



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



**Faculté Des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique
Présenté pour obtenir le Diplôme de**

Master

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Thème

**Amélioration énergétique de l'ambiance
intérieure d'une piscine en utilisant
l'énergie solaire à travers un mur Trombe**

Présenté par :

- Bakhti Wiam
- Tarfaia Abdelkader

Devant le jury composé par:

Dr. Kina Mohammed salah

Dr. Kebdi Zakaria

Dr. Guermit Tahar

MAA

MCB

MCA

Supervisor

President

Examineur

UKMO

UKMO

UKMO

Anne universitaire 2022/2023

RECONNAISSANCE

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir permis d'accéder à ces modestes connaissances et de nous avoir donné le courage et la patience de faire le travail que nous avons fait sur cette thèse et de mener à bien ce projet.

Ensuite, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre au travail décrit dans cette lettre.

Ce fut un voyage de bon augure pour nous d'atteindre ce point. Nous sommes vraiment à court de mots pour le moment, mais nous saisissons cette occasion pour exprimer nos sincères remerciements pour la thèse du Dr Kina Mohamed Al-Saleh.

Merci beaucoup pour la disponibilité de tant de choses et de discussions scientifiques intéressantes, pour vos notes et conseils, pour vos nombreuses astuces judicieuses, pour vos encouragements quotidiens, pour votre soutien constant et pour votre compréhension.

Pour la confiance que vous nous avez toujours accordée et que vous nous assurez, pour votre écoute et tout simplement pour votre bienveillance.

Je remercie particulièrement tous les membres du jury qui ont accepté de présider et de lire ce travail et d'examiner notre mémoire.

Nous devons notre profonde gratitude au Dr KINA Mohamed Salah pour son soutien et ses encouragements exceptionnels tout au long de notre projet de recherche.

J'exprime également mes sincères remerciements et ma reconnaissance à tous les enseignants du Département de Génie Mécanique de l'Université de KasdiMerbah Ouargla.

Enfin, un grand merci à tous ceux qui nous ont aidés par leurs encouragements et leur soutien continu tout au long de la préparation de nos travaux.

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à ceux qui sont la source de ma force, de mon inspiration et de ma détermination

À ma chère mère, **Khakha Fatma**, et à mon père, **Mohamed**, un homme pas comme les autres, que Dieu ait pitié d'eux, qui ont quitté le monde et n'ont jamais quitté mon cœur, et m'ont toujours donné force et espoir dans cette vie.

Mes frères et sœurs : **Zouhir, Massouda, Amina, hadjra et Mouna**, je les remercie d'être à mes côtés chaque jour, que Dieu les protège

Et leurs fils **Abderrahmane, Djamaa Nourhan, Tasnim et Abdelkader**.

Je le dédie à la personne la plus importante de ma vie, **ma chère épouse**, qui a été à mes côtés tout au long de ce travail.

Mon encadrant : **Dr. Kina Muhammad Salah**, que Dieu vous accorde le succès avec la santé, le bonheur et une longue vie.

A tous ceux qui m'ont aidé et encouragé durant mes années d'études

Tarfaia Abdelkader

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à ma chère et affectueuse mère «Aïcha»; qui a été mon soutien dans ma vie, à mon grand-père et "Lakhdar»; et à mes sœurs que Dieu les protège, qui m'ont soutenu dans ma carrière.

Et je le dédie à mon compagnon de vie, ami et frère qui ma soutenu dans des circonstances difficiles.

A toute ma famille et mes proches qui m'ont soutenu durant mes années scolaires.

BekhtiWiam

Sommaire

I - Introduction générale :	2
I.1 Introduction	2
I.2 L'énergie solaire :	2
I.3 Conversion de l'énergie :	3
I.3.1 L'énergie solaire thermique:	3
I.3.2 L'énergie solaire thermodynamique:	3
I.4 Mur Trombe:	3
I.4.1 Définition	3
I.4.2 Principe de fonctionnement	5
I.4.3 Mur Trombe : Avantages et inconvénients	6
I.4.4 Epaisseur d'un mur Trombe:	6
I.4.5 Les accessoires pour améliorer le rendement	7
I.5 L'effusivité thermique:	7
I.6 Paramètres liés à l'environnement :	7
I.7 Modes de transfert de chaleur:	8
I.7.1 Transfert par conduction:	8
I.7.2 Transfert par convection:	9
I.7.3 Rayonnement thermique:	11
I.8 Thermo-circulation	12
II- Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe	14
II.1 Description du modèle	14
II.3 Calculs des températures de l'enveloppe à chauffée	18
II.3.1 Températures des nœuds	18
II.3.1.4 Températures nodales du mur de mass :	20
II.3.1.5 Température de l'air ambiant intérieure :	22

II.3.2 Températures de surface des parois.....	22
II.3.2.2 Température la surface inférieur de la dalle de sol sur terre:	23
II.3.2.3 Température du vitrage en face du mur Trombe:	23
II.3.2.4 Température de la surface interieur du mur de mass orienté vers l'Ouest	24
II.3.2.5 Température de la surface interieur du mur orienté vers le Nord :.....	24
II.3.2.7 Température de la surface interieur du plafond:	24
II.3.2.9 Température de la surface exterior du mur orienté vers le Nord:.....	25
II.3.2.10 Température de la surface exterior du mur orienté vers l'Ouest:.....	25
II.3.2.11 Température de la surface exterior du plafond :	25
II.4 Calcul des coefficients de transfert thermique :	26
II.4.1 Transfert de chaleur dû à la convection :	26
II.4.1.1 Transfert de chaleur par convection libre :	26
II.5 Transfert de chaleur dû au vent:.....	27
II.6 Transfert de chaleur par rayonnement à ondes longues :	27
II.7 Le coefficient de transfert de chaleur dû à la perte de chaleur à la terre:	28
II.8 Infiltration de l'air :.....	30
II.9 Applications numériques	31
III Résultats et Discussion.....	33
Conclusions.....	45
Références	42

Liste des Figures

Figure I.1: Le mur Trombe ou mur Trombe-Michel capteur de calories solaires.....	04
Figure I.2: Capteurs solaires passifs, le mur Trombe-Michel.....	04
Figure I.3 : Principe du fonctionnement du mur trombe	05
Figure I.4 : La spécificité du mur Trombe	05
Figure II .1 : Configuration schématique de la piscine à mur Trombe.....	14
Figure II .2 : Coupe de la piscine à mur Trombe.....	15

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : les avantages et les inconvénients de mur trombe	06
Tableau II.1 : Valeurs Géométriques des éléments la construction.....	15
Tableau II .2 : Valeurs Thermo-Physique des éléments la construction.....	16
Tableau. II.3 : Corrélations de la convection libre.	23
Tableau II.4 : Coefficient de perte de chaleur par conduction pour des fondations des murs non isolés dans la terre	25
Tableau. II.5 : Coefficient de perte de chaleur par conduction à travers la base de la dalle au sol vers la terre.....	26
Tableau III.1 : Performances énergétiques pour différentes configurations de construction de la piscine (simulation de six mois).....	29

Liste des Graphe

Graphe 1: Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masse léger.....	30
Graphe 2: Sélection pour un mur Trombe léger avec mur de masse moyen.....	31
Graphe 3: Sélection pour un mur Trombe léger avec mur de masse lourde.....	32
Graphe 4: Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de masse léger.....	33
Graphe 5: Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de masse moyen.....	34
Graphe 6: Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de masse lourde.....	35
Graphe 7: Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masse léger.....	36
Graphe 8: Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masse moyen.....	37
Graphe 9: Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masse lourde.....	38

RESUME

Dans le cadre d'une démarche énergétique d'amélioration de l'ambiance intérieur d'une piscine semi olympique en zone aride chauffée par un mur Trombe; Une simulation dynamique unidimensionnelle d'un model d'une construction type est élaborée par une étude numérique pour des sélections de différentes constructions (Mur Trombe Lourd Moyen Legé) est élaborée. Un mur Trombe de masse moyenne ou lourde est considéré comme le plus approprié pour un meilleur confort lorsqu'il est combiné avec un mur de masse lourde. Les économies d'une combinaison à l'autre sont d'environ de 4% à 7%, la stratégie d'implantation de murs Trombe en mode de chauffage pour l'enveloppe d'une piscine est fiable pour l'un ou l'autre de ces cas de construction sous les conditions climatique aride.

ABSTRACT

As part of an energy process to improve the interior atmosphere of a semi-Olympic swimming pool in an arid zone heated by a Trombe wall; A one-dimensional dynamic simulation of a model of a typical construction is developed by a numerical study for selections of different constructions (Mur Trombe Heavy- Middle- Light) is developed. A Trombe wall of medium or heavy mass is considered the most suitable for best comfort when combined with a heavy mass wall. The savings from one combination to another are approximately 4% to 7%, the strategy for installing Trombe walls in heating mode for the envelope of a swimming pool is reliable for either of these cases of construction under the arid climatic conditions.

ملخص

كجزء من عملية الطاقة لتحسين الجو الداخلي لحوض سباحة شبه أولمبي في منطقة قاحلة يتم تسخينها بواسطة جدار ترومبي؛ تم تطوير محاكاة ديناميكية أحادية البعد لنموذج بناء نموذج يمن خلال دراسة عددية لاختيار هياكل مختلفة (جدار تروب ثقيل - متوسط - خفيف الوزن) تم تطويره. من خلال النتائج يعتبر جدار ترومبي ذو الكتلة المتوسطة أو الثقيلة هو الأنسب للحصول على أفضل راحة عندما يقتصر جدار كتلة ثقيلة. التوفير من مجموعة إلى أخرى ما يقرب من 4% إلى 7%، إستراتيجية تركيب جدران تروب في وضع التسخين لغلاف حمام السباحة يمكن الاعتماد عليها لأيمن حالات البناء هذه في ظل الظروف المناخية الجافة.

Mots clés : Chauffage solaire, Économie d'énergie, Mur Trombe, Piscine semi olympique

Key words : Energy saving, Trombe Wall, Semi Olympic swimming pool, Solar heating

الكلمات المفتاحية : حمام سباحة شبه أولمبي، توفير الطاقة، جدار ترومبي، التسخين بالطاقة الشمسية

NOMENCLATURE

λ :conductivité(W/m. °K)

ρ :masse volumique (kg/m³)

c_p : chaleurs spécifique (J/(kg. °K))

φ : Flux de chaleur (W)

λ_c : Conductivité thermique(W/m. ° K)

Q : Puissance transmise (W)

h_c : Coefficient de transmission thermique par convection, W/m²°K.

S:Surface d'échange considérée m².

T_1 : Température la plus chaude °K

T_2 : Température la plus froide °K

T_p :Température à la paroi du solide ° K

T_f : Température du fluide K

Σ : Déviation de la distribution du rayonnement direct Wm°K

ε :l'émissivité du corps

T: Température moyenne absolue de l'air à la surface du solide; °K

ΔT : Différence de température entre la surface et l'air: °K

L: Longueur géométrique m

ITS Intégrale de la Température intérieure Supérieure °C.

HS: Nombre des heures supérieur °C.

MXTS: Température moyenne maximale de l'air intérieur supérieure °C.

IGI: Intégrale de la température intérieure inférieure °C.

HI: Nombre des heures inférieur °C.

MXTI: Température moyenne maximale de l'air intérieur inférieure °C.

Q_{ech} Énergie échangée.(W)

Nu: Nombre de Nusselt

Pr : Nombre de Prandtl

Ra: Nombre de Rayleigh

ω : L'angle horaire du soleil [degré]

CHAPITRE I:
Introduction Générale

Chapitre I: Introduction générale

I.1 Introduction générale :

Un problème énergétique concerne actuellement tous les pays du monde, ce qui oblige l'humanité à essayer d'exploiter une énergie quasi gratuite [1], il est donc nécessaire de développer une stratégie qui recourt à la sobriété, à l'efficacité et au renouvellement énergétique. L'Algérie dispose d'un potentiel en énergies renouvelables énorme, telles que : l'énergie solaire, éolienne, la géothermie, la biomasse.... etc.

Compte tenu de l'importance du domaine solaire dans le pays et parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire qui est utilisée depuis des milliers d'années, l'énergie thermique générée par l'énergie solaire est une forme d'énergie très écologique sans émettre de dioxyde de carbone, ce qui remplace le charbon, le gaz naturel et autres, réduit sans aucun doute les effets catastrophiques des systèmes énergétiques.

La solution proposée s'articule autour de l'ajout d'un système de chauffage solaire passif basé sur la réduction des déperditions énergétiques. C'est aussi une solution attractive et intéressante, et est considérée comme la solution idéale. Pour l'économie et l'utilisation parmi les nouveaux systèmes [2].

Il convient de réfléchir à l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment, Par le meilleur traitement des ponts thermiques, ce qui conduit à réduire les besoins thermiques, de climatisation et de chauffage [3].

Le mur Trombe est l'un des systèmes les plus innovants dans le domaine de chauffage passif. Les performances de ce système dépendent de paramètres tels que : les matériaux, l'épaisseur des murs [4].

I.2 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie électromagnétique liée au rayonnement émis par le soleil (150 millions de kilomètres environ, parcourus en quelques 8 minutes par la lumière). La puissance rayonnée par les réactions thermonucléaires au sein du soleil se traduit, sur notre planète, par un apport énergétique important qui peut atteindre 1.000 W/m^2 au niveau du sol, sous forme de lumière visible et de proche infrarouge.

Chapitre I: Introduction générale

Sur la Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et règne végétal, dont dépend le règne animal. A l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est en fait à l'origine de toutes les énergies sur terre.

I.3 Conversion de l'énergie :

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, et en électricité.

I.3.1 L'énergie solaire thermique:

La conversion photo- thermique est le processus le plus simple. Il consiste en une transformation du rayonnement solaire en chaleur, qu'on peut l'utiliser en usage direct pour l'eau chaude sanitaire, chauffage solaire, etséchoir solaire.

En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage: froid solaire.

I.3.2 L'énergie solaire thermodynamique:

Le solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales héliosélectriques.

Trois principaux types de centrales sont utilisés :

- Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.
- Les centrales à capteurs paraboliques permettant d'obtenir des températures de 1000°C ou plus.
- Les centrales à tour pour atteindre une température de 1000°C[3].

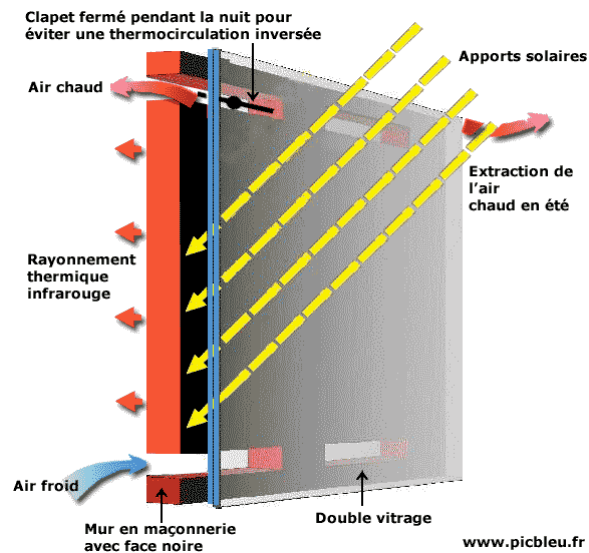
I.4Mur Trombe:

4.1Définition

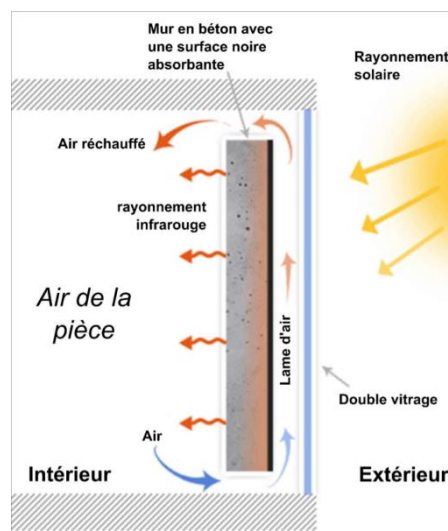
Le mur Trombe est un système simple et intéressant qui repose sur le solaire passif, (Figures I.1et I.2) son objectif consiste à valoriser le rayonnement du soleil en associant deux propriétés physiques : l'inertie thermique du mur et l'effet de serre à travers un vitrage. Il est constitué d'un mur entièrement plein vertical en maçonnerie lourde (souvent composé de

Chapitre I: Introduction générale

béton ou de pierre dans quelques cas) orienté vers le sud et muni de deux orifices permettant la circulation de l'air entre la pièce et la serre formée par la surface de réception du mur et le vitrage qui le précède. Grâce à ce vitrage, la chaleur captée auprès du soleil bénéficie de ce que l'on appelle l'effet de serre et se restitue à travers le béton et la pierre, puis ensuite au cœur de tout le logement équipé.



Figures I.1:Le mur Trombe ou mur Trombe-Michel capteur de calories solaires
(Doc encyclopédie ACQUALYS)



Figures I.2:Capteurs solaires passifs, le mur Trombe-Michel
(Doc encyclopédie ACQUALYS)

Chapitre I: Introduction générale

I.4.2 Principe de fonctionnement

Le mur Trombe est constitué d'une partie en béton devant laquelle on dispose un vitrage en laissant un espace de lame d'air. Il a des ouvertures en haut et en bas pour faire circuler l'air. Le fonctionnement du mur Trombe est différencié en été et en hiver: il transmet les rayons solaires captés par les trois moyens de transfert de chaleur, une partie est transmise par conduction à travers le mur qui est peint dans une couleur sombre pour une meilleur absorption, où il la restitue à l'intérieur du local par convection, la deuxième partie se transmet par circulation de l'air chaud se trouvant dans la cheminée solaire à travers les orifices (la chaleur piégée entre le mur et la vitre). Alors que la troisième se transmet par rayonnement. (Figures I.3et I.4)

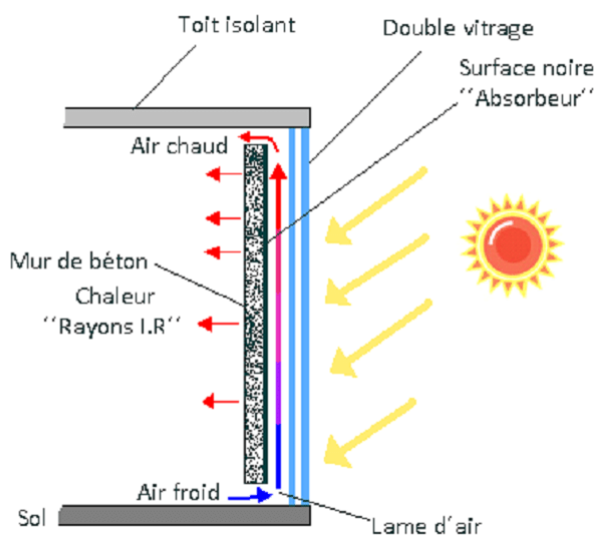


Figure 1.3: Principe du fonctionnement du mur trombe
(Doc encyclopédie ACQUALYS)

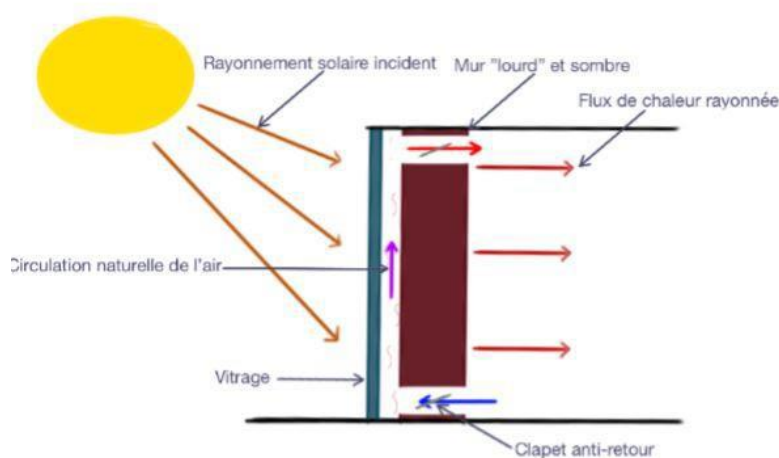


Figure 1.4:La spécificité du mur Trombe
(Doc encyclopédie ACQUALYS)

Chapitre I: Introduction générale

Toute différence de température dans le fluide, le liquide ou le gaz, change sa densité et un mouvement d'agitation apparaît. Ce mouvement dans lequel les parties les plus chaudes du fluide ont tendance à s'élever et les parties froides et denses à descendre, s'appelle la convection. Ce dernier est observé entre le fluide en mouvement et la paroi, phénomène principal dans la plupart des échangeurs de chaleur. Même si les trois processus peuvent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est habituellement primordial. Parmi eux, l'échange de convection est la partie principale du transfert de chaleur, car le phénomène de convection est omniprésent dans la vie quotidienne. Le mur Trombe est utilisé différemment selon les saisons et la période de la journée

I.4.3 Mur Trombe : Avantages et inconvénients

Tableau 1. 1 : les avantages et les inconvénients de mur trombe

Avantages	Inconvénients
Pas de réglementation.	Système assez complexe a mettre en œuvre.
Possibilité d'automatiser tout le système.	Peut-être contraignant : fermeture et ouverture des clapets, des volets, manuellement.
Système passif, propre.	Nettoyage du vitrage difficile, la convection du mur favorisant la poussière si on ne prévoit pas des filtres, des clapets anti retour et des ventilateurs.
	Manque d'esthétisme.
Réduction de la facture énergétique.	Très onéreux à mettre en place en raison de l'étude en amont et de l'installation.

- Pendant les mois d'été (périodes chaudes): afin que la température du logement ne monte pas, l'air chaud est évacué la nuit au moyen d'une ouverture de chauffage, celle du haut tandis que celle du bas est fermée.

I.4.4 Epaisseur d'un mur Trombe:

L'épaisseur optimale dépend du matériau utilisé et du temps d'ensoleillement disponible en hiver.

Si le mur est trop épais, il risque de ne pas pouvoir se réchauffer suffisamment en profondeur durant une journée d'hiver ensoleillée, où la durée d'ensoleillement efficace ne dépasse pas 5 heures.

Chapitre I: Introduction générale

Si le mur est trop fin, les déperditions thermiques seront trop importantes et l'apport solaire emmagasiné ne sera pas suffisant pour les compenser.

Un mur avec 20 à 30 cm d'épaisseur est une valeur correcte pour un matériau comme le béton.

I.4.5 Les accessoires pour améliorer le rendement

La transmission de la chaleur solaire à travers le mur croît proportionnellement au coefficient d'absorption de sa face externe.

Peindre le mur en noir derrière le vitrage d'un mur Trombe, augmente cette capacité, avec un coefficient d'absorption solaire de 0,95.

Une peinture bleue profond donnera de bons résultats, mais un coefficient d'absorption de seulement 0,85.

Un volet, sur l'extérieur du vitrage, peut compléter l'isolation du mur Trombe la nuit en hiver, en empêchant les déperditions excessives.

Les clapets commandant la circulation d'air à travers les ouvertures supérieures et inférieures, peuvent être automatisés à partir d'indications fournies par des sondes de températures.

La surface de ces orifices doit être sensiblement égale en partie haute et en partie basse.

Dans les climats froids, la présence d'ouvertures dans le mur Trombe en maçonnerie ou en béton, améliore sensiblement le rendement du mur.

Dans les climats doux, ces orifices sont inutiles puisque les températures hivernales restent tempérées pendant toute la journée.

I.5 L'effusivité thermique:

L'effusivité thermique E_f , caractérise la capacité des matériaux à réagir plus ou moins rapidement à un apport de chaleur intérieur au logement (provenant d'une source interne ou du rayonnement solaire). Plus l'effusivité est grande, et plus vite la chaleur interne sera absorbée par le mur, plus l'élévation de la température sera limitée. Une grande effusivité implique une grande capacité thermique du mur, dont la température ne s'élève que lentement.[2]

$$E_f = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (I.1)$$

ou:

λ : Conductivité (W/m. °K)

ρ : Masse volumique (kg/m³)

c_p : Chaleurs spécifique (J/(kg.°K))

Chapitre I: Introduction générale

I.6 Paramètres liés à l'environnement :

- **Température de surface:**

C'est la moyenne des températures de surface des parois qui entourent la personne.

- **Température de l'air ambiant:**

La température de l'air ambiant est un paramètre essentiel du confort thermique. Il participe à l'évaluation de l'équilibre thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs, radiatifs. Dans une pièce, la température de la zone n'est pas uniforme, les différences des températures de surface se produisent également dans le plan près des surfaces froides et des corps de chauffe.

- **Vitesse de l'air:**

Ce paramètre influence les échanges de chaleur par convection. En pratique, dans un bâtiment, les vitesses de l'air ne devraient pas dépasser les 0,2m/s.[1]

- **L'humidité de l'air :**

L'humidité relative de l'air affecte les échanges évaporatifs de la peau, elle détermine la capacité d'évaporation de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la sueur. Selon A. Liébard, une humidité relative comprise entre 30% et 70% a peu d'effet sur le confort thermique. Une humidité trop élevée va interférer avec la régulation de la température de l'organisme, car l'évaporation à la surface de la peau ne se produit plus, donc transpiration accrue et plus d'inconfort.[2]

- **Température de l'air:**

La température de l'air est l'indice de confort le plus utilisé, mais, seule, elle ne reflète pas parfaitement la sensation de confort, bien qu'elle soit le paramètre le plus important.

1.7 Modes de transfert de chaleur:

I.7.1 Transfert par conduction:

La conduction est la transmission de la chaleur dans la matière par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent

Chapitre I: Introduction générale

négligeable par rapport à la convection ou rayonnement. Le transfert thermique par conduction est décrit par la loi de Fourier à partir de

la conductivité thermique λ_c

En un point de cette surface, la densité de flux thermique est le flux thermique par unité de surface. (W/m^2).

$$\vec{\varphi}_{\text{cond}} = -\lambda \cdot \vec{\text{grad}} T. \quad (\text{I.2})$$

En régime stationnaire: $\varphi = -\lambda_c \cdot S \cdot \frac{dT}{dx}$ (I.3)

φ : Flux de chaleur (W)

λ_c : Conductivité thermique ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{K}$)

I.7.2 Transfert par convection:

Le transfert de chaleur par convection est complexe, car il résulte de la superposition de deux phénomènes :

- Conduction entre les particules de fluide qui se rencontrent;
- Mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide.

Si ce mouvement n'est provoqué que par les seules différences de températures (donc de densité), la convection est dite libre ou naturelle. Si ce mouvement résulte d'une action mécanique (pompe, ventilateur, etc.), la convection est dite forcée.

Le transfert par convection est régi par la loi de Newton qui stipule que le flux de chaleur transmis est proportionnel à l'écart entre la température T_i du corps solide qui reçoit ou transmet de la chaleur et la température T , du liquide ou du gaz qui transmet ou reçoit cette chaleur. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Fourier est appelé coefficient de convection thermique est noté h .

Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivant :

$$Q = h_c \cdot S \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{I.4})$$

Où:

Chapitre I: Introduction générale

Q : Puissance transmise en W.

h_c : Coefficient de transmission thermique par convection, ou coefficient de convection thermique en W/m^2K .

S : Surface d'échange considérée en m^2 .

T_1 : Température la plus chaude (paroi ou fluide en $^{\circ}K$).

T_2 : Température la plus froide (fluide ou paroi en $^{\circ}K$).

La convection naturelle : les molécules chaudes de masse volumique plus faible ont tendance à s'élever.

La convection forcée: la présence d'un moteur ou d'un ventilateur provoque le déplacement du fluide.

Le coefficient de convection h_c , est de l'ordre de quelques unités pour la convection naturelle des gaz, quelques dizaines pour la convection forcée des gaz, quelques centaines pour la convection naturelle des liquides et de quelques milliers pour la convection forcée des liquides. Il est exprimé en $W.m^2. ^{\circ}K$.

C'est le mode de transfert que l'on observe entre un solide et un fluide de

Températures différentes. Il comprend des phénomènes de conduction auxquels se superpose un transport de matière, les molécules du fluide venant se réchauffer ou se refroidir au contact de la surface du solide. Selon l'origine de la force créant le transport de matière dans le fluide, on distingue :

La convection naturelle : les molécules chaudes de masse volumique plus faible ont tendance à s'élever.

La convection forcée : la présence d'un moteur ou d'un ventilateur provoque le déplacement du fluide.

L'étude de la convection est très complexe et doit être abordée par la Mécanique

des fluides. Dans la plupart des cas, les phénomènes qui en découlent sont régis par

l'équation de Navier-Stokes. Mais une bonne approximation, selon la loi de Newton, permet d'exprimer la densité de flux de chaleur échangée par convection, notée par h_c , la relation :

Chapitre I: Introduction générale

$$\varphi_c = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_f) \text{ (I.5)}$$

Où

h_c est le coefficient de convection

T_p est la température à la paroi du solide

T_f la température du fluide loin de la paroi ou la "température du mélange " s'il est entre deux parois.

Le coefficient de convection h_c est de l'ordre de quelques unités pour la convection naturelle des gaz, quelques dizaines pour la convection forcée des gaz, quelques centaines pour la convection naturelle des liquides et de quelques milliers pour la convection forcée des liquides. Il est exprimé en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

I.7.3 Rayonnement thermique:

La surface d'un solide émet un rayonnement de nature électromagnétique transportant de l'énergie d'autant plus grande que la surface émettrice est à température plus élevée.

Ce rayonnement se propage dans les milieux transparents. Lorsqu'il rencontre un corps, il est totalement absorbé (corps noir) ou partiellement absorbé (corps réel ou semi transparent) ou pas du tout absorbé (corps parfaitement réfléchissant ou corps parfaitement transparent). Le spectre du rayonnement électromagnétique ainsi émis dépend de la température de l'émetteur, de sa nature et de son état de surface.

L'aptitude d'un corps à réfléchir, à transmettre ou à absorber un rayonnement dépend aussi, entre autres, de ces paramètres.

Les propriétés radiatives d'un émetteur sont rapportées à celles du corps noir. En particulier, son aptitude à absorber un rayonnement, dans une direction d'incidence, est identique à son aptitude à en émettre dans une direction d'émission. Cette première aptitude est exprimée par un coefficient appelé émissivité, de valeur comprise entre 0 et 1.

La densité du flux d'énergie émis, par unité de surface du corps appelée émittance, à la température T et sous forme de rayonnement électromagnétique est égale à :

$$\varphi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ (I.6)}$$

Où $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ Wm}^{-2}.\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann.

Chapitre I: Introduction générale

ϵ :l'émissivité du corps

Pour des corps ternes dit gris (cas des peintures non métalliques, des matériaux servant dans la construction), nous pouvons considérer que $\epsilon > 0,7$.

Pour des corps métalliques polis (brillants et donc réfléchissants). ϵ se situe entre 0,05 et 0,3.

I.8 Thermo-circulation

Le mur capteur transmet l'énergie solaire captée par deux moyens, une partie est transmise par conduction à travers le mur qui la restitue à l'intérieur du local par convection, alors que la deuxième partie se transmet par circulation naturelle de l'air chaud se trouvant dans la cheminée solaire à travers les orifices. Dans la littérature, le débit de cet air peut être calculé par la relation suivante:

$$m = \rho A_d \sqrt{\frac{2gH(T_m - T_{in})}{C_{T_m}}} \quad (I.7a)$$

$$C = C_1 \left(\frac{A_d}{A_v} \right)^2 + C_2 \quad (I.7b)$$

$$C_1 = 8 \text{ et } C_2 = 2$$

Notre travail s'intitule "Amélioration de l'atmosphère intérieure énergétique d'une piscine utilisant l'énergie solaire à travers un mur Trombe".

Consacré à l'étude appliquée du transfert de chaleur de l'énergie solaire à travers un mur Trombe vers l'intérieur une piscine couverte semi olympique, sous un climat aride. Dans le chapitre 2, une simulation dynamique unidimensionnelle d'un modèle d'une construction type de piscine équipée d'un mur Trombe est élaborée sous un climat aride, en adoptons une modélisation par la méthode des différences finies.

Dans le chapitre 3, des applications numériques sont établies pour une période de six mois (Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars, Avril) qui sont considérés comme les plus froids.

CHAPITRE II:

Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

II- Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

II.1 Description du modèle

Une piscine semi olympique équipée d'un système de chauffage par mur Trombe, de volume (1500 m^3) est représentée par un modèle générale (Figures II.1 et II.2), décrivant la distribution des différentes températures; où:

Les murs orientés vers l'est et le nord sont de $0,10 \text{ m}$ d'épaisseur chaque et sont construits en éléments avec parois d'inertie thermique considérés négligeables; un mur de masse de $0,25 \text{ m}$ épaisseur est orienté vers l'ouest, faisant une barrière aux pertes (gains) de chaleur avec l'ambiance extérieure; et le mur sud restant est construit avec un double vitrage à verre ordinaire simple d'une surface de $3 \times 2,5 \text{ m}$ et de 5 mm d'épaisseur qui font face à un mur Trombe en béton lourd de $0,3 \text{ m}$ d'épaisseur. La surface inférieure de la dalle du sol sur terre repose sur un isolant thermique en laine de verre de $0,05 \text{ m}$; les dimensions géométriques de la construction sont récapitulées dans le Tableau II.1. L'énergie est transférée entre la zone et l'ambiance extérieure au moyen d'infiltrations d'air, de gains solaires et de pertes de chaleur (gains) à travers le sol, les murs, le toit et le vitrage. Le modèle décrit les caractéristiques dynamiques à court et à long terme de la zone à chauffée.

La démarche utilisée pour la modélisation consiste à établir un modèle pour chaque composant du système en fonction de ses caractéristiques physiques. Le transfert de chaleur à travers le système est calculé en supposant un flux de chaleur à une dimension pour éviter les structures dynamiques complexes pour un calcul progressif. Les valeurs des paramètres thermiques sont déterminées pour s'adapter au modèle pour différentes configurations (construction lourde, moyenne ou légère) Tableau II.2.

La méthode des différences finies est appliquée dans la simulation pour évaluer la distribution des températures à chaque intervalle de temps. Cette méthode employée est couramment utilisée pour simuler des modèles thermiques d'un bâtiment car elle offre la flexibilité en termes de variation de propriété de tous les composants du bâtiment qui peuvent être simulés et la quantité des informations qui peut être fournie. Des modèles de complexité variable peuvent être développés à partir des équations de bilan thermique en fonction de l'hypothèse appliquée.

Ainsi, le modèle choisi est développée à partir des équations de bilan thermique en considérant les hypothèses suivantes:

- tiens en compte des résistances aux échanges thermiques d'ondes longues et courtes;

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

- conserve une capacité thermique pour chacun de l'air intérieur, de la masse du mur Trombe et du mur de masse orienté vers ouest;
- tiens en comptes de la conduction à travers chaque mur, le sol, le toit et le vitrage séparément;
- prise en compte de l'infiltration d'air et des pertes de chaleur au sol de terre;
- considérons une construction ajustée et sans crépissage par laquelle on peut admettre que les déperditions de chaleur par les joints ne sont pas aussi importante et peuvent être allégées;
- les effets du rayonnement solaire émises à travers les volets des fenêtres sont concentrés sur les surfaces intérieures du mur de masse et la dalle du sol, y compris l'air intérieur de l'ambiance, étant supposées de recevoir un pourcentage fixe du gain. $a_r = 10\%$, $a_{ms} = 75\%$, $a_{dl} = 15\%$

La surface de ces orifices est sensiblement égale en partie haute et en partie basse.

- ne tient pas compte de la production de chaleur éventuelle des occupants et du matériel électrique pour une simplicité saquée.
- Température de l'eau piscine est de 28°C
- Hygrométrie 65%
- Température de l'air intérieur voulue 28°C avec une plage morte de $\pm 0.5^\circ\text{C}$
- Le system de chauffage est automatisé par un contrôleur de température conventionnel Proportionnel - Intégrale- Dérivative PID.
- Les clapets commandant la circulation d'air à travers les ouvertures supérieures et inférieures, peuvent être automatisés à partir d'indications fournies par des sondes de températures.

Le modèle développé dans cette étude décrit les caractéristiques dynamiques à court et à long terme d'un système de chauffage par un mur Trombe d'une piscine semi olympique. L'approche utilisée pour la modélisation consiste à établir un modèle pour chaque composant du système en fonction de ses caractéristiques physiques. Le transfert de chaleur à travers le système est calculé en supposant un flux de chaleur à une dimension. Les valeurs des paramètres sont déterminées pour correspondre au modèle pour une variété de différentes configurations du système.

La méthode des différences finies est appliquée dans la simulation pour évaluer la distribution de la température à chaque intervalle de temps. Le modèle de simulation est implémenté dans un

Chapitre II: Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

code informatique et des étapes de calculs sont effectuées pour identifier le comportement thermo -dynamique du système de chauffage simulé.

Les données d'entrée sont: La température de l'ambiance extérieure, L'irradiation globale et diffus, Vitesse du vent.

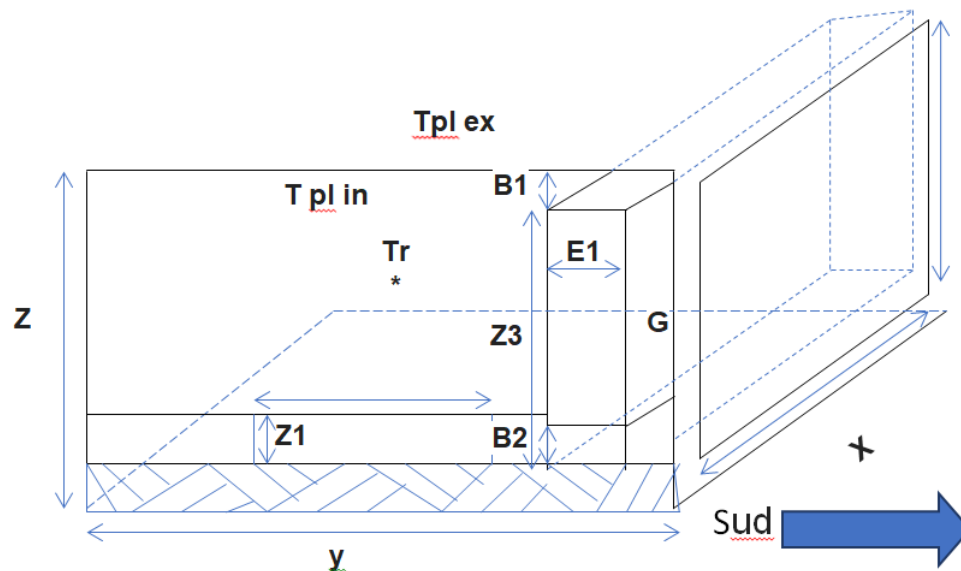


Figure II.1 Configuration schématique de la piscine à mur Trombe

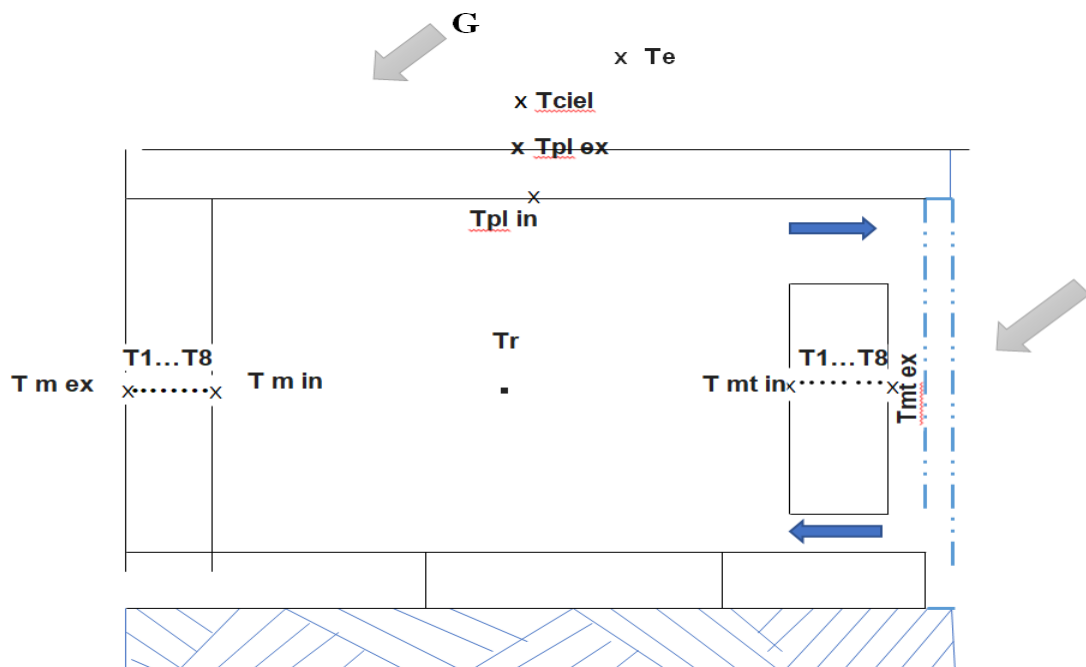


Figure II.2 Coupe de la piscine à mur Trombe

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

Tableau II.1 : Valeurs Géométriques des éléments la construction

- Volume de l'enveloppe (X x Y x Z)	V_{ev} (30 x10x5m)	m^3
- Surface de la dalle du sol	S_{dl} 300	m^2
- Epaisseur de la dalle du sol	e_{dl} 15	cm
Isolant sous la dalle :	e_{isl} 5	cm
- Mur de mass orienté vers l'Ouest (10x5 m):	e_m 0.25	m
- Murs orienté vers le Nord (30x5 m)	e_n 0.10	m
- Murs orienté vers L'est (10x5 m)	e_r 0.10	m
- Vitrage large orienté vers le Sud (30x5 m)	e_{ve} 0.005	m
- Plafond (10x 30 m):	e_{pf} 0.015	m

Tableau II.2 : Valeurs Thermo-Physique des éléments la construction

Elément	Valeurs Thermo-Physique	
Air ambiant intérieure	λ_{air}	0,0251 W/m °K
	ρ_{air}	1,164 kg/m ³
	cp_{air}	1012,18 J/kg °K
	ϑ_{air}	18,24E-6 m ² /s
Dalle en béton lourd	λ_{pl}	1,75 W/m °K
	ρ_{pl}	2000 kg/m ³
	cp_{pl}	880 J/kg °K
	ε_{pl}	0.95
	$T_{pl(max)}$	28 °C

Chapitre II: Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

Isolant du plancher à terre	$c_{p_{iso}}$ ρ_{iso} λ_{iso}	1500 20 0,04	J/kg °K kg/m ³ W/m °K
Murs en brique creuse (ms, mN, et mW)	c_p $\varepsilon_{(int)}$ $\varepsilon_{(ext)}$	840.0 0.2 0.01	J/kg °K
Plafond en ourdi	λ_{pf} ρ_{pf} $c_{p_{pf}}$ $\varepsilon_{pf(int)}$ $\varepsilon_{pf(ext)}$	0,8 1810.0 840.0 0.2 0.0	W/m °K kg/m ³ J/kg °K
Vitrage de la fenêtre (verre ordinaire)	λ_{ver} ε_{ver} α_{ver}	0,76 0.9 0.05	W/m °K

II.3 Calculs des températures de l'enveloppe à chauffée

II.3.1 Températures des nœuds

Le mur de Trombe, qui est l'élément chauffant, mur de masse qui est orienté vers l'ouest, sont divisées en plusieurs couches d'épaisseur Δx_{MT} et Δx_{MS} respectivement. Ils sont considérés d'avoir une capacitance thermique.

Un bilan énergétique pour un intervalle de temps Δt peut être exprimé comme suit: Le flux de chaleur de tous les nœuds voisins vers le nœud (i) pendant Δt est égal à l'augmentation de l'énergie interne du matériau associé à ce nœud (i), c'est-à-dire:

$$M c_{p_i} \left(\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \right) = U A_{i-1,i} (T_{i-1}^n - T_i^n) + U A_{i,i+1} (T_{i+1}^n - T_i^n) \quad (II.1.a)$$

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

Réorganisation de l'équation ci-dessus en:

$$\left(\frac{T_i^{n+1}-T_i^n}{\Delta t}\right) = \frac{((UA_{i-1,i}T_{i-1}^n + UA_{i,i+1}T_{i+1}^n) - (UA_{i-1,i} + UA_{i,i+1})T_i^n)}{Mcp_i} \quad (\text{II.1.b})$$

on laisse: $S_i = (UA_{i-1,i}T_{i-1}^n + UA_{i,i+1}T_{i+1}^n)/Mcp_i$ (II.2)

$$\lambda_i = (UA_{i-1,i} + UA_{i,i+1})/Mcp_i \quad (\text{II.3})$$

$$\omega_i = (T_i^{n+1} - T_i^n)/\Delta t \quad (\text{II.4})$$

l'équation (II.1.b) devient:

$$(T_i^{n+1} - T_i^n/\Delta t) = \omega_i = S_i - \lambda_i T_i^n \quad (\text{II.5.a})$$

cette équation peut être écrite comme:

$$T_i^{n+1} = (1 - \lambda_i \Delta t) T_i^n + S_i \Delta t \quad (\text{II.5.b})$$

Dans le cas du modèle de simulation, la taille de pas de temps maximale autorisée est de 2,5 secondes, ce qui prend trop de temps de calcul pour une simulation à long terme. Cependant, une augmentation de la taille du pas de temps admissible peut être obtenue sans perte de précision en introduisant un facteur de pondération σ_i , c'est-à-dire en choisissant une solution implicite.

L'équation (II.5.b) devient:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \omega_i \Delta t \quad (\text{II.5.c})$$

Réolvons pour ω_i , on a:

$$\omega_i = \frac{S_i - \lambda_i T_i^n}{1 + \lambda_i \sigma_i \Delta t} \quad (\text{II.6})$$

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

Le facteur de pondération σ_i peut être obtenu en faisant correspondre les équations analytiques et numériques implicites de ω_i à savoir:

$$\frac{(1-e^{-\lambda_i \Delta t})S_i - \lambda_i T_i^n}{\lambda_i \cdot T^n} = \frac{S_i - \lambda_i T_i^n}{1 + \lambda_i \cdot \sigma_i \Delta t} \quad (\text{II.7})$$

résolvons pour σ_i on a:

$$\sigma_i = \frac{1}{(1-e^{-\lambda_i \Delta t})} - \frac{1}{\lambda_i \Delta t} \quad (\text{II.8})$$

de cette équation (II.8), σ_i prend toujours des valeurs dans la gamme $[0,1]$ quelle que soit la valeur du produit $(\lambda_i \Delta t)$. Une fois que la valeur de ω_i est calculée, la température prédite du nœud (i) pour un pas de temps Δt est donné comme:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \omega_i \Delta t \quad (\text{II.9})$$

La procédure décrite ci-dessus est utilisée pour calculer à chaque pas du temps, la température nodale pour la masse du mur Trombe, le mur de masse et l'air de l'ambiance intérieure.

II.3.1.4 Températures nodales du mur de mass :

- **Premier nœud :**

$$S_{ms(1)} = (UA_{ms(O1)} T_{ms(si)}^n + UA_{ms(E1)} T_{ms(2)}^n) / Mcp_{ms(1)} \quad (\text{II.10})$$

$$\lambda_{ms(1)} = \frac{(UA_{ms(O1)} + UA_{ms(E1)})}{Mcp_{ms(1)}} \quad (\text{II.11})$$

$$\sigma_{ms(1)} = \frac{1}{(1-e^{-\lambda_{ms(1)} \Delta t})} - \frac{1}{\lambda_{ms(1)} \Delta t} \quad (\text{II.12})$$

$$\omega_{ms(1)} = \frac{S_{ms(1)} - \lambda_{ms(1)} T_r^n}{1 + \lambda_{ms(1)} \sigma_{ms(1)} \Delta t} \quad (\text{II.13})$$

$$T_{ms(1)}^{n+1} = T_{ms(1)}^n + \omega_{ms(1)}\Delta t \quad (II.14)$$

-Nœuds intérieurs:

$$S_{ms(i)} = \frac{UA_{i-1,i}T_{ms(i-1)}^n + UA_{i,i+1}T_{ms(i+1)}^n}{Mcp_{ms(i)}} \quad (II.15)$$

$$\lambda_{ms(i)} = \frac{(UA_{i-1,i} + UA_{i,i+1})}{Mcp_{ms(i)}} \quad (II.16)$$

$$\sigma_{ms(i)} = \frac{1}{(1 - e^{-\lambda_{ms(i)}\Delta t})} - \frac{1}{\lambda_{ms(i)}\Delta t} \quad (II.17)$$

$$\omega_{ms(i)} = \frac{S_{ms(i)} - \lambda_{ms(i)}T_r^n}{1 + \lambda_{ms(i)}\sigma_{ms(i)}\Delta t} \quad (II.18)$$

$$T_{ms(i)}^{n+1} = T_{ms(i)}^n + \omega_{ms(i)}\Delta t \quad (II.19)$$

- Dernier nœud:

$$S_{ms(N)} = (UA_{N-1,N}T_{ms(N-1)}^n + UA_{ms(EN)}T_{ms(se)}^n)/Mcp_{ms(N)} \quad (II.18)$$

$$\lambda_{ms(N)} = (UA_{N-1,N} + UA_{ms(EN)})/Mcp_{ms(N)} \quad (II.19)$$

$$\sigma_{ms(N)} = \frac{1}{(1 - e^{-\lambda_{ms(N)}\Delta t})} - \frac{1}{\lambda_{ms(N)}\Delta t} \quad (II.20)$$

$$\omega_{ms(N)} = \frac{S_{ms(N)} - \lambda_{ms(N)}T_r^n}{1 + \lambda_{ms(N)}\sigma_{ms(N)}\Delta t} \quad (II.21)$$

$$T_{ms(N)}^{n+1} = T_{ms(N)}^n + \omega_{ms(N)}\Delta t \quad (II.22)$$

II.3.1.5 Température de l'air ambiant intérieure :

La température de l'air ambiant intérieure est définie comme le procédé de sortie de l'échange thermique de l'enveloppe de la piscine avec l'ambiance extérieure. Cette température est le résultat de l'apport de chaleur à travers, de l'irradiation solaire et des pertes ou gains de chaleur à travers le mur de Trombe, le mur de masse, le vitrage, le plafond, la dalle du sol, les murs restants et les infiltrations d'air. Par conséquent, la variation de la température de l'air ambiant intérieur peut être vue comme dépendant des grandeurs physiques qui sont définies comme le procédé des entrées notamment: la température extérieure, l'irradiation solaire et la vitesse du vent; les gains par les occupants, Q_{oc} , et les équipements électriques, Q_{ec} sont allégés.

L'existence d'éventuelles perturbations non mesurables n'est pas prise en compte.

$$S_r = (UA_{r,pl(ss)}T_{pl(ss)} + UA_{r,ms(si)}T_{ms(si)} + UA_{r,mN}T_{mN(si)} + UA_{r,mO}T_{mO(si)} + UA_{r,pf}T_{pf(si)} + UA_{r,vt}T_{vt} + \dot{m}_{inf}c_{p,air}T_{ext} + \alpha_{sol}G + Q_{oc} + Q_{ec})/Mcp_{air} \quad (II.23)$$

$$\lambda_r = (UA_{r,pl(ss)} + UA_{r,ms(si)} + UA_{r,mN} + UA_{r,mO} + UA_{r,pf} + UA_{r,vt} + \dot{m}_{inf}c_{p,air})/Mcp_{air} \quad (II.24)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{(1-e^{-\lambda_r \Delta t})} - \frac{1}{\lambda_r \Delta t} \quad (II.25)$$

$$\omega_r = \frac{S_r - \lambda_r T_r^n}{1 + \lambda_r \sigma_r \Delta t} \quad (II.26)$$

$$T_r^{n+1} = T_r^n + \omega_r \Delta t \quad (II.27)$$

II.3.2 Temperatures De Surface Des Parois :

Un bilan énergétique permanent sur chacun des surfaces intérieures et extérieures est utilisé pour calculer leurs températures. L'équation de la température de surface peut être exprimée en termes d'échange de chaleur par conduction, convection et rayonnement, y compris le gain de chaleur solaire sur les surfaces extérieures des parois de l'enveloppe.

En état permanent, la capacité thermique des nœuds est nulle ce qui donne:

$$Mcp_i \left(\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \right) = \sum UA_j \cdot T_j + \sum UA_j \cdot T_s^n = 0 \quad (II.28.a)$$

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

Alors:

$$T_{\text{surface}} = T_s = \frac{\sum U_{A_j} \cdot T_j}{\sum U_{A_j}} \quad (\text{II.28.b})$$

- Surface intérieure des parois

$$T_{\text{si}} = \frac{\sum (U_{A_j} T_j) + p_{\text{cr sol}} G}{\sum U_{A_j}} \quad (\text{II.28.c})$$

- Surface extérieure des parois

$$T_{\text{se}} = \frac{\sum (U_{A_j} T_j) + G}{\sum U_{A_j}} \quad (\text{II.28.d})$$

Irradiation solaire globale: $G = G_{\text{direct}} + G_{\text{diffus}}$ (II.29)

II.3.2.2 Température la surface inferieur de la dalle de sol sur terre:

$$T_{\text{sol(sinf)}} = \frac{U_{A_r, \text{sol(sinf)}} T_r + U_{P_{\text{pl}}} \bar{T}_{\text{ext(jours)}} + A_{\text{pl}} \cdot U_{A_{\text{sol}}} \bar{T}_{\text{ext(ans)}}}{U_{A_r, \text{sol(sinf)}} + U_{A_{\text{sol(sinf), terre}}}} \quad (\text{II.30})$$

II.3.2.3 Température du vitrage en face du mur Tombe:

Le vitrage est supposé d'avoir une seule température de surface puisque son épaisseur est choisie petit (5mm).

$$T_{\text{vt}} = (U_{A_{r, \text{vt}}} T_r + U_{A_{\text{vt, ext}}} T_{\text{ext}} + A_{\text{vt}} (h_{\text{rad(vt, sim)}} T_{\text{ms(si)}} + h_{\text{rad(vt, pf)}} T_{\text{pf(si)}} + h_{\text{rad(vt, sspl)}} T_{\text{pl(ss)}} + h_{\text{rad(vt, mN)}} T_{\text{mn(si)}} + h_{\text{rad(vt, mO)}} T_{\text{mw(si)}} + h_{\text{rad(vt, mO)}} T_{\text{mw(si)}} + h_{\text{ciel}} T_{\text{ciel}}) + \alpha_{\text{vt}} G) / (U_{A_{\text{vt}}} + U_{A_{\text{vt, ext}}} + A_{\text{vt}} (h_{\text{rad(vt, sim)}} + h_{\text{rad(vt, pf)}} + h_{\text{rad(vt, mN)}} + h_{\text{rad(vt, mW)}} + h_{\text{ciel}})) \quad (\text{II.61})$$

Où:

$$U_{A_{\text{MT, vt}}} = \frac{A_{\text{vt}} \cdot h_{\text{cov(r, vt)}} \lambda_{\text{vt}} \cdot 2 / e_{\text{vt}}}{h_{\text{cov(r, vt)}} + (\lambda_{\text{vt}} \cdot e_{\text{vt}} / 2)} \quad (\text{II.31})$$

$$UA_{vt,ext} = \frac{A_{vt} \cdot h_{comb(vt)} \lambda_{vt} \cdot 2 / e_{vt}}{h_{comb(vt)} + (2 \cdot \lambda_{vt} / e_{vt})} \quad (II.32)$$

II.3.2.4 Température de la surface interieur du mur de mass orienté vers l'Ouest

$$T_{ms(si)} = (UA_{r,sims} T_r + UA_{ms(W1)} T_{ms(1)} + A_{ms} (h_{rad(sims,pl(ss))} T_{pl(ss)} + h_{rad(sims,pf)} T_{pf(si)} + h_{rad(sims,mN)} T_{mn(si)} + h_{rad(sims,mW)} T_{mw(si)}) + \alpha_{ms(si)} \cdot G) / (UA_{rad,sims} + UA_{ms(O1)} + A_{ms} (h_{rad(sims,pl(ss))} + h_{rad(ms,pf)} + h_{rad(sims,mN)} + h_{rad(sims,mO)})) \quad (II.33)$$

Où :

$$UA_{r,sims} = A_{ms} \cdot h_{cov(r,sims)} \quad (II.34)$$

$$UA_{ms(W1)} = A_{ms} \cdot \lambda_{brique} \cdot N_{ms} \cdot 2 / e_{ms} \quad (II.35)$$

II.3.2.5 Température de la surface interieur du mur orienté vers le Nord :

$$T_{mN(si)} = (UA_{r,simN} T_r + UA_{mN} T_{mN(se)} + A_{mN} (h_{rad(dl,mN)} T_{pl(ss)} + h_{rad(vt,mN)} T_{vt} + h_{rad(ms,mN)} T_{ms(si)} + h_{rad(mN,pf)} T_{dl(si)} + h_{rad(mN,mO)} T_{mw(si)}) + \alpha_{mN(si)} \cdot G) / (UA_{r,simN} + UA_{mN} + A_{mN} (h_{rad(pl,mN)} + h_{rad(vt,mN)} + h_{rad(ms,mN)} + h_{rad(mN,pf)} + h_{rad(mN,mO)})) \quad (II.36)$$

Où:

$$UA_{r,mN(si)} = A_{mN} \cdot h_{cov(r,simN)} \quad (II.37)$$

$$UA_{mN} = A_{mN} \cdot \lambda_{brique} \cdot \frac{2}{e_{mN}} \quad (II.38)$$

II.3.2.7 Température de la surface interieur du plafond:

$$T_{pf(si)} = (UA_{r,pf} T_r + UA_{pf} T_{pf(se)} + A_{pf} (h_{rad(ms,pf)} + h_{rad(pl,pf)} T_{pl(ss)} + h_{rad(vt,pf)} T_{vt} + h_{rad(mN,pf)} T_{mN(si)} + h_{rad(mO,pf)} T_{mO(si)}) / (UA_{r,pf} + UA_{pf} + A_{pf} (h_{rad(ms,pf)} + h_{rad(pl,pf)} + h_{rad(vt,pf)} + h_{rad(mN,pf)} + h_{rad(mO,pf)}) + \alpha_{pf(si)} G \nearrow^0) \quad (II.39)$$

où :

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

$$UA_{r,pf} = A_{pf} \cdot h_{cov(r,pf)} \quad (II.40)$$

$$UA_{mW} = A_{pf} \cdot \lambda_{pf} \cdot \frac{2}{e_{pf}} \quad (II.41)$$

II.3.2.9 Température de la surface extérieur du mur orienté vers le Nord:

$$T_{mN(se)} = \frac{UA_{mN} T_{mN(si)} + UA_{mN,ext} T_{ext} + A_{mN} h_{ciel} \cdot T_{ciel} + G}{UA_{mN} + UA_{mN,ext} + A_{mN} h_{ciel}} \quad (II.42)$$

où:

$$UA_{mN} = A_{mN} \cdot \lambda_{brique} \cdot \frac{2}{e_{mN}} \quad (II.43)$$

$$UA_{mN,ext} = A_{mN} \cdot h_{comb(se)} \quad (II.44)$$

II.3.2.10 Température de la surface extérieur du mur orienté vers l'Ouest:

$$T_{mN(se)} = \frac{UA_{mO} T_{mN(si)} + UA_{mO,ext} T_{ext} + A_{mO} h_{ciel} \cdot T_{ciel} + G}{UA_{mO} + UA_{mO,ext} + A_{mO} h_{ciel}} \quad (II.45)$$

où:

$$UA_{mO} = A_{mO} \cdot \lambda_{brique} \cdot 2/e_{mW} \quad (II.46)$$

$$UA_{mO,ext} = A_{mO} \cdot h_{comb(se)} \quad (II.47)$$

II.3.2.11 Température de la surface extérieur du plafond :

$$T_{pf(se)} = \frac{UA_{pf} T_{pf(si)} + UA_{pf,ext} T_{ext} + A_{pf} h_{ciel} \cdot T_{ciel} + G}{UA_{pf} + UA_{pf,ext} + A_{pf} h_{ciel}} \quad (II.48)$$

où:

$$UA_{pf} = A_{pf} \cdot \lambda_{béton} \cdot 2/e_{pf} \quad (II.49)$$

$$UA_{pf,ext} = A_{pf} \cdot h_{comb(se)} \quad (II.50)$$

La valeur instantanée du rayonnement solaire globale sur des surfaces extérieures des parois est calculée suivant leur orientation par rapport au soleil par des corrélations du gisement solaire du lieu établis dans un sous-programme

II.4 Calcul des coefficients de transfert thermique :

II.4.1 Transfert de chaleur dû à la convection :

Les relations de transfert de chaleur pour le processus de convection, donnant le débit thermique entre un corps de fluide et une surface solide à une température différente ou avec un fluide entre deux surfaces, sont exprimées en termes de Nusselt, Grashof, Prandlt et Reynolds (Nu, GR, Pr et Re), groupes de constantes physiques sans dimension, fondés sur des résultats expérimentaux et sont défini comme:

$$Nu = \frac{h.l}{\lambda} \text{ (II.51)}$$

$$Gr = \frac{g.\Delta T.L^3\rho^2}{T.\mu^2} \text{ (II.52)}$$

$$Pr = \frac{\mu.c_p}{\lambda} \text{ (II.53)}$$

$$Re = \frac{v.L.\rho}{\mu} \text{ (II.54)}$$

où:

T est la température moyenne absolue de l'air à la surface du solide; ΔT est la différence de température entre la surface et l'air; L est une longueur géométrique et les valeurs thermo-physiques λ, c_p ... etc., sont définies dans la littérature.

II.4.1.1 Transfert de chaleur par convection libre :

Les corrélations pour la convection libre consistent en une relation fonctionnelle entre le nombre de Nu et le produit des nombres de Gr et de Pr qui correspond à un nombre de Rayleigh (Ra). La relation est généralement de la forme:

$$Nu = C. (Gr.Pr)^n = C. Ra^n \text{ (II.55)}$$

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

Les corrélations indiquées dans le Tableau II.3 permettent de calculer les coefficients de transfert de chaleur dus à la convection libre sur les surfaces intérieures et extérieures du bâtiment.

Tableau. II.3: Corrélations de la convection libre.

Géométrie	Formule	Intervalle d'application
Plaque verticale (L= hauteur)	$\overline{Nu} = 0.59Ra^{1/4}$	$10^4 < Ra < 10^9$
	$\overline{Nu} = 0.129Ra^{1/3}$	$10^9 < Ra < 10^{12}$
Plaque horizontale (L= moyenne des dimensions)		
a) de surface supérieure chaude et de surface inférieure froide.	$\overline{Nu} = 0.54Ra^{1/4}$	$10^5 < Ra < 2.10^7$
b) de surface supérieure froide et de surface inférieure chaude	$\overline{Nu} = 0.14Ra^{1/3}$ $\overline{Nu} = 0.44Ra^{1/5}$	$2.10^4 < Ra < 3 \times 10^{10}$ $10^5 < Ra < 10^7$

II.5 Transfert de chaleur dû au vent :

Une situation courante dans le chauffage des locaux implique un flux de chaleur des surfaces enveloppantes d'un bâtiment vers l'air extérieur à une vitesse variant avec la vitesse du vent.

Équations dimensionnelles exprimant le coefficient d'échange sont données par différents auteurs :

cp_{msb} Le coefficient de transfert de chaleur combiné dû à la convection libre et au vent sur les surfaces extérieures est exprimé par:

$$h_{comb} = (h_{cov(libre)}^{3.46} + h_{vent}^{3.46})^{1/3.46} [9] \text{ (II.56a)}$$

II.6 Transfert de chaleur par rayonnement à ondes longues :

Le rayonnement à ondes longues est un processus d'échange de chaleur important dans l'analyse thermique d'un bâtiment, car le transfert d'énergie se produisant par rayonnement entre deux surfaces dépend de la différence de température individuelle de la surface, chacune augmentée à

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

la même puissance. Beaucoup de techniques ont été utilisées par de nombreux autres pour modéliser les échanges de radiations à ondes longues et longues entre les surfaces internes d'un bâtiment et entre un bâtiment et ses environs.

Le coefficient de transfert de chaleur du rayonnement à ondes longues est calculé à l'aide de la linéarisation:

$$h_r = \sigma \cdot F \cdot (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \text{ (II.59)}$$

où: σ : la constante de Stefan-Boltzman = $5.678 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

F est le facteur de forme calculé par:

$$F = \left(\frac{1}{F_g} + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1(1-\varepsilon_2)}{A_2 \cdot \varepsilon_2} \right)^{-1} \text{ (II.60)}$$

F_g est le facteur de forme géométrique dépendant de la position des deux surface en égare.

ε_1 et ε_2 sont les émissivité des deux surfaces en égare.

A_1 et A_2 sont les aires des deux surfaces en égare.

Le coefficient de transfert de chaleur par les surfaces extérieures vue par le ciel: (Swindbank, 1963) [] relie la température du ciel à la température de l'air extérieur local dans la relation simple suivante:

$$h_{\text{ciel}} = \sigma \cdot \varepsilon_s \cdot (T_s^2 + T_{\text{ciel}}^2)(T_s + T_{\text{ciel}}) \text{ (II.61)}$$

$$T_{\text{ciel}} = 0.0552 \cdot T_{\text{ext}}^{3/2} (T_{\text{ciel}} \text{ et } T_{\text{ext}}) \text{ en } (^{\circ}\text{K}) \text{ (II.62)}$$

L'influence des nuages vus par la surface extérieure du toit et les murs, et l'influence du sol vu par les murs qui se rend pour augmenter la température effective du ciel ne sont pas incluses dans l'expression. En général, l'estimation de la température du ciel sous les conditions générales est soumise à des différences de températures larges comprises entre 0° et 20° C .

II.7 Le coefficient de transfert de chaleur dû à la perte de chaleur à la terre:

Différents auteurs utilisent différents procédés pour calculer le coefficient de perte de chaleur dû à la perte dans le sol. La méthode ASHREA[10] est l'une des méthodes les plus couramment utilisées à cet égard pour calculer ses valeurs pour différents types de construction de bâtiments.

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

En se référant à cette méthode, deux coefficients sont considérés : UP_{pl} et UA_{pl} exprimant respectivement la perte thermique par le périmètre et la surface du plancher chauffant et qui sont donnés dans les Tableaux II.4 et II.5. A savoir que le taux de perte de chaleur du plancher vers la terre peut-être calculé en appliquant la corrélation suivante:

$$Q_{\text{terre}} = UP_{pl} \cdot (T_{pl(\text{sinf})} - \bar{T}_{\text{ext}(\text{jours})}) + A_{pl} \cdot UA_{pl} \cdot (T_{pl(\text{sinf})} - \bar{T}_{\text{ext}(\text{ans})}) \quad (\text{II.63})$$

où:

$\bar{T}_{\text{ext}(\text{jours})}$ est la valeur moyenne journalière de la température extérieur donnée par la valeur moyenne annuelle de la température extérieur $\bar{T}_{\text{ext}(\text{ans})}$:

$$\bar{T}_{\text{ext}(\text{jours})} = \bar{T}_{\text{ext}(\text{ans})} + \text{Amp} \cdot \cos(nj - \varphi) \cdot 2\pi / 366 \quad (\text{II.64})$$

où : Amp est l'amplitude de la variation de la température

φ est la phase

 nj est le nombre du jour de l'année

Tableau II.4:Coefficient de perte de chaleur par conduction pour des fondations des murs non isolés dans la terre

Profondeur (m)	UP_{pl} (W/m.°K)
0.0 – 0.3	0.698
0.3 – 0.6	0.378
0.6 – 0.9	0.264
0.9 – 1.2	0.203
1.2 – 1.5	0.164
1.5 – 1.8	0.150
1.5 – 2.1	0.118

Tableau. II.5: Coefficient de perte de chaleur par conduction à travers la dalle au sol vers la terre.

Chapitre II: Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

Profondeur de la fondation du mur (m)	UA_{pl} (W/m ² °K)		
	Largeur du bâtiment (m)		
	6	7.2	8.4
1.5	0.182	0.165	0.148
2.8	0.171	0.154	0.142
2.1	0.165	0.148	0.131

II.8 Infiltration de l'air :

L'échange par infiltration de l'air entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment peut représenter un mécanisme important de perte (gain) de la chaleur. La quantité d'air qui s'infiltré dans un bâtiment dépend des caractéristiques de construction. Dans des modèles simples, on suppose des taux d'infiltration constants exprimés en nombre de changements d'air par heure (ACPH). On prend : ACPH = 1,5 pour les résidences plus anciennes

et ACPH = 1,0 pour les résidences, bureaux et appartements plus récents

De nombreuses références utilisent les formules suivantes pour calculer l'ACPH:

$$ACPH = C_1 + C_2 \cdot v_{vent} + C_3 \cdot (T_{ext} - T_r) \quad (II.65)$$

Où:

les valeurs des constantes C_1 , C_2 et C_3 sont données par [11]:

C_1	C_2	C_3
0.150	0.0088	0.00483 (construction normal)
0.110	0.0530	0.00366 (construction ajustée)

Le stockage thermique pour chaque type de construction est donné par [12] IEA, (International Energy Agency):

Mur de mass Léger, Mlg. 0.150 MJ/m². °K

Mur de mass Moyen, Mm. 0.255 MJ/m². °K

Chapitre II:Modélisation de la piscine chauffée par un mur trombe

Mur de mass Lourd, Mlr.

0.300 MJ/m². °K

II.9 Applications numériques

Une sélection des éléments est adopté pour couvrir diverses configurations de construction type: (MTlg, MTm, MTlr : Mur Trombe Léger, Moyen et Lourd) sélectionnées avec (Mlg, Mm, Mlr : Mur de mass Léger, Moyen et Lourd). Simulations de six mois sont établis sous climat aride pour une période consécutive à partir du mois de Novembre jusqu'au fin du mois d'Avril.

On considère:

10 nœuds pour une construction de masse lourde ou moyenne.

5 nœuds pour une construction de masse moyenne.

CHAPITRE III:
Résultatset Discussion

CHAPITRE III: Résultats et Discussion

III Résultats et Discussion

Les Performances énergétiques sont généralisées dans le Tableau III.1

Tableau III.1: Performances énergétiques pour différentes selections de configurations de construction de la piscine (simulation de six mois)

Éléments de construction	IGS (°C.H)	HS (H)	MXTS (°C)	IGI (°C.H)	HI (H)	MXTI (°C)	Q _{éch} (MJ)
MTlg - Mlg	2043.90	1815.35	1.1	371.24	731.24	0.5	2747.320
MTlg - Mm	1955.90	1817.45	1.0	257.98	585.90	0.4	2637.260
MTlg - Mlr	1922.30	1725.25	1.0	166.82	484.70	0.3	2500.700
MTm - Mlg	1534.32	1439.90	1.0	352.04	745.30	0.5	2689.158
MTm - Mm	1457.56	1471.30	1.0	216.11	562.70	0.4	2582.538
MTm - Mlr	1456.96	1546.90	0.9	135.67	462.75	0.3	2452.745
MTlr - Mlg	1282.85	1260.65	1.0	556.40	946.75	0.6	2637.780
MTlr - Mm	1290.91	1325.05	1.0	348.54	746.80	0.5	2542.025
MTlr - Mlr	1365.80	1422.30	0.9	203.17	600.05	0.3	2422.803

ITS = Intégrale de la température intérieure supérieure à 28 °C.
 HS = Nombre des heures supérieur à 28°C.
 MXTS = Température moyenne maximale de l'air intérieur supérieure à 28°C.
 IGI = Intégrale de la température intérieure inférieure à 28 °C.
 HI = Nombre des heures inférieure à 28,5 °C.
 MXTI = Température moyenne maximale de l'air intérieur inférieure à 28,5 °C.
 Q_{éch} = énergie échangée.

Les résultats de simulations obtenues des performances avec différentes selections des murs sous un climat aride sont les suivantes:

- Sélection pour un mur Trombe léger avec mur de masse léger (Graphe 1): la température de l'ambiance intérieure reste au-dessous de la température de consigne sans dépassement inadéquate de la valeur de consigne.
- Sélection pour un mur Trombe léger avec mur de masse moyen (Graphe 2): la température de l'ambiance intérieure reste au-dessous de la température de consigne sans dépassement inadéquate de la valeur de consigne, et aussi pas de changement remarquable des oscillations de température en comparaison avec celle du Graphe 1.
- Sélection pour un mur Trombe léger avec mur de masse lourde (Graphe 3): Améliorations des amplitudes de températures
- Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de masse léger (Graphe 4): Similaire oscillations avec le graphe 2, pas de changement remarquable des amplitudes d'oscillations de la température de l'ambiance intérieure

CHAPITRE III: Résultats et Discussion

- Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de masse moyen(Graphe 5):Similaire oscillations avec le graphe 4, pas de changement remarquable des amplitudes d'oscillations de la température de l'ambiance intérieure
- Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de masse lourd(Graphe 6):Similaire oscillations avec le graphe 2,3,et 4, pas de changement remarquable des amplitudes d'oscillations de la température de l'ambiance intérieure
- Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masse léger(Graphe 7):augmentation inadéquate au-dessus de la valeur de consigne.
- Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masse moyen(Graphe 8):augmentation inadéquate au-dessus de la valeur de consigne.
- Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masse lourd(Graphe 9):augmentation inadéquate au-dessus de la valeur de consigne.

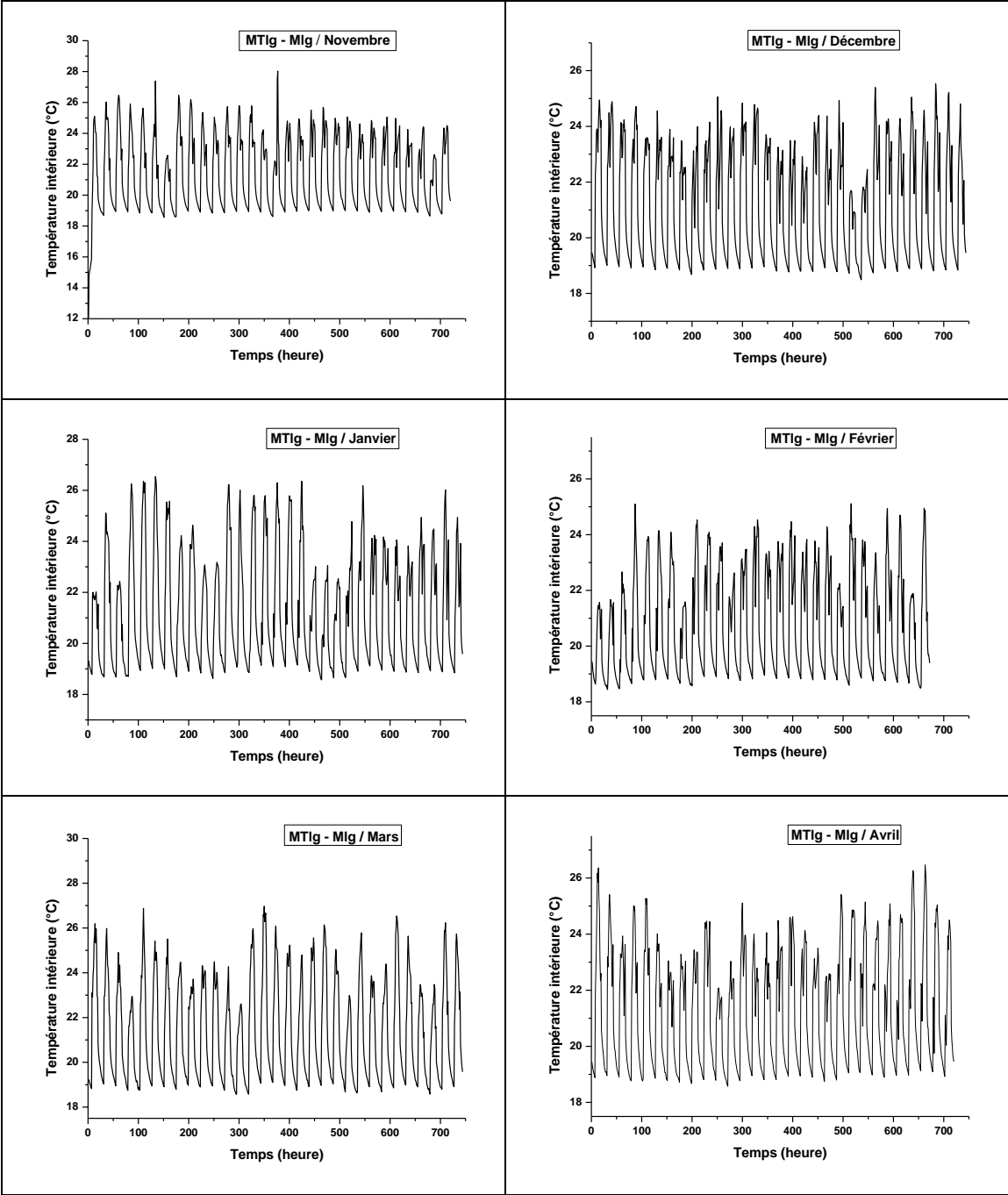
Les résultats montrent que les différentes combinaisons du mur de masse comme barrière thermique aux pertes (gains) de chaleur, avec la masse du mur Trombe comme stockage thermique et comme élément de chauffe, n'affectent pas considérablement le niveau de confort, en produisant des dépassements ou des sous-dépassements indésirables. Elle n'influence pas de manière significative la consommation d'énergie. De ce fait :

- les économies d'une combinaison à l'autre sont d'environ de 4% à 7%, comme le montre le Tableau III.1.
- Un mur Trombe de masse moyenne ou lourde est considéré comme le plus approprié pour un meilleur confort lorsqu'il est combiné avec un mur de masse lourd (Graphes 1-9).

Les résultats obtenus par la simulation indiquent plutôt que la stratégie est fiable pour l'un ou l'autre de ces cas.

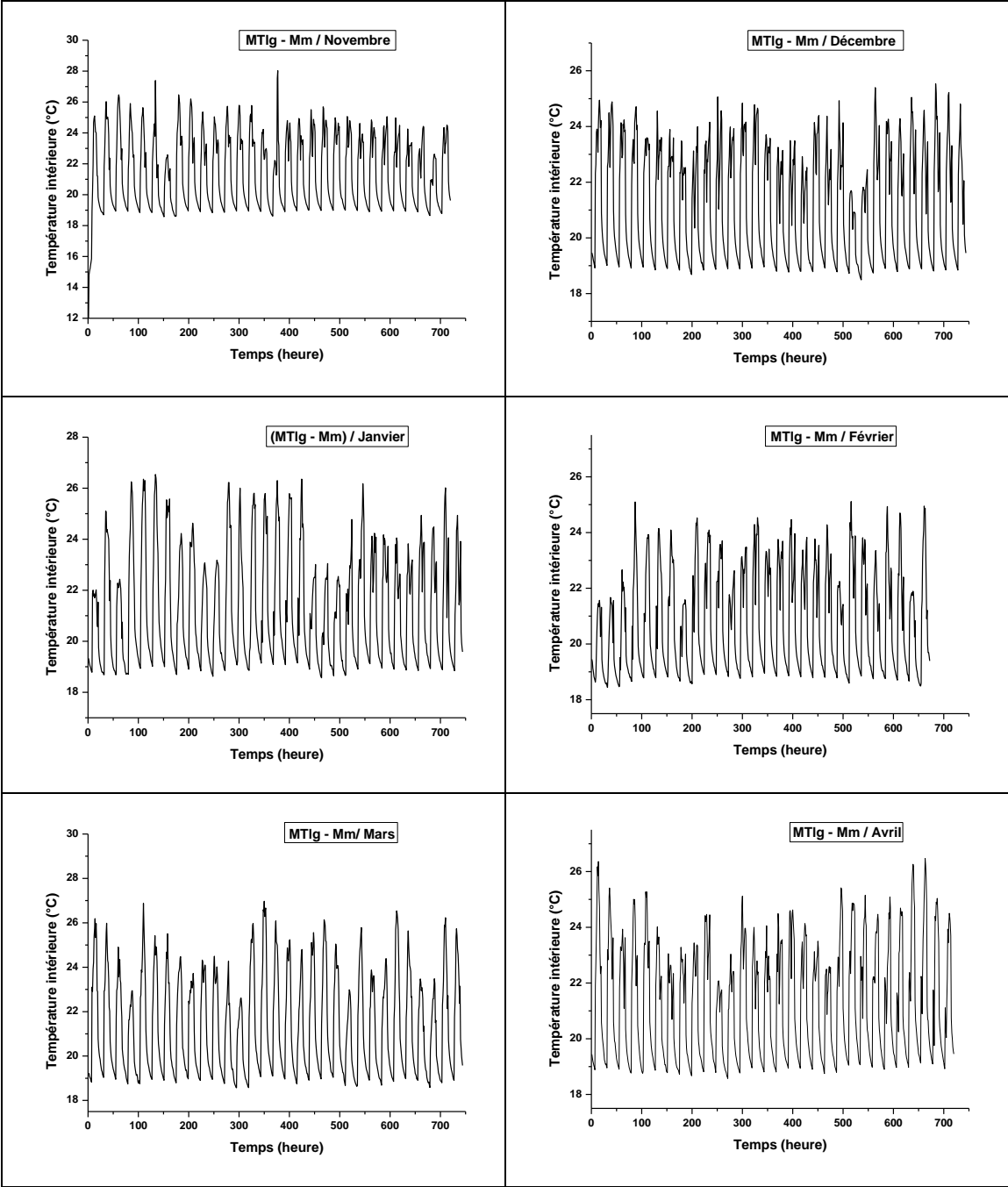
CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe 1: Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masse léger



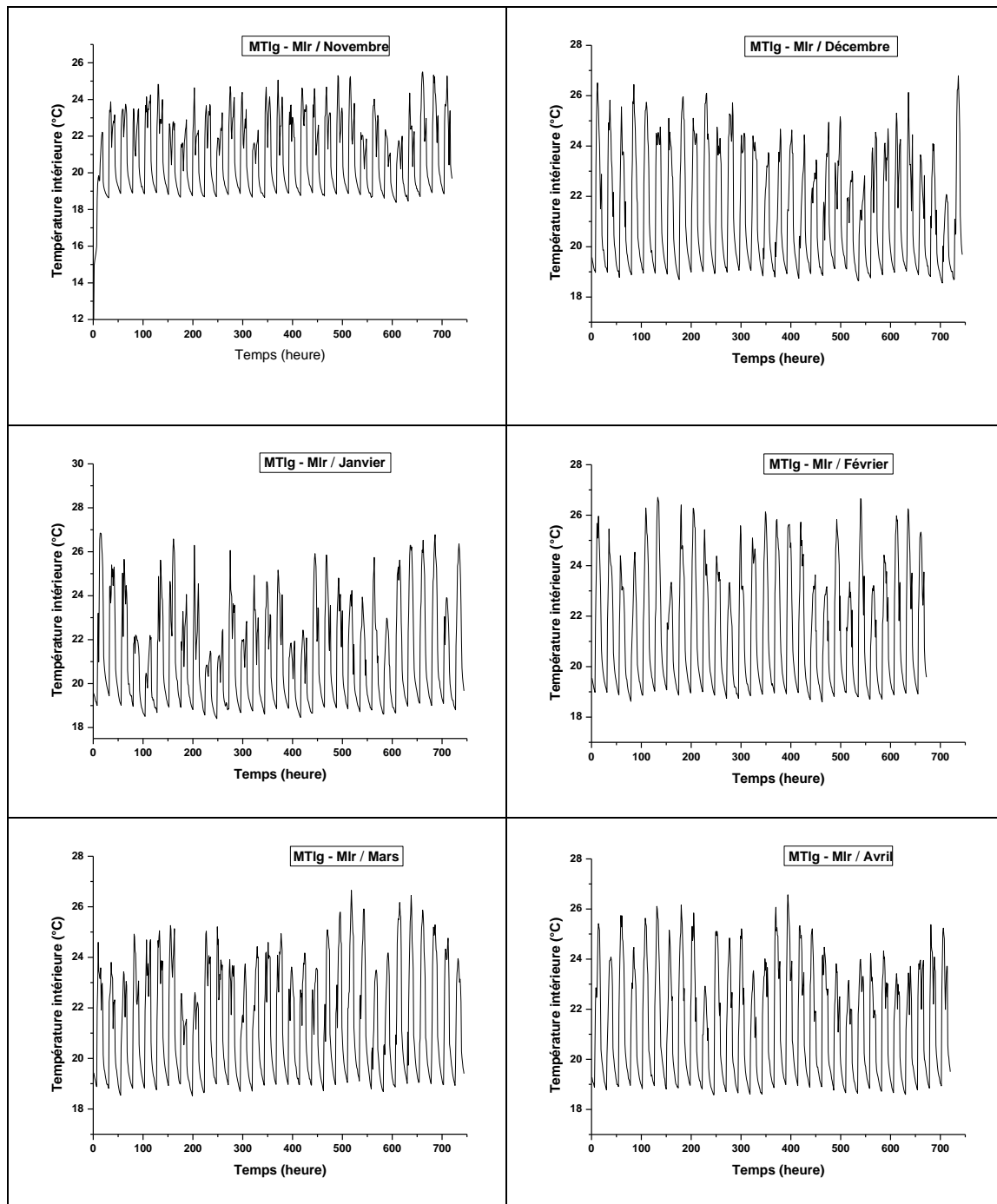
CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe2: Sélection pour un mur Trombe léger avec mur de masse moyen



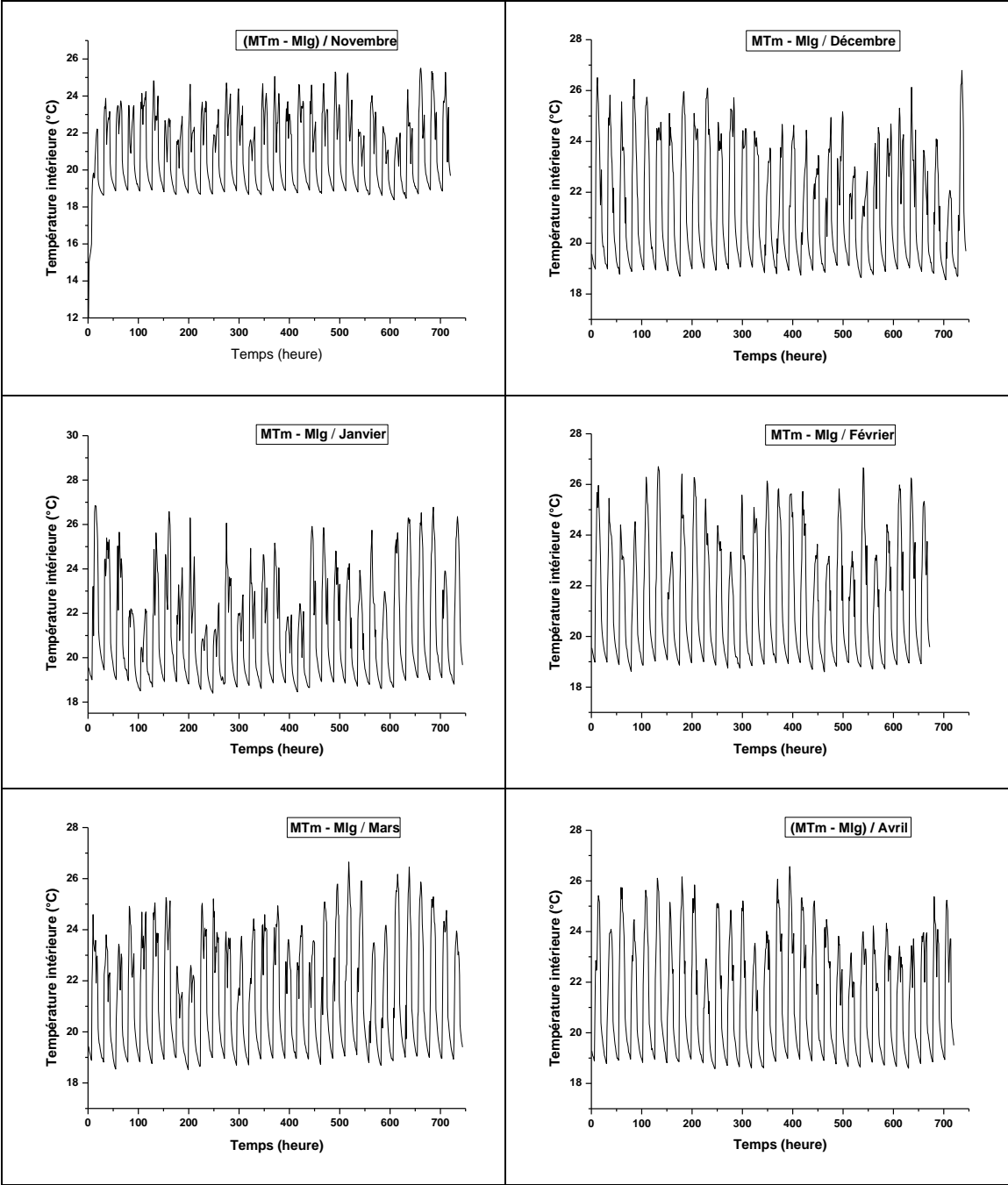
CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe3: Sélection pour un mur Trombe léger avec mur de masse lourde



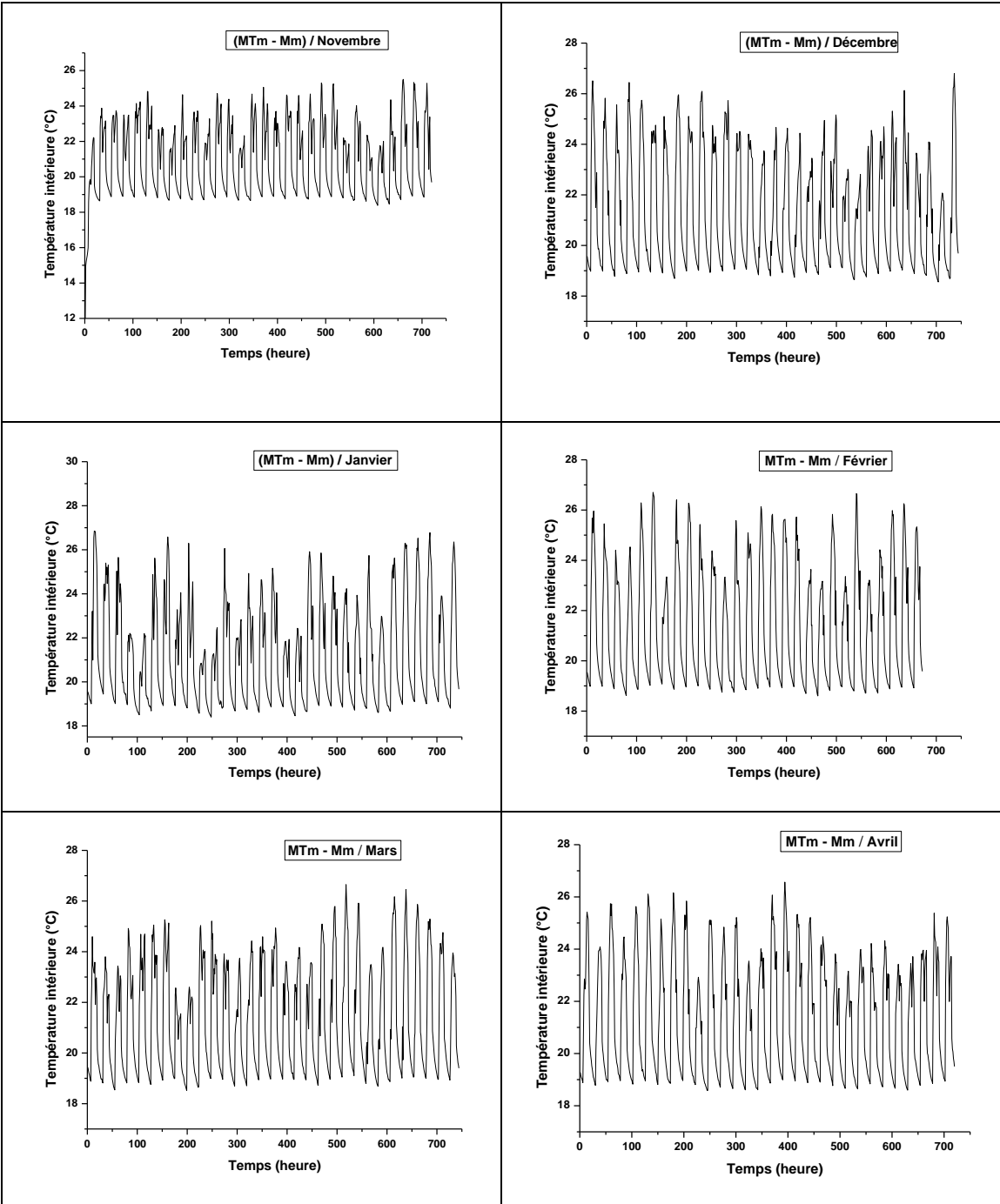
CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe4: Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de masse léger



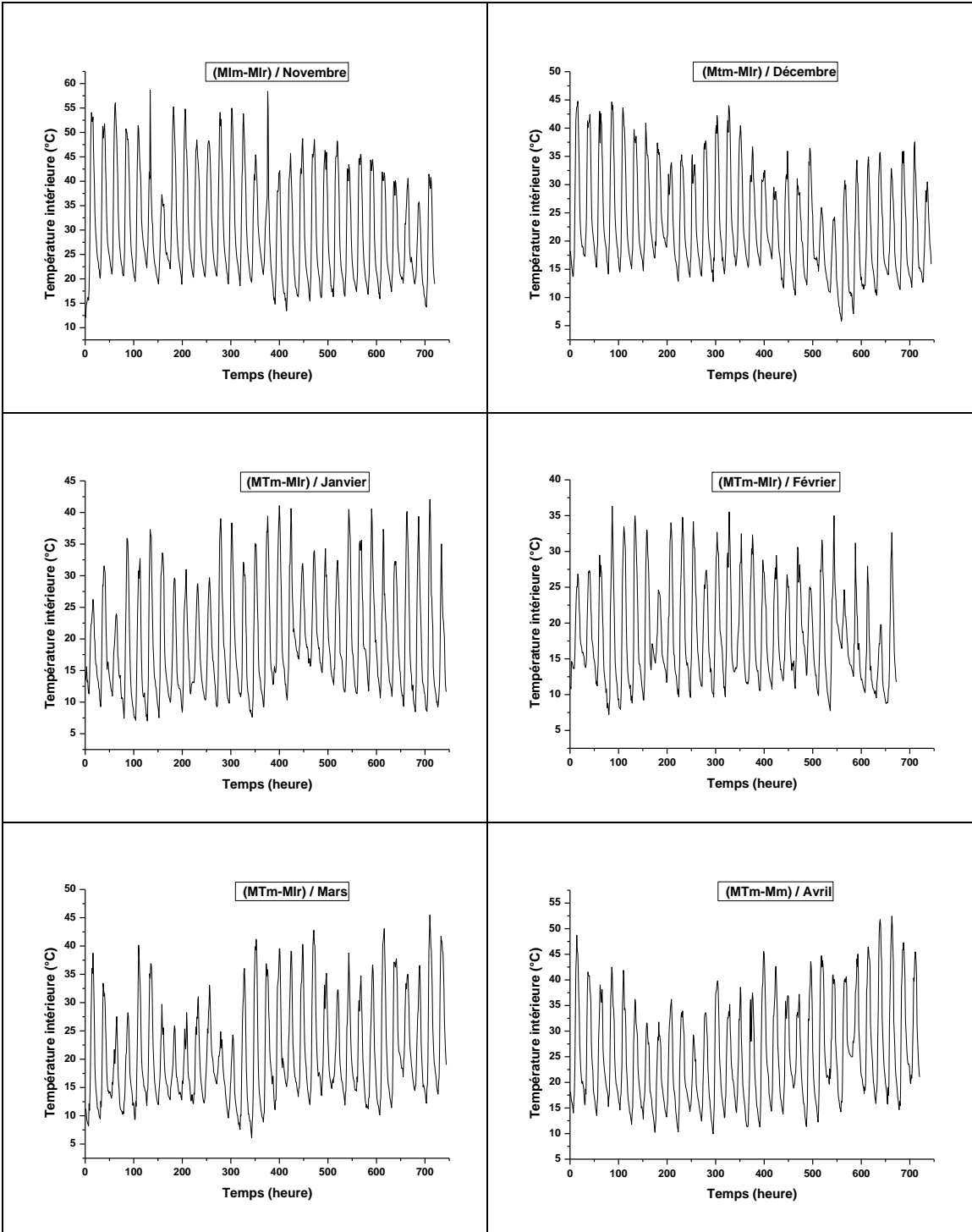
CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe5: Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de massemoyen



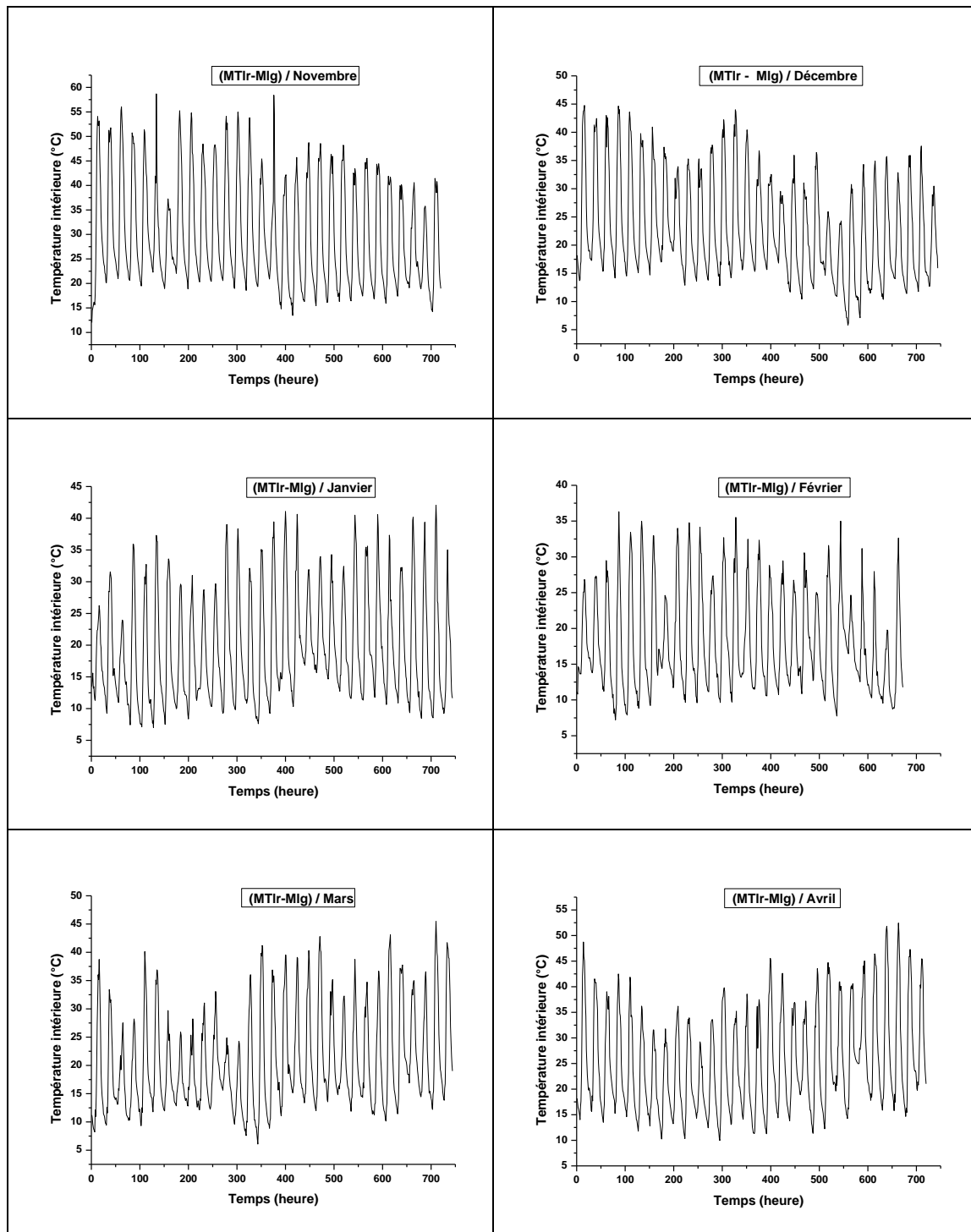
CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe6: Sélection pour un mur Trombe moyen avec mur de masselourd



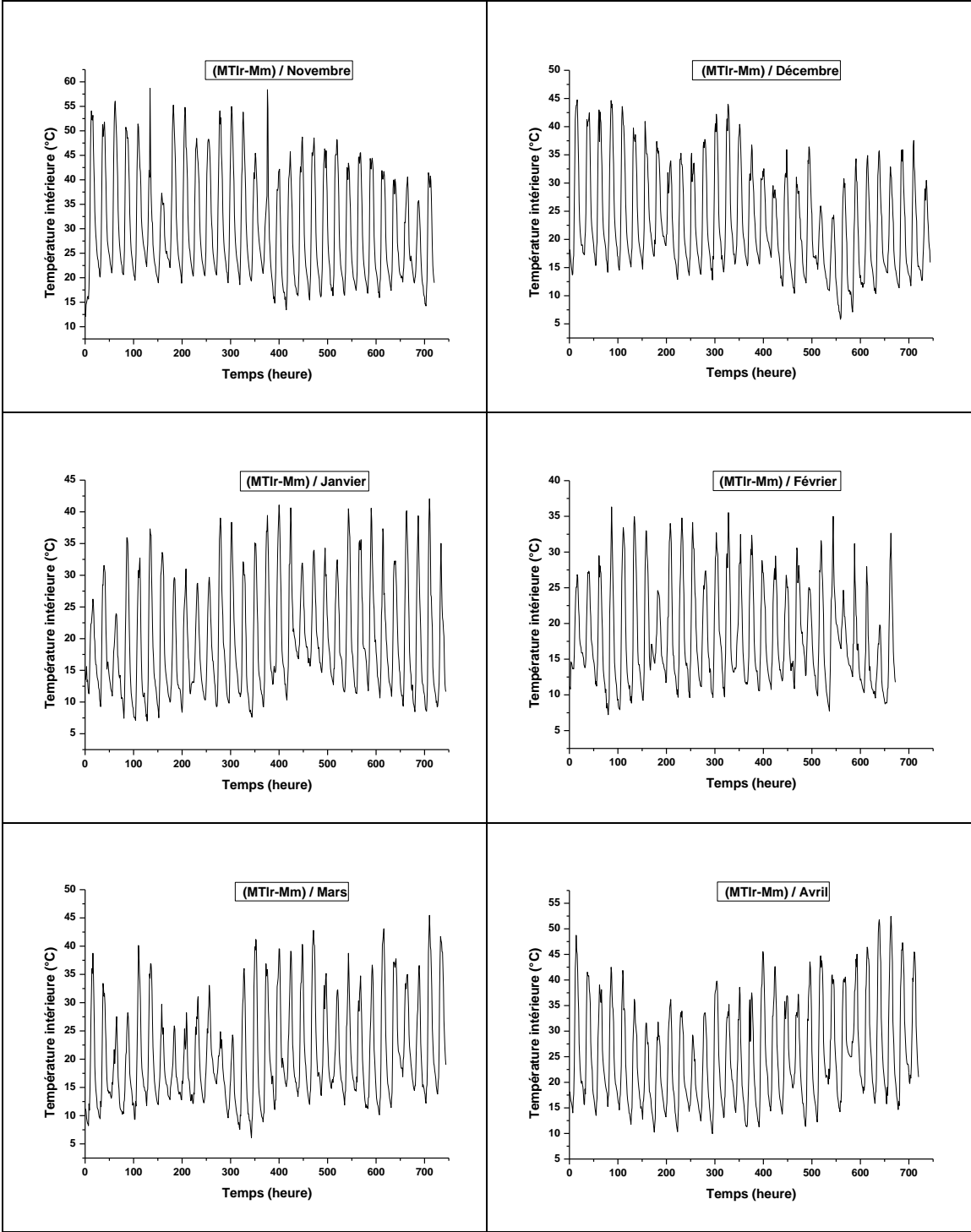
CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe7: Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masselégér



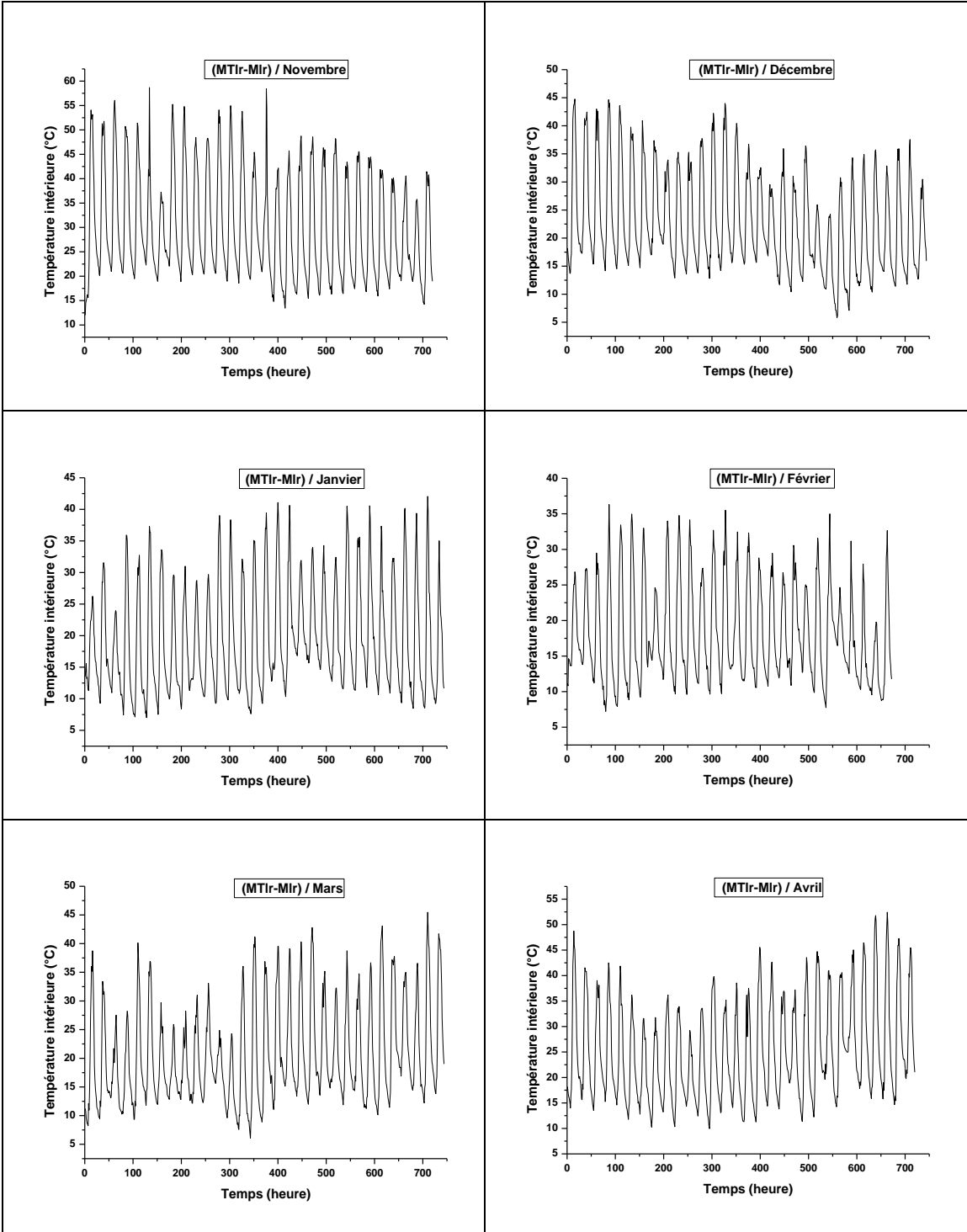
CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe8: Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de massemoyen



CHAPITRE III: Résultats et Discussion

Graphe9: Sélection pour un mur Trombe lourd avec mur de masselourd



Conclusions

CONCLUSIONS

Conclusions:

Une simulation dynamique unidimensionnelle d'un model d'une construction type de piscine équipée d'un mur Trombe est élaborée sous un climat aride, en adoptons une modélisation par la méthode des différences finies et des sélections de différents types de constructions sont élaborée par l'étude numérique.

Les différentes combinaisons n'affectent pas considérablement le niveau de confort, en produisant des dépassements ou des sous-dépassements indésirables, et elle n'influencent pas de manière significative la consommation d'énergie. De ce là:

- les économies d'une combinaison à l'autre sont d'environ de 4% à 7%,
- Un mur Trombe de masse moyenne ou lourde est considéré comme le plus approprié pour un meilleur confort lorsqu'il est combiné avec un mur de masse lourd.
- Le système de chauffage peut être réglé par un contrôleur de température conventionnel PID.

Les résultats obtenus par la simulation indiquent plutôt que la stratégie de implantation de murs Trombe en mode de chauffage apporte une amélioration en confort thermique dans le local pour l'un ou l'autre de ces cas de construction sous des conditions climatiques arides.

Références

- [1] J. Randriamanalina, modélisation de l'effet du mur Trombe sur le confort d'un local, mémoire master énergétique, Université d'Antananarivo, 2009.
- [2] M. Farah al., Etude de l'effet du mur Trombe sur la distribution de l'air et le confort dans l'habitat, mémoire master, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, 2020.
- [3] D. Abbaz, Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un plancher solaire direct (PSD), mémoire master énergies renouvelables, Université Constantine(1), 2013.
- [4] K. Imessadal, 1999, Evaluation des performances d'un Mur Trombe, p195-198
- [5] N. Guerfala, Étude thermo aérodynamique d'un piscine intérieure, mémoire master génie mécanique, Université de Sherbrooke, 2012.
- [6] E. Guemari et al., Etude théorique et expérimentale d'un mur capture type Trombe, mémoire master. Université Echahid Hamma Lakhard EL-oued, 2017.

CONCLUSIONS

- [07]Ito.N.,K.Kumira, A field experiment study on the Convective heat transfer coefficient on exterior surfaces of a building, ASHRAE Trans., Vol 78(1) 184-191, (1972).
- [8]N.S.Sturrock , Localized Boundary-layer Heat Transfer from External Building Surfaces, University of Liverpool, 1971
- [09]A. Green, The influence of operating conditions on the thermal performance of non concentrating, solar collectors. Phd, Thesis, University College Cardiff, 1984.
- [10]G. G. Boileau., J.K.Latta, simplified method, based on heat transfer paths to Ground, ASHRAE1968,
- [11]Raftery, P., Keane, M., Costa, A, Calibrating whole building energy models: detailed case study using hourly measured data, Energy Build. 43 (12), 2011, Pages 3666-3679.
- [12]IEA, International Energy Agency, (1988), Energy Design Principles in Buildings, Design Booklet N° 1.