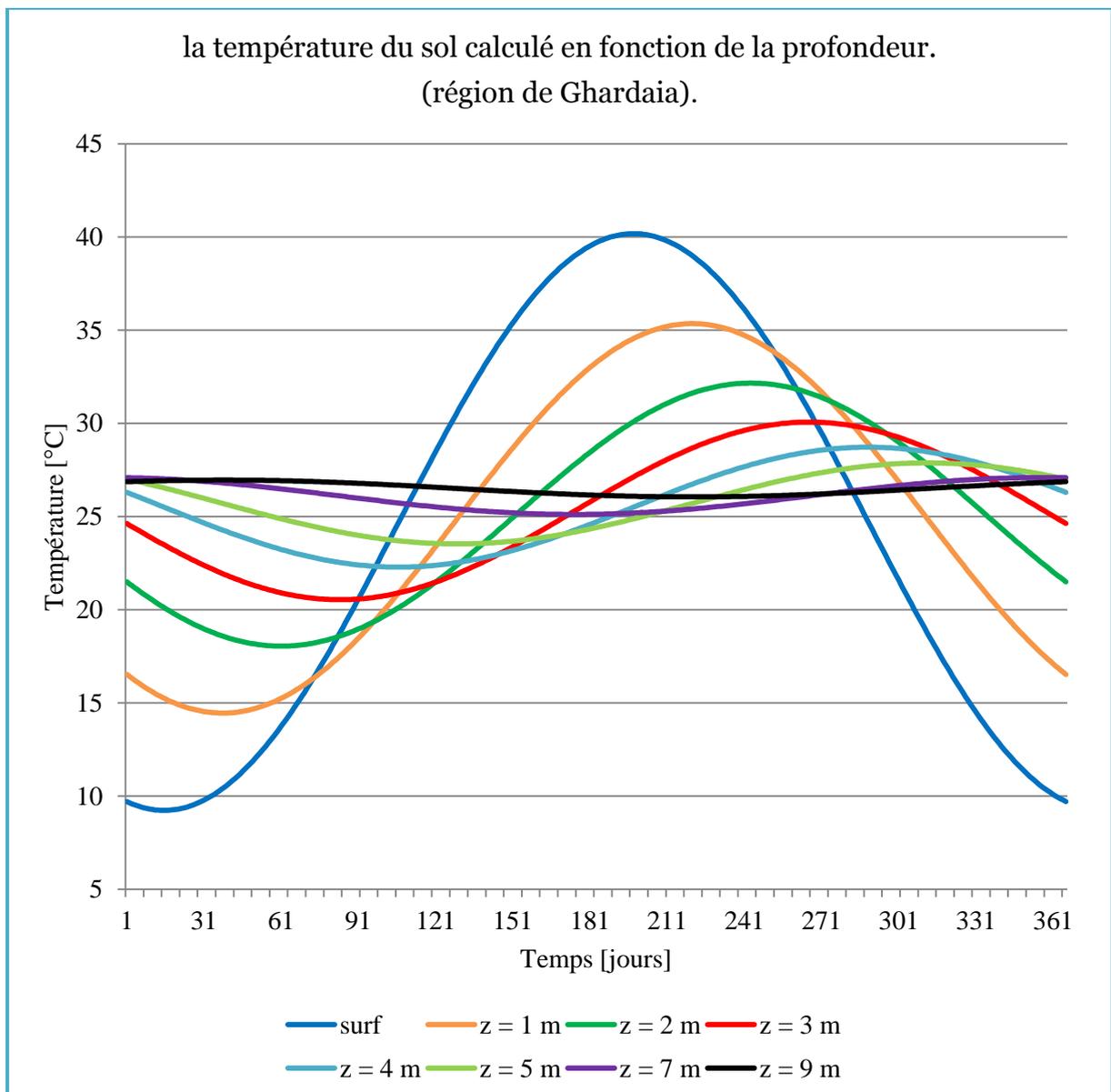
MOIS	T_{moy} [°C]	MMU [%]	T_{surf_sol} [°C]	Rayon.so.moy. [w/m²]	Moy.vent [m/s]
JANVIER	13,04	42,2	/	196,23	3,7
FEVRIER	14,18	38,4	/	274,35	4,18
MARS	17,52	36,4	/	382,23	4,59
AVRIL	22,7	31,2	/	454,77	4,82
MAI	26,75	27,8	30,62	475,23	4,78
JUIN	31,42	25	35,26	495,69	4,34
JUILLET	32,74	20	40,37	488,25	3,7
AOÛT	34,24	25	39,44	442,68	3,82
SEPTEMBRE	30,14	34	34,51	370,14	3,58
OCTOBRE	24,53	40,6	/	282,72	3,82
NOVEMBRE	17,99	49,6	/	203,67	3,6
DECEMBRE	12,754	54,6	/	164,61	3,65

Tableau. IV.2 : Les caractéristiques d'un sol à Ghardaïa (sol d'installation de puits).

Masse volumique. [kg/m ³]	Chaleur spécifique. [J/kg.K]	Conductivité thermique. [w.m/K]	Albédo
1725	1570	1.75	0.35

Tableau IV.3 : température mensuelle calculé du sol a une profondeur z pour une période estivale.

Mois.	mai	Juin	juillet	aout	Septembre
Z=3.0	20.98	23.17	25.61	27.67	28.73
Z=3.5	20.92	22.51	24.50	26.36	27.59
Z=4.0	21.04	22.13	23.69	25.33	26.56



II.2. MODELISATION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR DANS LE TUBE.
 [Maerefat, Haghghi (2010)]

Le modèle suppose que le puits se constitue de tubes parallèles également distants les uns des autres sur un plan horizontal. Ces tubes sont alimentés par un distributeur d'entrée et l'air est évacué en sortie par un collecteur. Voir figure (IV.4).

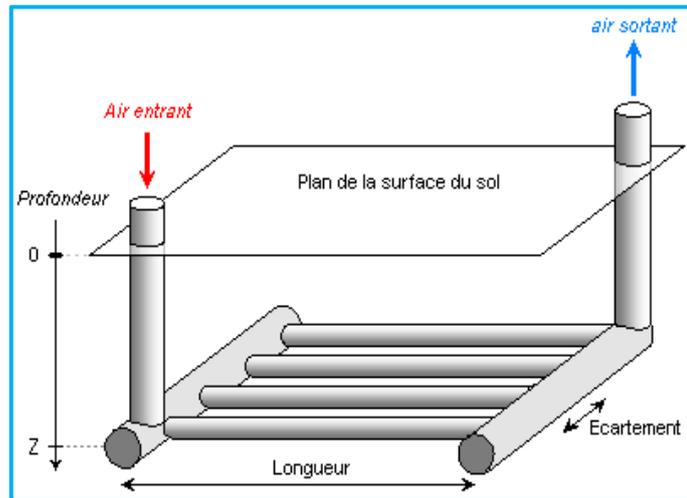


Fig. IV.4 : Positionnement et géométrie du puits.

Seul l'échange thermique au niveau des tubes est considéré. Les tubes sont supposés identiques et le sol est supposé présenter des propriétés homogènes autour des tubes.

Un bilan thermique en tout point du tube permet de déduire le profil de température de l'air en toute distance x de l'entrée. Le bilan énergétique d'une longueur différentiel du puits peut être exprimé sous la forme suivante:

$$T_{a_tube} - T_{sol} = \frac{d\theta}{dx} R_{total} \quad (34)$$

R_{total} : Résistance thermique globale.

$$R_{total} = R_{conv-tube} + R_{tube} + R_{sol} \quad (35)$$

$R_{conv-tube}$: Résistance thermique dû à la convection de chaleur transférer entre l'air dans le tuyau et la surface intérieure du tuyau.

$$R_{conv-tube} = \frac{1}{2\pi \cdot L_{tube} \cdot h_{a_tube}} \quad (36)$$

h_{a_tube} : Coefficient de transfert de chaleur par convection à l'intérieur du tuyau.

$$h_{a_tube} = \frac{Nu_{tube} \cdot \lambda_{a_tube}}{D_{in_tube}} \quad (37)$$

Le nombre de Nusselt pour l'écoulement de l'air dans le tuyau avec une surface interne lisse dépend de nombre de Reynolds, exprimé :

$$Nu = 3.66 \quad \text{si } Re < 2300 \quad (38.a)$$

$$Nu = \frac{\xi/8 (Re - 1000)Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\xi/8} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad \text{si } 2300 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \quad (38.b)$$

Ou $\xi = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2}$ si $2300 \leq Re$

Pr : Le nombre de Prandtl ; Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement μ (ou viscosité) et la diffusivité thermique.

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \quad (39)$$

R_{tube} : Résistance thermique des tubes. L'analyse à état stationnaire donne la résistance thermique de l'anneau de tuyaux :

$$R_{tube} = \ln \left(\frac{(D_{in_tube}/2) + e_{tube}}{(D_{in_tube}/2)} \right) / 2\pi \cdot \lambda_{tube} \cdot L_{tube} \quad (40)$$

R_{sol} : Résistance thermique entre le puits et le sol de pénétration; donné par la relation suivante :

$$R_{sol} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{tube} \cdot L_{tube}} \ln \left(1 + \frac{\delta}{(D_{in_tube}/2) + e_{tube}} + \sqrt{\left(1 + \frac{\delta}{(D_{in_tube}/2) + e_{tube}} \right)^2 - 1} \right) \quad (41)$$

Le bilan énergétique du fluide circulant est donnée par :

$$d\emptyset = -\dot{m}c_a \cdot \frac{dT_{a_tube}}{dx} dx \quad (42)$$

Équations. (34) et (42) donnent l'équation différentielle globale du bilan énergétique sous la forme:

$$\begin{cases} \frac{dT_{a_tube}}{dx} + \frac{T_{a_tube}}{\dot{m}c_a R_{total}} \\ T_{a_tube} = T_{ae} \cdot \text{Quant } x = 0 \end{cases} \quad (43)$$

La solution de l'équation (43) peut être exprimée sous la forme:

$$T_{a_tube}(x) = T_{sol} + (T_{ae} - T_{sol}) \exp \left(-\frac{x}{\dot{m}c_a R_{total}} \right) \quad (44)$$

III. MODELISATION DE CHEMINEE SOLAIRE . [Maerefat, Haghghi (2010)]

Pour estimer le taux de rafraîchissement et de ventilation de la cellule équipé du système étudié ; il est important de déterminer le taux d'air qui peuvent être traité sous une conception particulière et sous des conditions de fonctionnement. Un bilan énergétique global de la cheminée est considéré. Cela inclut les bilans énergétiques de couvercle en verre mur, le mur de l'absorbeur noir, et l'air entre les deux. Les principales hypothèses qui sont utilisées dans la modélisation peuvent être résumées comme suit: Entrée d'air de la cheminée est considérée comme ayant la température moyenne de l'air de la chambre même et la ventilation naturelle n'est pas incluse. Seule la force de flottabilité est considérée quand le système est ouvert. La figure (IV.5) représente le transfert de chaleur dans un élément de la cheminée solaire.

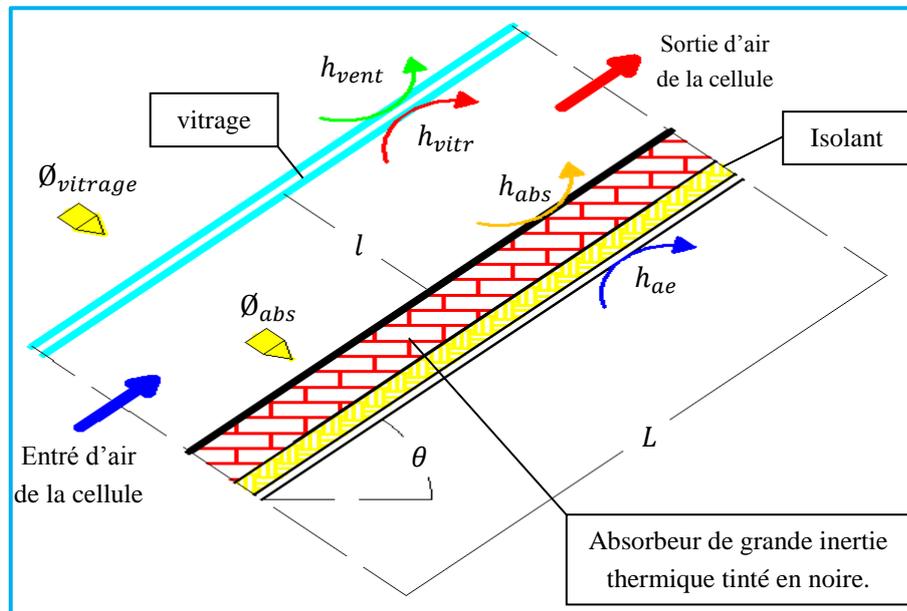


Fig. IV.5 : Schéma représente le transfert de chaleur dans un élément de la cheminée solaire.

$$\begin{aligned}
 G_{vitr} \cdot S_{vitr} + hr_{abs-vitr} \cdot S_{abs} (T_{abs} - T_{vitr}) \\
 = \\
 h_{vitr} \cdot S_{vitr} (T_{vitr} - T_{a_cs}) + U_{vitr_ae} \cdot S_{vitr} (T_{vitr} - T_{a_cs})
 \end{aligned}
 \tag{45}$$

Le coefficient global de transfert de chaleur à partir du vitrage a l'air extérieur peut être écrite comme :

$$U_{vitr-ae} = h_{vent} + hr_{vitr-ciel} + h_{vitr-ae}
 \tag{46}$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection à cause du vent est donné par :

$$h_{vent} = 2.8 + 3v_{vent} \quad (47)$$

Le flux solaire thermique de rayonnement absorbé par le vitrage est donné par :

$$G_{vitr} = \alpha_{vitr} \cdot I \quad (48)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement à partir de la surface de vitrage extérieure au ciel renvoyée à la température de l'air extérieur est obtenue à partir de:

$$hr_{vitr-ciel} = \frac{\sigma \varepsilon_{vitr} (T_{vitr} + T_{ciel})(T_{vitr}^2 + T_{ciel}^2)(T_{vitr} - T_{ciel})}{T_{vitr} - T_{ae}} \quad (49)$$

Où, la température de ciel est : $T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_{ae}^{1.5}$

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage peut être obtenu à partir de :

$$hr_{abs-vitr} = \frac{\sigma (T_{vitr}^2 + T_{abs}^2)(T_{vitr} + T_{abs})}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{vitr}}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{abs}}\right) - 1} \quad (50)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre le vitrage et le débit d'air dans la cheminée :

$$h_{vitr} = Nu_{vitr} \cdot \lambda_{a_{cs}} / L_{vitr} \quad (51)$$

Où

$$\text{Nombre de Nusselt : } Nu_{abs} = 0.6 (Gr_{abs} \cos \theta Pr_{a_{cs}})^{0.2} \quad (52)$$

$$\text{Nombre de Grashof : } Gr_{abs} = g \beta G_{abs} \left(\frac{(L_{abs})^4}{\lambda_{abs} \cdot \nu_{a_{cs}}^2} \right) \quad (53)$$

L'équation de l'équilibre énergétique pour l'écoulement de l'air dans la cheminée est :

$$h_{abs} S_{abs} (T_{abs} - T_{a_{cs}}) + h_{vitr} S_{vitr} (T_{vitr} - T_{a_{cs}}) = -\dot{m} c_{a_{cs}} (T_{a_{cs}} - T_{a_{cel}}) / \gamma \quad (54)$$

La température moyenne de l'air axiale était déterminée expérimentalement de suivre la forme non linéaire :

$$T_{a_{cs}} = \gamma T_{a_{cs_o}} + (1 - \gamma) T_{a_{cs_{in}}} \quad (55)$$

La constante γ est prise comme 0,74.

L'équation de bilan énergétique de l'absorbeur est écrite comme :

$$\begin{aligned}
 G_{abs}S_{abs} &= h_{abs}S_{abs}(T_{abs} - T_{acs}) \\
 &+ \\
 hr_{abs-vitr} \cdot S_{abs} &(T_{abs} - T_{vitr}) \\
 &+ \\
 U_{abs-ae}S_{abs} &(T_{abs} - T_{ae})
 \end{aligned}
 \tag{56}$$

Le coefficient de transfert thermique global de l'arrière de la paroi de l'absorbeur à la température ambiante U_{abs-ae} est donné par :

$$U_{abs-ae} = 1 / \left(\frac{1}{h_{ae}} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} \right)
 \tag{57}$$

h_{ae} : A été pris comme 2,8 w/m²K.

IV. MODELISATION DE LA TEMPERATURE ET DE LA VENTILATION DE LA CELLULE. [Maerefat, Haghighi (2010)]

Effet de cheminée provoque le mouvement de l'air ; il est entraîné par la flottabilité, due à une différence dans la densité de l'air à l'intérieur et à l'extérieur résultant de différences de la température et d'humidité. Une cheminée chauffée par l'énergie solaire ou l'énergie peut être utilisée pour entraîner l'effet de cheminée, sans augmenter la température intérieur.

Les pertes de friction en raison de l'écoulement du fluide à travers les tubes et à travers les raccords, abstenir de l'écoulement du fluide. Si la pression de flottabilité surmonte la somme de toutes les pertes de pression du flux, la ventilation naturelle peut avoir lieu. (À la forme de ventilation nocturne ou absence rayon solaire)

L'effet de cheminée peut être calculé par l'équation suivante :

$$Ef_{cs} = (\rho_{ae} - \rho_{a_{cs_o}})gL_{cs} \cdot \sin \theta - \left(\sum_{i=6}^7 c_i + \xi_{cs} \frac{L_{cs}}{(D_{hyd})_{cs}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{a_{cs_o}} \cdot v_{cs}^2}{2} \right)
 \tag{58}$$

Où c_i sont les coefficients de perte de pression aux emplacements qui sont indiqués dans la figure (III.01). La première partie de l'équation (58) est l'effet théorique de la cheminée et la deuxième partie est la perte de charge de la cheminée.

La perte de pression des tubes est exprimée dans l'équation :

$$\Delta P_{tube} = \left(\sum_{i=1}^5 c_i + \xi_{tube} \frac{L_{tube}}{D_{in,tube}} \right) \left(\frac{\rho_{a,tube} \cdot v_{a,tube}^2}{2} \right) \quad (59)$$

La variation de température de l'air dans le tuyau vertical est ignorée. La température de l'air à l'entrée de la cheminée solaire est supposée être identique à la température de l'air de la cellule qui est plus élevée que la température de l'air refroidi à la sortie du tuyau.

Ainsi, les effets de cheminée, les effets de puits et les effets de la cellule peut être exprimé comme :

$$Ef_{tube} = (\rho_{a,cel} - \rho_{a,tube})gH_{tube-cel} \quad (60)$$

$$Ef_{cel} = (\rho_{a,cs,in} - \rho_{a,cel})gH_{cel,in-cs,in} \quad (61)$$

L'effet nécessaire pour le système de refroidissement est la somme de la perte de pression dans les tubes et la pression négative de l'effet du puits plus l'effet de la cellule.

$$Ef_{syst} = \Delta P_{tube} - Ef_{tube} + Ef_{cel} \quad (62)$$

Dans des conditions stationnaires, nous pouvons écrire:

$$Ef_{sys} = Ef_{cs} \quad (63)$$

Le débit de masse d'air à la cheminée et au puits est identique en l'absence d'infiltration d'air ou :

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v|_{cs,o} = \rho \cdot S \cdot v|_{cs,in} = \rho \cdot S \cdot v|_{tube} \quad (64)$$

En élargissant l'équation (63) et l'utilisation de l'équation (64), la vitesse de l'air dans la cheminée solaire peut être obtenue sous la forme:

$$v_{cs} = \sqrt{\frac{\text{Conditions de flottabilité}}{\text{Conditions de friction}}} \quad (65)$$

$$\text{flottabilité} = 2 \left((\rho_{ae} - \rho_{a,cs,o})gL_{cs} \cdot \sin \theta - Ef_{tube} - Ef_{cel} \right) \quad (66)$$

$$\begin{aligned}
 fraction = & c_6 \left(\frac{\rho_{a_cs_o} S_{cs_o}}{\rho_{a_cel} S_{cs_in}} \right)^2 \cdot \rho_{a_cel} + \left(c_7 + \xi_{cs} \frac{L_{cs}}{(D_{hyd})_{cs}} \right) \cdot \rho_{a_cs_o} \\
 & + \left[\left(\sum_{i=1}^5 c_i + \xi_{tube} \frac{L_{tube} + H_{tube-cel} + z}{D_{tube}} \right) \left(\frac{\rho_{a_cs_o} S_{cs_o}}{\rho_{a_tube} S_{tube}} \right) \right] \rho_{a_tube} \quad (67)
 \end{aligned}$$

Le taux de renouvellement d'air (ACH) est un des principaux critères du confort thermique :

$$ACH = \frac{3600 \cdot \dot{m}}{\rho_{a_cs} \cdot V_{cel}} \quad (69)$$

La température de l'air de la cellule qui est en fonction de l'apport de chaleur de la cellule est obtenue par l'équation suivante :

$$T_{cel} = T_{a_tube_o} + \frac{\Phi_{cel}}{\dot{m} c_{a_tube}} \quad (68)$$

Φ_{cel} : est la somme des chaleurs acquies dans la cellule à travers les parois et la chaleur générée par des sources de chaleur internes.

Chapitre V.

Simulation du système de refroidissement passif par l'accouplement de puits climatique a une cheminée solaire

I. INTRODUCTION .

La température de l'air extérieur est en fonction de différents paramètres climatiques qui déterminent le climat d'une région ; la connaissance du climat est nécessaire avant toute étude et simulation d'un système. Les logiciels de simulation aident à la conception et permettent d'estimer l'ambiance thermique intérieur par évaluation des paramètres physiques influençant le confort thermique afin d'obtenir un environnement thermique agréable.

I.1. DONNES CLIMATIQUES DE LA VALLEE DE M'ZAB .

Le système étudié est considéré implanté à Ghardaïa située dans la partie sud de l'Algérie à 600 km de la capitale Alger. Les données astronomiques de la ville 32° 29' 00" Nord, 3° 41' 00" Est. La vallée de M'Zâb est caractérisée en été par un climat chaud et sec, un ciel souvent bien dégagé et une hygrométrie très faible. Les rayonnements directs et diffus sont très importants, ou la durée journalière est très longue et l'insolation atteint en été presque 16 heures.

I.1.1. LA TEMPERATURE .

Les températures mensuelles enregistrées pour la période 2010-2014 représentées dans la figure (V.1). La température moyenne annuelle est 23,25 °C. La saison chaude dure entre la deuxième moitié du mois du Mai jusqu'à la première moitié de mois de Septembre. Le mois le plus chaud est juillet avec température maximale de 47 °C et minimale de 22.2 °C. Le mois le plus froid est Décembre avec une température maximale de 27 °C et minimale de 0 °C l'amplitude moyenne journalière abouti les 22,8 °C.

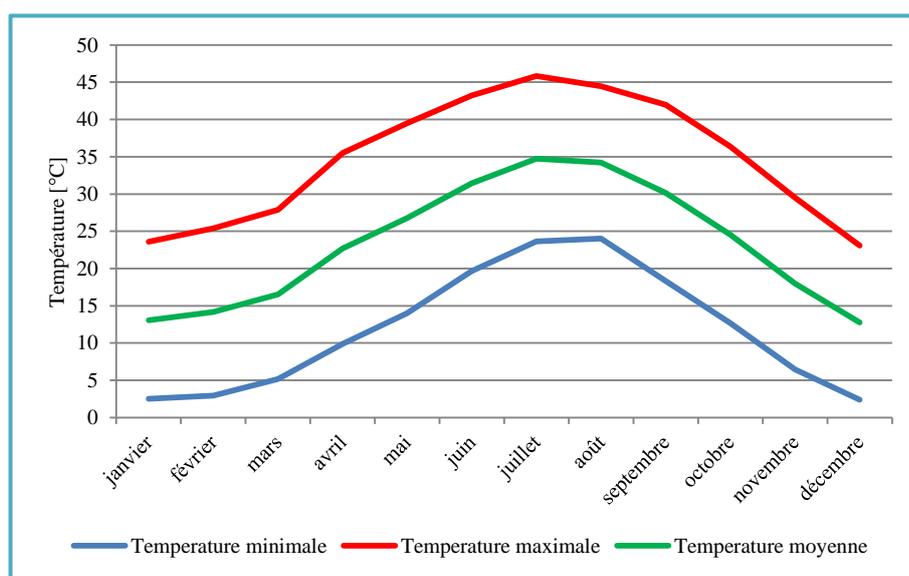


Fig. V.1 : Graphe des températures de l'air minimales et maximales mensuelles moyennes entre [2010-2014].

I.1.2. LES PRECIPITATIONS .

Les pluies sont rares et irrégulières ou la sécheresse dure pour de longues périodes. Sur l'ensemble de l'année, les formes les plus courantes de la précipitation sont des orages (39%), des pluies modérées (29%) et faibles pluies (28%). voir la figure (V.2).

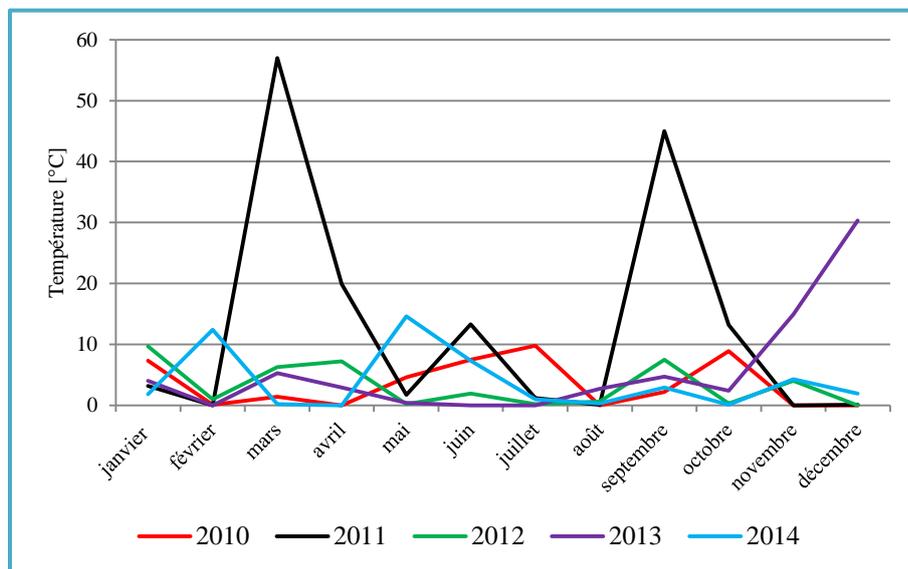


Fig. V.2 : Graphe des précipitations mensuelles entre [2010-2014].

I.1.3. L'HUMIDITE RELATIVE ET L'EVAPORATION .

Parmi les paramètres les plus influents sur le confort thermique, l'humidité relative reste faible durant l'année d'une moyenne de 35,4%. La figure (V.3) présente l'humidité et l'évaporation ; les moyennes maximales sont enregistrées dans la période hivernale de 66% dans le mois de Décembre par contre les moyennes minimales sont enregistrées dans la période estivale de 14% dans le mois de juillet. L'évaporation est la conséquence des moyennes et des amplitudes thermiques élevées, ainsi que de l'agitation de l'air par suit du vent elle est très intense, surtout lorsqu'elle est renforcée par les vents chauds.

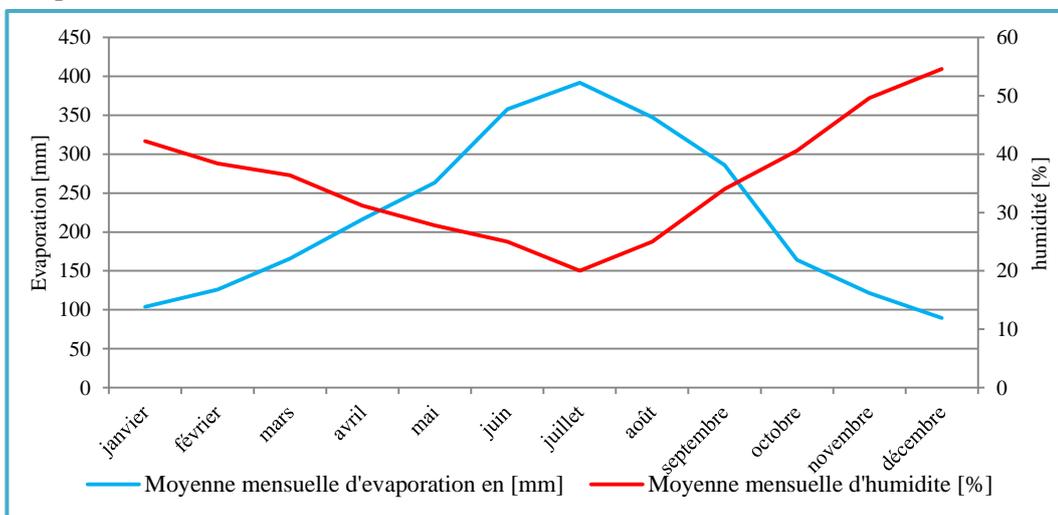


Fig. V.3 : Représentation graphique de l'humidité relative mensuelle de l'air et l'évaporation mensuelle durant la période [2010-2014].

I.1.4. L'INSOLATION.

La durée moyenne de l'insolation est de 287.76 heures/mois, avec un maximum de 341,2 heures en Juin et un minimum de 243,2 heures en mois de Décembre. D'après la figure (V.4) la durée d'insolation moyenne annuelle entre 2010 et 2014 est de 3453,2 heures/an, soit approximativement 9,46 heures/jour.

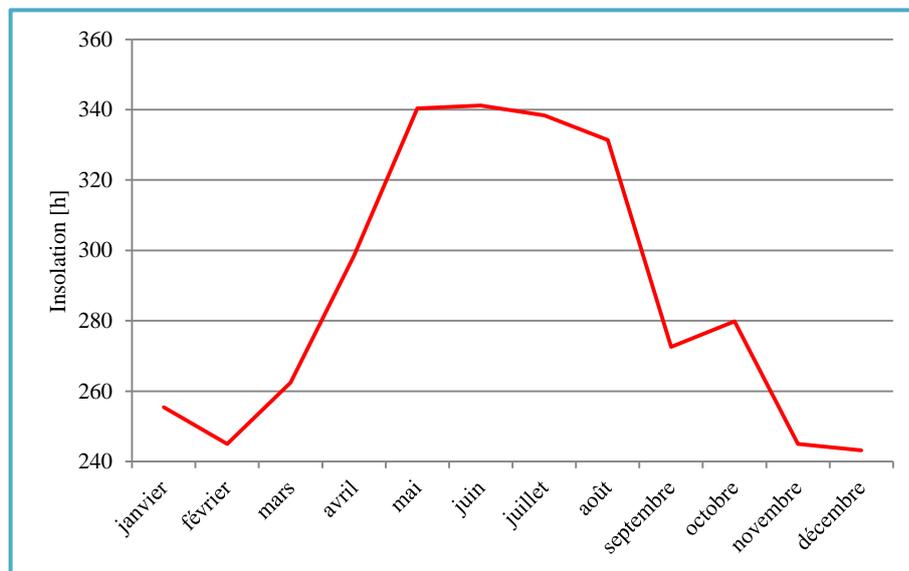


Fig. V.4 : Durée mensuelle d'isolation durant la période [2010-2014].

I.1.5. LES VENTS.

Selon la figure (V.5) Au cours de l'année les vitesses typiques de vent varient de 0 m/s à 9 m/s. ils dépassant rarement 13 m/s. la moyenne des vitesses maximale du vent est 5 m/s enregistré 13 Avril, avec une vitesse maximale quotidienne de 8 m/s. la moyenne vitesse minimale du vent est 3 m/s enregistré autour 21 Octobre, avec une vitesse maximale quotidienne de 6 m/s. les deux figures (V. 6, 7) résument les directions des vents et leur fréquences.

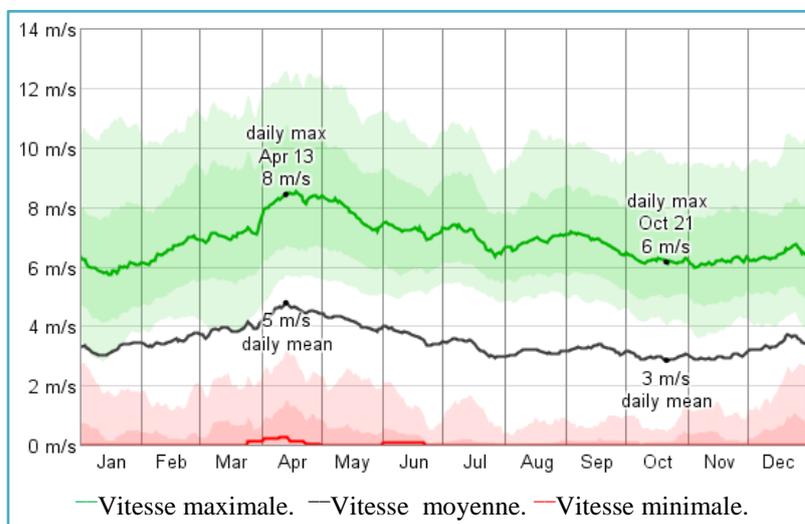


Fig. V.5 : Vitesse des vents enregistrés entre [2000-2012].

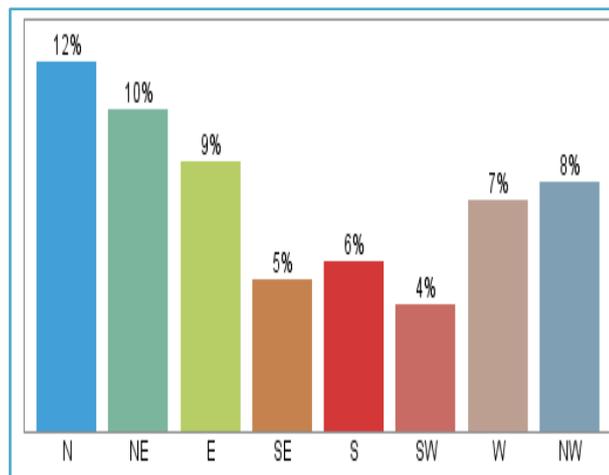


Fig. V.6 : La moyenne de la direction du vent durant une année enregistré entre [2000-2012].

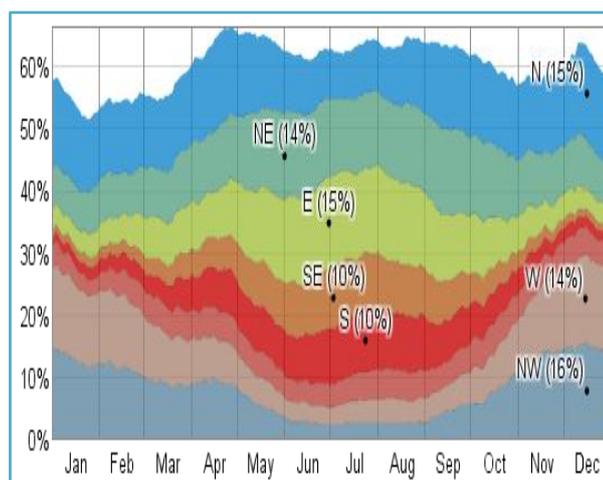


Fig. V.7 : Fraction du temps passé avec différentes directions de vent enregistré entre [2000-2012].

I.2. OUTIL D'AIDE A LA SIMULATION .

Les simulations thermiques dynamiques sont employées afin d'obtenir de façon déterminée des évaluations précises du fonctionnement des bâtiments. L'objectif est une maîtrise de tous les échanges énergétiques afin de concevoir des bâtiments neufs à haute efficacité et de rechercher des solutions d'amélioration efficaces. Afin de quantifier et réduire les écarts pour le temps et le cout durant la vie du bâtiment pour qu'il soit plus durable. La variation des paramètres d'entrée est rendu possible par l'augmentation de la puissance de calcul des stations de travail et par la généralisation les outils de simulation dynamique. Ces logiciels de simulation intègrent généralement des options permettant de faire des analyses paramétriques ou peuvent être couplés à de tels outils, comme EnergyPlus.

Le logiciel de simulation EnergyPlus a été choisi pour de nombreuses raisons. C'est un outil complet, gratuit et multiplateforme avec un développement important et une capacité de simulation des systèmes énergétiques développée. Il dispose d'entrées et de sorties au format texte et peut être utilisé en parallèle sans interface graphique. De plus, il a fait l'objet de nombreuses validations et dispose d'un fort soutien de la communauté scientifique qui permet : la calibration de modèle, un indice de confiance sur les résultats et a la recherche de solution pour le système étudié. Pour atteindre ce but on suit les étapes suivantes : préciser les variables, simuler ; collecter les résultats et calculer l'effet en fin interpréter et présenter les résultats.

I.3. TEMPERATURE DU SOL EN FONCTION DE LA PROFONDEUR.

Les variations de température de l'air extérieur selon les saisons, dans la région n'ont pas un grand effet sur les températures du sol à une profondeur considéré, due à la grande inertie thermique du sol. En profondeur les fluctuations sont généralement faibles ; voir figure (V.8). Ainsi l'alternance des jours et des nuits, ou la succession d'une journée ensoleillée avec une journée nuageuse, aura un impact mesurable sur la température de la partie superficielle du sol. Mais n'aura pas d'incidence mesurable sur les parties plus profondes du sol, qui mettant plus longtemps à se réchauffer, ne réagissent qu'à des variations longues de températures. Ou le réchauffement ou refroidissement du sol provoqué par les changements de saisons se réalise avec un décalage dans le temps et une baisse d'amplitude avec l'accroissement de la profondeur. Le tableau (V.1) donne la température calculé dans une saison estivale pour trois profondeurs différentes a partir du model analytique développé dans le chapitre 4 et les données climatiques.

Dans un climat torride et en mode rafraichissement, on cherche un amortissement annuel ou saisonnier. En saison froide la chaleur capté est stocké dans le sol sera utiliser en hiver ; voir figure (V.8).

Tableau V.1 : la température calculée pour la saison estivale pour trois profondeurs différentes.

Mois	Période	Z=3m	Z=3.5m	Z=4m
Mai	01-15	21,91	22.13	22.52
	16-31	22.87	22.79	22.93
Juin	01-15	23.99	23.61	23.50
	16-30	25.25	24.59	24.24
Juillet	01-15	26.50	25.63	25.06
	16-31	27.67	26.65	25.91
Aout	01-15	28.67	27.58	26.74
	16-31	29.43	28.35	27.47
Septembre	01-15	29.90	28.92	28.07
	16-30	30.05	29.23	28.47

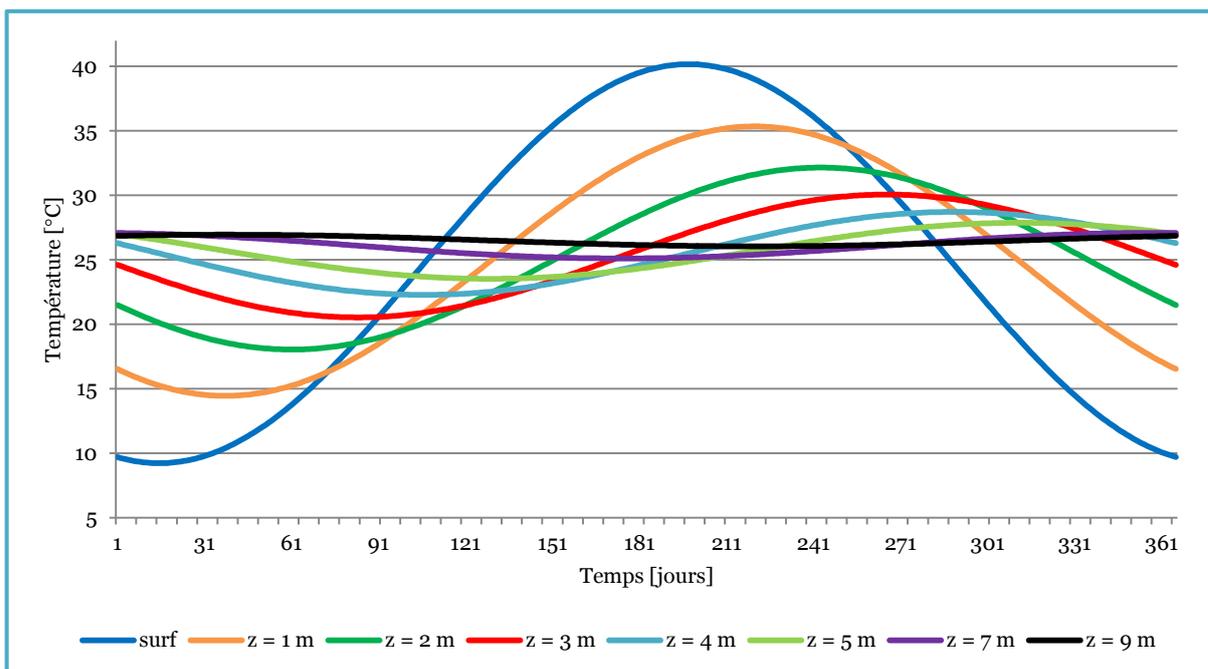


Fig. V.8 : Température du sol calculé en fonction de la profondeur.

II. CONCEPTION ET DESCRIPTION DU SYSTEME .

Afin d'évaluer l'effet de système de refroidissement passive, deux cellules identiques (A) et (B) de forme cubique de 27 m^3 sont étudiées. Les quatre façades sont orientées perpendiculairement sur les orientations principales (Nord, Sud, Est, Ouest). Deux ouvertures de forme carrée de 1 m^2 opaque (bois) afin d'éliminer les apports solaires sont prévues dans les façades Est et Ouest de chaque cellule pour la ventilation naturelle quand la température intérieure est supérieure à la température extérieure (si $T_{ai} \geq T_{ae}$). Les murs extérieurs se composent de l'extérieur à l'intérieur de mortier de ciment de 2 cm, deux parois de brique perforée de 10 cm séparé de 4 cm de polystyrène et un revêtement intérieur de 2 cm de plâtre. Le plafond se compose de l'extérieur à l'intérieur béton armé de 10 cm isolé thermiquement par polystyrène de 8 cm et à l'intérieur de 2 cm de plâtre. Le plancher se compose de l'extérieur à l'intérieur d'une isolation de 8 cm de polystyrène et une plateforme en béton armé de 10 cm.

La cellule (A) est équipée par le système de rafraîchissement passif contient :

Le puits climatique se compose des tubes en PVC de 2 mm d'épaisseur, ils sont parallèles sur un plan horizontal. Ils sont alimentés par un distributeur d'entrée, et l'air est évacué en sortie par un collecteur, l'air sortant est soufflé par une ouverture dans la façade Nord.

La cheminée solaire est intégrée dans la façade Sud de la cellule (A) qui se compose de l'extérieur à l'intérieur d'un vitrage, une cavité thermique et un absorbeur qui se compose d'une tôle métallique teinté en noir, une masse thermique en ardoise de grande inertie thermique isoler thermiquement par 8cm de polystyrène, paroi en brique creuse de 10 cm à la fin un revêtement de 2 cm de plâtre.

II.1. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME .

Durant les périodes estivales le renouvellement d'air et le refroidissement sont deux nécessités assurées la plus part du temps par des systèmes conventionnelles énergivores. Le système passif étudié indépendant de tout besoin énergétique, il se compose de cheminée solaire et puits climatique.

L'air extérieur entrant dans la cellule par le puits climatique; à 3,5 m de profondeur d'après la figure (V.9) ; la température moyenne du sol est environs 24.59 °c ($z = 3.5\text{m}$) ou la température moyenne extérieur est de 31.08 °C dans la période [mai - septembre]. Le puits climatique permettre de pré-rafraichir l'air entrant dans la cellule. La ventilation va être engendrée par la cheminée solaire qui permet la ventilation naturelle ou l'air emprisonné dans la cavité de la cheminée est chauffé par rayonnement, il s'élève par effet de tirage thermique (mouvement d'air par gravité).

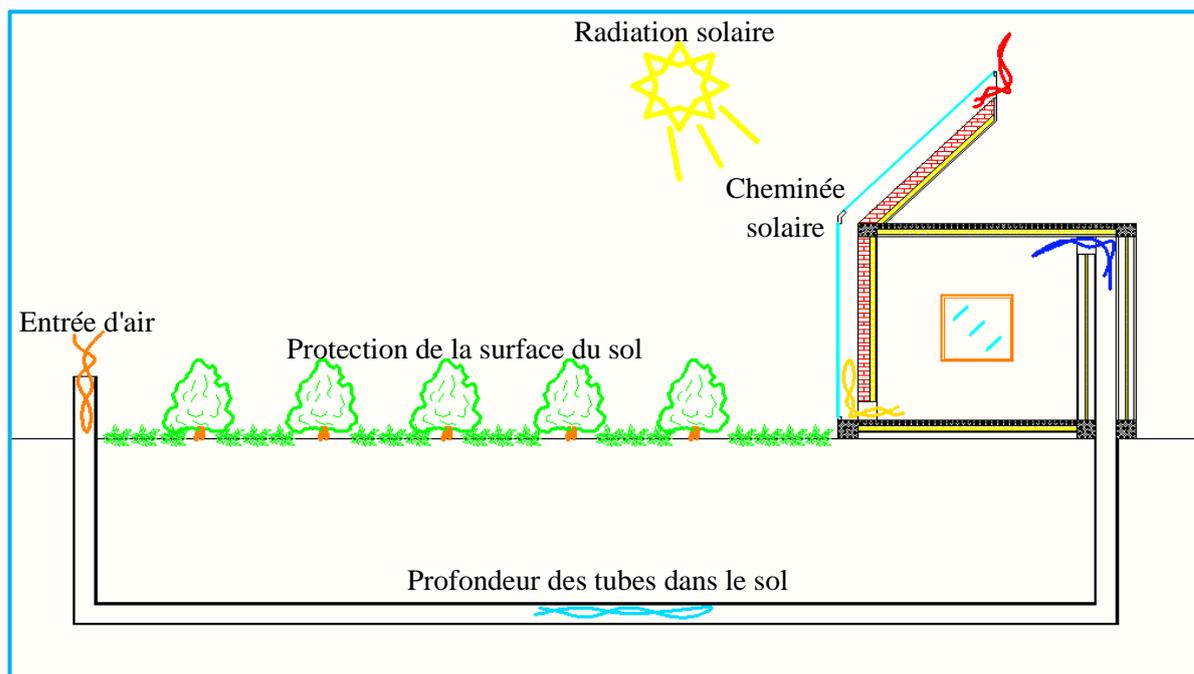


Fig. V.9 : Diagramme schématique du puits climatique combiné à la cheminée solaire pour le refroidissement de l'air.

Le système est fonctionnel pendant la journée grace au rayonnement solaire et les nuits grâce à l'énergie stockée dans la masse thermique de l'absorbeur. Une ventilation transversale est prouvée par des ouvertures quand la température de l'air extérieur est inferieur de la température de l'air pré-rafraichie du puits climatique.

Tableau V.2 : Caractéristique des matériaux utilisés.

Element.	Matériaux.	Epaisseur. [m]	Conductivité. [w / m.k]	Masse Volumique. [Kg/m ³]	Chaleur Spécifique. [J/kg.k]
Mur exterieur de la cellule	Enduit ciment.	0.02	1.40	2200	1080
	Brique creuse.	0.10	0.63	1400	936
	Polystérene.	0.04	0.045	1050	1404
	Brique creuse.	0.10	0.63	1400	936
	Enduit platre.	0.02	0.35	875	936
Plafond.	Beton armée.	0.10	1.75	2400	1080
	Polystérene	0.08	0.045	1050	1404
	Enduit platre.	0.02	0.35	875	936
Plancher.	Polystérene.	0.08	0.045	1050	1404
	Beton armée.	0.10	1.75	2400	1080
Fenetre.	Bois.	0.05	0.15	500	2160
Vitrage	Verre.	0.005	1.1	2700	792
Absorbueur.	tôle en cuivre.	0.001	380	8930	432
	Ardoise.	x	2.2	2400	936
	Polystérene	0.08	0.40	1050	1404
	Brique creuse.	0.10	0.63	1400	936
	Enduit platre.	0.02	0.35	875	936
canalisation	PVC	0.002	0.2	1380	1046

Les hypothèses considérées au cours de la modélisation sont :

Durant $T_{a_tube} < T_{ae}$ aucune ventilation naturelle est prise, le système et la cellule sont considéré étanche à l'air (aucune infiltration d'air).

Au premier temps les vents et leur directions sont pris comme des vents faible et nulle.

Le sol est homogène et le type de sol ne change pas le long des canalisations.

Ciel clair de 95%.

Les tubes de forme circulaire sont simplifiés au forme carré.

Le distributeur et le collecteur se compose d'un tube isolé (PVC) par 8 cm de Polystyrène, 10 cm de brique creuse et enduit ciment de 3 cm de l'extérieur.

La section de sortie du puits égale la section de collecteur. (au premier temps la section de collecteur égale la section des tubes).

Les débits parcourant les puits (lorsque sont importants) n'influent pas sur la température de la terre (température de terre en contact avec le puits est constante).

II.2. REALISATION DU SYSTEME .

La figure (V.10) montre les différentes cellules (A) et (B), l'accouplement du puits climatique avec la cheminée solaire et les différents composants du puits.

Les simulations dynamiques sont effectuées selon des conditions climatiques similaires aux données climatiques du site tel que la température extérieure et l'irradiation solaire.

Une comparaison est faite entre la température de l'air dans la cellule (A) et la cellule (B) sans ventilation naturelle (journalière, nocturne) et sans fonctionnement du système dans la cellule (A). La température de l'air de la cellule (B) varie entre 41,27°C et 41,89°C et pour la cellule (A) varie de 41,38°C et 42,10°C soit une augmentation moyenne de 0,16°C par rapport à la cellule de référence (B) causé par la juxtaposition de la cheminée solaire avec la cellule (A) quand la température extérieure varie de 45°C et 22°C. Voir figure (V.10).

La figure (V.11) montre la température de l'air dans chaque zone sans ventilation et sans fonctionnement du système ou la température de l'air dans les puits et collecteur est supérieure de la température extérieure durant la nuit entre 22 h 00 et 08 h 30. Durant cette période on obtient pour la ventilation naturelle nocturne ou ($T_{ai} \geq T_{ae}$) pour rafraichir la cellule(A) et (B).

Tableau V.3 : les dimensions des éléments principaux du système.

Élément	Longueur [m]	Largeur [m]	Hauteur [m]	Epaisseur [m]	Section [m]	Espacement [m]	Construction
Distributeur	18.30	0.30	0.30	0.212	0.3x0.3	-	(PVC) isolé
Canalisation	25	0.30	0.30	0.002	0.3x0.3	1,7	(PVC)
Collecteur	18.30	0.30	0.30	0,212	0.3x0.3	-	(PVC) isolé
(CS)	4.41	1	4	0.15	0.15x1	-	-
Entré (CS)	-	0.1	0.1	-	0.1x0.1	Centre - Bas	Verre

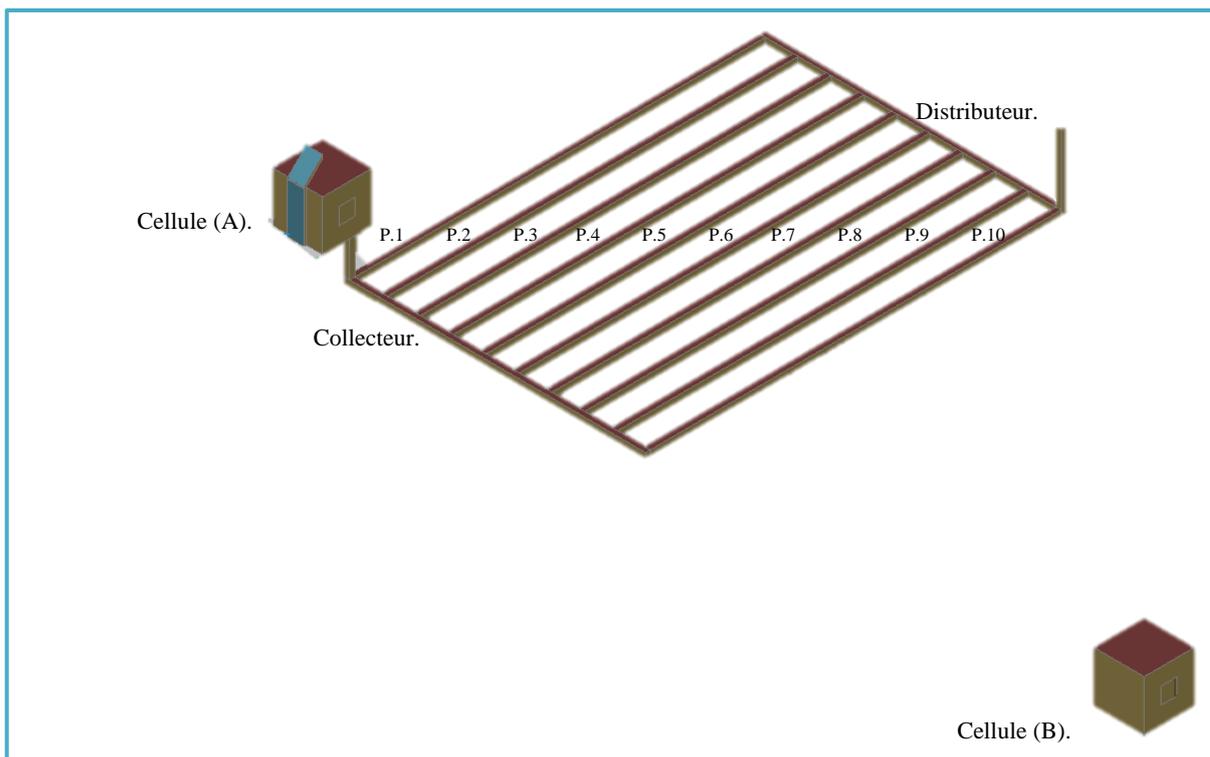


Fig. V.10 : Réalisation des deux cellules pour la simulation.

Cellule (A) avec système de refroidissement.

Cellule (B) sans système de rafraîchissement.

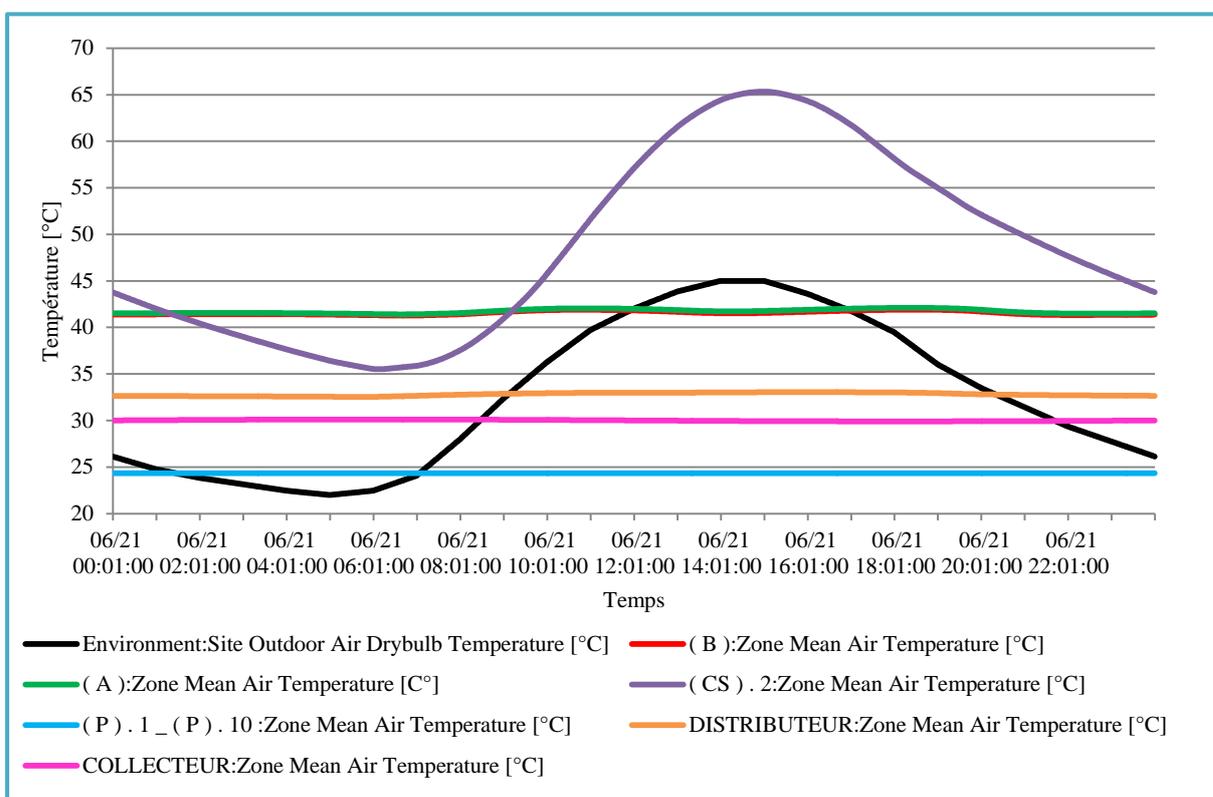


Fig. V.10 : La température de l'air dans les différentes zones sans ventilation (journalière et nocturne) et sans fonctionnement du système.

Après la mise en marche du système dans la cellule (A), le système permet de rafraîchir l'air intérieur par rapport à la température de l'air dans la cellule (B) d'une différence de température moyenne journalière de 4,90°C. Le rendement du système diminue entre 06 h 00 à 11 h 30, ou la température de cheminée solaire se rapproche de la température extérieure ce qui réduit le tirage thermique de l'air intérieur, via le rapprochement de la densité de l'air entre le cheminée solaire et l'environnement extérieur. La figure (V.12) représente la température de l'air dans les différentes zones sans ventilation naturelle et avec fonctionnement du système en montrant le rendement du système sur la cellule (A) par rapport la cellule de référence (B).

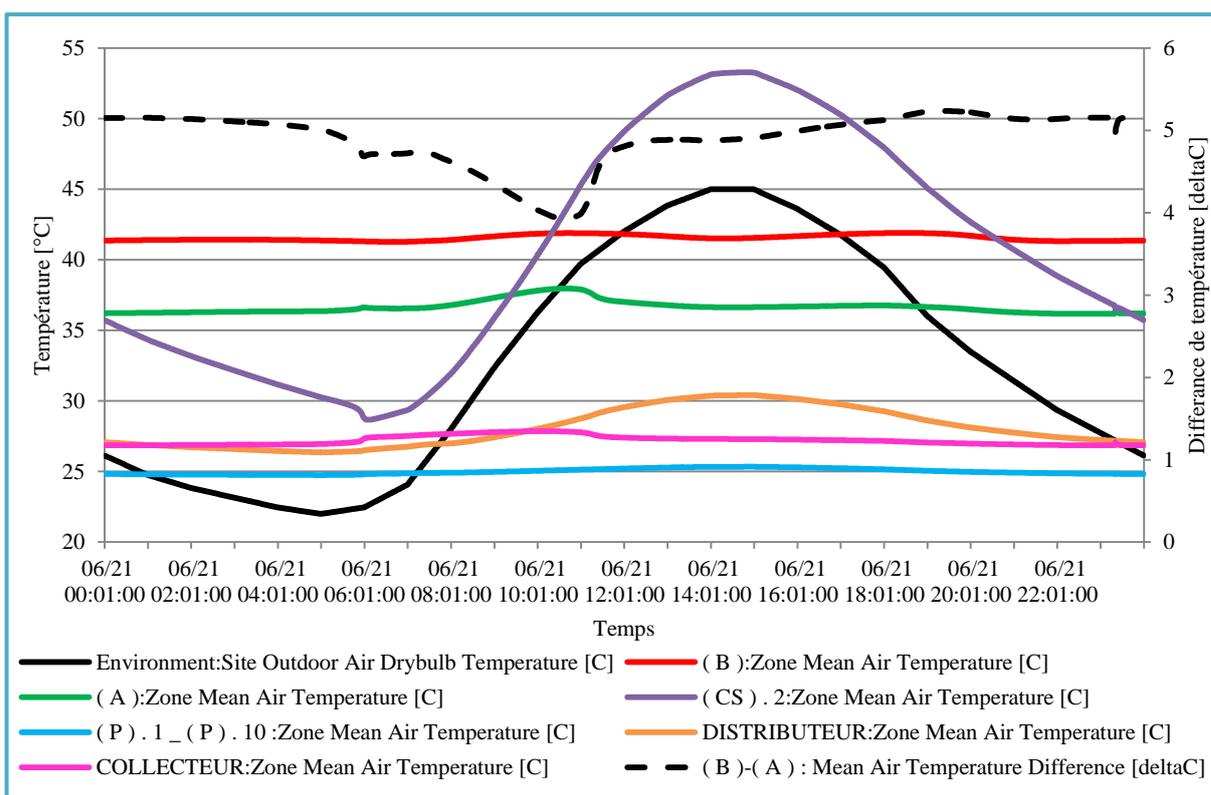


Fig. V.12 : La température de l'air dans les différentes zones sans ventilation (journalier et nocturne) et avec fonctionnement du système.

Avant de mettre aucune amélioration sur le système, une ventilation nocturne est prise afin d'évaluer la température de l'air intérieur de deux cellules (A) et (B). La ventilation nocturne ($T_{ai} \geq T_{ae}$) permet de rafraîchir l'air intérieur durant l'absence du rayonnement solaire et durant la température extérieure est plus fraîche que la température intérieure. La figure (V.13) représente le comportement du système en appliquant la ventilation nocturne pour les cellules (A) et (B); la ventilation nocturne permet de réduire la température de l'air pour les deux cellules (A) et (B). Pour la période nocturne ou ($T_{ai} \geq T_{ae}$) entre 20 h 30 et 09 h 00 les deux cellules ont presque la même température de l'air qui varie de 25,37°C à 32,62°C. Par contre durant la période journalière ($T_{ai} < T_{ae}$) entre 09 h 00 et 20 h 30 la température de l'air dans la cellule (B) évolue de 32,62°C à 35,55°C ou la température de l'air dans la cellule (A) de 32,62°C à 33,27°C soit un gain maximale de 2,28°C et un gain moyen de 1,55°C.

Durant la période nocturne il est important de mettre la ventilation nocturne afin de bien rafraîchir les deux cellules (A) et (B) sans recourir au système qui montre ses défauts ou la température fournie par le puits climatique est supérieur de la température extérieur et aussi avec l'absence de rayonnement solaire afin de provoquer un tirage important par la cheminée solaire.

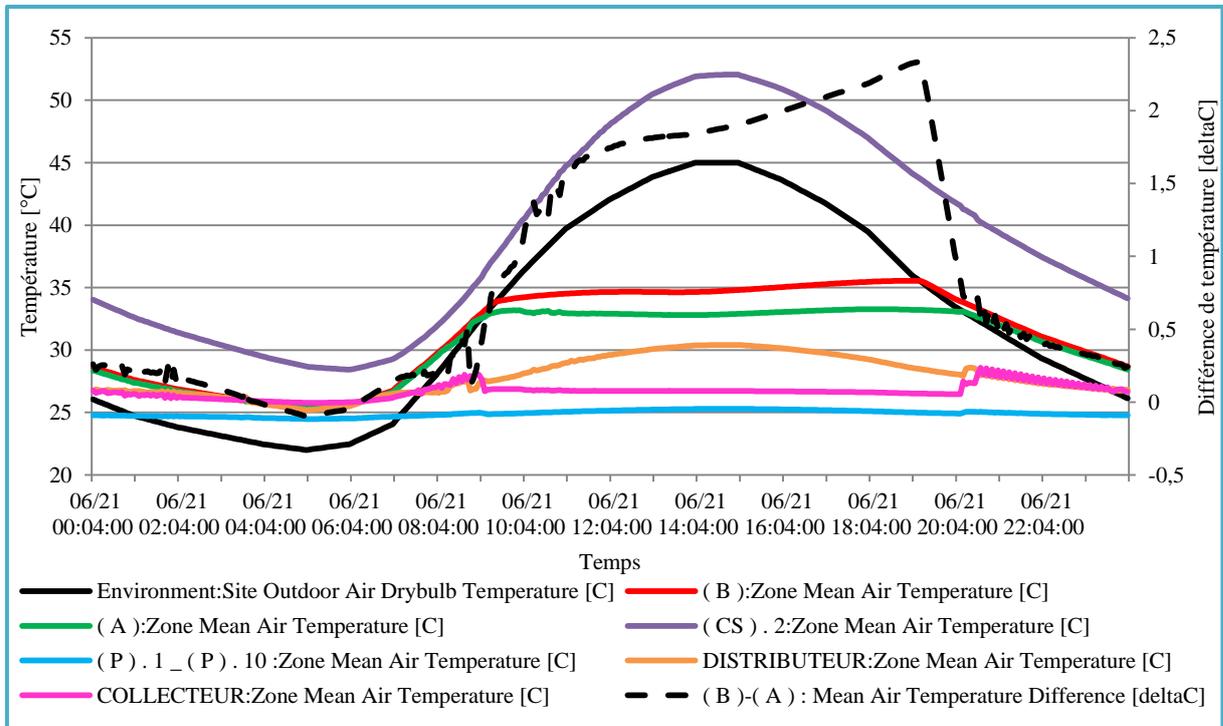


Fig. V.13 : La température de l'air dans les différentes zones avec ventilation nocturne et avec fonctionnement du système.

II.3. EFFET DE LA DISPOSITION.

Afin de minimiser les pertes de charge au sein dans les tubes et de faciliter son entretien ou cette perte de charge due à la rugosité, au frottement et nombre de coudes (le changement de direction). Il est recommandé de limiter le nombre de coudes. Pour comprendre l'effet de disposition ; deux disposition sont étudiées ; puits disposé en linéaire et puits disposé en rangées, voir la figure (V.14).

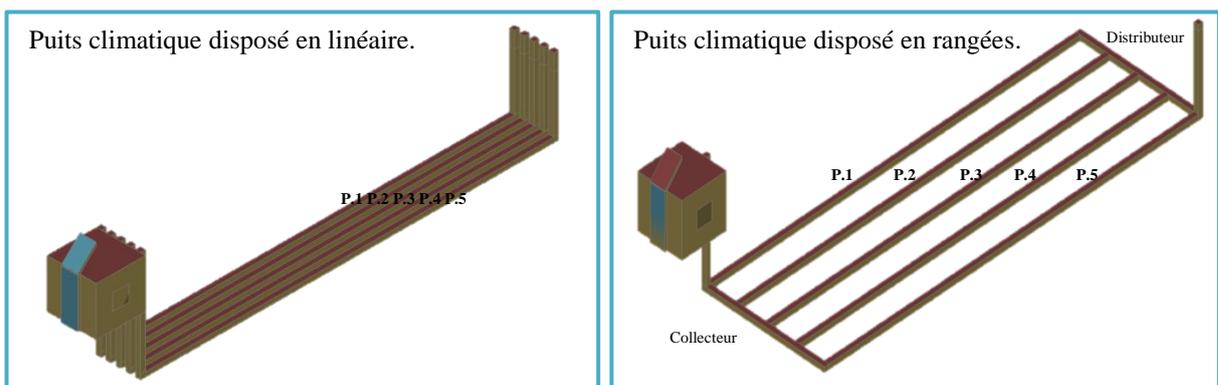


Fig. V.14 : représentation de deux types de dispositions.

La figure (V.14) représente le comportement du système ou le puits climatique est disposé en linéaire de cinq puits raccordé directement avec la cellule (A) nommés de gauche a l'adroite P.1, P.2, P.3, P.4 et P.5 d'une section de $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$ séparé uniformément (0,3m) d'une longueur de 25m voir figure (V.14) ; avec l'application de la ventilation nocturne. Sur la figure (V.15) durant la période diurne la température des quatre puits P.1, P.2, P.4 et P.5 est identique et ils se comportent de la même façon ; par contre le puits P.3 est plus chaud qui signifie le tirage de l'air plus facilement et rapidement à travers le puits P.3 causé par la position du puits P.3 et la cheminée solaire sur des parois opposées (les bouches sortie P.3 et entrée cheminée sont face à face). La température moyenne de la cellule (A) entre 09 h 00 à 21 h 30 est $31,14^\circ\text{C}$ avec une température moyenne de la cellule de référence (B) de $34,56^\circ\text{C}$ pour la même période. Dans cette disposition la majorité de l'air rafraîchi passe à travers un seul puits P.3 par contre les puits P.1, P.2, P.4 et P.5 donne un faible gain de refroidissement.

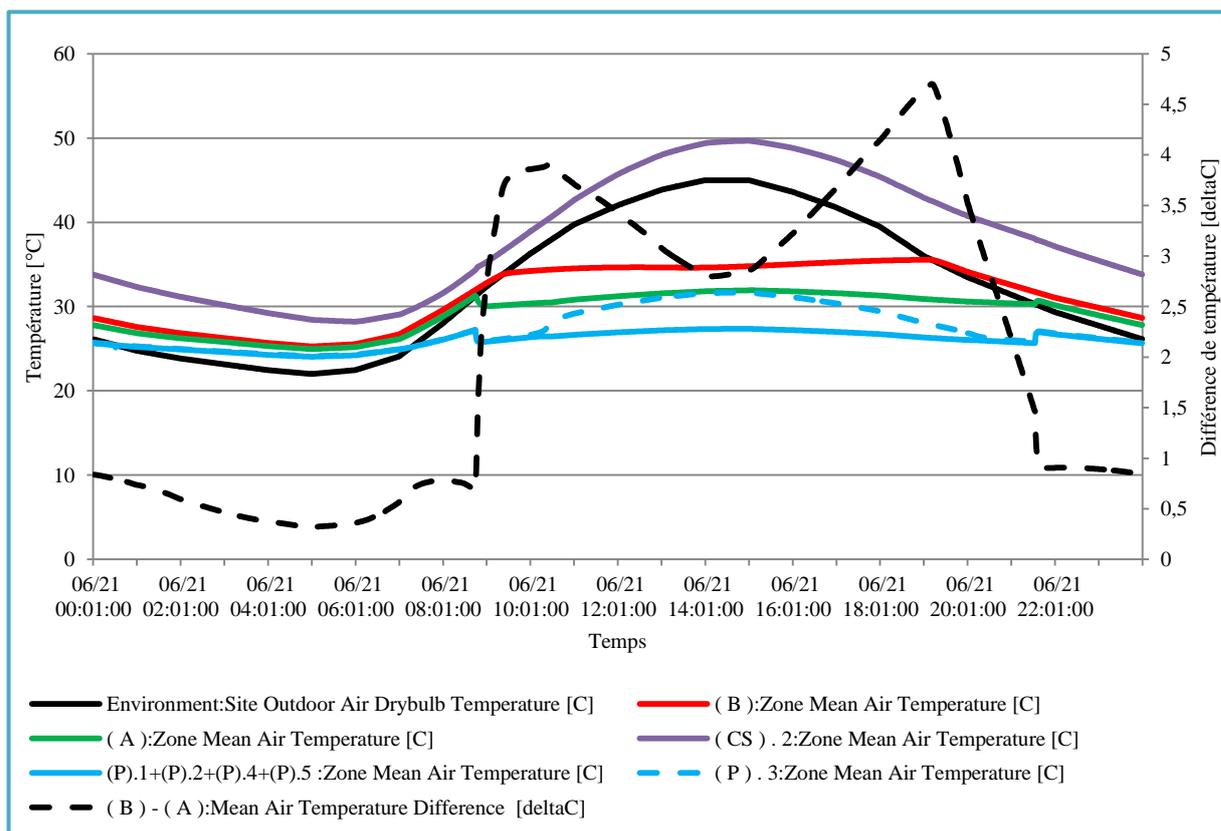


Fig. V.15 : Le comportement du système ou le puits climatique est disposé en linéaire.

La figure (V.16) représente le comportement du système ou le puits climatique est disposé en rangées de cinq puits alimentés par un distributeur d'entrée et l'air est évacué en sortie par un collecteur raccordé avec la cellule (A) ; ils sont nommés de gauche a l'adroite P.1, P.2, P.3, P.4 et P.5 d'une section de $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$ séparé uniformément (1,7m) d'une longueur de 25 m voir figure (V.15). la section de sortie du puits est $0,45 \text{ m}^2$ (5 fois $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$).

La figure (V,16) présente la température des cinq puits est identique et ils se comportent de la même façon. La température moyenne de la cellule (A) entre 09 h 00 à 21 h 30 est 31,39°C avec une température moyenne de la cellule de référence (B) de 34,56°C pour la même période. Cette disposition permet le rafraîchissement de l'air fourni par le puits climatique à travers les cinq puits d'une façon similaire.

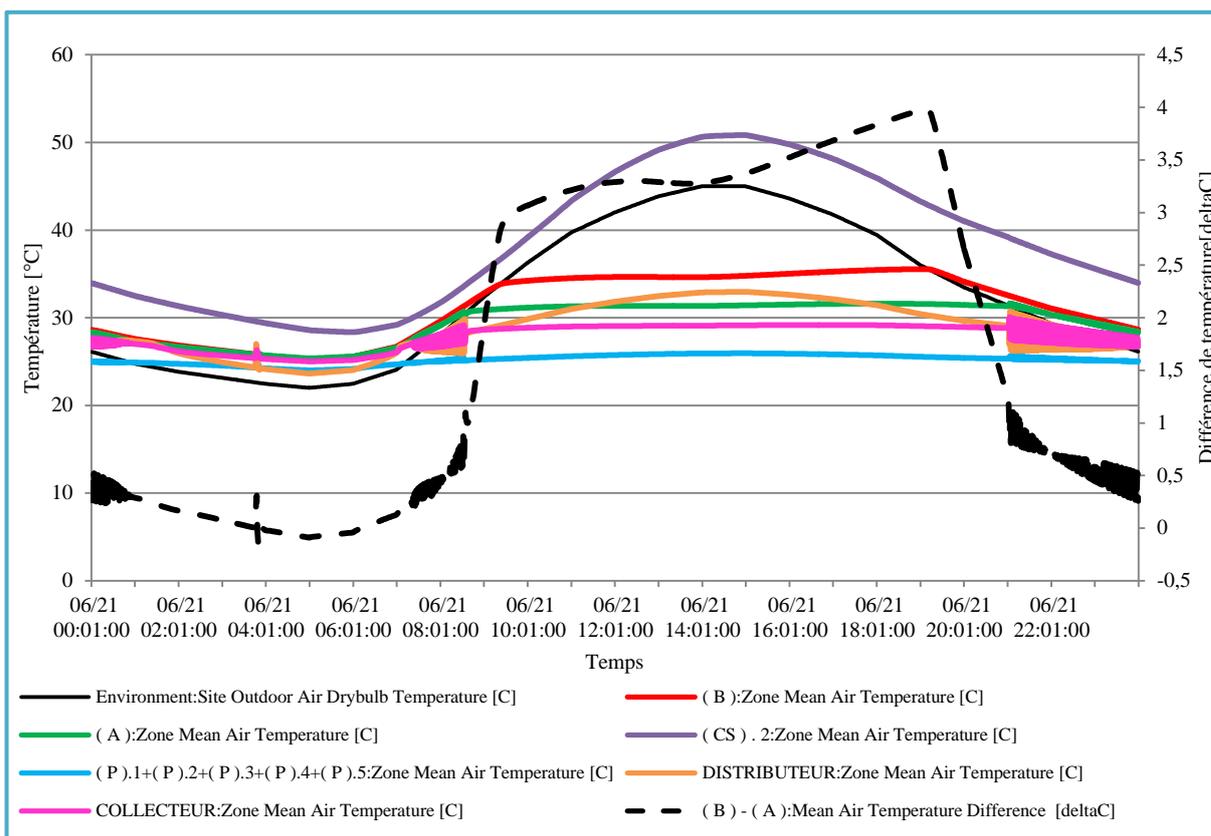


Fig. V.16 : Le comportement du système ou le puits climatique est disposé en rangées.

La figure (V.17) présente une comparaison entre le gain de température du rafraîchissement pour les deux types de disposition. Pour la disposition en linéaire le rendement du système est remarquable durant les périodes où la température extérieure est basse dans le début et la fin de la période journalière 09 h 00 à 12 h 30 et 17 h 00 à 21 h 00 il atteint 4,70°C par contre durant la période journalière la plus chaude de 12 h 30 et 17 h 00 le rendement diminue jusqu'à 2,80°C. Pour la disposition en rangées le rendement est continu et donne un rendement plus efficace durant la période la plus chaude de la journée par un rendement entre 2°C à 3,97°C. La disposition en rangées est plus efficace.

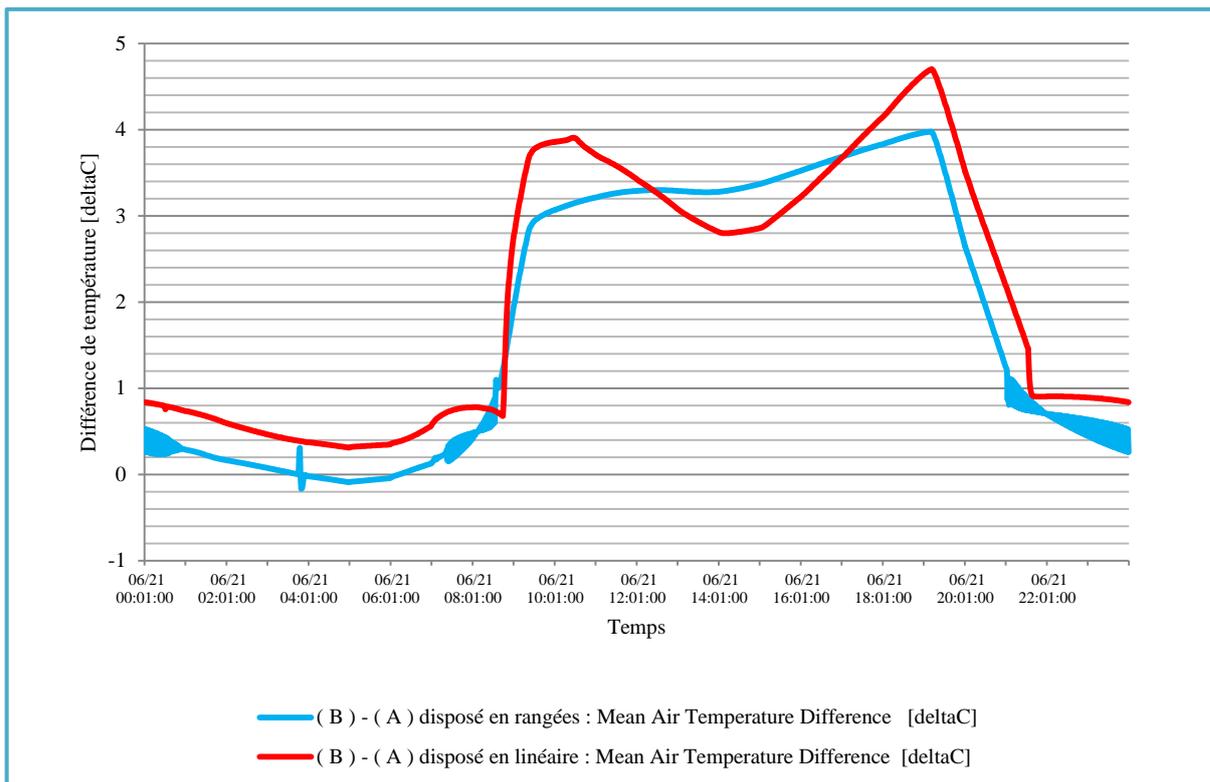


Fig. V.17 : Gain de température engendré par le système pour deux types de disposition.

III. EFFET DES DIMENSIONS DU Puits CLIMATIQUE .

III.1. EFFICACITE DU SYSTEME SELON LA SECTION, LONGUEUR ET NOMBRE DES Puits .

Pour la section de 0,3x0,3 m² (une petite section) le comportement du système est identique selon la longueur et le nombre des puits ou les rendements maximales du système sont représenté dans le tableau V.4.

Tableau V.4 : rendements maximales du système pour une section du tube de 0,3x0,3m² .

	6 puits	8 puits	10 puits
L = 25 m	2,10 °C	2,22 °C	2,30 °C
L = 35 m	2,13 °C	2,25 °C	2,33 °C
L = 45 m	2,15 °C	2,27 °C	2,36 °C

Pour une petite section l'augmentation de la longueur et du nombre n'ont pas un grand effet sur le rendement du système à cause de la section du collecteur qui joue un rôle d'un réducteur une petite section ne permet pas le drainage de l'air rafraichie dues à la rugosité, au frottement et aux petits nœuds dans le puits climatique et entre le puits et la cellule. Voir figure (V.18).

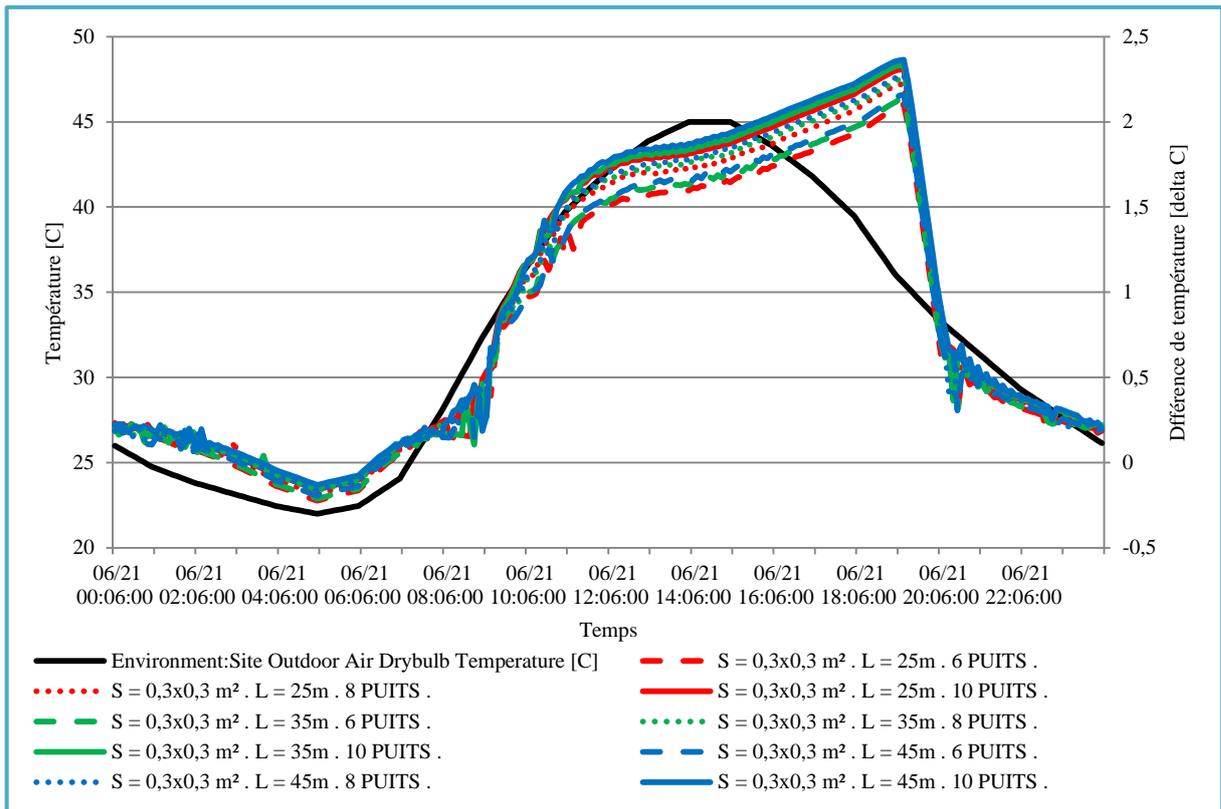


Fig. V.18 : le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de 0.3x0.3 m².

Pour la section de 0,5x0,5 m² (section moyenne) le comportement du système est légèrement identique selon la longueur et le nombre des puits ou les rendements maximales du système sont représenté dans le tableau V.5 :

Tableau V.5 : rendements maximales du système pour une section du tube de 0,5x0,5m² .

	6 puits	8 puits	10 puits
L = 25 m	3,60 °C	3,78 °C	3,93 °C
L = 35 m	3,72 °C	3,90 °C	4,03 °C
L = 45 m	3,79 °C	3,97 °C	4,09 °C

Pour une section moyenne la longueur et le nombre des puits ont un effet faible sur le rendement général mais permettent de réduire l'abaissement du rendement durant la période la plus chaude de la journée qui peut être remarqué dans la figure (V.19) entre 13 h 00 à 15 h 30 ; causé par la section moyenne du collecteur.

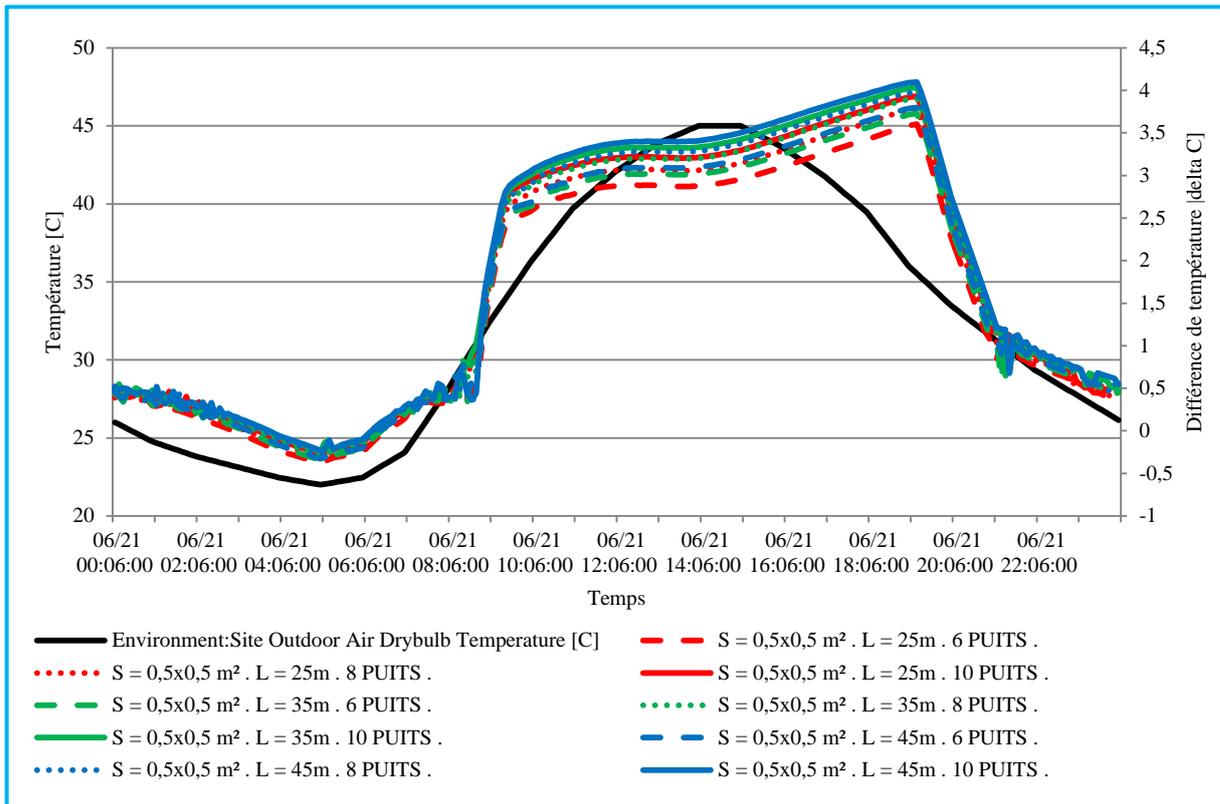


Fig. V.19 : le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de 0.5x0.5 m².

Pour la section de 0,7x0,7m² (une grande section) l'effet de la longueur et le nombre des puits sont remarquables sur le rendement du système ou les rendements maximales du système sont représenté dans le tableau V.6 :

Tableau V.6 : rendements maximales du système pour une section du tube de 0,7x0,7m² .

	6 puits	8 puits	10 puits
L = 25 m	4,66 °C	4,90 °C	5,09 °C
L = 35 m	4,89 °C	5,12 °C	5,29 °C
L = 45 m	5,03 °C	5,26 °C	5,41 °C

Pour une section moyenne la longueur et le nombre des puits ont un effet sur le rendement général mais permettre de réduire l'abaissement du rendement durant la période la plus chaude de la journée qui peut être remarqué dans la figure (V.20) entre 13 h 00 à 15 h 30 ; causé par l'augmentation de l'échange de l'air qui passe à travers le puits par augmentation de son surface. Plus la surface est grande plus le système amortie la température extérieur.

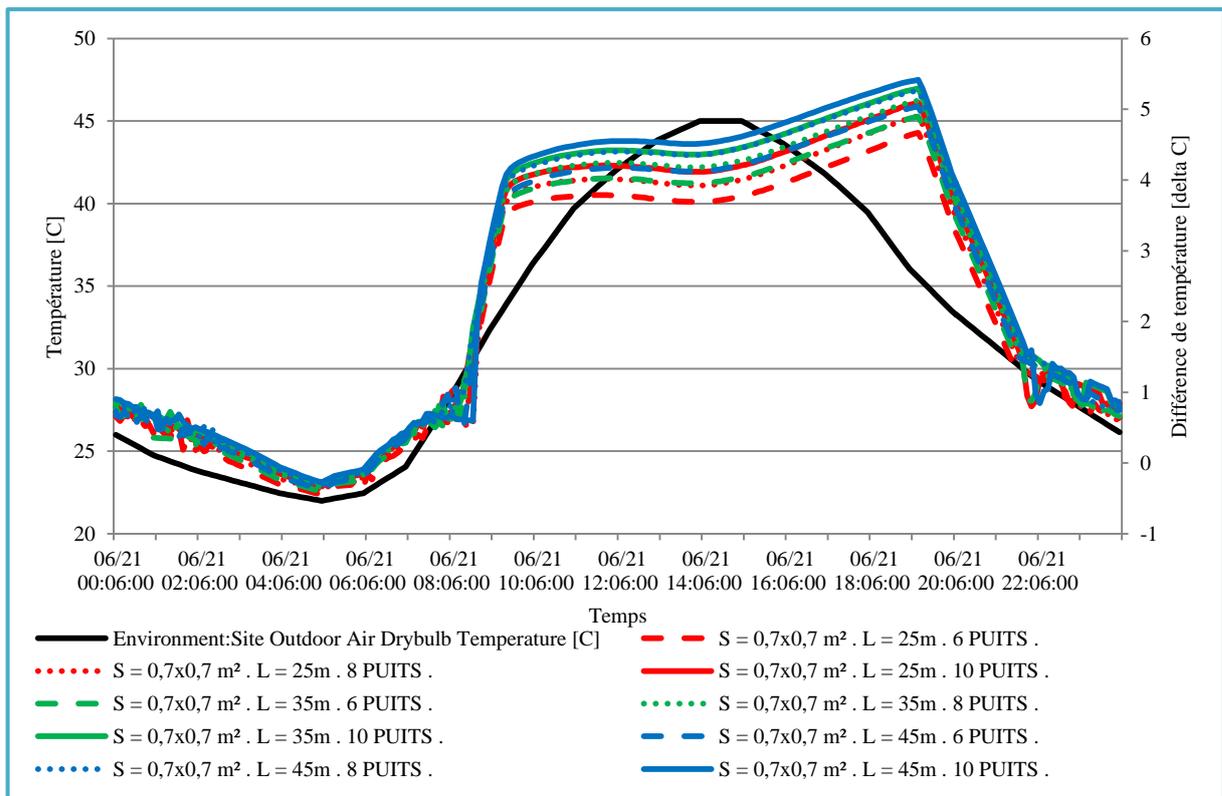


Fig. V.20 : le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de $0,7 \times 0,7 \text{ m}^2$.

La surface des canalisations enterrée sert comme un dissipateur de chaleur pour le système. L'augmentation de la surface de rafraîchissement du puits cède plus d'effet sur le refroidissement du système en augmentant la section, la longueur et le nombre.

En augmentant la section permet d'augmenter la surface de contact qui permet un échange thermique plus important et de réduire les effets négatifs des pertes de charge et des nœuds et permet le soufflage dans la cellule. La figure (V.21) résume le rendement du système en fonction de la section, la longueur et le nombre des puits. Les pertes de charge sont des pertes d'énergie mécanique d'un fluide dû à la friction. Dans notre cas l'air en passant par le conduit subit des frottements contre les parois qui le ralentissent. Il y a également une perte de charge associée à chaque accessoire aéraulique, comme les coudes ou les tés car l'air y rencontre un obstacle et perd de l'énergie mécanique supplémentaire

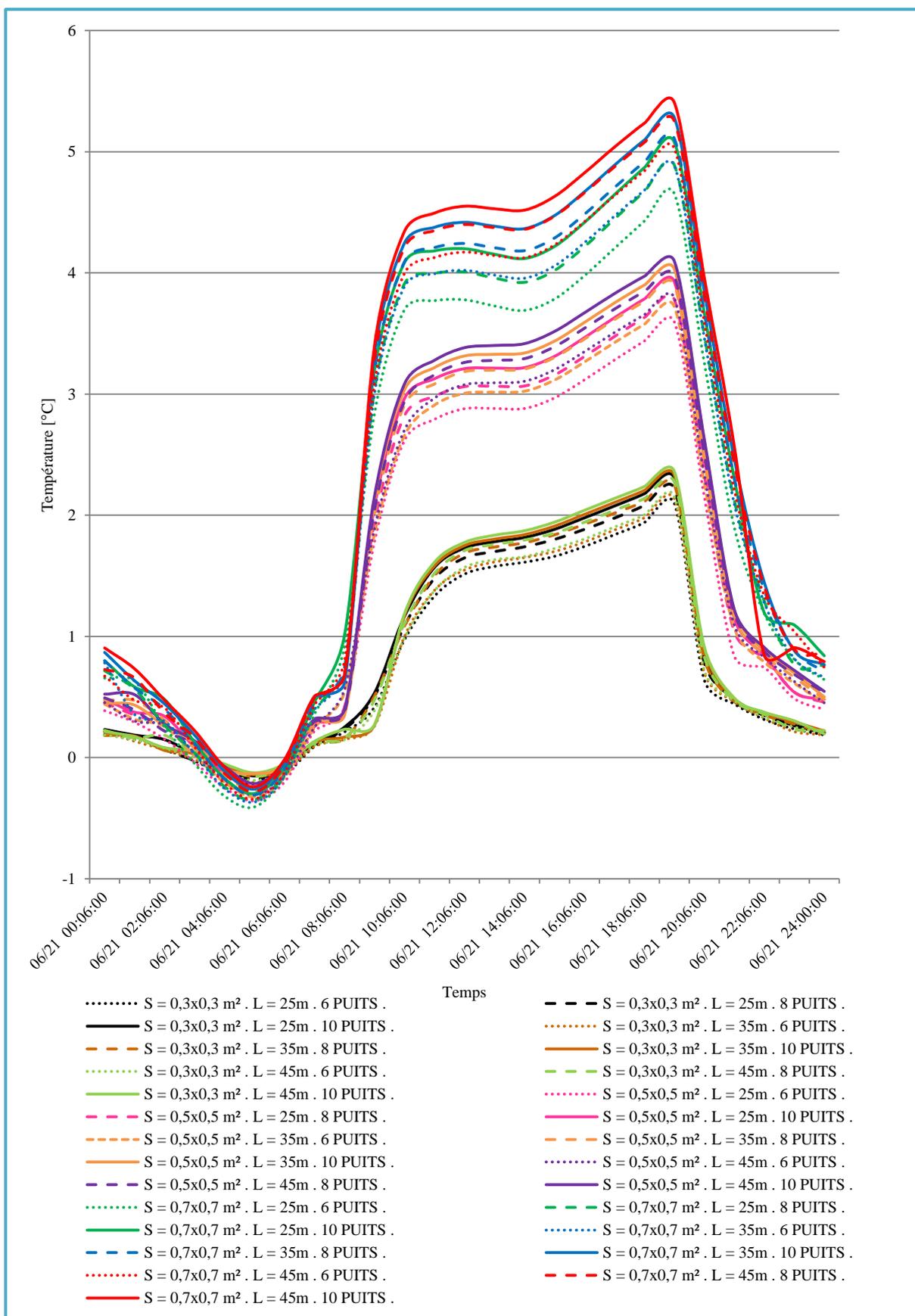


Fig.V.21 : le rendement du système en fonction de la section, la longueur et le nombre des puits.

III.2. EFFET DE LA SECTION DU COLLECTEUR (SORTIE DU Puits CLIMATIQUE).

La figure (V.23) montre l'effet de la section du collecteur sur le rendement du système, pour dix tubes d'une longueur de 35 m.

La section du collecteur montre une amélioration remarquable ; les rendements maximaux pour les différentes sections des puits selon la section du collecteur sont présentés dans le tableau V.7 .

Tableau V.7 : les rendements maximaux pour les différentes sections des puits selon la section du collecteur.

section des puits	Collecteur de section originale	Collecteur de section 0,50 x 0,50 m ²	Collecteur de section 0,75 x 0,75 m ²	Collecteur de section 1,00 x 1,00 m ²
0,30 x 0,30	2,33 °C	3,67 °C	4,72 °C	5,33 °C
0,40 x 0,40	3,21 °C	3,91 °C	5,12 °C	5,84 °C
0,50 x 0,50	4,04 °C	-	5,36 °C	6,15 °C
0,60 x 0,60	4,72 °C	-	5,48 °C	6,33 °C
0,70 x 0,70	5,29 °C	-	-	6,41 °C

L'augmentation de la section de collecteur et la section de la sortie du puits climatique pour le même nombre des puits et la même section des puits ; voir figure (V.22). Il permet de d'avoir un rendement important sur la capacité de refroidissement du système causé par augmentation de la capacité du tirage thermique (fraction). La section optimale pour les tubes est 0,6x0,6 m² avec une section de collecteur de 1.00x1.00 m². pour une section de 0,7x0,7m² aucune amélioration remarquable sur le rendement du système .

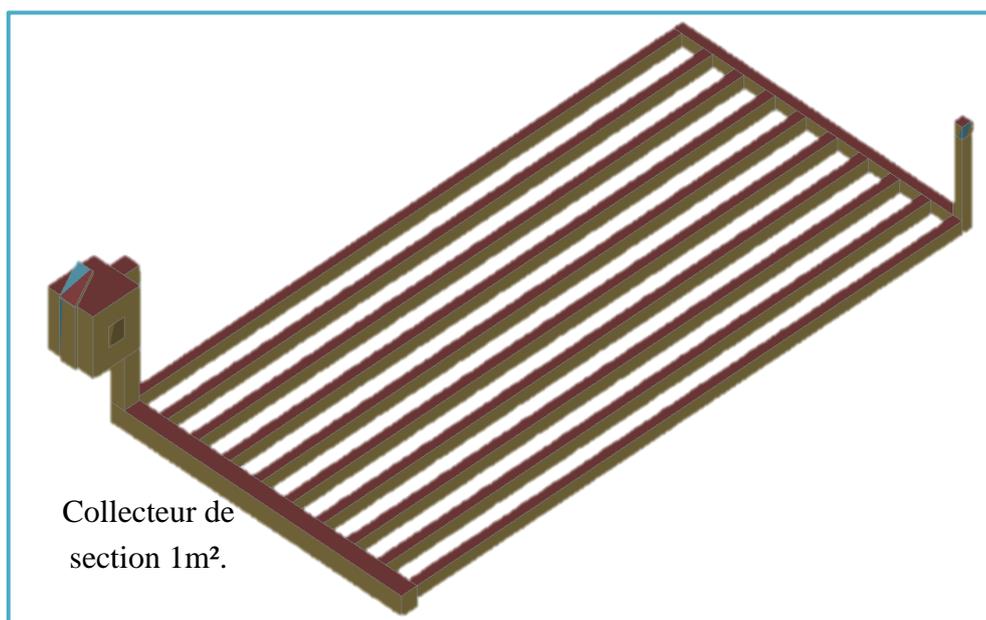


Fig. V.22 : représentation du système ou la section de collecteur est 1,00x1,00 m² pour dix puits de section de 0,60x0,60 m²

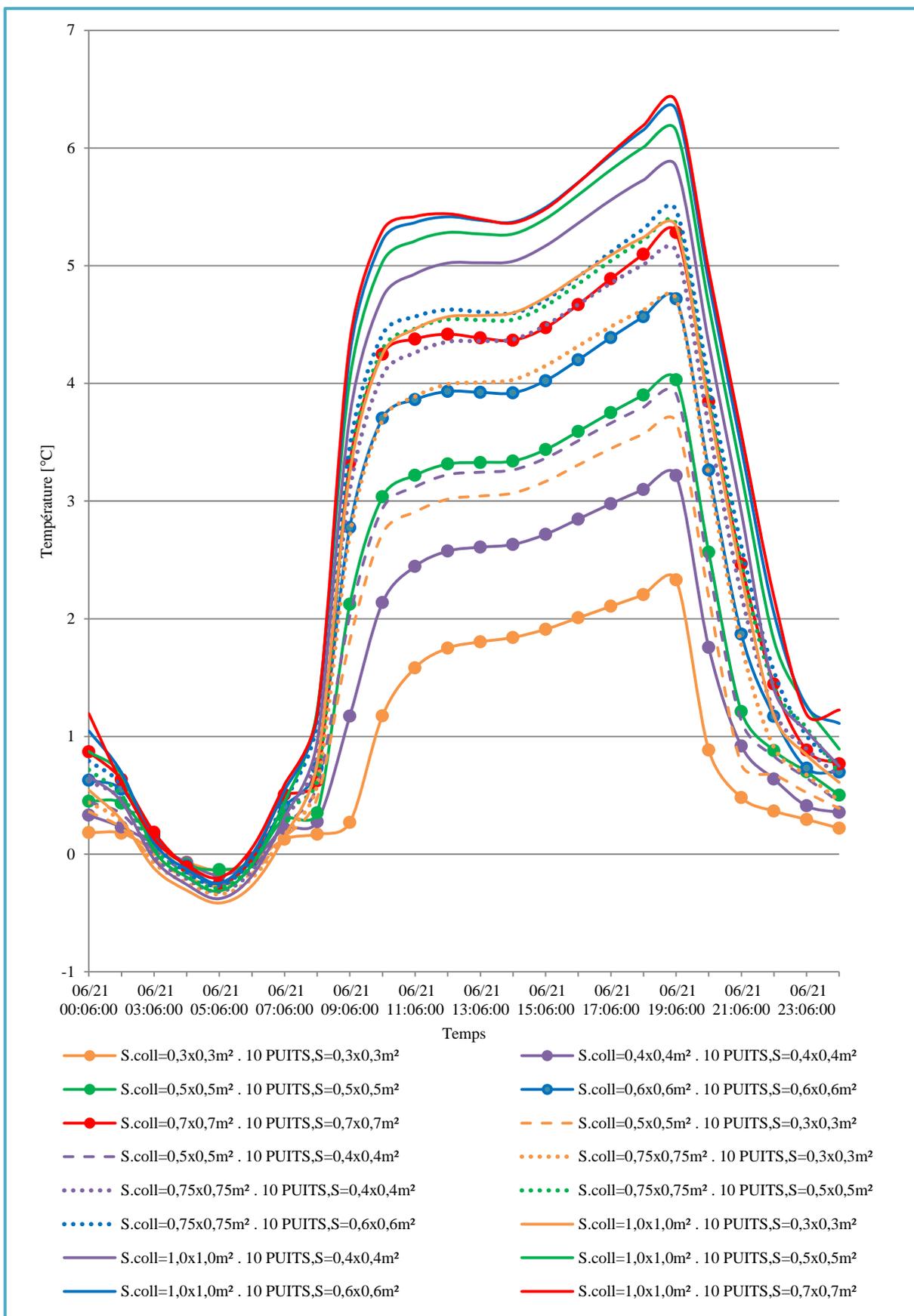


Fig.V.23 : le rendement du système en fonction des sections des puits avec la section de collecteur et sortie du puits climatique.

IV.3. EFFET DE LA POSITION DE SORTIE DE PUIITS ET ENTREE CHEMINEE.

Afin de connaître la meilleure disposition des bouches à l'intérieur de la cellule ; nommer sous la forme *HAUT - BAS*, *HAUT - CENTRE*, *HAUT - HAUT* ; *CENTRE - BAS*, *CENTRE - CENTRE*, *CENTRE - HAUT* ; *BAS - BAS*, *BAS - CENTRE* ET *BAS - HAUT* représentés sur la figure (V.24). Le premier terme correspond à la bouche de sortie de puits climatique, et le second à la bouche d'entrée de cheminée solaire.

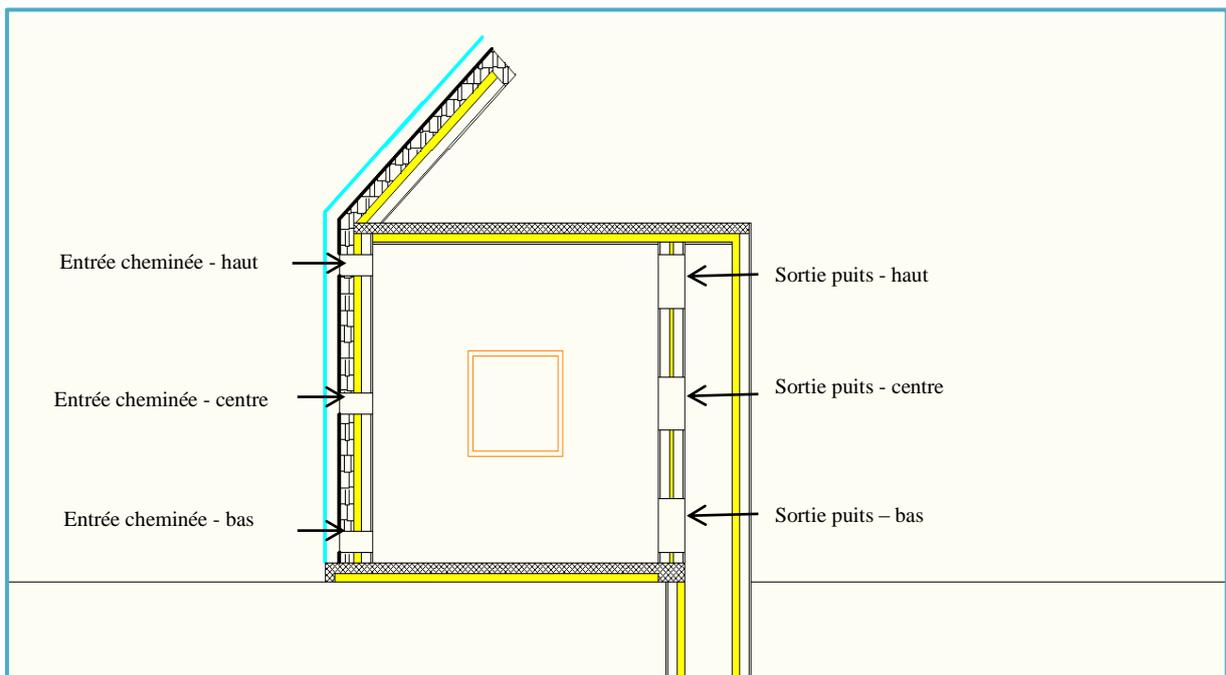


Fig. V.24: représente les différentes dispositions de sortie de puits et entrée cheminée.

La figure (V.25) représente le rendement et le comportement du système pour différentes disposition des bouches sortie puits climatique et entrée cheminée solaire ; sur cette figure on distingue trois comportement principale sont :

HAUT - HAUT, *CENTRE - HAUT*, *BAS - HAUT* ; cette position de la bouche de l'entrée de cheminée (*HAUT*) sont rendement durant la période journalière entre 3,01 °C et 5,29 °C.

HAUT - CENTRE, *CENTRE - CENTRE*, *BAS - CENTRE* ; cette position de la bouche de l'entrée de cheminée (*CENTRE*) sont rendement durant la période journalière entre 4,25 °C et 6,27 °C.

HAUT - BAS, *CENTRE - BAS*, *BAS - BAS* ; cette position de la bouche de l'entrée de cheminée (*BAS*) sont rendement durant la période journalière entre 5,36 °C et 6,33 °C.

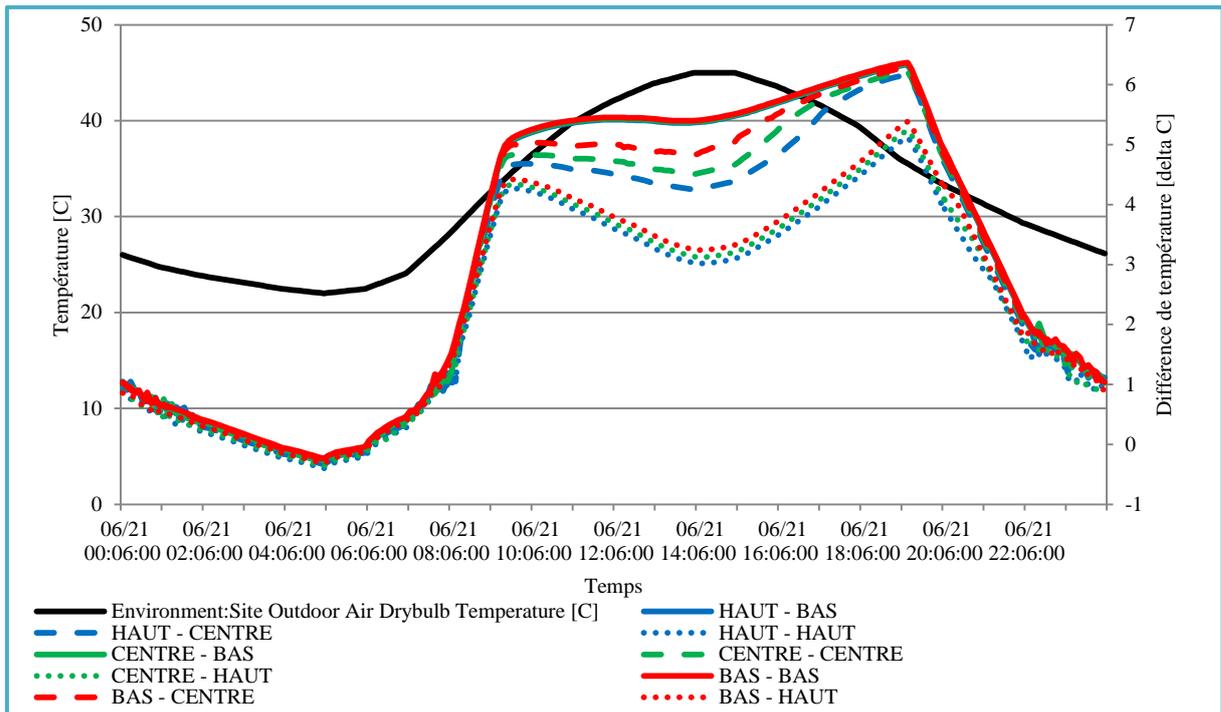


Fig.V.25 : effet sur le rendement de la position de la sortie de puits climatique et entrée de cheminée solaire.

V.3. EFFET DES DIMENSIONS DE LA CHEMINEE SOLAIRE .

V.1. EFFET DE LA SECTION DE L'ENTREE DE CHEMINEE ET LONGUEUR DE L'ABSORBEUR .

La cheminée solaire se compose de deux partie la premier est fixée sur le mur sud ou absorbeur est vertical d'une largeur de 1 m et une longueur de 3 m ; la seconde partie ou l'absorbeur est inclinée d'un angle de 45° une largeur de 1 m et la longueur se varie de 1,41 m, 2,84 m et 4,24 m et entrée d'air a une hauteur de 0,1 m et la largeur varie de 0,1 m à 0,9 m d'un champ de 0,2 m. représenté sur la figure (V.26).

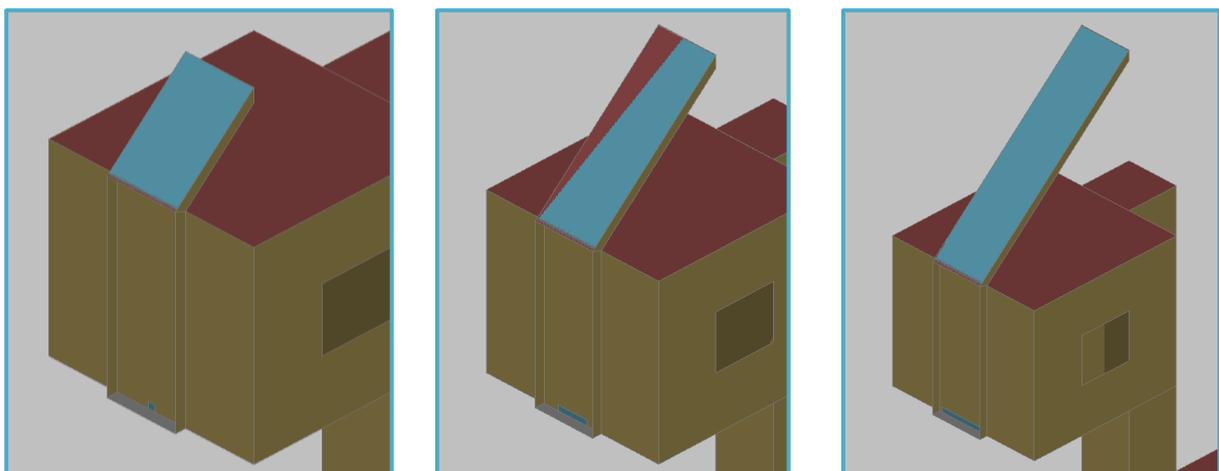


Fig. V.26: représentation des différentes longueurs et avec section de entrée de la cheminée solaire.

Les figures (V.27, 28, 29) montre que pour une longueur d'absorbeur de 3+1,41 m la section optimale est 0,3x0,3 m, pour plus que cette section le rendement de refroidissement va diminuer pour la même longueur par contre l'augmentation de la longueur de la cheminée permet de stabiliser le rendement de refroidissement pour des sections plus grandes. Une cheminée de 3+4,24 et entrée de 0,7x0,1 m² donne un rendement maximale près de 6,70 °C par contre une cheminée de 3+1,41 et entrée de 0,3x0,1 m² a un rendement maximal de 6,30 °C.

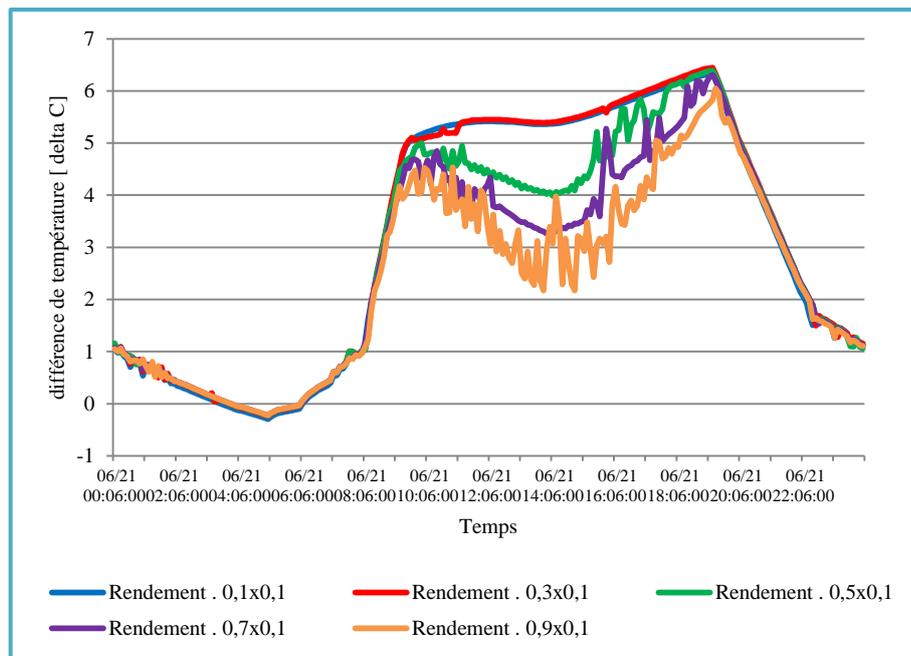


Fig. V.27: Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de 3+1,41 m.

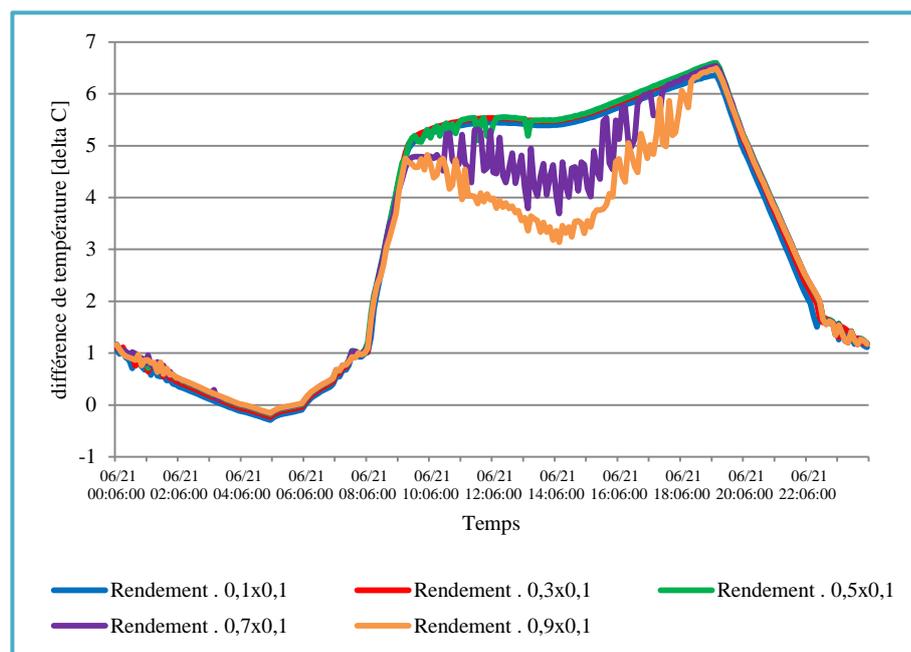


Fig. V.28 : Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de 3+2,84 m.

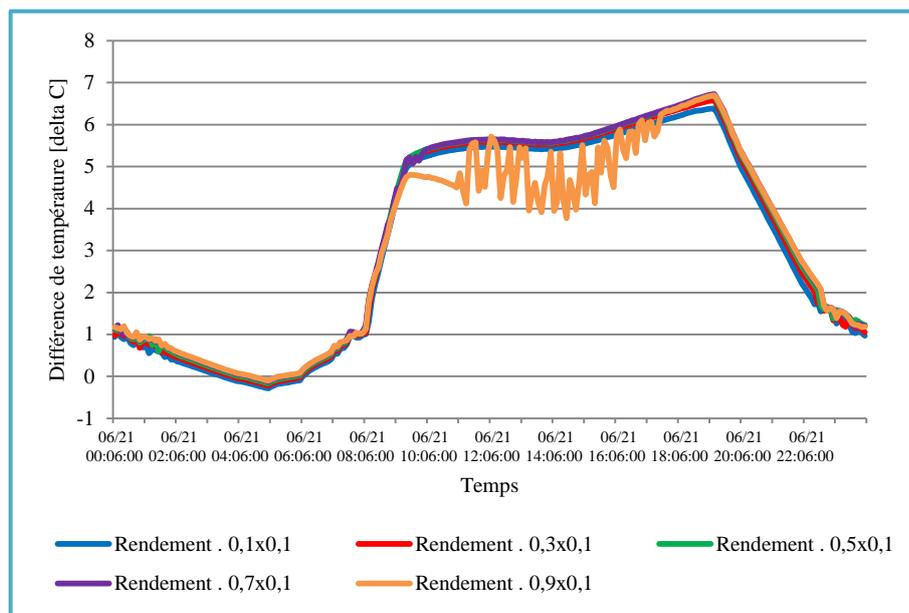


Fig. V.29 : Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de 3+4,24 m.

V.2. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE CHEMINÉE, L'ISOLATION DE PAROIS LATÉRALES ET VITRAGE AVEC UTILISATION DE L'INERTIE THERMIQUE DANS L'ABSORBEUR.

La figure (V.30) représente l'effet de l'épaisseur de la cheminée solaire avec isolation par le double vitrage et isolement des parois latérales ; la figure (V.31) représente l'effet de la masse thermique appliqué au niveau de l'absorbeur avec et sans isolation ces paramètres n'ont aucune significations importante sur le comportement et sur l'effet sur le rendement du système.

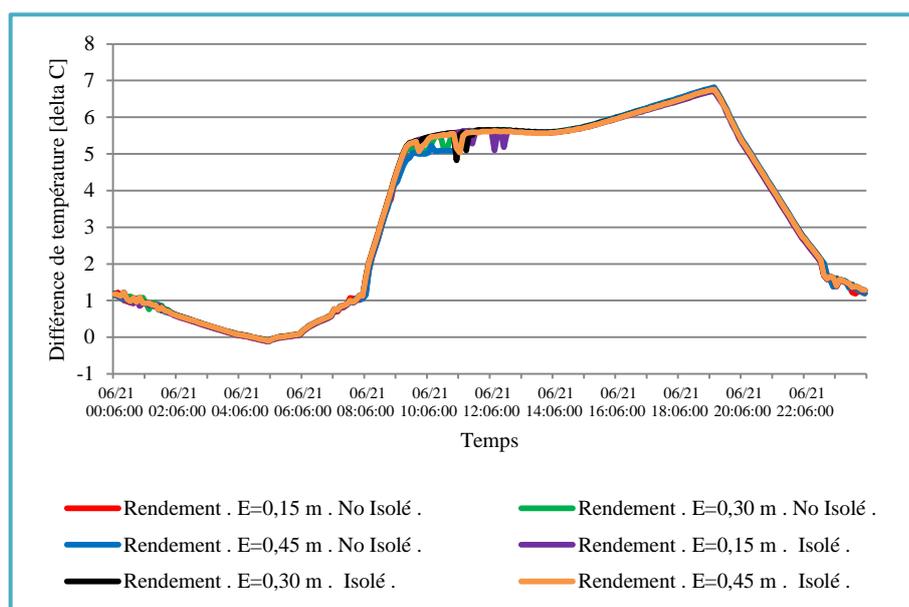


Fig. V.30 : Effet de l'épaisseur de cheminée et l'isolation des parois latérales et double vitrage.

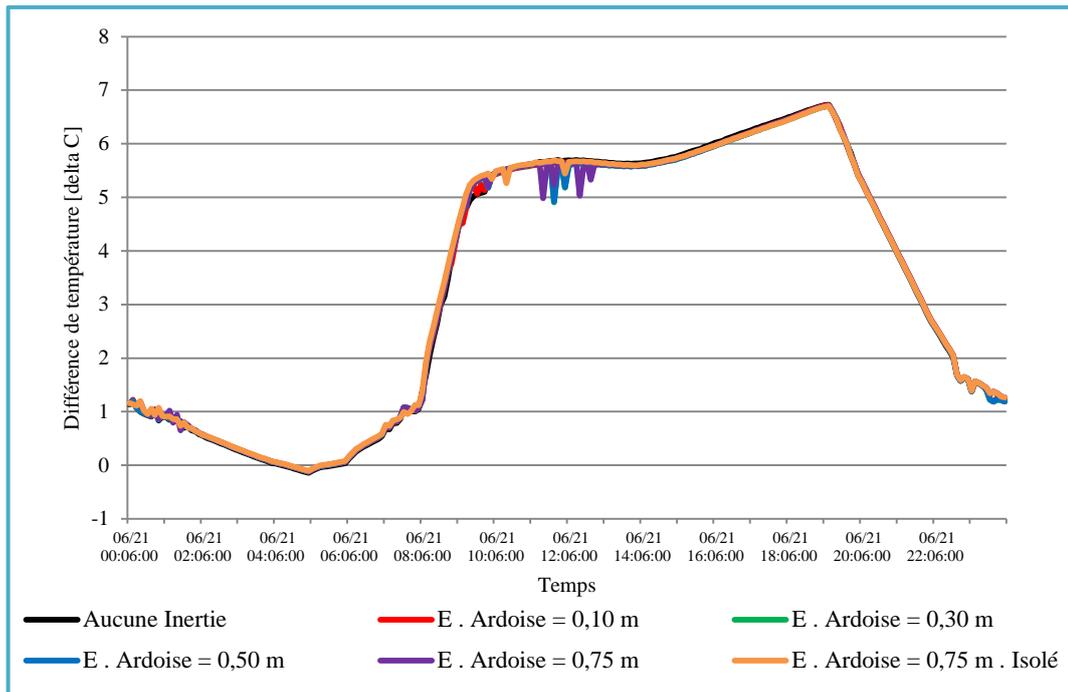


Fig. V.31 : Effet de l'inertie thermique dans l'absorbeur.

V.3. EFFET DU NOMBRE DE CHEMINEE .

L'augmentation de nombre de cheminée solaire permet de tirer l'air intérieur et de refroidir la cellule par convection donc le tirage augmente avec l'augmentation de nombre de cheminée solaire représenté sur la figure (V.32) ; la cheminée a une largeur de 1 m, longueur d'absorbeur 3+4.24 m et une épaisseur de 0.15 m.

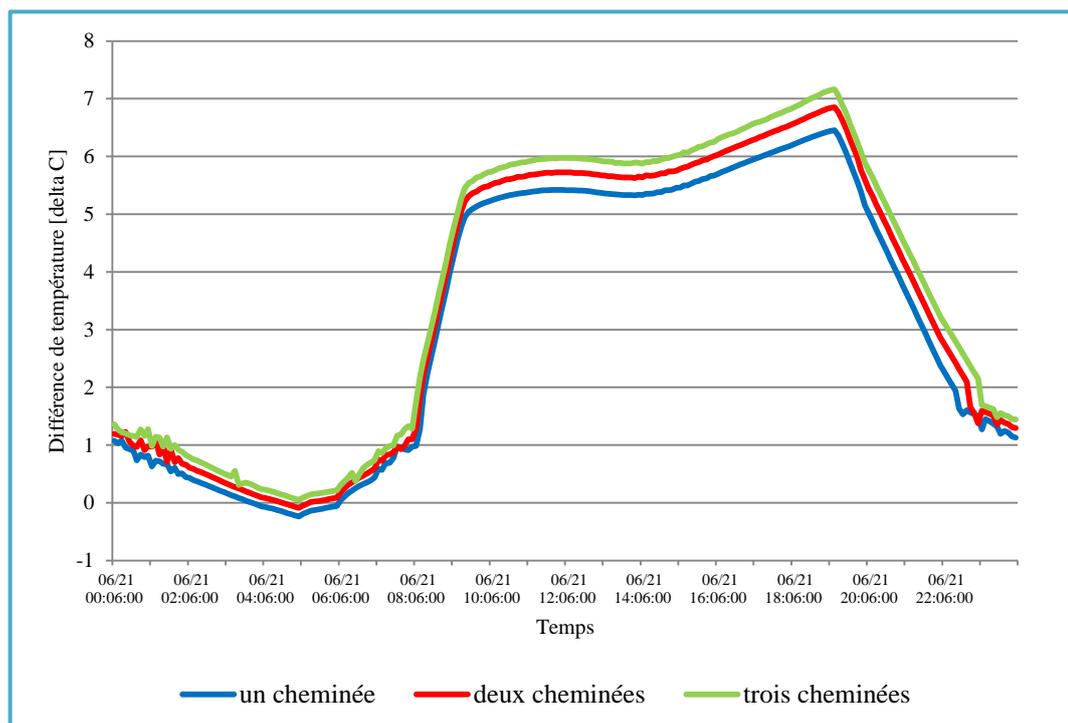


Fig. V.32 : l'effet du nombre de cheminée sur le rendement du système.

VI. EFFET DE L'ORIENTATION SUR LE COMPORTEMENT ET L'EFFICACITE.

La figure (V.33) montre une comparaison de rendement du système pour différentes orientations.; en changeant l'orientation des cheminées du plein SUD au plein OUEST par un champ de 22.5°, le tirage de l'air change causé par le trajectoire du soleil (incidence de rayonnement solaire) durant la journée. Le pic de tirage de la cheminée est à :

14 h 48 pour l'orientation SUD (180°).

14 h 54 pour l'orientation SUD-SUD-OUEST (202,5°).

15 h 06 pour l'orientation SUD-OUEST (225°).

15 h 48 pour l'orientation OUEST-SUD-OUEST (247,5°).

16 h 06 pour l'orientation OUEST (270°).

L'orientation en plein SUD donne un meilleur rendement et meilleur comportement durant la période la plus chaude de la journée.

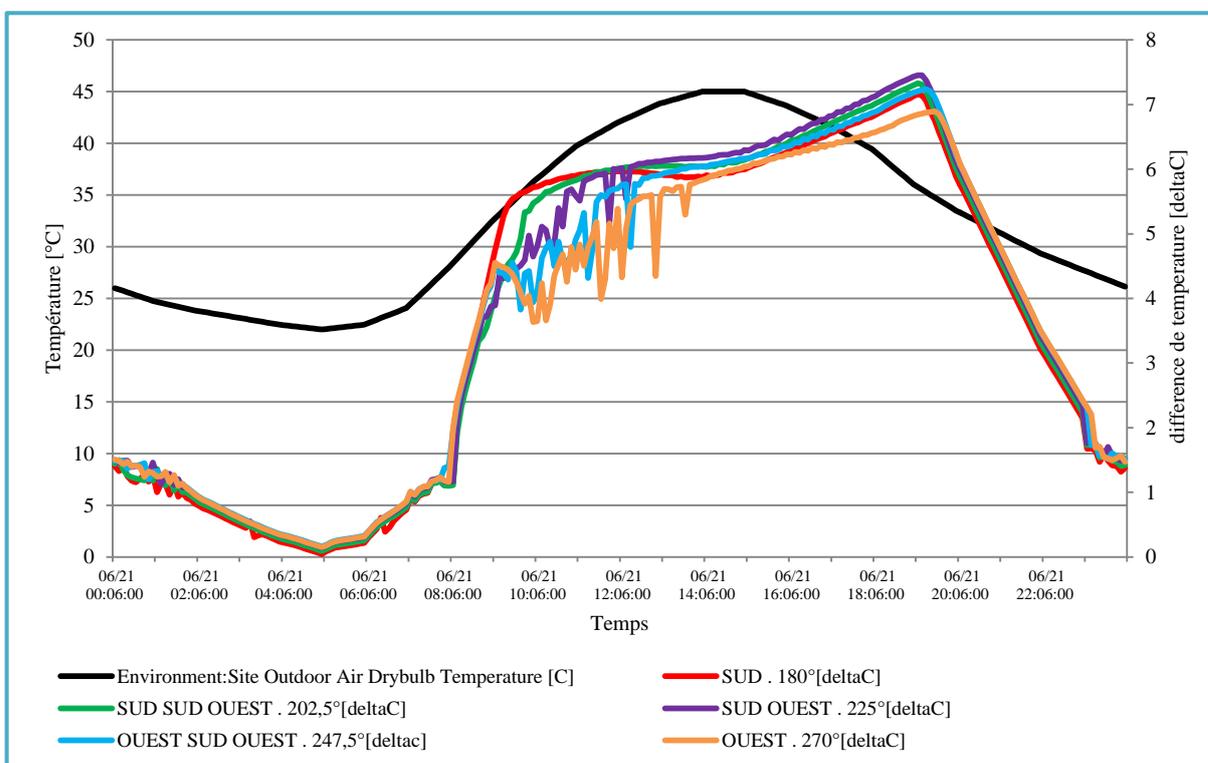


Fig. V.33 : Comparaison entre les différents rendements du système selon l'orientation des cheminées.

VII. EFFET DE L'ORIENTATION ET VITESSE DU VENT.

La figure (V.35) montre le comportement du système et la température intérieure de la cellule (A) sous une direction et vitesse de vent variable montré dans la figure (V.34). Ce vent permet de produire une turbulence à l'intérieur du puits et dans la cheminée solaire qui provoque un effet inverse sur le fonctionnement du système.

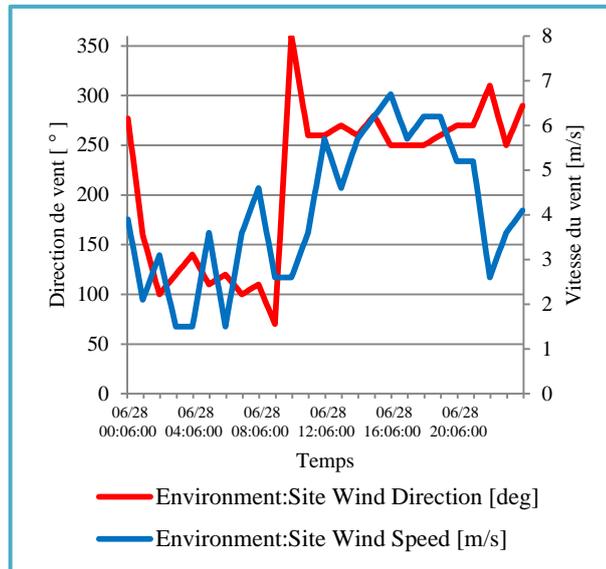


Fig. V.34 : direction et vitesse de vent.

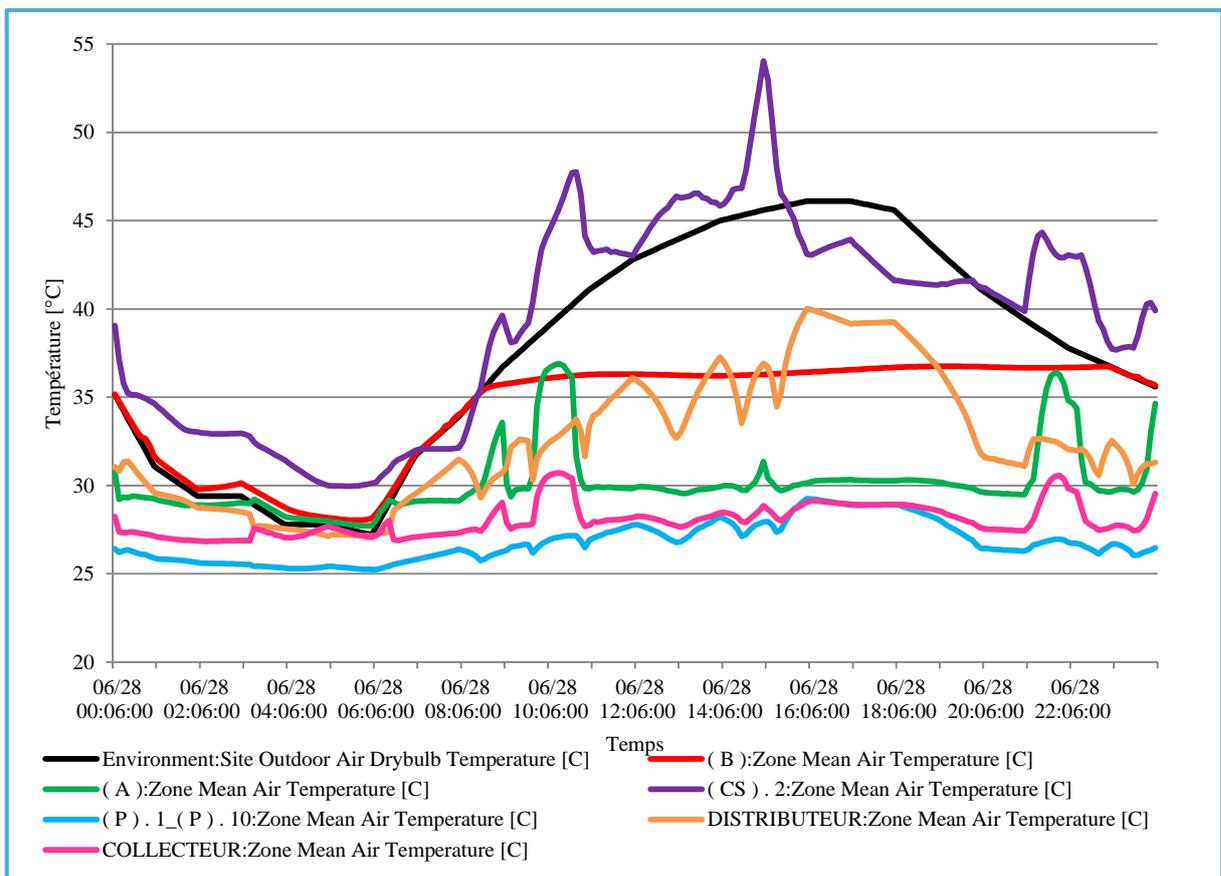


Fig.V.35 : le comportement du système dans les différents composants pour des vitesses et des orientations de vent différentes.

VIII. EFFET DE LA REDUCTION DE LA SURFACE DE SORTIE DE LA CHEMINEE SOUS L'IMPACT DU VENT.

La réduction de section de sortie de cheminée solaire (0,1x0,1m²) permet de réduire la turbulence et d'augmenter la vitesse de sortie de l'air dans la cheminée et de stabiliser le comportement du système représenté dans la figure (V.36).

La figure (V.37) montre une comparaison de rendement de système entre une sortie de cheminée solaire de 0,21x1m² et la sortie de cheminée 0,1x0,1m² sur l'impact du vent ; la réduction de la section permet de faire sortir l'air de cheminée à grande vitesse et de stopper l'inconvénient porté par le vent , minimiser la turbulence et le retour de l'air chauffé de la cheminée vers la cellule.

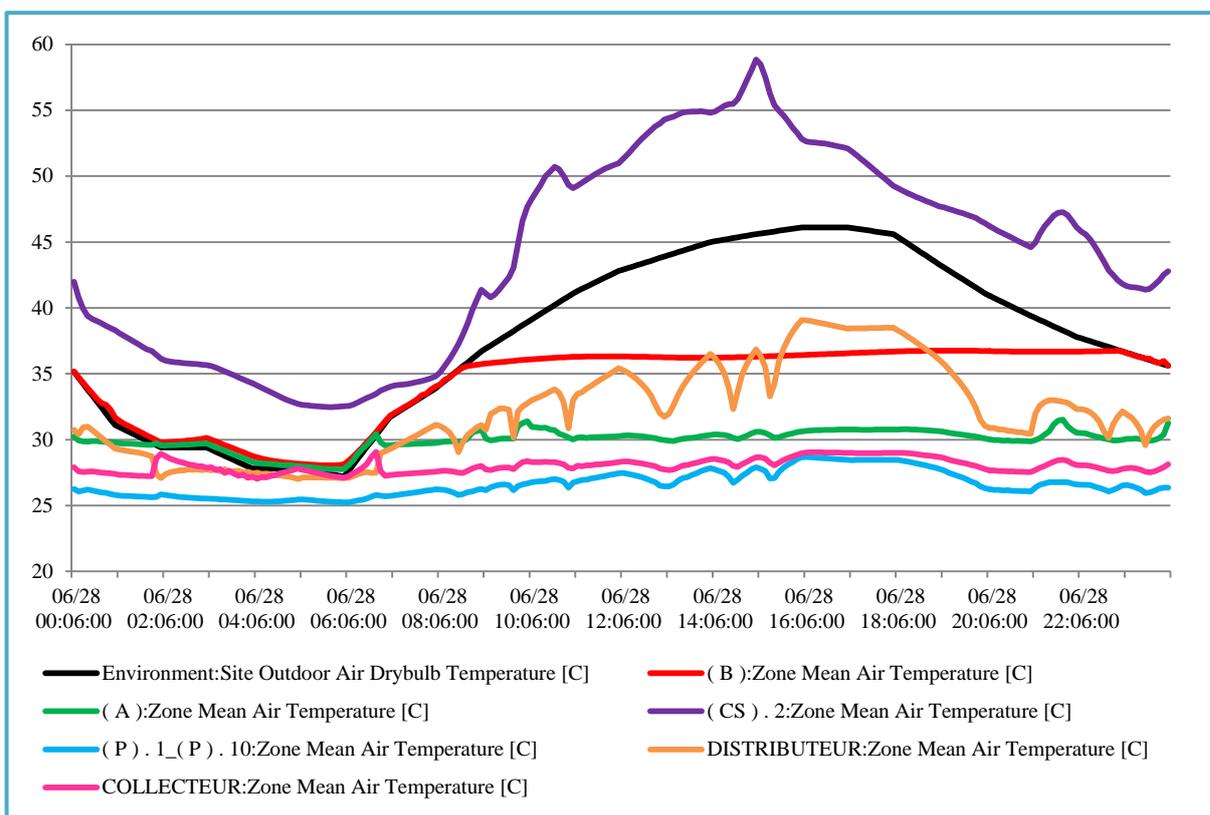


Fig.V.36 : le comportement du système sous l'effet du vent en réduisant la section de sortie de cheminée solaire .

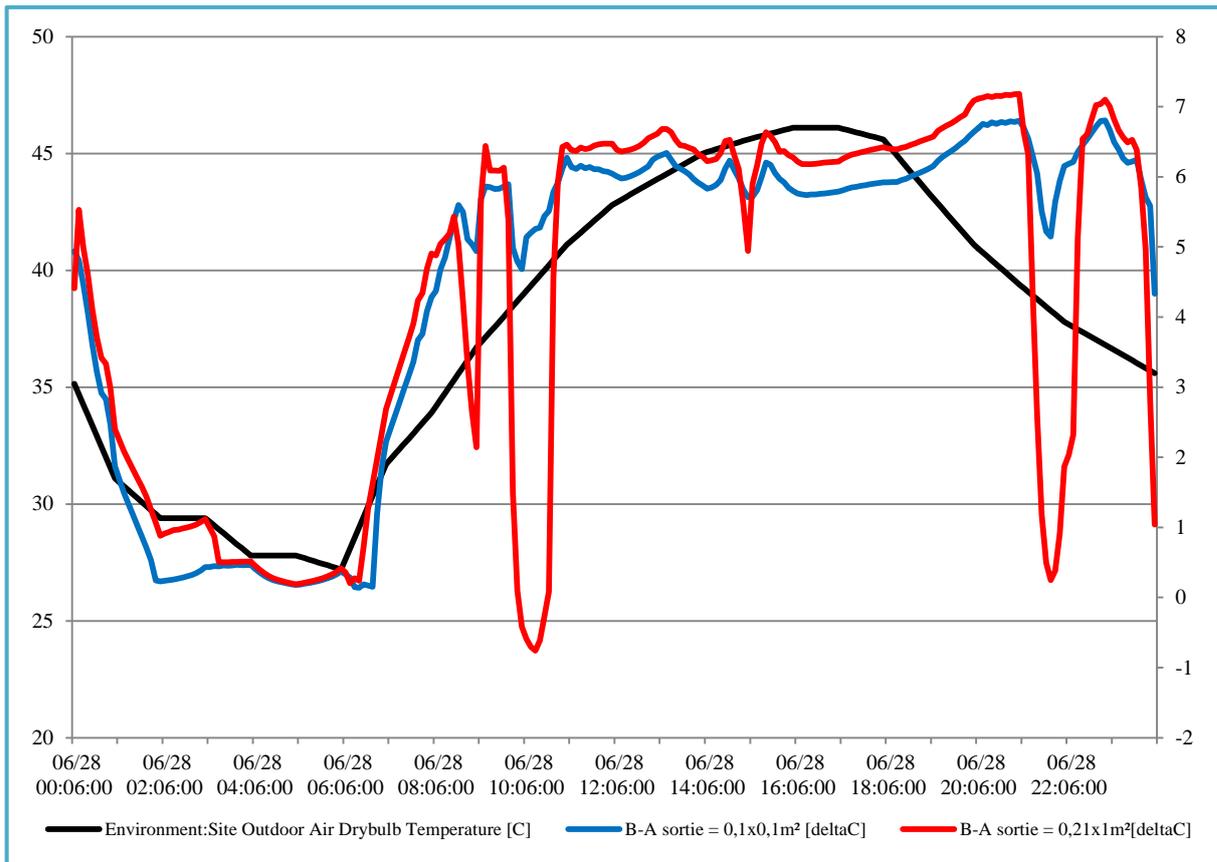


Fig.V.37 : comparaison entre deux sections de sortie de cheminée sous effet de vent.

IX. CONCLUSION.

La simulation thermique dynamique a été appliquée pour évaluer un système de refroidissement passif par l'accouplement de puits climatique a une cheminée solaire dans une chambre cubique de 27 m^3 ; proposée d'être dans une zone a climat chaud et aride exactement dans la région de la vallée de M'Zab au Sahara algérien ($32^\circ 29' 00''$ Nord, $3^\circ 41' 00''$ Est) ; la température du sol calculée durant le mois de juin est autour de $24,26^\circ\text{C}$ dans une profondeur de 3.5 m ou les conduits de puits climatique sont implantés, cette température est proche avec les résultats expérimentaux de Moummi et al (2010) qui se trouve dans la même zone climatique (chaude et aride) exactement dans la ville de Biskra.

La température de l'air est refroidie par le puits climatique durant la journée qui se rapproche à la température de sol ; la fluctuation journalière de la température extérieure varie entre 22°C et 45°C , qui est amortie entre $23,91^\circ\text{C}$ et $26,50^\circ\text{C}$ par le puits climatique. Par contre la température soufflée dans la cellule (A) dans le collecteur est entre $24,70^\circ\text{C}$ et 27°C une légère augmentation significative la recherche de Woodson et al (2012).

La cheminée solaire permet de générer un tirage thermique et de renouveler l'air dans la cellule (A) durant la journée, ce système de cheminée solaire est la seule force motrice du puits climatique et comme un système de renouvellement d'air passif par tirage qui ne permet pas l'entrée de l'air extérieur durant les moments les plus chauds de la journée.

La ventilation nocturne était appliquée dans les deux cellules (A) et (B) qui est une solution à la température extérieure qui permet de refroidir l'intérieur des deux cellules afin de connaître les vraies performances du système étudié pour le refroidissement.

Les dimensions du système jouent un rôle très important sur le comportement et l'efficacité du système, premièrement la disposition du puits climatique en rangées permet de donner une performance continue de refroidissement durant la journée à travers la répartition de l'air similaire dans tous les conduits du puits climatique.

L'augmentation des dimensions du puits (section, longueur, nombre) permet de réduire la vitesse de l'air à l'intérieur des conduits et réduit la fraction et augmente la surface de contact entre l'air-puits-sol ; mais ces dimensions peuvent être réduites en augmentant la section du collecteur jusqu'à $1.00 \times 1.00 \text{ m}^2$ qui relie entre les conduits de puits et la cellule (A) ; la section est optimisée à $0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$ par contre sur la recherche de Maerefat et Haghghi (2010) le diamètre du puits était optimisé à 0.5 m, la longueur dans cette recherche est optimisée à 35 m ce qui a donné de grandes performances par rapport à une longueur de 25 m, et très proche des performances fournies par un puits de longueur de 45 m et pour des raisons économiques et d'entretien ou Maerefat et Haghghi (2010) ont recommandé une longueur supérieure ou égale à 25 m. L'utilisation d'un grand nombre de puits permet d'améliorer le rendement du système pour le refroidissement afin de se rapprocher de la plage de confort thermique qui doit être supérieure de 2 puits ou Maerefat et Haghghi (2010) ont utilisé 12 puits dans les conditions les plus défavorables du climat extérieur et avec un gain intérieur important de 1500 W.

La meilleure disposition des ouvertures de la sortie du puits et l'entrée de la cheminée est HAUT – BAS, qui permet au puits climatique de souffler l'air à l'intérieur d'un point plus haut afin de bien distribuer la fraîcheur et de donner à la cheminée solaire plus de puissance en augmentant la distance entre l'entrée et la sortie de la cheminée.

En augmentant la longueur de la cheminée solaire, la surface d'absorbeur augmente et le débit de ventilation va générer plus en plus. Cette augmentation permet d'augmenter la section d'entrée de la cheminée. La grande surface de la cheminée aide à générer plus de tirage thermique et d'éliminer l'effet inverse qui peut augmenter la température intérieure de la cellule (A).

Le double vitrage, l'isolation des parois latérales, l'épaisseur de la cheminée et l'inertie thermique dans l'absorbeur n'ont aucune influence sur le rendement du système.

Pour un grands nombre des puits (10 puits) l'augmentation du nombre de cheminée permet d'augmenter la capacité de refroidissement du système.

La meilleure orientation de la cheminée est le SUD.

La turbulence engendrée par des vents forts peut être réduite par la réduction de la surface de sortie de la cheminée.

Le système étudié permet de réduire la température intérieure durant la journée d'été dans un climat chaud et aride ou la température du sol est $24.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ à une profondeur de 3.5 m. un puits climatique de deux conduits de 35 m de longueur d'une section de $0.6 \times 0.6\text{ m}^2$.

Une cheminée solaire de $3+4.24\text{m}$ d'une entrée de $0.6 \times 0.1\text{m}^2$. La température moyenne de la cellule (A) entre 9 heure 00 et 19 heure 00 est 30.87°C ou la température moyenne de la cellule (B) est 34.73°C soit un refroidissement moyen de 3.87°C durant la même période

CONCLUSION
GENERALE .

Dans les zones chaudes et arides l'homme a toujours cherché un confort thermique dans un climat torride de grande période estivale par l'installation des climatiseurs dans les bureaux administratifs et les logements. La recherche s'inscrit dans la problématique de la construction qui ne peut plus ignorer tout à la fois les limites physiques de la planète, les exigences sociales des populations urbaines croissantes, leurs attentes de sécurité et de confort, les contraintes fortes de l'environnement et de l'économie. La consommation énergétique dans les bâtiments est en augmentation durant les dix dernières années dans le sud algérien qui va s'élargir de plus en plus dans les prochaines années ; à cause de l'accroissement démographique urbain et les exigences de la vie moderne qui pousse à la réalisation de construction énergivore avec la forte demande de la construction rapide à moindre cout et en grande quantité. Ceci épuise les ressources énergétiques non renouvelables et polluantes qui cause le changement climatique et la déstabilisation du l'écosystème.

L'idée est de valoriser d'autre ressources de refroidissement qui permettent la protection de l'environnement, maitriser la consommation énergétique, assurer un confort thermique intérieur ; l'utilisation des ressources renouvelables par l'exploitation de la géothermie et le soleil permettent de minimiser les besoins en climatisation et en ventilation. L'évaluation d'un système de rafraichissement passif dans les zones chaudes et arides par l'application d'un couplage puits canadien et cheminée solaire sous les conditions climatiques de la vallée de M'Zab (32° 29' 00" Nord, 3° 41' 00" Est) d'une altitude de 506 m.

La recherche bibliographique sur les méthodes traditionnelles de refroidissement pratiquées dans les enceints d'agglomération pour les deux échelles urbaines et architecturales. A travers l'utilisation de la morphologie, densité, disposition, circulation, forme de toit, surface, ouvertures, dispositif d'ombre et matériaux ; ces méthodes ou pratiques sont utilisées et regroupées afin de se rapprocher à satisfaire un environnement thermique intérieur confortable. Déterminer de la zone de confort, norme et ressortir l'effet de climat sur la configuration architecturale.

Les différents modes de refroidissement passif moderne étaient étudiés par plusieurs chercheurs afin de répondre aux exigences de la vie moderne à travers l'utilisation la convection, le rayonnement, l'évaporation, l'inertie du sol. Afin de comprendre les systèmes, son utilisation et les résultats ; cette recherche a permis de savoir les avantages et inconvénients de chaque système pour opter une combinaison entre deux principes de

refroidissement qui se complètent. Le premier permet de refroidir l'air par l'inertie thermique stocké dans le sol peu profond qui est permanente durant l'été par l'amortissement et le déphasage de la température entre l'été et l'hiver ; ce système est combiné avec un système solaire de façade pour la ventilation et l'extraction de l'air intérieur qui va être remplacé par l'air froid a partir du puits climatique en utilisant l'énergie solaire gratuite et inépuisable.

Une recherche bibliographique et la synthèse de connaissances pour le puits climatique et cheminée solaire pour inclure une analyse des découvertes, inventions et nouveautés suivie par une recherche analytique afin d'établir la température du sol durant la saison chaude dans le lieu d'étude avec la suite d'autres modèles mathématiques pour l'échange thermique entre l'air, tube et sol et l'échange dans le cheminée solaire. finalement la température de la cellule rafraichi .

Le système évalué se compose d'un puits canadien a plusieurs conduites enterrées a une profondeur de 3.5 m pour le pré-rafraichissement de l'air extérieur avant de le souffler dans la cellule. La cellule est équipé par une cheminé solaire afin de permettre le renouvellement de l'air a l'intérieur de la cellule et d'être le générateur du puits canadien en utilisant le gisement solaire incitant durant la journée.

Les paramètres influents sur le rendement du système sont :

La température du sol influencé par ces propriétés physiques, surface du sol et les conditions climatique extérieures.

La section, la longueur et le nombre des puits avec la section de collecteur qui joue un rôle majeur pour l'écoulement facile d'air refroidi dans la cellule.

La cheminée solaire permet de générer un tirage thermique qui est influencé par sa surface ; plus cette surface augmente plus le renouvellement d'air et le refroidissement est important.

Le vent permet de créer des turbulences défavorables dans la cheminée solaire qui peut être minimisé par la réduction de la surface de sortie.

Le système a prouvé une efficacité en matière de refroidissement passif durant la période estivale ou la température intérieure reste stable au-dessous de 31 °C durant la journée ou la fluctuation du température entre 09 heure 00 et 19 heure 00 est de 32 °C jusqu'à 45 °C. Sois un gain de température de 14 °C durant les moments les plus chaudes de la journée.

Le puits climatique peut réduire la température de l'air extérieur de 45°C jusqu'à 26°C ou la température du sol est 24,26 °C durant le mois de juin. Ce système doit rester en marche toute les journées et les nuits pour permettre le refroidissement du sol (la nuit) qui entoure les conduits est recherché pour le lendemain. Sans oublier l'utilisation de la ventilation nocturne pour améliorer les performances de refroidissement.

Le sud algérien reçoit à une moyenne d'ensoleillement de dix heures par jour une énergie électrique de 8 kWh/m². Ceci est l'équivalent d'une énergie thermique de 6880 kcal/m² qui représente approximativement un litre d'essence par mètre carré ; cette force permet de faire marcher le système pour une longue durée et rafraîchir avec l'assurance de renouvellement d'air.

Pour perfectionner le système on propose d'appliquer :

- Une couverture végétale autour du site d'implantation pour humidifier l'air et minimiser la température de surface du sol par l'arrosage et la protection des rayons solaires incidents sur la surface.

- Protéger le collecteur des rayons solaires et renforcer isolation de cet élément.

- le puits doit être en marche les nuits pour permettre au sol en contact avec les tubes de se refroidir à nouveau.

- Il n'est pas intéressant d'utiliser une masse thermique dans la cheminée pour son fonctionnement durant les nuits ou le refroidissement et la ventilation sont assurés par la ventilation nocturne.

La recherche dans le domaine de refroidissement passif des bâtiments est nouveau et peu développer en Algérie particulièrement dans le sud qui a un climat très spéciale.

Est-il possible de minimiser les dimensions de puits climatique en ajoutant un système de refroidissement par évaporation à point de rosé dans le collecteur pour le refroidissement de l'air avant d'être soufflé à l'intérieur tout en gardant ou améliorant la capacité de refroidissement ?

Est-il possibilité de modifier la conception de la cheminée pour refroidir l'air extérieur durant les nuits en profitant du rayonnement nocturne ?

Est-il possible d'intégrer un système de ventilation passif en utilisant la force du vent pour résoudre le défi de faible performance du cheminée au vent et au vent de sable qui frappe la région sud algérienne ?

BIBLIOGRAPHIE .

Ouvrage :

Dutreix, A. (2010). Bioclimatisme Et Performances Energétiques Des Bâtiments. Paris : Eyrolles. 240 p.
ISBN : 978-2-212-12702-7

Givoni, B. (1994). Passive Low Energy Cooling of Buildings. Canada: John Wiley & Sons. 263 p

Herzog, B. (2010). Le puits canadien. Paris: Eyrolles. 116p. ISBN : 978-2-212-12723-2

Mak, C. M.(2010) Application of Computational Fluid Dynamics to the Study of Designed Green Features for Sustainable Buildings, Computational Fluid Dynamics, Hyoung Woo Oh (Ed.), ISBN: 978-953- [consulté le 4 juillet 2016]. Disponible à l'adresse: <http://www.intechopen.com/books/computational-fluid-dynamics/application-of-computational-fluid-dynamics-to-the-study-of-designed-green-features-for-sustainable->

Olivier, C. Colleu, A. (2016). 12 solutions bioclimatiques pour l'habitat. Paris: Eyrolles, 230p.
ISBN : 978-2-212-14102-3

Article de revues scientifiques :

ABC. IZARD, J.L. KAÇALA, O. (2006). LES DONNEES THERMO-HYGROMETRIQUES MEDITERRANEENNES. *Laboratoire ABC, ENSA Marseille* .10p

Arce, J., Jimenez, M.J., Guzman, J.D., Heras, M.R., Alvarez, G., Xaman, J. (2009). Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. *Renewable Energy* . Volume 34. 2928-2934.

Balaras, A. C. (1996). The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and Buildings*, volume 24, 1-10

Bansal, N. K. Mathur, R. Bhandari. M. S. (1993). Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Building and Environment* .volume 28. 373–377

Bansal. N.K , Mathur. R, Bhandari. M.S. (1994). A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. *Building and Environment*.volume 29. 495–500

Bassiouny, R. Koura, N.S.A. (2008). An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation. *Energy and Buildings*. Volume 40. 865–873

Ben Cheikh, H. Bouchair, A. (2008). Experimental studies of a passive cooling roof in hot arid areas. *The Open Fuels & Energy Science Journal*.volume 1,1-6

Bencheikh, H. Rachid, A. (2012). The Effects of Green Spaces (Palme Trees) on the Microclimate in Arides Zones, Case Study: Ghardaia, Algeria. *Energy Procedia*.volume 18. 10-20

Benhammou, M. Draoui, B. (2012). Simulation et caractérisation d'un échangeur géothermique à air destiné au rafraîchissement des bâtiments fonctionnant dans les conditions climatiques du sud de l'Algérie. *Revue des Energies Renouvelables* .volume 15. 275-284

Burek, S.A.M. Habeb, A. (2007). Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls. *Energy and Buildings*. volume 39. 128–135

CETIAT. (2008). Les puits canadiens/provençaux, Guide d'information. 32p. [consulté le 22 octobre 2014]. Disponible à l'adresse: http://www.cetiat.fr/fr/publicationsveille/servezvous/guidesgratuits/index.cfm#puits_canadiens

Farmahini-Farahani,M. Heidarinejad,G. Delfani,S. (2010). A two-stage system of nocturnal radiative and indirect evaporative cooling for conditions in Tehran. *Energy and Building*.volume 42, 2131–2138

-
- Gan, G.** (1998). A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings. *Energy and Buildings*. volume 27. 37-43
- Gan, G.** (2006). Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. *Energy and Buildings*. Volume 38. 410-420
- GILL, S.E. HANDLEY, J.F. ENNOS, A.R. PAULEIT, S.** (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *BUILT ENVIRONMENT*, volume 33, 115-133
- Harris, D.J., Helwig, N.** (2007). Solar chimney and building ventilation. *Applied Energy* . Volume 84. 135-146.
- Hirunlabh, J. Wachirapuwadon, S. Pratinthong, N. Khedari, J.** (2001). New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. *Building and Environment*. Volume 36. 383–391
- Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P., Khedari, J.** (1999). Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. *Renewable Energy*. volume 18. 109-119.
- Ho Lee, K. and Strand, R.K.** (2009). Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. *Energy and Buildings*. Volume 41. 615-621.
- Hooff, T. Blocken, B. Aanen, L. et al.** (2011). A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. *Building and Environment*, Volume 46, Issue 9, 1797–1807
- ICEB. Bornarel, A.** (2014). Confort d'été passif. *Les guides BIO-TECH*. ISBN EAN : 978-2-911-533-07-5. [consulté le 02 decembre 2014]. Disponible à l'adresse: http://www.asso-iceb.org/wp-content/uploads/2014/07/guide_bio_tech_confort_d_ete_passif1.pdf
- Ji, Y et Cook, M.J.** (2005). ATRIUM-ASSISTED NATURAL VENTILATION OF MULTI-STOREY BUILDINGS. *Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University, Queens Building, The Gateway, Leicester, LE1 9BH, UK*
- Kamel, M. A.** (2010). a study on shading of buildings as a preventive measure for passive cooling and energy conservation in buildings. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, volume 10, 19-22
- Kamel, M. A.** (2012). An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings: Design Concepts and Architectural Interventions. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, Volume 55, 84-97
- Khair-Al-Din, AEH.** (1991). Earth Sheltered Housing: An Approach to Energy Conservation in Hot Arid Areas. *J. King Saud Univ. Architecture and Planning*, volume 3, 3-18
- Khalajzadeh, V. Farmahini-Farahani, M. Heidarinejad, G.** (2012). A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler. *Energy and Buildings*. volume 49, 604-610
- Khedari, J. Boonsri, B. Hirunlabh, J.** (2000). Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. *Energy and Buildings* . Volume 32. 89–93
- Khedari, J. Rachapradit, N. Hirunlabh, J.** (2003). Field study of performance of solar chimney with airconditioned building. *Energy* . Volume 28. 1099–1114
- Liu, K. Baskaran, B.** (2003). Thermal performance of green roofs through field evaluation, *National Research Council of Canada*. Rapport : NRCC-46412, Ottawa.
- Maciasa.M. Gaonab. J. A. Luxanc. J.M. Gomezc, G.** (2009). Low cost passive cooling system for social housing in dry hot climate. *Energy and Buildings*. volume 41. 915–921
- Macquoy, B.** (2014). Natural ventilation based bioclimatic redevelopment. *Delft University of Technology, Department of Architecture*
-

Maerefat, M. Haghghi, A, P. (2010). Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney. *Renewable Energy*, Volume 35, 2316-2324

Mathur, J. and Mathur, S. (2006), Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation, *Energy and Buildings*, Volume 38. 1156-1163.

Mebarki,B. Draoui, B. Abdessemed, A. Keboucha, A. Drici, S. Salhi, A. (2012). Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar. *Revue des Energies Renouvelables*. Volume 15. 465-478

Mihalakakou, G et Bagiorgas, H. S. (2013). A low-energy innovative system for space cooling. *Université de Patras*, (Grèce), [consulté le 7 juillet 2016]. Disponible à l'adresse: [http://www.aivc.org/sites/default/files/69.1367310444.full .pdf](http://www.aivc.org/sites/default/files/69.1367310444.full.pdf)

Miyazaki, T. Akisawa, A. Nikai, I. (2011). The cooling performance of a building integrated evaporative cooling system driven by solar energy. *Energy and Buildings*. Volume 43. 2211–2218

Moummi, N. Benfatah,H. Hatraf, N. Moummi, A. Youcef Ali, S. (2010). Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra. *Revue des Energies Renouvelables* .volume 13, 399 – 406

Ong, K.S. and Chow, C.C. (2003). Performance of a solar chimney. *Solar Energy* .volume 74 . 1-17.

Raman, P. Mande, S. Kishore, V.V.N. (2001). A passive solar system for thermal comfort conditioning of buildings in composite climates. *Solar Energy*.volume 70. 319–329

Riangvilaikul,B. Kumar,S. (2010). Numerical study of a novel dew point evaporative cooling system. *Energy and Buildings*, Volume 42, 2241–2250

Sellier, D. ARENE Île-de-France. (2012). Ventilation naturelle et mécanique. *Les guides BIO-TECH*.ISBN EAN : 978-2-911533-00-6. [consulté le 10 janvier 2015]. Disponible à l'adresse: http://www.asso-iceb.org/wp-content/uploads/2014/07/guide_bio_tech_ventilation_naturelle_et_mecanique.pdf

Taleghani, M. Behboud, K. T. Heidari, S. (2010).Energy efficient architectural design strategies in hot-dry area of iran: kashan. *Emirates Journal for Engineering Researc*.volume 15, 85-91

Woodson, T. Coulibaly, Y. Traoré, E. S. (2012). Earth-Air Heat Exchangers for Passive Air Conditioning: Case Study Burkina Faso. *Journal of Construction in Developing Countries*.volume 17, 21-32

Zhai, X.Q. Dai, Y.J. Wang, R.Z. (2005). Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors, *Applied Thermal Engineering*. Volume 25. 741–757

Thèse, mémoire, cours et rapports de recherche :

Ben Cheikh, H. (2007). Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio évaporative dans les climats chauds et arides. Thèse doctorat. Université Mentouri de Constantine. (Algerie)

Bouchair, A. (1989). Solar induced ventilation in the Algerian and similar climates. Thèse de doctorat. Université de Leeds, (Royaume-Uni)

DUGUE, A. (2013) . Caractérisation Et Valorisation De Protections Solaires Pour La Conception De Bâtiments : Analyse Expérimentale Et Propositions De Modélisations, Thèse Doctorat, L'université Bordeaux I. (France)

Hollumer, P. (2002). Utilisation des Echangeurs Air/Sol pour le Chauffage et le Rafraîchissement des Bâtiments. Thèse de Doctorat, Université de Genève. (Suisse)

Peron, F. (2015). Climate, Vernacular Architecture and Architecture Regionalism. Cours de master en Architecture et Innovation. Université IUAV de Venise. (italie)

Thiers, S. (2008). Bilans Energétiques Et Environnementaux De Bâtiments A Energie Positive. Thèse doctorat. École nationale supérieure des mines de Paris.(France)

Communication à congrès :

Baâli, S. Bensalem, R. Boussoulim. Bencheriet, N. (2014). RAFRAÎCHISSEMENT PASSIF DU BÂTIMENT PAR LA GÉOTHERMIE. Conférence IBPSA France-Arras.

Charvat, P., Jicah, M., Stetina, J. (2004). Solar chimneys for ventilation and passive cooling. *World Renewable Energy Congress*, Denver, USA.

Khabbaz, m. Benhamou, b. Hamdi, h. Bennouna, a. Hollmuller, p. (2014). Etude expérimentale d'un échangeur de chaleur air-sol (puits canadien) pour le rafraîchissement d'un bâtiment résidentiel à Marrakech. Troisième Congrès de l'Association Marocaine de Thermique. 21-22 Avril 2014. Agadir (Maroc)

Mofidi, S.M. (2007). Passive architectural cooling principles for arid climates. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century. PALENC 2007 -volume 2.indd .7/9/2007.674-677

Moossavi, S.M. (2011). Passive Cooling Systems for Hot-Arid Climate in Islamic Iranian Architecture. ICIAA 2011. November 11-13, 2011. New Delhi, 43p

Nugroho, A. M. Hamdan bin Ahmad, M. (2005). POSSIBILITY TO USE SOLAR INDUCED VENTILATION STRATEGIES IN TROPICAL CONDITIONS BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC SIMULATION. Le 6 emme Séminaire international sur le développement durable de l'environnement et l'architecture.(September 2005) Department of Architecture, Institut Teknologi Bandung, Indonesia .

Site web :

ENERGIE +. [consulté le 17 juillet 2016]. Disponible à l'adresse: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18273>

EnergyPlus. <https://energyplus.net/downloads>

IBEG.(2007). REALISER UN PUIT CANADIEN / PROVENÇAL. GUIDE PRATIQUE POUR LA CONSTRUCTION ET LA RENOVATION DURABLES DE PETITS BATIMENTS . RECOMMANDATION PRATIQUE ENE22

Loyau, F. Le puits canadien à la loupe . [consulté le 17 decembre 2014]. Disponible à l'adresse: <http://www.fiabitat.com/le-bioclimatisme-a-la-loupe/>

renewables – Made in Germany. Berlin, Allemagne. [consulté le 17 juillet 2016]. Disponible à l'adresse: <http://www.renewables-made-in-germany.com/en/renewables-made-in-germany/technologies/geothermal/geothermal-energy/technologies-and-applications.html>

weatherspark.com (meteo ghardaia)

Autre :

meteonorm.com

Station météorologique (GHARDAIA)

ANNEXES .

ANNEXES 1 : les résultats de simulation avec un intervalle de 60 minutes .

1. La température de l'air dans les différentes zones sans ventilation (journalière et nocturne) et sans fonctionnement du système.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	(B): Mean Air Temperature [C]	(A): Mean Air Temperature [C]	(CH).2: Mean Air Temperature [C]	(P).1_(P).10: Mean Air Temperature [C]	DISTRIB: Mean Air Temperature [C]	COLLEC: Mean Air Temperature [C]	(B)-(A): Temperature difference [delta C]
01:00:00	24,76	41,420	41,569	43,268	24,332	32,687	30,081	-0,149
02:00:00	23,84	41,438	41,582	41,679	24,333	32,668	30,104	-0,143
03:00:00	23,15	41,443	41,580	40,231	24,332	32,650	30,123	-0,137
04:00:00	22,46	41,428	41,564	38,865	24,332	32,625	30,136	-0,135
05:00:00	22	41,391	41,526	37,617	24,332	32,598	30,143	-0,135
06:00:00	22,46	41,330	41,470	36,655	24,332	32,578	30,145	-0,139
07:00:00	24,07	41,310	41,454	36,478	24,332	32,648	30,139	-0,143
08:00:00	27,98	41,412	41,556	37,417	24,333	32,772	30,129	-0,144
09:00:00	32,35	41,525	41,673	39,793	24,333	32,860	30,113	-0,148
10:00:00	36,26	41,789	41,940	43,276	24,334	32,930	30,093	-0,151
11:00:00	39,71	41,885	42,047	48,160	24,334	32,978	30,069	-0,161
12:00:00	42,01	41,826	42,002	53,442	24,334	33,004	30,043	-0,175
13:00:00	43,85	41,739	41,930	57,722	24,334	33,002	30,018	-0,190
14:00:00	45	41,600	41,808	62,076	24,334	33,018	29,995	-0,208
15:00:00	45	41,569	41,790	63,931	24,334	33,038	29,975	-0,221
16:00:00	43,62	41,654	41,878	64,108	24,334	33,040	29,962	-0,224
17:00:00	41,78	41,770	41,989	62,704	24,334	33,041	29,954	-0,218
18:00:00	39,48	41,862	42,077	59,709	24,334	33,034	29,953	-0,215
19:00:00	36,03	41,886	42,094	56,175	24,334	32,988	29,958	-0,207
20:00:00	33,5	41,772	41,966	53,153	24,333	32,879	29,969	-0,194
21:00:00	31,43	41,544	41,734	51,088	24,333	32,818	29,986	-0,190
22:00:00	29,36	41,385	41,569	48,864	24,333	32,769	30,006	-0,184
23:00:00	27,75	41,371	41,543	46,916	24,332	32,738	30,030	-0,172
24:00:00	26,14	41,404	41,564	45,029	24,332	32,711	30,056	-0,159

2. : La température de l'air dans les différentes zones sans ventilation (journalier et nocturne) et avec fonctionnement du système.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	(B): Mean Air Temperature [C]	(A): Mean Air Temperature [C]	(CH).2: Mean Air Temperature [C]	(P).1_(P).10: Mean Air Temperature [C]	DISTRIB: Mean Air Temperature [C]	COLLEC: Mean Air Temperature [C]	(B)-(A): Temperature difference [delta C]
01:00:00	24,76	41,419	36,245	35,020	24,800	26,886	26,833	5,173
02:00:00	23,84	41,437	36,268	33,882	24,780	26,728	26,841	5,169
03:00:00	23,15	41,442	36,317	32,872	24,762	26,602	26,867	5,124
04:00:00	22,46	41,427	36,294	31,920	24,750	26,443	26,854	5,133
05:00:00	22	41,390	36,328	31,037	24,735	26,354	26,890	5,061
06:00:00	22,46	41,329	36,366	30,500	24,750	26,431	26,949	4,963
07:00:00	24,07	41,310	36,656	29,699	24,837	26,756	27,463	4,654
08:00:00	27,98	41,403	36,797	32,086	24,915	26,996	27,666	4,605
09:00:00	32,35	41,525	37,212	35,128	24,986	27,407	27,845	4,313
10:00:00	36,26	41,788	37,797	39,024	25,066	27,972	27,970	3,990
11:00:00	39,71	41,891	38,255	43,998	25,151	28,648	27,972	3,636
12:00:00	42,01	41,839	37,506	48,349	25,210	29,360	27,619	4,332
13:00:00	43,85	41,7355	37,627	50,587	25,274	29,802	27,650	4,107
14:00:00	45	41,6000	37,260	52,724	25,309	30,233	27,513	4,339
15:00:00	45	41,574	36,801	53,206	25,347	30,360	27,347	4,773
16:00:00	43,62	41,650	36,771	51,977	25,288	30,121	27,279	4,879
17:00:00	41,78	41,770	36,794	50,549	25,227	29,751	27,235	4,975
18:00:00	39,48	41,882	36,805	48,171	25,153	29,269	27,163	5,076
19:00:00	36,03	41,891	36,695	45,29	25,044	28,578	27,042	5,196
20:00:00	33,5	41,752	36,550	43,002	24,977	28,120	26,976	5,201
21:00:00	31,43	41,508	36,363	41,080	24,923	27,763	26,920	5,145
22:00:00	29,36	41,391	36,250	39,504	24,878	27,460	26,862	5,140
23:00:00	27,75	41,368	36,235	37,940	24,844	27,258	26,859	5,133
24:00:00	26,14	41,404	36,243	36,411	24,822	27,096	26,852	5,160

3. La température de l'air dans les différentes zones avec ventilation nocturne et avec fonctionnement du système.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	(B): Mean Air Temperature [C]	(A): Mean Air Temperature [C]	(CH).2: Mean Air Temperature [C]	(P).1_(P).10: Mean Air Temperature [C]	DISTRIB: Mean Air Temperature [C]	COLLEC: Mean Air Temperature [C]	(B)-(A): Temperature difference [delta C]
01:00:00	24,76	27,612	27,388	32,998	24,728	26,693	26,437	0,223
02:00:00	23,84	26,915	26,734	32,002	24,733	26,671	26,212	0,181
03:00:00	23,15	26,320	26,219	30,785	24,663	26,350	26,126	0,100
04:00:00	22,46	25,760	25,766	30,009	24,615	25,817	25,966	-0,006
05:00:00	22	25,345	25,438	29,028	24,520	25,323	25,827	-0,092
06:00:00	22,46	25,679	25,713	28,798	24,522	25,597	25,822	-0,033
07:00:00	24,07	26,844	26,695	29,531	24,679	26,530	26,253	0,148
08:00:00	27,98	29,641	29,367	31,891	24,813	27,001	27,118	0,274
09:00:00	32,35	32,510	32,123	35,381	24,850	27,411	26,715	0,387
10:00:00	36,26	33,733	33,140	39,497	24,952	28,007	26,957	0,593
11:00:00	39,71	34,271	33,252	43,985	25,060	28,810	26,895	1,018
12:00:00	42,01	34,463	33,054	47,400	25,159	29,499	26,804	1,408
13:00:00	43,85	34,504	32,931	50,075	25,231	30,028	26,775	1,573
14:00:00	45	34,517	32,790	51,690	25,281	30,345	26,747	1,726
15:00:00	45	34,617	32,826	51,808	25,281	30,381	26,726	1,791
16:00:00	43,62	34,821	32,919	50,803	25,250	30,126	26,696	1,901
17:00:00	41,78	35,046	33,028	49,350	25,187	29,772	26,649	2,018
18:00:00	39,48	35,247	33,116	47,354	25,112	29,288	26,600	2,130
19:00:00	36,03	35,397	33,125	44,361	24,992	28,555	26,512	2,272
20:00:00	33,5	34,052	33,017	42,120	24,926	28,092	26,459	1,035
21:00:00	31,43	32,455	31,965	39,721	24,991	28,242	28,177	0,489
22:00:00	29,36	31,002	30,608	37,794	24,872	27,391	27,658	0,393
23:00:00	27,75	29,852	29,539	36,132	24,849	27,228	27,195	0,313
24:00:00	26,14	28,652	28,382	34,484	24,752	26,733	26,848	0,270

4. Le comportement du système ou le puits climatique est disposé en linéaire.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	(B): Mean Air Temperature [C]	(A): Mean Air Temperature [C]	(CH).2: Mean Air Temperature [C]	(P).1, (P).2, (P).4, (P).5 : Mean Air Temperature [C]	(P).3 : Mean Air Temperature [C]	(B)-(A): Temperature difference [delta C]
01:00:00	24,76	27,565	26,828	32,865	25,273	25,193	0,736
02:00:00	23,84	26,84	26,256	31,690	24,937	24,869	0,590
03:00:00	23,15	26,322	25,814	30,707	24,677	24,608	0,508
04:00:00	22,46	25,742	25,334	29,741	24,354	24,279	0,407
05:00:00	22	25,287	24,976	28,925	24,110	24,021	0,310
06:00:00	22,46	25,638	25,259	28,641	24,330	24,241	0,378
07:00:00	24,07	26,795	26,216	29,274	25,078	24,979	0,579
08:00:00	27,98	29,607	28,762	31,431	26,161	26,110	0,844
09:00:00	32,35	32,482	29,773	34,536	25,824	25,698	2,708
10:00:00	36,26	33,650	30,251	37,907	26,813	26,338	3,399
11:00:00	39,71	34,010	30,606	41,331	28,140	26,540	3,404
12:00:00	42,01	34,391	30,951	44,405	29,578	26,619	3,440
13:00:00	43,85	34,457	31,451	47,034	30,498	26,801	3,006
14:00:00	45	34,484	31,673	48,726	31,037	26,906	2,810
15:00:00	45	34,589	31,757	49,267	31,021	26,918	2,832
16:00:00	43,62	34,792	31,675	48,597	30,539	26,828	3,117
17:00:00	41,78	35,018	31,428	47,436	29,817	26,670	3,590
18:00:00	39,48	35,220	31,119	45,683	28,868	26,470	4,101
19:00:00	36,03	35,347	30,773	43,302	27,289	26,212	4,573
20:00:00	33,5	34,071	30,584	41,300	26,473	25,970	3,486
21:00:00	31,43	32,372	30,371	39,506	25,961	25,738	2,001
22:00:00	29,36	31,036	30,134	37,672	26,906	26,808	0,902
23:00:00	27,75	29,821	28,900	35,976	26,214	26,120	0,921
24:00:00	26,14	28,672	27,814	34,330	25,660	25,562	0,857

5. Le comportement du système ou le puits climatique est disposé en rangées.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	(B) : Mean Air Temperature [C]	(A) : Mean Air Temperature [C]	(CH).2: Mean Air Temperature [C]	(P).1_ (P).5 : Mean Air Temperature [C]	DISTRIB: Mean Air Temperature [C]	COLLEC: Mean Air Temperature [C]	(B)-(A): Temperature difference [delta C]
01:00:00	24,76	27,570	27,346	32,883	24,860	26,620	26,669	0,224
02:00:00	23,84	26,846	26,668	31,715	24,597	25,345	25,810	0,178
03:00:00	23,15	26,264	26,195	30,714	24,411	24,385	25,380	0,069
04:00:00	22,46	25,727	25,697	29,753	23,942	23,597	24,872	0,029
05:00:00	22	25,272	25,336	28,951	23,849	23,107	24,708	-0,064
06:00:00	22,46	25,626	25,549	28,696	23,892	23,558	24,678	0,077
07:00:00	24,07	26,795	26,626	29,421	24,6114	25,776	26,129	0,169
08:00:00	27,98	29,620	29,288	31,795	24,956	26,806	27,575	0,331
09:00:00	32,35	32,511	30,783	34,825	25,289	28,634	28,757	1,728
10:00:00	36,26	33,718	31,145	38,475	25,439	29,837	28,936	2,572
11:00:00	39,71	34,252	31,382	42,465	25,645	31,038	29,146	2,870
12:00:00	42,01	34,444	31,463	45,887	25,801	31,993	29,224	2,980
13:00:00	43,85	34,487	31,461	48,663	25,923	32,747	29,248	3,025
14:00:00	45	34,499	31,459	50,491	26,000	33,219	29,263	3,040
15:00:00	45	34,634	31,495	50,810	26,001	33,308	29,270	3,138
16:00:00	43,62	34,796	31,552	49,613	25,959	32,918	29,270	3,243
17:00:00	41,78	35,031	31,612	48,382	25,860	32,410	29,268	3,418
18:00:00	39,48	35,284	31,674	46,174	25,754	31,624	29,247	3,610
19:00:00	36,03	35,376	31,631	43,486	25,572	30,533	29,135	3,744
20:00:00	33,5	34,047	31,539	41,334	25,441	29,701	29,028	2,508
21:00:00	31,43	32,438	31,899	39,563	25,123	28,497	28,676	0,538
22:00:00	29,36	30,988	30,425	37,619	25,132	27,428	28,211	0,562
23:00:00	27,75	29,829	29,476	35,997	24,971	27,041	27,543	0,353
24:00:00	26,14	28,647	28,518	34,380	24,902	26,226	27,120	0,128

6. le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de 0.3x0.3 m².

Date : 06/21	Outdoor environment [C]	0,3x0,3 m ²	0,3x0,3 m ²	0,3x0,3 m ²	0,3x0,3 m ²	0,3x0,3 m ²	0,3x0,3 m ²	0,3x0,3 m ²	0,3x0,3 m ²	0,3x0,3 m ²
Time		L = 25m 6 PUIITS [deltaC]	L = 25m 8 PUIITS [deltaC]	L = 25m 10 PUIITS [deltaC]	L = 35m 6 PUIITS [deltaC]	L = 35m 8 PUIITS [deltaC]	L = 35m 10 PUIITS [deltaC]	L = 45m 6 PUIITS [deltaC]	L = 45m . 8 PUIITS [deltaC]	L = 45m 10 PUIITS [deltaC]
01:00:00	24,76	0,156	0,187	0,184	0,142	0,128	0,171	0,105	0,129	0,195
02:00:00	23,84	0,080	0,146	0,126	0,087	0,109	0,180	0,083	0,066	0,133
03:00:00	23,15	-0,016	0,130	0,036	-0,007	0,038	0,047	0,012	0,039	0,063
04:00:00	22,46	-0,136	-0,099	-0,072	-0,124	-0,075	-0,060	-0,104	-0,072	-0,043
05:00:00	22	-0,223	-0,186	-0,157	-0,212	-0,164	-0,146	-0,194	-0,161	-0,1311
06:00:00	22,46	-0,163	-0,128	-0,101	-0,152	-0,106	-0,090	-0,135	-0,104	-0,075
07:00:00	24,07	0,050	0,076	0,1003	0,055	0,098	0,102	0,0731	0,098	0,105
08:00:00	27,98	0,197	0,219	0,236	0,205	0,227	0,168	0,147	0,162	0,163
09:00:00	32,35	0,415	0,460	0,487	0,443	0,473	0,443	0,442	0,469	0,186
10:00:00	36,26	0,953	1,066	1,155	0,986	1,020	1,152	0,939	1,048	1,121
11:00:00	39,71	1,225	1,431	1,539	1,330	1,457	1,546	1,322	1,476	1,582
12:00:00	42,01	1,491	1,633	1,723	1,522	1,664	1,742	1,549	1,684	1,759
13:00:00	43,85	1,567	1,702	1,785	1,603	1,723	1,808	1,645	1,744	1,837
14:00:00	45	1,596	1,714	1,813	1,630	1,752	1,838	1,657	1,772	1,872
15:00:00	45	1,644	1,772	1,872	1,678	1,810	1,900	1,706	1,832	1,934
16:00:00	43,62	1,740	1,866	1,967	1,782	1,905	1,996	1,808	1,937	2,030
17:00:00	41,78	1,830	1,964	2,065	1,869	2,005	2,094	1,895	2,030	2,127
18:00:00	39,48	1,928	2,064	2,161	1,967	2,102	2,189	1,992	2,126	2,221
19:00:00	36,03	2,080	2,212	2,300	2,115	2,235	2,325	2,137	2,256	2,355
20:00:00	33,5	0,801	0,914	0,997	0,833	0,946	1,019	0,853	0,965	1,048
21:00:00	31,43	0,429	0,463	0,534	0,443	0,520	0,547	0,451	0,531	0,561
22:00:00	29,36	0,321	0,349	0,378	0,332	0,367	0,387	0,339	0,375	0,397
23:00:00	27,75	0,245	0,276	0,252	0,237	0,285	0,303	0,260	0,228	0,312
24:00:00	26,14	0,187	0,208	0,203	0,187	0,205	0,220	0,204	0,224	0,195

7. le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de 0.5x0.5 m².

Date : 06/21	Outdoor environment [C]	0,5x0,5 m ² L = 25m . 6 PUIITS .	0,5x0,5 m ² L = 25m . 8 PUIITS .	0,5x0,5 m ² L = 25m . 10 PUIITS .	0,5x0,5 m ² . L = 35m . 6 PUIITS .	0,5x0,5 m ² L = 35m . 8 PUIITS .	0,5x0,5 m ² L = 35m . 10 PUIITS .	0,5x0,5 m ² L = 45m . 6 PUIITS .	0,5x0,5 m ² L = 45m . 8 PUIITS .	0,5x0,5 m ² L = 45m . 10 PUIITS .
Time		[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]
01:00:00	24,76	0,293	0,349	0,412	0,299	0,376	0,479	0,365	0,439	0,383
02:00:00	23,84	0,169	0,228	0,200	0,177	0,229	0,322	0,203	0,295	0,329
03:00:00	23,15	-0,017	0,044	0,098	0,038	0,093	0,144	0,060	0,134	0,161
04:00:00	22,46	-0,237	-0,171	-0,113	-0,188	-0,126	-0,072	-0,166	-0,089	-0,054
05:00:00	22	-0,377	-0,321	-0,272	-0,342	-0,289	-0,243	-0,327	-0,264	-0,230
06:00:00	22,46	-0,251	-0,193	-0,1427	-0,214	-0,159	-0,113	-0,199	-0,133	-0,099
07:00:00	24,07	0,145	0,200	0,218	0,188	0,213	0,267	0,193	0,256	0,288
08:00:00	27,98	0,312	0,373	0,378	0,486	0,364	0,384	0,357	0,377	0,392
09:00:00	32,35	1,523	1,683	1,809	1,593	1,757	1,864	1,633	1,783	1,906
10:00:00	36,26	2,577	2,791	2,942	2,634	2,872	3,004	2,681	2,891	3,050
11:00:00	39,71	2,776	2,969	3,113	2,869	3,076	3,203	2,920	3,142	3,262
12:00:00	42,01	2,875	3,057	3,205	3,001	3,180	3,309	3,071	3,255	3,376
13:00:00	43,85	2,882	3,066	3,216	3,016	3,197	3,328	3,092	3,278	3,401
14:00:00	45	2,875	3,060	3,212	3,016	3,200	3,332	3,098	3,285	3,408
15:00:00	45	2,954	3,143	3,297	3,1009	3,287	3,422	3,185	3,375	3,501
16:00:00	43,62	3,101	3,293	3,449	3,248	3,437	3,574	3,333	3,526	3,654
17:00:00	41,78	3,264	3,458	3,614	3,408	3,598	3,736	3,491	3,685	3,813
18:00:00	39,48	3,421	3,614	3,768	3,560	3,748	3,884	3,638	3,830	3,957
19:00:00	36,03	3,585	3,771	3,918	3,713	3,893	4,023	3,785	3,968	4,089
20:00:00	33,5	2,288	2,467	2,608	2,405	2,578	2,703	2,469	2,647	2,764
21:00:00	31,43	1,030	1,145	1,218	1,124	1,184	1,306	1,1620	1,249	1,363
22:00:00	29,36	0,769	0,824	0,897	0,818	0,892	0,939	0,8388	0,924	0,972
23:00:00	27,75	0,525	0,524	0,575	0,623	0,684	0,724	0,6514	0,709	0,748
24:00:00	26,14	0,397	0,456	0,478	0,453	0,480	0,5007	0,4515	0,539	0,546

8. le rendement du système en fonction de la longueur et le nombre pour une section des tubes de 0.7x0.7 m².

Date : 06/21	Outdoor environment [C]	0,7x0,7 m ² L = 25m . 6 PUIITS .	0,7x0,7 m ² L = 25m . 8 PUIITS .	0,7x0,7 m ² L = 25m . 10 PUIITS .	0,7x0,7 m ² . L = 35m . 6 PUIITS .	0,7x0,7 m ² L = 35m . 8 PUIITS .	0,7x0,7 m ² L = 35m . 10 PUIITS .	0,7x0,7 m ² L = 45m . 6 PUIITS .	0,7x0,7 m ² L = 45m . 8 PUIITS .	0,7x0,7 m ² L = 45m . 10 PUIITS .
Time		[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]	[deltaC]
01:00:00	24,76	0,421	0,567	0,642	0,357	0,649	0,681	0,732	0,673	0,647
02:00:00	23,84	0,183	0,347	0,305	0,320	0,255	0,471	0,341	0,446	0,508
03:00:00	23,15	-0,027	0,069	0,128	0,060	0,153	0,215	0,112	0,212	0,250
04:00:00	22,46	-0,303	-0,221	-0,151	-0,237	-0,155	-0,088	-0,191	-0,107	-0,054
05:00:00	22	-0,445	-0,385	-0,331	-0,404	-0,344	-0,293	-0,377	-0,316	-0,274
06:00:00	22,46	-0,329	-0,207	-0,152	-0,228	-0,163	-0,111	-0,198	-0,131	-0,089
07:00:00	24,07	0,251	0,295	0,369	0,287	0,383	0,434	0,351	0,422	0,427
08:00:00	27,98	0,576	0,653	0,879	0,531	0,574	0,630	0,964	0,996	0,636
09:00:00	32,35	2,577	2,765	2,934	2,740	2,922	3,054	2,817	3,018	3,125
10:00:00	36,26	3,684	3,897	4,072	3,872	4,075	4,229	3,974	4,192	4,324
11:00:00	39,71	3,767	3,992	4,177	3,987	4,202	4,368	4,118	4,340	4,484
12:00:00	42,01	3,781	4,011	4,202	4,023	4,244	4,418	4,172	4,399	4,549
13:00:00	43,85	3,735	3,965	4,160	3,989	4,214	4,392	4,149	4,379	4,535
14:00:00	45	3,689	3,921	4,116	3,953	4,180	4,362	4,121	4,354	4,513
15:00:00	45	3,770	4,006	4,205	4,042	4,273	4,458	4,215	4,452	4,615
16:00:00	43,62	3,957	4,197	4,398	4,229	4,463	4,649	4,402	4,641	4,805
17:00:00	41,78	4,180	4,423	4,625	4,446	4,683	4,867	4,615	4,854	5,017
18:00:00	39,48	4,406	4,651	4,850	4,661	4,895	5,077	4,821	5,057	5,216
19:00:00	36,03	4,636	4,874	5,064	4,869	5,095	5,268	5,014	5,241	5,394
20:00:00	33,5	3,389	3,618	3,801	3,599	3,817	3,983	3,728	3,948	4,095
21:00:00	31,43	2,036	2,259	2,436	2,229	2,442	2,604	2,349	2,563	2,705
22:00:00	29,36	1,222	1,295	0,874	0,989	1,379	1,484	1,378	1,476	0,990
23:00:00	27,75	0,815	0,886	1,122	0,888	0,870	0,895	1,070	0,968	0,979
24:00:00	26,14	0,643	0,761	0,840	0,659	0,708	0,767	0,744	0,858	0,792

9. le rendement du système en fonction des sections des puits avec la section de collecteur et sortie du puits climatique.

Date :06/21	Outdoor environment [C]	S.coll= 0,3x0,3m ² 10PUITS,S= 0,3x0,3m ² [deltaC]	S.coll= 0,4x0,4m ² 10PUITS,S= 0,4x0,4m ² [deltaC]	S.coll= 0,5x0,5m ² 10PUITS,S= 0,5x0,5m ² [deltaC]	S.coll= 0,6x0,6m ² 10PUITS,S= 0,6x0,6m ² [deltaC]	S.coll= 0,7x0,7m ² . 10 PUITS, S=0,7x0,7m ² [deltaC]	S.coll= 0,5x0,5m ² 10PUITS,S= 0,3x0,3m ² [deltaC]
Time							
00:06:00	26,00	0,182	0,330	0,449	0,627	0,868	0,360
01:06:00	24,66	0,178	0,229	0,433	0,551	0,634	0,224
03:06:00	23,08	0,037	0,088	0,120	0,156	0,185	-0,043
04:06:00	22,41	-0,069	-0,072	-0,090	-0,101	-0,110	-0,193
05:06:00	22,04	-0,139	-0,179	-0,131	-0,251	-0,259	-0,275
06:06:00	22,62	-0,067	-0,064	-0,064	-0,052	-0,036	-0,162
07:06:00	24,46	0,126	0,217	0,308	0,405	0,504	0,141
08:06:00	28,41	0,169	0,275	0,350	0,732	0,623	0,477
09:06:00	32,74	0,269	1,173	2,122	2,774	3,324	1,816
10:06:00	36,60	1,174	2,136	3,035	3,703	4,247	2,723
11:06:00	39,94	1,582	2,444	3,218	3,862	4,376	2,907
12:06:00	42,19	1,749	2,574	3,314	3,931	4,417	3,016
13:06:00	43,96	1,803	2,607	3,328	3,923	4,385	3,042
14:06:00	45	1,840	2,631	3,339	3,918	4,365	3,067
15:06:00	44,86	1,910	2,717	3,437	4,022	4,472	3,166
16:06:00	43,43	2,007	2,846	3,591	4,199	4,669	3,306
17:06:00	41,55	2,105	2,977	3,752	4,389	4,888	3,446
18:06:00	39,13	2,205	3,098	3,900	4,566	5,097	3,568
19:06:00	35,77	2,333	3,217	4,030	4,719	5,280	3,671
20:06:00	33,29	0,883	1,756	2,564	3,264	3,846	2,186
21:06:00	31,22	0,479	0,918	1,211	1,869	2,464	0,762
22:06:00	29,19	0,365	0,638	0,880	1,169	1,445	0,676
23:06:00	27,58	0,294	0,409	0,698	0,729	0,883	0,521
24:00:00	26,14	0,220	0,354	0,500	0,697	0,767	0,388

Date : 06/21	Outdoor environment [C]	S.coll= 0,5x0,5m ² 10PUITS,S= 0,4x0,4m ² [deltaC]	S.coll= 0,75x0,75m ² 10 PUIITS,S= 0,3x0,3m ² [deltaC]	S.coll= 0,75x0,75m ² 10 PUIITS,S= 0,4x0,4m ² [deltaC]	S.coll= 0,75x0,75m ² 10 PUIITS, S=0,5x0,5m ² [deltaC]	S.coll= 0,75x0,75m ² 10 PUIITS,S= 0,6x0,6m ² [deltaC]
00:06:00	26,00	0,443	0,438	0,619	0,716	0,792
01:06:00	24,66	0,342	0,280	0,463	0,498	0,587
03:06:00	23,08	0,038	-0,073	-0,012	0,050	0,101
04:06:00	22,41	-0,157	-0,245	-0,210	-0,178	-0,154
05:06:00	22,04	-0,262	-0,341	-0,319	-0,288	-0,266
06:06:00	22,62	-0,121	-0,204	-0,144	-0,087	-0,049
07:06:00	24,46	0,238	0,163	0,288	0,376	0,446
08:06:00	28,41	0,578	0,588	0,853	0,629	1,109
09:06:00	32,74	2,024	2,712	3,094	3,321	3,466
10:06:00	36,60	2,935	3,687	4,068	4,289	4,414
11:06:00	39,94	3,119	3,888	4,260	4,465	4,567
12:06:00	42,19	3,224	3,992	4,353	4,543	4,625
13:06:00	43,96	3,245	4,008	4,359	4,537	4,606
14:06:00	45	3,264	4,030	4,373	4,540	4,595
15:06:00	44,86	3,364	4,149	4,493	4,658	4,710
16:06:00	43,43	3,512	4,316	4,670	4,845	4,905
17:06:00	41,55	3,662	4,481	4,851	5,041	5,116
18:06:00	39,13	3,797	4,622	5,009	5,217	5,311
19:06:00	35,77	3,911	4,719	5,124	5,354	5,472
20:06:00	33,29	2,433	3,212	3,630	3,877	4,015
21:06:00	31,22	1,130	1,779	2,204	2,463	2,615
22:06:00	29,19	0,831	0,905	1,216	1,418	1,550
23:06:00	27,58	0,646	0,673	0,894	1,072	1,006
24:00:00	26,14	0,438	0,452	0,658	0,684	0,762

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	S.coll= 1,0x1,0m ² 10 PUIITS,S= 0,3x0,3m ² [deltaC]	S.coll= 1,0x1,0m ² 10 PUIITS,S= 0,4x0,4m ² [deltaC]	S.coll= 1,0x1,0m ² . 10 PUIITS,S= 0,5x0,5m ² [deltaC]	S.coll= 1,0x1,0m ² . 10 PUIITS,S= 0,6x0,6m ² [deltaC]	S.coll= 1,0x1,0m ² . 10 PUIITS,S= 0,7x0,7m ² [deltaC]
00:06:00	26,00	0,544	0,663	0,872	1,047	1,193
01:06:00	24,66	0,289	0,446	0,673	0,693	0,604
03:06:00	23,08	-0,120	-0,043	0,032	0,098	0,129
04:06:00	22,41	-0,307	-0,258	-0,194	-0,129	-0,090
05:06:00	22,04	-0,415	-0,378	-0,313	-0,246	-0,200
06:06:00	22,62	-0,268	-0,188	-0,091	-0,004	0,050
07:06:00	24,46	0,151	0,312	0,443	0,542	0,590
08:06:00	28,41	0,770	0,957	1,224	1,162	1,195
09:06:00	32,74	3,240	3,722	4,034	4,242	4,353
10:06:00	36,60	4,248	4,728	5,029	5,214	5,297
11:06:00	39,94	4,461	4,930	5,209	5,366	5,417
12:06:00	42,19	4,565	5,022	5,282	5,415	5,441
13:06:00	43,96	4,577	5,024	5,269	5,386	5,395
14:06:00	45	4,599	5,037	5,269	5,370	5,363
15:06:00	44,86	4,729	5,168	5,398	5,495	5,482
16:06:00	43,43	4,910	5,361	5,601	5,707	5,705
17:06:00	41,55	5,090	5,55	5,815	5,939	5,955
18:06:00	39,13	5,240	5,727	6,006	6,153	6,192
19:06:00	35,77	5,335	5,844	6,148	6,324	6,396
20:06:00	33,29	3,818	4,342	4,664	4,862	4,961
21:06:00	31,22	2,373	2,906	3,239	3,453	3,572
22:06:00	29,19	1,175	1,402	1,817	2,047	2,184
23:06:00	27,58	0,842	1,046	1,261	1,256	1,188
24:00:00	26,14	0,608	0,746	0,8918	1,110	1,224

10. effet sur le rendement de la position de la sortie de puits climatique et entrée de cheminée solaire.

Date : 06/21	Outdoor environment [C]	HAUT	HAUT	HAUT	CENTRE	CENTRE	CENTRE	BAS	BAS	BAS
Time		- BAS [deltaC]	- CENTRE [deltaC]	- HAUT [deltaC]	- BAS [deltaC]	- CENTRE [deltaC]	- HAUT [deltaC]	- BAS [deltaC]	- CENTRE [deltaC]	- HAUT [deltaC]
01:00:00	24,76	0,539	0,497	0,559	0,573	0,593	0,582	0,650	0,641	0,530
02:00:00	23,84	0,391	0,324	0,216	0,379	0,345	0,253	0,420	0,398	0,309
03:00:00	23,15	0,123	0,075	-0,002	0,150	0,119	0,039	0,188	0,167	0,088
04:00:00	22,46	-0,119	-0,162	-0,232	-0,093	-0,121	-0,194	-0,060	-0,079	-0,152
05:00:00	22	-0,294	-0,334	-0,399	-0,269	-0,296	-0,363	-0,237	-0,255	-0,323
06:00:00	22,46	-0,098	-0,137	-0,201	-0,071	-0,098	-0,164	-0,039	-0,055	-0,122
07:00:00	24,07	0,397	0,345	0,269	0,407	0,381	0,315	0,463	0,447	0,380
08:00:00	27,98	0,992	1,301	1,243	1,043	1,190	1,025	1,364	1,292	1,271
09:00:00	32,35	3,965	3,741	3,373	3,984	3,927	3,439	4,017	3,948	3,530
10:00:00	36,26	5,193	4,678	4,228	5,210	4,829	4,298	5,239	5,039	4,383
11:00:00	39,71	5,357	4,596	3,946	5,372	4,764	4,027	5,398	4,966	4,119
12:00:00	42,01	5,415	4,516	3,616	5,429	4,726	3,709	5,453	4,992	3,812
13:00:00	43,85	5,393	4,361	3,280	5,407	4,598	3,380	5,429	4,888	3,491
14:00:00	45	5,366	4,251	3,026	5,379	4,505	3,133	5,402	4,823	3,249
15:00:00	45	5,479	4,388	3,097	5,492	4,666	3,206	5,514	5,046	3,325
16:00:00	43,62	5,686	4,808	3,469	5,699	5,216	3,579	5,720	5,503	3,699
17:00:00	41,78	5,917	5,436	3,941	5,930	5,712	4,051	5,951	5,822	4,171
18:00:00	39,48	6,133	5,904	4,456	6,147	5,997	4,564	6,168	6,063	4,684
19:00:00	36,03	6,313	6,139	5,035	6,327	6,204	5,153	6,348	6,265	5,290
20:00:00	33,5	5,002	4,827	4,039	5,017	4,887	4,184	5,039	4,946	4,385
21:00:00	31,43	3,595	3,429	2,954	3,610	3,488	3,158	3,631	3,543	3,226
22:00:00	29,36	2,155	1,999	1,725	2,170	2,055	1,774	2,191	2,110	1,827
23:00:00	27,75	1,507	1,446	1,348	1,545	1,527	1,390	1,640	1,581	1,488
24:00:00	26,14	1,110	1,045	0,919	1,028	0,962	0,836	1,036	1,053	0,903

11. Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de 3+1,41 m.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	Chimney inlet : 0,1x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,3x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,5x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,7x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,9x0,1 [deltaC]
01:00:00	24,76	0,539	0,615	0,781	0,658	0,853
02:00:00	23,84	0,391	0,459	0,450	0,456	0,434
03:00:00	23,15	0,123	0,180	0,188	0,196	0,195
04:00:00	22,46	-0,119	-0,067	-0,056	-0,048	-0,046
05:00:00	22	-0,294	-0,244	-0,233	-0,224	-0,221
06:00:00	22,46	-0,098	-0,051	-0,042	-0,035	-0,033
07:00:00	24,07	0,397	0,445	0,446	0,450	0,447
08:00:00	27,98	0,992	1,020	1,014	0,991	0,967
09:00:00	32,35	3,965	4,012	3,831	3,664	3,532
10:00:00	36,26	5,193	5,094	4,780	4,484	4,524
11:00:00	39,71	5,357	5,192	4,558	4,340	3,713
12:00:00	42,01	5,415	5,448	4,492	4,187	3,468
13:00:00	43,85	5,393	5,417	4,242	3,513	3,328
14:00:00	45	5,366	5,392	4,056	3,249	3,397
15:00:00	45	5,479	5,512	4,231	3,487	3,164
16:00:00	43,62	5,686	5,734	4,764	4,403	3,815
17:00:00	41,78	5,917	5,983	5,654	4,748	3,914
18:00:00	39,48	6,133	6,213	6,117	5,269	4,950
19:00:00	36,03	6,313	6,427	6,365	6,152	5,699
20:00:00	33,5	5,002	5,129	5,091	5,066	4,979
21:00:00	31,43	3,595	3,741	3,722	3,688	3,622
22:00:00	29,36	2,155	2,325	2,334	2,322	2,280
23:00:00	27,75	1,507	1,545	1,518	1,499	1,470
24:00:00	26,14	1,110	1,153	1,063	1,126	1,104

12. Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de 3+2,84 m.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	Chimney inlet : 0,1x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,3x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,5x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,7x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,9x0,1 [deltaC]
01:00:00	24,76	0,677	0,837	0,847	0,792	0,867
02:00:00	23,84	0,390	0,453	0,516	0,537	0,525
03:00:00	23,15	0,127	0,197	0,248	0,259	0,270
04:00:00	22,46	-0,115	-0,050	-0,003	0,008	0,021
05:00:00	22	-0,291	-0,230	-0,184	-0,170	-0,157
06:00:00	22,46	-0,096	-0,038	0,0047	0,016	0,027
07:00:00	24,07	0,401	0,461	0,503	0,507	0,514
08:00:00	27,98	0,991	1,024	1,047	1,043	0,992
09:00:00	32,35	3,975	4,066	4,101	3,970	3,697
10:00:00	36,26	5,214	5,295	5,312	4,773	4,822
11:00:00	39,71	5,384	5,464	5,441	4,641	4,414
12:00:00	42,01	5,444	5,532	5,204	5,285	3,959
13:00:00	43,85	5,422	5,497	5,518	4,812	3,556
14:00:00	45	5,394	5,475	5,489	4,628	3,180
15:00:00	45	5,507	5,591	5,614	4,630	3,311
16:00:00	43,62	5,715	5,817	5,845	5,488	4,691
17:00:00	41,78	5,946	6,059	6,095	5,988	4,755
18:00:00	39,48	6,161	6,284	6,333	6,242	5,609
19:00:00	36,03	6,342	6,513	6,573	6,512	6,459
20:00:00	33,5	5,029	5,207	5,288	5,309	5,271
21:00:00	31,43	3,620	3,817	3,918	3,897	3,872
22:00:00	29,36	2,180	2,401	2,526	2,531	2,531
23:00:00	27,75	1,509	1,550	1,356	1,351	1,347
24:00:00	26,14	1,113	1,170	1,183	1,176	1,173

13. Effet de la section de l'entrée de cheminée solaire pour une longueur de l'absorbeur de 3+4,24 m.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	Chimney inlet : 0,1x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : . 0,3x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : . 0,5x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,7x0,1 [deltaC]	Chimney inlet : 0,9x0,1 [deltaC]
01:00:00	24,76	0,690	0,819	0,876	0,925	0,944
02:00:00	23,84	0,404	0,471	0,547	0,601	0,612
03:00:00	23,15	0,131	0,210	0,269	0,314	0,331
04:00:00	22,46	-0,111	-0,039	0,016	0,059	0,077
05:00:00	22	-0,287	-0,219	-0,165	-0,123	-0,105
06:00:00	22,46	-0,092	-0,028	0,021	0,060	0,0761
07:00:00	24,07	0,409	0,473	0,525	0,564	0,573
08:00:00	27,98	0,987	1,027	1,051	1,066	1,030
09:00:00	32,35	3,989	4,108	4,163	4,145	3,960
10:00:00	36,26	5,236	5,351	5,396	5,402	4,743
11:00:00	39,71	5,409	5,525	5,565	5,580	4,500
12:00:00	42,01	5,469	5,588	5,635	5,650	5,345
13:00:00	43,85	5,448	5,564	5,601	5,611	5,455
14:00:00	45	5,420	5,536	5,566	5,582	5,348
15:00:00	45	5,534	5,655	5,699	5,710	5,509
16:00:00	43,62	5,741	5,875	5,930	5,945	4,504
17:00:00	41,78	5,972	6,117	6,183	6,196	5,626
18:00:00	39,48	6,187	6,345	6,416	6,441	6,375
19:00:00	36,03	6,366	6,557	6,662	6,698	6,665
20:00:00	33,5	5,054	5,268	5,378	5,428	5,425
21:00:00	31,43	3,645	3,877	4,004	4,077	4,077
22:00:00	29,36	2,205	2,460	2,611	2,705	2,726
23:00:00	27,75	1,513	1,335	1,371	1,609	1,602
24:00:00	26,14	0,972	1,051	1,231	1,195	1,186

14. Effet de l'épaisseur de cheminée et l'isolation des parois latérales et double vitrage.

Date : 06/21 Time	Rendement . E=0,15 m . No Isolé . [deltaC]	Rendement . E=0,30 m . No Isolé . [deltaC]	Rendement . E=0,45 m . No Isolé . [deltaC]	Rendement . E=0,15 m . Isolé . [deltaC]	Rendement . E=0,30 m . Isolé . [deltaC]	Rendement . E=0,45 m . Isolé . [deltaC]
01:00:00	0,925	1,085	0,953	0,923	0,949	0,94
02:00:00	0,601	0,637	0,617	0,592	0,628	0,62
03:00:00	0,314	0,337	0,334	0,320	0,344	0,34
04:00:00	0,059	0,080	0,076	0,067	0,089	0,08
05:00:00	-0,123	-0,103	-0,108	-0,115	-0,094	-0,1
06:00:00	0,060	0,079	0,074	0,070	0,091	0,09
07:00:00	0,564	0,582	0,577	0,575	0,598	0,59
08:00:00	1,066	1,115	1,047	1,111	1,128	1,13
09:00:00	4,145	4,173	4,128	4,248	4,276	4,26
10:00:00	5,402	5,087	4,999	5,433	5,436	5,28
11:00:00	5,580	5,567	5,090	5,586	4,829	5,16
12:00:00	5,650	5,652	5,644	5,648	5,656	5,61
13:00:00	5,611	5,621	5,613	5,613	5,615	5,59
14:00:00	5,582	5,598	5,593	5,583	5,589	5,58
15:00:00	5,710	5,730	5,721	5,708	5,718	5,7
16:00:00	5,945	5,969	5,975	5,937	5,953	5,94
17:00:00	6,199	6,232	6,240	6,183	6,207	6,2
18:00:00	6,441	6,486	6,505	6,420	6,454	6,45
19:00:00	6,698	6,756	6,773	6,678	6,726	6,73
20:00:00	5,428	5,496	5,520	5,410	5,476	5,48
21:00:00	4,077	4,146	4,160	4,064	4,123	4,12
22:00:00	2,705	2,777	2,786	2,700	2,763	2,76
23:00:00	1,609	1,379	1,382	1,608	1,622	1,62
24:00:00	1,195	1,193	1,195	1,260	1,281	1,28

15. Effet de l'inertie thermique dans l'absorbeur.

Date : 06/21 Time	Aucune Inertie	E . Ardoise = 0,10 m [deltaC]	E . Ardoise = 0,30 m [deltaC]	E . Ardoise = 0,50 m [deltaC]	E . Ardoise = 0,75 m [deltaC]	E . Ardoise = 0,75 m . Isolé [deltaC]
01:00:00	0,907	0,925	0,921	0,923	0,924	0,917
02:00:00	0,580	0,601	0,598	0,599	0,602	0,606
03:00:00	0,294	0,314	0,314	0,315	0,317	0,325
04:00:00	0,039	0,059	0,060	0,061	0,063	0,072
05:00:00	-0,143	-0,123	-0,121	-0,120	-0,1184	-0,109
06:00:00	0,038	0,060	0,063	0,064	0,066	0,077
07:00:00	0,541	0,564	0,569	0,570	0,571	0,585
08:00:00	1,052	1,066	1,073	1,075	1,079	1,122
09:00:00	4,183	4,145	4,210	4,215	4,225	4,291
10:00:00	5,417	5,402	5,400	5,405	5,418	5,338
11:00:00	5,612	5,580	5,592	5,597	5,604	5,617
12:00:00	5,685	5,650	5,180	5,188	5,636	5,440
13:00:00	5,655	5,611	5,603	5,609	5,617	5,635
14:00:00	5,629	5,582	5,578	5,583	5,586	5,601
15:00:00	5,749	5,710	5,700	5,705	5,719	5,720
16:00:00	5,988	5,945	5,937	5,941	5,944	5,948
17:00:00	6,236	6,199	6,187	6,192	6,194	6,190
18:00:00	6,466	6,441	6,425	6,429	6,431	6,421
19:00:00	6,707	6,698	6,678	6,683	6,688	6,676
20:00:00	5,437	5,428	5,408	5,413	5,431	5,406
21:00:00	4,053	4,077	4,054	4,058	4,065	4,058
22:00:00	2,670	2,705	2,684	2,688	2,693	2,695
23:00:00	1,603	1,609	1,604	1,606	1,609	1,611
24:00:00	1,252	1,195	1,184	1,188	1,264	1,264

16. l'effet du nombre de cheminée sur le rendement du système.

Date : 06/21 Time	un cheminée [deltaC]	deux cheminées [deltaC]	trois cheminées [deltaC]
01:00:00	0,816	0,976	1,277
02:00:00	0,441	0,660	0,825
03:00:00	0,185	0,355	0,510
04:00:00	-0,060	0,096	0,238
05:00:00	-0,239	-0,090	0,047
06:00:00	-0,052	0,088	0,217
07:00:00	0,438	0,589	0,737
08:00:00	0,972	1,099	1,283
09:00:00	3,996	4,261	4,482
10:00:00	5,217	5,481	5,727
11:00:00	5,373	5,660	5,902
12:00:00	5,419	5,725	5,971
13:00:00	5,370	5,677	5,925
14:00:00	5,337	5,652	5,888
15:00:00	5,456	5,750	6,018
16:00:00	5,667	6,005	6,252
17:00:00	5,935	6,277	6,553
18:00:00	6,180	6,535	6,816
19:00:00	6,427	6,823	7,128
20:00:00	5,157	5,601	5,895
21:00:00	3,773	4,222	4,565
22:00:00	2,380	2,859	3,222
23:00:00	1,498	1,377	2,149
24:00:00	1,130	1,291	1,441

17. Comparaison entre les différents rendements du système selon l'orientation des cheminées.

Date : 06/21 Time	SUD . 180° [deltaC]	SUD SUD OUEST . 202,5° [deltaC]	SUD OUEST . 225° [deltaC]	OUEST SUD OUEST . 247,5° [deltac]	OUEST . 270° [deltaC]
01:00:00	1,264	1,181	1,459	1,316	1,295
02:00:00	0,823	0,902	0,966	0,973	0,962
03:00:00	0,508	0,563	0,620	0,633	0,620
04:00:00	0,236	0,289	0,341	0,356	0,344
05:00:00	0,045	0,093	0,145	0,160	0,150
06:00:00	0,215	0,255	0,308	0,325	0,317
07:00:00	0,732	0,768	0,833	0,846	0,857
08:00:00	1,113	1,102	1,161	1,402	1,162
09:00:00	4,471	3,802	3,875	4,193	4,232
10:00:00	5,718	5,470	4,649	3,939	3,636
11:00:00	5,895	5,826	5,591	4,903	4,443
12:00:00	5,964	6,010	5,990	5,697	5,388
13:00:00	5,918	6,049	6,119	5,912	5,577
14:00:00	5,875	6,039	6,174	6,048	5,832
15:00:00	5,998	6,144	6,297	6,163	6,039
16:00:00	6,264	6,401	6,538	6,348	6,230
17:00:00	6,544	6,695	6,822	6,615	6,387
18:00:00	6,806	6,980	7,109	6,871	6,558
19:00:00	7,130	7,297	7,431	7,185	6,826
20:00:00	5,891	6,022	6,140	6,221	6,262
21:00:00	4,561	4,672	4,783	4,844	4,848
22:00:00	3,218	3,321	3,428	3,494	3,500
23:00:00	2,145	2,240	2,345	2,416	2,426
24:00:00	1,378	1,420	1,515	1,522	1,470

18. le comportement du système dans les différents composants pour des vitesses et des orientations de vent différentes.

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	(B): Mean Air Temperature [C]	(A): Mean Air Temperature [C]	(CH).2_(CH).3: Mean Air Temperature [C]	(P).1_(P).10: Mean Air Temperature [C]	DISTRIB: Mean Air Temperature [C]	COLLEC: Mean Air Temperature [C]	(B)-(A): Temperature difference [delta C]
01:00:00	31,1	31,657	29,250	34,658	25,888	29,594	27,148	2,401
02:00:00	29,4	29,783	28,901	33,028	25,643	28,726	26,879	0,881
03:00:00	29,4	30,136	29,018	32,966	25,547	28,521	26,895	1,118
04:00:00	27,8	28,760	28,246	31,449	25,328	27,558	27,045	0,514
05:00:00	27,8	28,179	27,989	30,005	25,417	27,126	27,701	0,190
06:00:00	27,2	28,128	27,714	30,121	25,243	27,146	27,062	0,414
07:00:00	31,7	31,806	29,117	31,988	25,800	29,534	27,089	2,689
08:00:00	33,9	34,029	29,124	32,128	26,393	31,489	27,326	4,905
09:00:00	36,7	35,731	33,587	39,629	26,264	30,724	29,039	2,144
10:00:00	38,9	36,073	36,491	44,010	26,823	32,235	30,423	-0,416
11:00:00	41,1	36,281	29,823	43,563	26,930	33,447	27,761	6,458
12:00:00	42,8	36,312	29,839	43,003	27,777	36,101	28,198	6,472
13:00:00	43,9	36,249	29,634	46,377	26,785	32,697	27,715	6,614
14:00:00	45	36,220	29,933	45,838	28,220	37,275	28,470	6,287
15:00:00	45,6	36,296	31,351	54,035	27,931	36,928	28,866	4,944
16:00:00	46,1	36,421	30,144	43,108	29,259	40,018	29,061	6,277
17:00:00	46,1	36,556	30,338	43,933	28,887	39,155	28,957	6,217
18:00:00	46,05	36,570	30,309	43,656	28,869	39,188	28,931	6,261
19:00:00	45,6	36,688	30,267	41,600	28,920	39,257	28,929	6,420
20:00:00	43,3	36,754	30,203	41,351	28,107	36,701	28,587	6,551
21:00:00	41,1	36,727	29,641	41,220	26,432	31,766	27,601	7,086
22:00:00	39,4	36,672	29,489	39,862	26,287	31,106	27,437	7,182
23:00:00	37,8	36,684	34,819	43,043	26,781	32,037	29,844	1,865
24:00:00	36,7	36,670	29,663	37,736	26,697	32,545	27,669	7,006

19. le comportement du système sous l'effet du vent en réduisant la section de sortie de cheminée solaire .

Date : 06/21 Time	Outdoor environment [C]	(B): Mean Air Temperature [C]	(A): Mean Air Temperature [C]	(CH).2_(CH).3: Mean Air Temperature [C]	(P).1_(P).10: Mean Air Temperature [C]	DISTRIB: Mean Air Temperature [C]	COLLEC: Mean Air Temperature [C]	(B)-(A): Temperature difference [delta C]
01:00:00	31,1	31,657	29,783	38,294	25,794	29,301	27,389	1,873
02:00:00	29,4	29,783	29,551	36,134	25,836	27,074	28,93	0,231
03:00:00	29,4	30,136	29,704	35,663	25,526	27,743	27,867	0,432
04:00:00	27,8	28,760	28,295	34,276	25,315	27,421	27,182	0,465
05:00:00	27,8	28,179	28,001	32,699	25,455	27,017	27,799	0,177
06:00:00	27,2	28,128	27,756	32,524	25,246	27,086	27,107	0,372
07:00:00	31,7	31,806	29,582	34,005	25,733	29,284	27,310	2,223
08:00:00	33,9	34,029	29,746	34,811	26,236	31,126	27,578	4,283
09:00:00	36,7	35,730	30,792	41,371	26,249	31,110	28,008	4,938
10:00:00	38,9	36,073	31,390	47,671	26,675	32,748	28,364	4,680
11:00:00	41,1	36,281	30,007	49,084	26,742	32,997	27,811	6,273
12:00:00	42,8	36,312	30,265	50,976	27,448	35,419	28,285	6,047
13:00:00	43,9	36,248	29,962	54,296	26,457	31,741	27,748	6,286
14:00:00	45	36,220	30,345	54,814	27,831	36,496	28,500	5,875
15:00:00	45,6	36,296	30,588	58,837	27,908	36,842	28,659	5,708
16:00:00	46,1	36,421	30,622	52,825	28,665	39,081	28,971	5,799
17:00:00	46,1	36,555	30,764	52,083	28,472	38,428	29,001	5,7915
18:00:00	45,6	36,688	30,76	49,265	28,473	38,496	28,989	5,922
19:00:00	43,3	36,754	30,637	47,708	27,796	36,076	28,674	6,117
20:00:00	41,1	36,727	30,083	46,416	26,300	31,021	27,765	6,643
21:00:00	39,4	36,672	29,871	44,598	26,071	30,442	27,552	6,800
22:00:00	37,8	36,684	30,530	46,123	26,588	32,313	28,085	6,153
23:00:00	36,7	36,670	29,998	41,809	26,532	32,144	27,773	6,672
24:00:00	35,6	35,607	31,275	42,786	26,360	31,601	28,128	4,332