

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département du Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ENERGETIQUE EN GENIE MECANIQUE
OPTION: Froid, Chauffage et Climatisation**

Intitulé du sujet:

**Etude de l'influence de la lame d'air sur la transmission de chaleur
à travers une paroi à double cloison**

Proposé par : M. R. NEBBALI

Etudié par : M. Amine SEMAH

Promotion 2020-2021

Remerciements

La réalisation de ce travail a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon encadreur, Monsieur NEBBALI, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à remercier spécialement ma mère, mon père et Said pour leur soutien, et leur assistance à mon interminable cursus

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Enfin, je tiens à témoigner toute ma gratitude à Léna pour sa confiance et son soutien inestimable.

Table des matières

Nomenclature	03
Résumé	04
Mots clés	04
1 – Introduction	04
2 – Méthode	05
2.1 – Equations associées	06
2.2 – Domaine de calcul et conditions aux limites	07
2.3 – Maillage	08
3 – Résultats et discussions	08
4 – conclusion	13
Références	14

Nomenclature

Cp capacité calorifique (J/kg.K) ou (J/kg.C)

e épaisseur (cm)

g accélération de la gravité (m/s²)

h coefficients de transfert de chaleur (W/m².K) ou (W/m².C)

R résistance thermique (K/W)

S surface (m²)

T température (K) ou (C)

t temps (s)

U coefficient global de transfert de chaleur (W/m².K)

U vitesse d'écoulement suivant x (m/s)

V vitesse d'écoulement suivant y (m/s)

Nombres adimensionnels

Nu Nombre de Nusselt

Pr Nombre de Prandtl

Ra Nombre de Raleigh

Re Nombre de Reynolds

St Nombre de Stanton

Lettres grecques

μ viscosité cinématique (m² /s)

σ constante de Stephan-Boltzman (W/m².K⁴)

φ densité de flux de chaleur (W/m²)

ϕ flux de chaleur (W)

β coefficient d'expansion thermique (K⁻¹)

ρ masse volumique (kg/m³)

ν viscosité (Pa.s) (kg/m.s)

Etude de l'influence de la lame d'air sur la transmission de chaleur à travers une paroi à double cloison

A. Semah, R. Nebbali

Département du génie mécanique. Faculté du génie de la construction. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Algérie.

Résumé

Ce travail s'intéresse au transfert de chaleur à travers une paroi à double cloison pourvue d'une lame d'air. Afin de comparer les flux de chaleurs à travers différentes épaisseurs de lames d'air. On a considéré trois cas de figure: lame d'air d'épaisseur 2.5, 5 et 10cm. Les simulations sont réalisées avec le code de calcul CFD-Fluent. La température intérieure est maintenue à 25°C (considérée comme température de confort), tandis que la température externe varie de 30 à 55 °C. Les résultats obtenus montrent que l'épaisseur de la lame d'air n'influe pas de façon significative sur l'intensité de flux de chaleur transmis par cette paroi à double cloison. Ainsi, l'utilisation d'une lame d'air de 2.5, 5 ou 10cm permet à la paroi d'assurer le même pouvoir isolant.

Mots clés:

Confort thermique, convection naturelle, flux de chaleur, isolation thermique, lame d'air, mur à double cloisons,

1. Introduction

Les avancées technologiques, qui offrent plus de confort dans le bâtiment, ont largement contribué à l'aggravation du réchauffement climatique. Le secteur du bâtiment représente une part importante de l'énergie consommée dans le monde et constitue le secteur qui émet le plus de gaz à effet de serre. La consommation globale d'énergie dans les bâtiments représente environ 40% de la consommation totale d'énergie, et est responsable d'environ 25% des émissions totales de CO₂(Mahlia and Iqbal 2010).

L'isolation thermique peut réaliser d'importantes économies d'énergie de fonctionnement dans les bâtiments. Ainsi, pour lutter contre le réchauffement climatique et assurer la transition énergétique, il faut rénover les constructions existantes et imposer des normes plus strictes en termes de consommation d'énergie pour les bâtiments neufs.

En raison de la conductivité relativement élevée des matériaux de construction tel que le béton, les codes de construction recommandent d'ajouter des niveaux d'isolations d'épaisseurs variables en fonction de la météo locale.

Outre les matériaux conventionnels utilisés pour l'isolation, tel que le polystyrène expansé, le liège, l'aluminium et les laines minérales ou animales, l'air répond à toutes les exigences d'isolation et de protection de l'environnement.

De nombreuses études se sont intéressées à ce cas de figure (Lorent and Bejan 2002, Moon and Chung 2014, Ouédraogo and Coulibaly 2018, Saleh et al., 2018). En introduisant une épaisseur optimale de différents matériaux isolants combinés avec des lames d'air de 2, 4 et 6cm d'épaisseurs, Mahlia and Iqbal (2010) ont réduit la consommation d'énergie de 65 à 77%, en comparaison avec un mur dépourvu d'isolation et de lame d'air.

On se propose, dans le présent travail, d'étudier l'influence de l'épaisseur de la lame d'air sur l'intensité du flux de chaleur transmis à travers une paroi à double cloison. En négligeant les échanges radiatifs, on considère trois épaisseurs de lame d'air: 2.5, 5 et 10cm dans un mur à double cloison d'épaisseurs 10cm chacune. Le pouvoir isolant de cette paroi est alors étudié au regard des gradients de températures imposés sur ses faces externes.

2. Méthode

2.1. Equations associées

Il s'agit d'évaluer le flux de chaleur à travers un mur à double parois séparées par une lame d'air.

On impose des températures sur les deux faces externes à la paroi, alors que les côtés supérieur et inférieur sont supposés adiabatiques.

L'air contenu dans l'espace confiné obéit à la l'hypothèse de Boussinesq tel que:

$$\rho = \rho_o [1 - \beta(T - T_o)]$$

où:

β : Coefficient d'expansion thermique, égal à $1/T$ pour le cas d'un gaz parfait.

ρ_o : densité de l'air à la température T_o

A travers les parois solides, seule l'équation de l'énergie est résolue. Tandis que pour la lame d'air les équations couplées de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie sont résolues. Aux interfaces solide-air, la continuité des flux de chaleur et de profils de températures sont assurées grâce aux conditions aux limites de types Dirichlet et Neumann prises en compte par le code de calcul CFD.

Ainsi la lame d'air est régie par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, données ci-après

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho C_P \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Pour les parois solides (brique), seule l'équation d'énergie est résolue. Elle se réduit pour le cas d'un régime permanent en absence de source de chaleur à l'équation de Laplace, laquelle s'exprime par:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

La complexité des équations mises en jeu, impose le recours à la résolution numérique. Pour ce faire, on fait appel au code de calcul CFD-Fluent. Celui-ci, basé sur la méthode des volumes finis, discrétise les différentes équations pour obtenir des équations algébriques linéaires.

2.2. Domaine de calcul et conditions aux limites

Le domaine de calcul concerne une paroi à double cloison de 10cm d'épaisseur chacune et une lame d'air d'épaisseurs 2.5, 5 et 10cm.

Les conditions aux limites appliquées sont:

Paroi externe Text (°C)	30	35	40	45	50	55
Paroi interne Tint (°C)	25	25	25	25	25	25
Limites supérieure et inférieure	Adiabatique	Adiabatique	Adiabatique	Adiabatique	Adiabatique	Adiabatique

Tableau 1: Conditions aux limites appliquées au domaine de calcul

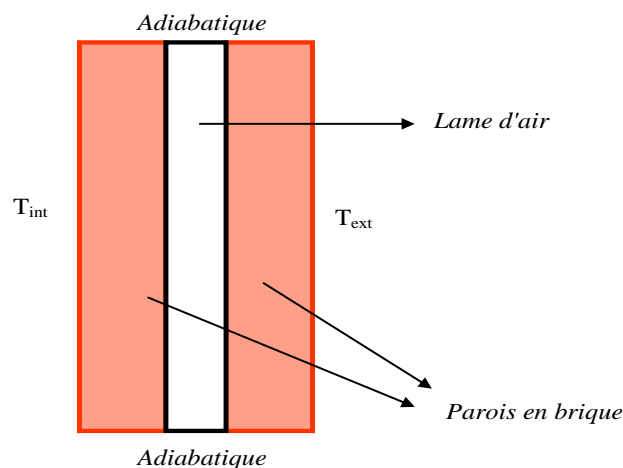


Fig.1 : Illustration de la paroi à double cloison pourvue d'une lame d'air.

2.3. Maillage

On a procédé au maillage structuré du domaine avec des mailles de dimensions 0.5×1mm pour la lame d'air, alors que pour les parois du mur les mailles sont plus grandes (10×1mm) (Fig. 2)

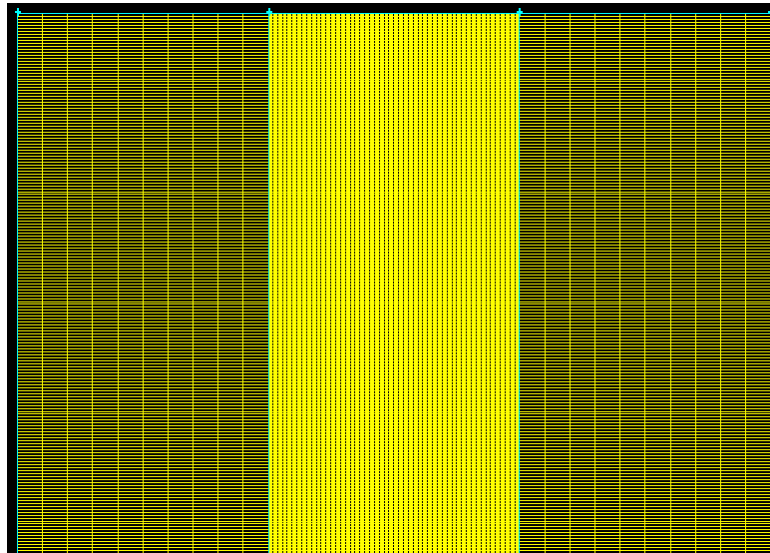


Fig. 2: Illustration du maillage appliqué sur le domaine de calcul

3. Résultats et discussion

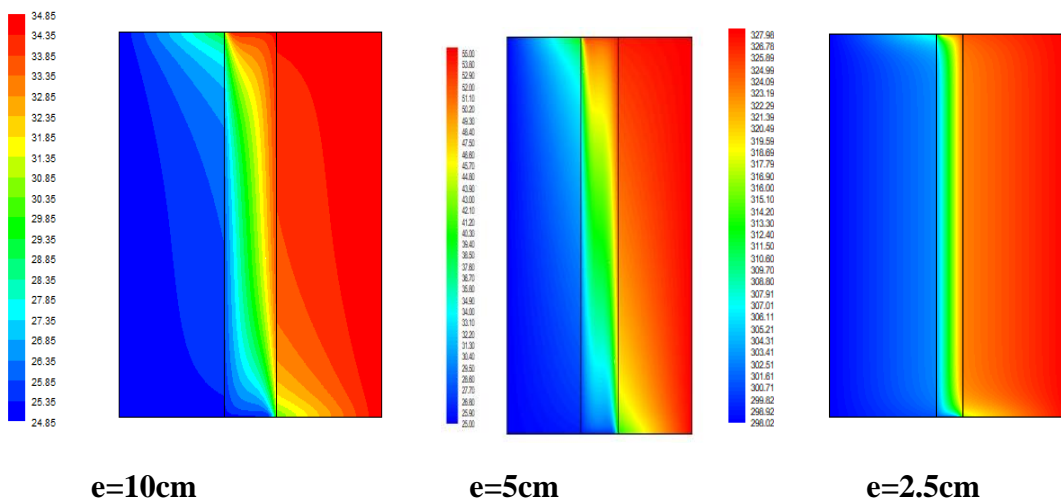


Fig. 3: Distribution du champ de température à travers la paroi pour $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$

On observe à travers la figure (3) que les isothermes sont quasi verticales pour le cas d'une lame d'air d'épaisseur 2.5cm. Ces isothermes se tordent au fur et à mesure que l'épaisseur de la lame d'air augmente. Ce qui confirme que le mouvement d'air à l'intérieur de la lame d'air augmente avec l'épaisseur. En effet, comme le montre les figures (4, 5 et 6), il apparaît clairement que lignes de courant s'intensifient avec l'épaisseur de la lame d'air.

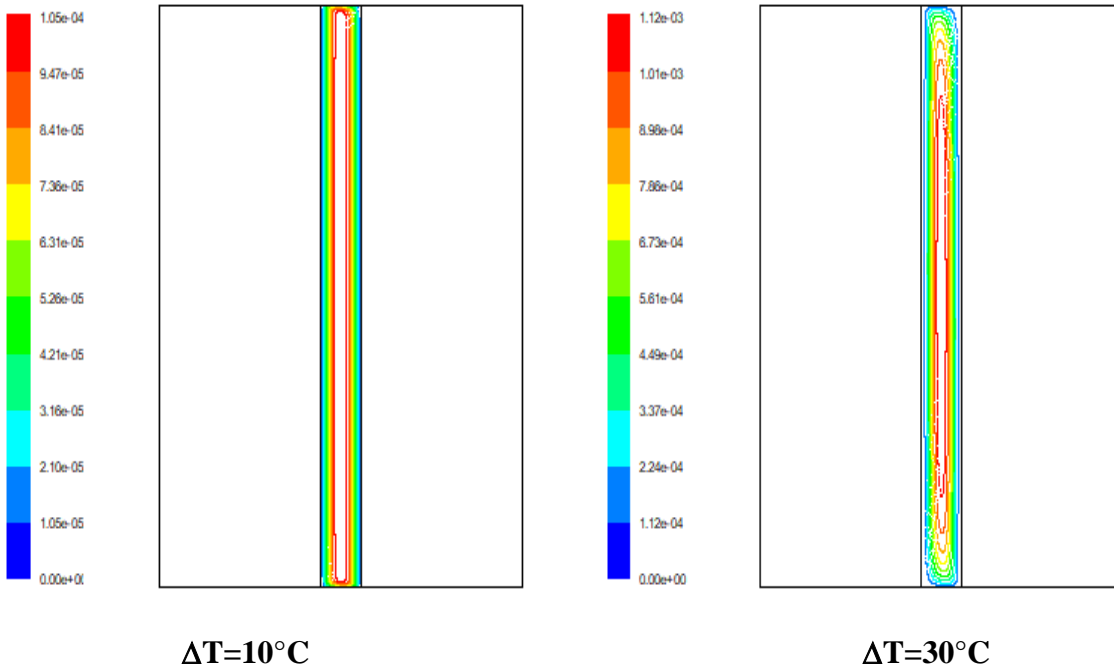


Fig. 4: Lignes de courant dans la lame d'air d'épaisseur 2.5cm

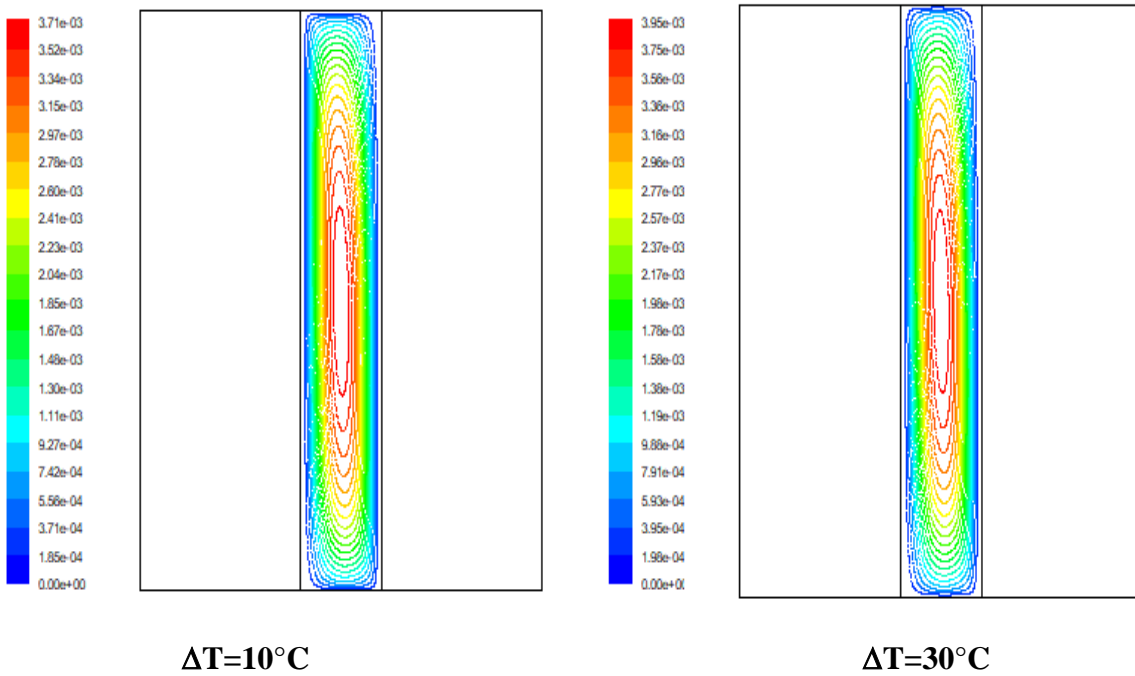


Fig. 5: Lignes de courant dans la lame d'air d'épaisseur 5cm

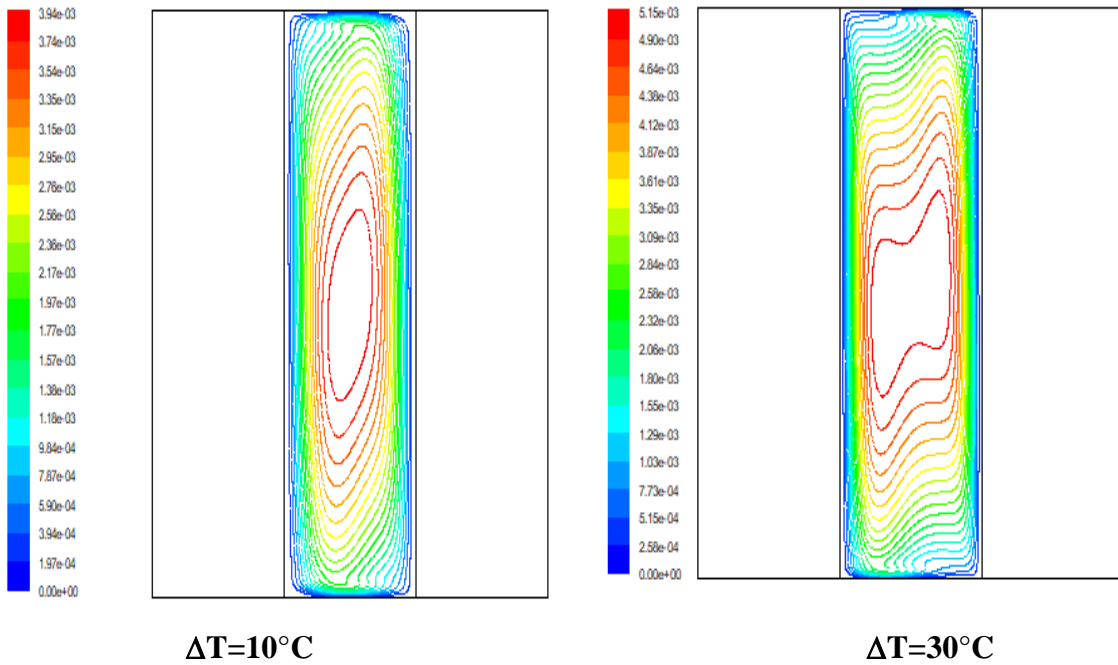


Fig. 6: Lignes de courant dans la lame d'air d'épaisseur 10cm

La figure (7) montre que le nombre de Rayleigh augmente avec l'écart de température. Ce nombre adimensionnel qui permet de quantifier l'intensité de l'échange convectif sous l'effet de la pesanteur, montre que l'augmentation de l'épaisseur de la lame d'air favorise le mouvement convectif de l'air dans cet espace confiné. Pour le cas d'une lame d'air de 10cm Rayleigh atteint des valeurs environ 20 fois supérieures à celles obtenues pour les cas de lames d'air d'épaisseurs 5 et 2.5cm. Cependant, Rayleigh atteint des valeurs stables aux épaisseurs 5 et 2.5cm de la lame d'air.

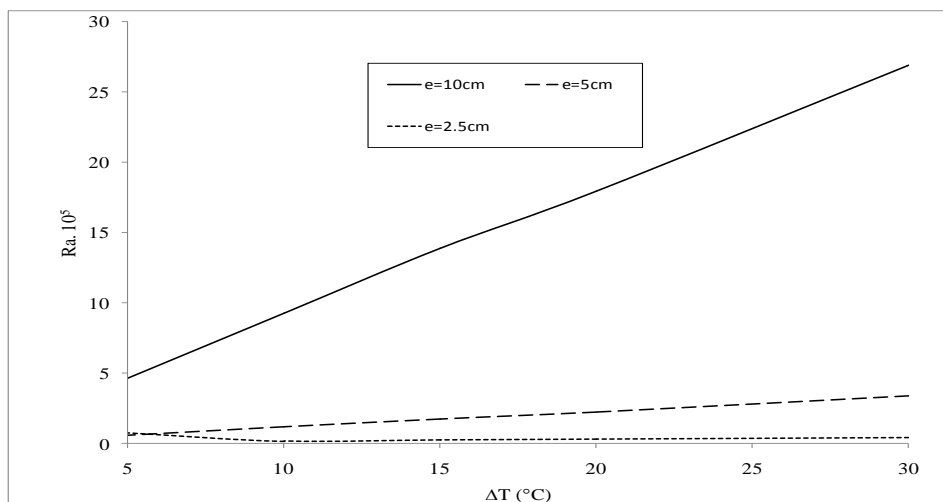


Fig. 7: Evolution du nombre de Rayleigh avec l'écart de température entre les faces interne et externe de la paroi, pour différentes épaisseurs de la lame d'air

Les ordres de grandeurs du nombre de Rayleigh étant relatives à un écoulement laminaire, les coefficients d'échanges convectifs au niveau des interfaces air /parois (Fig. 8) sont seulement d'environ $2\text{W/m}^2\text{K}$ du côté de la face froide et moins de $0.5\text{W/m}^2\text{K}$ du côté de la face chaude avec des écarts insignifiants entre les différentes épaisseurs de lame d'air. La figure (9), montre bien que les résistances thermiques de convections sont quasi identiques pour les trois épaisseurs de lame d'air et évoluent environ, de 2 à $8\text{m}^2\text{M/W}$ pour des écarts de températures variant, respectivement, de 5 à 30°C . Par voie de conséquences, le flux de chaleur augmente quand l'écart de température augmente de 5 à 30°C . En outre, on remarque qu'en deçà de 15°C d'écart de température, l'influence de l'épaisseur de la lame d'air est quasi nulle. Par contre, au delà de 15°C on observe une légère différence de flux entre les trois cas de lame d'air.

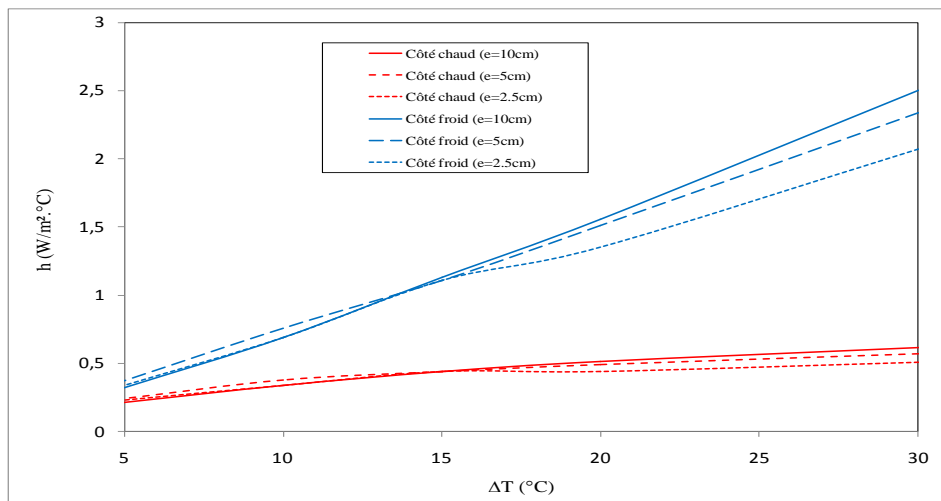


Fig. 8: Evolution du coefficient d'échange convectif air-parois avec l'écart de température entre les faces interne et externe du mur, pour différentes épaisseurs de la lame d'air

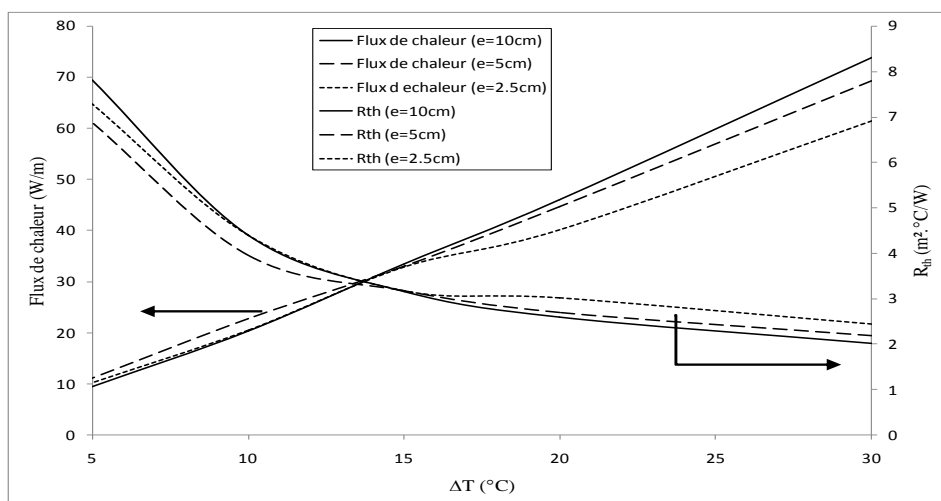


Fig. 9: Evolution de la résistance thermique de convection à travers la lame d'air avec l'écart de température entre les faces interne et externe de la paroi, pour différentes épaisseurs de la lame d'air

Afin de voir si le choix de l'épaisseur de la lame d'air constitue un critère important dans la conception des murs à double cloison, il est nécessaire de comparer les flux transmis à travers cette paroi pourvue d'une lame d'air selon trois configurations. Les figures (10-12) traduisent les flux de chaleur pour différents écarts de températures en i).absence de lame d'air, ii).en supposant la lame d'air à l'état statique et iii).dans le cas réel d'une lame d'air dynamique. Il apparaît que le cas réel d'une lame d'air dynamique engendre, pour une épaisseur de lame d'air de 10cm, des flux de chaleur environ trois fois plus importants que ceux obtenus pour le cas d'une lame d'air statique, alors que pour le cas d'une épaisseur de lame d'air de 5cm il est seulement le double. Pour le cas d'une lame d'air d'épaisseur 2.5cm le flux de chaleur s'apparente à celui d'une diffusion pure. D'autre part, les intensités de flux de chaleur transmis à travers les parois d'épaisseurs de lames d'air de 10, 5 et 2.5cm sont quasi identiques. La figure (13) montre l'évolution de ces flux pour différents écarts de températures et épaisseurs de lames d'air.

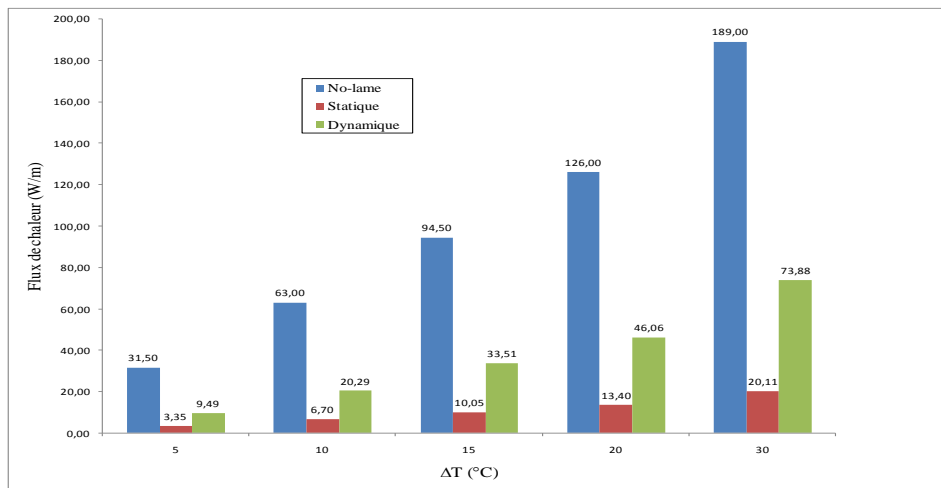


Fig. 10: Comparaison des intensités des flux de chaleur transmis à travers la paroi l'écart de température entre les faces interne et externe de la paroi, selon trois configurations: Absence de la lame d'air - Lame d'air d'épaisseur 10cm à l'état statique - Lame d'air d'épaisseur 10cm en mouvement.

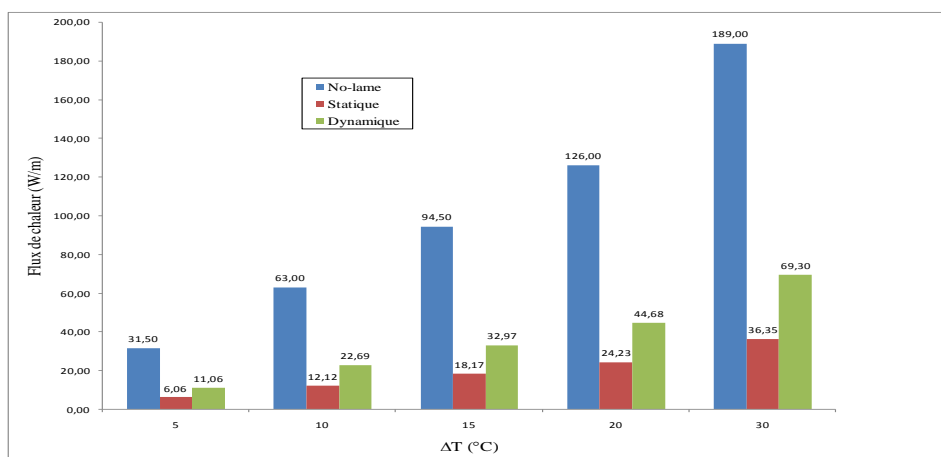


Fig. 11: Comparaison des intensités des flux de chaleur transmis à travers la paroi l'écart de température entre les faces interne et externe de la paroi, selon trois configurations: Absence

de la lame d'air - lame d'air d'épaisseur 5cm à l'état statique - lame d'air d'épaisseur 5cm en mouvement.

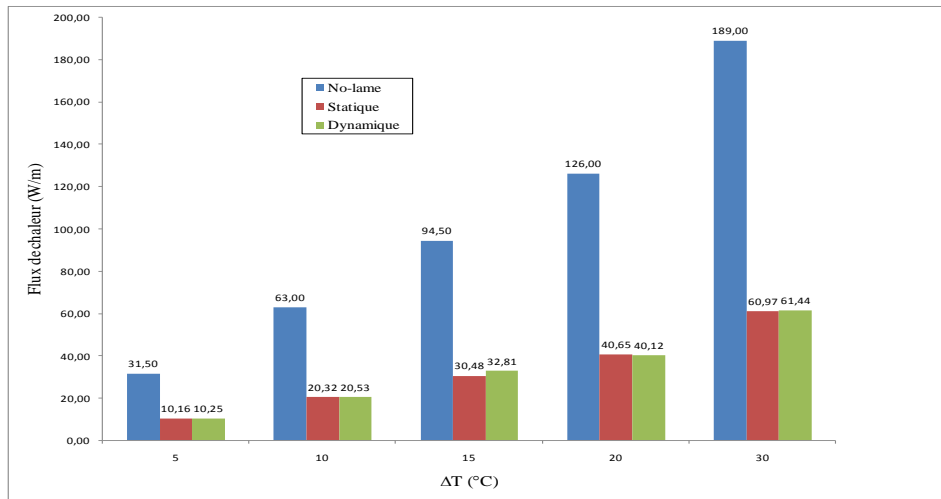


Fig. 12: Comparaison des intensités des flux de chaleur transmis à travers la paroi l'écart de température entre les faces interne et externe de la paroi, selon trois configurations: Absence de la lame d'air - lame d'air d'épaisseur 2.5cm à l'état statique - lame d'air d'épaisseur 2.5cm en mouvement.

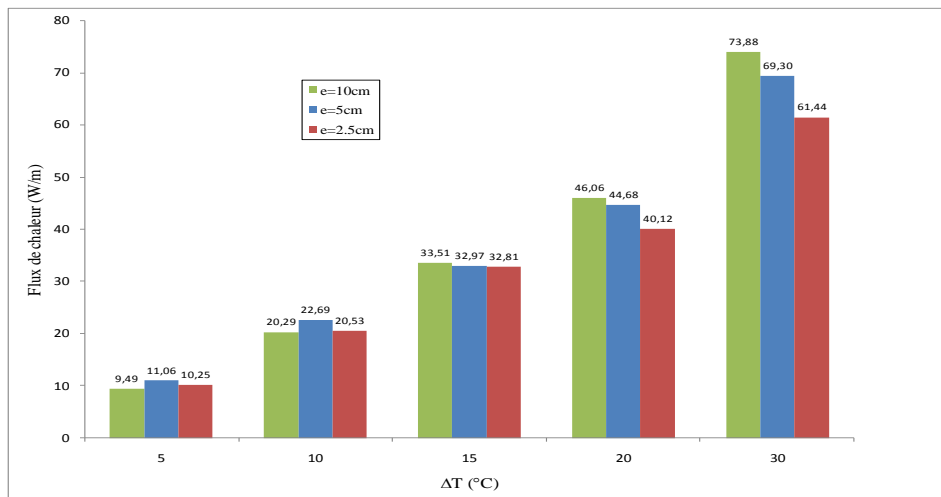


Fig. 13: Comparaison des flux de chaleur transmis par la paroi, pour différents écarts de température et épaisseurs de la lame d'air.

4. Conclusion

Afin d'étudier l'influence de la lame d'air sur la transmission de chaleur à travers une paroi à double cloisons, on a considéré trois cas d'épaisseurs de lame d'air: 2.5, 5 et 10cm. De part la faible conductivité thermique de l'air, il est considéré comme isolant thermique. Cependant, quand cet air est en mouvement, la transmission de chaleur s'intensifie par effet de convection naturelle. Afin de comparer ces deux cas de figure, on a considéré d'une part, le cas de la lame d'air statique pour simuler la transmission de chaleur par diffusion et d'autre part, le cas réel

de mouvement d'air engendré par les forces de flottabilité (convection naturelle). Les résultats obtenus montrent que la présence de la lame d'air réduit effectivement les intensités de flux de chaleur transmis par ces parois à double cloisons. Cependant, ces flux demeurent plus importants que ceux obtenus pour le cas d'une diffusion pure à travers cette lame d'air (lame d'air statique). Par ailleurs, on montre que l'épaisseur de la lame d'air n'influe pratiquement pas sur le flux de chaleur transmis. En effet, pour les épaisseurs de lame d'air de 2.5, 5 et 10cm, le flux de chaleur est quasi identique.

Références

- Lorente S., A. Bejan (2002).. Combined flow and strength geometric optimisation for internal structure in a vertical insulation wall with air cavities and prescribed strength. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Mahlia T.M.I., A. Iqbal. (2010). Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives. *Energy, The international journal*.
- Moon Je-Young, Bum-Jin Chung (2014). Time-dependent Rayleigh–Benard convection: Cell formation and Nusselt number. *Nuclear Engineering and Design*.
- Ouédraogo E., O. Coulibaly (2018). Optimization of the air gap thickness for the insulation of double-walled walls of a building. *Asian Journal of Science and Technology*.
- Saleh Philippe H., Rosa Schiano-Phan , Colin Gleeson (2018). The Rasmaska project: temperature behaviour of three, full scale testcells in hot Mediterranean summer: non-insulated double masonry wall and different insulation locations. *International journal of Energy & Buildings*.