

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

Université Constantine 01
Faculté des Sciences de la Technologie
Département de Génie Climatique

N° d'ordre :.....
Série :

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de magister
Option : Thermique de bâtiment et réfrigération

THEME

**DIFFUSION THERMO-HYDRIQUE
DANS LES MATERIAUX DE
CONSTRUCTION**

PAR
FERGATI FOUAD

Soutenu le : 15/05/2014

Jury d'examen :

Président :

ROUBAH M^{ed} Salah

Professeur

Univ. Constantine 01

Rapporteur :

BELHAMRI Azeddine

Professeur

Univ. Constantine 01

Membres :

MAHRI Zine Labidine

Professeur

Univ. Constantine 01

BACHTARZI Abdelmalik

M.C

Univ. Constantine 01

Remerciements:

Tous mes remerciements à :

Monsieur Azeddine BELHAMRI, qui m'a inspiré le sujet de cette thèse ; J'ai trouvé en lui un maître particulièrement bienveillant qui m'a fait bénéficier de ses conseils et son enseignement toujours utile.

Le président de jury Mr ROUABAH et les membres juré, Mr MAHRI et Mr BACHTARZI qui ont bien voulu évaluer mon travail.

Mes enseignants de la post-graduation, ainsi que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Que ce travail soit un témoignage de ma très sincère reconnaissance et de mon profond respect

Dédicace :

*En témoignage de ma profonde
gratitude, Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents que j'aime profondément, pour leur
affection dont ils m'ont toujours entouré et les
encouragements qu'ils m'ont prodigués.*

A mes chers frères et chères sœurs ;

A ma famille ;

A tous mes enseignants et mes collègues de post- graduation ;

*A tous mes amis : Billel, Abdelwahab, Rabah, Boudjamâa,
Fayçal ... Et à tous ceux que j'aime, et à ceux qui m'aiment,
Je leur dédie cette thèse.*

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. Introduction	3
2. Les milieux poreux	3
2.1 Définition des milieux poreux	3
2.2 Représentation d'un milieu poreux	3
2.3 Classification des matériaux poreux	4
2.3.1 Matériaux non hygroscopiques	5
2.3.2 Matériaux hygroscopiques	5
2.4 Propriétés des milieux poreux	5
2.4.1 La porosité	5
2.4.1.1 Classification de la porosité	6
2.4.2 La perméabilité	6
2.4.2.1 Perméabilité saturée	6
2.4.2.2 Perméabilité effective	6
2.4.2.3 Perméabilité relative	7
2.4.3 Teneur d'humidité et saturation	7
2.4.4 Pression gaz	8
2.4.5 Autres paramètres	8
3. Transfert de masse dans les milieux poreux	9
3.1 La rétention en l'humidité	9
3.2 L'hystérésis de l'adsorption et la désorption	11
3.3 Condensation	12
3.4 La diffusion massique	13
3.5 Les coefficients de diffusion de masse	14
3.5.1 Le coefficient de diffusion apparent de l'humidité	14
3.5.2 Le coefficient de diffusion effectif de l'humidité.....	14
3.6 Imbibition capillaire dans un tube	14
4. Transfert de chaleur dans les milieux poreux	16
4.1 Détermination de la conductivité thermique des milieux poreux	16
4.2 Facteurs influent sur la conductivité thermique des milieux poreux	18

4.2.1	Influence de la température	18
4.2.2	Influence du type des matériaux et les ajouts sur le transfert thermique	19
4.2.3	Influence de la saturation du milieu poreux	21
5.	Couplage des transferts dans les milieux poreux	24
6.	Exemples de travaux	25
7.	Phénomènes de transfert au niveau des surfaces des milieux poreux et conditions aux limites	26
8.	Conclusion	27
CHAPITRE II : MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET LEURS PROPRIETES THERMO PHYSIQUES		
1.	Introduction	28
2.	Les matériaux de construction	28
2.1	Le béton	28
2.2	Caractérisation de la structure poreuse du béton	29
2.3	La brique	29
2.4	Le bois	30
2.5	Les isolants	31
2.6	Le plâtre	31
2.7	Le polystyrène	31
3.	Caractérisation des propriétés physiques des matériaux de construction	32
3.1	Détermination de la conductivité thermique d'un matériau de construction	32
3.2	Techniques de détermination du coefficient de diffusion massique	33
4.	Les parois de construction multicouches	34
4.1	Les contacts dans les parois de construction	34
4.2	Représentation des configurations de contact	35
5.	Conclusion	36
CHAPITRE III : MODELISATION DES TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE DANS LES PAROIS		
1.	Introduction	37
2.	Approches de description des transferts	37
3.	Homogénéisation	37

3.1	Méthodes d'homogénéisation	38
3.2	La notion du volume élémentaire représentatif (VER)	38
4.	Modèles de séchage	38
5.	Modèles de couplage hydro-thermique	39
5.1	Modèles utilisant une paroi simple	40
5.1.1	Modèle d'A. Degiovanni et C. Moyne	40
5.1.2	Modèle d'Abahri et al	41
5.2	Modèles utilisant une paroi multicouche	41
5.2.1	Modèle de N. Mendes et P.C Philippi	41
5.2.2	Modèle de Qin et al	43
6.	Modèle de transfert proposé	44
6.1	Critères du choix de notre modèle	44
6.2	Hypothèses du modèle	44
6.3	Domaine de validité de notre modèle	45
6.4	Equation de transfert massique	45
6.5	Equation de transfert thermique	46
6.6	Couplage des équations de transfert thermique et massique	46
6.7	Concept de la conductivité thermique effective	47
6.8	Conditions aux limites	47
6.9	Transfert de chaleur entre la paroi et l'ambiance	49
6.10	Transfert de masse entre la paroi et l'ambiance	49
6.11	Calcul de la masse volumique de la vapeur d'eau	50
7.	Conclusion	51
CHAPITRE IV : RESOLUTION NUMERIQUE DES EQUATIONS DE TRANSFERT		
1.	Introduction	52
2.	Résolution numérique	52
2.1	Méthode des volumes finis	52
2.1.1	Principe de la méthode des volumes finis	53
2.1.2	Les avantages de la méthode des volumes finis	53
2.1.3	Maillage du système	53
2.1.4	Les règles de base	54

2.1.5	Linéarisation du terme source	55
2.1.6	Notion du volume de contrôle	55
2.2	Discretisation des équations de transferts de chaleur	55
2.3	Algorithme TDMA pour couplage des équations de transfert	57
2.4	choix du pas dans le temps et la longueur	59
2.5	Traitement des conditions au surface de contact de deux couches	59
2.5.1	Discretisation des équations au niveau des extrémités	59
2.6	Discretisation des équations de transferts de masse	61
2.7	Discretisation des équations de transferts de masse et de chaleur pour une paroi composée de plusieurs couches	61
2.8	Maillage du système au niveau des contacts	61
2.9	Organigramme pour le cas des conditions aux limites constantes	63
2.10	Organigramme pour le cas des conditions aux limites variables	65
3.	Conclusion	66
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION		
1.	Introduction	67
2.	Les parois utilisées pour notre modèle	67
3.	Conditions initiales	69
4.	Simulations	69
4.1	Simulation pour des conditions aux limites constantes	69
4.1.1	Evolutions des propriétés des parois	70
4.1.1.1	Evolution de la distribution de la diffusivité massique de la paroi simple en béton	70
4.1.1.2	Distribution de la conductivité thermique de la paroi simple en béton	70
4.1.2	Evolution de la distribution de la diffusivité massique et la conductivité thermique de la paroi multicouche	71
4.1.3	Etude de la saturation des parois	73
4.1.3.1	Evolution de la saturation en eau des parois au cours du temps	73
	• Comparaison avec d'autres travaux	74
4.1.3.2	Evolution de la saturation à la surface extérieure des parois	76
4.1.3.3	Evolution de la saturation à la surface intérieure de la paroi	76
4.1.3.4	Evolution de la saturation au centre de la paroi	77

• Comparaison avec d'autres travaux	77
4.1.4 Distribution de la température de la paroi	79
• Comparaison avec d'autres travaux	82
4.1.4.1 Evolution de la température de la surface extérieure de la paroi	84
4.1.4.2 Evolution de la température de la surface intérieure de la paroi	85
4.1.4.3 Evolution des températures aux surfaces de la paroi	87
• Comparaison avec d'autres résultats	88
4.1.5 Evolution de la densité du flux thermique à la surface extérieur de la paroi	89
4.1.6 Evolution de la densité du flux thermique à la surface intérieur de la paroi	92
4.2 Simulation pour des conditions aux limites périodiques	94
4.2.1 distribution de la température de la paroi au cours du temps	94
4.2.1.1 Evolution des températures des surfaces extérieures et intérieures des parois	98
4.2.1.2 représentation des températures de l'air extérieur et quelques points de la paroi multicouche	100
4.2.2 Evolution des densités des flux thermiques aux surfaces des parois	101
• Comparaison avec d'autres travaux	102
5. Conclusion	103
Conclusion générale	105

LISTE DES FIGURES

1. Fig. (1.01) Structure bidimensionnelle d'un milieu poreux
2. Fig. (1.02) Représentation d'un milieu poreux.
3. Fig. (1.03) : Schéma du diagramme de la fonction de la rétention en eau d'un matériau de construction hygroscopique actif capillaire
4. Fig. (1.04) les isothermes types d'adsorption et désorption d'un isolant en fibres de verre.
5. Fig. (1.05) Paroi plane à couches parallèles représentée à l'échelle des résistances à la diffusion de vapeur d'eau, pour l'établissement de la zone de condensation par procédé graphique de Glaser.
6. Fig. (1.06) : Imbibition capillaire dans un tube
7. Fig. (1.07) : a) Modèle parallèle, b) Modèle en série, c) Modèle mixte
8. Fig. (1.08) : conductivité thermique du plâtre en fonction de température
9. Fig. (1.09) Variation de la conductivité thermique effective avec le taux de porosité calculée suivant différents modèles analytiques.
10. Fig. (1.10) Conductivité thermique en fonction de la teneur en bois : comparaison des résultats expérimentaux aux résultats obtenus par le modèle auto-cohérent
11. Fig. (1.11) conductivité thermique apparente du béton cellulaire en fonction de la teneur en eau mesuré à sept temps
12. Fig. (1.12) Relation diffusivité hydrique-teneur en eau du béton cellulaire pour deux températures
13. Fig.(1.13) Variation du taux de la conductivité thermique avec la variation de la teneur en eau d'un béton renforcé en copeaux d'acier
14. Fig. (2.01) : coefficient de diffusivité de l'humidité D , Brique d'argile
15. Fig. (2.02) : principe de calcul de relation $R(P_c)$
16. Fig. (2.03). Modèle de la paroi simple en béton
17. Fig. (2.04) Modèle de la paroi multicouche
18. Fig. (04.01) maillage 1D du système
19. Fig. (04.02) Volume de contrôle
20. Fig. (5.01-s) : Evolution de la diffusivité de la paroi simple en béton
21. Fig. (5.02-s) : Evolution de la conductivité thermique de la paroi simple en béton
22. Fig. (5.04-c) : Distribution de conductivité thermique dans la paroi multicouche
23. Fig. (5.05-s) : Evolution de la saturation de la paroi simple en béton
24. Fig. (5.06-c) : Evolution de la distribution de la saturation de la paroi multicouche
25. Fig. (05.07) Profil de concentration en humidité
26. Fig.(5.08) profile de la teneur en humidité à partir d'une humidité initiale 80.8%
27. Fig. (5.09) comparaison des résultats de distribution du potentiel d'humidité analytiques et numérique
28. Fig. (5.10-s) : Evolution de la saturation à la surface extérieure de la paroi en béton ($X=30\text{cm}$)
29. Fig. (5.11-s) : Evolution de la saturation à la surface intérieure de la paroi simple en béton ($X=0\text{ cm}$)
30. Fig. (5.12-s) : Evolution de la saturation au centre de la paroi en béton ($X=15\text{cm}$)
31. Fig. (5.13) Séchage d'une plaque en kaolin utilisant $D=f(S)$
32. Fig. (5.14-a-s) : Evolution de la température de la paroi simple en béton
33. Fig. (5.15-a-c) : Evolution de la température de la paroi multicouche

34. Fig. (5.16-b-s) : Evolution de la température de la paroi simple en béton (cas -b-refroidissement de la paroi)
35. Fig. (5.17-b-c) : Evolution de la distribution de la température de la paroi multicouche
36. Fig(5.18) Distribution de la température dans un isolant poreux
37. Fig. (5.19) Evolution du profile de température dans un milieu poreux (béton cellulaire).
38. Fig. (5.20) comparaison entre les profils de distribution de température analytiques et numériques.
39. Fig. (5.21-a-s) : Evolution de la température de surface extérieure (X=30 cm) de la paroi simple en béton
40. Fig. (5.22-b-c) : Evolution de la température de surface extérieure de la paroi multicouche
41. Fig. (5.23-a-s) : Evolution de la température de la surface intérieure (X = 0 cm) de la paroi simple en béton
42. Fig. (5.24-a-c) : Evolution de la température de la surface intérieure (X = 0 cm) de la paroi multicouche
43. Fig. (5.25-b-c) : Evolution de la température de surface intérieure de la paroi multicouche.
44. Fig. (5.26-s) : comparaison des évolutions des températures aux surfaces de la paroi simple en béton (X = 0 cm ; X= 30cm).
45. Fig. (5.27) Evolution de la température d'un nœud n=3 d'un système en milieu poreux par une simulation utilisant les éléments finis.
46. Fig. (5.28) Comparaison entre l'évolution de la température au centre d'une paroi (à 25mm), une obtenue par une résolution analytique et l'autre par la méthode des différences finies.
47. Fig. (5.29-s) (A), (B), (C) : Evolution de la densité de flux thermique à la surface extérieur (X= 30cm) de la paroi simple en béton.
48. Fig. (5.30-c) : Evolution de la densité de flux thermique à la surface extérieure (X = 30 cm) de la paroi multicouche.
49. Fig. (5.31) (A), (B) : Evolution de la densité de flux thermique à la surface intérieure (X= 0 cm) de la paroi simple en béton.
50. Fig. (5.32) : Comparaison des évolutions des densités des flux thermiques aux surfaces de la paroi simple en béton (X = 0 cm ; X= 30cm).
51. Fig. (5.36) (A), (B), (C) Distribution de la température de la paroi simple (Conditions aux limites variables)
52. Fig. (5.34) (A), (B), (C) : Evolution de la température de la paroi composée (Conditions aux limites variables ; $40 \leq t \leq 50$ heures)
53. Fig. (5.35 s) : Evolution de la température de surface extérieur de la paroi simple en béton (conditions aux limites périodiques)
54. Fig. (5.36 s) : Evolution de la température de surface intérieure de la paroi simple en béton (conditions aux limites variables)
55. Fig. (5.37 s) : Comparaison de l'évolution des températures des surfaces d'extrémités de la paroi simple en béton (conditions aux limites variables)
56. Fig. (5.38 c) : Comparaison de l'évolution des températures de la paroi multicouche
57. Fig. (5.39 s) : Evolution des densités des flux thermiques aux surfaces de la paroi simple en béton (conditions aux limites périodiques)
58. Fig. (5.40 c) : Evolution des densités des flux thermiques aux surfaces de la paroi multicouche (X=30cm)
59. Fig. (5.41 c) : Evolution de la densité de flux thermique à la surface intérieur de la paroi multicouche (X=0 cm)

60. Fig. (5.42) Evolution de la température de la surface intérieure d'une paroi en utilisant des conditions aux limites extérieures et intérieures sinusoïdales.
61. Fig. (5.43) comparaison de température de surface d'un échantillon en brique entre deux modèles.
62. Fig. (5.44): Profil des températures dans un mur des plusieurs points par un modèle pour un jour type d'été en Juillet dans Yerevan, Armenia, les distances sont mesurées de la surface extérieure ($x=0$).

Nomenclature :

a : Diffusivité thermique (m^2/s) ;

C_p : Chaleur spécifique ($\text{J}/\text{Kg K}$) ;

C_m : Masse spécifique ($\text{Kg } ^\circ\text{M}/\text{Kg}$) ;

D : Diffusivité massique (m^2/s) ;

D_{va} : Coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air (m/s) ;

D_T : Coefficient de diffusion thermique due au gradient thermique (m/s) ;

e : Epaisseur (m) ;

F_v : Fraction volumique ;

h : Coefficient de transfert thermique par convection ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$) ;

h_m : Coefficient de transfert de masse par convection ($\text{Kg}/\text{s m}^2$) ;

L : Chaleur latente d'évaporation (J/Kg) ;

l : Dimension (m) ;

M : Masse molaire (Kg/mole) ;

m : Potentiel de l'humidité ;

P : Pression (Pa) ;

P_c : Pression capillaire (Pa) ;

q : Densité du flux thermique (W/m^2) ;

q_m : Densité du flux massique ($\text{Kg}/\text{s m}^2$) ;

S : Saturation ;

S_c : Terme constant de la source de chaleur (W/m^3) ;

S_p : Terme pente de la source de chaleur (W/m^3) ;

Sm_c : Terme constant de la source de masse ($\text{Kg}/\text{s m}^3$) ;

Sm_p : Terme pente de la source de masse ($\text{Kg}/\text{s m}^3$) ;

t : Temps (s) ;

T : Température (K) ;

v : Teneur en vapeur d'eau (Kg/m^3) ;

w : Teneur en eau (Kg/Kg) ;

x : Dimension sur l'axe Ox (m) ;

X : Fraction massique (Kg/Kg) ;

Re : Nombre de Reynolds ;

Nu : Nombre de Nusselt ;

Pr : nombre de Prandtl ;

Sc : Nombre de Schmidt ;

Sh : Nombre de Sherwood ;

Alphabet latin :

λ : Conductivité thermique (W/mK) ;

ρ : masse volumique (kg/m³) ;

φ : Humidité relative ;

ε : Porosité ou fraction volumique ;

κ : Perméabilité ;

ν : Viscosité cinématique (m²/s) ;

μ : Viscosité dynamique (Kg/m s) ;

δ : Coefficient équivalent total de diffusion de l'humidité ;

δ_v : Coefficient de flux de vapeur d'eau (m²/s) ;

δ_l : Coefficient de flux de l'eau liquide ;

ξ : Taux entre D_T et δ ;

γ : Chaleur d'adsorption ou de désorption ;

Indice :

a : air ;

cr : critique ;

e : eau ;

eff : effective ;

ext : extérieur ;

int : intérieur ;

imp : imposé ;

ini : initiale ;

g : phase gazeuse ;

l : phase liquide ;

m : moyen ;

o : anhydre ;

r : relative ;

s : phase solide ;

v : phase vapeur.

Constants :

R : = 8.32 constante des gaz parfait (J/mole K).

Introduction générale :

La consommation énergétique des bâtiments, est un enjeu d'une grande importance économique. De nombreux travaux de recherche ont été consacrés à ce sujet. Ils se sont intéressés aux matériaux de construction, aux systèmes énergétiques et à leur exploitation. L'étude des performances des matériaux de construction implique des connaissances approfondies de la science des phénomènes et des processus physiques, qui s'y déroulent.

Les majeures parties composant l'enveloppe des bâtiments, sont des parois opaques. Elles même, peuvent être composées de plusieurs couches de matériaux de construction, tel que le béton et ses dérivés, les matériaux en terre cuite, les céramiques, le bois, les métaux, les matériaux d'étanchéités... Elles sont le siège de transfert de chaleur et d'humidité, qu'il faut identifier. Leur étude est d'une grande importance pour le confort intérieure et la durabilité des ouvrages et leur comportement influe sur la consommation énergétique globale des bâtiments.

La plupart de ces matériaux sont des matériaux poreux, constitués de pores interconnectés et qui permettent la fixation de l'humidité. Leurs propriétés thermo-physiques se trouvent alors, aussi modifiées. La fixation et la migration de l'humidité sont des phénomènes qui doivent être pris en charge, lors de l'étude des transferts thermiques dans les enveloppes des bâtiments.

L'objectif de notre travail est l'étude du couplage de l'ensemble de ces phénomènes à l'aide d'un modèle instationnaire de couplage de l'équation de la chaleur avec celle-ci de la diffusion massique, en tenant compte des réalités physiques des ambiances pour des parois qui se composent d'une seule couche (un seul matériau) et de plusieurs couches.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres :

- Le premier chapitre englobe une étude bibliographique et l'ensemble des concepts de base, les caractéristiques des milieux poreux et les mécanismes de migration de la masse et transfert de chaleur.
- Le deuxième chapitre concerne l'analyse des parois et leurs types qui peuvent composer l'enveloppe d'un bâtiment, ainsi que l'obtention de leurs propriétés hydro-thermiques, et les techniques de détermination expérimentale des coefficients de transfert.
- Le troisième chapitre s'intéresse à la modélisation et modèles de transfert couplé dans deux types de parois en se basant sur des hypothèses et des modèles de couplage, obtenus des lois fondamentaux de transfert de chaleur (la loi de *Fourier*) et de la diffusion de la vapeur d'eau (la loi de *Fick*) dans les milieux poreux, ainsi que sur

l'utilisation des conditions au limites du transfert thermique par convection entre la paroi et les ambiances (loi de *Newton*) et des flux massique imposés.

- Le quatrième chapitre présente la résolution numérique des équations différentielles des transferts, se basant sur la discrétisation par la méthode des volumes finis et en utilisant l'élimination Gaussienne standard. Deux algorithmes suivant la méthode *TDMA*, l'un pour une paroi simple et l'autre pour une paroi multicouches, sont alors, écrits. Des codes de calculs sont obtenus pour les simulations numériques.
- Le cinquième chapitre s'étale sur les résultats obtenus par des simulations adaptées au modèle de calcul et leurs discussions. La validation des résultats est faite par la comparaison avec des résultats obtenus, à la base de d'autres modèles de calcul et des résultats expérimentaux publiés dans des revues scientifiques.
- Enfin, on présentera une conclusion à la fin du mémoire, où nous reviendrons sur nos principaux résultats et nous développerons les perspectives de ce travail.



**CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
ET CONCEPTS DE BASE**

1. Introduction :

Les matériaux de construction sont des milieux poreux. Le comportement de leurs propriétés physiques, dépend de leur état hydro-thermique. L'étude des phénomènes couplés thermique et massique concernant l'enveloppe des bâtiments, nécessite des connaissances approfondies des matériaux, utilisés pour la construction. Beaucoup de chercheurs se sont alors, intéressés à ce sujet.

2. Les milieux poreux :

2.1 Définition des milieux poreux :

Un milieu poreux est un matériau poly-phasique. Il se compose d'une matrice solide contenant des vides (pores) qui peuvent communiquer entre eux en formant un réseau compliqué. Les pores peuvent contenir une ou plusieurs phases fluides susceptibles de s'écouler et éventuellement d'échanger entre elles et avec le solide, de la matière et de l'énergie.

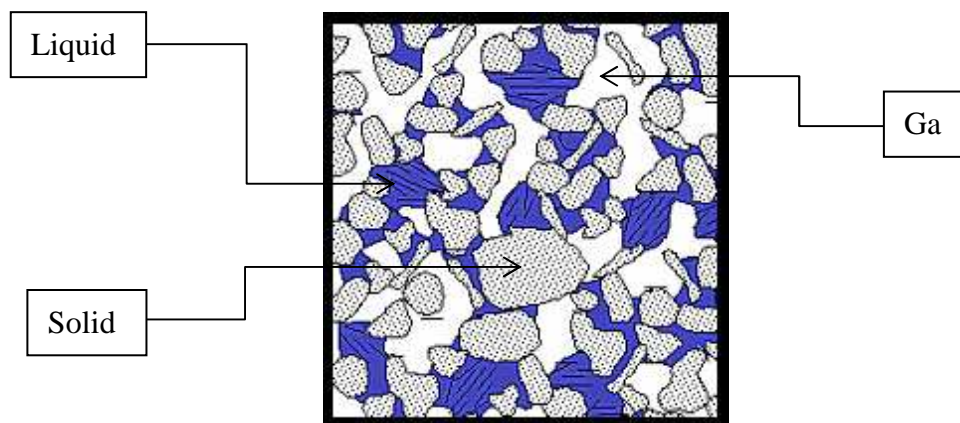


Fig. (1.01) Structure bidimensionnelle d'un milieu poreux

2.2 Représentation d'un milieu poreux :

C.L.D Huang en 1979, a proposé une représentation d'un milieu par les fractions des volumes de leurs composants, solide, liquide, vapeur et air.

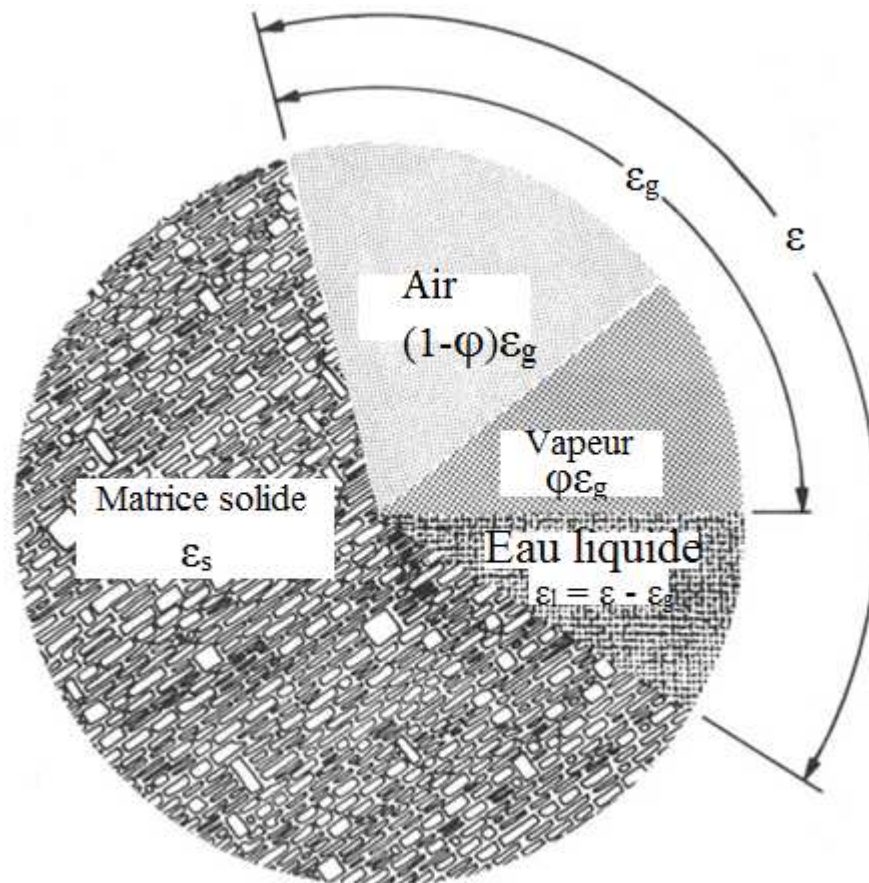


Fig. (1.02) Représentation d'un milieu poreux [1]

2.3 Classification des matériaux poreux :

2.3.1 Matériaux non hygroscopiques :

Ce sont des matériaux qui théoriquement, ne sont pas susceptibles de réagir avec l'environnement et de capter de l'humidité. Pour ces matériaux, il existe deux concepts fondamentaux de transfert d'eau ;

- l'écoulement d'eau capillaire au sein du matériau ;
- l'écoulement de l'eau funiculaire au sein du matériau et l'eau pendulaire reste autour des pores, Cette eau ne s'écoule pas et elle reste à sa position.

En plus de ces deux écoulements, il y a un troisième qui est l'écoulement d'eau osmotique qui s'effectue aux fines particules du matériau grâce à une pression osmotique.

2.3.2 Matériaux hygroscopiques :

L'eau peut être captée à leur surface et se trouve dans les plus fins capillaires de diamètre de 10 à 10² Å ainsi qu'à la surface du solide par adsorption.

On peut dire qu'un matériau est « hygroscopique », s'il peut fixer une quantité mesurable d'humidité de l'air environnant. Le comportement de ce type de matériau peut en partie être caractérisé par sa courbe isotherme de sorption. L'hygroscopicité est plus marquée pour les matériaux présentant des pores très fins (< 100 nm).

2.4 Propriétés des milieux poreux :

2.4.1 La porosité :

Le paramètre principal décrivant un milieu poreux est la porosité, elle caractérise l'importance des vides qu'il contient. La porosité est définie par :

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{pore}}}{V_{\text{total}}} \quad (1.01)$$

Qui varie donc entre 0 (solide plein) et 1 (volume complètement vide). Ce paramètre de porosité est complémentaire de la fraction volumique de solide ε_s telle que :

$$\varepsilon + \varepsilon_s = 1 \quad (1.02)$$

Les pores forment des réseaux de vides plus ou moins complexes et il est évident que tous n'agissent pas de la même manière sur les phénomènes de transport qui peuvent intervenir à l'intérieur du matériau de construction, du fait de leur constitution. Généralement, on distingue trois types de pores :

- les pores interconnectés: ils forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport à travers le matériau,
- les pores aveugles : ils sont interconnectés d'un seul côté et peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ils ne participent pas au transport de matière,
- les pores isolés: ils ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

2.4.1.1 Classification de la porosité :

Selon l'IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), la classification des pores en fonction de leur taille est la suivante :

Diamètre des pores	Classe
<2 nm	Microporosité
De 2 à 50 nm	Mésoporosité
>50 nm	Macroporosité

Tableau (1.01) : Classification de la porosité selon l'IUPAC [2]

Dans le cas du béton, la proportion volumique de pores isolés est négligeable et ε peut être considérée comme égale à la porosité totale.

2.4.2 La perméabilité

Un matériau perméable est un matériau capable à laisser un fluide s'écouler à travers lui sous l'effet d'une telle tension, comme la pression ou de concentration. Dans la littérature, on distingue trois formes de perméabilité : La perméabilité saturée, effective et relative [3].

2.4.2.1 Perméabilité saturée :

La perméabilité saturée est définie théoriquement pour l'écoulement monophasique du fluide dans les milieux poreux sous l'effet d'un gradient de pression.

La perméabilité au gaz de matériaux cimentaires secs est appelée la perméabilité saturée au gaz, La perméabilité à l'eau de matériaux saturés en eau est appelée la perméabilité saturée.

2.4.2.2 Perméabilité effective :

Les matériaux cimentaires sont souvent partiellement saturés en eau: des pores sont occupés par l'eau et les autres sont occupés par l'air.

Lorsqu'on applique un gradient de pression de gaz sur un matériau partiellement saturé en

eau, le gaz s'écoule par les pores remplis par l'air. Cela donne une perméabilité au gaz plus faible que la perméabilité saturé en gaz car des passages de gaz par les pores remplis d'eau sont empêchés.

La perméabilité effective au gaz diminue lorsque la saturation en eau augmente, car l'augmentation de saturation en eau est liée à la diminution de passages de gaz.

2.4.2.3 Perméabilité relative :

La perméabilité relative est le taux de la perméabilité effective sur la perméabilité saturée.

- La perméabilité relative au gaz :

$$K_{g,r} = \frac{K_{g,e}}{K_{s,g}} \quad (1.03)$$

- La perméabilité relative à l'eau :

$$K_{e,r} = \frac{K_{e,e}}{K_{s,e}} \quad (1.04)$$

2.4.3 Teneur d'humidité et saturation

La saturation est le volume de fraction des vides remplie de liquide :

$$S = \frac{V_e}{V_{\text{pore}}} \quad (1.05)$$

La saturation est sans dimension et elle est comprise entre 0 (quand le milieu est complètement sec) et 1 (quand le milieu est complètement saturé).

La teneur d'humidité est le rapport de la masse totale de l'eau et la masse du solide sec.

$$w = \frac{M_e}{M_s} \quad \frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg de solide sec}} \quad (1.06)$$

La relation entre la teneur d'humidité et la saturation est :

$$w = \frac{\varepsilon \rho_e}{(1-\varepsilon) \rho_s} \quad (1.07)$$

Où ρ_e et ρ_s sont la densité d'eau et la densité du solide.

2.4.4 Pression de gaz :

Dans un mélange de gaz parfaits, la pression totale p est la somme des pressions partielles des constituants du mélange (relation de *Dalton*). En considérant l'air humide comme un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, et en supposant que ces deux gaz suivent le comportement d'un gaz parfait, on peut écrire que la pression totale de l'air humide (P_T) est la somme de la pression partielle de la vapeur d'eau (P_v) et de la pression partielle de l'air sec (P_a) :

$$P_T = P_v + P_a \quad (1.08)$$

2.4.5 Autres paramètres

D'autres paramètres peuvent être importants au niveau de l'échelle microscopique, en particulier quand un fluide circule dans l'espace des pores. On peut citer la connectivité, qui caractérise le nombre de voisins pour un pore, la présence de bras morts (pores bouchés), ou encore la topologie du volume des pores. Le désordre géométrique est un caractère essentiel des milieux poreux. Cela empêche toute trajectoire en ligne droite incluse dans le volume des pores. On peut alors définir une tortuosité, qui représente le caractère non rectiligne des trajectoires.

3. Transfert de masse dans les milieux poreux :

On peut envisager trois mécanismes principaux de transfert d'humidité : absorption, condensation, et action de capillarité, on peut citer en plus, l'action de la gravité et la pression extérieure [4].

Les études de recherche concernant la migration de l'humidité dans les milieux poreux et sa dépendance avec ses caractéristiques (la topologie de la matrice du solide, le phénomène d'interface, l'équilibre liquide-vapeur et air), doivent prendre en considération les phénomènes dues à l'humidité, à la distribution de la pression et la température et leur couplage.

La théorie de diffusion avec coefficient de diffusion linéaire ou non linéaire n'est pas toujours, adéquate pour la description du comportement du transfert de la masse dans un milieu poreux, mais elle peut rendre compte sur ces phénomènes de façon assez suffisante pour les matériaux de construction.

L'expérience montre que la diffusion, la capillarité et l'évaporation/ la condensation sont l'ensemble des mécanismes dans le processus du transfert de masse.

3.1 La rétention en l'humidité:

L'humidité dans les matériaux de construction peut se présenter sous forme de vapeur, d'eau liquide ou de givre. Une partie de cette humidité peut être trouvée à l'état intermédiaire sur les surfaces des pores (phase absorbée) et il est quasiment impossible de déterminer la quantité de celle-ci dans chaque phase. La teneur en eau est alors, déterminée comme l'humidité totale dans un kilogramme du matériau sec. Comme la teneur en eau du matériau est généralement en équilibre avec son environnement local, une fonction de rétention d'humidité (fig.I.03) peut être utilisée pour décrire le stockage de l'eau pour un matériau actif, hygroscopique, et capillaire [5].

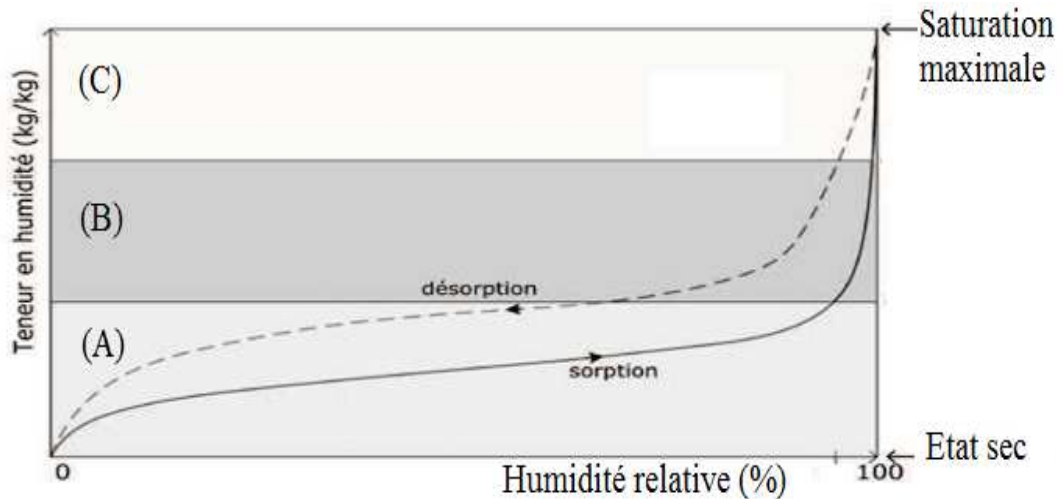


Fig. (1.03) : Schéma du diagramme de la fonction de la rétention en eau d'un matériau de construction hygroscopique actif capillaire [5]

Dans la figure (1.03), la fonction de rétention en humidité d'un matériau poreux consiste de trois parties : l'étape de l'isotherme de sorption d'humidité (A), l'étape de l'humidité capillaire (B) et l'étape de saturation en humidité (C).

Dans la période A, la fonction de rétention en eau est égale à l'isotherme de sorption du matériau. Aux points sûrs sous 95 % d'humidité relative, le matériau est dans l'équilibre la sorption de l'humidité relative du matériau avec l'air ambiant.

Dans la partie B, l'humidité relative est 95 % en saturation capillaire. Due à l'incertitude expérimentale et l'inclinaison excessive de l'isotherme de sorption, l'équilibre et la teneur en eau est difficile à mesurer par les tests de sorption. Cependant, il reste encore un équilibre avec son ambiance local ou entre deux matériaux poreux en contact. La tension de succion dans les pores capillaires dépend de leurs rayons, peut expliquer ce phénomène. Dans deux matériaux en contact, l'équilibre est atteint quand les tensions de succion sont égales. Quand le matériau poreux est en contact avec de l'eau liquide, l'équilibre de la teneur en eau appelé la saturation capillaire et la tension de succion dans le matériau tend vers la valeur nulle. Cependant, ça ne veut pas dire que tous les pores du matériau sont remplis d'eau. Dans la majorité des matériaux de construction, la saturation capillaire est considérablement inférieure à leurs porosités.

Dans la partie C, entre la saturation capillaire et la saturation maximum en eau, il n'y a pas une fonction définie entre la teneur en eau et la tension de succion, respectivement l'humidité relative. La fonction de rétention en eau est une ligne verticale à l'humidité relative 100%.

Dans la partie C, entre deux matériaux poreux en contact, il n'y a pas un équilibre d'humidité clairement défini [5].

La rétention en humidité est une propriété de chaque matériau poreux. Elle peut être représentée par une formule mathématique qui montre la relation entre l'humidité relative de l'ambiance et la teneur en eau du matériau. On présente l'exemple par l'article [6], où les auteurs ont présenté une corrélation obtenue par **Mauri Fortes** et **Martin R. Okos** en utilisant l'isotherme de désorption modifiée de **Henderson** pour déterminer la concentration de l'humidité dans la surface d'une paroi en brique [6], par la corrélation suivante:

$$\varphi = 1 - \exp(-17 w^{0.6}) \quad (1.09)$$

3.2 L'hystérésis de l'adsorption et la désorption :

L'hystérésis thermique est caractérisée par la différence entre les isothermes de sorption et désorption, et la différence entre la chaleur d'adsorption et la chaleur de désorption d'un matériau poreux. La figure (I.04) montre la boucle d'hystérésis type des isothermes d'adsorption et désorption d'un isolant en fibres de verre [7].

C. J. Simonson et al ont présenté une approximation pour déterminer l'isotherme d'adsorption de la fibre de verre représenté par l'équation développée par **Brunauer- Emmett-Teller** (BET) :

$$\frac{W}{W_m} = \frac{C \varphi}{[1 - \varphi][1 + (C - 1) \varphi]} \quad (1.10)$$

Où, l'isotherme de désorption est représentée par l'équation de **Langmuir** :

$$\frac{W}{W_m} = \frac{C \varphi}{1 + C \varphi} \quad (1.11)$$

W_m et C sont des constantes empiriques, et :

$$W = \varepsilon_\beta (\rho_\beta / \rho_0) \quad (1.12)$$

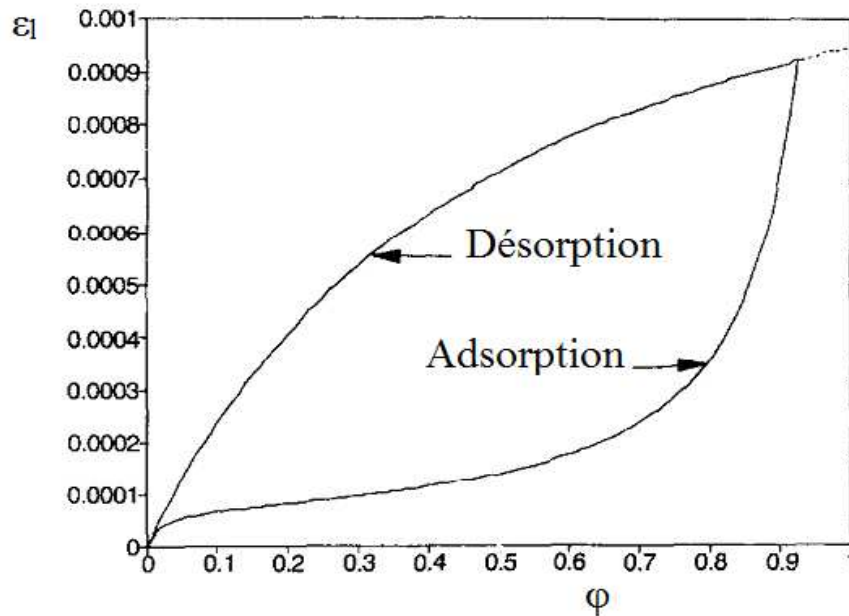


Fig. (1.04) les isothermes types d'adsorption et désorption d'un isolant en fibres de verre. [7]

3.3 Condensation :

Pendant la saison froide, la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air des locaux chauffés étant supérieure à celle de l'air extérieur, il résulte un mouvement de l'intérieur vers l'extérieur à travers les parois et les toitures des bâtiments. Etant donné que la température décroît vers l'extérieur, et donc les pressions de saturation aussi, il peut arriver qu'à partir d'une certaine zone la vapeur d'eau condense, causant parfois l'humidification excessive des éléments de construction. Pour évaluer le risque de condensation, plusieurs auteurs utilisent le procédé de calcul graphique proposé par **H Glaser**, Il consiste notamment dans l'établissement des pressions de saturation et effective en considérant que le phénomène est unidirectionnel, ainsi que d'autres simplifications [8], Figure (I.05).

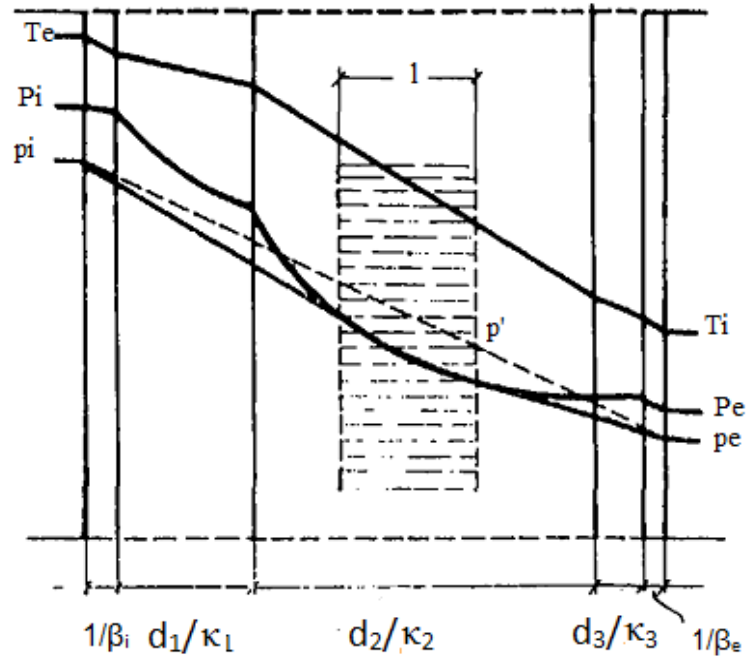


Fig. (I.05) Paroi plane à couches parallèles représentée à l'échelle des résistances à la diffusion de vapeur d'eau, pour l'établissement de la zone de condensation par procédé graphique de Glaser [8].

$1/\beta$, d_i/κ_i : résistance à la diffusion à la vapeur d'eau, t : température, p : pressions partielles de la vapeur d'eau, P : pressions de saturation de la vapeur d'eau, p' : pressions effectives de la vapeur d'eau, l : largeur de la zone de condensation.

3.4 La diffusion massique :

La diffusion est le processus de transport de la masse d'une zone vers une autre zone d'un système, résultant du mouvement aveugle des molécules.

Le potentiel principal conduisant la diffusion est le gradient de la concentration. La diffusion due au gradient de concentration est connue par la diffusion ordinaire. Cependant, la diffusion peut être causée par d'autres effets. Le gradient de température dans un milieu poreux peut provoquer la diffusion thermique (aussi appelé l'effet *Soret*), le gradient de pression peut engendrer la diffusion de pression.

D'autres mécanismes de diffusion existent, comme ceux sont appelés : la diffusion de *Knudsen*, la diffusion surfacique.

Hans Janssen (2011), a étudié la diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet de gradient de

pression partielle de vapeur et le gradient de température, il a conclu que la diffusion de vapeur d'eau sous gradient de température, est négligeable. Le gradient de pression de vapeur est le principal potentiel conduisant à la diffusion de vapeur dans les milieux poreux [9].

3.5 Les coefficients de diffusion de masse :

Le coefficient de diffusivité de l'humidité (D), formulé en m^2/s , est un paramètre fondamental pour les équations de transfert de l'humidité, il varie avec la variation de température et essentiellement avec la teneur en humidité du matériau [4].

3.5.1 Le coefficient de diffusion apparent de l'humidité :

Dans les systèmes unidimensionnels, plusieurs formules sont proposées dans la littérature en écrivant l'équation type de la diffusion non linéaire de l'humidité. La description de l'évolution du degré de saturation en eau dans l'échelle macroscopique est englobée par l'équation (3.18). Le coefficient (D) utilisé dans cette équation est appelé le coefficient de diffusion apparent de l'humidité. Pour évaluer le coefficient de diffusion apparent sous des conditions instationnaires (densité de flux massique variable comme une fonction du temps) dans les matériaux cimentaires en les supposant comme des milieux poreux partiellement saturés en phase liquide, il est nécessaire de résoudre la deuxième loi de *Fick* [36].

3.5.2 Le coefficient de diffusion effectif de l'humidité :

L'approche la plus utilisée dans la description du transfert de liquide dans les milieux poreux est basée sur son analogie avec le mécanisme de diffusion. Elle introduit une diffusivité effective $D(w)$ dépend de la teneur en eau w , **J Prazak et al** (1990) ont montré que cette fonction $D(w)$ ne peut être regardé comme une caractéristique matérielle à cause de sa forte dépendance vis-à-vis des conditions initiales et aux limites [10].

3.6 Imbibition capillaire dans un tube :

Si on met un tube vertical en contact avec l'eau, un ménisque concave va se former à l'interface entre l'eau et l'air, voir figure (I.06) La tension superficielle de l'interface donne une

force verticale sur l'eau liquide due à ce ménisque. Cette force fera monter la surface de l'eau dans le tube jusqu'à l'équilibre avec le poids de la colonne d'eau dans le tube [3].

La force qui fait monter l'eau est exprimée par une pression équivalente la pression capillaire p_c :

$$p_c = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (1.13)$$

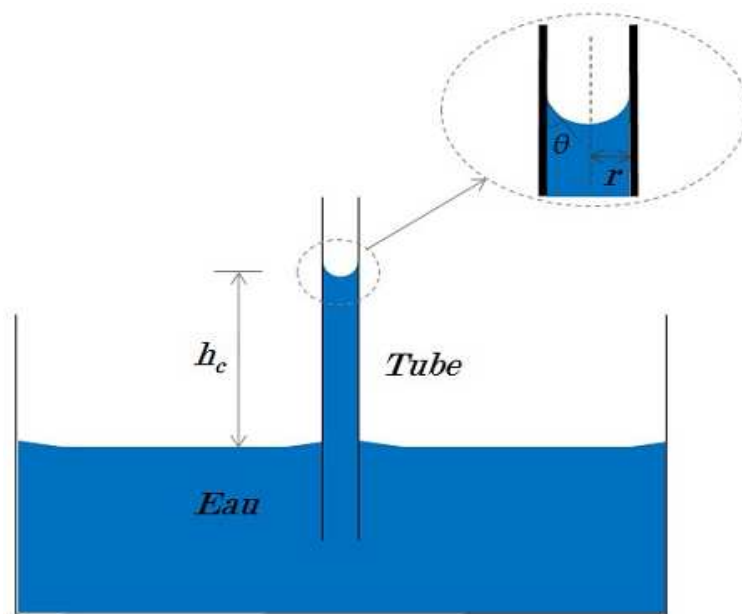


Fig. (1.06) : Imbibition capillaire dans un tube[3]

4. Transfert de chaleur dans les milieux poreux :

Le transfert de chaleur dans les matériaux de construction s'effectue sous quatre formes :

- Conduction :

La transmission de chaleur par conduction s'effectue dans les trois phases du milieu poreux et essentiellement dans le squelette solide. Le modèle de **Krischer** exprime cette quantité, tenant compte l'hypothèse que le matériau poreux est un empilage de structures solides plane disposées en parallèle ou en série séparées par un fluide [11].

- Convection :

Le transfert par convection s'effectue par la transmission due au déplacement des phases fluides mobiles à travers les pores du milieu.

- Rayonnement :

Le transfert par rayonnement peut se manifester dans des pores par le processus d'émission d'ondes électromagnétiques. Le transfert par rayonnement devient important dans les températures élevées des milieux poreux.

- Changement de Phase :

C'est un transfert dû à la chaleur latente d'évaporation ou de condensation d'eau dans les pores.

Les travaux consacrés pour l'analyse du transfert thermique uniquement dans les milieux poreux concernent les caractéristiques thermiques ou leurs influences sur le transfert thermique.

4.3 Détermination de la conductivité thermique des milieux poreux :

Durant le dernier siècle, les chercheurs scientifiques et les ingénieurs se sont intéressés à la conductivité thermique des systèmes poreux. Plusieurs formules sont proposées pour la prédiction des conductivités thermiques effectives des systèmes poreux [12].

La détermination de la conductivité thermique λ à partir des conductivités thermiques des différents constituants et de la morphologie du milieu, est un travail difficile, même dans le cas, où le milieu est composé de deux phases et qui n'échange que par conduction. Ce problème devient extraordinairement complexe lorsqu'il faut de plus, prendre en compte le mécanisme d'évaporation-condensation (transport par la vapeur en phase gazeuse de son enthalpie et rappel de

l'humidité sous forme liquide par capillarité) aux échelles de longueur inférieure à celles du volume élémentaire représentatif. Ce transport à l'intérieur du volume élémentaire représentatif ne concourt évidemment pas au transfert de masse global mais peut accroître considérablement la conductivité thermique λ du milieu assimilé à un milieu continu apparaissant dans l'équation de transfert de chaleur [13].

Des méthodes de mesure sont développées et ont donné d'excellents résultats. En parallèle des modèles de calcul basés généralement sur la méthode semi-empirique de **Krischer**.

La conductivité thermique apparente peut être calculée par un modèle en série, parallèle, ou mixte, en utilisant les relations [14] :

$$\lambda_{\text{série}} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_g} + \frac{\alpha}{\lambda_1}} \quad (1.14)$$

$$\lambda_{\text{parallèle}} = \alpha \lambda_1 + \varepsilon \lambda_g \quad (1.15)$$

Les valeurs de la conductivité thermique de la matrice poreuse λ_1 et les agrégats λ_g sont déterminés expérimentalement.

$$\lambda_{\text{app}} = \frac{\lambda_{\text{série}} \lambda_{\text{parallèle}}}{\theta \lambda_{\text{parallèle}} + (1 - \theta) \lambda_{\text{série}}} \quad (1.16)$$

$$\theta = \frac{\lambda_{\text{série}} (\lambda_m - \lambda_{\text{parallèle}})}{\lambda_m (\lambda_{\text{parallèle}} - \lambda_{\text{série}})} \quad (1.17)$$

$\lambda_{\text{parallèle}}$ et $\lambda_{\text{série}}$ représente la conductivité thermique des couches arrangées en parallèles et en série, respectivement.

Avec θ = la fraction volumique de portion arrangée en série

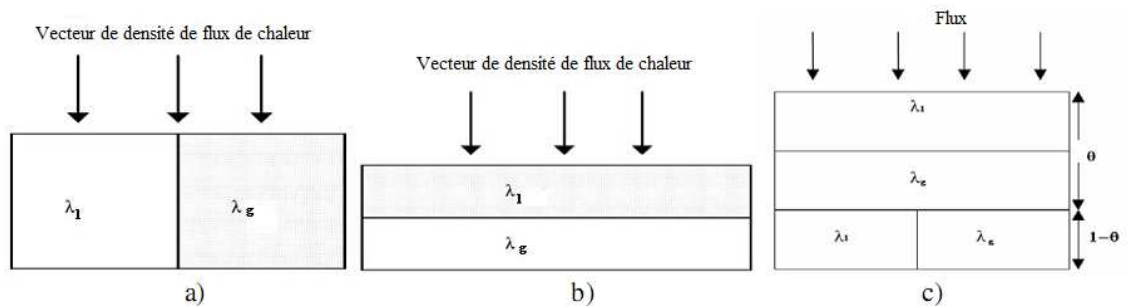


Fig. (1.07) : a) Modèle parallèle, b) Modèle en série, c) Modèle mixte [14]

4.4 Facteurs influent sur la conductivité thermique des milieux poreux:

Plusieurs facteurs influent sur la conductivité thermique des milieux poreux. La température et saturation en eau, et le type des matériaux composant la matrice solide du milieu poreux sont les facteurs fondamentaux, qui influent sur leur conductivité thermique.

4.4.1 Influence de la température :

Généralement, la conductivité thermique s'accroît avec l'accroissement de la température du matériau. Dans la figure (I.08) **I. Rahmanian** et **Y. C. Wang** ont présenté la variation de la conductivité thermique du plâtre en fonction de température reporté de plusieurs chercheurs [15].

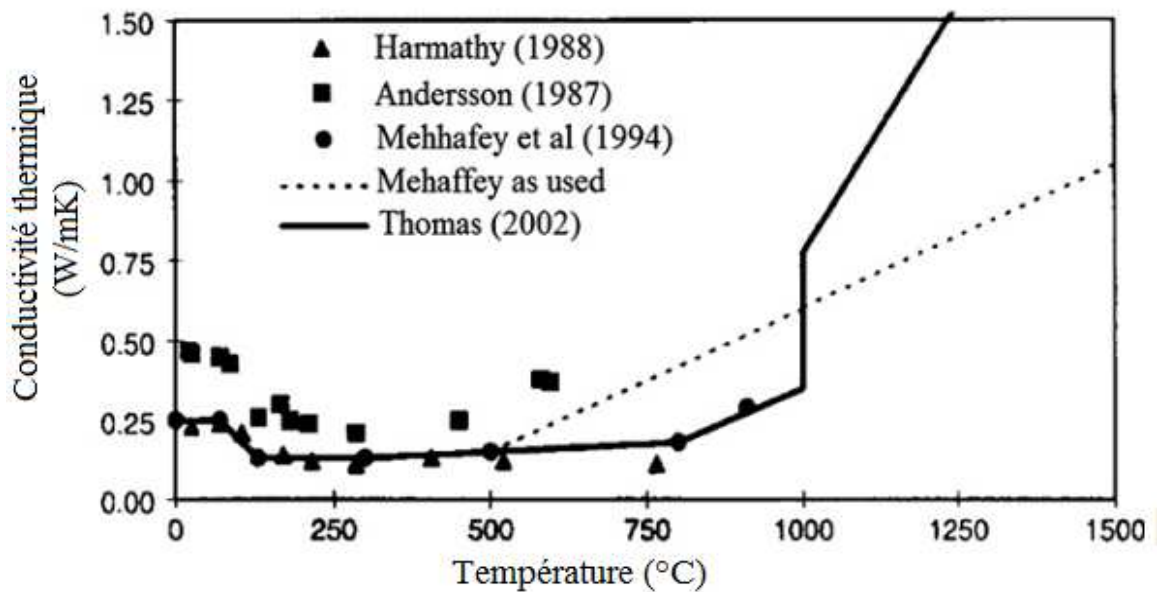


Fig. (1.08) : conductivité thermique du plâtre en fonction de température [15]

Bessenouci et al. en 2011, ont étudié la conductivité thermique apparente d'un béton de pouzzolane en se basant sur deux approches qui s'appuient sur les démarches suivantes:

- Une approche avec l'hypothèse d'un matériau composé de deux interfaces solides liant – granulats en introduisant la notion de la conductivité thermique de la matrice liante et la conductivité thermique du grain.
- Le concept de la deuxième approche, considère que le matériau est constitué d'une matrice solide combinée avec une phase fluide (air). Dans ce cas, la conductivité thermique apparente sera une fonction des conductivités thermiques de la phase solide et la phase fluide (air) [16].

4.4.2 Influence du type des matériaux et les ajouts sur le transfert thermique :

Le transfert thermique au niveau des parois de construction est une fonction de la structure du matériau et ses dimensions.

Généralement, la présence des pores dans un matériau entraîne une diminution de sa conductivité thermique. L'importance de l'ensemble du volume des pores caractérise le taux de la diminution de la conductivité thermique du matériau. La figure (1.09) montre la variation de la

conductivité thermique en fonction du taux de porosité [18].

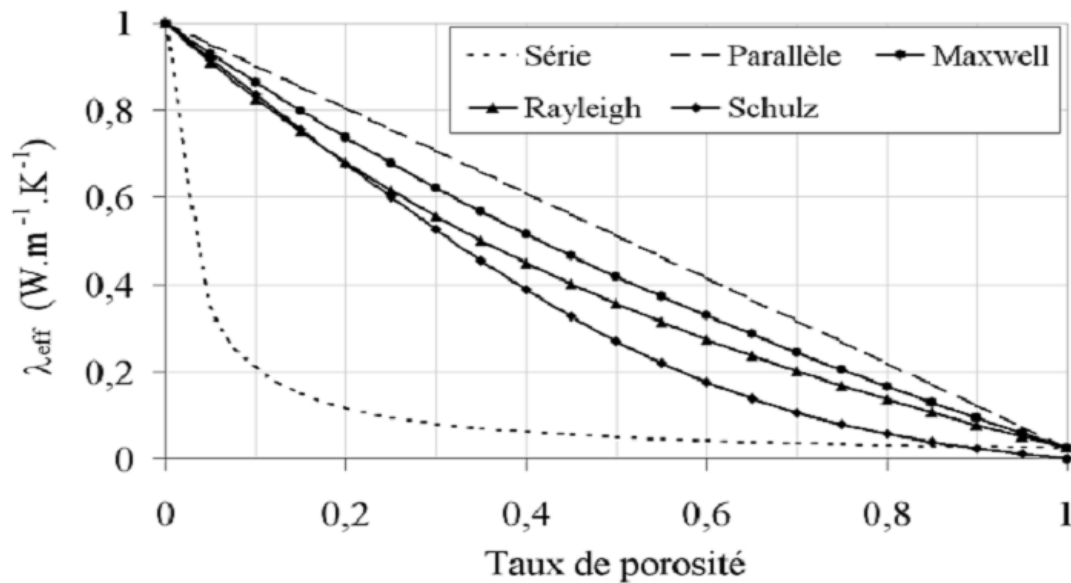


Fig. (1.09) Variation de la conductivité thermique effective avec le taux de porosité calculée suivant différents modèles analytiques. [18].

Dans la référence [19], l'auteur a proposé le comportement du transfert thermique dans les parois composées contenant des lames d'air comme la brique perforée verticalement. Il a analysé la propagation du signal thermique dans ce type des matériaux. Ses études montrent la possibilité de la détermination de la résistance thermique et les paramètres pour la brique seulement par l'expérience.

Dans le cas où, les constituants du béton sont des agrégats, la conductivité thermique du mortier et du béton, est mesurée pour plusieurs contenances en eau, les travaux de *M.I Khan* (2002) montrent que la conductivité thermique des roches s'accroît avec l'accroissement de son contenance en eau. Les types des agrégats constituant le béton ont une importante influence sur la conductivité thermique. On peut se référer à [17] pour voir l'influence des différents facteurs sur la conductivité thermique du béton.

Dans la référence [20], une étude sur l'influence d'addition des chutes de bois sur la conductivité thermique du béton de sable en préservant leurs performances mécaniques, où la teneur en chutes en bois varie entre 0 et 100 kg/m³ a été effectuée fig.(1.09).

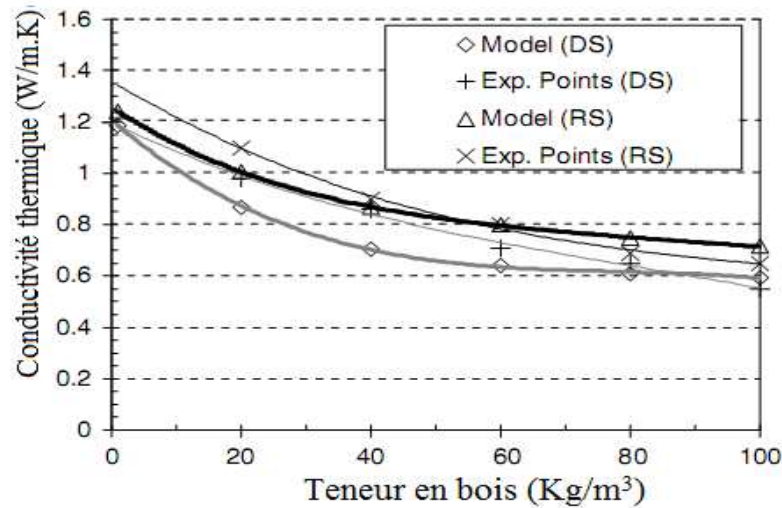


Fig. (1.10) Conductivité thermique en fonction de la teneur en bois : comparaison des résultats expérimentaux aux résultats obtenus par le modèle auto-cohérent [20].

4.4.3 Influence de la saturation du milieu poreux:

Dans les figure (1.10) et (1.11), *P. Crausse, J.P. Laurent et B. Perrin* ont présenté l'influence de la saturation d'un béton cellulaire sur son conductivité thermique apparente et son diffusivité hydrique pour des températures différentes [21].

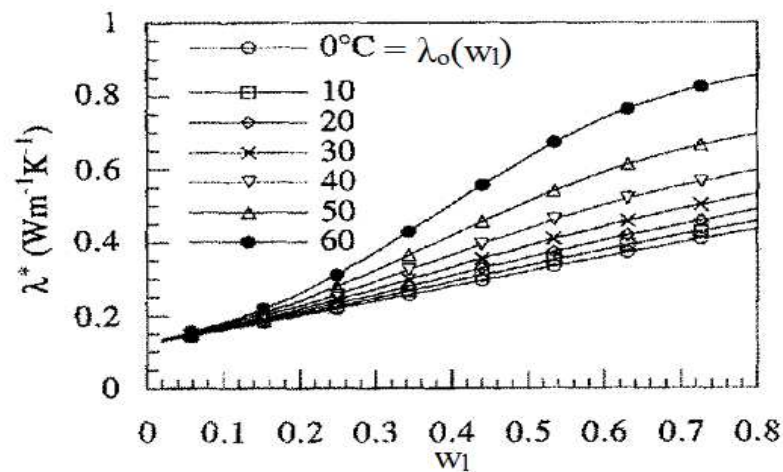


Fig. (1.11) conductivité thermique apparente du béton cellulaire en fonction de la teneur en eau mesuré à sept températures [21].

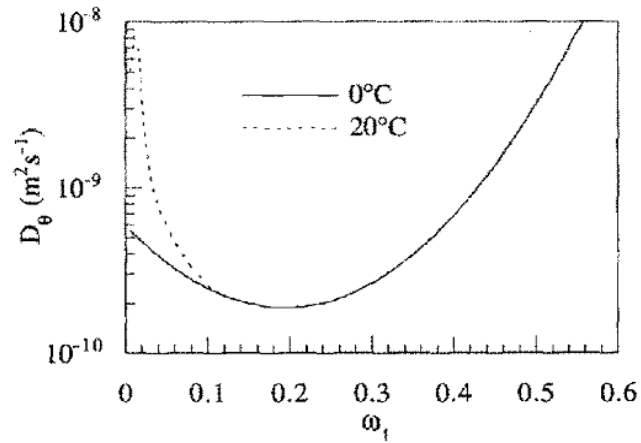


Fig. (1.12) Relation diffusivité hydrique-teneur en eau du béton cellulaire pour deux températures [21].

Belhamri (2007) a étudié l'influence du taux de saturation sur le transfert de chaleur dans les matériaux de construction, il a obtenu une corrélation pour estimer l'effet de la saturation sur la conductivité thermique du béton renforcé avec des copeaux en bois, il a conclu que la conductivité et la diffusivité dépendent fortement à la saturation [22].

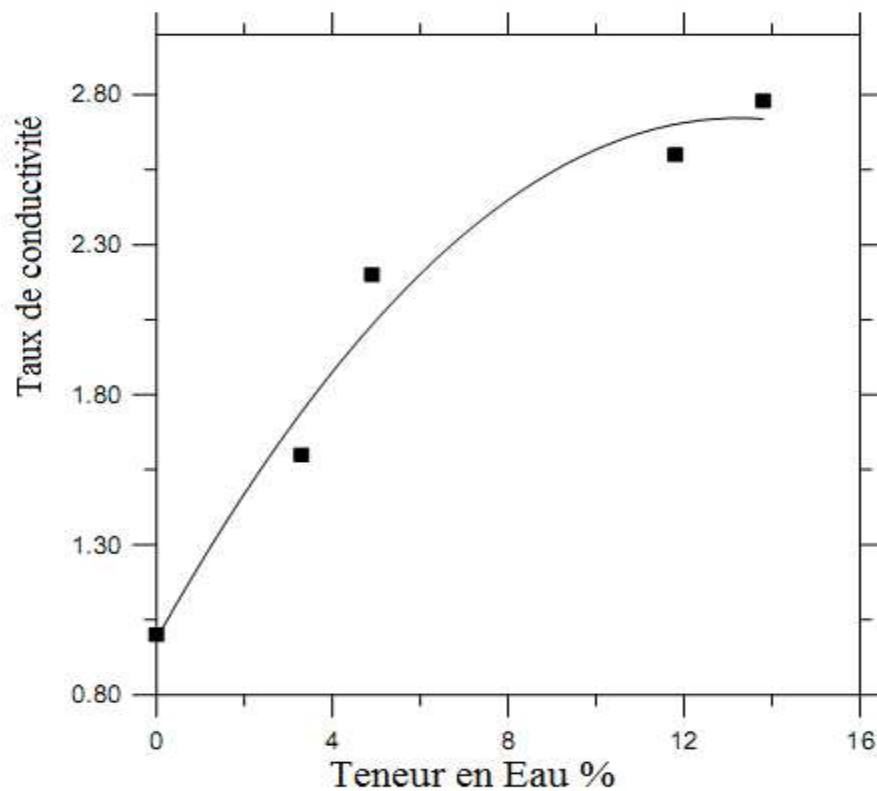


Fig.(1.13) Variation du taux de la conductivité thermique avec la variation de la teneur en eau d'un béton renforcé en copeaux d'acier [22].

L'étude de caractérisation thermique du béton produit localement (en Algérie) montre que la

teneur en eau est un paramètre essentiel pour l'évaluation des paramètres thermiques. L'observation d'un écart pour la conductivité thermique d'un matériau sec et celle-ci d'un matériau humide, implique des conséquences qui pourront être très significatifs pour l'établissement des bilans thermiques des bâtiments [22].

5. Couplage des transferts dans les milieux poreux :

Les transferts, simultanés de chaleur et de masse en milieu poreux non saturé interviennent dans de nombreux domaines: séchage, mécanique des sols, thermique du bâtiment... Aussi, la connaissance des propriétés phénoménologiques de ces milieux revête elle une grande importance [13].

La dépendance entre le transfert de chaleur et de masse dans les corps poreux a été établie premièrement par **Luikov**. Il a proposé deux termes de relation pour la diffusion de la masse non isothermique et aussi la détermination expérimentale des coefficients de diffusion et thermo-diffusion pour un nombre de matériaux humides. Selon l'utilisation des processus thermodynamiques irréversibles, il a défini un système des équations différentielles partielles couplées pour la distribution du potentiel de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux.

Krischer et **De Vries** ont proposé des systèmes d'équations différentielles du type de **Luikov** pour la distribution de la température et la teneur en humidité dans les milieux poreux.

La solution analytique pour ce type d'équations présente une grande difficulté mathématique, et par conséquent les solutions sont trouvées pour les plus simples configurations géométriques et les conditions aux limites. Dans un problème réel, la solution doit être faite avec des techniques numériques. Généralement, ils sont basés sur les méthodes des différences finies [23].

Le couplage des transferts de chaleur, air et humidité entre les enveloppes des bâtiments et l'air intérieur est compliqué, il a un effet significatif sur l'environnement intérieur et la performance énergétique des bâtiments. Le mouvement de l'humidité et le transfert de chaleur sont fortement couplés dans les matériaux de construction.

Cependant dans la plus part des analyses de l'énergie des bâtiments les calculs de la conduction à travers les parois, généralement négligent le transport et le stockage de l'humidité dans les matériaux poreux de construction et l'interaction entre les transferts hygrothermiques multizones du flux d'air à l'intérieur des bâtiments.

En plus, l'accumulation de l'humidité peut provoquer des dommages de construction pour les enveloppes des bâtiments, et peut avoir un impact sur la qualité de l'air intérieur [24].

6. Exemples de travaux :

Les systèmes de transfert dans les milieux poreux sont compliqués et difficiles à résoudre analytiquement. Les méthodes numériques sont généralement utilisées.

P. NORDON et **H. G. DAVID** (1967), ont appliqué une solution par différences finies basée sur la méthode de "double balayage", pour résoudre les équations différentielles non linéaires qui décrivent la diffusion couplée de la chaleur et de masse (humidité) dans les matériaux hygroscopiques de textiles. En plus des équations de diffusion, ils ont introduit une équation de vitesse décrivant la vitesse d'échange d'humidité entre le solide (fibres textiles) et la phase gazeuse (espace des pores) [25].

Les auteurs de [26] ont proposé un modèle analytique dynamique pour l'évaluation de l'évolution du transfert instationnaire thermique et de l'humidité dans les matériaux de constructions poreuses et une méthode analytique pour calculer le processus du transfert couplé de la chaleur et de l'humidité. Le système couplé est soumet premièrement au transformé de Laplace, et puis les équations sont résolues par l'introduction de la méthode de la fonction de transfert. Dans ce modèle ils ont pris la conductivité thermique et la diffusivité comme des constantes [26].

K. Abahri, **R. Belarbi**, et **A. Trabelsi** (2011), ont développé un modèle monodimensionnel pour évaluer le transfert couplé de chaleur et l'humidité dans les matériaux de construction poreux. Le système stationnaire des équations différentielles partielles et résolu analytiquement pour des conditions aux limites de type **Dirichlet** [27].

Les auteurs de [4], ont développé un programme numérique en se basant sur la théorie proposé par **Luikov** et **Philip De Vries** pour investir les différents mécanismes de transport de l'humidité dans les parois de construction, et analyser les phénomènes d'interface [4].

Menghao Qin et al (2010) [24], ont proposé un modèle mathématique bidimensionnel pour l'évaluation de transfert hygrothermique dans les matériaux de construction poreux, en choisissant la teneur en eau et la température comme des potentiels conduisant le transfert. Ils ont utilisé une technique appelée **MTDMA** pour la résolution des équations de transfert.

7. Phénomènes de transfert au niveau des surfaces des milieux poreux et conditions aux limites :

La détermination des coefficients d'échange thermique ou massique entre le milieu poreux et l'air a une grande importance pour l'étude de la distribution de la température et la saturation dans la paroi poreuse. L'étude de la distribution de chaleur et la saturation dans les milieux poreux, nécessite la détermination des conditions aux limites, plusieurs recherches sont développées pour l'analyse des phénomènes que se manifestent à la surface des milieux poreux. Les travaux effectués concernant le transfert de chaleur et de masse sont nombreux, on peut citer :

Durant le séchage d'un milieu poreux saturé, une large quantité d'eau s'évapore de la surface extérieure du système poreux vers l'ambiance avec un taux égale ou peu inférieur à au taux d'évaporation de la surface du bulbe d'eau sous des conditions ambiantes identiques. Le taux d'évaporation est presque constant [28].

Yogendra JOSHI et **Benjamin GEBHART** (1984) [29], ont obtenu des corrections d'ordre élevé dans la solution de la couche limite pour les écoulements verticaux de convection naturelle dans les milieux poreux.

W. Masmoudi et **M. Part** en 1991 [30], ont présenté une méthode numérique permettant de prédéterminer les transferts de masse et de chaleur entre un écoulement d'air externe et un corps poreux non saturé. A partir des divers simulations, ils ont étudiés les coefficients des transferts interfaciaux de masse et de chaleur, finalement ils ont discutés l'influence de l'apparition de l'hétérogénéité macroscopique de la teneur en eau au cours de séchage à l'interface sur les coefficients de transfert.

Thijs Defraeye et *al.* (2012) [31], ont utilisé la modélisation conjuguée de transport de la masse et de la chaleur entre un flux d'air et un matériau poreux pour l'analyse du séchage convectif d'un plan poreux, avec un nombre de Reynolds inférieur à 1000.

8. Conclusion :

La recherche dans le domaine des milieux poreux est très vaste et il est toujours, en stade de développement continu. L'amélioration de la consommation énergétique dans la construction nécessite l'étude et la caractérisation des matériaux de construction comme des milieux poreux.

Plusieurs propriétés hydro-thermiques des matériaux de construction peuvent être variables avec la variation de leurs états de saturation en eau et l'état d'échauffement. Plusieurs modèles existent dans la littérature pour l'étude du comportement des matériaux de construction.



CHAPITRE II
MATERIAUX DE CONSTRUCTION
ET LEURS PROPRIETES THERMO
PHYSIQUES

1. Introduction :

Les matériaux de construction sont utilisés dans le bâtiment comme :

- matériaux de portage ;
- matériaux des différentes isolations : isolation thermique, isolation phonique, isolation de la radiation nucléaire...
- matériaux de finition et décoration ;
- matériaux d'étanchéités ;
- matériaux de protection contre les différents risques tels que les incendies.

L'intérêt de l'économie énergétique, la santé et confort des personnes, rend la recherche, le développement et la production dans le domaine des matériaux de construction très riche.

2. Les matériaux de construction :

La variété des conséquences précédentes, nécessite une complexité des parois de construction, selon les conditions d'utilisation et les exigences techniques, de confort, de santé et d'esthétique. La gamme des matériaux utilisée dans le domaine de construction est très large. Le ciment, le béton, la terre à l'état naturel peuvent être utilisés comme des matériaux de construction pratiquement sans dépense d'énergie. Elles présentent de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. La terre et ses dérivés sont largement utilisés dans le bâtiment et sont sensibles à l'eau selon leurs conditions de formation [11].

Dans ce chapitre, on cite quelques matériaux de construction couramment utilisés:

2.1 Le béton :

Le béton est un matériau hétérogène. Il se compose d'un mélange composé de doses précises de ciment, de granulats et d'eau. Dans ce mélange, le ciment joue le rôle de liant et modifie les qualités et les usages du béton. C'est le matériau le plus utilisé dans la construction du bâtiment.

A cause de la grande différence d'échelle dans le système de la structure intérieure du béton, il est impossible de représenter toutes les structures dans un seul modèle en même temps. La seule solution réelle pour ce problème, est de poser une supposition de séparation des échelles et d'utiliser des structures des méthodes numériques en multi-échelles [32].

2.2 Caractérisation de la structure poreuse du béton :

Le béton est un matériau poreux avec des volumes des pores de quelques nanomètres jusqu'à plusieurs microns. Les pores du béton peuvent être subdivisés en pore de gel (2-10 nm), pores capillaires (10-200 nm), et les fissures ou les vides d'air ($> 1 \mu\text{m}$). Le degré de saturation de ces pores dépend de l'humidité relative. A l'humidité relative 40%, les pores de gel sont saturés, au-dessus de cette valeur d'humidité, les pores commencent à se remplir d'eau. Pour l'humidité relative 100%, les fissures ou les vides sont aussi remplis d'eau, et le matériau est dit complètement saturé [33].

Dans la littérature, plusieurs types de béton sont cités:

- Le béton ordinaire ;
- Le béton cellulaire autoclavé ;
- Le béton cellulaire ;
- Le béton de chanvre;
- Le béton léger de Pouzzolane ;
- Les bétons renforcés avec des coupeaux en acier, en bois...
- Les bétons à haute performance ;
- Les mortiers.

2.3 La brique :

La brique est connue comme un matériau utilisé pour la construction des parois des bâtiments. C'est un matériau fabriqué en effectuant la cuisson de la pâte d'argile sous des températures peu élevées. Pour certains types, on ajoute des grains de combustibles tels que la sciure de bois. Lors de la cuisson dans les fours, la sciure se consume en économisant l'énergie du four, en créant des petits bulles d'air qui améliorent l'isolation thermique. La brique de terre cuite est un matériau qui permet d'évacuer efficacement l'humidité vers l'extérieur.

On a rencontré plusieurs types de brique cités dans la littérature et qui sont :

- la brique rouge ;
- la brique creuse ;
- la brique perforée ;

- La brique pleine ;
- La brique de terre stabilisée (BTS) ;
- La brique de terre comprimée (BTC) ;
- Les briques alvéolée.

La figure (2.01) montre la variation de D comme fonction de la teneur en humidité pour la brique d'argile [4].

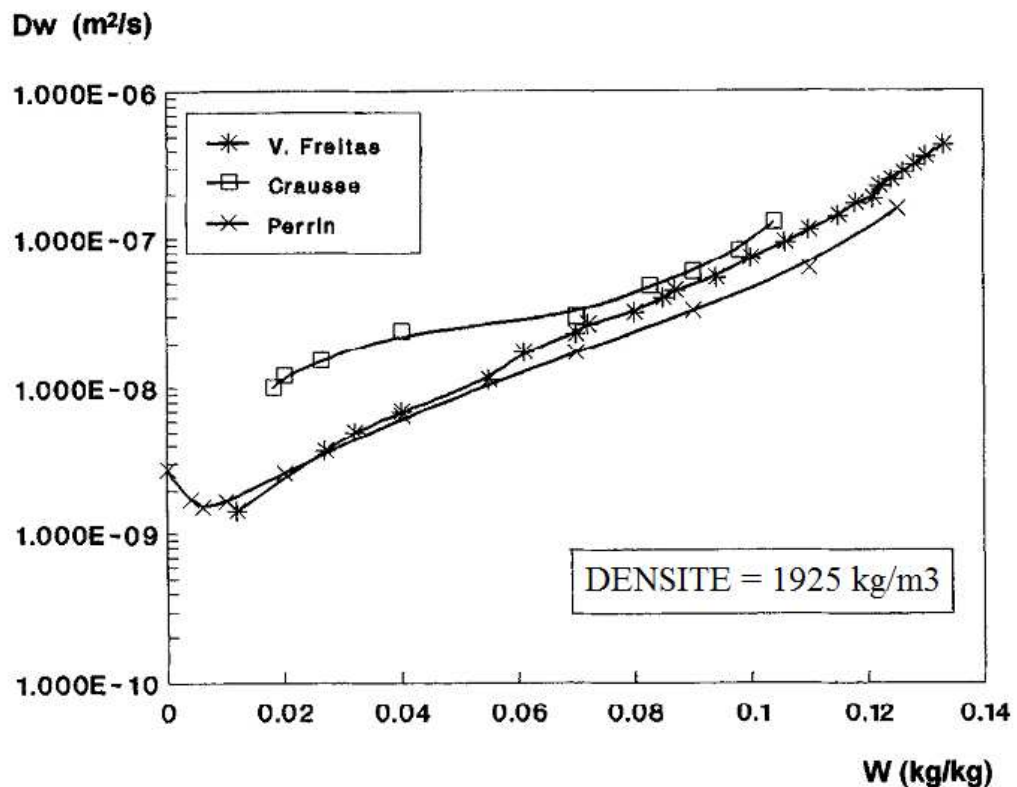


Fig. (2.01) : coefficient de diffusivité de l'humidité D , Brique d'argile [4].

2.4 Le bois :

Le bois est un tissu végétal assimilable à un matériau composite, formé de cellules, canalisant la sève brute du matériau. Il est utilisé dans la construction comme un matériau d'habillage des surfaces, d'isolation thermique, et dans les ouvertures des bâtiments. Le bois est un matériau sensible à l'humidité de l'air. Il est toutefois important de noter que pour ce matériau l'humidité relative de service doit être inférieure à 20 %.

2.5 Les isolants:

Les isolants thermiques sont des matériaux de construction généralement de faible densité et dont la conductivité thermique est faible. Ils sont utilisés dans le but de l'amélioration des performances thermique des parois. Plusieurs types des isolants sont développés [11]:

- La laine de verre minérale
- Le polystyrène expansé
- Le polystyrène extrudé
- Le verre cellulaire
- Le polyuréthane et le polyisocyanurate
- La laine de bois
- Le phénol
- La perlite expansée

2.6 Le plâtre :

Les plâtres sont fabriqués à partir de la réhydratation du gypse, après le gâchage de la poudre de ce dernier avec de l'eau. Cette opération permet de constituer un matériau solide utilisé dans la construction.

Les systèmes basés sur les plaques en plâtre sont largement utilisés dans la construction comme des parois ou des cloisons résistantes au feu et fournissent une protection passive au feu. La résistance au feu de tels systèmes est fondamentalement due aux propriétés thermiques désirables du plâtre [15].

2.7 Le polystyrène :

Les plaques en mousse de polystyrène expansé sont utilisées comme matériaux d'isolation thermique dans les parois des bâtiments. Elles sont produites par le moulage de la résine de styrène pulvérisé sous pression. L'air immobile est le matériau le plus isolant. Les matériaux en mousse de polystyrène contiennent proche de 98% de volume d'air. La phase solide qui transporte de la chaleur par conduction occupe 2% du volume total. En plus le polystyrène est un isolant thermique efficace.

3. Caractérisation des propriétés physiques des matériaux de construction :

L'optimisation des transferts thermiques et massiques dans le bâtiment nécessite la connaissance des propriétés thermo-hydriques de chaque matériau qui peut composer la paroi. Cette raison fait appel aux différents moyens des mesures expérimentales des propriétés physiques de ces matériaux.

Il existe plusieurs grandes familles de techniques expérimentales permettant de mesurer les caractéristiques thermiques (conductivité ou diffusivité) de solides homogènes et isotropes. En particulier, les techniques de régimes permanents et celles de régimes impulsionnels [13].

3.1 Détermination de la conductivité thermique d'un matériau de construction :

Les techniques permettant d'estimer les propriétés thermiques des matériaux peuvent être divisées en deux familles, les méthodes en régime stationnaire et les méthodes en régime instationnaire. On peut seulement quantifier les techniques suivantes [34]:

Les méthodes en régime stationnaire :

- La méthode de la plaque chaude gardée (*Hladik*, 1990) ;
- La méthode des boîtes ;

Les méthodes en régime instationnaire :

- La méthode de la plaque chaude avec excitation sinusoïdale
- La méthode fluxmétrique ;
- La méthode du fil chaud ;
- La méthode flash (*Parker et al.*, 1961) ;
- La méthode du plan chaud ;
- La méthode impulsionnelle (Mesure de la diffusivité thermique) [35].

A.DEGIOVANNI et *C. MOYNE* (1987) [13], ont développé un modèle de transfert simultané de chaleur et de masse en milieu poreux non saturé. Ils ont utilisé ce modèle pour, d'une part évaluer de façon théorique la conductivité thermique apparente du milieu poreux et d'autre part, simuler une mesure de type "plaque chaude" et une mesure de type "flash".

I. Rahmanian, et *Y.C. Wang* (2012) [15], ont proposé une méthode hybride numérique-expérimentale pour l'obtention des conductivités thermiques d'une variété des

planches en plâtre produites sous des températures élevées. Les planches en plâtre sont utilisées pour les constructions résistantes au feu.

3.2 Techniques de détermination du coefficient de diffusion massique :

La littérature montre que plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer plus ou moins dans le sens direct ce coefficient global de transport d'humidité dépendante. Les profils d'humidité associés avec les expériences de séchage ou de l'humidification sous le régime instationnaire et des conditions initiales et aux limites doivent être bien définis [36].

Le coefficient de diffusion de l'humidité est difficile à estimer. Il est fortement dépendant de la méthode de leur détermination. Parmi ces méthodes on cite: la méthode de la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau (appelée méthode de la coupe), la méthode du test d'imbibition, et la méthode de stock hydrique.

Pour un même béton appelé (OC), un facteur supérieur à 100 fois observé entre le coefficient de diffusion déterminé en utilisant la première méthode (méthode de la coupe), qui fournis un D à l'ordre de 10^{-11} m²/s, et les autres méthodes fournissent un D de l'ordre de 10^{-9} m²/s. Cette variation considérable est mentionnée par plusieurs auteurs [38].

On peut aussi citer les techniques suivantes :

- L'analyse des rayons gamma ;
- les rayons X ;
- résonance magnétique nucléaire (NMR) ;
- radiographie neutronique ;
- méthode de la coupe.

Jozef PRAZAK et al en 1990, ont pu déterminer la diffusivité effective en fonction de la teneur en humidité de quelques matériaux de construction à partir des données expérimentales obtenues par la radiographie neutronique [10].

L. PEL et al (1993) [38], ont présenté une technique pour mesurer les profils de concentration de l'humidité basée sur la radiographie du scan des neutrons, avec cette technique

les profils de concentration de l'humidité sont mesurés durant le séchage de la brique. Les isothermes de la diffusivité massique sont des fonctions de la teneur en eau peuvent être déterminés directement d'après ces profils.

4. Les parois de construction multicouches :

Les enveloppes des bâtiments sont des parois constituées de plusieurs couches adjacentes et qui se composent de structures différentes selon leurs utilisations (habitat, industrie, laboratoires ...). Plusieurs matériaux sont utilisés dans la construction de ces parois, tels que les bétons, les briques, les plâtres, les différents isolants ...

Les investigations des parois de constructions constitués de deux couches ou plus, font intervenir les phénomènes des contacts au niveau des interfaces des différentes couches. L'étude du transfert de l'humidité implique l'existence de la théorie de la continuité entre les couches. Différents types des résistances de contact au niveau des contacts entre les couches de la paroi, peuvent être distingués.

4.1 Les contacts dans les parois de construction:

Plusieurs auteurs ont intéressé par les contacts des couches dans les matériaux, [62] et [4].

On peut distinguer trois types de contact entre les couches des parois de construction, qui sont les suivants :

- **Continuité hydraulique:**

D'après la référence [4], il y a une interpénétration entre les deux couches adjacentes de structure poreuse. La « continuité hydraulique », l'équivalence de la pression capillaire ($P_{c1} = P_{c2}$) cause une relation entre les valeurs de la teneur en humidité des deux matériaux en interfaces ($w_1 = w_2$) établie par la fonction $R(P_c)$, le calcul principal qui est présenté dans la figure (2.02) [4].

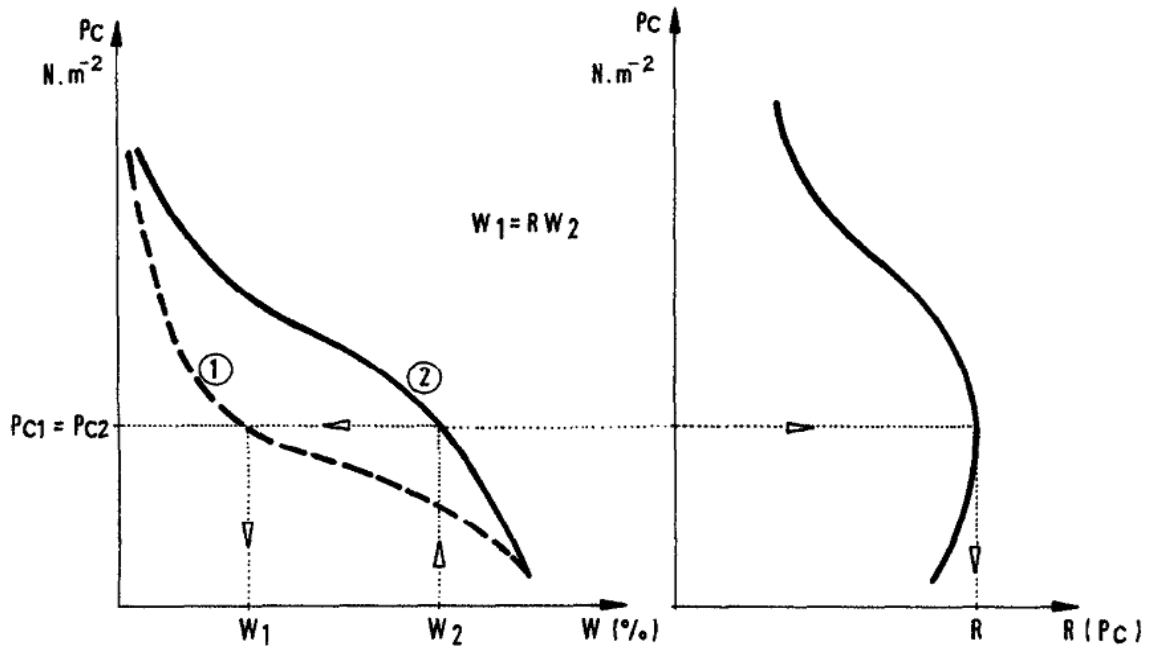


Fig. (2.02) : principe de calcul de relation $R(P_c)$ [4].

- **Contact naturel:**

Il n'y a pas une interpénétration entre les deux couches adjacentes de structure poreuse. On peut admettre qu'il y a encore une continuité dans la température et une équivalence du flux thermique, mais avec référence à l'humidité, les études expérimentales développées par les auteurs actuels montrent la résistance hydrique à l'interface qui conditionne le flux maximum transmit, FLUXMAX ($P_{c1} \neq P_{c2}$).

- **espace d'air entre les couches:**

Il y a un espace d'air entre les couches de quelques millimètres d'épaisseur. L'équivalence de l'humidité relative permet d'établir une relation entre les valeurs pour l'humidité des matériaux sur l'un et l'autre surface de l'interface ($w_1 = S w_2$) établit par la fonction $S(\varphi)$.

4.2 Représentation des configurations de contact :

Dans le tableau (2.01), on présente trois configurations des contacts analysés entre deux différentes couches, bien que la définition de l'équation de la continuité. Comme ça était développé précédemment, la définition de la continuité à l'interface entre les couches, est une

question très compliquée.

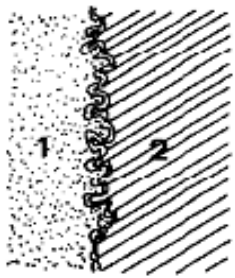
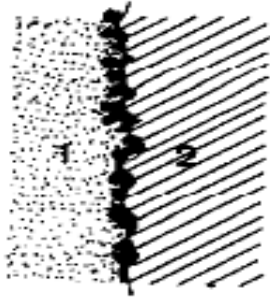
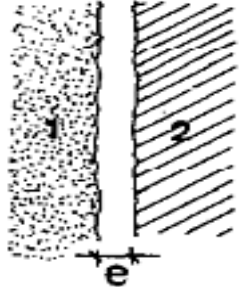
Continuité hydraulique	Contacte naturel	Espace d'air entre les couches de la paroi de construction
		
<ul style="list-style-type: none"> • $\lambda_1^* \frac{\partial T}{\partial x} 1 = \lambda_2^* \frac{\partial T}{\partial x} 2$ • $T_1 = T_2$ • $\rho_1 \left(D w_1 \frac{\partial w}{\partial x} 1 + D t_1 \frac{\partial T}{\partial x} 1 \right) = \rho_2 \left(D w_2 \frac{\partial w}{\partial x} 2 + D t_2 \frac{\partial T}{\partial x} 2 \right)$ • $w_1 = w_2 R (Pc)$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $\lambda_1^* \frac{\partial T}{\partial x} 1 = \lambda_2^* \frac{\partial T}{\partial x} 2$ • $T_1 = T_2$ • $\rho_1 \left(D w_1 \frac{\partial w}{\partial x} 1 + D t_1 \frac{\partial T}{\partial x} 1 \right) = \rho_2 \left(D w_2 \frac{\partial w}{\partial x} 2 + D t_2 \frac{\partial T}{\partial x} 2 \right) \leq FLUMAX$ • $w_1 \neq w_2$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $\rho_1 \left(D w_1 \frac{\partial w}{\partial x} 1 + D t_1 \frac{\partial T}{\partial x} 1 \right) = \rho_2 \left(D w_2 \frac{\partial w}{\partial x} 2 + D t_2 \frac{\partial T}{\partial x} 2 \right) \leq FLUAR$ • $w \leq w_{cr}, w_1 = w_2 \cdot S(\varphi)$ • $w \geq w_{cr}, w_2 = w_{cr}$

Tableau (2.01): Configuration des contacts [4].

5. Conclusion:

Les conditions et les performances de pose, les matériaux utilisés pour l'habillage des bâtiments sont des facteurs qui peuvent déterminer le type et la qualité hydro-thermique de la paroi de construction.



CHAPITRE III
MODELISATION DES TRANSFERTS
COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE
DANS LES PAROIS

1. Introduction :

L'écriture d'un modèle mathématique, qui peut décrire les phénomènes couplés de chaleur et masse, nécessite la compréhension des phénomènes microscopiques, existant dans le milieu poreux à modéliser et les étapes à suivre pour le passage vers l'échelle macroscopique. La prise en considération de la variation de toutes les propriétés physiques du milieu dans le modèle présente une autre difficulté pour la résolution du problème.

La modélisation du transfert couplé de chaleur et de masse dans une paroi de construction verticale simple ou multicouche, est une nécessité pour la description de leur comportement énergétique et hydrique, et la définition des coefficients de transfert et leurs déterminations.

Les transferts couplés sont simulés numériquement en tenant compte de la composition des parois de construction, des phénomènes entrant en jeu et de la variation des conditions climatiques extérieures.

8. Approches de description des transferts :

La modélisation des transferts couplés chaleur-masse peut être effectuée selon trois approches générales suivant la description du milieu poreux :

- Description microscopique à l'échelle moléculaire inférieure à la longueur moyenne des pores est caractérisée par l'hétérogénéité due aux interfaces de contacts entre les phases composant le milieu poreux (solide, liquide et gaz)
- Description porale à l'échelle de la longueur moyenne des pores, au niveau de cette description les phases constituantes et le milieu poreux sont assimilés à des milieux continus.
- Description macroscopique à l'échelle supérieure à la longueur moyenne des pores, elle considère une homogénéité du milieu poreux.

9. Homogénéisation :

Les matériaux poreux sont des matériaux hétérogènes, possédant une structure géométrique très complexe à l'échelle microscopique. La description des processus physiques qui les concerne au niveau de cette échelle, devient délicate ou bien impossible, si on prend en compte

tous les hétérogénéités. Afin de décrire le comportement macroscopique de ces milieux hétérogènes, les auteurs les assimilent à des milieux continus homogènes équivalents ayant le même comportement en moyenne.

Plusieurs méthodes d'homogénéisation permettent, à partir d'une description microscopique des phénomènes physiques intervenant, d'obtenir un comportement macroscopique équivalent. L'échelle des hétérogénéités sera dite échelle microscopique, par opposition à l'échelle macroscopique, le milieu poreux ainsi défini, est continu et homogène (équivalent) [40].

3.3 Méthodes d'homogénéisation :

Trois grands types d'homogénéisation sont distingués [40] :

- L'homogénéisation par prise de moyenne (Travaux de **Whitaker**) [65] [66];
- L'homogénéisation périodique [67] [69];
- L'homogénéisation des milieux à microstructure aléatoire [68] [70].

3.4 La notion du volume élémentaire représentatif (VER) :

Les équations qui décrivent les transferts massiques et thermiques à l'échelle macroscopique, sont écrites en valeurs moyennes sur un volume (V). Les différentes grandeurs en un point donné, seront alors considérées avec leurs valeurs moyennes sur ce volume (V). La validité d'une telle démarche repose sur l'existence d'un volume de dimension caractéristique (r_0), qui soit élémentaire en comparaison avec la dimension macroscopique du milieu (L), mais de taille suffisante par rapport à la dimension microscopique des pores (l), pour que les valeurs moyennes observées soient statistiquement représentatives ($l \ll r_0 \ll L$). Ce qui précise les dimensions qui concernent les mesures et l'étude en général, des transferts dans les milieux poreux [41].

10. Modèles de séchage :

Les modèles fondamentaux sur le séchage sont : le modèle de diffusion, modèle à front d'évaporation, modèle de **Philip** et **De Vries**, modèle de **Luikov**, modèle de **Krischer**, et le modèle de **Whitaker**.

D'autres modèles se basent sur ces modèles de bases qui sont appliqués sur plusieurs

matériaux poreux. On peut citer les travaux suivants :

Bazant et Najjar (1971) [42] ont étudié le séchage du béton comme un problème de diffusion non linéaire, ils ont obtenus que pour un accord satisfaisant entre la théorie et les résultats de mesure, le coefficient de diffusion doit être considéré comme une fonction de l'humidité relative dans les pores (ou la teneur en l'eau). Ils ont montré que le coefficient de diffusion décroît fortement (à peu près 20 fois) en passant de l'humidité 0.9 à 0.6 dans les pores, tandis qu'au-dessous de 0.6 il apparaît comme constant.

Kari Hillebrand et al. [43] ont développé un modèle de séchage pour un milieu poreux hygroscopique, en utilisant un système appelé résidus du sol-atmosphère, en contribuant au modèle de séchage la teneur en eau initiale et le taux de chargement des résidus, d'autres variables introduites sont : la radiation solaire, la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse moyenne du vent, le volume moyen des particules des résidus. Ils ont trouvé un agrément de prédiction du temps de séchage calculé par le modèle avec les résultats expérimentaux.

H Amir et al. [44] (1987) ont décrit les transferts d'humidité et de chaleur dans une plaque épaisse d'un matériau poreux humide plongé dans un écoulement laminaire permanent d'air chaud parallèlement à sa surface déduite de la théorie de **Luikov**, par l'écriture des équations de la couche limite dans l'air (équation de continuité, du mouvement, de la chaleur et de la masse), ils les ont couplé en exprimant à l'interface air-produit, la continuité des flux thermiques et massiques, compte tenu l'évaporation de l'eau. La résolution du système différentiel ainsi obtenu par la méthode des différences finis implicite. Ils ont pu déterminer une évolution temporelle de la distribution spatiale des températures et des humidités.

11. Modèles de couplage hydro-thermique :

L'étude théorique des transferts de chaleur et de masse dans les éléments poreux non saturés et particulièrement dans les matériaux de construction est un thème important. Des travaux de recherches basées sur une variété des modèles sont développés, en utilisant les lois des bilans thermiques et massiques et l'équation de la diffusion, suivant [4] :

- Diffusion de la phase liquide (*Loi de Darcy*) ;
- Diffusion de la phase vapeur (*loi de Fick*) ;
- Diffusion thermique (*loi de Fourier*) ;

Plusieurs modèles de transfert hygrothermique sont utilisés pour la description du transfert hygrothermique dans les milieux poreux et spécialement les matériaux de construction.

5.3 Modèles utilisant une paroi simple :

5.3.1 Modèle de A. Degiovanni et C. Moyne (1987) :

Degiovanni et C. Moyne (1987) [13], ont développé un modèle des transferts couplés chaleur-masse en milieux poreux non saturés. La description de la géométrie du milieu est assimilée à un milieu continu homogénéisé par l'application des techniques de prise de moyenne. Ils sont basés sur les équations de conservation énergétique et massique en effectuant les différents bilans de toutes les phases fluides (air, liquide et vapeur), ils ont obtenu le système d'équation à résoudre, suivant :

$$\rho_o C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q}_c - L_v \nabla \cdot \mathbf{q}_v \quad (3.01)$$

$$\rho_o \frac{\partial X}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{q}_l + \mathbf{q}_v) \quad (3.02)$$

$$\rho_o \frac{\partial X_a}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q}_a \quad (3.03)$$

$$p_v(T, X) = \phi(T, X) p_{vs}(T) \quad (3.04)$$

5.3.2 Modèle d'Abahri et al (2011):

Abahri et al [45], ont exprimé un modèle de transfert hygrothermique, en se basant sur le modèle de *Luikov*. Ils ont présenté les équations de conservation d'énergie et de masse en introduisant le concept du potentiel de l'humidité m développé par *Qin et al*, et qui est défini comme une fonction linéaire de la teneur en eau :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho C_m (\sigma L_{iv} + \gamma) \frac{\partial m}{\partial t} \quad (3.05)$$

$$\rho C_m \frac{\partial m}{\partial t} = D \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + \delta D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.06)$$

Où :

$$m = C_m w \quad (3.07)$$

Dans ces équations les coefficients de transfert λ et D sont indépendantes de la température et de la masse.

5.4 Modèles utilisant une paroi multicouche :

Plusieurs auteurs ont consacré leurs travaux à l'étude des transferts couplés chaleur-masse dans les parois multicouches [57], [58], [59], [60], [61], [62] :

5.4.1 Modèle de N. Mendes et P.C Philippi (2005) :

N. Mendes et P.C Philippi (2005) [55], ont présenté une formulation mathématique appliquée à un solveur numérique robuste pour étudier le transfert couplé chaleur et masse d'un système monodimensionnel composé de deux couches de matériaux différent. En négligeant la résistance de contact thermique et massique entre les deux matériaux poreux A et B, et en utilisant la continuité :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_A = T_B \\ P_{CA} = P_{CB} \end{array} \right.$$

En déduisant une égalité entre les autres paramètres des deux matériaux à l'interface de contact ρ_v et φ .

L'équation de la conservation massique :

Les auteurs ont utilisé le modèle phénoménologique de *Philip* et *De Vries* et négligeant le terme de la gravité, pour écrire l'équation de conservation de masse suivante :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (D_w \nabla w_i) + \nabla \cdot (D_T \nabla T) \quad (3.08)$$

Où :

$$D_T = D_{TL} + D_{TV}$$

$$D_w = D_{wL} + D_{wV}$$

D_{TL} : est le coefficient de transport de la phase liquide associé au gradient de température ;

D_{TV} : est le coefficient de transport de la phase vapeur associé au gradient de température ;

D_{wL} : est le coefficient de transport de la phase liquide associé au gradient de la teneur en eau ;

D_{wV} : est le coefficient de transport de la phase vapeur associé au gradient de la teneur en eau.

En tenant en compte l'hypothèse de la modélisation unidimensionnelle (1-D) l'équation (3.08) devient:

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.09)$$

L'équation de conservation d'énergie :

En effectuant le bilan énergétique sur le volume élémentaire représentatif, Ils ont déduit

l'équation de conservation énergétique suivante :

$$\rho_0 C_m \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla q - L \nabla j_v \quad (3.10)$$

j_v est le flux de vapeur d'eau du modèle de *Philip* et *De Vries*.

Donc :

$$\rho_0 C_m(w) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(w, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L(T) \rho_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tv}(w, T) \frac{\partial T}{\partial x} + D_{wv}(w, T) \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.11)$$

Ce système est résolu par une méthode numérique utilisant une technique appelée algorithme multi-matrice tridiagonale (*MTDMA*) (Multi Tri-Diagonal-Matrix Algorithm).

5.4.2 Modèle de Qin et al (2009) :

En 2009, *M.Qin et al* [27], ont proposé un modèle mathématique dynamique pour simuler un transfert couplé de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche.

Ils sont adoptés le flux d'humidité proposé par *Nilsson* :

$$q_m = q_v + q_1 = -\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{k_p P_e}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} = (\delta_v + \delta_1) \frac{\partial v}{\partial x} = -\delta \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.12)$$

Introduisant une correction sur cette équation :

$$q_m = -\delta \frac{\partial v}{\partial x} - D_\tau \frac{\partial T}{\partial x} = -\delta \frac{\partial v}{\partial x} - \xi \delta \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.13)$$

Ils considèrent la chaleur due au changement de phase, l'adsorption et désorption comme une source ou un puits de chaleur.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho C_m (\sigma L_{lv} + \gamma) \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.14)$$

$$\rho C_m \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\xi \delta \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (3.15)$$

Pour les interfaces entre les couches de la paroi, ils ont adopté une continuité de température et de l'humidité :

$$T(l_n, t) = T(l_{n+1}, t) \quad n=1, 2, 3 \dots n-2 \quad (3.16)$$

$$v(l_n, t) = v(l_{n+1}, t) \quad n=1, 2, 3 \dots n-2 \quad (3.17)$$

12. Modèle de transfert proposé:

6.12 Critères du choix de notre modèle :

Le but de ce modèle est la détermination des évolutions instationnaires des profils des propriétés hydro-thermiques et énergétiques dans deux types de paroi, soit simple ou multicouches pour deux types des conditions aux limites, soit constantes ou variables. Les conditions aux limites périodiques sont les mieux pour illustrer des profils lisibles et comparables.

Pour pouvoir mieux illustrer l'effet du couplage des transferts instationnaires sur le comportement énergétique d'une paroi, le modèle de couplage des équations des transferts le plus simple est le modèle de diffusion. Il est tout à fait adapté et suffisant pour aboutir à notre but.

6.13 Hypothèses du modèle :

Ce modèle considère l'étude d'une paroi verticale de construction. Il propose les hypothèses suivantes :

- Les milieux sont des milieux homogènes ;
- Les transferts sont en régime instationnaires et unidimensionnels ;

- L'effet de la gravité est négligeable ;
- Les potentiels de transport sont la température et la saturation en eau ;
- Les coefficients de conductivité thermique et de diffusivité massique sont des fonctions de la saturation en eau ;
- Les effets Duffor et Soret sont négligeables ;
- Le changement de phase au cours du transfert et la chaleur latente due au changement de phase ou les réactions chimiques sont négligeables ;
- Les matériaux sont non hygroscopiques ;
- L'échelle de transfert est une échelle macroscopique ;
- Les écoulements sont incompressibles ;
- Les masses volumiques et les chaleurs spécifiques des milieux sont constantes ;
- L'hystérésis d'adsorption et désorption est négligeable ;
- L'effet du rayonnement thermique est négligeable ;
- La paroi ne contient pas une lame d'air ;

Au niveau des interfaces entre les couches dans le cas de la paroi multicouches, il adopte une continuité thermique et massique.

6.14 Domaine de validité de notre modèle :

Notre modèle est valide pour les intervalles, dont le phénomène de changement de phase est négligeable.

6.15 Equation de transfert massique :

L'équation différentielle caractérisant le transfert massique instationnaire, est basée sur la loi de *Fick* est :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial S}{\partial x} \right) \quad (3.18)$$

6.16 Equation de transfert thermique :

Le processus de transfert de chaleur dans les milieux poreux prend généralement trois mécanismes, transfert par conduction, convection et sous une chaleur latente portée par la vapeur d'eau. En négligeant le transfert convectif, le flux de chaleur s'écrit à l'échelle macroscopique.

$$q_c = -\lambda \text{ grad } T + L_v q_v \quad (3.19)$$

On adopte l'équation de conservation d'énergie simplifiée qui décrit le transfert thermique monodimensionnel dans une paroi poreuse humide basée sur la *loi de Fourier* :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_c \quad (3.20)$$

6.17 Couplage des équations de transfert thermique et massique:

Le transfert thermique est lié au transfert massique avec la dépendance de la conductivité thermique de la saturation en eau. La diffusivité thermique est une fonction de la saturation. Donc la saturation conduit le transfert thermique et massique.

$$\lambda_e = f(S) \quad (3.21)$$

$$D = g(S) \quad (3.22)$$

6.18 Concept de la conductivité thermique effective :

Dans ce travail, on utilise la notion de la conductivité thermique effective, qui est une dérivée directe de l'équation de conduction thermique. Donc, en considérant le milieu poreux comme un milieu homogène équivalent et pour déterminer la densité de flux de chaleur q dans un milieu poreux, plusieurs auteurs utilisent souvent l'équation suivante.

$$\vec{q} = \lambda_{\text{eff}} \vec{\text{grad}} T \quad (3.23)$$

La conductivité thermique effective n'a de sens que dans un volume élémentaire représentatif (VER) du matériau hétérogène, car il s'agit du volume au-dessus duquel la valeur de la conductivité thermique effective n'est plus soumise à des fluctuations dues à des hétérogénéités. Il s'agit donc du volume minimal représentatif pour considérer le matériau pris dans son ensemble comme équivalent à un milieu homogène.

La conductivité thermique effective dépend de la porosité, de la microstructure du matériau et des propriétés de ses constituants. Elle est d'autant plus difficile à estimer que la géométrie de la structure est complexe et que les conductivités thermiques des constituants sont différentes.

6.19 Conditions aux limites :

Le calcul du transfert entre la paroi et l'ambiance qui l'entoure nécessite la détermination des coefficients de transfert par convection. Les coefficients de transfert de chaleur et de masse par convection peuvent être calculés d'une même manière par analogie.

Les conditions aux limites peuvent être constantes ou variables. Plusieurs auteurs utilisent des conditions aux limites variables ou périodiques pour leurs simulations. Dans la référence [57], les auteurs utilisent un modèle des conditions aux limites périodiques :

$$T = 20 + 10 \cos(0.000717 t)$$

$$\varphi = 0.65 + 0.15 \cos(0.000717 t)$$

Dans ce travail, on adopte des conditions aux limites de température utilisé dans [21], et des conditions d'humidité de types flux imposés.

$$T_{\text{int}} = \text{constant}$$

$$T_{\text{ext}} = 293 + 15 \cos (2\pi t / 48 \text{ heures})$$

6.20 Transfert de chaleur entre la paroi et l'ambiance :

La loi de *Newton* détermine la densité de flux de chaleur échangé par convection entre la surface de la paroi et l'air ambiant :

$$q = h (T_p - T_f) \quad (3.24)$$

h est le coefficient de transfert par convection, il dépend de plusieurs paramètres, comme la vitesse de l'air et les propriétés de la paroi. Il est calculé en fonction du nombre de *Nusselt*.

$$h = \frac{Nu \lambda}{l} \quad (3.25)$$

Pour une convection forcée, le nombre de *Nusselt* calculé en fonction de *Reynolds* et *Prandtl*. Pour un écoulement laminaire, on présente la formule suivante :

$$Nu = 0.332 Re^{0.5} Pr^{1/3} \quad (3.26)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (3.27)$$

Pour une convection naturelle : $Nu = f(Gr, Pr)$

6.21 Transfert de masse entre la paroi et l'ambiance :

La diffusion de la vapeur dans l'air libre est décrite par la loi de *Fick*, dont le flux de vapeur associé s'écrit :

$$\vec{q}_v = D_{va} \vec{\text{grad}} \rho_v \quad (3.28)$$

Le transfert de masse par convection est exprimé par la formule :

$$q_m = h_m (\rho_{v,s} - \rho_{v,\text{air}}) \quad (3.29)$$

h_m est le coefficient de transfert de masse par convection, il peut se calculé en fonction de **Sherwood**.

$$h_m = \frac{Sh \ D}{l} \quad (3.30)$$

Le nombre de **Sherwood** peut être calculé en fonction de **Reynolds** et **Schmidt**. Pour un écoulement laminaire forcé, on présente la formule suivante :

$$Sh = 0.332 \ Re^{0.5} \ Sc^{1/3} \quad (3.31)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{va}} \quad (3.32)$$

D_{va} : est le coefficient de la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air,

$$D_{va} = 26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{conditions normales})$$

6.22 Calcul de la masse volumique de la vapeur d'eau :

En considérant la vapeur d'eau comme un gaz parfait, l'équation d'état d'un gaz parfait est :

$$P V_v = n R T \quad (3.33)$$

En divisant par M :

$$\frac{P_v}{\rho_v} = \frac{RT}{M_v} \quad (3.34)$$

Donc :

$$\rho_v = P_v \frac{M_v}{RT} \quad (3.35)$$

On admet la masse volumique de la vapeur d'eau de la surface de la paroi est celle-ci de la saturation de la paroi.

$$\rho_{vs} = \frac{M_v}{R} \frac{P_{vsat_s}}{T_s} \quad (3.36)$$

La masse volumique de la vapeur d'eau dans l'air est exprimée par la formulation suivante :

$$\rho_{vair} = \frac{M_v}{R} \frac{P_{vair}}{T_{air}} \quad (3.37)$$

$$P_{vair} = \varphi_{air} P_{vsat_{air}} \quad (3.38)$$

$$\rho_{vair} = \varphi_{air} \frac{M_v}{R} \frac{P_{vsat_{air}}}{T_{air}} \quad (3.39)$$

La pression de saturation de la vapeur d'eau est exprimée en fonction de la température :

$$P_{vsat} = 9.81 \cdot 10^4 \cdot 10^{\left(5.978 - \frac{2225}{T}\right)} \quad (3.40)$$

13. Conclusion :

Ce modèle s'adapte suffisamment à étudier des transferts couplés de chaleur et de masse dans une paroi simple ou complexe. Les difficultés peuvent être liées à son application : introduction des différents paramètres et la résolution mathématique des équations.



CHAPITRE IV
RESOLUTION NUMERIQUE DES
EQUATIONS DE TRANSFERT

1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la résolution des équations des transferts couplées de chaleur et de masse, en tenant compte des facteurs qui influent sur le processus physique. Il s'agit d'équations différentielles à dérivées partielles couplées. L'utilisation des méthodes analytiques est une difficulté inabordable. Les méthodes numériques sont plus adaptées.

Plusieurs méthodes sont citées dans la littérature pour la résolution des systèmes de ce type, on cite les méthodes suivantes :

- *Méthode spectrale*
- *méthode des éléments finis*
- *méthode des différences finies*
- *méthode des volumes finis*

Dans ce travail la méthode des volumes finis est adoptée. Pour la résolution du système d'équations, un code de calcul est écrit.

2. Résolution numérique :

2.1 Méthode des volumes finis :

La méthode a été décrite pour la première fois en 1971 par *Patankar* et *Spalding* et publiée en 1980 par *Patankar* [54], cette méthode est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (VC).

2.1.1 Principe de la méthode des volumes finis :

Au début, la méthode a été développée comme une formulation spéciale de la méthode des différences finies. Les différentes étapes de la mise en œuvre sont :

- Le domaine de calcul est discrétisé en un nombre fini de points (les nœuds du maillage), autour desquels on définit des volumes élémentaires (appelés volumes de contrôle) adjacents, non liés et sans discontinuités aux interfaces ;
- Les équations modèles, sous forme conservative, sont intégrées sur chaque volume de contrôle (VC) ;
- Les intégrales sur un volume de contrôle en un nœud donné sont évaluées en approchant la variation de la grandeur physique par des profils ou des lois d'interpolation entre les nœuds voisins du point considéré ;
- Écriture des équations algébriques en fonction des valeurs de la grandeur aux nœuds du maillage ;
- Résolution du système algébrique linéaire obtenu.

2.1.2 Les avantages de la méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis présente les avantages suivants :

- Une préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle (continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage ;
- La mise en œuvre relativement aux autres méthodes est plus facile ;
- Une facilité pour l'application aux géométries complexes ;
- Nécessite un temps de calcul et une mémoire de stockage dans le solveur de simulation raisonnables (matrice de type bande).

2.1.3 Maillage du système :

Il n'y a pas une méthode citée dans la littérature et utilisée dans la méthode des volumes finis pour définir le nombre et la tailles des mailles optimale pour un tel système à résoudre. Les résultats deviennent plus précis quand les mailles sont plus fines, mais le temps de calcul devient

plus grand. La méthode appliquée ici consiste en la réduction de la taille des mailles jusqu'à avoir la précision voulue.

Le système des nœuds est présenté à la figure (04.01) :

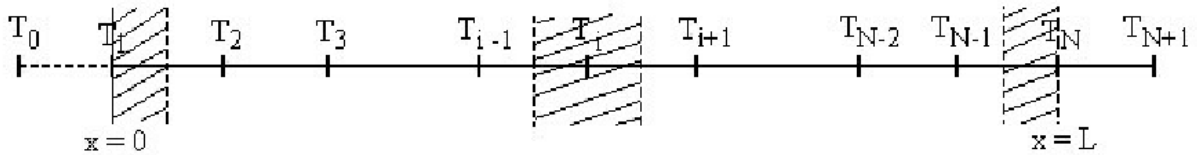


Fig. (04.01) maillage 1D du système

2.1.4 Les règles de base :

Patankar [54] a énoncé des règles (dites règles de **Patankar**), pour que le programme ne diverge pas. Les règles de **Patankar** sont :

– **Règle N° (01) Consistance du flux aux interfaces des volumes de contrôle :**

Si une interface est commune à deux volumes de contrôle, l'expression du flux à travers elle, dans les équations discrétisées, doit être la même pour les deux volumes de contrôle voisins considérés.

– **Règle N° (02) :**

Tous les coefficients a_p et a_{vs} doivent avoir le même signe dans l'équation discrétisée.

– **Règle N° (03) Pente négative dans le terme source linéarisé :**

Lors de la linéarisation du terme source :

$$S = S_c + S_p T_p \quad (4.01)$$

La pente S_p doit être inférieur à 0, car sinon on peut avoir $a_p < 0$ avec des $a_{vs} > 0$ (contraire à la règle N° 2).

– **Règle N° (04) :**

Les équations discrétisées doivent rester valables quand la valeur d'une variable dépendante augmente avec une valeur constante.

2.1.5 Linéarisation du terme source :

On doit avoir le terme source des équations discrétisées sous forme linéaire, Si le terme source q_c varie de façon non linéaire

$$q_c = q_c(T), \quad (4.02)$$

On écrit :

$$q_c = S_c + S_p T_P, \quad (4.03)$$

Où S_c est un terme constant (indépendant de la température). Il faut linéariser q_c en fonction de T pour obtenir un système d'équations algébriques linéaires.

2.1.6 Notion du volume de contrôle :

La figure (04.02) montre la représentation du volume de contrôle utilisé pour le maillage d'un système unidimensionnel.

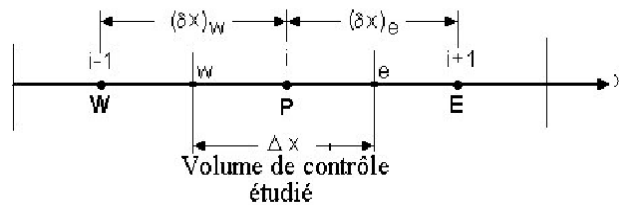


Fig. (04.02) Volume de control

2.2 Discrétisation des équations de transferts de chaleur :

L'équation caractérise le transfert de chaleur est :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_c \quad (4.04)$$

En intégrant l'équation (4.1) sur le volume de control VC et le pas dans le temps dt :

$$\rho C_p \int_w^e \int_t^{t+dt} \frac{\partial T}{\partial t} dt . dx = \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt . dx + q_c \quad (4.05)$$

Où

$$\rho C_p \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt . dx = \rho C_p \Delta x (T_p^1 - T_p^0) + q_c \quad (4.06)$$

Donc

$$\rho C_p \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{\lambda_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] dt + q_c \quad (4.07)$$

Où :

$$\int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [f T_p^1 + (1-f) T_p^0] \Delta t \quad (4.08)$$

En remplaçant la formule (4.5) dans la formule (4.4), on trouvera :

$$\rho C_p \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = f \left[\frac{\lambda_e (T_E^1 - T_p^1)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (T_p^1 - T_w^1)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[\frac{\lambda_e (T_E^0 - T_p^0)}{(\delta x)_e} - \frac{\lambda_w (T_p^0 - T_w^0)}{(\delta x)_w} \right] + q_c \quad (4.09)$$

En arrangeant :

$$a_p T_p = a_E [f T_E + (1-f) T_E^0] + a_w [f T_w + (1-f) T_w^0] + [a_p^0 - (1-f) a_E - (1-f) a_w] T_p^0 + q_c \quad (4.10)$$

Où :

$$a_E = \frac{\lambda_e}{(\delta x)_e} ;$$

$$a_w = \frac{\lambda_w}{(\delta x)_w} ;$$

$$a_p^0 = \frac{\rho C \Delta x}{\Delta t} ;$$

$$a_p = f a_E + f a_w + a_p^0 .$$

En utilisant le schéma totalement implicite ($f = 1$) :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_w T_w + b \quad (4.11)$$

Où

$$a_E = \frac{\lambda_e}{(\delta x)_e}$$

$$a_w = \frac{\lambda_w}{(\delta x)_w} ;$$

$$a_p^0 = \frac{\rho C \Delta x}{\Delta t} ;$$

$$b = S_c \Delta x + a_p^0 T_p^0$$

$$a_p = f a_E + f a_w + a_p^0 - S_p \Delta x.$$

Pour la résolution de l'équation linéaire algébrique (4.11) on utilise la méthode d'élimination Gaussienne standard, cet algorithme est appelé l'algorithme de **Thomas** ou **TDMA** (*tri-diagonal matrice algorithm*)

2.3 Algorithme TDMA pour couplage des équations de transfert:

Cet algorithme a été développé par **Patankar** (54), il permet de calculer la solution d'un système linéaire de la matrice tridiagonale. Les équations discrétisées dans le système linéaire algébrique s'écrivent :

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + b_i \quad 1 \leq i \leq N \quad (4.12)$$

$$a_m S_i = b_m S_{i+1} + c_m S_{i-1} + b_m \quad 1 \leq i \leq N \quad (4.13)$$

Pour le cas des conditions aux limites constantes, on adopte l'algorithme **TDMA** suivant :

1. Introduction des propriétés de système :

- L'épaisseur e de paroi et la taille du nœud Δx (on a adopté une taille du nœud constante);
- Détermination du nombre des nœuds N ;
- Le temps de calcul et le pas dans le temps Δt ;
- Détermination du nombre des incréments dans le temps ;
- Les propriétés physiques de la paroi : ρ et C_p ;
- Les conditions initiales ;
- Les conditions aux limites

2. Initiation de temps $t = \Delta t$

3. Début de la boucle de l'incrémementation
4. Calcul des conductivités thermique et des diffusivités massique en fonction des S_i précédentes ;

5. Calcul des coefficients :

$a_i, b_i, c_i, \text{ et } d_i$

6. Calcul de P_1 et Q_1 en utilisant les formules :

$$P_1 = \frac{b_1}{a_1} \quad \text{Et} \quad Q_1 = \frac{d_1}{a_1} \quad (4.14)$$

7. En utilisant la récurrence pour calculer P_i et Q_i pour $i=2\dots N$ en utilisant les formules suivants :

$$P_i = \frac{b_i}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (4.15)$$

$$Q_i = \frac{d_i + c_i Q_{i-1}}{a_i - c_i P_{i-1}} \quad (4.16)$$

Où :

$$c_1 = 0 ; \quad \text{et} \quad b_N = 0$$

8. Posant :

$$T_N = Q_N$$

9. On utilise la formule de récurrence :

$$a_i T_i = P_i T_{i+1} + Q_i \quad (4.17)$$

Pour calculer les températures aux nœuds $i=N-1\dots 1$

10. On fait un test de convergence selon la précision voulue :

$$\frac{|T_i^k \text{ moy} - T_i^{k+1} \text{ moy}|}{|T_i^k \text{ moy}|} \leq \text{eps}_i \quad (4.18)$$

– si la condition est réalisée, continuer, sinon affecter les valeurs de T_i^{k+1} aux valeurs de T_i^k et retourner à l'étape (N° 4) ;

11. On refait les mêmes étapes avec la deuxième équation (4.10), et on calcule les S_i

12. On refait un autre test de convergence :

$$\frac{|S_i^k \text{ moy} - S_i^{k+1} \text{ moy}|}{|S_i^k \text{ moy}|} \leq \text{eps}_2 \quad (4.19)$$

- si la condition est réalisée, continuer, sinon affecter les valeurs de S_i^{k+1} aux valeurs de S_i^k et retourner à l'étape (N° 12) ;
- 13. Enregistrement des valeurs de S_i et T_i ;
- 14. affecter la valeur de temps la valeur $t+\Delta t$ et retourner à l'étape (N° 4) dans une prochaine incrémentation.
- 15. Fin du programme.

- Pour le cas des conditions aux limites variables ou périodiques, on adopte les mêmes étapes utilisées dans l'algorithme précédent, en introduisant les conditions aux limites dans le début de la boucle de l'incrément de temps.

2.4 choix du pas dans le temps et la longueur :

On ne cite pas une méthode qui peut déterminer le pas dans le temps, et même que pour de la taille des mailles. Pour adopter un pas bien choisi, on détermine un pas un peu grand, on le diminue pour plusieurs simulations, jusqu'à l'obtention des résultats stables avec la comparaison. On choisit le plus grand pas dans la phase de stabilisation des résultats.

2.5 Traitement des conditions au surface de contact de deux couches :

2.5.1 Discrétisation des équations au niveau des extrémités :

a) Conditions de type température ou saturation imposée (Dirichlet) :

Pour ce type de conditions, la valeur de la température ou de la saturation du nœud d'extrémité intérieur ou extérieur est connue :

$$T_I = T_{imp\ i}$$

$$S_I = S_{imp\ i}$$

$$T_N = T_{imp\ e}$$

$$S_N = S_{imp\ e}$$

b) Conditions de type flux imposé (Neumann) :

Dans les nœuds d'extrémité, la densité du flux de thermique constante est imposée, on la traite comme un terme source.

$$q_1 = \underbrace{q_{imp1} + S_{c1}}_{S_c(n=1)} + S_{P1}T_{P1}, \quad (4.20)$$

$$q_N = \underbrace{q_{impN} + S_{cN}}_{S_c(n=N)} + S_{PN}T_{PN}, \quad (4.21)$$

Les termes constants de source de chaleur :

$$S_c(n=1) = q_{imp1} + S_{c1} \quad (4.22)$$

$$S_c(n=N) = q_{impN} + S_{cN} \quad (4.23)$$

c) Conditions de type mixte

Un échange thermique ou massique par convection s'effectue aux nœuds d'extrémités. Des coefficients d'échange thermique et massique de surface h_T , h_m constants caractérisent les densités des flux :

– Densités des flux thermique :

$$q_1 = h_i(T_{fi} - T_1), \quad (4.24)$$

$$q_N = h_e(T_{fi} - T_N), \quad (4.25)$$

– Densités des flux massique :

$$q_{m1} = hm_i(\rho_{fi} - \rho_1), \quad (4.26)$$

$$q_{mN} = hm_e(\rho_{fe} - \rho_N), \quad (4.27)$$

On utilise un nœud supplémentaire pour chaque extrémité $n = 0$ et $n = N+1$, et on traite ces nœuds comme le cas des conditions de température et de humidité relative imposées.

2.6 Discrétisation des équations de transferts de masse :

L'équation caractérise le transfert de masse est :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial S}{\partial x} \right) \quad (4.28)$$

Par analogie, on simule cette équation avec celle-ci du transfert de chaleur et en remplaçant ρC_p par 1, et en déduisant la même discrétisation. Généralement le transfert de masse dans les constructions s'effectue au sens inverse que le transfert de chaleur.

2.7 Discrétisation des équations de transferts de masse et de chaleur pour une paroi composée de plusieurs couches :

La discrétisation des équations de transferts pour une paroi multicouche est la même que celle-ci pour la paroi simple, en simulant les effets de contact aux conditions aux limites, en basant sur l'utilisation de la notion de continuité thermique et massique au niveau des contacts entre les couches [47].

La continuité de température et de masse peut être simulée à une condition à la limite de type « Dirichlet » par rapport à chaque couche.

2.8 Maillage du système au niveau des contacts :

Au niveau de contact entre deux couches adjacentes, on utilise des nœuds, qui se composent de deux demi nœuds extrêmes de ces couches, où le numéro des nœuds à chaque contact k est l_k , où k varie de un jusqu'au nombre des couches moins un.

Ces nœuds ont les propriétés suivantes :

On utilise une hypothèse que l'on peut appeler hypothèse des moyennes pour déterminer les caractéristiques des nœuds intermédiaires :

$$(\delta x)_{lk} = \frac{(\delta x)_{lk-1} + (\delta x)_{lk+1}}{2} \quad (4.29)$$

$$\rho_{lk} = \frac{(\delta x)_{lk-1} \rho_{lk-1} + (\delta x)_{lk+1} \rho_{lk+1}}{(\delta x)_{lk-1} + (\delta x)_{lk+1}} \quad (4.30)$$

$$C_{p_{lk}} = \frac{(\delta x)_{lk-1} C_{p_{lk-1}} + (\delta x)_{lk+1} C_{p_{lk+1}}}{(\delta x)_{lk-1} + (\delta x)_{lk+1}} \quad (4.31)$$

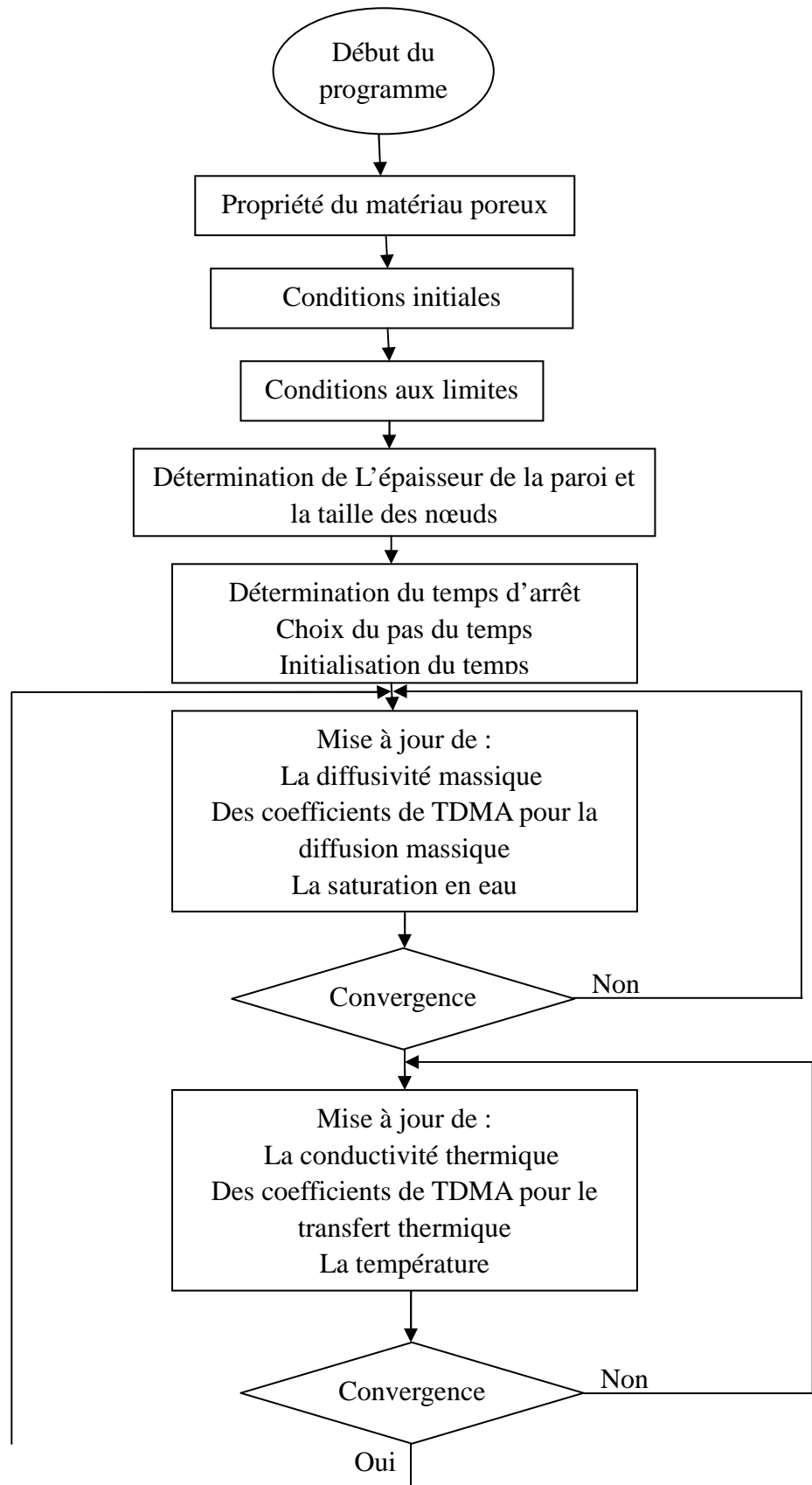
$$a_{lk} = \frac{\lambda_e}{(\delta x)_e} ;$$

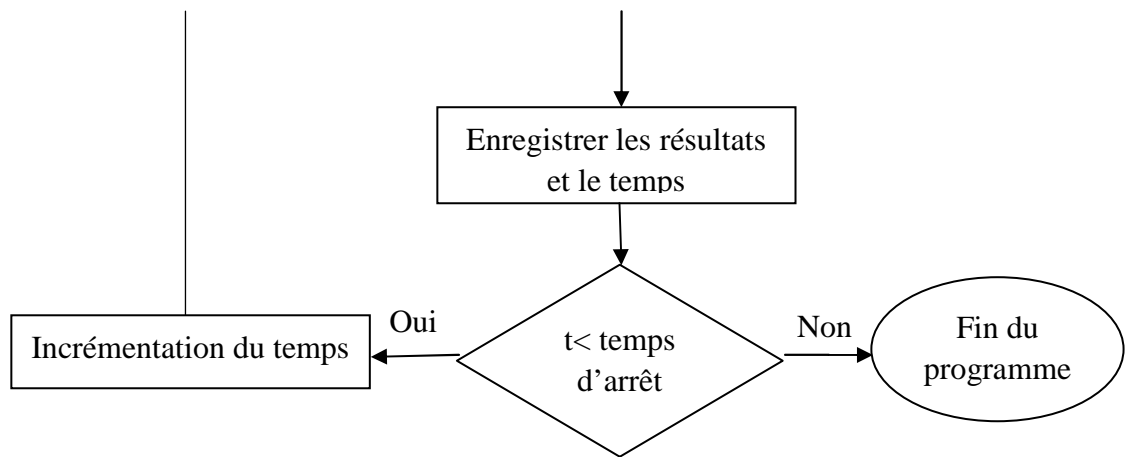
$$a_w = \frac{\lambda_w}{(\delta x)_w} ;$$

$$a_p^0 = \frac{\rho C \Delta x}{\Delta t} ;$$

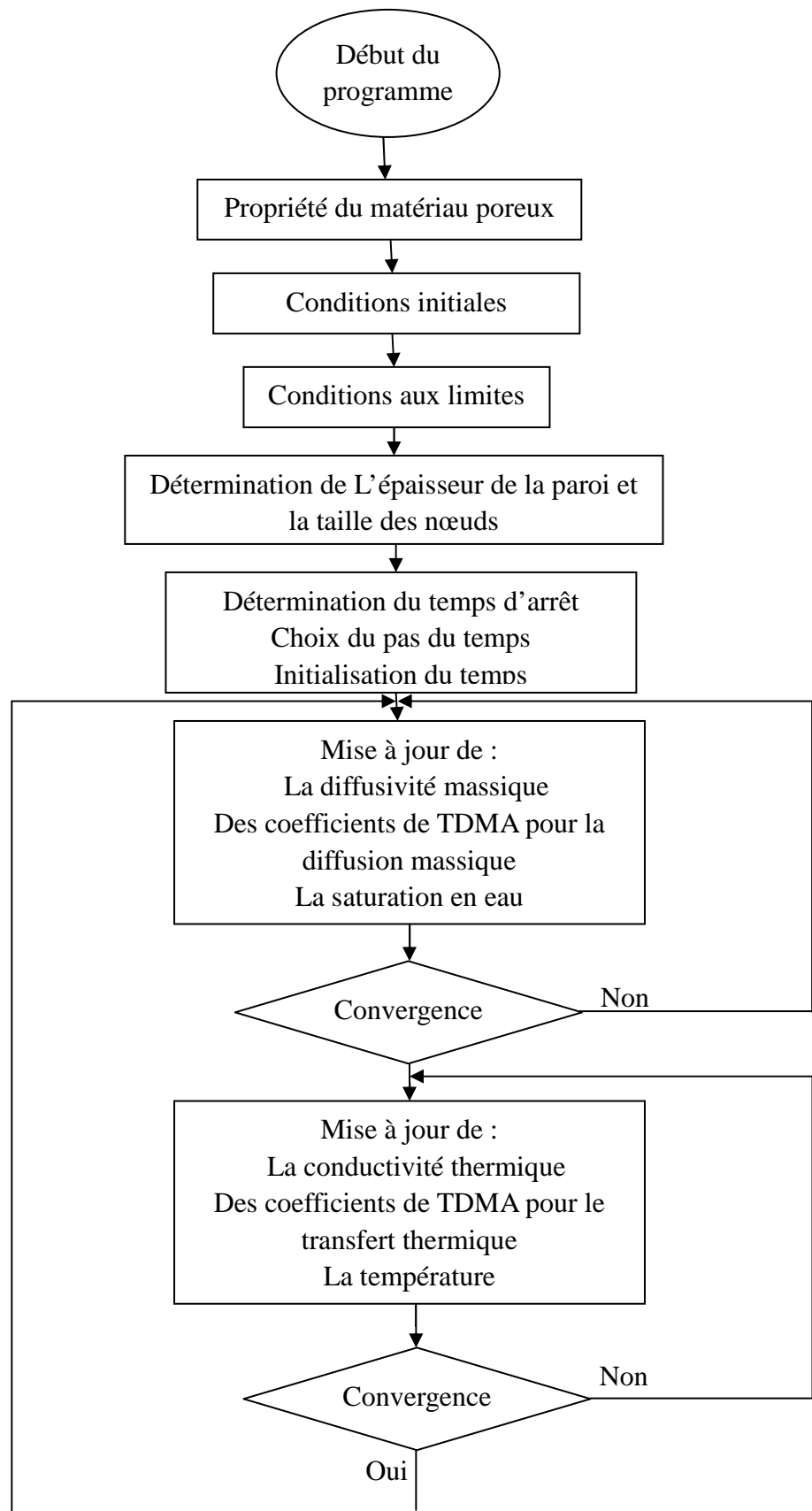
$$b = S_c \Delta x + a_p^0 T_p^0$$

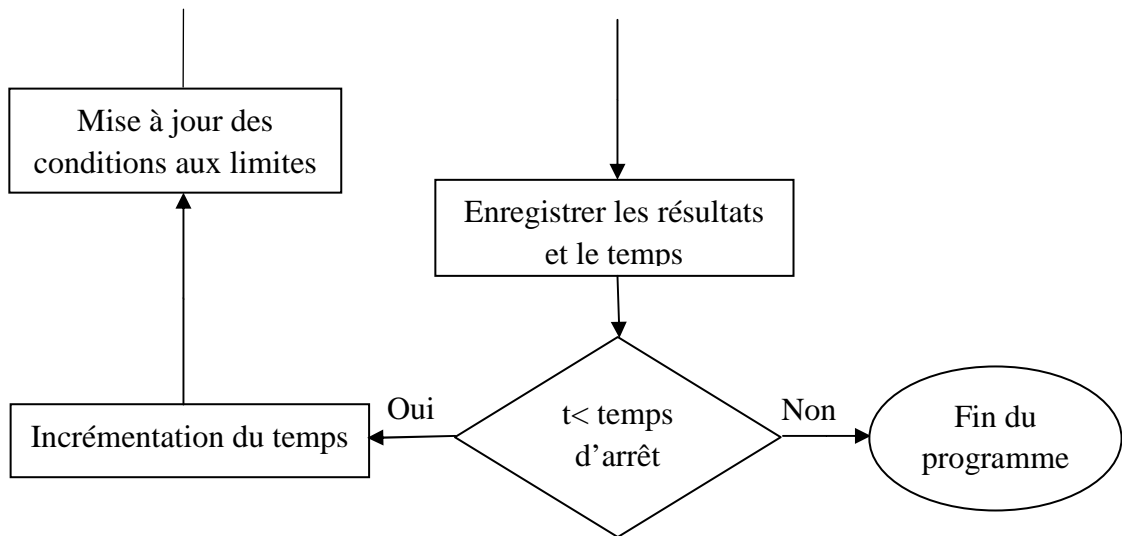
2.9 Organigramme pour le cas des conditions aux limites constantes:





2.10 Organigramme pour le cas des conditions aux limites variables:





3. Conclusion :

Le programme de calcul semble être consistant pour donner des résultats acceptables pour notre modèle. La bonne adaptation de la taille des nœuds et des pas d'incrémenter du temps permet d'obtenir les profils de la température et la saturation en eau, ainsi que les autres paramètres dans la paroi simple ou composée, en régime instationnaire.



CHAPITRE V
RESULTATS ET DISCUSSIONS

1 Introduction :

Dans ce chapitre, On présente les résultats obtenus à partir des simulations faites sur deux types de paroi, qui ont les mêmes épaisseurs, une paroi simple et une autre multicouche.

- On adopte des mêmes conditions initiales pour toutes les simulations :

$$T_{ini} = 293 \text{ K}$$

$$S_{ini} = 1$$

- On choisit les conditions aux limites de transfert massique de type flux imposé (*Neumann*) sur les deux côtés du système. On les fixe pour toutes les simulations faites.
- Les conditions aux limites de transfert thermique, sont de types mixtes (coefficient de transfert par convection h), on fait des simulations pour plusieurs cas:

- Le premier cas est pour des conditions aux limites constantes. En premier lieu, on fait la simulation avec une température extérieure supérieure que celle intérieure. En deuxième lieu, on inverse le flux thermique. On choisit un écart de température identique pour les deux cas (20 K).

On applique ces simulations sur les deux types de paroi :

- a) Paroi simple
 - b) Paroi multicouche
- Des conditions thermiques aux limites variables (périodiques) sont appliquées dans le deuxième cas, les conditions aux limites de la masse restent inchangées.

On applique cette simulation sur les deux types de paroi :

Remarque :

Dans les interprétations, on adopte le terme « transfert par conduction » pour tous les types de transfert thermique qui se déroulent dans le milieu poreux (la paroi).

2 Les parois utilisées pour notre modèle :

On a choisi deux types de paroi ont les mêmes épaisseurs pour étudier dans notre modèle et pour comparer la différence entre les transferts et l'influence des différents facteurs entrent en jeu.

- La première paroi est une paroi simple d'une épaisseur $e = 0.3$ m, composée d'une seule couche en béton cité dans [39].
- La deuxième est paroi de même épaisseur que la précédente. La composition multicouche est choisie arbitrairement.

paroi simple :

On propose une paroi simple verticale en béton renforcés en copeaux en bois d'une épaisseur $e = 0.3$ m Figure (5.01):

$$\rho = 2200 \text{ Kg/m}^3 ;$$

$$C_p = 840 \text{ J/kg K};$$

$$\lambda = \lambda(S) \text{ W/m K};$$

$$D = D(s) \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D(S) = 3.22 \cdot 10^{-10} \exp(6 S)$$

On a retenu la corrélation proposée par **Belhamri** et al. Qui décrit la relation entre la conductivité thermique du béton et la saturation en eau [39]

$$\lambda(S) = -0.41222 S^2 + 0.77459 S + 0.20601$$

Paroi multicouches :

On propose arbitrairement, une paroi multicouche verticale d'une épaisseur de 0.3 m, Figure (5.02), qui se compose en quatre couches dont les propriétés thermo-physiques différentes.

Composition de la paroi de l'intérieur vers l'extérieur :

- Couche en plâtre $e_1 = 0.01$ m :[15]

$$\rho_1 = 700 \text{ Kg/m}^3 ;$$

$$C_{p1} = 840 \text{ J/Kg K};$$

$$\lambda_1 = 0.25 \text{ W/m K};$$

$$D_1 = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Couche en brique pleine $e_2 = 0.15$ m :[17]

$$\rho_2 = 1700 \text{ Kg/m}^3 ;$$

$$C_{p2} = 960 \text{ J/Kg K};$$

$$\lambda_2 = 0.5 \text{ W/m K} ;$$

$$D_2 = 1.69 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Couche en polystyrène $e_3 = 0.04 \text{ m}$:

$$\rho_3 = 19 \text{ Kg/m}^3 ;$$

$$C_{p3} = 1280 \text{ J/Kg K};$$

$$\lambda_3 = 0.34 \text{ W/m K} ;$$

$$D_3 = 1.48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Couche en béton renforcé en copeaux en bois $e_4 = 0.10 \text{ m}$:

$$\rho_4 = 2200 \text{ Kg/m}^3 ;$$

$$C_{p4} = 840 \text{ J/Kg K};$$

$$\lambda_4 = \lambda(S) \text{ W/m K};$$

$$D_4 = D(S) \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\lambda(S) = -0.41222 S^2 + 0.77459 S + 0.20601 \text{ (Belhamri 2007)}$$

$$D(S) = 3.22 \cdot 10^{-10} \exp(6 S) \quad [45]$$

3 Conditions initiales :

On adopte la fixation des conditions initiales de la paroi étudiée.

- La température initiale de la paroi est de 293 K (20°C).
- On admet la paroi est totalement saturée à l'état initiale, $S_{ini} = 1$.

4 Simulations :

4.1 Simulation pour des conditions aux limites constantes :

On choisit les conditions aux limites suivantes :

- Température intérieure $T_{int} = 293 \text{ K}$ (20°C) ;
- Température extérieure est utilisée dans deux cas de simulation :
 - Cas (a) échauffement de la paroi : $T_{ext} = 313 \text{ K}$ (40°C) ;

- Cas (b) refroidissement de la paroi : $T_{\text{ext}} = 273 \text{ K} (0^\circ\text{C})$;
- Le coefficient d'échange thermique superficiel intérieur : $h_i = 9.1 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$;
- Le coefficient d'échange thermique superficiel extérieur : $h_e = 16.7 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$;
- Densité du flux massique intérieur : $q_{\text{mi}} = 0.00001 \text{ Kg/m}^2\text{s}$;
- Densité du flux massique extérieur : $q_{\text{me}} = 0.00004 \text{ Kg/m}^2\text{s}$.

4.1.1 Evolutions des propriétés des parois :

4.1.1.1 Evolution de la distribution de la diffusivité massique de la paroi simple en béton:

L'influence de la variation de la saturation en eau de la paroi en béton sur sa diffusivité massique est représentée dans les figures (5.01-s) au cours du temps. La diffusivité massique suit l'évolution de la saturation en eau du béton.

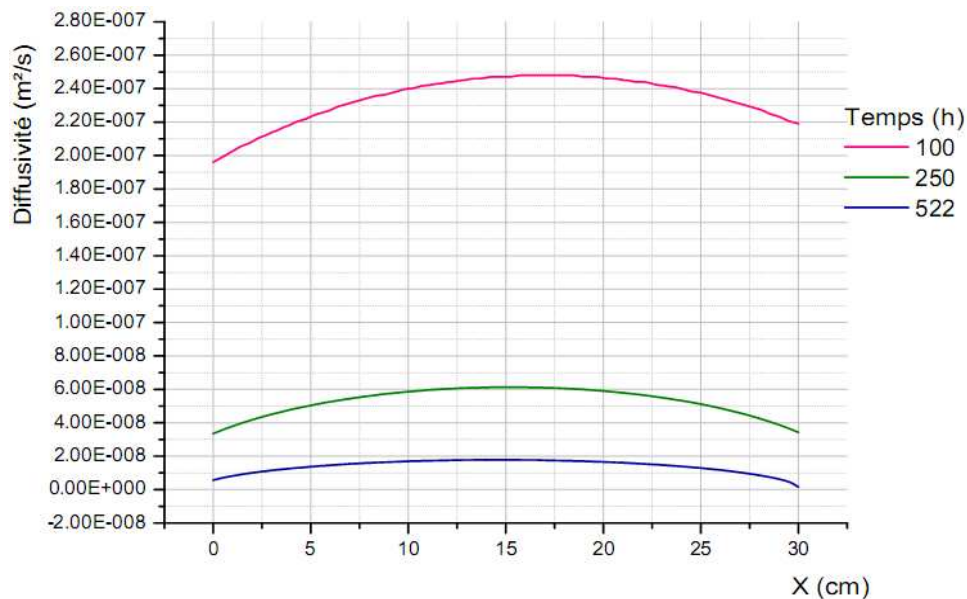


Fig. (5.01-s) : Evolution de la diffusivité de la paroi simple en béton

4.1.1.2 Distribution de la conductivité thermique de la paroi simple en béton:

La figure (5.02-s) représente l'évolution de la conductivité thermique de la paroi en béton avec sa variation de saturation en eau au cours du temps. Au premier temps, la conductivité thermique est presque constante le long de la paroi, après un temps un peu long elle diminue d'une façon non linéaire, d'un gradient plus important proche des surfaces extérieures, car elle

est une fonction de la saturation.

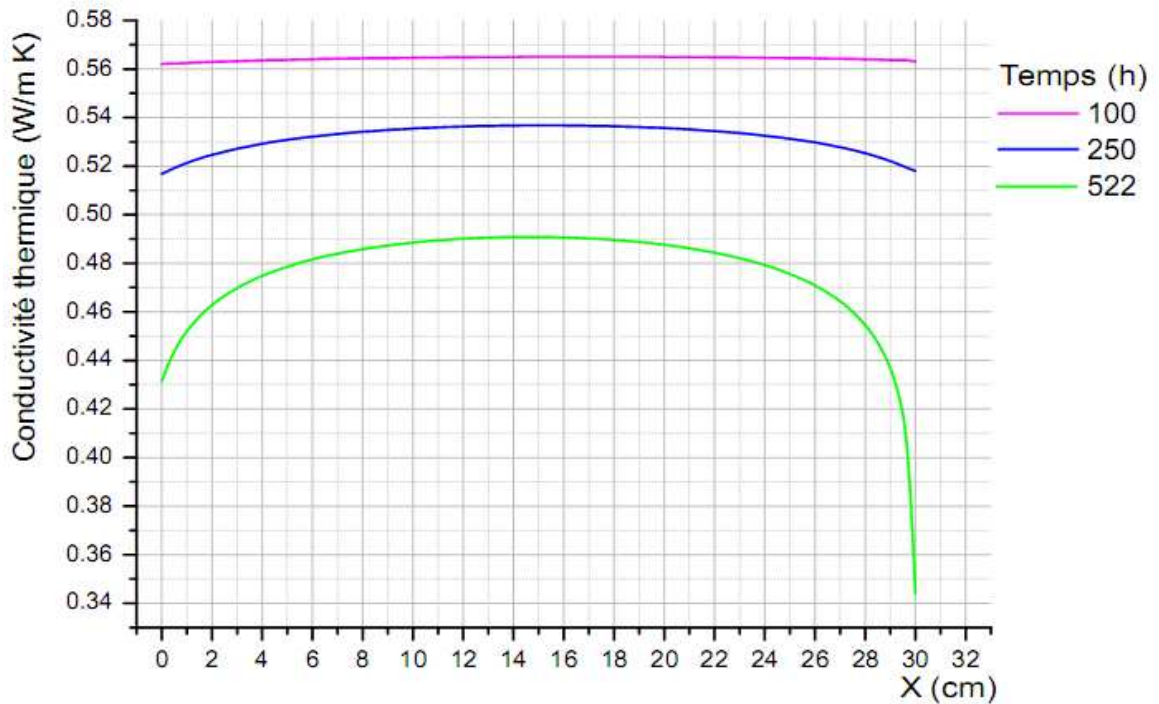


Fig. (5.02-s) : Evolution de la conductivité thermique de la paroi simple en béton

4.1.2 Evolution de la distribution de la diffusivité massique et la conductivité thermique de la paroi multicouche:

Les figures (5.03-c) et (5.04-c) représentent les variations de la diffusivité massique et la conductivité thermique avec la variation de la composition de la paroi multicouche en matériaux différents. Dans les surfaces de contacts entre les différentes couches, on a pris une discontinuité des valeurs aux niveaux des nœuds intermédiaires, ce qui est représenté dans ces figures.

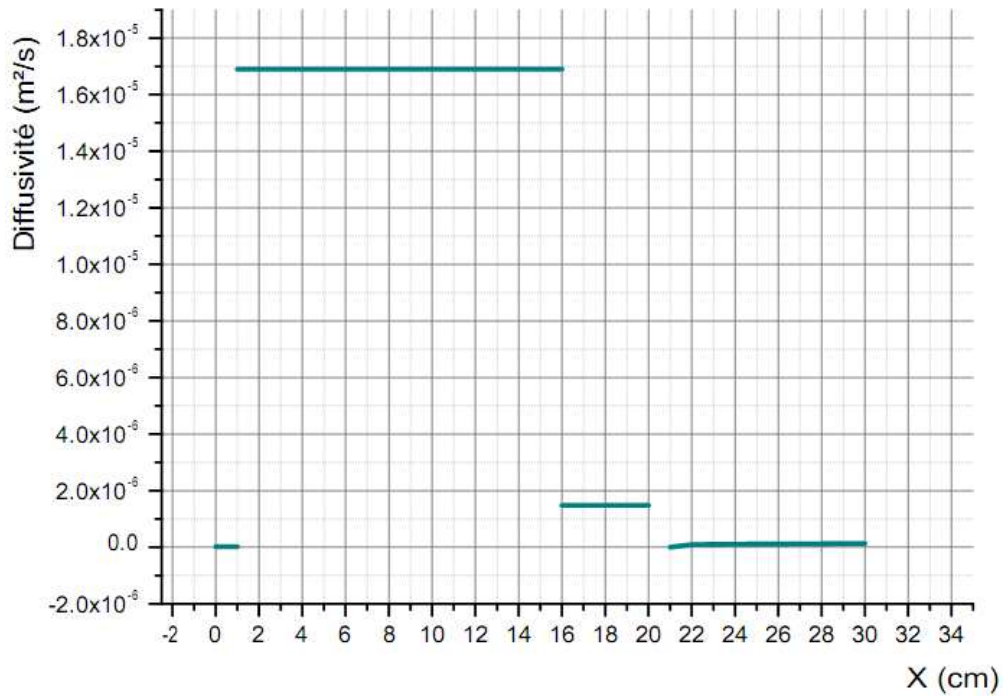


Fig. (5.03-c) : Distribution de diffusivité massique dans la paroi multicouche

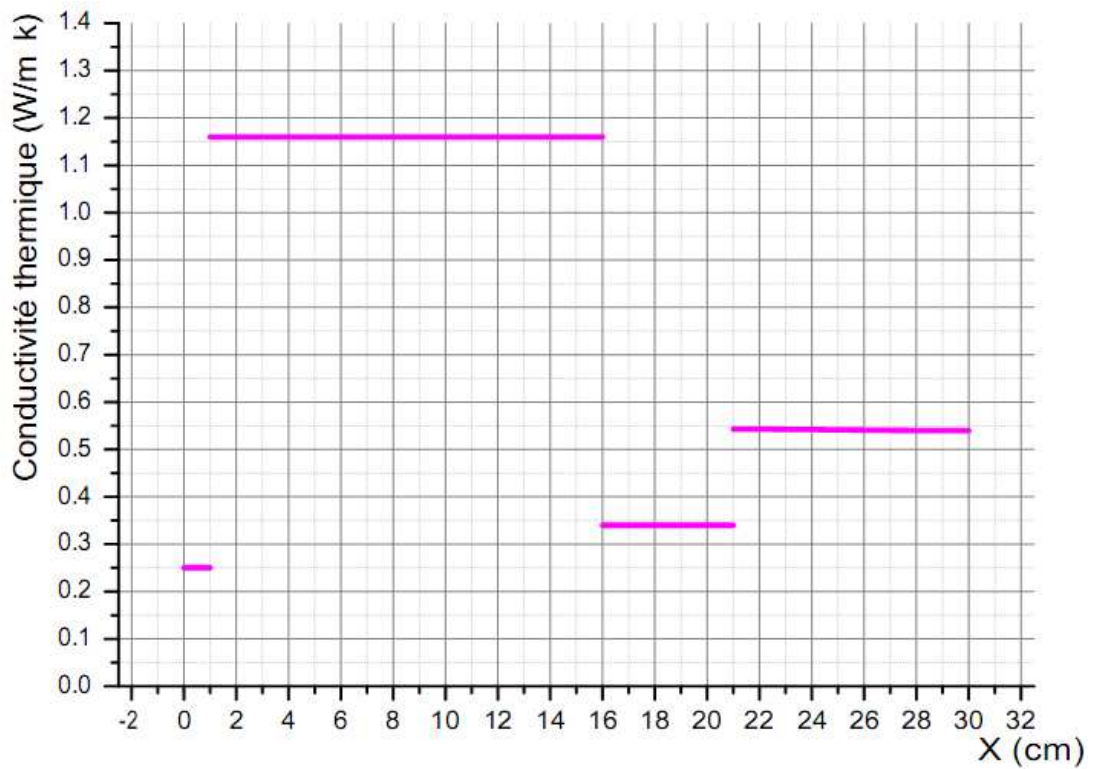


Fig. (5.04-c) : Distribution de conductivité thermique dans la paroi multicouche

4.1.3 Etude de la saturation des parois :

4.1.3.1 Evolution de la saturation en eau des parois au cours du temps :

Les figures (5.05-s) et (5.06-c) représentent l'évolution de la saturation dans la paroi simple en béton et dans la paroi multicouche au cours du temps. Le processus est un séchage. La saturation de la paroi diminue lentement de l'extérieur vers l'intérieur de la paroi. Le flux massique imposé engendre un gradient de saturation vers les centres des parois.

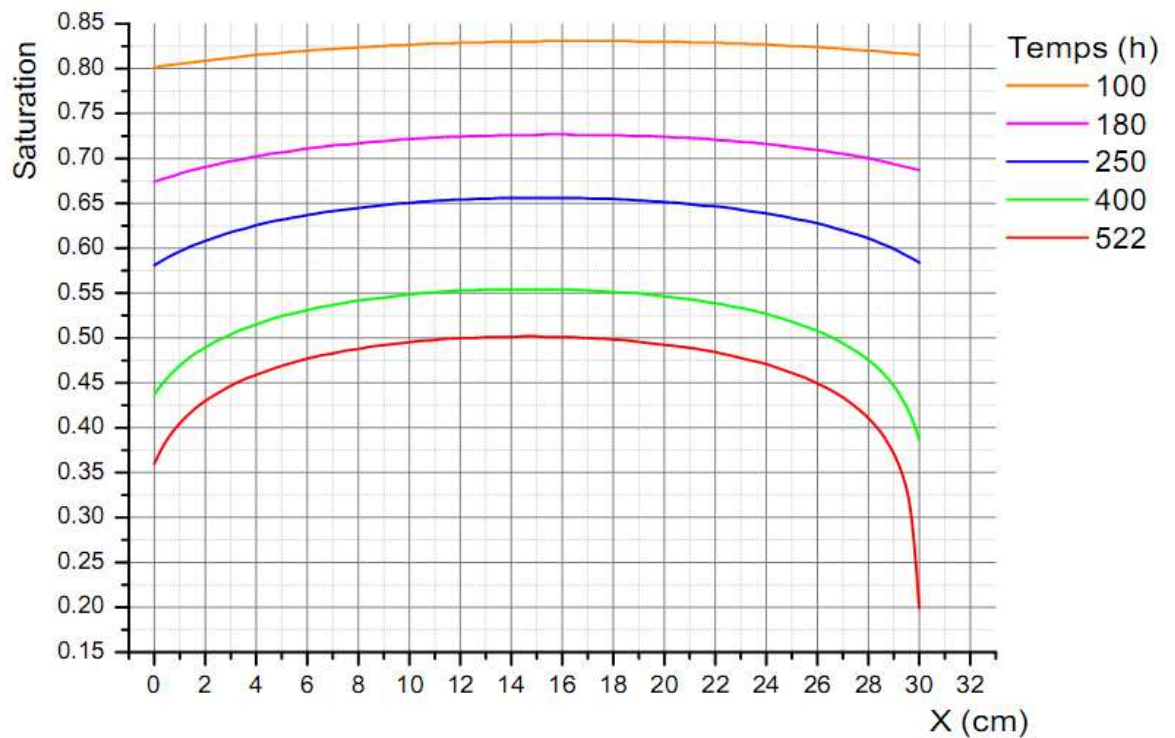


Fig. (5.05-s) : Evolution de la saturation de la paroi simple en béton

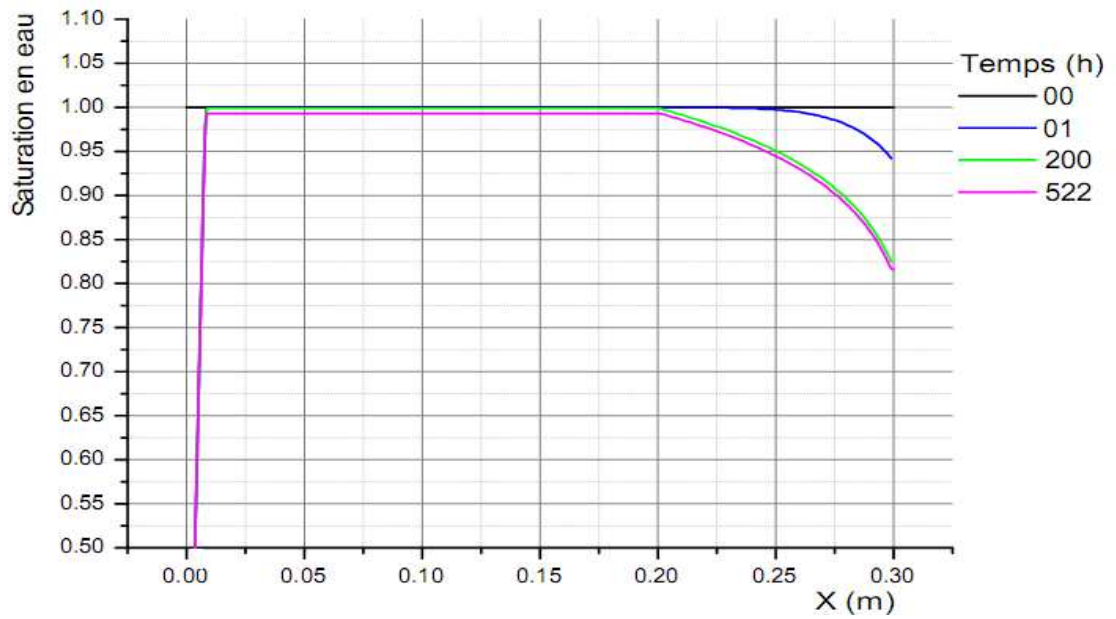


Fig. (5.06-c) : Evolution de la distribution de la saturation de la paroi multicouche

- Comparaison avec d'autres travaux

Nos résultats ont un bon agrément avec les travaux d'**A. A. J. KETELAARS** et al en 1995 [48] figure (5.07), et de **Fitsum Tariku et al** [49] figure (5.08), et de **K. Abahri et al** en 2011 [27.] figure (5.09)

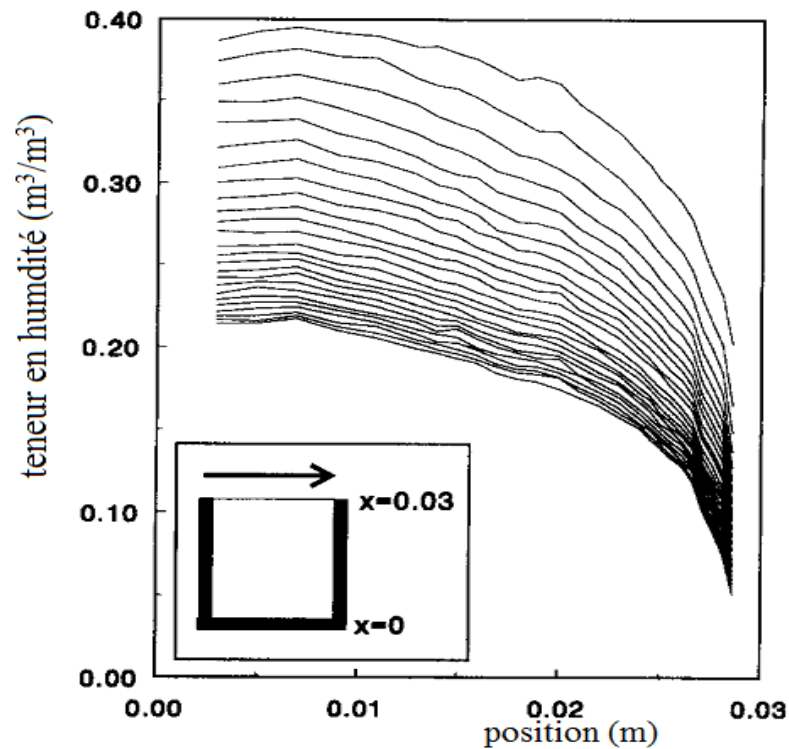


Fig. (05.07) Profil de concentration en humidité [48]

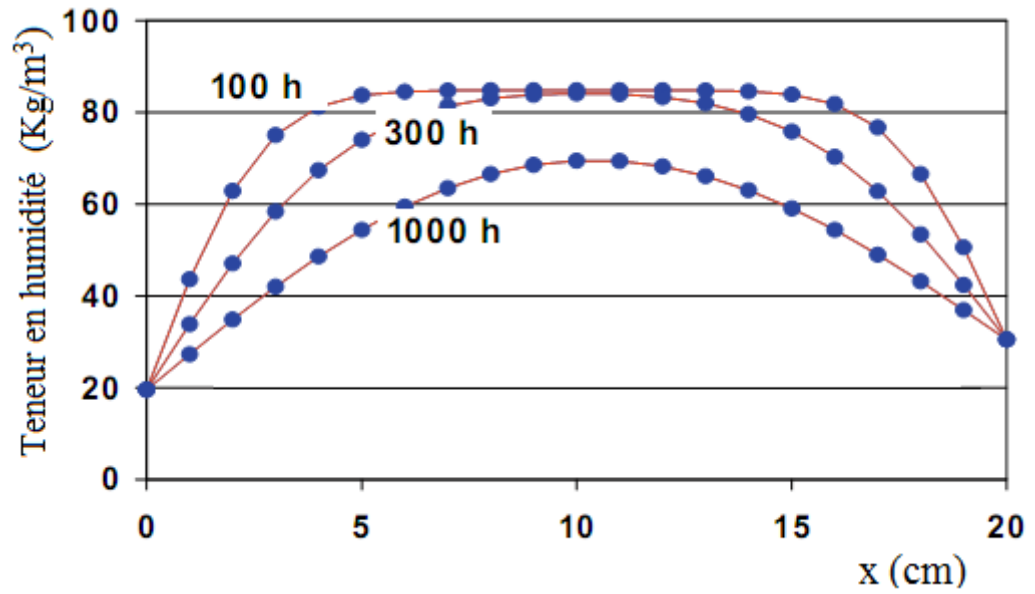


Fig.(5.08) profile de la teneur en humidité à partir d'une humidité initiale 80.8% [49].

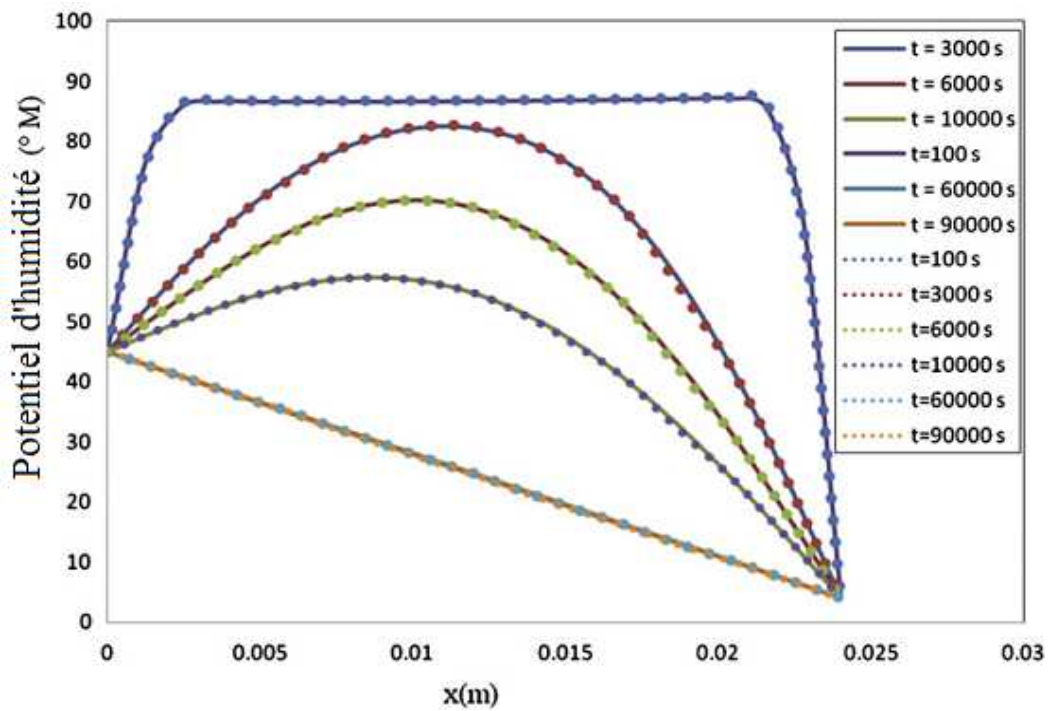


Fig. (5.09) comparaison des résultats de distribution du potentiel d'humidité analytiques et numérique [27].

4.1.3.2 Evolution de la saturation à la surface extérieure des parois :

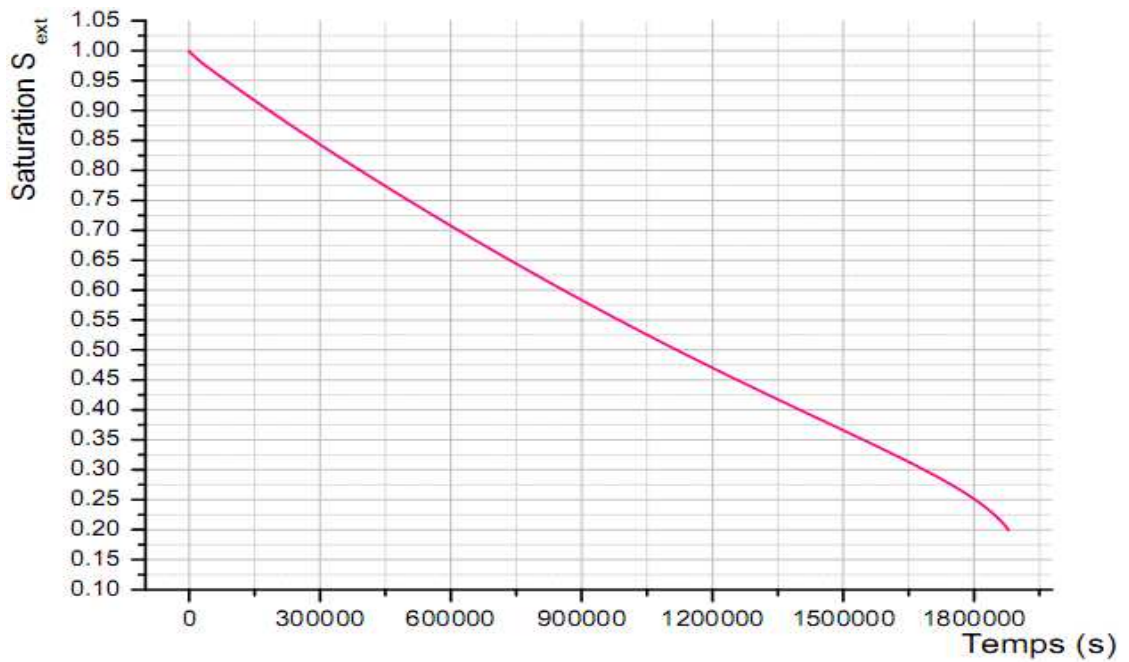


Fig. (5.10-s) : Evolution de la saturation à la surface extérieure de la paroi en béton ($X=30cm$)

4.1.3.3 Evolution de la saturation à la surface intérieure de la paroi :

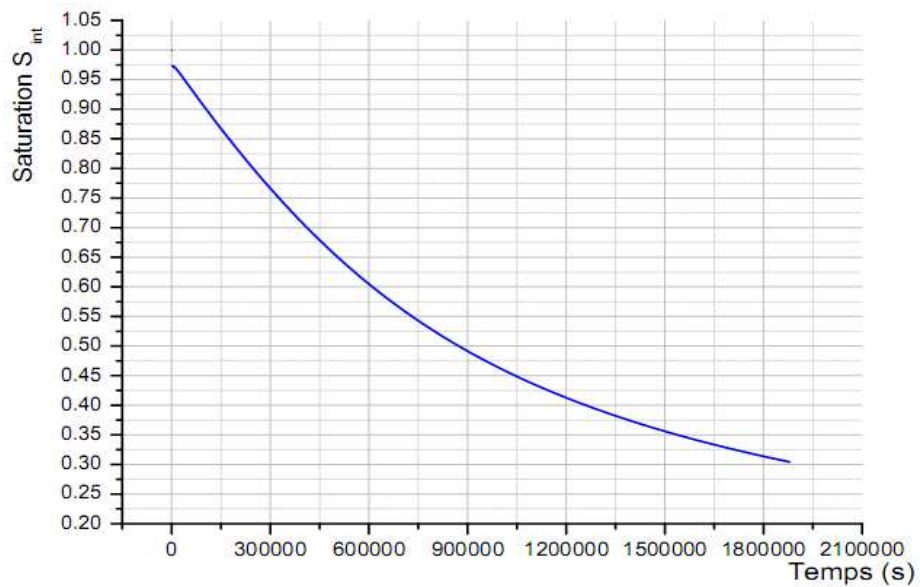


Fig. (5.11-s) : Evolution de la saturation à la surface intérieure de la paroi simple en béton ($X=0 cm$)

4.1.3.4 Evolution de la saturation au centre de la paroi :

La figure (5.12-s) montre l'évolution de la saturation au centre de la paroi ($X = 15$ cm), il apparaît un retard au débit de transfert puis, elle décroît lentement.

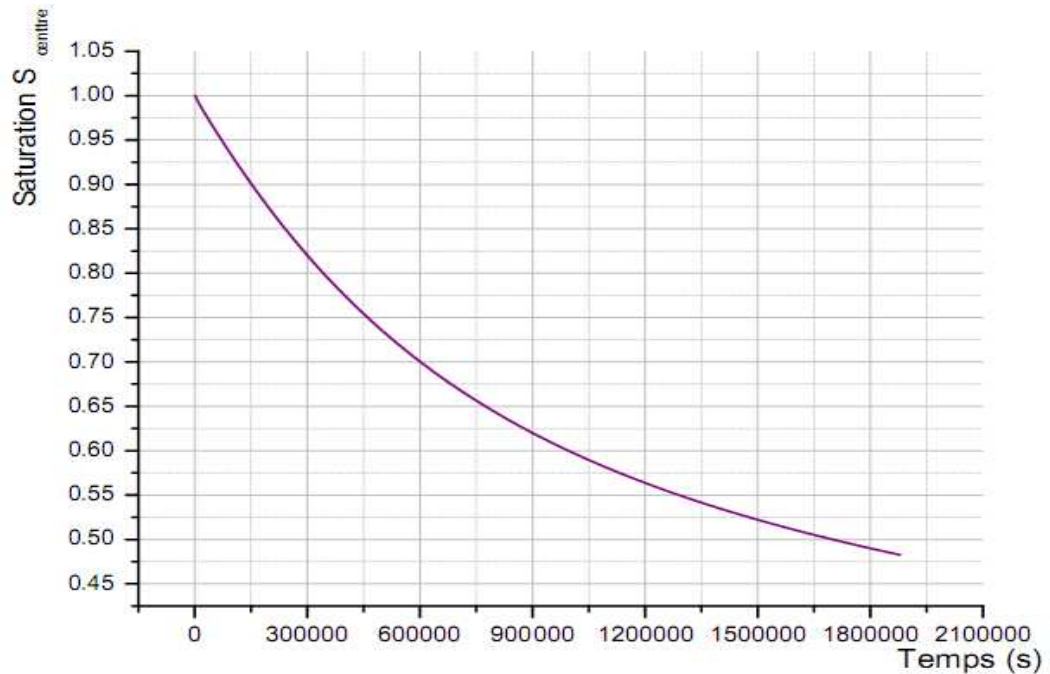


Fig. (5.12-s) : Evolution de la saturation au centre de la paroi en béton ($X=15$ cm)

- **Comparaison avec d'autres travaux :**

Les résultats sont bons à cause de leurs agréments avec les résultats de *A.A Ketelaars* en 1995, figure (5.13) [48].

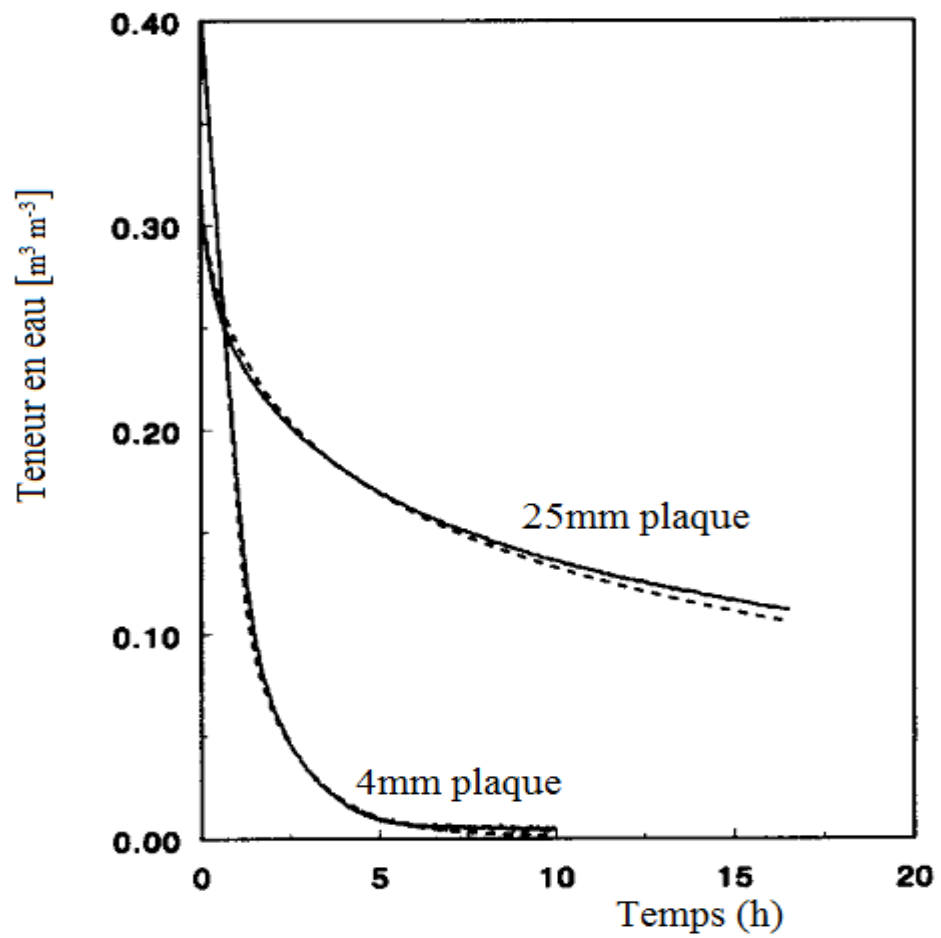


Fig. (5.13) Séchage d'une plaque en kaolin utilisant $D=f(S)$ [48].

4.1.4 Distribution de la température de la paroi :

Les figures (5.14 a-s) et (5.16 b-s) montrent l'évolution du profil instationnaire de la température dans la paroi pour des conditions aux limites constantes de types mixtes (des coefficients de transfert de convection intérieur et extérieur h_i et h_e différents et constants). Pour les deux cas, le cas (a) échauffement de la paroi, où la température de l'ambiance extérieure est supérieure à celle de l'ambiance intérieure (gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur $\Delta T = 20$ °C) et l'autre initiale de la paroi. Dans ce cas le flux thermique entrant de l'ambiance extérieure vers la paroi par la surface extérieure est plus important que celui-ci sortant de la paroi vers l'ambiance intérieure à travers la surface intérieure de la paroi, ce problème est représenté par les figures (5.14 a-s) et (5.15 a-c). On observe la différence entre les valeurs des densités des flux thermiques au niveau des surfaces des extrémités de la paroi. Le cas (b) la paroi se refroidit, suivant la température extérieure. Celle-ci est inférieure à celle intérieure et initiale de la paroi ($\Delta T = 20$ °C).

Dans les figures (5.15 a-c) et (5.17 b-c), l'influence de la composition de la paroi sur la distribution de la température est plus claire. Les matériaux ont un gradient de température plus important que les isolants. Dans les couches où les caractéristiques thermo hydriques supposées constantes, la distribution de la température est représentée par une droite, par contre dans la couche en béton où la conductivité thermique et la diffusivité massique sont des fonctions de la saturation en eau, la distribution de la température représentée par une ligne courbée. Entre les couches de la paroi, on observe la continuité de la température.

Au début du transfert thermique, le gradient de température est fonction de x . Après un certain temps, le régime de transfert thermique devient un régime quasi-stationnaire.

Dans les figures. (5.15-a-c), on observe que la couche en brique pleine utilisée n'est pas isolante, car la différence entre les températures des extrémités de la couche en brique sont moins importantes les différences des autres couches de la paroi multicouche.

• *Cas (a) : Echauffement de la paroi :*

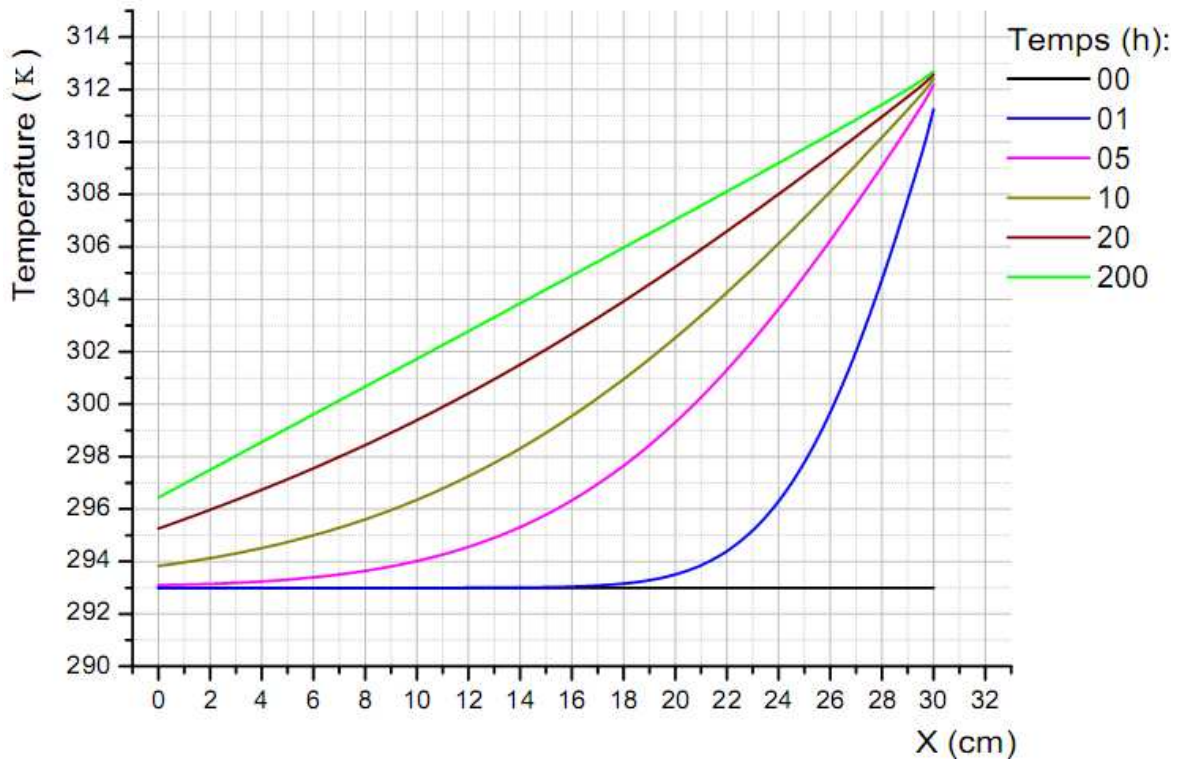


Fig. (5.14-a-s) : Evolution de la température de la paroi simple en béton

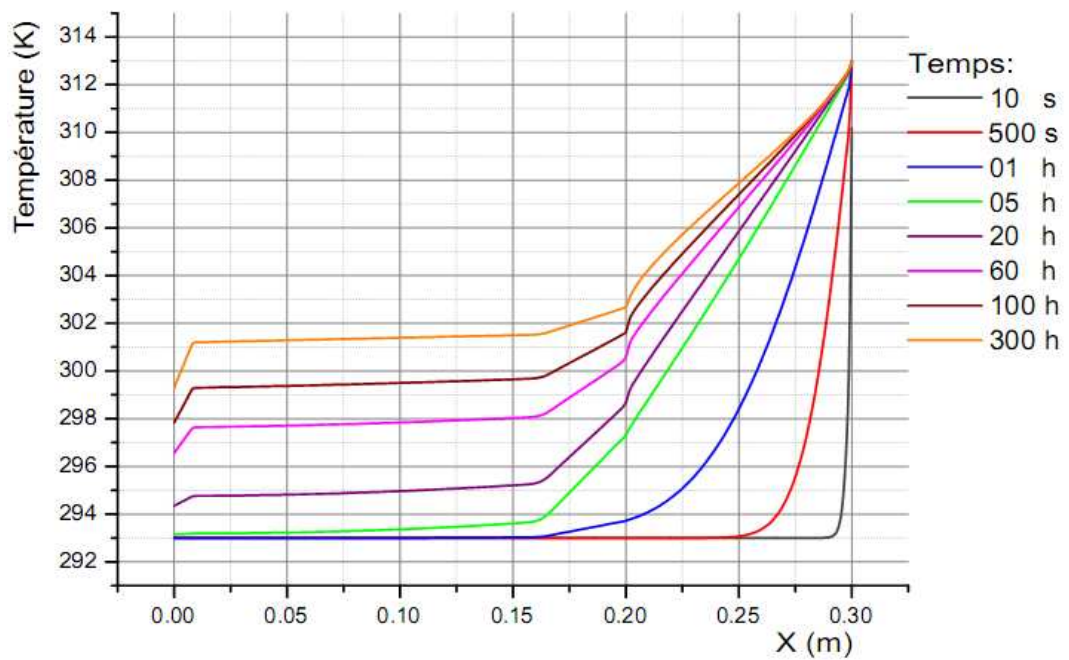


Fig. (5.15-a-c) : Evolution de la température de la paroi multicouche

• **Cas (b) : Refroidissement de la paroi :**

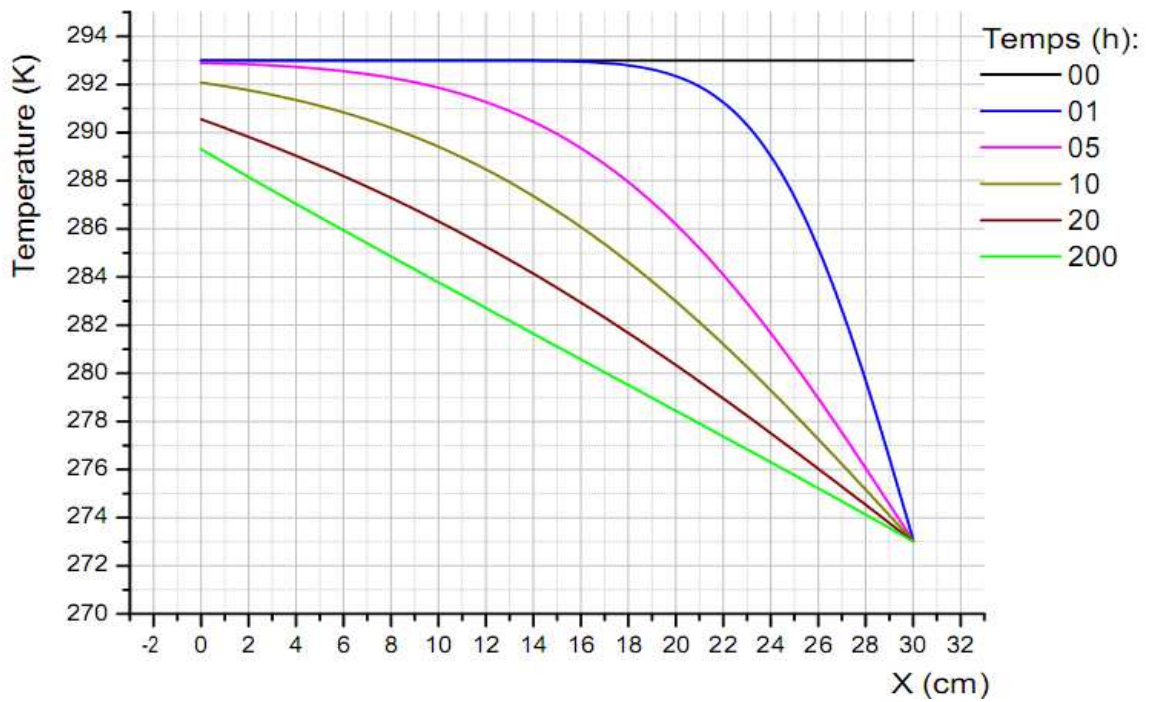


Fig. (5.16-b-s) : Evolution de la température de la paroi simple en béton (cas -b- refroidissement de la paroi)

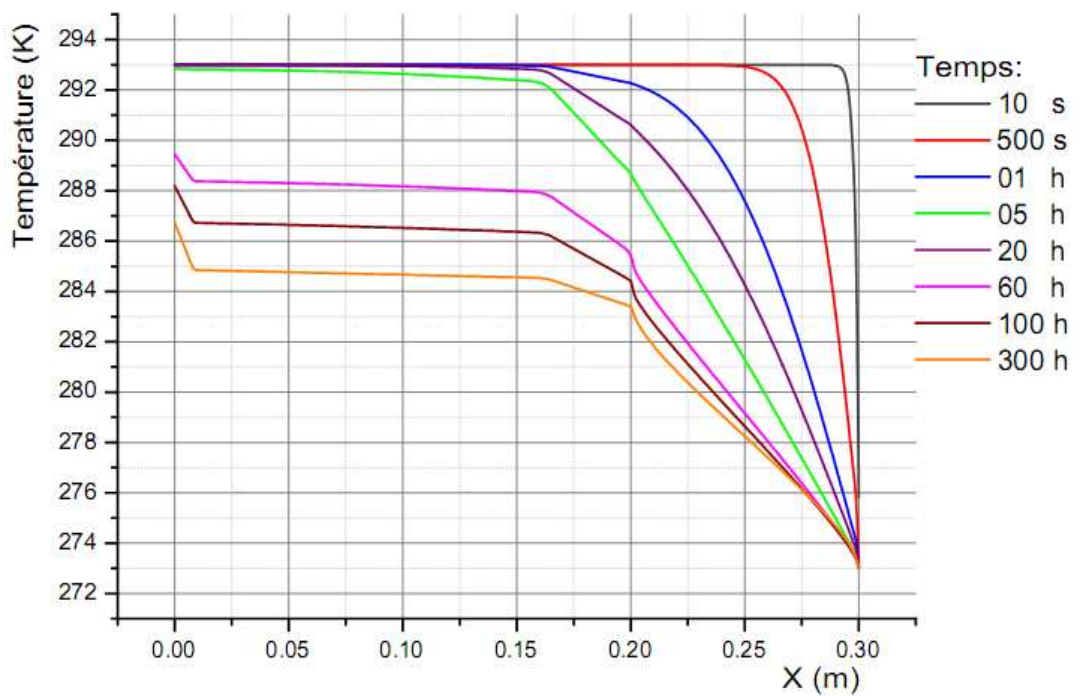


Fig. (5.17-b-c) : Evolution de la distribution de la température de la paroi multicouche

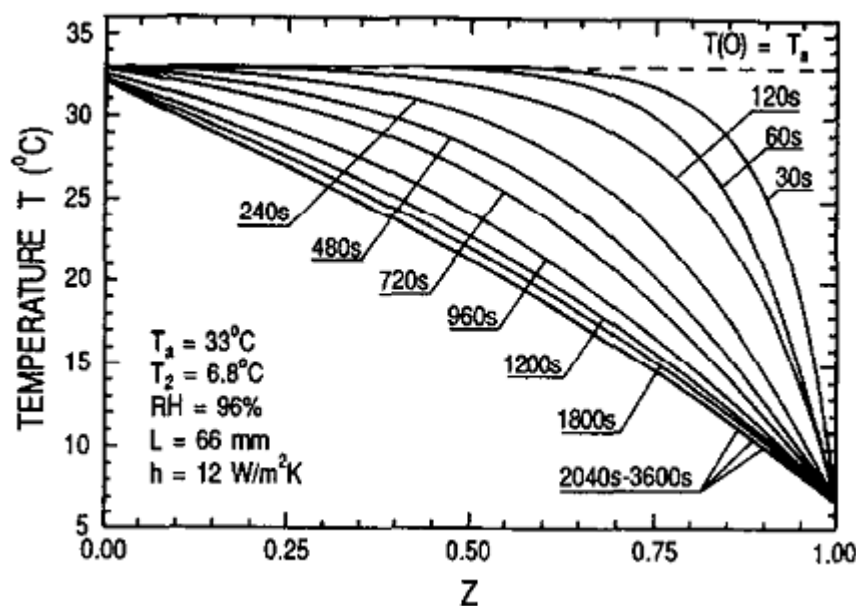
- *Comparaison avec d'autres travaux :*

N. E. WIJEYSUNDERA et *al* en 1996 [51], ont développé un modèle numérique pour simuler le transfert thermique et massique dans un isolant poreux. Ils ont obtenu les résultats représentés dans la figure (5.18) et validés avec l'expérience. *K Abahri* et *al* en 2011 ont comparé leurs résultats analytiques avec ceux cités précédemment.

Les travaux de *C.H.A Molenda* et *al* en 1992 [52], ont appliqué un modèle mathématique des transferts couplés de masse et de chaleur dans un milieu poreux non saturé prenant compte l'effet d'hystérésis capillaire, pour la simulation numérique des phénomènes de transfert dans un mur en béton cellulaire d'une épaisseur de 0.2 m, figure (5.19).

K Abahri et *al* 2011 ont résolu analytiquement un système d'équations différentielles pour des conditions aux limites de type *Dirichlet* d'un modèle monodimensionnel proposé pour évaluer les transferts couplés de l'humidité et de chaleur. Ils ont fait des comparaisons avec des résultats numériques [27], Figure (5.20).

Qualitativement, on observe que nos résultats sont en bon accord avec ceux obtenus par les auteurs.



Fig(5.18) Distribution de la température Dans un isolant poreux[51].

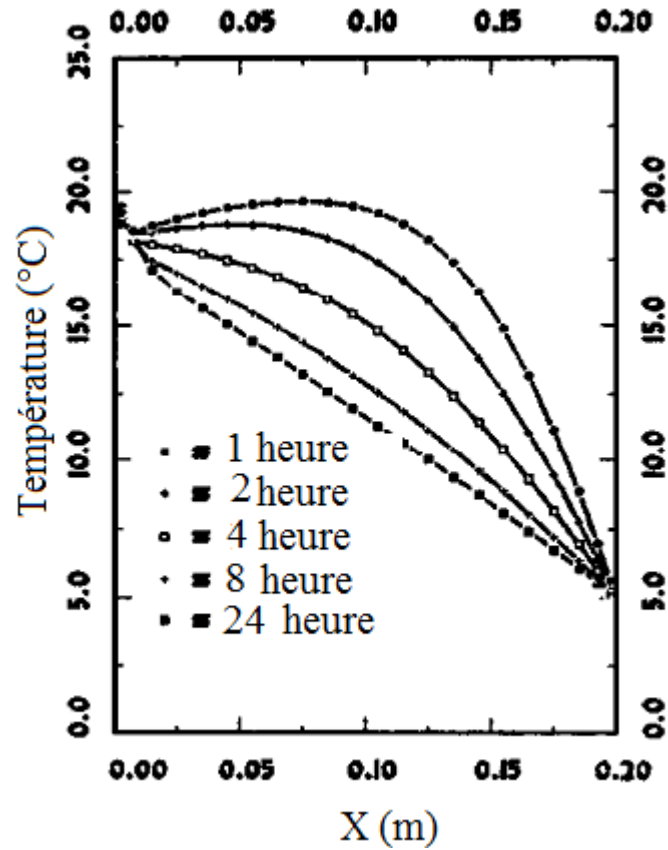


Fig. (5.19) Evolution du profil de température dans un milieu poreux (béton cellulaire) [52].

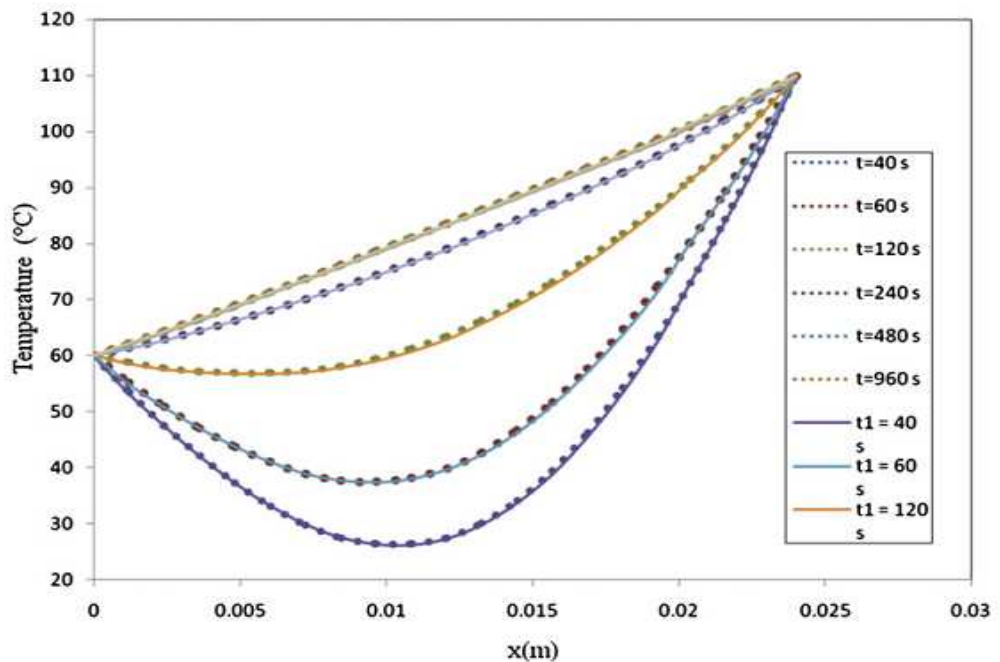


Fig. (5.20) comparaison entre les profils de distribution de température analytiques et numériques [27].

4.1.4.1 Evolution de la température de la surface extérieure de la paroi :

Les figures (5.21 a-s), et (5.22 b-c) montrent l'évolution de la température de la surface extérieure des parois. Cette évolution est traduite par l'importance du flux thermique entrant par convection à la surface provoqué par le gradient de température entre l'ambiance extérieur et la surface de la paroi, au premier temps de processus de transfert thermique. Dans cette phase de transfert, un gradient de température dans la paroi apparaît, ce qui provoque un flux thermique par conduction sortant de la surface vers les zones intérieures de la paroi. Le gradient de température entre la surface et l'ambiance décroît et cause une diminution rapide de l'écart de la température de l'ambiance extérieure et celle-ci de la surface de la paroi. L'autre gradient dans la paroi augmente, il cause une augmentation du flux sortant vers l'intérieur de la paroi. Le temps où les valeurs des deux flux thermique se rapprochent, la température tend vers la valeur qui mène un équilibre thermique entre le transfert par convection et celui par conduction. La variation de la conductivité thermique du béton en fonction de leur saturation influe sur le processus de transfert.

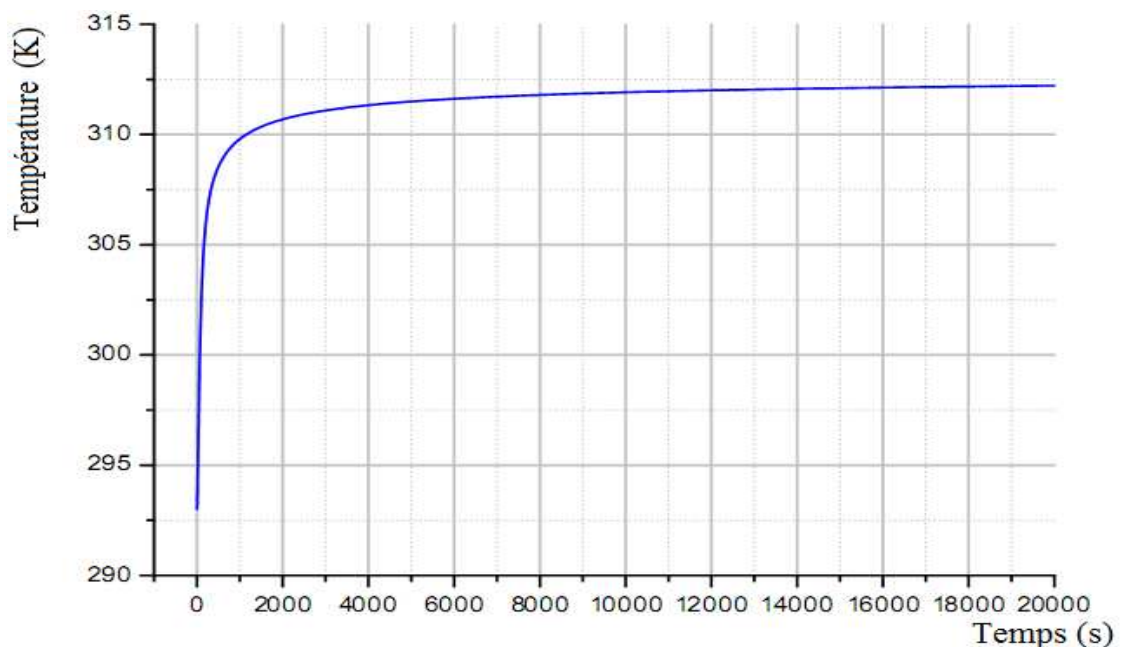


Fig. (5.21-a-s) : Evolution de la température de surface extérieure ($X=30$ cm) de la paroi simple en béton

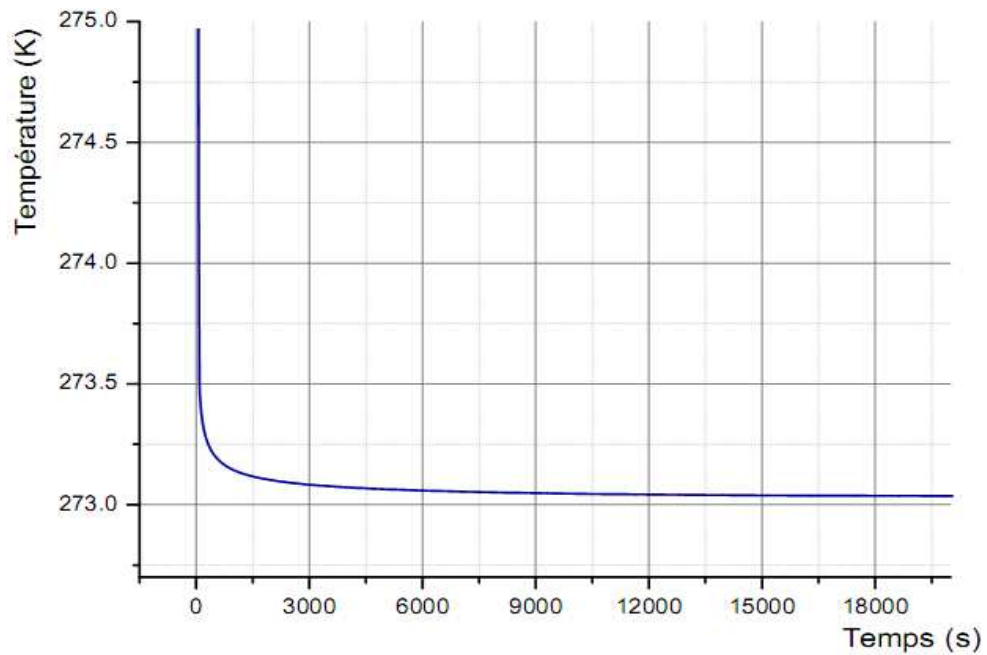


Fig. (5.22-b-c) : Evolution de la température de surface extérieure de la paroi multicouche

4.1.4.2 Evolution de la température de la surface intérieure de la paroi :

Les figures (5.23 a-s), (5.24 a-c) et (5.25 b-c) montrent l'évolution de la température de surface intérieure de la paroi. Au début du transfert, la température de surface intérieure de la paroi est constante, parce qu'au début de la simulation, la température initiale de la paroi et la température de l'ambiance intérieure sont égales (293K). La température de l'ambiance extérieure est supérieure à celle-ci de la paroi de (20 K), cette différence provoque une onde thermique qui se propage avec une basse vitesse à travers la paroi, ce qui est expliqué par le retard de transfert. Le gradient de la température de la paroi au niveau de la surface varie jusqu'à où la température de la surface se tend vers une valeur stable. Cette évolution s'interprète par l'égalité des flux thermiques l'un entrant à la surface, provoqué par le gradient de température dans la paroi et l'autre sortant de la surface, engendré par le gradient de température entre celle-ci et l'air intérieur (transfert par convection).

La variation de la température de la surface intérieure de la paroi multicouche, figures (5.24 a-c) et (5.25 b-c), est plus lente et plus importante que dans la paroi simple. Cette différence est expliquée par l'effet de la variation des propriétés physiques le long de paroi et leur inertie thermique totale.

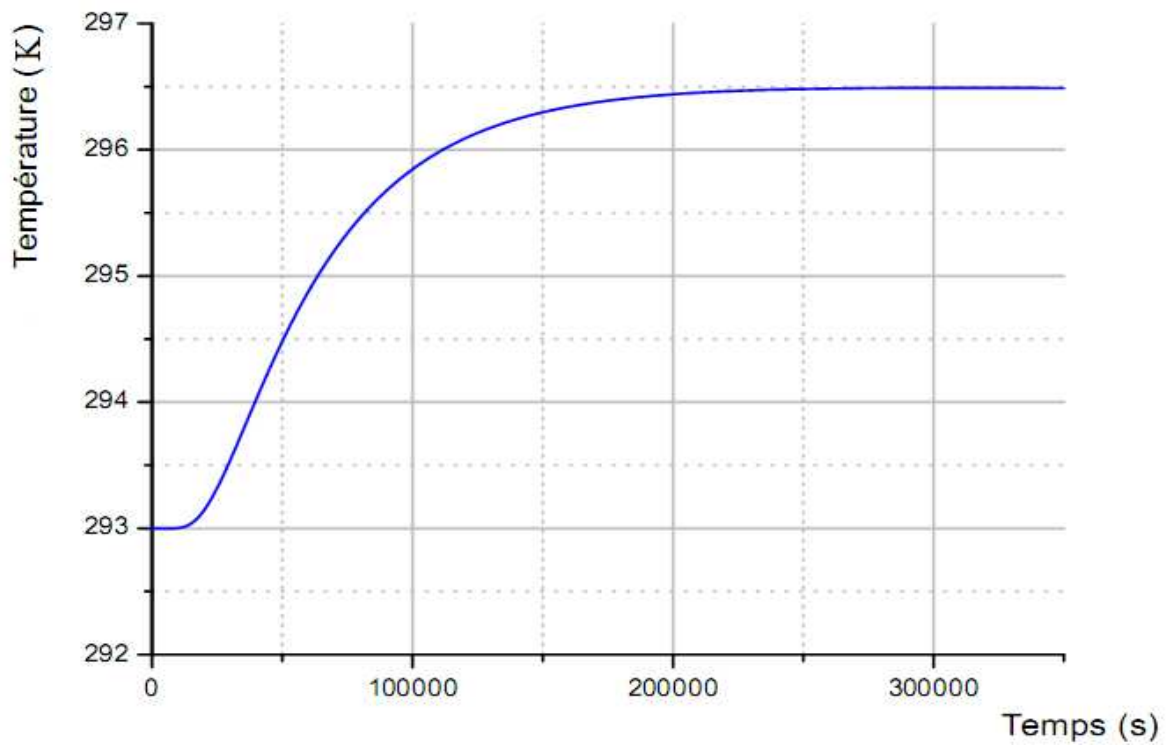


Fig. (5.23-a-s) : Evolution de la température de la surface intérieure ($X = 0$ cm) de la paroi simple en béton

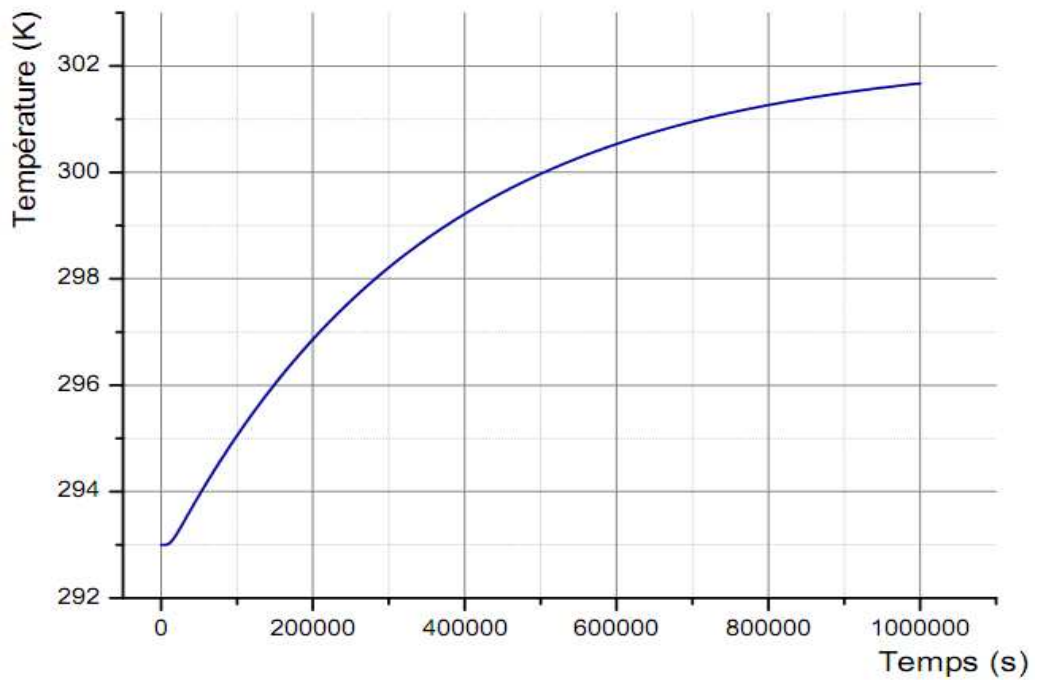


Fig. (5.24-a-c) : Evolution de la température de la surface intérieure ($X = 0$ cm) de la paroi multicouche

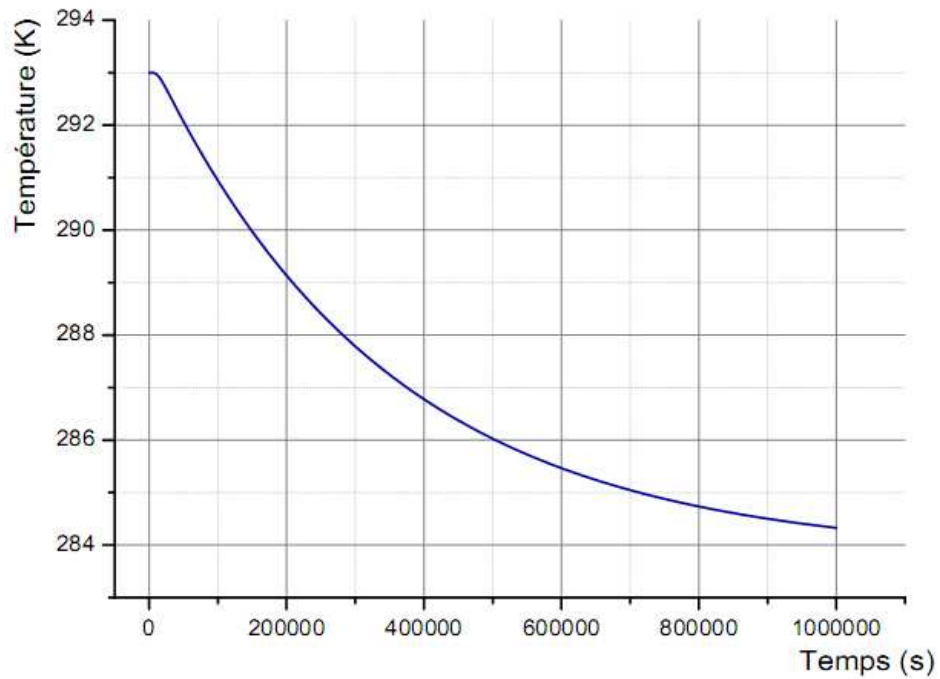


Fig. (5.25-b-c) : Evolution de la température de surface intérieure de la paroi multicouche

4.1.4.3 Evolution des températures aux surfaces de la paroi :

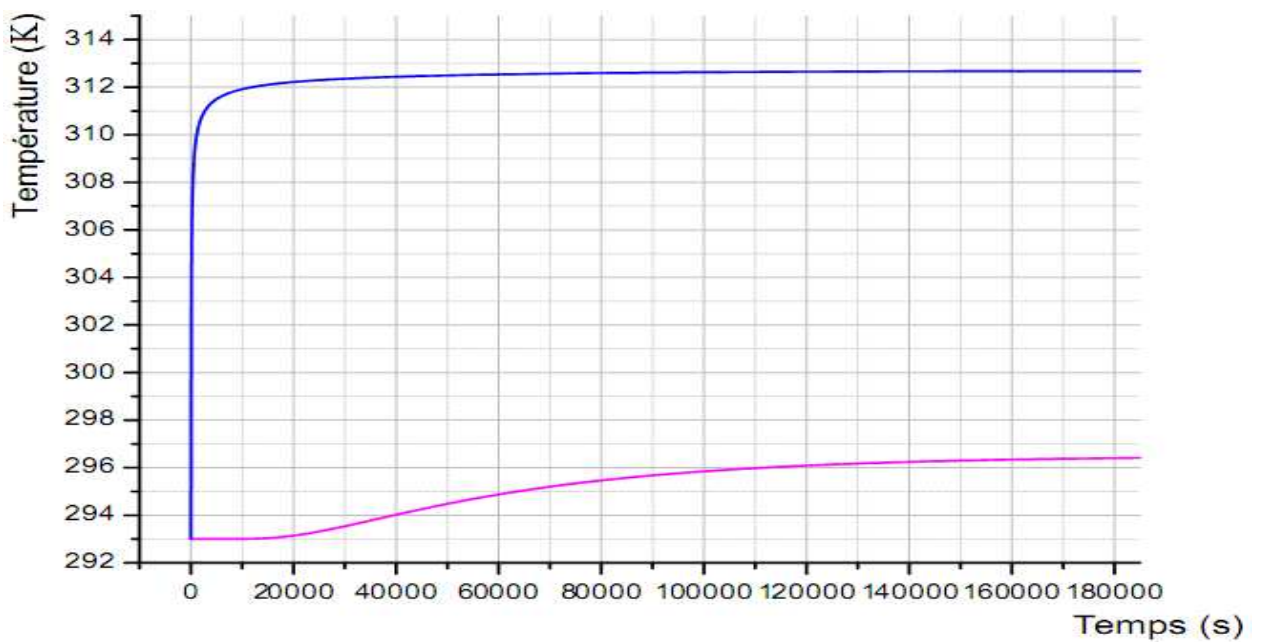


Fig. (5.26-s) : comparaison des évolutions des températures aux surfaces de la paroi simple en béton ($X = 0 \text{ cm}$; $X = 30 \text{ cm}$)

- *Comparaison avec d'autres résultats :*

Les variations des températures des surfaces des parois de notre modèle sont en bon accord avec les travaux de *R.W. Lewis* et *W. J. Ferguson* [53] figure (5.27), et de *I. Rahmanian* et *Y.C.Wang* en 2012 [15] figure (5.28).

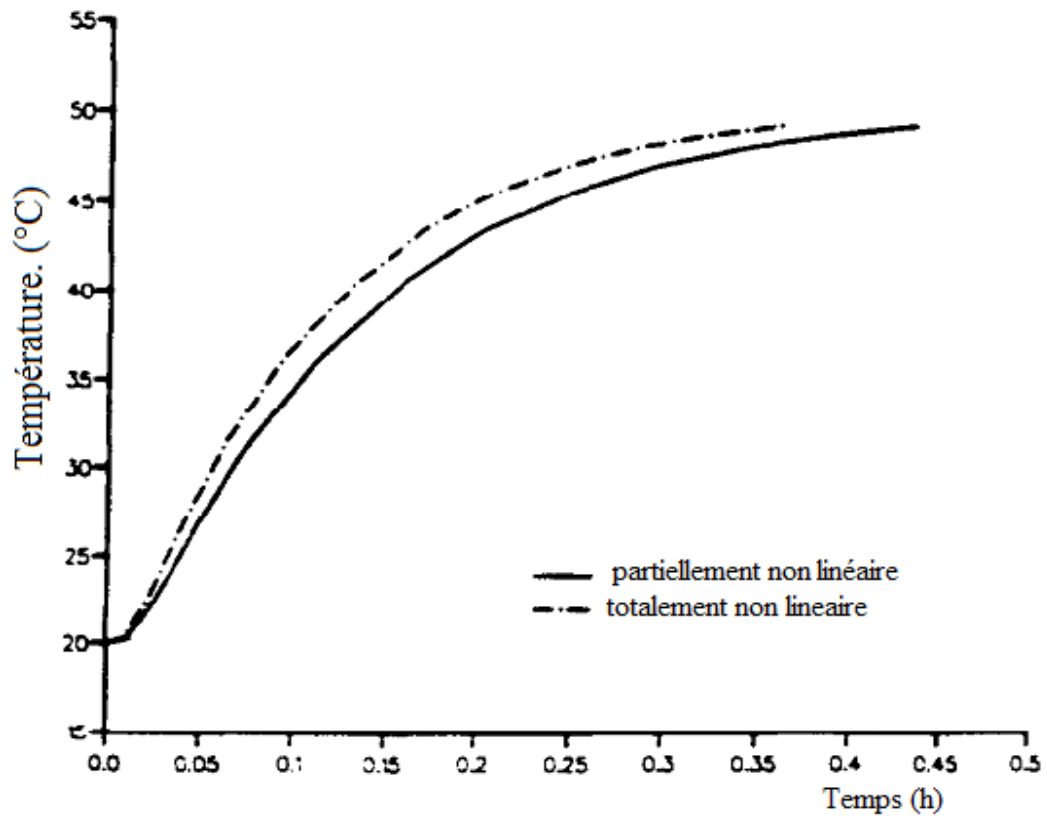


Fig. (5.27) Evolution de la température d'un nœud n=3 d'un système en milieu poreux par une simulation utilisant les éléments finis [53].

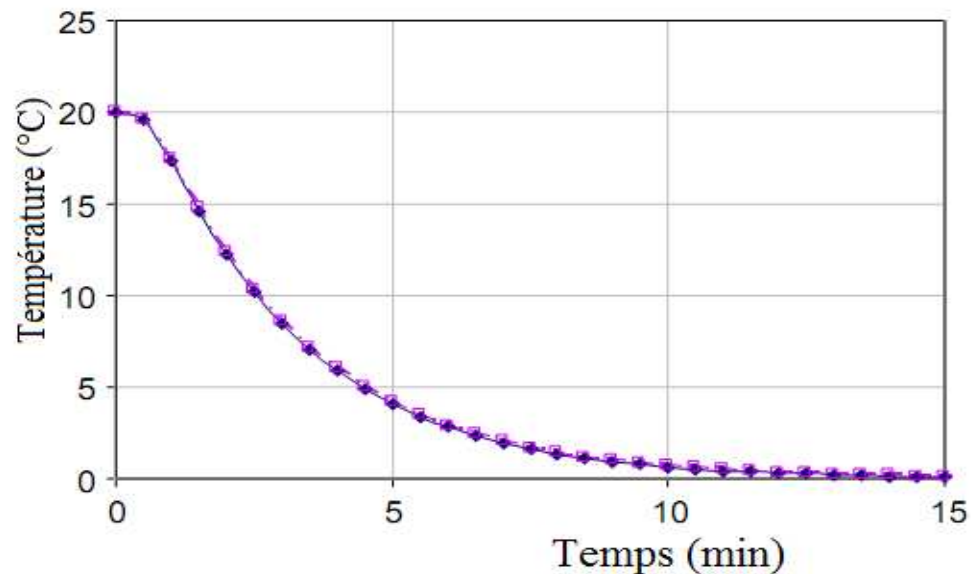


Fig. (5.28) Comparaison entre l'évolution de la température au centre d'une paroi (à 25mm), une obtenue par une résolution analytique et l'autre par la méthode des différences finies [15].

4.1.5 Evolution de la densité du flux thermique à la surface extérieure de la paroi :

Les évolutions des densités des flux thermiques au niveau des surfaces extérieures des deux parois, simple et composée sont présentées dans les figures (5.29 s) (A) et (5.30 c). La variation du flux thermique est proportionnelle au coefficient d'échange par convection h_{ext} (supposé constant), et le gradient de température entre la surface de la paroi (variable) et l'ambiance extérieur (constante). Donc il prend l'allure inverse que la température. A la première période du processus le flux thermique chute rapidement, à cause de la variation rapide de la température de la surface extérieure vers la température de l'ambiance. A la deuxième période, le flux tend vers une valeur stable afin d'atteindre un équilibre thermique du système (ambiance extérieure, paroi et ambiance intérieure). On observe dans le cas de la paroi simple en béton, que le flux thermique s'approche à la valeur nulle puis, il remonte vers des valeurs plus importantes. Cette variation est interprétée par la différence de entre le transfert par convection et par conduction d'une part et d'autre part, par la tendance vers l'équilibre thermique.

Remarque : Le signe positif ou négatif du flux thermique indique seulement leur sens.

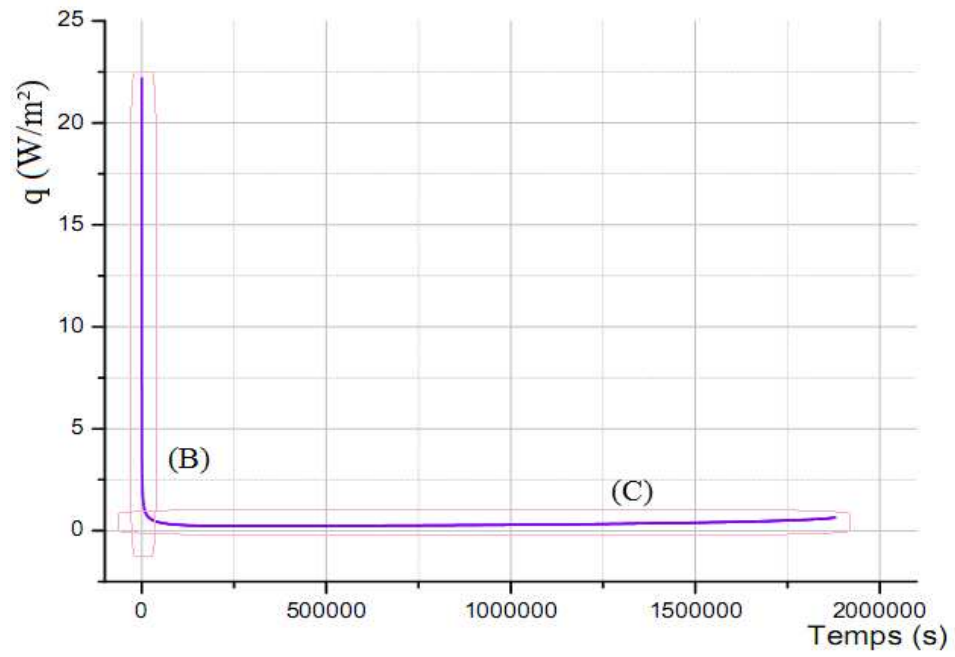


Fig. (5.29) (A) temps jusqu'à $2 \cdot 10^6$ s

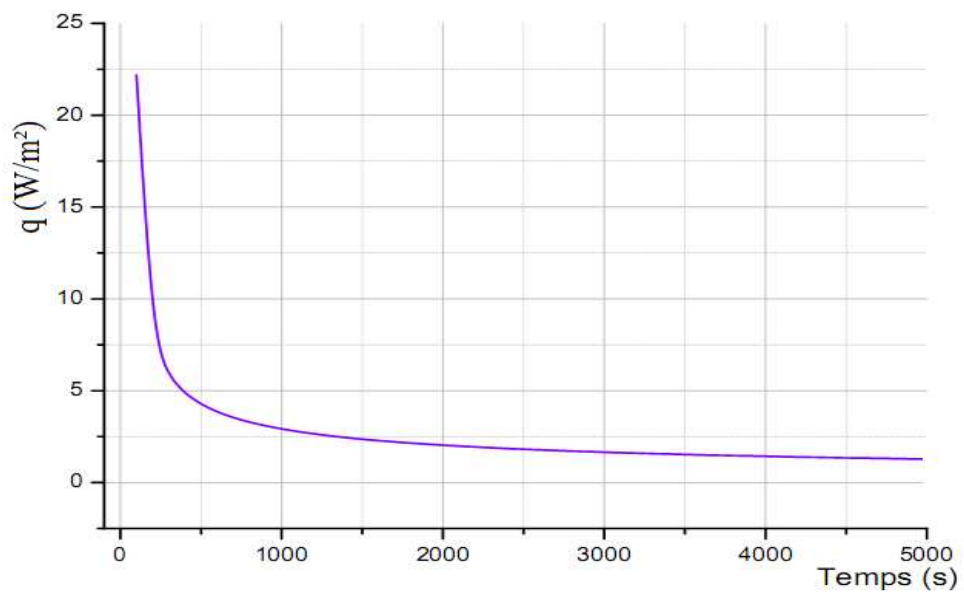


Fig. (5.29) (B) temps jusqu'à 5000 s

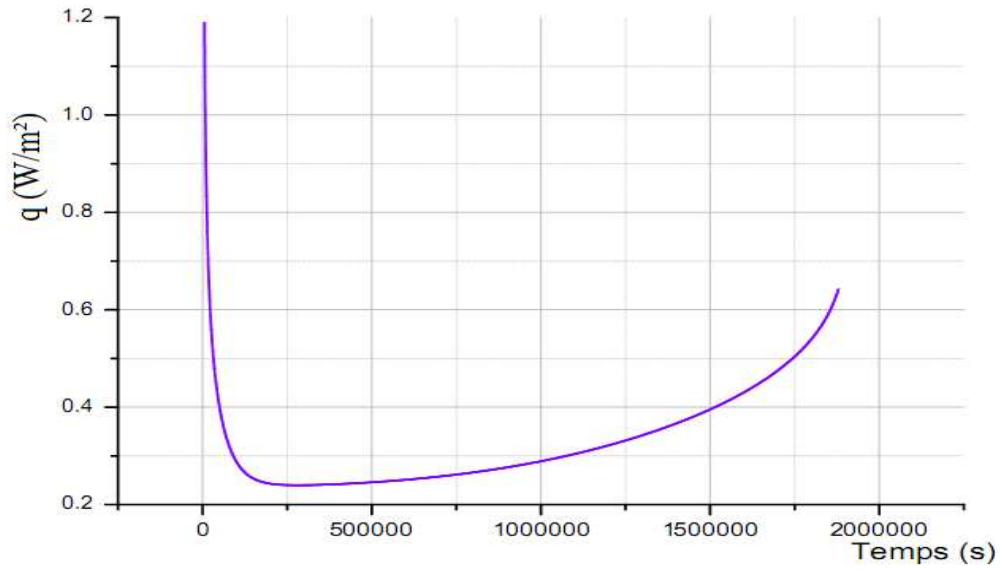


Fig. (5.30) (C)

Fig. (5.29-s) (A), (B), (C) : Evolution de la densité de flux thermique à la surface extérieure ($X= 30\text{cm}$) de la paroi simple en béton

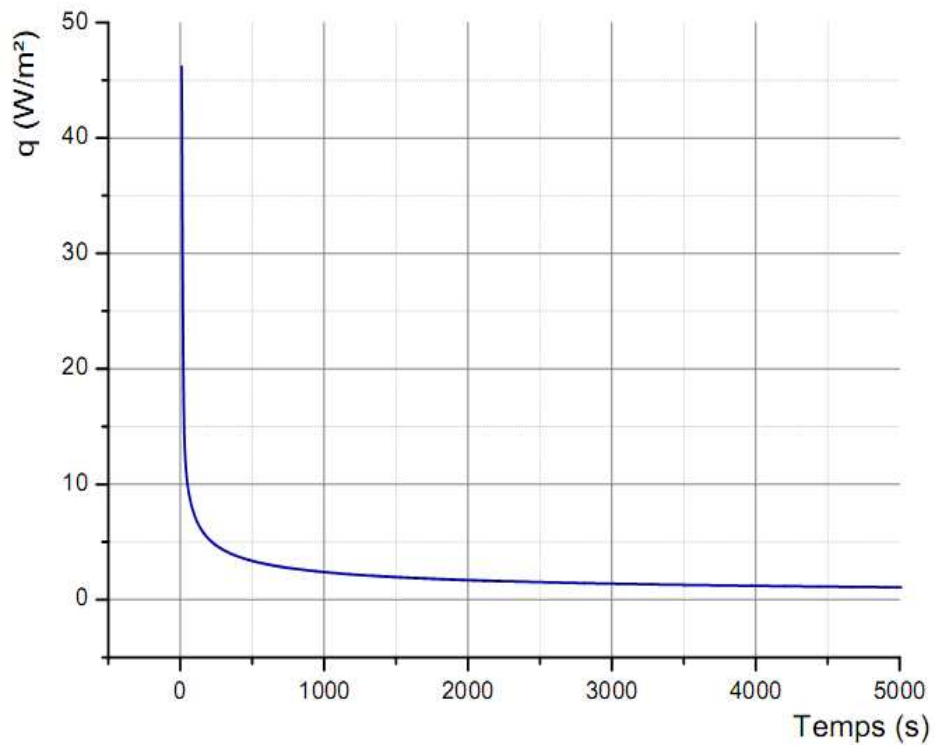


Fig. (5.30-c) : Evolution de la densité de flux thermique à la surface extérieure ($X = 30\text{ cm}$) de la paroi multicouche

4.1.6 Evolution de la densité du flux thermique à la surface intérieur de la paroi :

Les densités des flux thermiques à l'intérieur tiennent les mêmes allures que les températures de la surface intérieure. L'évolution de la densité du flux thermique se divise en trois phases, figures (5.31) (A). Dans la première phase, le gradient de température entre la paroi et l'air intérieur est nul (équilibre thermique, pas de transfert thermique). Après un certain temps, dans la deuxième phase, figures (5.31) (B), le gradient de température provoqué par le transfert par conduction dans la paroi atteint la surface intérieure, ce qui provoque un flux thermique par convection entre la surface intérieure de la paroi et l'ambiance intérieure qui s'accroît d'une manière importante vers une valeur maximale. La troisième phase est une phase d'équilibre, le flux thermique tend vers une valeur d'équilibre thermique inférieure que celle-ci de la deuxième phase.

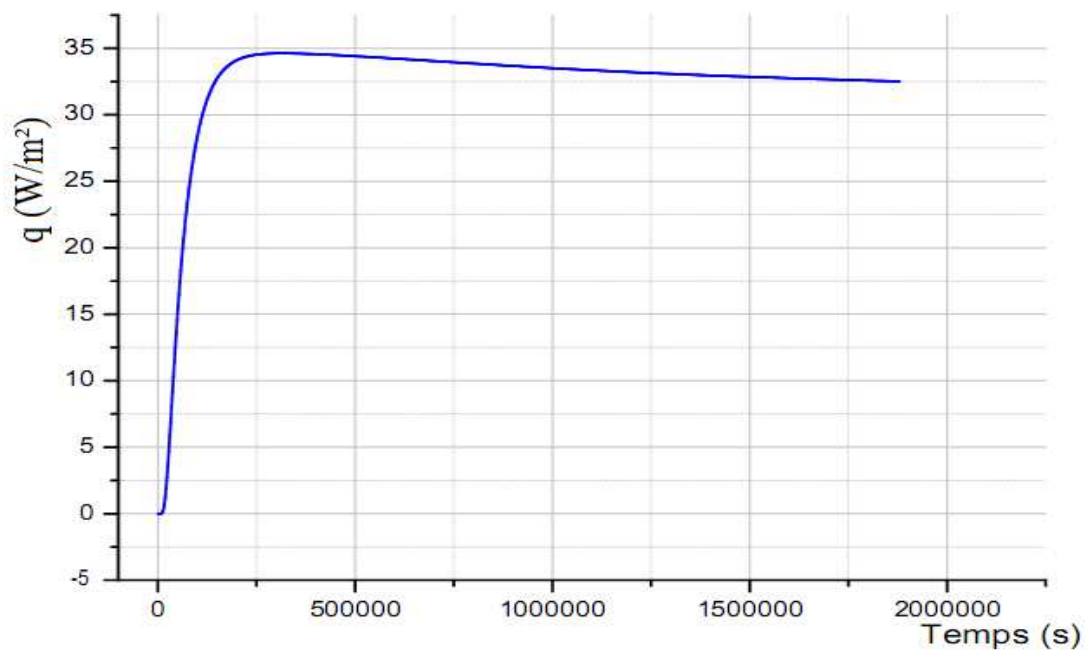


Fig. (5.31) (A) temps jusqu'à $2 \cdot 10^6$ s

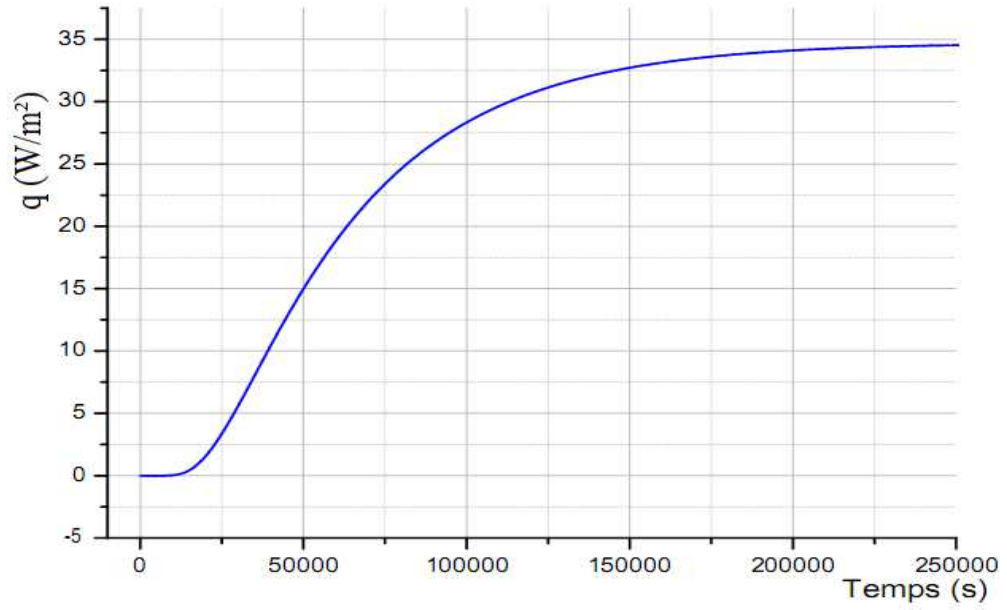


Fig. (5.31) (B) temps jusqu'à $25 \cdot 10^4$ s

Fig. (5.31) (A), (B) : Evolution de la densité de flux thermique à la surface intérieure ($X=0$ cm) de la paroi simple en béton

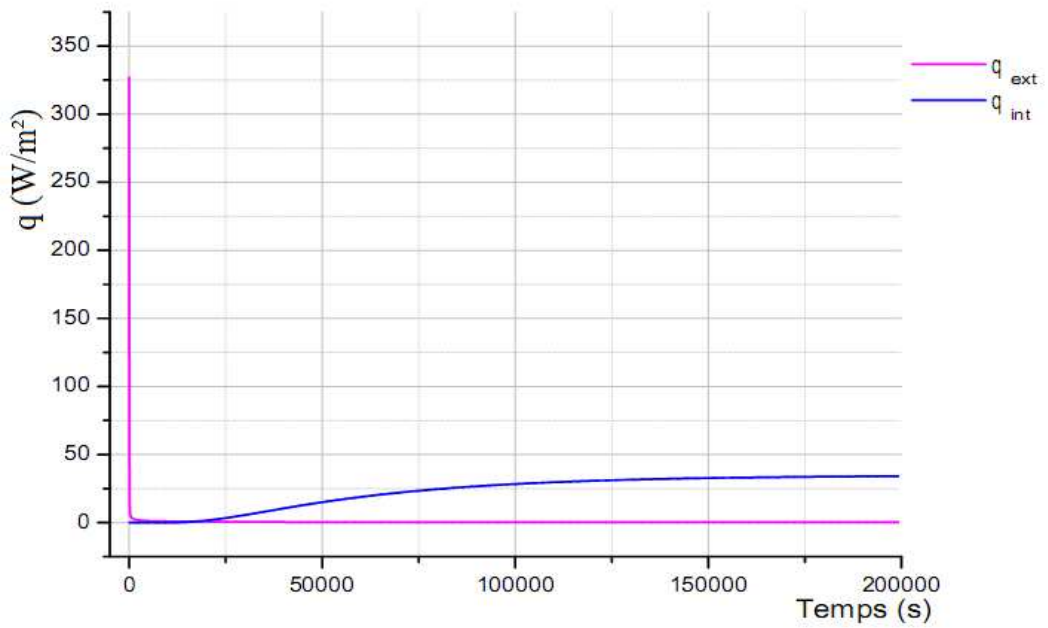


Fig. (5.32) : Comparaison des évolutions des densités des flux thermiques aux surfaces de la paroi simple en béton ($X=0$ cm ; $X=30$ cm)

4.2 Simulation pour des conditions aux limites périodiques :

- Température de l'air ambiant intérieur : $T_{\text{int}} = 293 \text{ °K}$ (20°C) ;
- Température de l'air ambiant extérieur : $T_{\text{ext}} = 293 + 15 (2\pi/48 \text{ heures})$ [21]
- le coefficient d'échange thermique superficiel intérieur : $h_i = 9.1 \text{ (w/m}^2 \text{ °k)}$;
- le coefficient d'échange thermique superficiel extérieur : $h_e = 14.7 \text{ (w/m}^2 \text{ °k)}$;
- densité du flux massique intérieur : $q_{\text{mi}} = 0.00001 \text{ (kg/s m}^2)$;
- densité du flux massique extérieur : $q_{\text{me}} = 0.00004 \text{ (kg/s m}^2)$;

4.2.1 distribution de la température de la paroi au cours du temps :

Les figures (5.33) (A), (B), (C) et (5.34) (A), (B), (C) montrent la distribution de température dans les parois simple en béton et l'autre multicouche sous des conditions aux limites périodiques, au cours des périodes de temps séparées afin d'éviter l'encombrement de l'illustration. Les figures (5.33) (A) ($0 \leq \text{temps} \leq 10 \text{ heures}$) et (5.34) (A) ($0 \leq \text{temps} \leq 4 \text{ heures}$) représentent la première phase de transfert quand la température augmente. A la deuxième période, la distribution de température entre les temps **15 et 35 heures**, figures (5.33) (B) et (5.34) (B), la température tend vers des valeurs plus basses de l'extérieur de la paroi vers l'intérieur. En troisième période, l'évolution de la température est représentée entre **40 et 100 heures**, figure (5.33) (C) et entre **40 et 50 heures**, figure (5.34) (C). La distribution remonte vers des valeurs plus hautes.

Le cycle se répétera d'une manière périodique, ce qui représenté par les figures (5.35), (5.36), (5.37), et (5.38).

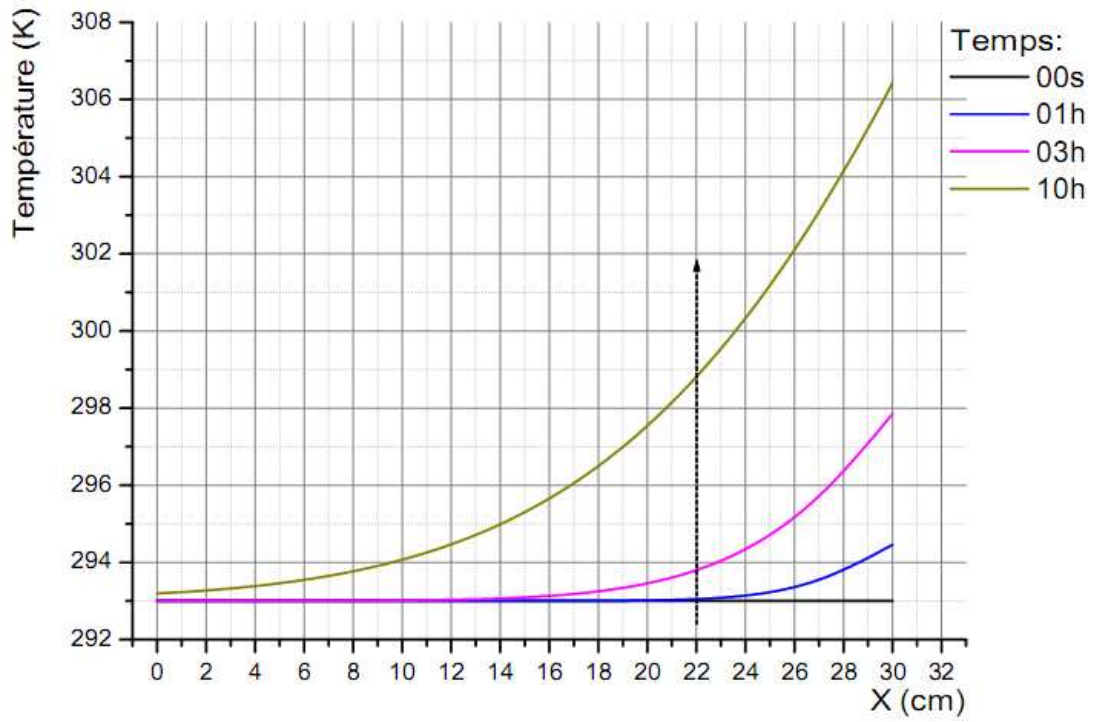


Fig. (5.33) (A) ($0 \leq t \leq 10 h$)

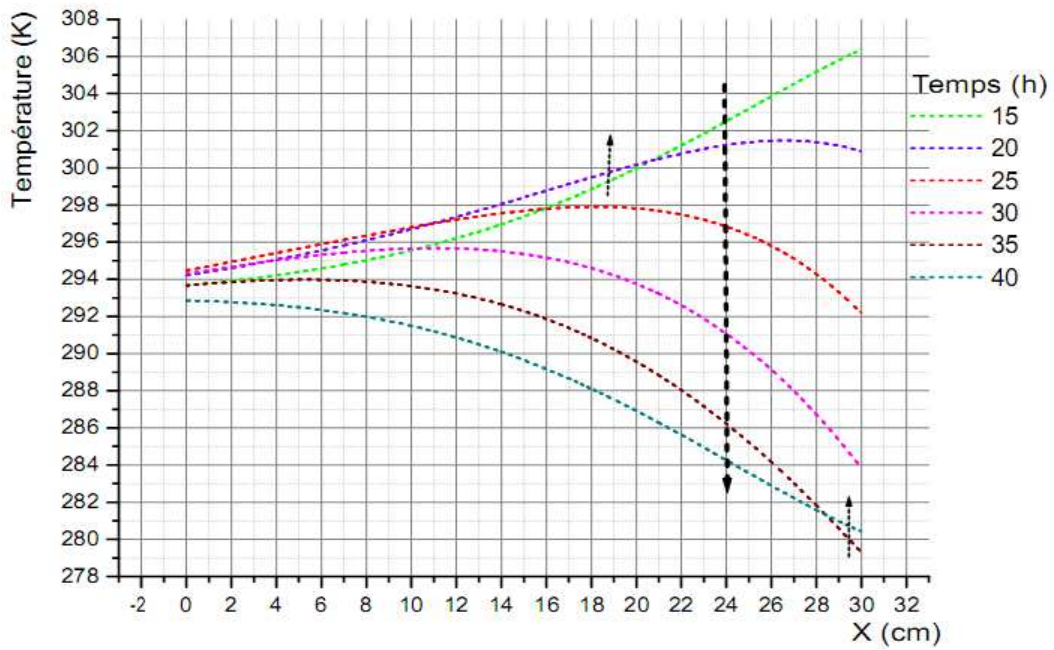


Fig. (5.33) (B) ($15 \leq t \leq 40 h$)

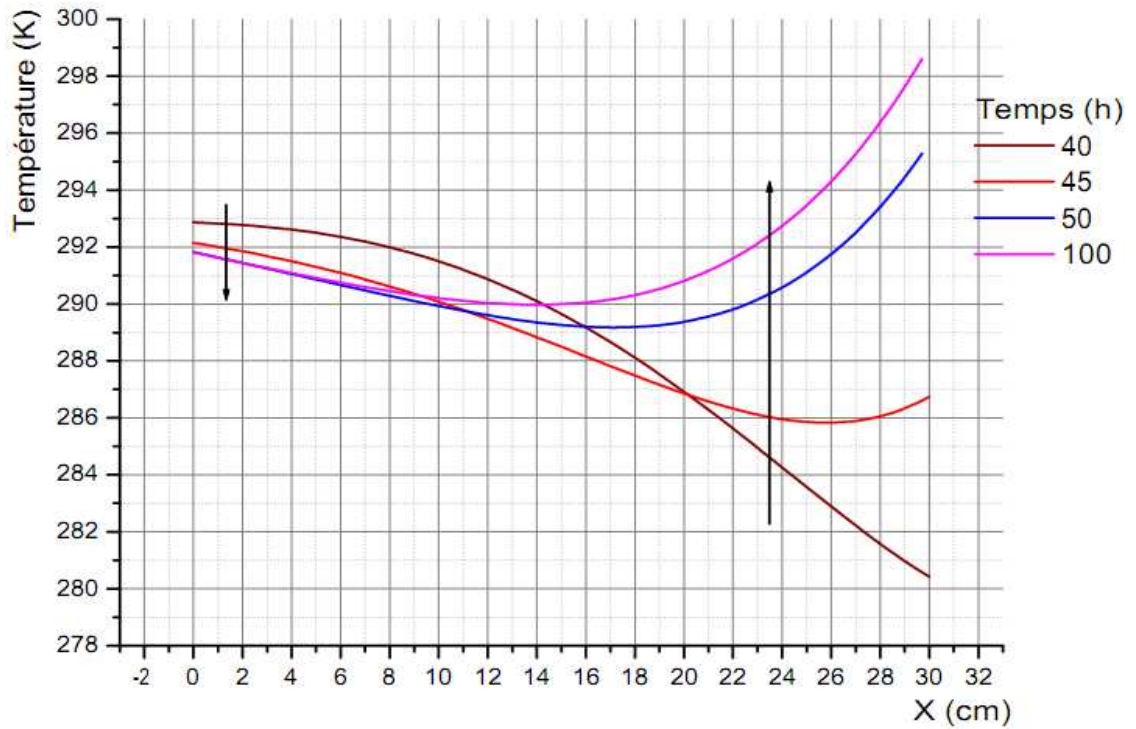


Fig. (5.33) (C) ($40 \leq t \leq 100$ h)

Fig. (5.33) (A), (B), (C) Distribution de la température de la paroi simple (Conditions aux limites variables)

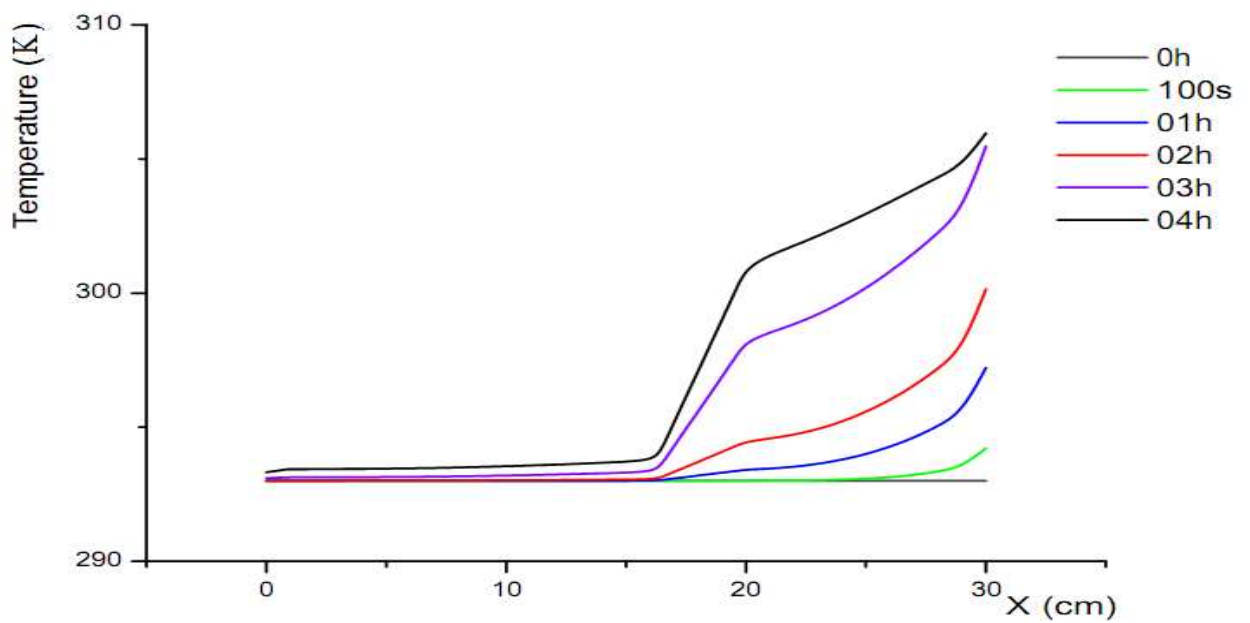


Fig. (5.34) (A) : Distribution de la température de la paroi composée (Conditions aux limites variables ; $0 \leq t \leq 4$ heures)

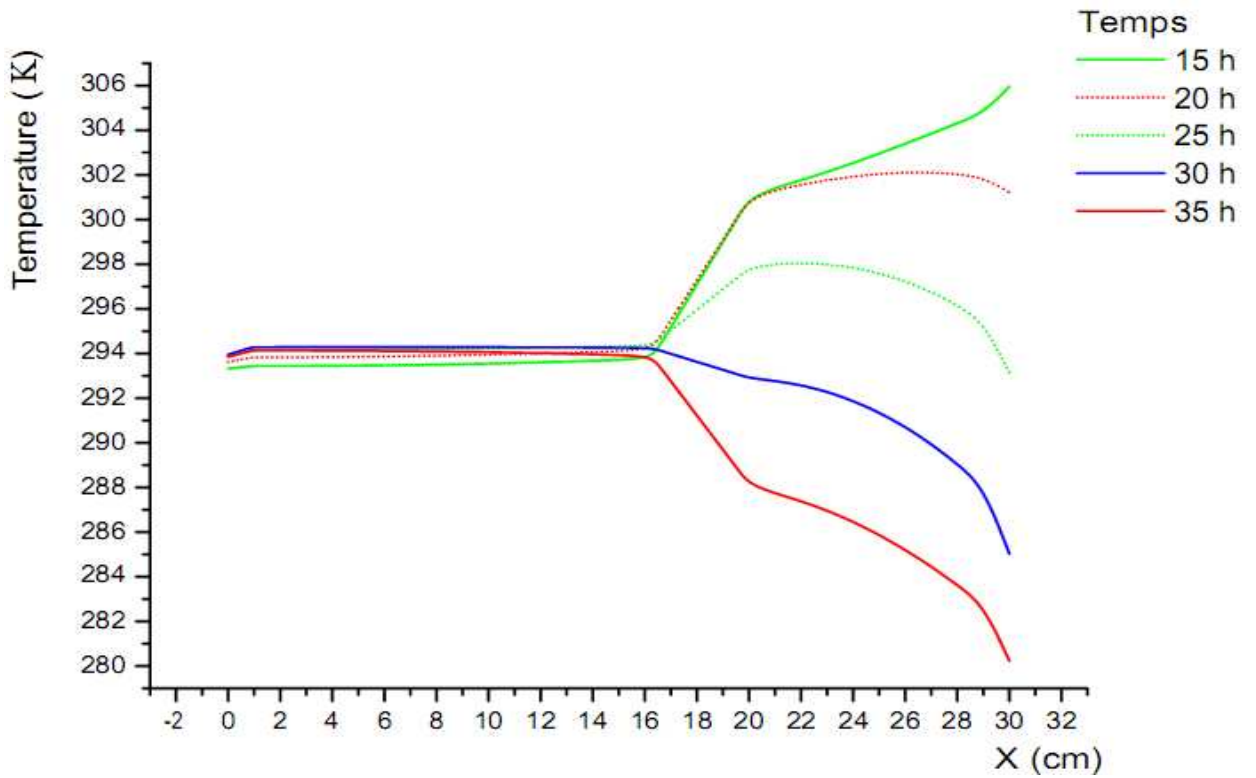


Fig. (5.34) (B) : Evolution de la température de la paroi composée (Conditions aux limites variables ; $15 \leq t \leq 35$ heures)

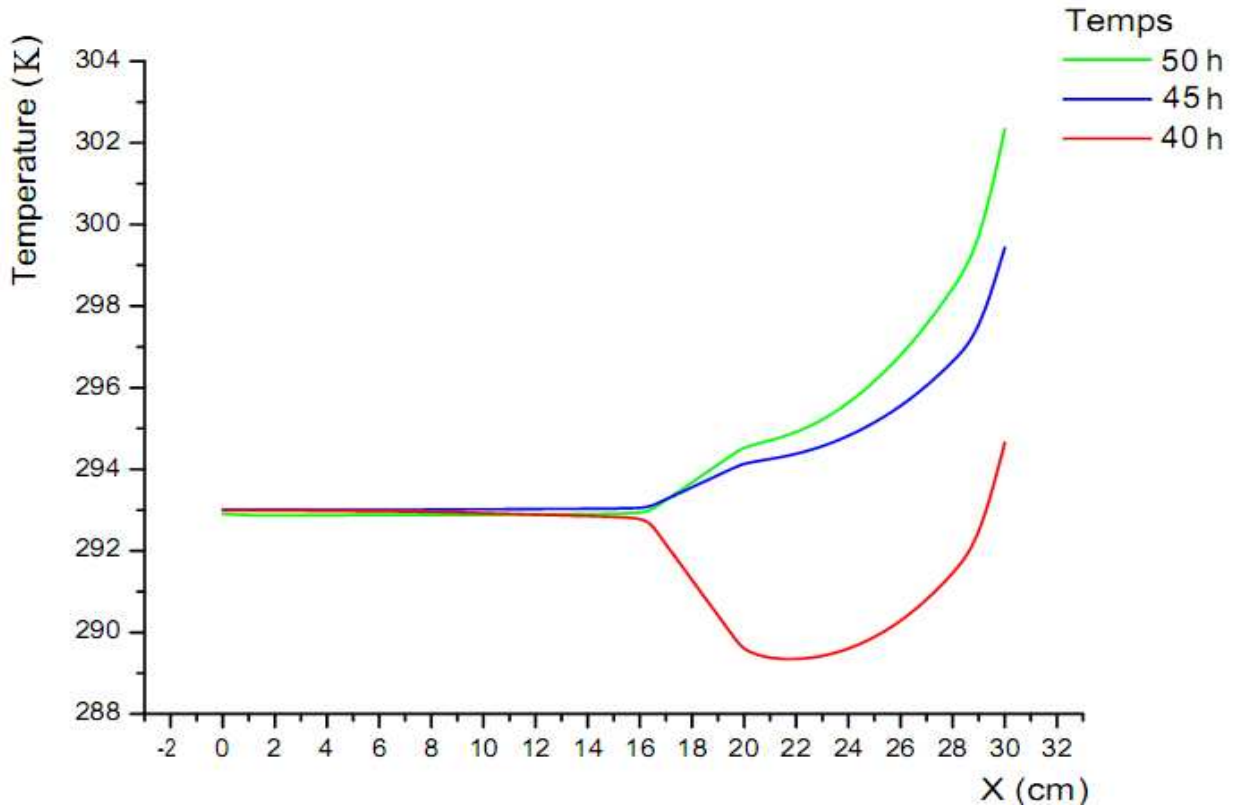


Fig. (5.34) (C) : Evolution de la température de la paroi composée (Conditions aux limites variables ; $40 \leq t \leq 50$ heures)

4.2.1.1 Evolution des températures des surfaces extérieures et intérieures des parois :

La variation de la température des surfaces intérieures et extérieures des deux types de paroi s'effectue d'une façon périodique, figures (5.35 s), (5.36 s), (5.37 s), et (5.38 c). L'amplitude de l'oscillation thermique à la surface intérieure est moins importante que celle-ci à la surface extérieure, ce qui traduit par l'effet d'atténuation des ondes thermiques par les parois. L'atténuation des ondes thermiques est expliquée par l'influence de la conductivité thermique ou l'importance de l'isolation thermique.

Le déphasage de l'oscillation thermique entre la surface intérieure et l'autre extérieur est une conséquence de l'inertie thermique, figures (5.37 s) et (5.38 c). On peut dire une paroi plus inerte, la paroi dont la propagation de l'onde thermique plus lente, et une paroi moins inerte une paroi dont la propagation de l'onde thermique plus vite. Dans notre modèle, l'inertie thermique est un effet due à l'importance de la masse volumique et la chaleur spécifique qui sont supposées comme des valeurs constantes.

Les conditions initiales, les conditions aux limites, la dépendance de la conductivité thermique à la variation de la saturation et leur gradient le long de la paroi sont des facteurs qui influent sur la stabilité de l'oscillation thermique et leur amplitude sur un axe variable dans le temps, figures (5.35 s), (5.36 s), et (5.38 c).

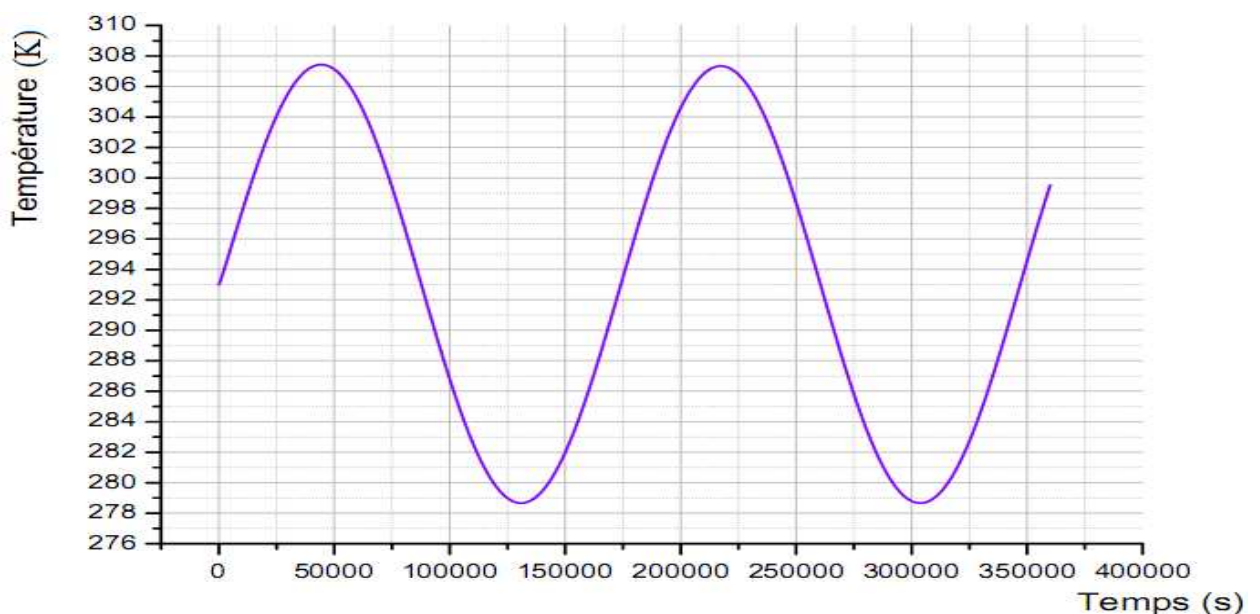


Fig. (5.35 s) : Evolution de la température de surface extérieure de la paroi simple en béton (conditions aux limites périodiques)

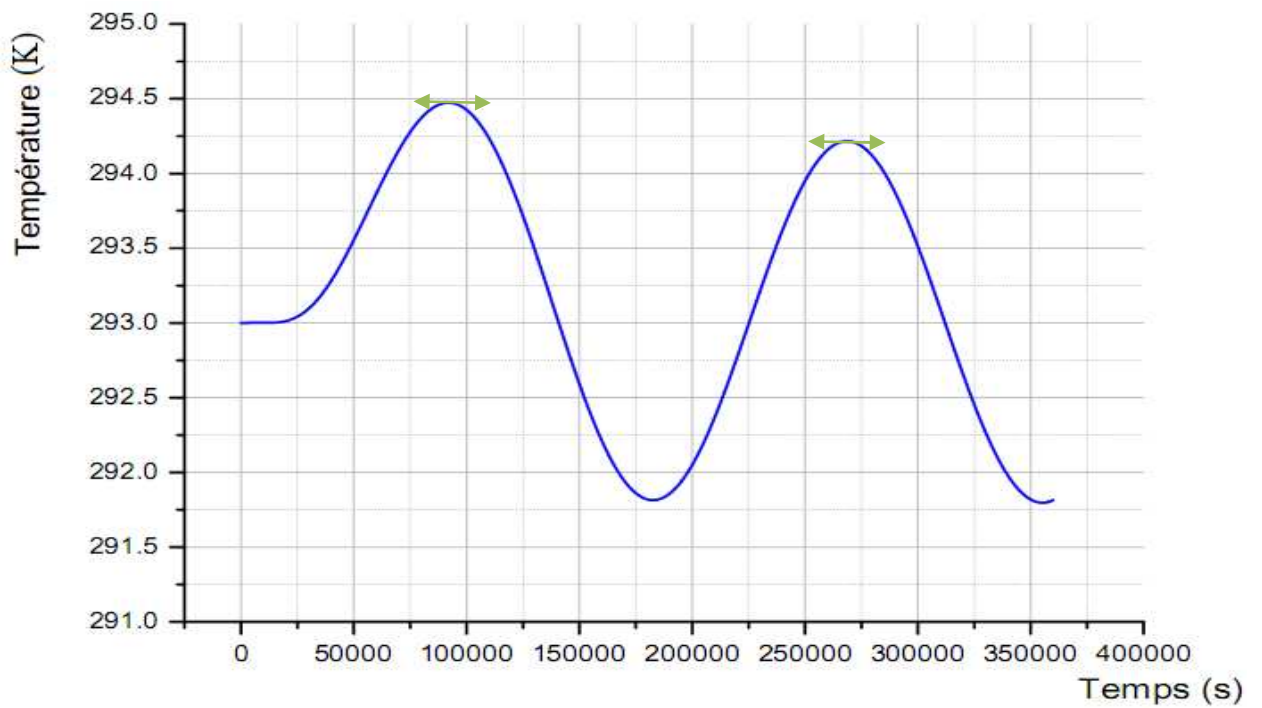


Fig. (5.36 s) : Evolution de la température de surface intérieure de la paroi simple en béton (conditions aux limites variables)

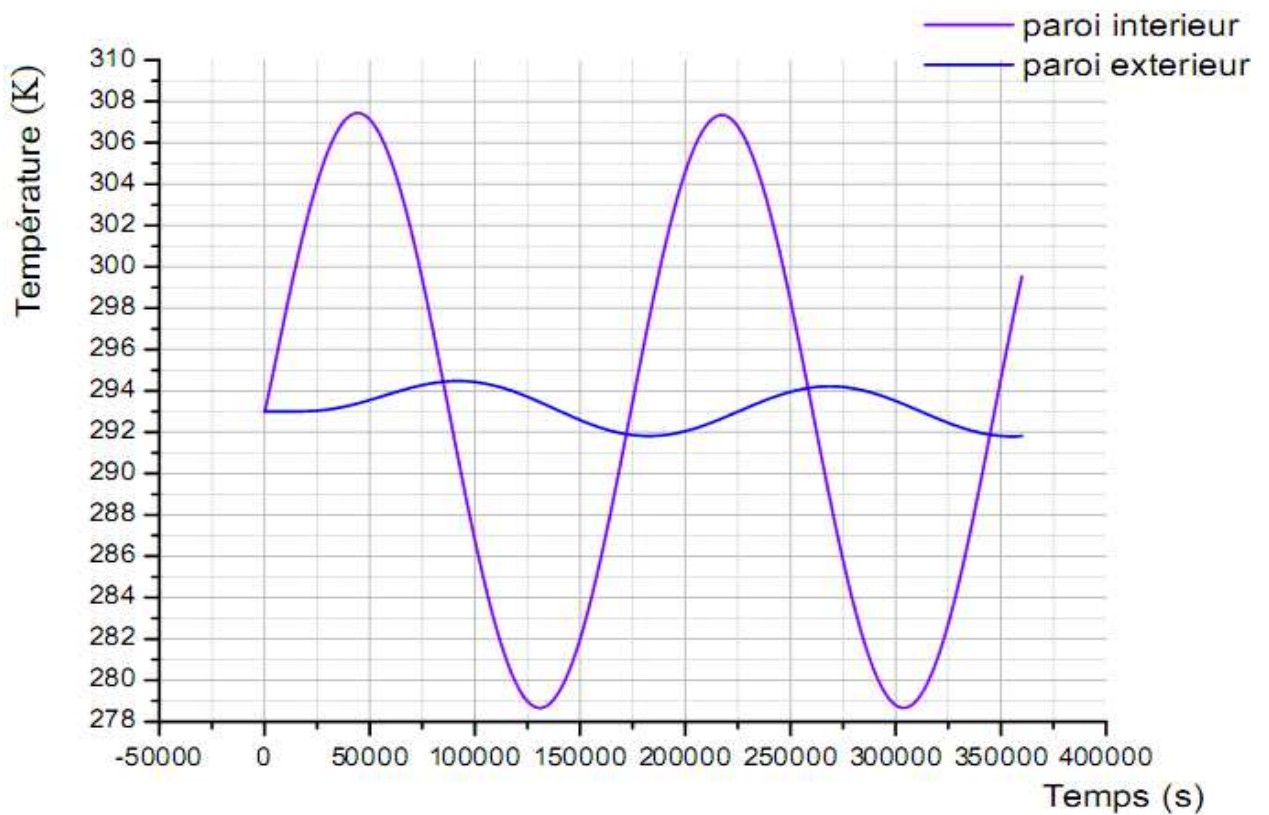


Fig. (5.37 s) : Comparaison de l'évolution des températures des surfaces d'extrémités de la paroi simple en béton (conditions aux limites variables)

4.2.1.2 représentation des températures de l'air extérieur et quelques points de la paroi multicouche :

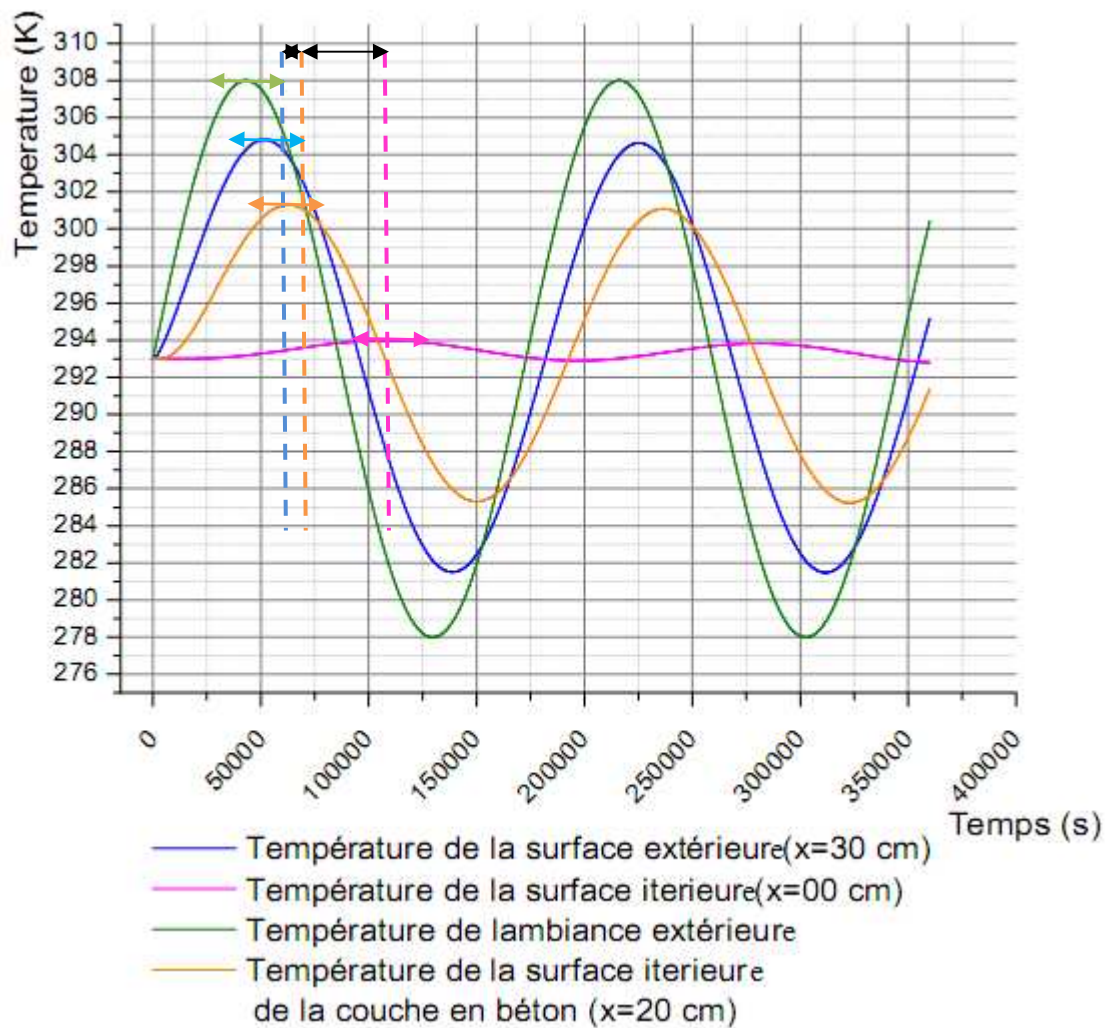


Fig. (5.38 c) : Comparaison de l'évolution des températures de la paroi multicouche

4.2.2 Evolution des densités des flux thermiques aux surfaces des parois :

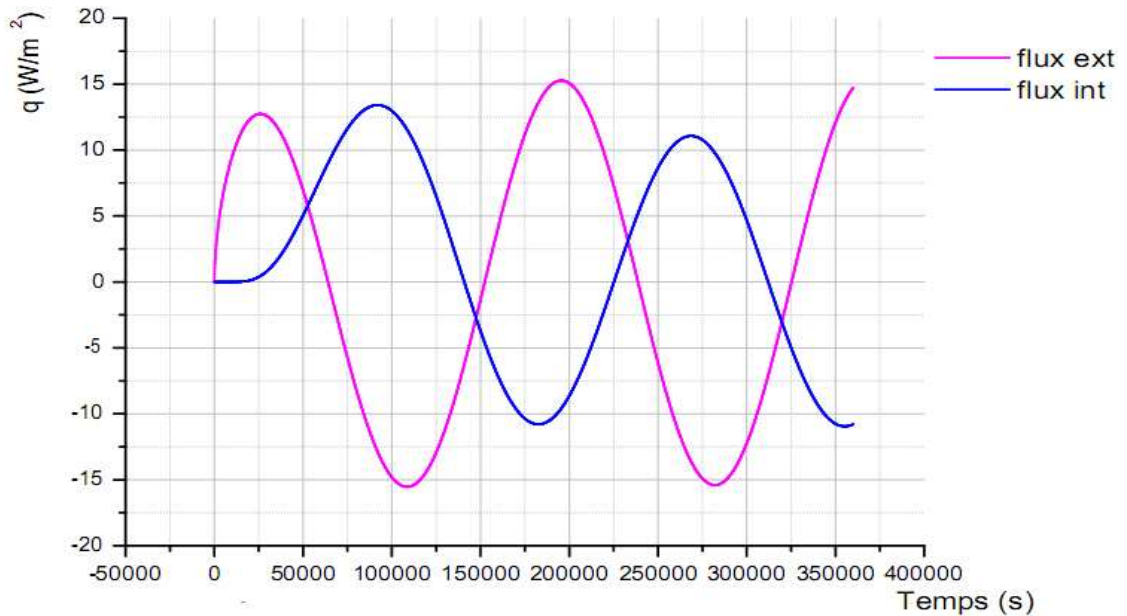


Fig. (5.39 s) : Evolution des densités des flux thermiques aux surfaces de la paroi simple en béton (conditions aux limites périodiques)

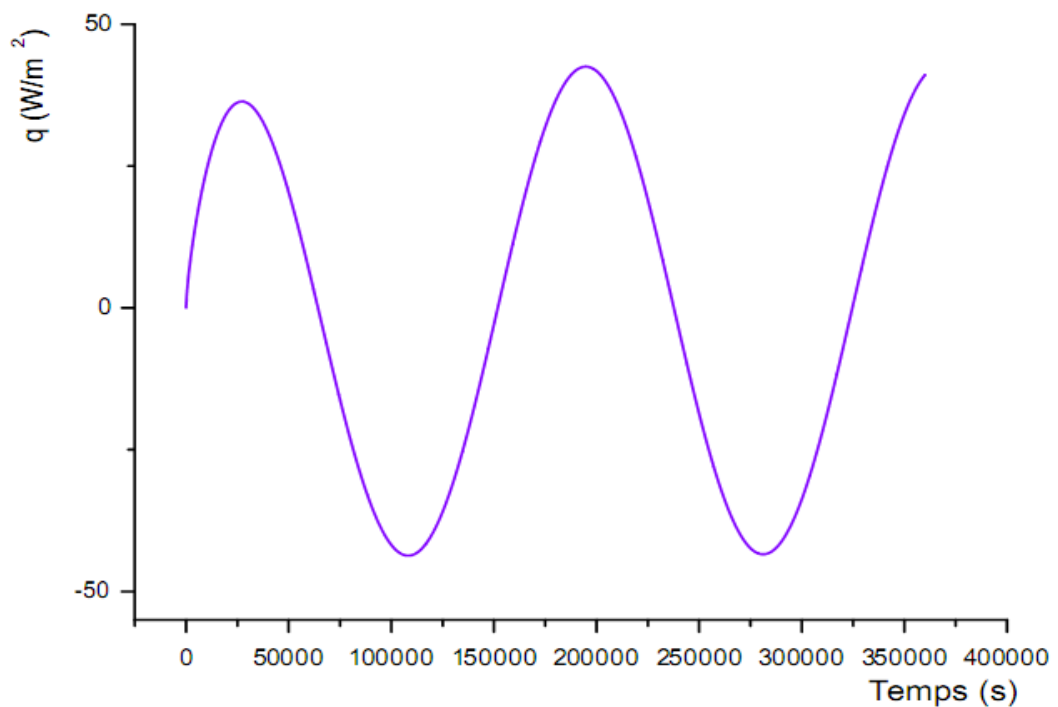


Fig. (5.40 c) : Evolution des densités des flux thermiques aux surfaces de la paroi multicouche ($X=30cm$)

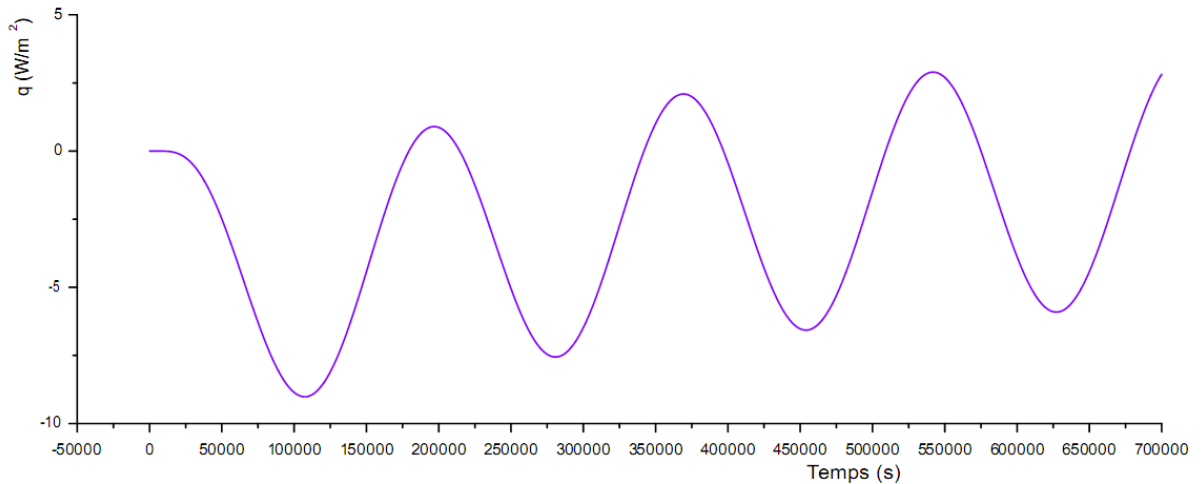


Fig. (5.41 c) : Evolution de la densité de flux thermique à la surface intérieure de la paroi multicouche ($X=0$ cm)

- **Comparaison avec d'autres travaux :**

Les évolutions des températures aux surfaces des parois simples et multicouches sont en bon accord avec les résultats des travaux de *N. Mendes* et *P.C. Philippi* en 2005 [55] figure (5.42), les travaux de *C. Maalouf* et al en 2011 [54] figure (5.43), et les travaux de *Lazaros Elias Mavromatidis* et al en 2012 [56] figure (5.44).

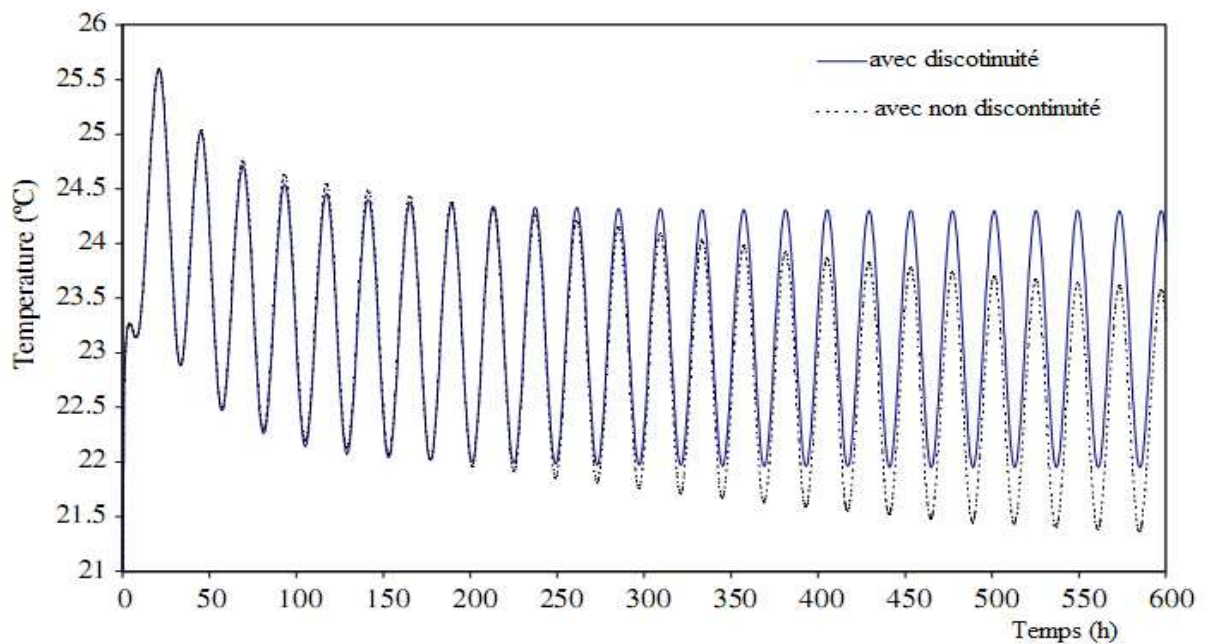


Fig. (5.42) Evolution de la température de la surface intérieure d'une paroi en utilisant des conditions aux limites extérieures et intérieures sinusoïdales [55].

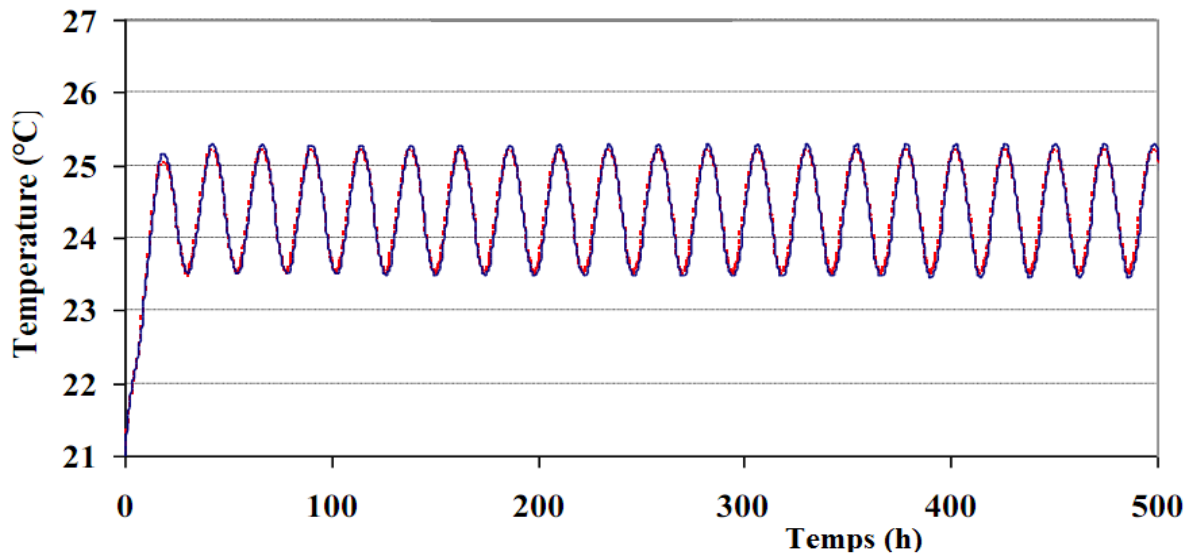


Fig. (5.43) comparaison de température de surface d'un échantillon en brique entre deux modèles [54].

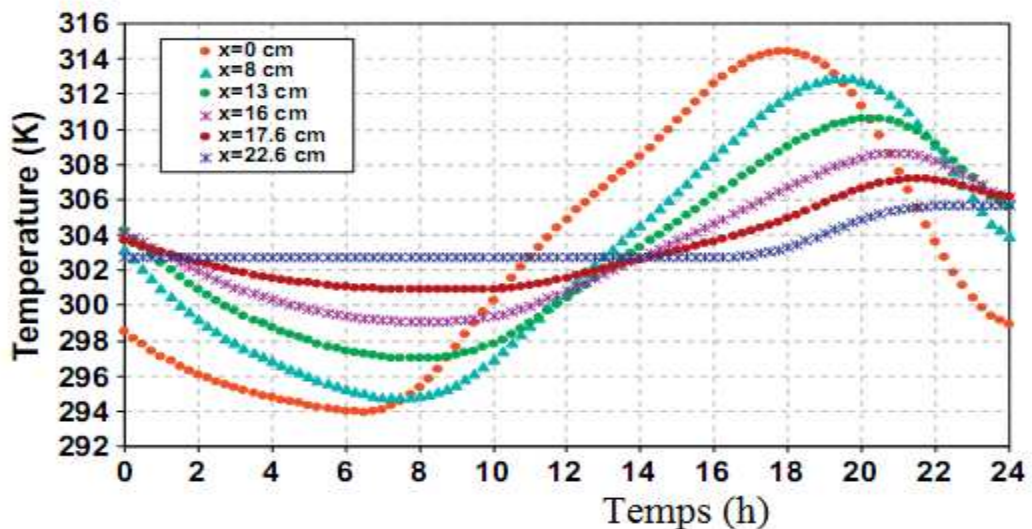


Fig. (5.44): Profil des températures dans un mure des plusieurs points par un modèle pour un jour type d'été en Juillet dans Yerevan, Armenia, les distances sont mesurées de la surface extérieure ($x=0$) [56].

5 Conclusion :

Les conditions de simulations sont bien adaptées à ce modèle. Les résultats obtenus sont, tout à fait, acceptables pour représenter l'impact des transferts couplés sur le comportement des parois et prédire précisément les phénomènes, qui peuvent être pris en considération lors de

l'étude des bilans énergétiques et massiques des bâtiments.

Ces résultats conduisent vers l'étude paramétrique, en jouant sur le changement de l'emplacement, les épaisseurs des couches, et les types des matériaux utilisés. A la base des conditions intérieures et extérieures, et en contribuant une étude d'optimisation, On peut venir à choisir la paroi la plus économique en gardant les mêmes conditions de confort.

Conclusion générale :

Ce travail est une contribution à l'étude du comportement thermo-hydrigue des matériaux de construction composant les parois des bâtiments en simple et multicouches.

La conduite de ce travail et les résultats permettent de conclure que :

- Le calcul des bilans énergétiques des bâtiments doivent être corrigés en tenant compte des effets de l'évolution des profils de la saturation dans les parois opaques pour les raisons suivantes :

- Les variations de la conductivité thermique moyenne ainsi que la diffusivité massique de la paroi peuvent être importantes.

- L'étude du phénomène de condensation dans la paroi et celle de surface peut être modifiée.

- Les isolants thermiques sont des matériaux sensibles à l'eau, leurs propriétés thermiques peuvent être modifiées d'une façon indésirable.

- L'étude instationnaire où les conditions aux limites sont variables ou périodiques peut permettre une bonne détermination :

- Des qualités des parois et des installations de régulation utilisées, surtout dans les zones dont des fluctuations thermiques sont importantes, en utilisant les calculs d'optimisation technico-économique entre la qualité de la paroi, des installations de régulation et la qualité du confort thermique et massique.

- Des temps de mise en marche des installations de conditionnement dans les zones d'occupations temporaire (ex. zones de travail journalier), et surtout dans la période hivernale dont le risque de condensation est plus important.

- Cette étude peut fournir une amélioration des connaissances pour mettre ou spécifier des réglementations et des modèles de calcul adéquat à la région climatique concernée (zones sèche ou humide) et les fluctuations de changement des conditions extérieures et de pouvoir déterminer les caractéristiques des matériaux voulus à utiliser.

- Dans le contexte de ce sujet, on peut envisager d'autres recherches :

– Dans le stade de l'amélioration des performances des matériaux de construction, les techniques pour les produire et les conditions de leur utilisation en utilisant les techniques des adjuvants.

– La prise en considération des effets des conditions météorologiques telles que la présence de la pluie, de la neige, et du givre et leurs alternations pendant le temps dans les études ;

– La prise en considération de l'importance de l'eau absorbée dans les parois sous l'effet de la succession par capillarité pour les parois qui peuvent être

en contact avec, soit de l'eau libre sur les sols soit de l'eau contenue dans les sols mouillés ;

- La prise en considération de la présence d'une ou plusieurs lames d'air dans la paroi ;
- Le développement et la résolution des modèles multidimensionnelles pour pouvoir prédire les ponts thermiques qui peuvent être importants dans présence de l'eau au niveau des contacts de parois entre elles ou avec des autres éléments de la construction.

Références

- [1] **C.L.D Huang**, multi-phase moisture transfer in porous Media subjected to temperature gradient Pergamon Press Ltd. 1979 Vol. 22, pp. 1295-1307
- [2] **Hamouda JAFFEL**, Caractérisation multi-échelles des matériaux poreux en évolution : cas du plâtre, thèse de doctorat de l'école polytechnique, décembre 2006
- [3] **Jian LIU**, étude expérimentale de la perméabilité relative des matériaux cimentaires et simulation numérique du transfert d'eau dans le béton, thèse de doctorat de Ecole Centrale de Lille décembre 2011.
- [4] **V.P De Freitas, V. Abrantes et P. Crausse**, Moisture Migration in Building Walls Analysis of the Interface Phenomena, Building and Environment, Vol. 31, No. 2, pp. 9S108, 1996.
- [5] **Youming Chen, Shengwei Wang**, Transfer function model and frequency domain validation of moisture sorption in air-conditioned buildings, Building and Environment 36 (2001) 579–588.
- [6] **K Murugesan, H N Suresh, K N Seetharamu, P A Aswatha Nayana**. A theoretical model of brick drying as conjugate problem. International Journal of Heat and Mass Transfer 44 (2001) 4075–4086.
- [7] **C. J. Simonson, Y.-X. Tao and R. W. Besant**, Thermal hysteresis in fibrous insulation. Int. J. Heat Mass transfer. Vol. 36, No. 18, pp. 4433-4441. 1993
- [8] **A Radu**. Représentation analogique des champs thermiques et de diffusion pour l'étude de la condensation dans les éléments de construction Institut polytechnique de Jassy. Roumanie. May 1967
- [9] **Hans Janssen**, Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction?, International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (2011) 1548–1562
- [10] **Josef Prazak**, and **Jan Tywoniak, Frantisek Peterka**. Description of transport of liquid in porous media a study based on neutron radiography data, Int. J. Heat Mass transfer. Vol. 33, No. 6, pp. 1105-1120, 1990.
- [11] **Pierre Meukam**. Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique des bâtiments. Thèse de doctorat d'université, en co- tutelle entre l'université de Cergy-Pontoise et l'Université de Yaoundé I. Décembre 2004.
- [12] **A. V. LUIKOV, A. G. SHASHKOV, L. L. VASILIEV and YU. E. FRAIMA** Thermal conductivity of porous systems. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 11, pp. 117-140. Pergamon Press 1968.
- [13] **A. DEGIOVANNI et C. MOYNE**. Conductivité thermique de matériaux poreux humides : évaluation théorique et possibilité de mesure, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 30, No. 11, pp. 2225-2245, 1987

- [14] **M Z BESSENOUCI, N E BIBI TRIKI, S KHELLADI, B.DRAOUI, A. ABENE.** The apparent thermal conductivity of pozzolana concrete. *Physics Procedia* 21 (2011) 59 – 66.
- [15] **I. Rahmanian, Y.C. Wang** A combined experimental and numerical method for extracting temperature dependent thermal conductivity of gypsum boards. *Construction and Building Materials* 26 (2012) 707–722.
- [16] **M Z BESSENOUCI, N E BIBI TRIKI, S KHELLADI, B.DRAOUI, A. ABENE.** Approches théoriques de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane à l'aide d'une modélisation des matériaux poreux. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 14 N°3 (2011) 427 – 440.
- [17] **B. Lacarrière, A. Trombe, F. Monchoux.** Experimental unsteady characterization of heat transfer in a multi-layer wall including air layers Application to vertically perforated bricks. *Energy and Buildings* 38 (2006) 232–237.
- [18] **Benoît NAITALI.** Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux. Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective. Thèse de doctorat de l'université de Limoge. Novembre 2005.
- [19] **Wei Chen.** A Study of Heat Transfer in a Composite Wall Collector System with Porous Absorber. *Renewable Energy Resources and a Greener Future* Vol.VIII-3-1.
- [20] **M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M. M. Khenfer, A. Bali, M. Quéneudec.** Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials* 21 (2007) 662–668.
- [21] **P. CRAUSSE, J.P. LAURENT et B. PERRIN.** Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux. *Rev Gén Therm* (1996) 35, 95-106.
- [22] **Azeddine BELHAMRI, Karima REBAHI, Ali CHIKHI et Lyes BENNAMOUN.** Etude et caractérisation des transferts thermiques dans des matériaux de construction locaux. 13èmes Journées Internationales de Thermique, Albi, France du 28 au 30 Août 2007
- [23] **G. COMINI and R. W. LEWIS.** A numerical solution of two-dimensional problems involving heat and mass transfer. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 19, pp. 1387-1392. Pergamon Press 1976.
- [24] **Menghao Qin, George Walton, Rafik Belarbi, Francis Allard.** Simulation of whole building coupled hygrothermal-air flow transfer in different climates. *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 1470–1478.
- [25] **P. NORDON and H. G. DAVID.** Coupled diffusion of moisture and heat in hygroscopic textile materials. *Int. J. Heat Man Transfer* Vol. 10, pp. 853-866. Pergamon Press Ltd. 1967.
- [26] **Menghao Qin, Rafik Belarbi, Abdelkarim Ait-Mokhtar, Alain Seigneurin.** An analytical

method to calculate the coupled heat and moisture transfer in building materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (2006) 39–48.

[27] **K. Abahri, R. Belarbi, A. Trabelsi.** Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials. *Building and Environment* 46 (2011) 1354 – 1360.

[28] **C. L. D. HUANG, H. H. SIANG and C. H. BEST.** Heat and moisture transfer in concrete slabs. *Int. J. Heat Man Transfer* Vol. 22, pp. 257-266. Pergamon Press Ltd. 1979.

[29] **Yogendra JOSHI and Benjamin GEBHART.** Vertical natural convection flows in porous media calculations of improved accuracy. *Int J. Heat Mass Transfer.* Vol. 27, No. 1, pp. 69-75, 1984

[30] **W. MASMOUDI and M. PRAT.** Heat and mass transfer between a porous medium and a parallel external flow. Application to drying of capillary porous materials. *Int J. Heat Mass Transfer.* Vol. 34, No. 8. pp 1975-1989. 1991

[31] **Thijs Defraeye, Bert Blocken, Jan Carmeliet.** Analysis of convective heat and mass transfer coefficients for convective drying of a porous flat plate by conjugate modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 112–124.

[32] **Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard.** Predicting the evolution of mechanical and diffusivity properties of cement pastes and mortars for various hydration degrees – A numerical simulation investigation. *Computational Materials Science* 61 (2012) 106–115.

[33] **G.H.A. Vander Heijden, H.P. Huinink, L. Pel, K. Kopinga.** One-dimensional scanning of moisture in heated porous building materials with NMR.

[34] **Issiaka TRAORE.** Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois. Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré–Nancy Université. Septembre 2011.

[35] **S. AZIZI, C. MOYNE et A. DEGIOVANNI.** Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides-I. Experimentation. *Int. Heat Mass Transfer.* Vol. 31, No. 11, pp. 2305-2317, 1988.

[36] **Véronique Baroghel-Bouny.** Water vapour sorption experiments on hardened cementations materials. Part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 438–454.

[38] **Vincent Picandet, Guy Bastian, Abdelhafid Khelidj.** Compared imbibitions of ordinary and high performance concrete with null or positive water pressure head. *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 772–782.

[38] **L. PEL, A. A. J. KETELAARSS and O. C. G. ADAN, and A. A. VAN WELL.**

Determination of moisture diffusivity in porous media using scanning neutron radiography. *Int. Heat Mass Transfer*. Vol. 36, No. 5, pp. 1621-1267, 1993.

[39] **Azeddine Belhamri, Karima Rebahi, Ali Chikhi, Lyes Bennamoun.** Influence of the saturation rate on the heat transfer in building materials. *Proceedings of the Third International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications* May 21-23, 2007, Amman, Jordan

[40] **Walid MCHIRGUI.** Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique Application aux matériaux cimentaires. Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle 2012.

[41] **Christian MOYNE, Jean-Christophe BATSALE et Alain DEGIOVANNI.** Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides-II. *Théorie. Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 31, No. 11, pp. 2319-2330, 1988.

[42] **Z. P. Bazant and L. J. Najjar.** Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem. *Cement and concrete research*. Vol. 1, pp. 461-473, 1971. Pergamon Press, Inc.

[43] **Kari Hillebrand, Markku Kallio and Pertti Frilander.** A drying model for hygroscopic porous material. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 14 (1992) 419-422.

[44] **H. AMIR, G. LE PALECS et M. DAGUENET.** Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud: couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite. *Int J. Heat Mass Transfer*. Vol. 30, No. 6, pp. 1149-1158, 1987

[45] **LI Chunqiu, LI Kefei, CHEN Zhaoyuan.** Numerical Analysis of Moisture Influential Depth in Concrete and Its Application in Durability Design. *Tsinghua science and technology*. ISSN 1007-0214 02/67 pp7-12 Volume 13, Number S1, October 2008.

[46] **Patankar Suhas V. patankar .** Numerical heat transfer and fluid flow (1980). ISBN 0-89116-522-3.

[47] **Menghao Qin, Rafik Belarbi, Abdelkarim Aït-Mokhtar, Lars-Olof Nilsson.** Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 967-975.

[48] **A. A. J. KETELAARS, L. PEL, W. J. COUMANS and P. J. A. M. KERKHOF.** Drying kinetics: a comparison of diffusion coefficients from moisture concentration profiles and drying curves. *Chemical Engineering Science*, Vol. 50, No. 7, pp. 1187-1191, 1995.

[49] **Fitsum Tariku, Kumar Kumaran,** Paul Fazio. Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media. *International Journal of Heat and Mass*

Transfer 53 (2010) 3035–3044.

[50] **Yunping Xi, Zdeněk P. Bazant, and Hamlin M. Jennings.** Moisture Diffusion in Cementitious Materials. *Advanced cement based materials* 1994, 1, 248-257.

[51] **N. E. WIJEYSUNDERA, B. F. ZHENG, M. IQBAL, and E. G. HAUPTMANN.** Numerical simulation of the transient moisture transfer through porous insulation. *Int J. Heat Mass Transfer*. Vol. 39. No. 5. pp. 995-1004. 1996.

[52] **C. H. A. MOLEND, P. CRAUSSE and D. LEMARCHAND.** The influence of capillary hysteresis effects on the humidity and heat coupled transfer in a non-saturated porous medium. *Int J. Heat Mass Transfer*. Vol. 35, No. 6, pp. 1385-1396, 1992

[53] **R. W. Lewis and W. J. Ferguson.** A partially nonlinear finite element analysis of heat and mass transfer in a capillary-porous body under the influence of a pressure gradient. *Appl. Math. Modelling*, 1993, Vol. 17, January.

[54] **C. Maalouf, A.D. Tran Le, M. Lachi, T.H. Mai.** Effect of moisture transfer on thermal inertia in simple layer walls: case of a vegetal fibre material. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. Issue 1 Volume 5, 2011.

[55] **N. Mendes, P.C. Philippi.** A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradient. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005) 37–51.

[56] **Lazaros Elias Mavromatidis, Mohamed EL Mankibi, Pierre Michel, Mat Santamouris.** Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones. *Applied Energy* 92 (2012) 480–491.

[57] **H.L. Zhang, W.M. Marci, X.Z. Fu.** Modeling of the hygrothermal absorption and desorption for underground building envelopes. *Energy and Buildings* 42 (2010) 1215–1219.

[58] **Huijun Wu, Jintu Fan.** Study of heat and moisture transfer within multi-layer clothing assemblies consisting of different types of battings. *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2008) 641–647.

[59] **M. Amara, V. Timchenko, M. El Ganaoui, E. Leonardi, G. de Vahl Davis.** A 3D computational model of heat transfer coupled to phase change in multilayer materials with random thermal contact resistance. *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009) 421–427.

[60] **Ratthasak Prommas.** Theoretical and experimental study of heat and mass transfer mechanism during convective drying of multi-layered porous packed bed. *International*

Communications in Heat and Mass Transfer 38 (2011) 900–905.

- [61] **Mingwei Tian, Sukang Zhu, Ning Pan, Lijun Qu, Guangting Han, Fukui Pan.** Effects of layering sequence on thermal response of multilayer fibrous materials: Unsteady-state cases. *Experimental Thermal and Fluid Science* 41 (2012) 143–148.
- [62] **R. KOHONEN.** Transient Analysis of the Thermal and Moisture Physical Behaviour of Building Constructions. *Building and Environment*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-11, 1984.
- [63] **Saleh A. Al-Ajlan.** Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 2184–2191.
- [64] **Youming Chen, Shengwei Wang.** Transfer function model and frequency domain validation of moisture sorption in air-conditioned buildings. *Building and Environment* 36 (2001) 579–588.
- [65] **G. H. CRAPISTE, E. ROTSTEIN and S. WHITAKER.** A general closure scheme for the method of volume averaging. *Chemical engineering Science*. Vol. 41, No. 2, pp. 227-235, 1986.
- [66] **J. Alberto Ochoa-Tapia, Pieter Stroeve and Stephen Whitaker.** Diffusive transport in two-phase media: spatially periodic models and Maxwell's theory for isotropic and anisotropic systems. *Chemical engineering Science*. Vol. 49, No. 5, pp. 709-726, 1994.
- [67] **J. L. Auriault** heterogeneous medium is an equivalent macroscopic description possible? *International Journal of Engineering Science*, Vol. 29, No.7, pp. 785-795, 1991.
- [68] **S. Maghous, Z. Saada, L. Dormieux, J. Canou, and J.C. Dupla.** A model for in situ grouting with account for particle filtration. *Computers and Geotechnics*, 34 (3): 164–174, 2007.
- [69] **J. L. Auriault and P. M. Adler.** Taylor dispersion in porous media: Analysis by multiple scale expansions. *Advances in Water Resources*, 18 (4): 217–226, 1995.
- [70] **J. Sanahuja, L. Dormieux, and G. Chanvillard.** Modelling elasticity of a hydrating cement paste. *Cement and Concrete Research*, 37 (10): 1427–1439, 2007.

Résumé:

Cette étude concerne les transferts couplés hydro-thermiques dans deux types de paroi: simple et multicouche, en utilisant des conditions aux limites constantes et variables.

Le mécanisme de transfert thermique est supposé par conduction et celui massique supposé par diffusion. La conductivité thermique et la diffusivité massique sont considérées comme variables et sont des fonctions de la saturation en eau. La continuité de la température, de la saturation, des flux thermiques et massiques aux niveaux des surfaces de contacts des couches, est utilisée pour les parois multicouches. Pour bien comprendre l'influence de la variation des conditions extérieures sur le comportement du transfert thermique et l'évolution de la température dans la paroi, on a adopté des conditions aux limites extérieures périodiques et sinusoïdales. Pour être plus proche de la réalité, on a étudié les transferts dans une paroi simple en béton, et dans une autre paroi multicouches.

En se basant sur la méthode des volumes finis, des simulations ont été effectuées à l'aide d'un code de calcul en Fortran 90. Les résultats sont validés à l'aide de la comparaison avec d'autres travaux publiés précédemment.

Ils montrent que :

- Les coefficients de transfert sont fortement couplés et la forte dépendance des caractéristiques physiques des milieux.
- Les conditions aux limites influent fortement sur l'évolution de la température dans la paroi et sur les densités des flux thermique au niveau de la surface intérieure de la paroi.

Mots clés:

Transfert de chaleur et de masse ;

Milieu poreux ;

Paroi simple ;

Paroi multicouche ;

Volumes finis ;

Conditions aux limites variables.

Abstract:

The present study concerns coupled mass and thermal transfers in tow simple and multilayered walls, by using constant and variable boundary conditions.

The thermal mechanism transfer is presumed by conduction and that of mass is assumed by diffusion. We have adopted thermal conductivity and mass diffusivity which are variable and are functions of water content. Temperature, moisture content, thermal and mass flux continuity is used at the level of layer contact surfaces for multilayered wall.

To better know the influence of the variation of the outside conditions on the behavior of the thermal transfer and the evolution of the temperature in the wall. We have adopted external boundary conditions as periodic and sinusoidal form. In order to be much closer from reality, we have studied the transfers in a simple wall made of concrete and in another one which is multilayered.

Basing on finite volumes method, some simulations have been realized, using a code of calculation by Fortran 90. The results are validated by comparing them with other studies recently published. They show that:

- The transfer coefficients are strongly coupled, and the physical medium characteristics make the thermal transfer unsteady.
- The boundary conditions strongly influence the evolution of the temperature in the wall and also the thermal flux densities at the level of wall interior surface.

Key words:

Heat and mass transfer;

Simple wall;

Multilayered wall;

Finite volumes;

Variable boundary conditions.

ملخص:

تخص هذه الدراسة الانتقال المزدوج للكتلة و الحرارة في نوعين من جدران البناءات , بسيطة و متعددة الطبقات شروط حدية ثابتة و متغيرة. يؤخذ بعين الاعتبار انتقال الحرارة بالوصل أما انتقال المادة فيعتبر بالانتشار. الناقلية الحرارية و الكتلية تعتبران متغيرتان بدوال درجة تشبع المادة المسامية بالماء. استمرارية الحرارة , التشبع و التدفقين الحراري و الكتلي على مستوى مساحة تلاصق الطبقات مستعملة في حالة دراسة الجدار متعدد الطبقات. من أجل الفهم الجيد لتأثير تغير الشروط الخارجية على تصرف الانتقال الحراري و تطوره في الجدار, نأخذ بعين شروط حدية دورية و جيبية. و لأجل الاقتراب أكثر من الحقيقة ندرس الانتقال المزدوج في جدار بسيط من الخرسانة و في آخر متعدد الطبقات. بالاعتماد على طريقة الحجم المتناهية, أجريت المحاكاة باستعمال برنامج حساب بلغة فوثرن 90. النتائج المتحصل عليها أثبتت بالاعتماد على المقارنة بأعمال أخرى منشورة في الجرائد العلمية مسبقا.

النتائج تبين:

- معاملات الانتقالات مقرونة بشدة و متعلقة بالخصائص الفيزيائية للأوساط المسامية.
- الشروط الخارجية تؤثر بشكل كبير على التطور الحراري في جدران البناءات و كثافة التدفقات الحرارية على مستوى المساحات الداخلية لجدران البناءات.

الكلمات المفاتيح:

- انتقال الحرارة و الكتلة ;
- الأوساط المسامية ;
- جدار بسيط ;
- جدار متعدد الطبقات ;
- الحجوم المتناهية ;
- شروط حدية متغيرة.