
INTRODUCTION GENERALE

Le radon est un gaz rare radioactif qui pénètre dans nos habitations et dans les lieux de travail principalement en s'infiltrant par les sous-sols. Puis, ce gaz et ses descendants présents dans l'air ambiant s'infiltrent dans les poumons où ils se déposent et irradient leurs tissus. Ce gaz radon est ainsi le deuxième facteur du cancer du poumon après le tabac [1].

Le problème du radon n'est pas nouveau. On effet, dès le début du XVI^{ème} siècle, on parlait d'une maladie pulmonaire mystérieuse qui avait causé la mort de nombreux mineurs en Bohême (France). C'est vers la fin du XIX^{ème} siècle que la «maladie des mineurs du Schneeberg» a été diagnostiquée comme étant un cancer du poumon. La cause de cette maladie resta cependant inconnue jusqu' aux années cinquante. Il a fallu attendre cette époque pour découvrir que les descendants du radon pouvaient soumettre les poumons à un fort rayonnement ionisant [1].

Le rapport entre la mortalité due au cancer du poumon et l'exposition des mineurs du Schneeberg aux descendants du radon est bien documenté [2]. L'analyse commune réalisée à partir de onze études fait ressortir une relation linéaire entre l'exposition et l'effet.

L'examen des différentes études épidémiologiques concernant l'Europe révèle une augmentation de risque du cancer du poumon de 8 % par 100 Bq.m⁻³ [3, 4]. Si l'on prend en compte l'incertitude lors de la détermination de l'exposition, l'augmentation monte alors à 16 % par 100 Bq.m⁻³. Les études cas-témoins américaines ont été analysées ensemble et ont conduit à des résultats similaires [5]. Si l'analyse se limite aux sources comprenant des données plus détaillées sur le radon, le risque estimé augmente encore.

Cela fait déjà une dizaine d'années que l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a classé le radon parmi les substances cancérigènes pour l'homme [6].

Dans l'air extérieur, le radon se dilue rapidement et sa concentration moyenne reste généralement faible: le plus souvent inférieure à une dizaine de Bq.m⁻³.

Dans des lieux confinés tels que les grottes, les mines souterraines mais aussi les bâtiments en général et les habitations en particulier, le radon peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées, ce qui présente une source significative d'exposition des hommes aux rayonnements ionisants.

Le radon présent dans une habitation provient essentiellement d'un transfert depuis le sol, les matériaux de construction (notamment le granite) et de l'eau de distribution.

La concentration du radon dans l'air d'une habitation dépend ainsi des caractéristiques du sol mais aussi de l'habitation et de sa ventilation. Elle varie également en fonction des paramètres météorologiques.

Pour assurer la protection du public et des travailleurs vis-à-vis de l'exposition au radon dans les habitations, Il est important de comprendre les processus de génération, de transfert et de distributions du radon et ses descendants à l'intérieur des habitations. Cette étude représente une compréhension générale sur les processus de transfert et de distribution du radon et ses descendants dans l'air intérieur, ainsi que les paramètres qui affectent également ces processus.

Comme les autres gaz rares, le radon inhalé, du fait de sa très faible réactivité chimique, a peu d'affinités avec le milieu biologique et est presque entièrement ré-exhalé. En revanche, ses descendants à vie courte, constitués d'atomes radioactifs, sous forme d'aérosols solides (polonium, plomb, bismuth), ont un fort potentiel énergétique. Une fois inhalés, ils se déposent le long des voies respiratoires et délivrent leur énergie alpha aux cellules et tissus proches du site de dépôt. Bien que la quantification de ces produits de filiation du radon soit une phase importante dans le processus de l'évaluation des doses reçues.

La dose délivrée aux différentes régions du poumon après inhalation du radon et de ses descendants ne peut pas être mesurée directement. Elle doit être calculée en utilisant des modèles mathématiques qui prennent en compte les différents processus impliqués, inhalation, dépôt, clairance et décroissance des descendants dans les voies respiratoires. La dose d'irradiation alpha délivrée aux tissus est fonction de la concentration des descendants du radon dans l'air, du volume d'air inhalé par le sujet, travailleur ou membre de la population générale au cours de la période considérée, de la fraction des descendants du radon qui reste déposée dans les différentes régions de l'arbre respiratoire. Par ailleurs, la fraction des descendants du radon déposée dans l'arbre respiratoire est fonction de la géométrie des voies respiratoires elles-mêmes, de la fréquence respiratoire, du mode de respiration (par le nez ou par la bouche) et de la taille des particules inhalées.

Ce projet de thèse de doctorat s'inscrit dans cette optique et s'intéressera à étudier numériquement et expérimentalement l'effet des paramètres météorologiques sur le comportement du radon et ses descendants dans l'air intérieur. Une étude détaillée de

l'influence des différents paramètres gouvernants (ventilation, la température et l'humidité.....) susceptibles d'affecter les distributions du radon et ses descendants est effectuée. Aussi, nous avons évalué des taux d'équivalent de doses engagées dues aux descendants du radon dans chaque compartiment du système respiratoire humain suite à l'inhalation de l'air intérieur. Pour ce faire, notre travail sera subdivisé en cinq chapitres distincts mais complémentaires.

Dans le premier chapitre du manuscrit, nous rappelons quelques généralités sur le radon et ses descendants et les conditions nécessaires sur les mécanismes de genèse et de transfert de ce gaz dans l'environnement. Egalement, nous présentons les méthodes utilisées pour mesurer la radioactivité dans l'air à savoir la méthode des scintillations, la spectrométrie alpha, et les méthodes des détecteurs solides de traces nucléaires. Aussi, nous faisons état de quelques travaux relativement récent se rapportant à l'étude de transport et la distribution du radon dans les habitations dans le but de situer notre sujet par rapport aux travaux publiés dans le domaine.

Dans le deuxième chapitre, on présente brièvement le modèle physique utilisé et la formulation mathématique régissant ces derniers moyennant certaines hypothèses simplificatrices. Une description de la méthode numérique utilisée pour la résolution des problèmes étudiés sera également présentée dans ce chapitre. Nous décrivons ensuite une méthode nucléaire basée sur l'utilisation de deux détecteurs de traces nucléaires (LR-115 et CR-39) pour la détermination des concentrations du radium et du radon dans les échantillons des matériaux de construction. Nous allons donner aussi un précis sur le modèle dosimétrique développé dans la Publication 66 de la Commission Internationale de la Protection Radiologique (CIPR).

Le troisième chapitre traite l'influence de la ventilation en fonction des indices du confort thermique et de qualité de l'air intérieur dans des cavités ouvertes remplies d'un mélange binaire air- ^{222}Rn en régime laminaire et permanent. En effet, les cavités ventilées sont généralement considérées comme étant une approximation pour la modélisation des locaux ventilés.

Dans le quatrième chapitre, nous analysons l'influence de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur dans une pièce tridimensionnelle en régime turbulent et permanent. Cette analyse concerne différentes configurations de ventilation mécanique simple flux en vue de

trouver la meilleure configuration en termes d'efficacité et de qualité de l'air intérieur. Au cours de cette partie, plusieurs confrontations ont été réalisées, présentées et discutées.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous présentons une étude numérique et expérimentale de l'influence des paramètres météorologiques ainsi que d'autres paramètres importants sur le comportement du radon et ses descendants dans une habitation. Nous déterminons aussi les taux d'équivalents de doses engagées dans les différents compartiments du système respiratoire des différents individus des membres du public suite à l'inhalation du radon et de ses descendants à l'intérieur.

Enfin une conclusion générale et perspectives viendront pour achever ces travaux.

Références

- [1] Commission fédérale de la protection contre les radiations et de surveillance de la radioactivité (CPR), berne (2005). Analyse des contributions à l'irradiation de la population Suisse en 2004.
- [2] J. Lubin, J. D. Boice, C. H. Edling, R. Hornung, G. Howe, E. Kunz, A. Kusiak, Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miners studies. US National Institutes of Health. NIH publication No. 94-3644, (1994).
- [3] S. Darby, D. Hill, A. Auvinen, J.M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, H. Deo, R. Falk, F. Forastiere, M. Hakama, I. Heid, L. Kreienbrock, M. Kreuzer, F. Lagarde, I. Mäkeläinen, Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*, (2004).
- [4] D. Krewski, H. J. Lubin, J. M. Zielinski, M. Alavanja, V. S. Catalan, R. W. Field, B. Klotz, Residential Radon and Risk of Lung Cancer: A Combined Analysis of 7 North American Case-Control Studies. *Epidemiology*. 16(2):137-145, (2005).
- [5] World Health Organisation (WHO), Indoor air Quality: A risk-based approach to health criteria for radon indoors", Report on a WHO Working Group, Eilat, Isreal, 28 March-4 April 1993, EUR/ICP/CEH 108(A), (1996).
- [6] B. Melloni, A. Vergnenègre, P. Lagrange, F. Bonnaud. Radon et exposition domestique. *Rev Mal Respir*. 17, 1061-1071, (2000).
- [7] G. Monchaux, R. Masse, Les incertitudes sur la dose délivrée aux voies respiratoires après exposition au radon. *Radioprotection*. 34 (3), 367-387, (1999).

CHAPITRE I:

GENERALITES SUR LE RADON ET SES DESCENDANTS

Introduction

Le radon est un gaz radioactif naturel, inodore, incolore et inerte. Il existe sous forme de trois isotopes radon (^{222}Rn , $T = 3,8 \text{ j}$), thoron (^{220}Rn , $T = 55 \text{ s}$), actinon (^{219}Rn , $T = 3,9 \text{ s}$). Ces isotopes proviennent respectivement de la décroissance du radium 226, radium 224 et radium 223, eux-mêmes produits de filiation respectifs de l'uranium 238, du thorium 232 et de l'uranium 235 (Figure I.1, Figure I.2 et Figure I.3) [1].

- Le radon 219 (actinon) est le moins abondant des trois isotopes. En effet, la teneur en l'uranium 235 dans les roches et les sols représente environ 0,73 % de celle de l'uranium 238. Par suite, il est pratiquement absent dans l'atmosphère. On ne parlera donc, dans ce qui suit, que des deux autres isotopes.
- Le radon 220 (thoron), issu du thorium 232, est le plus abondant des trois isotopes relâchés par la terre. Cependant, il disparaît très vite dans l'atmosphère en raison de sa courte période.
- Le radon 222, descendant du radium 226, appartenant à la famille de l'uranium 238, émane en quantité plus faible que le thoron. Il est pourtant l'isotope le plus présent dans l'atmosphère à cause de sa période radioactive qui est de 3.8 jours. Cette période est suffisamment longue pour lui permettre de migrer dans les sols depuis la roche qui lui a donné naissance, jusqu'à l'air libre.

En se désintégrant, le radon émet des particules alpha et engendre ainsi des descendants eux-mêmes radioactifs (polonium 214, bismuth 214, plomb 214,...). Le risque sanitaire du radon n'est pas lié au gaz lui-même, mais à ses produits de filiation. Fixés ou non sur les aérosols atmosphériques, les descendants du radon peuvent alors être inhalés et se déposer dans l'arbre broncho-pulmonaire, plus ou moins profondément, selon leur taille.

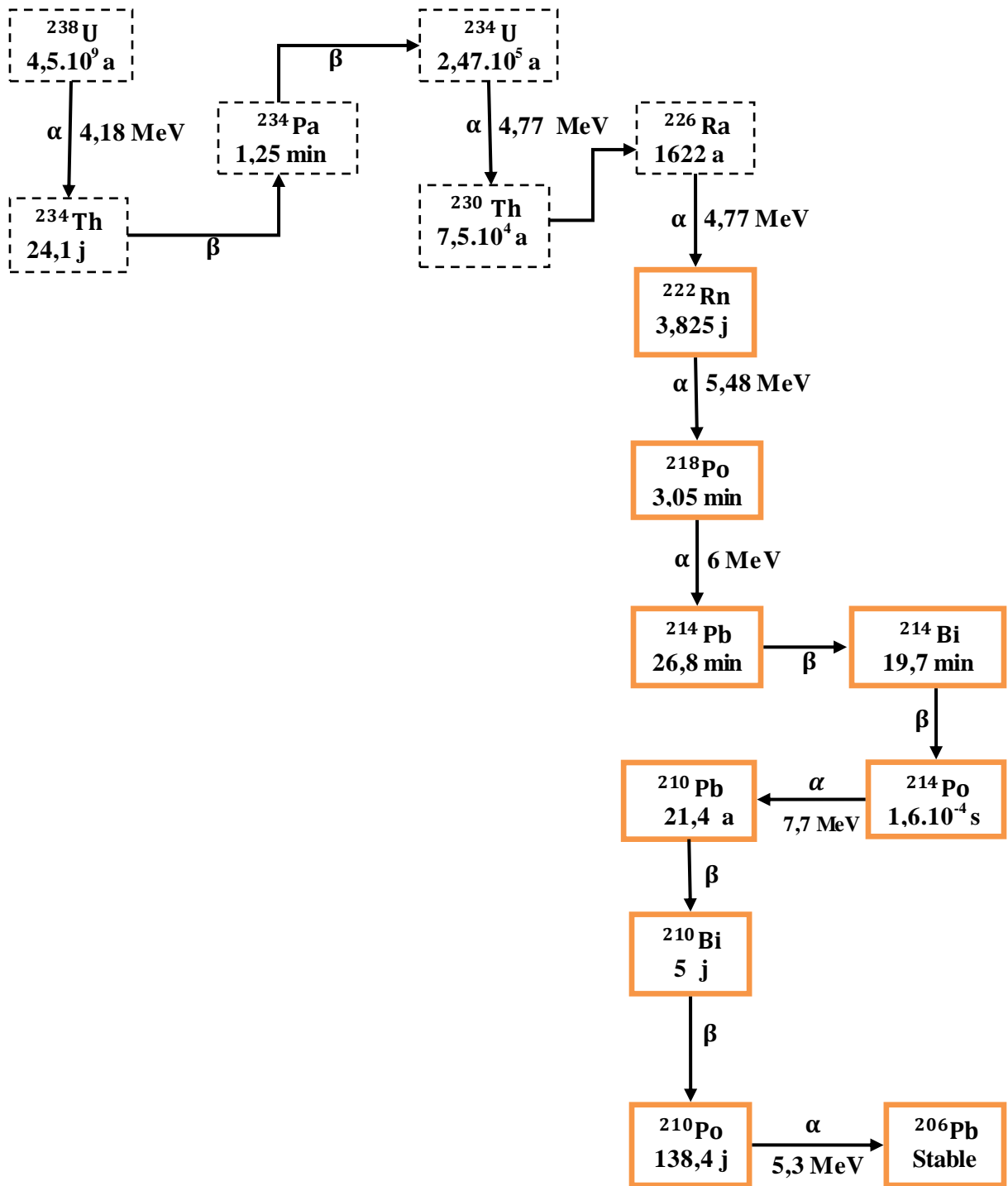


Figure I.1: Schéma de désintégration de la famille de l'uranium 238 [1].

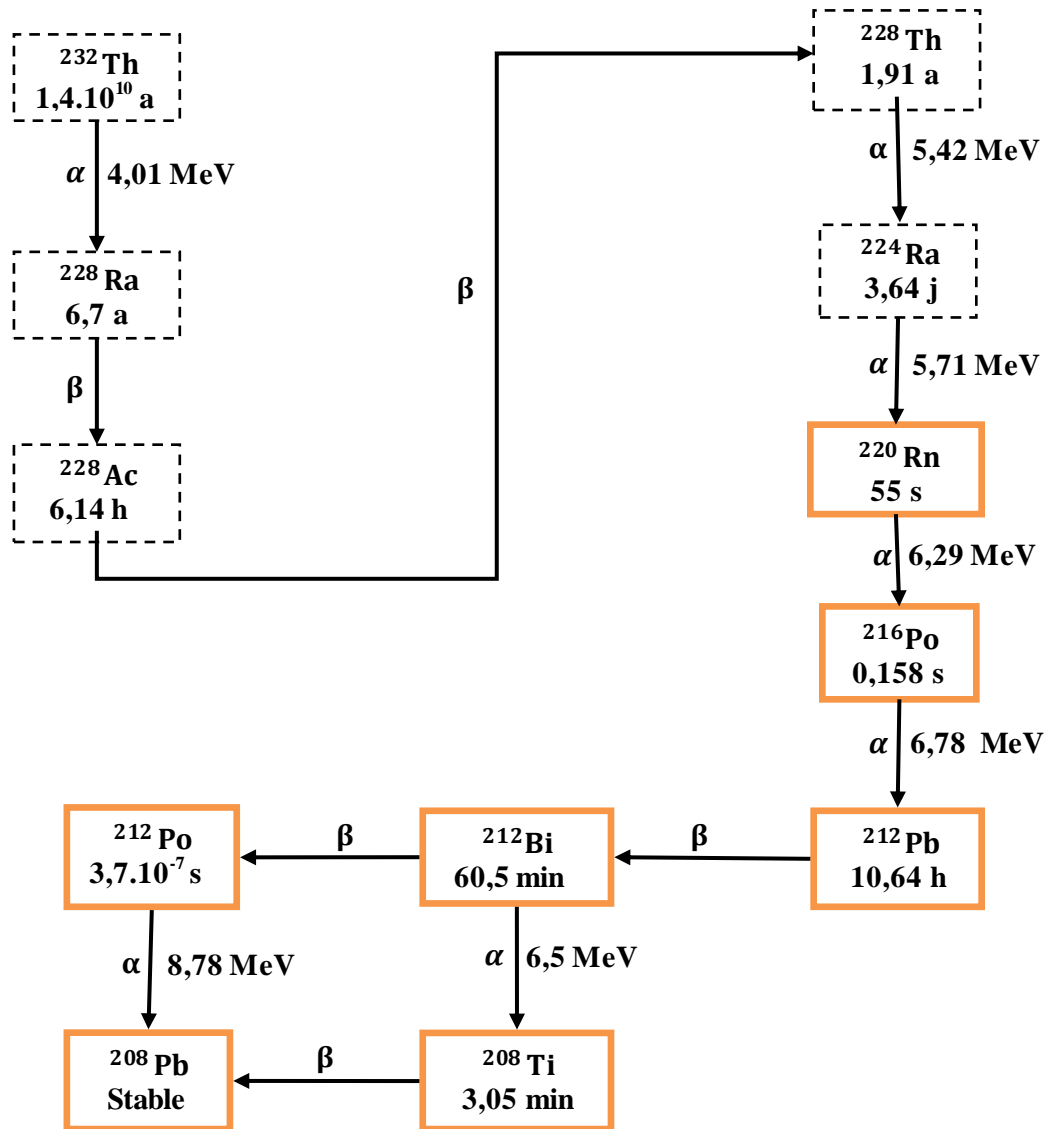


Figure I.2: Schéma de désintégration de la famille de thorium 232 [1].

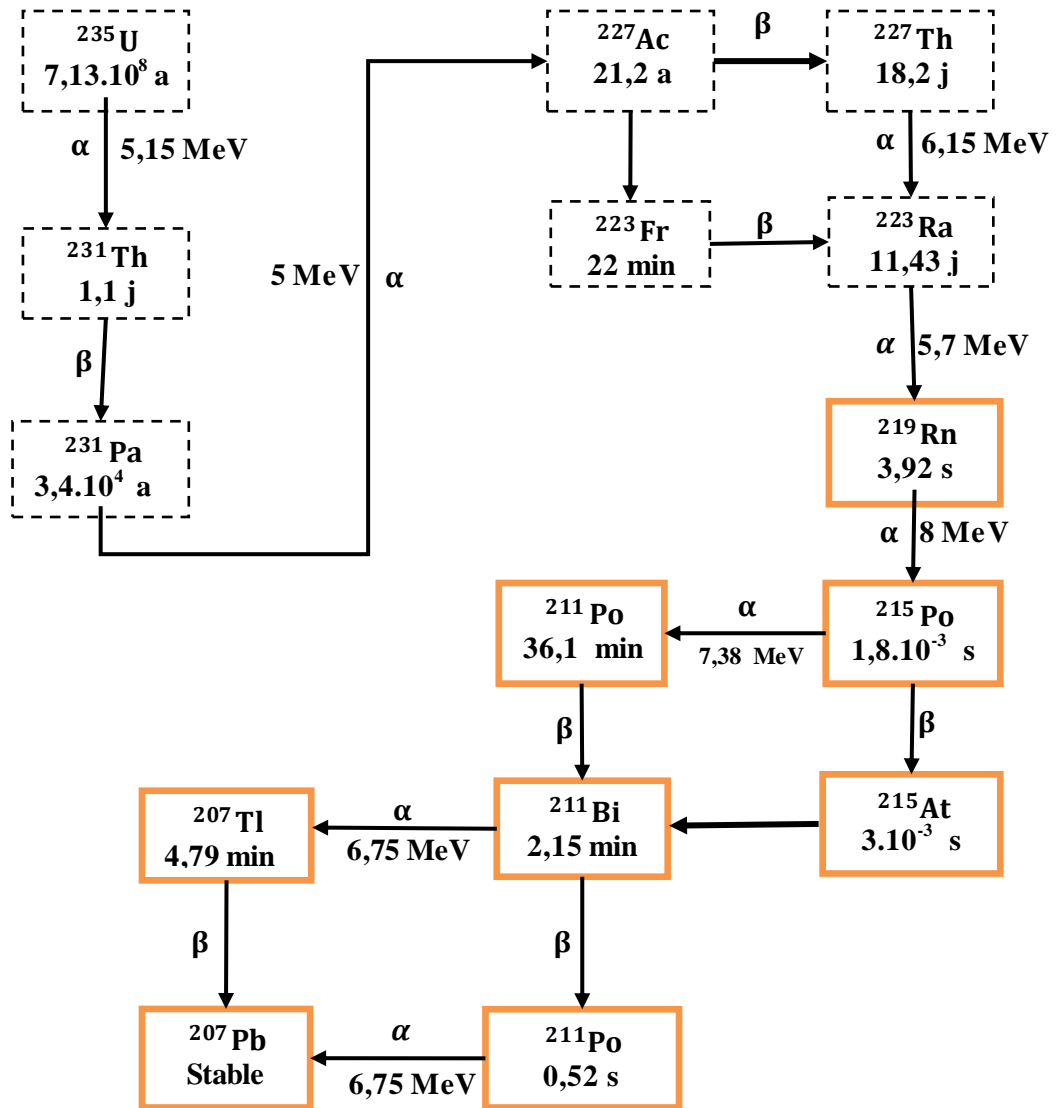


Figure I.3: Schéma de désintégration de la famille de l'uranium 235 [1].

I.1 Migration du radon dans le sol

Le radon (^{222}Rn) trouve son origine principale dans les sols et les matériaux de construction où il se forme par désintégration des noyaux de radium-226 présents dans les minéraux constitutifs des roches. La migration du radon à partir des sols ou des matériaux de construction jusqu'à l'interface sol-air se déroule en deux étapes (Figure. I.4):

- L'émanation des roches
- Le transport à travers les interstices des roches

I.1.1 Emanation des roches

Dans un premier temps (émanation), le radon formé par désintégration alpha du radium présent dans les particules du sol, est libéré par ces particules, gagne l'espace des pores du réseau cristallin. En effet, lors de cette désintégration sur l'action de l'énergie libérée, l'atome de radon subit un recul dans le réseau. Plusieurs cas, schématisés dans la figure I.4 peuvent alors se présenter.

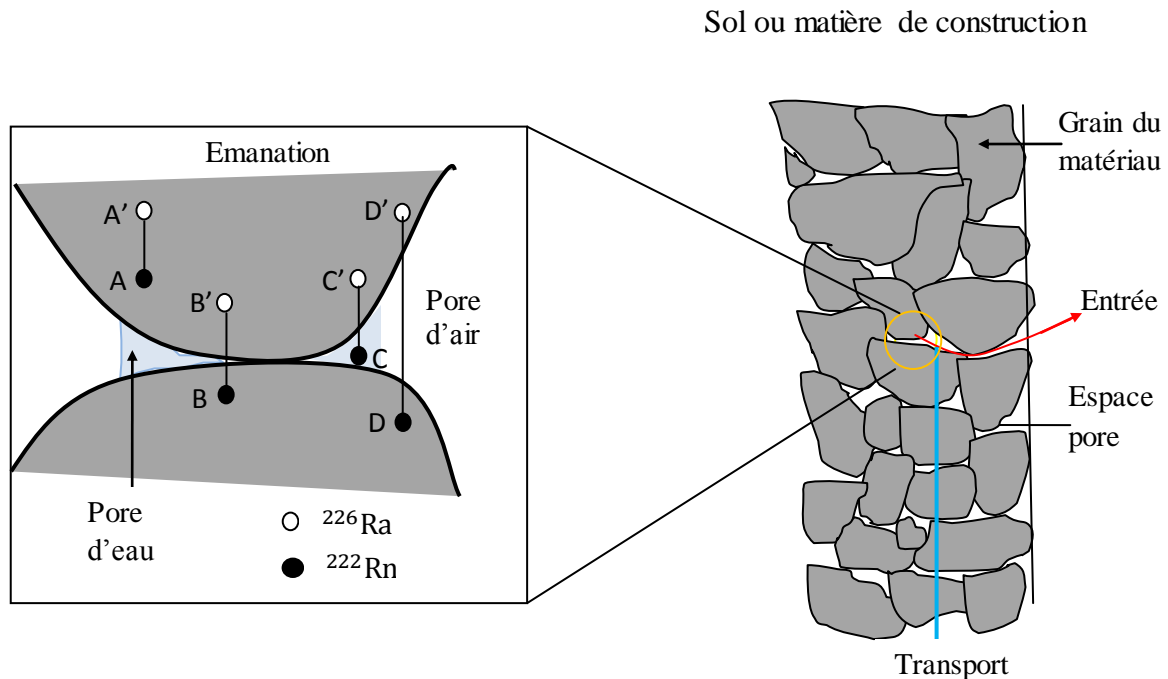


Figure I.4: Mécanisme de formation du radon dans un réseau cristallin: en A, l'atome de ^{226}Ra se trouve à une distance très grande pour que l'atome de ^{222}Rn reste dans grain; en B et D, l'atome de ^{222}Rn s'échappe du premier grain pour être piégé dans le grain voisin; en C l'atome du ^{222}Rn parvient à atteindre l'espace des pores [2].

Le tableau I.1 regroupe une partie des valeurs du facteur d'émanation du ^{222}Rn pour quelques matériaux [3, 4]. Le facteur d'émanation est défini comme le rapport du nombre de noyaux du radon émis au nombre de noyaux du radon formés après la désintégration du ^{226}Ra .

Matériaux	Facteur d'émanation du ^{222}Rn	
	Moyen	Gamme
Sols	0,10	0,01-0,50
Roches	0,08	<0,01-0,40
Matériaux de construction	0,05	<0,01-0,30
Briques d'argile	0,04	0,02-0,10
Béton	0,15	0,10-0,40

Tableau I.1: Facteur d'émanation du ^{222}Rn dans différents matériaux [4].

Ces quelques exemples montrent que l'émanation du ^{222}Rn est d'environ 1 noyau pour 10 créés. Jusqu'à présent, nous n'avons pas trouvé de données équivalentes pour l'émanation de thoron. Compte tenu de sa courte période, ce facteur doit être faible mais non nul puisque nous l'avons observé dans l'air au cours des expériences [4].

I.1.2 Le transport du radon vers l'atmosphère

Dans un deuxième temps (transport), les atomes du radon migrent à travers l'espace des pores jusqu'à ce qu'ils atteignent l'atmosphère ou jusqu'à ce qu'ils se désintègrent.

Les principaux mécanismes de migration du radon dans l'espace des pores sont la diffusion et l'advection. Généralement, la diffusion est le mécanisme dominant dans les canaux intergranulaires, les capillaires et les petits pores; par contre, dans les larges pores, l'advection devient dominante.

I.1.2.1 La diffusion

Dans le cas de la diffusion, le phénomène est décrit par la loi de Fick. Si un gradient de concentration apparaît pour le radon dans l'espace des pores, le processus de diffusion va tendre à le réduire en faisant passer plus d'atomes du côté des faibles concentrations que du côté des fortes concentrations.

Dans un milieu supposé homogène et isotrope, le flux des atomes du radon qui migrent par diffusion s'exprime d'après la loi de Fick par la relation [4]:

$$\vec{J}_D = -D_M \overrightarrow{\text{grad}} C \quad (\text{I.1})$$

où J_D est le flux du radon par diffusion ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), C est l'activité volumique du radon dans le milieu (Bq.m^{-3}) et D_M est le coefficient de diffusion moléculaire du radon dans le milieu ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

Le tableau I.2 regroupe le coefficient de diffusion du ^{222}Rn dans différents milieux:

Milieu	Coefficient de diffusion ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)
Air	0,12
Eau	$1,37.10^{-5}$
Milieu cristallin	10^{-20}
Granite	$10^{-10} \text{ } _{10^{-7}}$

Tableau I.2: Coefficient de diffusion du ^{222}Rn dans différents milieux [5].

I.1.2.2 L'advection.

En plus du phénomène de diffusion, les atomes du radon peuvent être transportés sous l'effet de gradients de pressions; le flux d'atomes du radon migrant par advection s'exprime par [6]:

$$\vec{J}_A = C\vec{v} \quad (\text{I. 2})$$

où J_A représente le flux du radon migrant par advection ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), C est l'activité volumique du radon (Bq.m^{-3}) et v est la vitesse du radon (m.s^{-1}).

La vitesse v du radon dépend du gradient de pression et du coefficient de mobilité lié directement à la géométrie du milieu et à la viscosité du gaz. Dans le cas de l'advection dans un milieu poreux sec, le coefficient de mobilité dépend de la perméabilité intrinsèque du milieu et de la viscosité du fluide. En accord avec la loi de Darcy, l'expression de la vitesse v est [6]:

$$v = - \frac{k \nabla P}{\mu} \quad (\text{I. 3})$$

où k est la perméabilité intrinsèque du milieu (m^2), ∇P est le gradient de pression et μ est le coefficient de viscosité dynamique du gaz ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$).

I.2 Les sources du radon dans des habitations

Dans les habitations, la concentration du radon est généralement plus importante que dans l'atmosphère extérieure, car le taux de renouvellement de l'air est plus faible. La figure I.5 nous montre les différentes voies de pénétration du radon dans les habitations. Le radon provient du sol et des matériaux de construction, avec une concentration souvent plus faible pour l'eau à usage domestique.

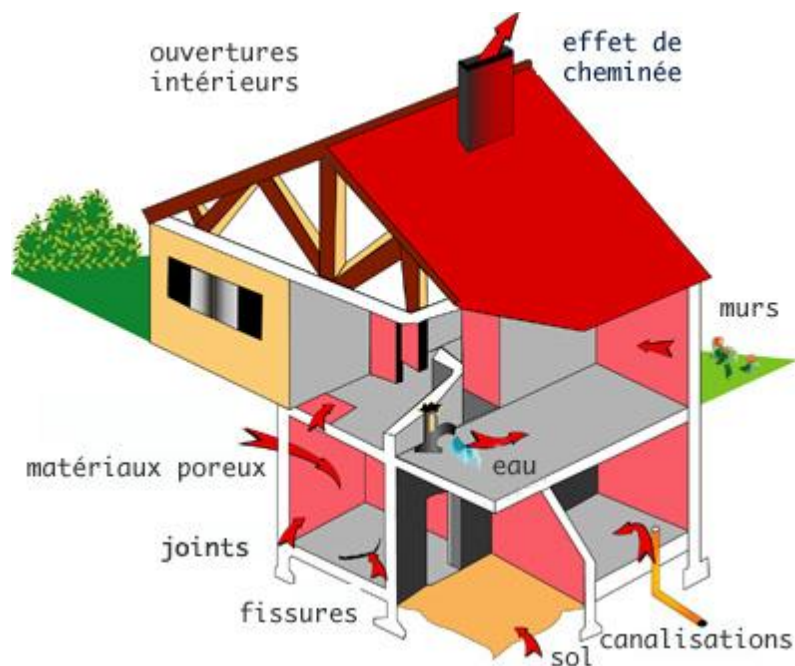


Figure I.5: Les voies de pénétration du radon dans les habitations [7].

I.3 Propriétés des descendants du radon

Contrairement à leur "père", les descendants du radon sont des éléments solides. En effet, au moment des désintégrations, les produits de filiation du radon sont des atomes isolés et c'est la théorie cinétique des gaz qui régit leur comportement, mais ils évoluent rapidement pour former deux types de descendants dont le comportement tend plutôt vers celui des particules. Ainsi [8]:

- certains atomes forment avec quelques molécules de l'air des agrégats dont la taille est de l'ordre quelques nm: la fraction formée est appelé "fraction libre" des descendants du radon;

- les autres atomes se fixent sur l'aérosol atmosphérique dont la taille moyenne est voisine de 0,1 μ m. Ils forment ainsi la fraction "attachée" des descendants du radon.

Nous aurons l'occasion d'apporter des précisions sur le mécanisme d'attachement des descendants libres sur les particules de l'aérosol ambiant: l'attachement est un processus dans lequel la fraction libre des descendants du ^{222}Rn de par leurs mouvements aléatoires dans un gaz entrent en collision avec un aérosol ambiant et forment un ensemble nouveau: l'aérosol émetteur α .

Pour préciser la notion de vitesse d'attachement, on définit en théorie classique le coefficient d'attachement β donné par :

$$\beta(d) = 2\pi Dd \quad (I.4)$$

avec D et d désignant respectivement le coefficient de diffusion et le diamètre de l'aérosol.

Connaissant le coefficient de fixation β , le taux d'attachement, X , peut être calculé en déterminant la concentration des aérosols Z (en m^{-3}) [8] :

$$X = \beta \cdot Z \quad (I.5)$$

Le taux d'attachement dans l'air intérieur varie entre 20 h^{-1} et 50 h^{-1} , dépendant de la concentration des particules aérosols Z [8].

Les descendants du radon peuvent ainsi se détacher de l'aérosol et être de nouveau considérés comme fraction libre. Pour les descendants émetteurs bêta le taux détachement est négligeable, par contre pour les descendants émetteurs alpha le taux détachement est égale 0,80.

La figure I.6 décrit l'enchaînement des processus de production, décroissance, attachement et détachement des descendants du radon [9].

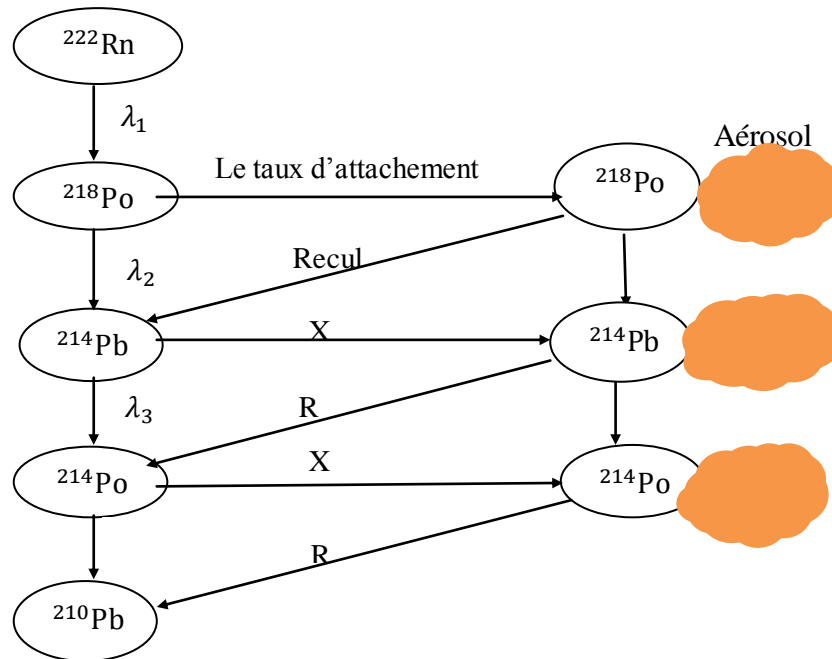


Figure I.6: Processus de production, décroissance, attachement et détachement des descendants du radon [9].

I.4 Evolution du radon et ses descendants dans l'atmosphère intérieure.

Le comportement des descendants radioactifs du radon-222 est symbolisé sur la figure I.7. Ce schéma montre les différents mécanismes susceptibles d'affecter un descendant solide entre sa formation et sa désintégration.

Après leur formation, seule une partie des atomes de ^{218}Po se retrouve mélangée à l'air ambiant de la chambre, une fraction se dépose sur les parois de la chambre (murs ou meubles), ou étant entraînée dans l'air extérieur par la ventilation. Le dépôt des descendants sur les parois résulte de la diffusion liée aux propriétés dimensionnelles des particules ultrafines. La grande part des descendants déposés sur les parois concerne principalement la fraction libre, la vitesse de dépôt a été estimée à $10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$ pour la fraction attachée, et de 1 à 3 cm.s^{-1} pour la fraction libre [10].

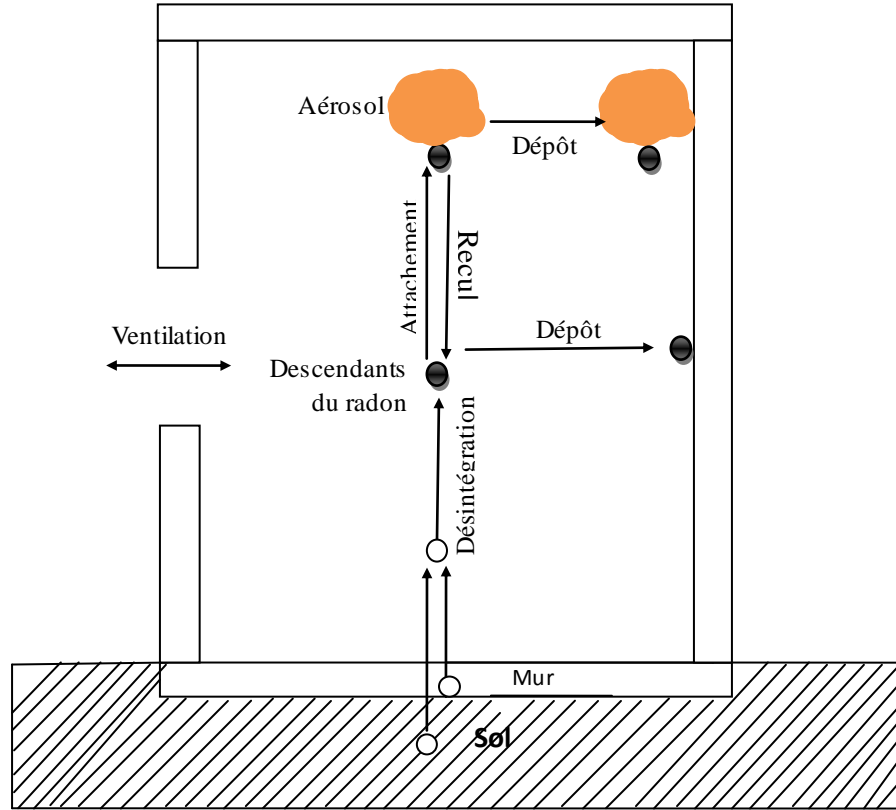


Figure I.7: Les processus de bases influençant la balance du radon et leurs descendants dans une chambre [10].

A son tour, le ^{218}Po se désintègre pour donner un atome de ^{214}Pb qui, si l'atome de ^{218}Po se trouvait fixé à un aérosol, reste fixé sur le noyau original ou s'en détache pour former un ion libre, sous l'action de l'énergie de recul libérée lors de la désintégration. Le mécanisme se reproduit ainsi pour les descendants qui suivent. Cependant, il faut noter la très faible probabilité pour un atome de ^{214}Bi de se détacher d'un aérosol au moment de la désintégration de l'atome de ^{214}Pb , l'énergie de recul étant beaucoup plus faible pour la désintégration bêta [10, 11].

Selon le modèle Porstendörfer et al. [12], les concentrations ou les activités volumiques des fractions libres et des fractions attachées dans l'air intérieur peuvent être déterminé en utilisant les équations suivantes:

$$\frac{\partial C_j^u}{\partial t} + u_i \frac{\partial C_j^u}{\partial x_i} = D_j^u \left(\frac{\partial^2 C_j^u}{\partial x_i^2} \right) + [\lambda_j C_{j-1}^u + R_{j-1} \lambda_j C_{j-1}^a] - (\lambda_j + X + \lambda_d^u) C_j^u \quad (\text{I.6})$$

$$\frac{\partial C_j^a}{\partial t} + u_i \frac{\partial C_j^a}{\partial x_i} = D_j^a \left(\frac{\partial^2 C_j^a}{\partial x_i^2} \right) + [(1 - R_{j-1}) \lambda_j C_{j-1}^a + X C_j^u] - (\lambda_j + \lambda_d^a) C_j^a \quad (\text{I.7})$$

et

$$C_j = C_j^u + C_j^a$$

C_j^u et C_j^a étant respectivement les concentrations des fractions libres et attachées du radon respectivement (Bq.m^{-3}), ($j= 1, 2, 3$ et 4 pour ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi et ^{214}Po), u_j les trois composantes de vitesse, t est le temps, les paramètres D^u et D^a désignent respectivement les coefficients de diffusion de la fraction libre et attachée, λ_j est la constante de désintégration du descendant j , λ_d^u est la constante de dépôt des fractions libres des descendants du radon allant de 5 à 110 h^{-1} , et λ_d^a la constante de dépôt des fractions attachées des descendants du radon allant de $0,10$ à $0,40 \text{ h}^{-1}$, X est le taux d'attachement du descendant sur un aérosol variant entre 20 et 50 h^{-1} et R_j ($R_1 = R_4 = 0,80$ et $R_2 = R_3 = 0$) est le facteur de recul (ou détachement) des descendants attachés du radon.

I.4.1 Facteur d'équilibre

Les descendants à vie courte du ^{222}Rn présents dans l'air intérieur sont très rarement à l'équilibre radioactif avec leur père et le facteur d'équilibre est alors utilisé pour quantifier cet état de « déséquilibre ». Le facteur d'équilibre est un paramètre sans dimension. Il est généralement compris entre 0 et 1 . Dans les bâtiments, le facteur d'équilibre varie entre $0,1$ et $0,9$ avec une valeur moyenne égale à $0,4$ (UNSCEAR, 2000). Ce facteur est défini comme suit [9] :

$$F = \frac{0,105(C_1^u + C_1^a) + 0,516(C_2^u + C_2^a) + 0,379(C_3^u + C_3^a)}{C} \quad (\text{I.8})$$

avec C désignée la concentration du radon (Bq.m^{-3}).

I.5 Qualité de l'air intérieur et ventilation

I.5.1 Indice de qualité de l'air intérieur

L'indice de qualité de l'air (I_{IAQ}) dans l'air intérieur est défini comme étant le rapport de la différence entre la concentration moyenne du radon à l'intérieure (\bar{C}) et la concentration de l'air extrait (C_s), et la différence de la concentration « seuil » ($C_{\text{seuil}}=200 \text{ Bq.m}^{-3}$) et C_s . Il est utilisé pour apprécier la qualité de l'air intérieur. Il est défini par la relation [10]:

$$I_{\text{IAQ}} = \frac{\bar{C} - C_s}{C_{\text{seuil}} - C_s} \quad (\text{I.9})$$

C_{seuil} est la valeur limite de concentration en radon au-dessus de laquelle l'exposition au radon peut présenter des risques sanitaires. Une bonne qualité d'air requiert $I_{\text{IAQ}} < 1$.

I.5.2 Efficacité d'élimination du radon

L'efficacité de la ventilation dans l'air intérieur est définie comme étant le rapport de la différence des concentrations du radon entre l'air extrait (C_s) et l'air insufflé (C_e) par la différence entre la concentration moyenne du radon de l'air intérieur (\bar{C}) et la concentration de l'air insufflé. Elle permet d'apprécier la capacité d'un système de ventilation à éliminer le radon présent dans une chambre ventilée. La description des indices et des méthodes d'évaluation est donnée par [11].

$$\varepsilon_c = \frac{C_s - C_e}{\bar{C} - C_e} \quad (\text{I. 10})$$

Le système de ventilation est d'autant plus efficace que l'indice ε_c a une valeur élevée:

- $0 < \varepsilon_c < 1$: le radon s'accumule dans le domaine étudié, la qualité de l'air y est donc moins bonne qu'en sortie. Le domaine est considéré comme peu efficace;
- $\varepsilon_c = 1$: la concentration du radon dans le domaine ventilé est équivalente à celle obtenue à l'extraction. L'indice indique alors que la distribution du radon obéit à l'hypothèse de mélange parfait. C'est souvent le cas pour les systèmes de ventilation par mélange;
- $\varepsilon_c \geq 1$: pour la ventilation à effet de piston (ventilation par déplacement). Le radon dans l'air est mieux dilué dans le domaine étudié que dans l'air extrait. La qualité de l'air est meilleure dans le domaine qu'en sortie et le système de ventilation est considéré comme étant efficace.

I.6 Techniques de détection du radon [12, 13]

Il existe de nombreuses techniques pour mesurer la concentration en radon dans l'air atmosphérique. Ces techniques de mesures reposent sur les différentes méthodes de détection des émissions qui accompagnent les désintégrations radioactives du radon et/ou de ses descendants et peuvent être classées en deux grandes catégories: passives et actives.

I.6.1 Détecteurs passifs

L'utilisation d'un détecteur passif entraîne généralement la modification physique de celui-ci après une période de mesure qui peut être très longue. Les mesures intégrées consistent par exemple en une accumulation de traces, de nombres de charges, d'atomes, etc. Nous passons en revue les plus importants de ces systèmes.

I.6.1.1 Charbon actif

Un détecteur à charbon actif est constitué d'un container rempli de pastilles de charbon placé dans le milieu à mesurer; le charbon piège les descendants solides à vie courte. La concentration en radon est obtenue en mesurant par spectrométrie gamma ou scintillation liquide l'activité du ^{214}Pb et du ^{214}Bi . Le charbon actif est fortement dépendant de la pollution de l'air ambiant car de faibles contaminations chimiques dégradent le charbon et donc affectent les mesures.

I.6.1.2 Détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN)

Les détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN) sont des matériaux solides diélectriques d'origines minérale ou organique, dans lesquels les particules chargées produisent des zones endommagées, appelées traces latentes, le long de leurs trajectoires (Figure I.8). Pour compter le nombre de traces détectées, un développement chimique ou électrochimique est nécessaire [12]. Cette technique sera largement détaillée dans le chapitre II.

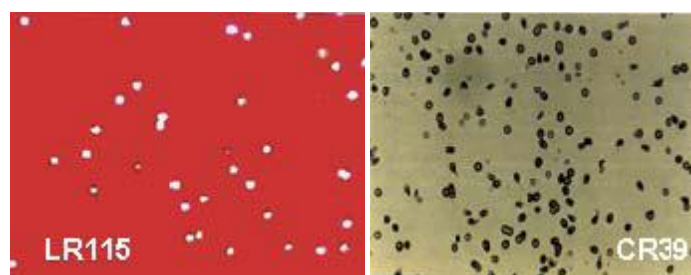


Figure I.8: DSTN LR115 et CR39.

I.6.1.3 Chambres à électret

Ces chambres se composent d'un disque (électret) en Téflon™ chargé positivement et d'une petite chambre d'ionisation en plastique (Figure I.9). La lecture se fait grâce à un dispositif extérieur qui mesure la charge de l'électret. La différence de charge et le temps d'exposition permettent de déterminer l'activité volumique du radon.



Figure I.9: Chambre d'ionisation à Electret.

I.6.2 Détecteurs actifs

Ces détecteurs, contrairement aux précédents, permettent des mesures en temps réel, continues et instantanées de l'évolution de l'activité volumique du radon.

I.6.2.1 Chambre d'ionisation (polarisation) (Exemple: Alphaguard et Rad7)

Elle repose sur l'ionisation d'un gaz par le passage de la particule α . Les électrons ou les ions positifs sont collectés sur une électrode centrale polarisée. La charge déposée est proportionnelle à l'énergie du rayonnement. Par exemple l'appareil Alphaguard (Figure I.10) commercialisé par la société SAPHYMO qui est muni d'une chambre d'ionisation d'un volume connu, dotée d'un filtre en entrée, retenant les aérosols présents dans l'air ambiant. Le radon et ses descendants formés émettent des particules alpha qui ionisent l'air porteur. Le courant d'ionisation ainsi produit est proportionnel à l'activité volumique du radon. Cet appareil est capable de mesurer des concentrations comprises entre quelques $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ et $10^6 \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Il permet également d'accéder à d'autres paramètres tels que la température, la pression atmosphérique et l'humidité relative.

Le Rad7 est un appareil qui mesure en continu l'activité volumique du radon dans l'air et dans l'eau. Le système de détection utilise une collection électrostatique des émetteurs α (un dispositif spécial est requis pour les mesures dans l'eau), il fait ensuite une spectrométrie. La

haute tension dans le conducteur est de 2000 V. L'instrument utilise un microprocesseur pour calculer l'activité volumique du radon.



Figure I.10: La chambre d'ionisation Alphaguard.

I.6.2.2 Détecteurs à semi-conducteur

Ces détecteurs utilisent un cristal semi-conducteur (Ge ou Si) dans lequel on crée deux zones de type n et p de dopages différents. En appliquant une différence de potentiel inverse (déplétion) entre les bornes de la jonction, on crée une zone désertée qui devient sensible. La longueur de cette zone est proportionnelle à la tension de déplétion, ainsi lorsqu'une particule traverse cette zone elle crée par ionisation des paires électron-trou qui se déplacent rapidement vers les bornes pour être collectés et génèrent une impulsion proportionnelle à l'énergie perdue par la particule. L'exemple de ces détecteurs est le Radon Scout Plus (Figure I.11) et dont les caractéristiques techniques sont les suivantes:

- protection en cas d'exposition à des activités trop importantes (jusqu'à 2 MBq.m^{-3}),
- capacité de stockage de 3 mois de mesures continues,
- erreur de linéarité inférieure à 5 %.



Figure I.11: Radon Scout Plus.

I.7 Risques liés au radon

I.7.1 Déposition du radon et de ses descendants

Le radon est inhalé avec l'air inspiré via le pharynx, la trachée, les bronches principales ainsi que les bronchioles périphériques et les alvéoles (Figure I.12). L'appareil respiratoire est alors au contact à la fois du radon, mais surtout de ses descendants particulaires émetteurs de particules α . Il est admis que 20 à 60 % des descendants du radon sont déposés dans l'arbre bronchique dont 70 % restent dans les bronches. On estime que 97 % de la dose déposée sur l'épithélium respiratoire provient de ces descendants et seulement 3 % du radon [14]. Les effets biologiques sur l'épithélium bronchique s'expliquent par l'absence de structure de protection, contrairement à la peau par exemple.

I.7.2 Conséquences cellulaires de l'exposition aux particules alpha

Les particules α sont capables d'induire l'excitation de 10 électrons sur un trajet très court de 100 micromètres. Sur l'épithélium bronchique et/ou alvéolaire, une particule émise induit des lésions du noyau cellulaire et tout particulièrement de l'ADN. Les particules α sont capables d'induire des coupures doubles brins (Figure I.13).

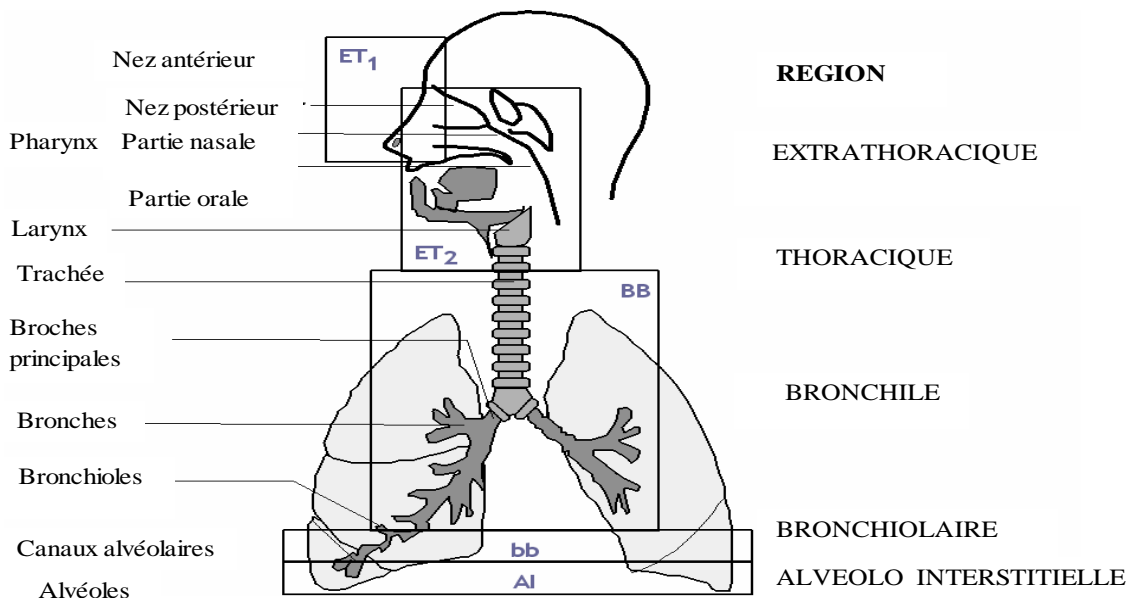


Figure I.12: Les différentes régions anatomiques du modèle pulmonaire [15].

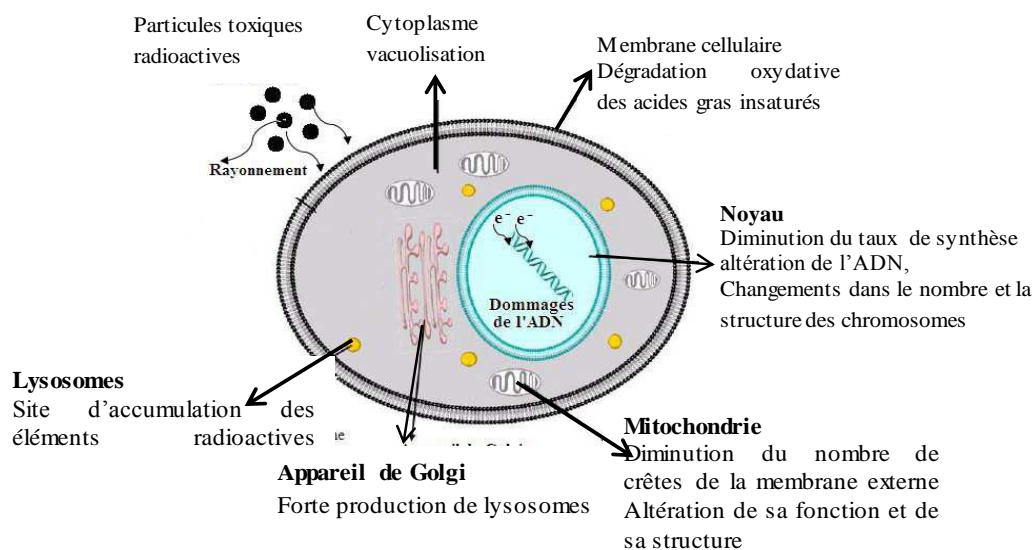


Figure I.13: Effets cellulaires des particules alpha [16].

Il est possible qu'une seule particule alpha entraîne des modifications génomiques dans la cellule: mutation et transformation. Le passage d'une particule alpha peut à la fois causer des lésions irréversibles avec mort cellulaire, mais aussi des lésions réversibles avec réparation et risque de mutations puis transformation maligne. Si l'on admet une origine monoclonale pour le cancer bronchique, la probabilité qu'une seule particule α induise un carcinome reste faible. Néanmoins, le sixième comité sur les Effets Biologiques des Radiations Ionisantes (BEIR VI) [17] conclut qu'il existe une relation linéaire sans seuil entre l'exposition au radon et le risque de cancer broncho-pulmonaire. Le sixième Comité n'exclut pas la possibilité d'une relation exposition radon-cancer du poumon avec seuil pour de très faibles expositions, s'appuyant sur les données épidémiologiques obtenues chez les mineurs d'uranium et sur les données expérimentales [17].

I.8 Les applications du radon

Sa mobilité a été mise à profit depuis longtemps dans de nombreuses applications géophysiques. Ainsi, les mesures de radon ont souvent été utilisées pour localiser les gisements d'uranium [18] ou même dans la prospection pétrolière [19]. Le radon est également utilisé comme traceur pour étudier la dynamique des masses d'air et des masses d'eau dans le sous-sol [20]. A titre d'illustration, il a été observé que le stress mécanique subi

par les roches avant ou pendant les séismes conduit à des anomalies de concentration en radon dans l'eau ou l'air du sol, de sorte que le radon est surveillé en prévision des séismes dans des régions à risques telles qu'à Kobe au Japon [21], en Californie [22] ou aux Philippines [23]. Les teneurs élevées en radon des eaux thermales permettent de détecter l'activité géothermique, souvent associée à des anomalies d'hélium et de mercure [24]. Lee et Hollyday [25] ont utilisé le radon pour étudier la relation entre nappes phréatiques et réseau hydrographique, pour localiser les résurgences et estimer leur débit. Radon et polonium-210 sont des traceurs fréquemment utilisés en volcanologie, notamment pour quantifier les émissions gazeuses ou bien pour la prédiction des éruptions [26]. Le radon a également été mis à profit dans l'étude des échanges gazeux sol atmosphère et océan-atmosphère [27]. L'idée d'utiliser le radon et son cortège de descendants comme traceurs atmosphériques remonte à presque 60 ans [28]. A nouveau, les applications dans ce domaine sont multiples : détermination du temps de résidence, des taux de rabattement et des vitesses de dépôt secs des aérosols atmosphériques [29], étude de la stabilité et du mélange turbulent de la couche limite atmosphérique [30], traçage des masses d'air continentales et de la circulation zonale [31], utilisation du radon dans l'étude de la pollution urbaine [32], étude des échanges troposphère-stratosphère [33], validation ou inter comparaison de modèles de circulation générale [34]. Enfin, pour conclure cette liste non exhaustive, citons l'utilisation du radon comme traceur géophysique sur la planète Mars [35].

I.9 Facteurs influençant la concentration du radon dans les habitations

Plusieurs chercheurs s'intéressent aux paramètres influant sur la concentration du radon dans l'air intérieur (l'exhalation, ventilation, température ...). Nazaroff et al. [36] a montré que la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur provoque l'apparition d'un gradient de pression ce qui excite l'entrée du radon dans l'habitation. Schery and Gaeddert [37], s'intéressent au fait que le taux d'émanation du radon est proportionnel à la perméabilité du sol, et de ce dernier facteur, perméabilité, on remarque son importance d'après Reimer [38] qui a fait une étude comparative pour montrer qu'un sol à une perméabilité importante et une quantité d'uranium moyenne émane plus du radon qu'un autre sol de faible perméabilité et contient une quantité importante d'uranium. Landa [39], a montré que l'émanation du radon dépend de la nature de matériau, la taille de ses particules et la façon de distribution de radium dedans.

Rely et al. [40], ont étudié l'effet du vent sur l'exhalation du radon se trouvant dans le sol entourant une maison, ils ont utilisé un modèle numérique tridimensionnel, qui permet de déterminer les modèles complexes d'écoulement du gaz dans le sol et déterminer l'effet du vent sur le taux d'entrée de ^{222}Rn et sur sa concentration. Ils ont fait le traçage de la courbe, concentration de ^{222}Rn à l'intérieur en fonction de la vitesse du vent, et ils ont montré qu'une maison exposée à un vent éprouvait une diminution du taux d'entrée du radon. Dans le but de contrôler la variation de concentration du Rn-222 dans les milieux poreux, à cause de son risque radiologique, Lopez-Coto et al. [41] ont réalisé une expérience pour mesurer le potentiel de risque et le taux d'émanation du radon des différents échantillons de matériaux de construction, dans trois chambres de géométrie et de construction différentes (chambre A: Chambre cylindrique fabriquée avec l'aluminium, chambres B et C: même matériaux de construction, polyéthylène mais de volume différent), les détecteurs utilisés ici sont le Alphaguarde et le SNC (Sun Nuclear Corporation), les résultats expérimentaux ont été comparé avec les résultats analytiques, ces derniers se basent sur quatre approximations (1: transport unidimensionnel, 2: coefficient de diffusion homogène dans le milieu étudié, 3: la concentration homogène de radon, 4: l'exhalation de radon conservée seulement selon $z=0$). Ils ont montré que les résultats analytiques et ceux expérimentaux sont équivalents, et que le taux d'émanation et le potentiel risque de radon varie selon la nature du matériau.

Rutherford et al. [42], ont étudié l'effet d'humidité sur l'exhalation du radon (^{222}Rn), ils ont trouvé que jusqu'à un seuil d'humidité égale à 25%, l'élévation du taux d'humidité entraîne une augmentation du taux de radon, au-delà de ce seuil, il n'y a pas un effet remarquable.

Fleischer [43], a montré que l'émanation du radon est proportionnelle à la porosité, en se basant sur la taille de pore; plus un pore est large, plus la distance parcourue par le radon est grande.

Stranden and Bertig [44], ont examiné l'effet de ventilation naturelle sur l'infiltration du radon dans le bâtiment, ils ont montré que le taux de ventilation dépend de gradient de température ΔT , (ΔT = différence de température entre l'extérieur et l'intérieur); si ΔT accroît alors la concentration du radon décroît. En plus, ils ont conclu que la concentration du radon (^{222}Rn) est plus importante pendant la nuit qu'en milieu de journée, cela due au phénomène d'inversion de température.

El-Hussein et al. [45], ont mesuré la concentration du radon à l'intérieur d'une chambre (200 m^3) en fonction du temps et à différents taux de ventilation pour avoir l'effet de la ventilation naturelle sur la variation de concentration du radon. Ils ont montré aussi que la

concentration du radon est inversement proportionnelle aux taux de ventilation; si l'un augmente l'autre diminue.

Ramachandran et al. [46], ont étudié la variation saisonnière du radon, par une expérience durant une année dans une maison construite avec des briques et des ciments, ce qui résulte que la concentration du radon est plus élevée pendant l'hiver à cause du phénomène d'inversion de température. La concentration du radon passe de $6,30 \text{ Bq.m}^{-3}$ le mois de juillet à $36,70 \text{ Bq.m}^{-3}$ pendant décembre et $24,70 \text{ Bq.m}^{-3}$ en janvier 1987. Ce même résultat a été confirmé par Frederic et al. [47], (voir figure I.14).

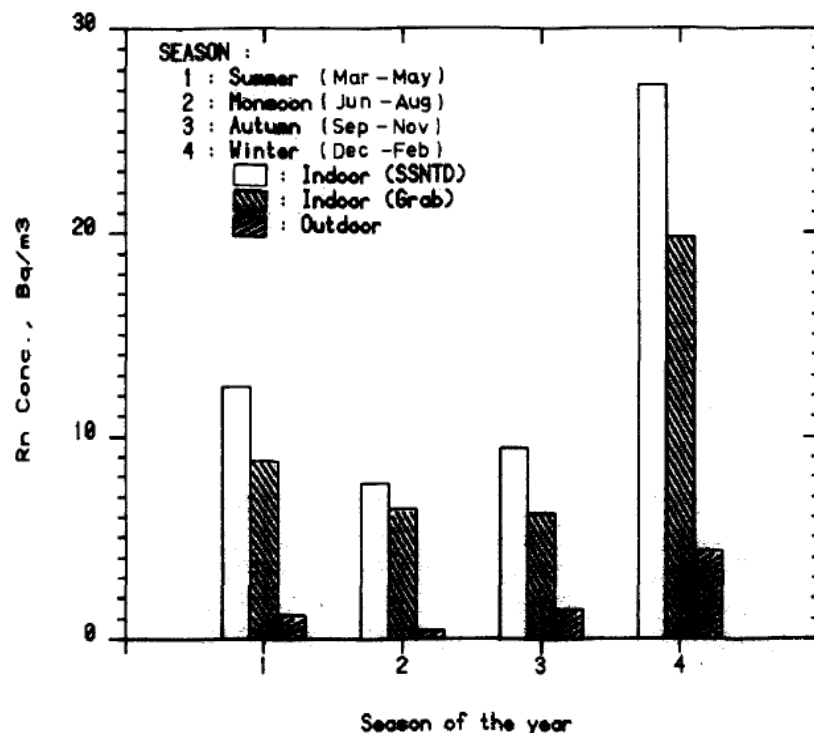


Figure I.14: Variation Saisonnière de concentration du radon à l'intérieur et à l'extérieur.

D'autres travaux aboutissant à des observations similaires sont disponibles dans la littérature. Parmi ceux-ci, on mentionne les travaux de Magalhaes et al. [48], Singh et al. [49], Cortina et al. [50], Rozas et al. [51], Chan et al. [52].

La concentration du radon dans l'air intérieur dépend aussi de la quantité d'uranium présente dans les roches ou les sols sur lequel elles sont construites. Plusieurs travaux ont été consacrés à la mesure de la quantité d'uranium dans les matériaux de construction. Parmi ces travaux, on mentionne ceux de Chauhan et al. [53], qui ont utilisé un détecteur passif

(détecteur solide de trace DSTN, LR-115 type) pour déterminer le taux d'exhalation du radon à partir de trois échantillons :

- a) brique seulement,
- b) brique et une couche d'argile,
- c) brique et une couche de ciment.

Ils ont remarqué que l'exhalation à partir de (b) et (c) est inférieure que celle de (a), puisque le ciment a une perméabilité inférieure que le brique, donc tendance d'exhaler le gaz du radon moins que le brique seule.

En Tunisie, une analyse semblable a été effectuée par Hizem et al. [54]. Ils ont utilisé la «spectrométrie gamma» sur 17 échantillons des matériaux de constructions, pour mesurer l'activité des différents radioéléments (^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{214}Bi), et déduire la dose annuelle reçue de ces matériaux, ainsi que la concentration index. Les résultats obtenus montrent que la dose annuelle varie entre 0,07 mSv/an et 0,86 mSv/an, seule les briques et le granite ont des doses qui dépassent la limite, soit 0,30 mSv/an, mais leurs index est inférieur à 1 (valeur limite d'index).

Au Maroc, plusieurs travaux ont été consacrés à la mesure de la concentration du radon et ses descendants dans les habitations. Parmi ces travaux on trouve celui de Oufni et al. [55] qui ont consacré à la mesure de la concentration du radon dans habitations des villes de Beni-Mellal, Khouribgra et Ben Guerir à l'aide de la technique SSNTD. Les résultats de ce travail permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les matériaux de construction sont les sources principales du radon dans les habitations.
- La ventilation diminue la concentration du radon.
- La concentration du radon est plus élevée en hiver qu'en été.

Parmi les travaux récents, on mentionne celui de Choukri et al. [56] qui ont mesuré la concentration du radon dans certaines habitations du Maroc. Les résultats des mesures montrent que les activités volumiques du radon sont relativement plus élevées dans les villes de Youssoufia et Khouribga situées dans des régions riches en phosphates (voir tableau I.3).

La ville	L'activité du radon (Bq.m ⁻³)	La dose efficace (mSv/an)
Berchid	76±8	1,34±0,14
Casablanca	31±3	0,55±0,05
El jadida	47±4	0,83±0,07
Ouarzazate	99±5	1,74±0,09
Oujda	83±7	1,46±0,12
Rabat	64±5	1,13±0,09
Kénitra	59±6	1,04±0,11
Youssoufia	124±8	2,18±0,14
Khouribga	136±9	2,39±0,16

Tableau I.3: Activités volumiques de ²²²Rn et doses efficaces dans les habitations au Maroc [56].

I.10 Revue bibliographique

Depuis quelques années, la simulation numérique du comportement du radon et ses descendants dans l'air intérieur est devenue primordiale afin de limiter les coûts liés à l'expérimentation. Plusieurs travaux ont fait l'objet de la simulation du comportement du radon dans les bâtiments. Dans cette section, nous passons en revue les grandes catégories d'investigation qui concernent cette problématique. Nous commençons par les travaux les plus anciens et nous terminons par les travaux plus récents.

Jiraneck et al. [57], ont effectué une étude numérique (2-D) de l'effet de perméabilité du sol sur le transport du radon. Cette étude a été réalisée pour un bâtiment avec un dallage indépendant et possédant en plus de la fissure périphérique, une fissure au centre de la dalle. Cette étude a montré que pour des perméabilités du sol inférieures à 10^{-12} m², le transport diffusif est prédominant, pour des perméabilités de sol comprises entre 10^{-12} m² et 10^{-11} m², la diffusion et la convection sont équivalentes; et pour des perméabilités supérieures à 10^{-11} m², le transport convectif est dominant. Il est important de noter que cette étude ne tient pas compte des phénomènes de transport dans la dalle supposée imperméable. Ces résultats vont dans le sens de ceux trouvés par Loureiro et al. [58]. À travers une étude numérique (3-D) pour une cave avec un dallage indépendant, Loureiro et al. [58] ont montré que pour des perméabilités du sol inférieures à 10^{-12} m², le transport est dominé par la diffusion et la

concentration intérieure varie peu avec la perméabilité du sol. Par contre, pour des perméabilités du sol supérieures à 10^{-12} m^2 , la concentration intérieure est très sensible à la perméabilité du sol. Adomait [59] aussi a trouvé la même conclusion.

Le travail de Loureiro et ses collègues [58] a été poursuivi par Revzan et al. [60]. Ces derniers ont trouvé que la présence d'une température non uniforme dans le sol autour d'un bâtiment chauffé pouvait augmenter de 40 % le flux d'entrée du radon dans le bâtiment. Ils ont aussi montré que la présence d'un gravier sous le plancher bas peut augmenter jusqu'à un facteur de 5 le flux d'entrée du radon. Ce travail a été validé expérimentalement par Robinson et Sextro en 1995 [61]. Ce modèle a été aussi utilisé par Robinson en 1997 [62] pour étudier les effets des fluctuations de pression sur le débit d'entrée du radon.

Sur la base des travaux de Loureiro et al. [58], Andersen et al. [63] ont effectué une étude numérique sur les paramètres physiques du sol impactant le taux d'entrée du radon dans le bâtiment. Ils ont trouvé que pour une fissure périphérique de 3 mm, le flux d'entrée du radon dépend principalement de la perméabilité du sol et d'autres facteurs tels que la dépression du bâtiment et la présence d'un lit de gravier sous la dalle.

Rely et al., [64], ont réalisé une étude numérique sur l'effet du vent sur l'exhalation du radon se trouvant dans le sol entourant une maison, ils ont utilisé un modèle numérique tridimensionnel, qui permet de déterminer les modèles complexes d'écoulement du gaz dans le sol et déterminer l'effet du vent sur le taux d'entrée du ^{222}Rn et sur sa concentration. Ils ont fait le traçage de la courbe, concentration de ^{222}Rn à l'intérieur en fonction de la vitesse du vent, et ils ont montré qu'une maison exposée à un vent éprouvait une diminution du taux d'entrée du radon.

Pour le modèle d'Abreu et Johnson [65], Ce modèle numérique 3D, basé sur la méthode des différences finies a été utilisé pour étudier plusieurs scénarios de pollution. Notamment l'influence de la concentration de la source, de la position de la source de contamination, de l'hétérogénéité du sol et l'impact du vent ont été étudiées. L'étude numérique de l'influence de la position de la source sur la concentration sous le plancher bas du bâtiment a montré que la concentration dans le sol juste sous le plancher bas est supérieure à la concentration dans le sol entourant le bâtiment. Ils ont aussi montré que la profondeur de la source a un rôle considérable. Par exemple pour un dallage indépendant sur terre-plein, la concentration sous le plancher bas pour une source située à 3 m est égale à 90% de la concentration à la source, elle est de 20-30% pour une source placée à 18 m. Cette étude a aussi montré que pour une

source latérale au bâtiment et non profonde, le transport du polluant se fera plus vers l'atmosphère que vers l'intérieur du bâtiment. Par contre pour une source profonde, le transfert se fera plutôt vers l'intérieur du bâtiment. Par exemple, la concentration à l'intérieur du bâtiment est 3 fois supérieure pour une source placée à une profondeur de 4 m, et à une distance latérale de 20 m du bâtiment qu'une source latérale au bâtiment placée à 1 m de profondeur et à 20 m du bâtiment.

Yao et al. [66], dans leur étude numérique (3-D) ont trouvé que c'est la diffusion qui détermine le profil de concentration des polluants sous le bâtiment. En comparant leurs résultats numériques avec ceux d'Abreu et Johnson [65], ils ont conclu que le transport diffusif est le phénomène prépondérant à proximité des fondations.

Zhuo et al., [67] dans leur étude numérique (3-D) ont trouvé que la distribution de la concentration du radon est uniforme, sauf aux endroits près des événements de diffuseur d'air. Cependant, au fur et à mesure que le taux de ventilation augmente, la concentration du radon diminue et sa distribution devient plus complexe dû à l'effet de l'écoulement turbulent. Les résultats de la simulation de la distribution du radon étaient comparables aux résultats expérimentaux dans une salle de laboratoire.

Sur la base des travaux de Zhuo et al. [67], Urosevic et al., [68] ont effectué une étude numérique sur la distribution spatiale du radon et de thoron à l'intérieur d'une chambre fermée (Figure I.15). Ils ont trouvé que leur distribution n'est pas homogène et que le radon plus est concentré près de mur qu'en milieu de la chambre, la concentration du thoron décroît exponentiellement en s'éloignant de mur vers le milieu de la chambre. Ces résultats sont en accord avec les résultats expérimentaux faits par Zhuo et al. [67].

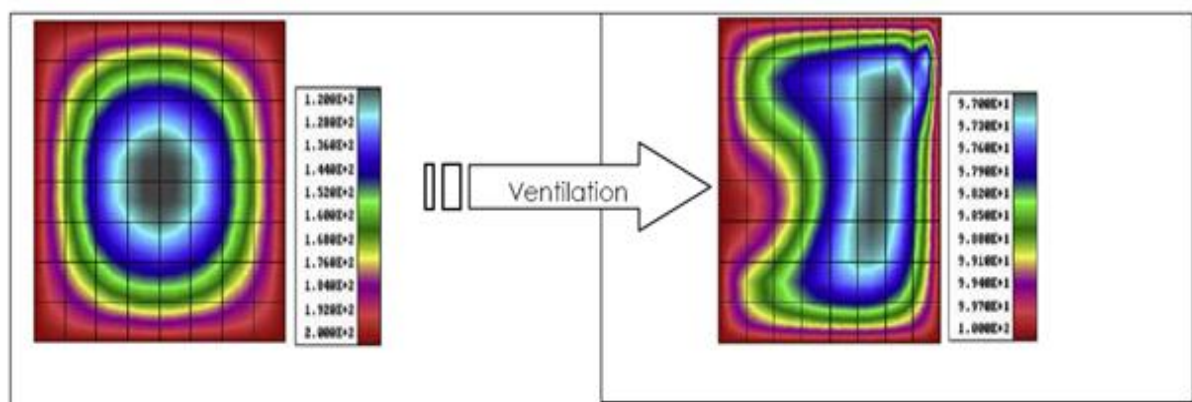


Figure I.15: Variation de concentration du radon ($x, y, z=1,5$) [Concentration max. 200 Bq.m^{-3}].

(Urosevic et al., [68]).

Rabi et al. [69], ont proposé un modèle bidimensionnel équilibré pour le transport de ^{222}Rn dans une cavité remplie de Phosphogypse et entourée par la terre isotherme et imperméable, dont la seule source de radon est le radium-226 existant dans le Phosphogypse. Ils ont supposé que l'écoulement est modélisé selon l'approche de Darcy-Brinkman Boussenesq, ils ont fixé les paramètres de contrôle: nombre de Prandtl $Pr = 0,71$, nombre de Schmidt $Sc=15$ et font varier le nombre de Grashof et Darcy: $10^{-7} < Gr < 10^{-13}$ et $10^7 < Da < 10^9$ et le rapport de forme $A=2$ ($A= L/H$). Ils ont montré que le modèle d'écoulement s'est composé d'une circulation ouverte de cellules avec le fluide entrant du remblai, et partant près de la frontière verticale pour $Gr_m < 10$ ($Gr_m = Gr \cdot Da$) et pour $Gr_m > 10$, la concentration faible de radon se trouve dans le remblai parce que l'air peut traîner de telles particules radioactives.

Dans le même sujet, Rabi et al. [70] ont développé un modèle numérique par la méthode des volumes finie (MVF) à deux dimensions en fonction du temps, pour avoir une idée sur la distribution spatiale du radon émanée à partir d'une planche de Phosphogypse, à l'intérieur d'une chambre fermée tout en tenant compte que le transport diffusif du radon, puisque la chambre est fermée et leurs murs sont imperméables. Ils ont trouvé que la concentration du radon est élevée près de la planche de Phosphogypse et décroît en s'éloignant vers le milieu de la chambre, donc la concentration du radon dépend de la nature de matériau et du temps d'accumulation, parce qu'en augmentant le temps, la concentration du radon s'accroît, comme représenté ci-dessous, (Figure I.16):

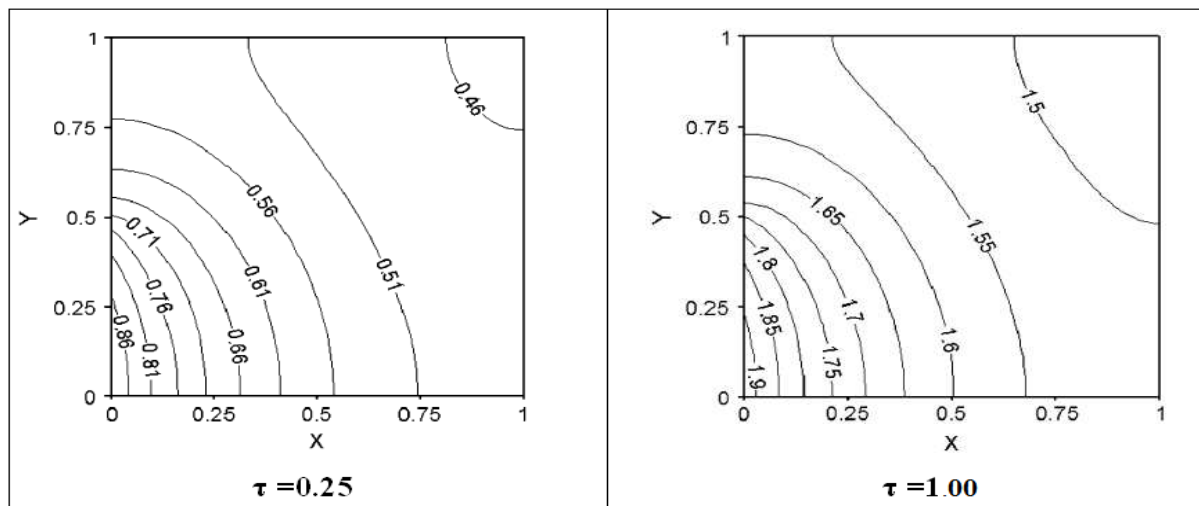


Figure I.16: La distribution du radon à $\tau = 0,25$ et $\tau = 1$ ($\tau = \lambda \cdot t$). [70]

avec τ , λ et t désignant respectivement le temps adimensionnel, la constante de désintégration du radon et le temps.

Bjørn Petter Jelle [71] a rapporté un modèle numérique pour calculer la concentration de radon dans l'air intérieur. Le modèle prend en compte divers paramètres importants, par exemple: la concentration de radon dans le sol, la résistance à la diffusion du radon de la barrière au radon, la perméabilité à l'air du sol, la différence de pression d'air entre le sol extérieur et l'intérieur au niveau du sol, la ventilation du sol du bâtiment et le nombre de changements d'air par heure en raison de la ventilation.

Safi et al. [72] ont effectué une investigation numérique de la distribution du radon et la température dans une chambre. Ils ont trouvé que la convection thermique, rend le transport du gaz radon plus rapide grâce au mouvement de l'air.

Sur la base des travaux de Zhuo et al. [67], Urosevic et al. [68]. With et al. [73] ont développé un autre modèle similaire et amélioré, en ajoutant l'attachement des descendants du radon aux particules d'aérosol ainsi que leur dépôt sur la surface de la chambre.

Parmi les travaux récents, on mentionne celui de Chauhan et al. [74] qui ont étudié expérimentalement et numériquement l'effet de taux l'exhalation des matériaux de construction sur la distribution de la concentration du radon dans une chambre fermée. Ils ont montré que la distribution du radon n'était pas uniforme en raison de la différence de taux d'exhalation provenant de différentes sources. La mesure passive à l'aide des détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN) et la mesure active à l'aide d'un détecteur de radon à scintillation (SRM) ont été effectuées à divers endroits pour vérifier le code de simulation. Par ailleurs, Chauhan et al. [75] ont étudié l'effet de la ventilation sur la distribution de la concentration du radon dans une chambre naturellement ventilée. Ils ont montré que la ventilation affecte le niveau et la distribution du radon à l'intérieur. Ils ont constaté que les niveaux de concentration de radon étaient moins élevés dans les habitations ouvertes comparables à ceux qui sont fermées. Ils n'ont constaté que la distribution du radon est plus homogène en salle ouverte que dans une salle fermée. La mesure passive à l'aide de dosimètres à broches et la mesure active à l'aide d'un détecteur de radon à scintillation (SRM) ont été effectuées à divers endroits pour vérifier le code de simulation.

Agarwal et al. [76] ont réalisé un travail numérique sur distribution du radon dans une chambre ventilée. Ils ont trouvé que la distribution du radon est non uniforme et dépend de débit d'air, la géométrie du volume et les positions d'entrée et de sortie du flux d'air.

Très récemment, Lee et al. [77] ont entrepris une étude numérique sur la distribution du radon dans une maison ventilée. Les résultats montrent que la concentration du radon à

l'intérieur diminue lorsque le taux de ventilation augmente. Les résultats indiquent aussi que le système de ventilation mécanique est plus efficace pour réduire la concentration du radon à l'intérieur d'un système de ventilation naturelle.

Conclusion

Tout d'abord, cette étude bibliographique a présenté des généralités sur le radon et ses descendants ainsi que les mécanismes de genèse et de transfert dans l'air intérieur. Ensuite, Nous avons décrit les méthodes les plus utilisées pour mesurer la radioactivité dans l'air à savoir la méthode des scintillateurs et la méthode des détecteurs solides de traces nucléaires. Par la suite, les paramètres influents la concentration du radon et ses descendants dans l'environnement intérieur. Nous avons aussi réalisé une revue bibliographique des nombreux travaux consacrés à l'étude du transport du radon et ses descendants dans les l'air intérieur. Ces travaux sont concentrés seulement sur des facteurs affectant la distribution de radon dans le sol. Ces études n'expliquent pas comment les facteurs physiques et environnementaux affectent le radon dans l'air 'intérieur.

Après cette recherche bibliographique, il se dégage un manque des travaux sur l'effet des paramètres météorologiques sur le comportement du radon et ses descendants dans l'air intérieur. C'est le point de motivation essentiel de la présente thèse, qui a pour objectif d'étudier, numériquement et expérimentalement l'effet de la ventilation, température, l'humidité relative et la concentration des aérosols ainsi que d'autres paramètres importants sur la concentration et la distribution du radon et ses descendants dans l'air intérieur dans le but de limiter le risque de dose de radiation due à l'inhalation de l'air intérieur.

Dans le chapitre qui suit, nous allons décrire les équations régissant le transport du radon et ses descendants dans l'air intérieur en se basant sur les équations de la dynamique des fluides et présenter le modèle de résolution associé. Ensuite, nous allons utiliser une nouvelle méthode basée sur l'utilisation des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires, CR-39 et LR-115 II, pour la mesure des taux d'exhalation du radon à partir des matériaux de construction de la chambre étudiée et qui sont utilisés ensuite comme conditions aux limites dans le modèle de la simulation. A la fin, nous proposons un nouveau modèle pour la détermination de la dose efficace annuelle due aux descendants de courte période du radon suite à l'inhalation de l'air intérieur par les membres du public.

Références

- [1] D. Thomas Apport de la caractérisation de la variabilité des concentrations en radon-222 dans l'eau à la compréhension du fonctionnement d'un aquifère en milieu fracturé de socle: exemple du site de Ploemeur, (2007).
- [2] A. B. Tanner, J.A.S. Adams, W. M. Lowder, T. F. Gesell, Radon migration in the ground: a supplementary review, *Natural radiation environment III*, (1980).
- [3] K. Filali-Jaouhari, Thèse de Clermont II France. Etude des mouvements des gaz dans le sol par une méthode nucléaire: application géophysique, (1987).
- [4] D. Klein, C. Devillard, A. chambaudet, R. Barillon, Développement de techniques de mesure utilisant un détecteur à silicium pour le suivi continu du radon Nucl. Tracks. Radiat. Meas. 22, 369-372, (1993).
- [5] S. Bernhard, J. Le Gac, P. Zettwoog, Identification of uranium mines which present a radon risk through measurements of exhaust air Club Vessivière- rapport CEA, (1984).
- [6] K. Amgarou, Thèse d'Universitat Autònoma de Barcelona, (2002).
- [7] A. d. S. Nucléaire, La gestion du risque lié au radon, Fiche d'information n°7 2003. www.asn.fr
- [8] L. Lassen, H. Weicksel, Z. Physik, The attachment of radioactive atoms to aerosols of size 0.7 to 5, *osti.gov*, (1960).
- [9] E. O. Knutson, Modeling indoor concentrations of radon's decay products, Wiley New York. 161, (1988).
- [10] C. Brouns, R. Water, A guide to contaminant removal effectiveness, Air Infiltration and Ventilation Centre, (1991).
- [11] H. B. Awbi, Ventilation of buildings, content.taylorfrancis.com, (2003).
- [12] J. Charuau, V. Labed, M.C. Robé, J.C. Thévenin, C. Aubert, J. Fazileabasse, D. Florence, C. Gibaud, H. Heleschewitz, D. Klein, N. Lemaitre, G. Tymen, Le radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'environnement atmosphérique: origine et méthodes de mesure, *Radioprotection*; 31, 371- 388, (1996).
- [13] S. Higeret, Développement d'un dosimètre électronique compact à base de capteurs CMOS pour la mesure du radon. Thèses de doctorat, Université Louis Pasteur, (2007).
- [14] P.S. Philips, A. R. Denman, Radon: a human carcinogen. *Science Progress*, 80: 317-36, (1997).
- [15] ICRP. protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication, 65(24), 1-3. Pergamon, Oxford, UK, (1994a).
- [16] D. Ribera, F. Labrot, G. Tisnerat et J. F. Narbonne. Uranium in the environment: occurrence, transfer, and biological effects. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 146, 53- 89, (1996).
- [17] National Academy of Sciences, National Research Council. Biological Effects of Ionizing Radiations, VI: Health Effects of Exposure to Indoor Radon. Washington, DC: National Academy Press, (1998).

- [18] A. Y. Smith, P. M. C. Barretto, S. Pournis, Radon methods in uranium exploration. In Exploration for uranium ore deposits, Symposium Proceedings. Edited by International Atomic Energy Agency. Vienne, 185-209, (1976).
- [19] F. E. Armstrong, R. J. Heemstra, Radiation halos and hydrocarbon reservoirs; A review. Information circular 8579, U.S. Bureau of Mines, GPO, (1973)
- [20] P. Richon, P. Bernard, V. Labed, J. C. Sabroux, A. Beneito, Results of monitoring ^{222}Rn in soil gas of the Gulf of Corinth region, Greece. Radiation Measurements, 42(1), 87-93, (2007).
- [21] G. Igarashi, S. Saeki, N. Takahata, S. Tasaka, Ground-Water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan. Science, 269 (5220), 60-61, (1995).
- [22] C. Y. King, Gas-geochemical approaches to earthquake prediction. In Radon monitoring in radioprotection, environmental radioactivity and Earth sciences. Edited by L. Tommasino, G. Furlan, H.A. Khan and M. Monnin World Scientific. Singapour, 244-274, (1990).
- [23] P. Richon, J. C. Sabroux, M. Halbwegs, J. Vandemeulebrouck, N. Poussielgue, Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994). Geophysical Research Letters, 30(9), 1481, (2003).
- [24] J. C. Sabroux, Le radon, traceur de phenomenes naturels. In Le radon de l'environnement a l'Homme. Edited by H. Metivier and M.C. Robe EDP Sciences, (1998).
- [25] R. W. Lee, E. F. Hollyday, Radon measurement in streams to determine location and magnitude of ground-water seepage. In Radon, radium, and other radioactivity in ground water. Edited by B. Graves Lewis, NWWA. 241-249, (1987).
- [26] P. Allard, G. Hammouya et F. Parello, Diffusive magmatic soil degassing at Soufriere of Guadeloupe, Antilles. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la terre et des planètes, 327, 315-318, (1998).
- [27] J. C. Sabroux, Le radon, traceur de phenomenes naturels. In Le radon de l'environnement a l'Homme. Edited by H. Metivier and M.C. Robe EDP Sciences, (1998).
- [28] H. Israël, Radioactivity of the atmosphere. In Compendium of Meteorology. Edited by Am. Met. Soc. Boston, 155-161, (1951).
- [29] C. Papastefanou, Residence time of tropospheric aerosols in association with radioactive nuclides. Applied Radiation and Isotopes, 64, 93-100, (2006).
- [30] W. Jacobi et K. André, The vertical distribution of radon 222, radon 220 and their decay products in the atmosphere. Journal of Geophysical Research, 68 (13), 3799-3814, (1963).
- [31] H. Dörr, K. O. Münnich, ^{222}Rn flux and soil air concentration profiles in West Germany. Soil Rn as tracer for gas transport in the unsaturated soil zone. Tellus, 42 B, 20-28, (1990).
- [32] I. Giral, Y. Le Moullec, B. Festy, P. Richon et M. C. Robe, Evolution comparee des teneurs en polluants chimiques et en radon dans une atmosphere urbaine. Papers from the World Clean Air Congress, (1995).
- [33] M. A. Kritz, S. W. Rosner, K. K. Kelly, M. Löwenstein et K. R. Chan, Radon measurements in the lower tropical stratosphere: Evidence for rapid vertical transport and dehydration of tropospheric air. Journal of Geophysical Research, 98(D5), 8725-8736, (2002)

- [34] A. Chevillard, P. Ciais, U. Karstens, M. Heimann, M. Schmidt, Transport of ^{222}Rn using the regional model REMO: a detailed comparison with measurements over Europe. *Tellus*, 54B, 850-871.
- [35] P.Y. Meslin, Le radon, traceur géophysique de l'environnement martien: Etude de son transport, première mise en évidence et développement d'une instrumentation pour sa mesure, (2008).
- [36] W. W. Nazaroff, Radon transport from soil to air, *Reviews of geophysics*, (1992).
- [37] S. D. Schery and D. H. Gaedert, Measurements of the effect of cyclic atmospheric pressure variation on the flux of radon-222 from the soil. *Geophysical Research Letters*, 9, 835-838, (1982).
- [38] G. M. Reimer, Reconnaissance techniques for determining soil-gas radon concentrations: An example from Prince Georges County, Maryland, *Geophysical Research Letters*, 18-88, (1990).
- [39] E. R. Landa, Radium-226 contents and ^{222}Rn emanation coefficients of particle size fraction of alkaline acid and mill U mill tailing. *Health physics*, 52, 303-310, (1987).
- [40] W. J. Rely, The effect of steady states winds on radon-222 entry from soil into houses. *Atmospheric environment*, 1167-1176, (1996).
- [41] I. Lopez-Coto, A short-time method to measure the radon potential of porous materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 67, 133-138, (2009).
- [42] P. M. Rutherford, Radon emanation coefficient for phosphogypsum. *Health physics*, 69, 513-520, (1995).
- [43] R. L. Fleischer, moisture and radon emanation, *Health physics*, 52, 779-799, (1987).
- [44] E. Strandén and L. Bertig, Radon in dwelling and influence factors, *Health physics*, Vol. 39, 275-284, (1980).
- [45] A. El-Hussein, Radon exhalation and ultrafine fraction of radon progeny in closed room air. *Atmospheric environment*, 33, 183-190, (1999).
- [46] T. V. Ramachandran, T. S. Muraleedharan, Seasonal variation of indoor radon and its progeny concentration in dwelling. *Atmospheric environmental*, 24 (3), 639-643, (1990).
- [47] F. Perrier, P. Richon, U. Gautam, D. R. Tiwari, Seasonal variations of natural ventilation and radon-222. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97, 220-235, (2007).
- [48] M. H. Magalhães, E. C. S. Amaral, I. Sachett, E. R. R. Rochedo, Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*, 67 (2), 131-143, (2003).
- [49] K. Singh, M. Singh, S. Singh, H.S. Sahota, Z. Papp, Variation of radon (^{222}Rn) progeny concentrations in outdoor air as a function of time, temperature and relative humidity. *Journal of Environmental Radioactivity*, 39, 213-217, (2005).
- [50] D. Cortina, I. Durán, J. J. Llerena, Measurements of indoor radon concentrations in the Santiago de Compostela area. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99 (10), 1583-1588, (2008).
- [51] S. Rozas, R. Idoeta, N. Alegría, M. Herranz, Radiological characterisation and radon equilibrium factor in the outdoor air of a post-industrial urban area. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 126-135, (2016).

- [52] S. W. Chan, C. W. Lee, K. C. Tsui, Atmospheric radon in Hong Kong, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101 (6), 494-503, (2010).
- [53] R. P. Chauhan, K. Kant, S. K. Sharma, Measurement of alpha radioactive air pollutants in fly ash brick dwelling, *Radiation measurement*, 36, 533-536, (2003).
- [54] N. Hizem, A. Ben Fredj, L. Ghedira, Determination of natural radioactivity in building materials used in tunisian dwellings by gamma ray spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*, 114 (4), 533–537, (2005).
- [55] L. Oufni, M.A. Misdaq, M. Amrane, Radon level and radon effective dose rate determination in Moroccan dwellings using SSNTDs. *Radiation Measurements*, 40, 118 – 123, (2005).
- [56] A. Choukri, O. K. Hakam, Volumic activities measurements and equivalent doses calculation of indoor ^{222}Rn in Morocco, *International Journal of Cancer Therapy and Oncology*, (2015).
- [57] M. Jiránek, J. Hůlka, Radon diffusion coefficient in radon-proof membranes–determination and applicability for the design of radon barriers. *International Journal on Architectural Science*, (2000).
- [58] C. O. Loureiro, L. M. Abriola, J. E. Martin, R. G. Sextro, Three-Dimensional Simulation of Radon Transport into Houses with Basements under Constant Negative Pressure. *Environmental Science and Technology*, 24, 1338-1348, (1990).
- [59] R.G. Sextro, Understanding the origin of radon indoors--Building a predictive capability. *Atmospheric Environment* (1967). Volume 21, Issue 2, pages 431–438, (1987).
- [60] A. L. Robinson, R.G. Sextro. Radon Entry into Buildings Driven by Atmospheric Pressure Fluctuations. *Environmental Science & Technology*. 31: 1742-1748, (1997)
- [61] C. E. Andersen. Entry of soil gas and radon entry into houses. Thesis Technical University of Denmark, (1992).
- [62] W. J. Rely, A. J. Gadgil, Y. C. Bonnefous, W. W. Nazaroff, The effect of steady states winds on radon-222 entry from soil into houses. *Atmospheric environment*, 30(7), 1167-1176, (1996).
- [63] C. E. Andersen. Entry of soil gas and radon entry into houses. Thesis Technical University of Denmark, (1992).
- [64] W. J. Rely, A. J. Gadgil, Y. C. Bonnefous, W. W. Nazaroff, The effect of steady states winds on radon-222 entry from soil into houses. *Atmospheric environment*, 30(7), 1167-1176, (1996).
- [65] L. D. V. Abreu, P. C. Johnson, Effect of vapor source– building separation and building construction on soil vapor intrusion as studied with a three-dimensional numerical model. *Environmental science & technology*, 39 (12), 4550–4561, (2005).
- [66] Y. Yao, R. Shen, K. G. Pennell, E. M. Suuberg, A Review of Vapor Intrusion Models, *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 47, 2457–2470, (2013).
- [67] W. Zhou, T. Iida, J. Moriizumi, T. Aoyagi, I. Takahashi, Simulation of the concentrations and distributions of indoor radon and thoron. *Radiation Protection Dosimetry*, 93, 357–368, (2001).
- [68] V. Urosevic, D. Nikezic, S. Vulovic, A theoretical approach to indoor radon and thoron distribution. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1829–1833, (2008).

- [69] J. A. Rabi, Radon-222 exhalation rates from phosphogypsum bearing embankment subject to constant temperature and fixed activity concentration. *Journal of Porous Media* 8(2), 1–17, (2005).
- [70] J. A. Rabi, N. C. Da Silva, Exhalation from phosphogypsum building boards: symmetry constraints, impermeable boundary conditions and numerical simulation of a test case. *Journal of Environmental Radioactivity*, 86, 164-175, (2006).
- [71] P. J. Bjørn, Development of a model for radon concentration in indoor air. *Science of the Total Environment*, 416, 343–350, (2010).
- [72] M. J. Safi, K. Charfi, Numerical Simulation of Contaminants Transport in Confined Medium. National Engineering School of Tunis, (2010).
- [73] G. de With, P. de Jong, CFD modelling of thoron and thoron progeny in the indoor environment. *Radiation Protection Dosimetry*, 145 (2), 138–144, (2011).
- [74] N. Chauhan, R. P. Chauhan, M. Joshi, T. K. Agarwal, Study of indoor radon distribution using measurements and CFD modeling. *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 105-111, (2014).
- [75] N. Chauhan, R. P. Chauhan, Active-passive measurements and CFD based modelling for indoor radon dispersion study. *Journal of Environmental Radioactivity*, 144, 57–61, (2015).
- [76] T. K. Agarwal, B. K. Sahoo, J. J. Gaware, M. Joshi, CFD based simulation of thoron (^{220}Rn) concentration in a delay chamber for mitigation application. *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 16-21, (2014).
- [77] J. E. Lee, H. C. Park, H. S. Choi, S. Y. Cho, T. Y. Jeong, A numerical study on the performance evaluation of ventilation systems for indoor radon reduction. *Korean J. Chem. Eng.*, 33(3), 782-794, (2016).

CHAPITRE II:

**MODELISATION NUMERIQUE ET METHODE
EXPERIMENTALE**

Introduction

Plus de 90% de la population vivent et travaillent dans des endroits fermés et confinés; bureaux et bâtiments résidentiels, par conséquent elle est exposée aux rayonnements dus au radon émanant par des matériaux de construction et du sol. Il est alors nécessaire de prédire le comportement du radon et ses descendants dans l'air intérieur pour évaluer les doses résultantes de rayonnements potentielles auxquelles les individus seraient exposés.

Dans ce chapitre, nous présentons les hypothèses simplificatrices introduites dans le cadre de ce travail. Après avoir décrit ces dernières, les équations du mouvement et de l'énergie puis l'équation de dispersion du radon et ses descendants sont écrites, en termes de variables primitives, sous forme adimensionnelle dans un système de coordonnées cartésiennes. Puis, nous présentons la méthode de discrétisation adoptée ici, puis nous rappelons l'algorithme de résolution retenu. Ensuite, nous allons utiliser une nouvelle méthode basée sur l'utilisation des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires, CR-39 et LR-115 II, pour la mesure de taux d'exhalation des matériaux de construction de la chambre étudiée et qui sont utilisés ensuite comme conditions aux limites dans le modèle de la simulation. A la fin, nous proposons un nouveau modèle pour la détermination de la dose efficace annuelle due aux descendants de courte période du radon suite à l'inhalation de l'air intérieur par les membres du public.

II.1. Equations de base

La description de tout phénomène de transport et de diffusion nécessite la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles comportant des équations de conservation (l'équation de continuité, l'équation de quantité de mouvement, l'équation de l'énergie, l'équation de conservation des espèces). La complexité de ces équations nécessite l'adoption d'hypothèses simplificatrices raisonnables. Dans le présent travail, les suppositions adoptées sont celles généralement admises dans la littérature spécialisée, à savoir:

- Le fluide Newtonien.
- Le fluide en écoulement est incompressible.
- L'approximation de Boussinesq validé, elle consiste à considérer que les variations de la masse volumique sont négligeables au niveau de tous les termes des équations de quantité de mouvement ($\rho = \rho_0$), sauf au niveau du terme de gravité. La variation de ρ en fonction de la température est donnée comme suit [1]:

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{II.1})$$

avec ρ , β et ρ_0 désignant respectivement la masse volumique du fluide, le coefficient d'expansion thermique à pression constante et la masse volumique du fluide à la température de référence T_0 .

Sous les hypothèses susmentionnées, l'équation de la conservation de la masse, la quantité de mouvement, l'énergie et de la concentration du radon et ses descendants s'écrivent comme suite [2]:

- Equation de conservation de la masse:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.2})$$

- Equation de quantité de mouvement:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (v + v_t) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.3})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + (v + v_t) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g \beta_T (T - T_0) \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + (v + v_t) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

- Equation d'énergie:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.6})$$

- Equation de transport des espèces:

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + v \frac{\partial Y_i}{\partial y} + w \frac{\partial Y_i}{\partial z} = \Gamma \left(\frac{\partial^2 Y_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

- Equation de dispersion du radon et ses descendants:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + u \frac{\partial C_j}{\partial x} + v \frac{\partial C_j}{\partial y} + w \frac{\partial C_j}{\partial z} = (D + D_t) \left(\frac{\partial^2 C_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_j}{\partial z^2} \right) - (\lambda_v + \lambda_j + \lambda_d) C_j \quad (\text{II.8})$$

Le modèle de turbulence utilisé dans cette étude est de type modèle $k - \varepsilon$ standard, qui sont donné par les deux équations suivantes [3]:

-Equation d'énergie cinétique turbulente :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial z^2} \right) + \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] - \varepsilon \quad (\text{II.9})$$

-Equation de dissipation d'énergie cinétique turbulente:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right) + C_{1\varepsilon} \nu_t \frac{\varepsilon}{k} \left[2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.10})$$

avec ν_t et D_t sont exprimé comme suit:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{et} \quad D_t = \frac{\nu_t}{Sc} \quad (\text{II.11})$$

où: u , v et w sont les composantes vitesses, x , y et z sont les coordonnées cartésiennes utilisées, T est la température, p est la pression, C_j est la concentration du descendant j , ν et ν_t sont les viscosités cinématique moléculaire et turbulent, α est la diffusivité thermique, D et D_t sont respectivement les coefficients de diffusion moléculaire et turbulent du descendant j dans l'air, λ_j est la constante de désintégration du descendant j , λ_v est le taux de ventilation, β_T et β_S sont respectivement les coefficients d'expansion thermique et solutale, g est l'accélération de pesanteur, ε est taux de dissipation de l'énergie turbulente, k est énergie cinétique turbulente, Sc est le nombre de Schmidt et C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ et $C_{2\varepsilon}$ sont les constantes du modèle $k - \varepsilon$. Les valeurs de ces constantes sont obtenues à partir des données expérimentales de Jones et Launder [4] (Tableau II.1):

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
0,09	1,44	1,92	1,00	1,30

Tableau II.1: Coefficient empirique du modèle $k - \varepsilon$ standard.

II.2. Equations adimensionnelles

L'adimensionnalisation du système d'équations (II.1- II.8) permet de faire apparaître des grandeurs sans dimensions qui rendent l'interprétation aisée. Pour cela, on a introduit les échelles caractéristiques suivantes:

$$(X, Y, Z) = \frac{(x, y, z)}{H}, \quad (U, V, W) = \frac{(u, v, w)}{u_i}, \quad P = \frac{p}{\rho u_i^2}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_H - T_0}$$

Après avoir introduit ces variables dans le système d'équations (II.1- II.8), celui-ci prend la forme suivante:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (\text{II.12})$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 Z} \right) \quad (\text{II.13})$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 Z} \right) + \frac{\text{Ra}}{\text{Re}^2 \text{Pr}} \theta \quad (\text{II.14})$$

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 W}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 W}{\partial^2 Z} \right) \quad (\text{II.15})$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} + W \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{1}{\text{RePr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 Z} \right) \quad (\text{II.16})$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} + W \frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{1}{\text{ReSc}} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 C}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 C}{\partial^2 Z} \right) - \frac{R}{\text{Re Sc}} \quad (\text{II.17})$$

Cette adimensionnalisation fait apparaître cinq paramètres fondamentaux qui sont le nombre de **Reynolds**, le nombre de **Rayleigh**, le nombre de **Prandtl**, le nombre de **Schmidt** et **Decay-to-diffusion**. Ils sont définis respectivement par:

$$\text{Re} = \frac{u_{\text{in}} H}{\nu}, \quad \text{Ra} = \frac{g \beta_T (T_H - T) H^3}{\nu \alpha}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}, \quad \text{Sc} = \frac{\nu}{D} \quad \text{et} \quad R = \frac{(\lambda_v + \lambda_j + \lambda_d) H^2}{D}$$

avec H , u_{in} et T_H désignant respectivement la hauteur caractéristique de la géométrie considérée, la vitesse de référence et est la température imposée.

Le nombre de Reynolds, Re , est un paramètre important en dynamique des fluides. Il mesure le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Ce nombre caractérise le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent).

Le nombre de Rayleigh, Ra , est le paramètre moteur de la convection naturelle. Il mesure en fait l'importance relative de la poussée d'Archimède qui provoque le mouvement du fluide par rapport aux forces visqueuses et à la conduction thermique qui tendent à supprimer ce mouvement.

Le nombre de Prandtl, Pr , ne dépend que des propriétés physiques du fluide. Il caractérise l'importance relative des effets thermique et visqueux qui traduisent respectivement la diffusion de l'énergie et celle de la quantité de mouvement. Dans ce travail de thèse, le fluide caloporteur considéré est l'air dont le nombre de Prandtl est faiblement dépendant de la température et qui vaut approximativement 0,72.

II.3. Résolution numérique

Il est bien connu que la résolution analytique des systèmes d'équations décrits ci-dessus est impossible dans le cas général. Par conséquent, on fait appel aux approches numériques. Ces méthodes sont: les méthodes aux différences finies, aux volumes finis, aux éléments finis, les méthodes intégrales et méthodes spectrales ... etc. Elles permettent de transformer le système d'équations aux dérivées partielles en un système matriciel.

Dans ce mémoire, nous avons choisi d'utiliser la méthode des volumes finis [5] et l'algorithme SIMPLER. Le choix de cette technique, réside dans les avantages qu'elle offre en termes de stabilité numérique, vis-à-vis des paramètres gouvernants, la convergence et la conservation des flux sur chaque volume élémentaire.

II.3.1. Principe de la Méthode des Volumes Finis

La méthode des volumes finis, développée par Patankar [5], consiste à découper le domaine de calcul considéré en un ensemble de volumes élémentaires ou de contrôle, entourant les points de maillage sur lesquels on intègre les équations aux dérivées partielles. Dans le cas bidimensionnel, ces volumes sont de taille $\Delta x \times \Delta y$ (Figure II.1). Les variables physiques recherchées sont supposées constantes dans chaque volume de contrôle

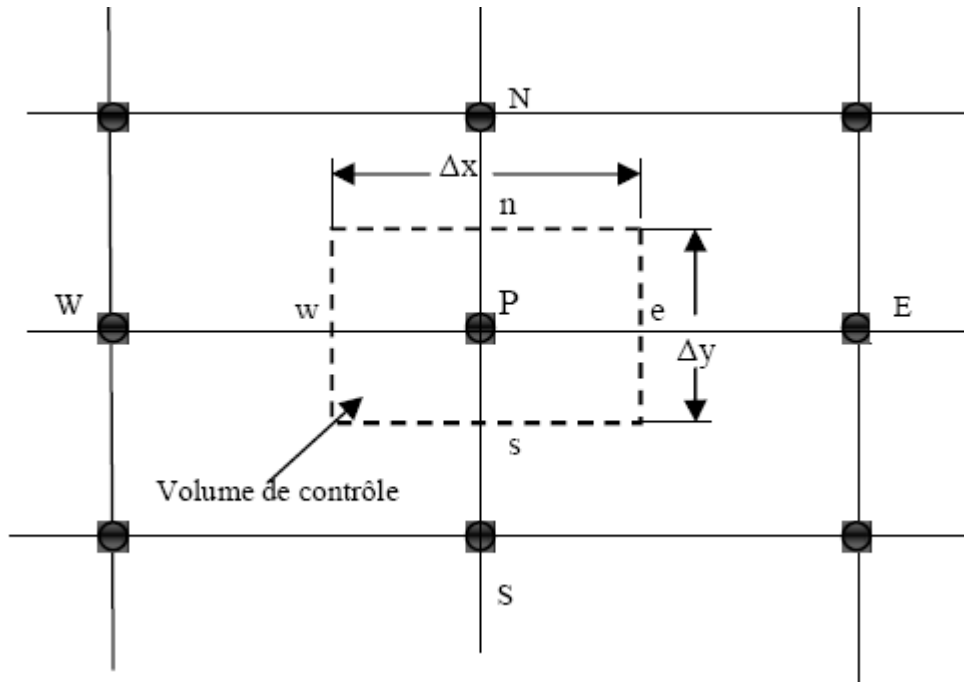


Figure II.1: Volume de contrôle pour une situation bidimensionnelle

En utilisant la variable généralisée ϕ , pour désigner U, V, W, T et C. Les équations de quantité de mouvement et d'énergie peuvent s'écrire, sous la forme:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = \Gamma \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} \right) + S_\phi \quad (\text{II.18})$$

En multipliant l'équation de continuité (II.2) par ϕ et en l'additionnant, membre à membre à (II.18), on obtient la forme conservative,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (U\phi)}{\partial X} + \frac{\partial (V\phi)}{\partial Y} = \Gamma \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} \right) + S_\phi \quad (\text{II.19})$$

avec ϕ , Γ et S_ϕ étant respectivement la variable dépendante, le paramètre de diffusion et le terme source, pouvant être identifiés à partir du tableau II.2:

Equations	ϕ	Γ	S_ϕ
II.12	1	0	0
II.13	U	$\frac{1}{Re}$	$-\frac{\partial P}{\partial X}$
II.14	V	$\frac{1}{Re}$	$\frac{Ra}{Re^2 Pr} \theta - \frac{\partial P}{\partial Y}$
II.15	W	$\frac{1}{Re}$	$-\frac{\partial P}{\partial Z}$
II.16	T	$\frac{1}{Re Pr}$	0
II.17	C	$\frac{1}{Re Sc}$	$-\frac{R}{Re Sc}$

Tableau II.2: Identification de ϕ , Γ et S_ϕ .

La discrétisation de l'équation (II.19) sur un volume de contrôle typique donne :

$$\begin{aligned}
& \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial \phi}{\partial t} dXdYdt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(U\phi)}{\partial X} dXdYdt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(U\phi)}{\partial Y} dYdYdt \\
& = \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right) dXdYdt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right) dXdYdt \\
& + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e S_\phi dXdYdt \tag{II.20}
\end{aligned}$$

où

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial \phi}{\partial t} dXdYd\tau = (\phi_p^{t+1} - \phi_p^t) \Delta X \Delta Y \tag{II.21}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(U\phi)}{\partial X} dXdYd\tau = (U_e \phi_e - U_w \phi_w) \Delta Y \Delta t \tag{II.22}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(V\phi)}{\partial Y} dXdYd\tau = (V_n \phi_n - V_s \phi_s) \Delta X \Delta t \tag{II.23}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right) dXdYd\tau = \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_w \right] \Delta Y \Delta t \tag{II.24}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right) dXdYd\tau = \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right)_s \right] \Delta X \Delta t \tag{II.25}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e S_\phi dXdYd\tau = \bar{S}_\phi \Delta X \Delta Y \Delta t \tag{II.26}$$

Le résultat de l'intégration de l'équation (II. 20) divisé par Δt donne :

$$\begin{aligned} & (\phi_p^{t+1} - \phi_p^t) \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta t} + (U_e \phi_p - U_w \phi_w) \Delta Y + (V_n \phi_n - V_s \phi_s) \Delta X \\ & = \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_w \right] \Delta Y + \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_s \right] \Delta X + \bar{S}_\phi \Delta X \Delta Y \end{aligned} \quad (\text{II. 27})$$

Désignons, respectivement, par ϕ_p, ϕ_w, ϕ_e et ϕ_s les valeurs de ϕ au aux nœuds P, W, E, S, N; U_w, U_e, V_s et V_n sont les composants vitesse aux interfaces (w, e, s, n).

En posant :

$$J_x = U\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \quad (\text{II. 28})$$

$$J_y = V\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad (\text{II. 29})$$

Donc le résultat de l'équation (II. 27) donne:

$$(\phi_p^{t+1} - \phi_p^n) \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta t} + J_e^{t+1} - J_w^{t+1} + J_n^{t+1} - J_s^{t+1} = \bar{S}_\phi \Delta X \Delta Y \quad (\text{II. 30})$$

où :

$$J_e = U_e \phi_e \Delta Y - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_e \Delta Y \quad (\text{II. 31})$$

$$J_w = U_w \phi_w \Delta Y - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_w \Delta Y \quad (\text{II. 32})$$

$$J_n = V_n \phi_n \Delta X - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_n \Delta X \quad (\text{II. 33})$$

$$J_s = V_s \phi_s \Delta X - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \Big|_s \Delta X \quad (\text{II. 34})$$

Les quantités J_e, J_w, J_n et J_s sont les flux aux interfaces (e, w, n, s). Le terme source S_ϕ est supposé être constant dans le volume de contrôle, et le terme source \bar{S}_ϕ est évalué au centre du volume de contrôle.

Partons des mêmes considérations, l'intégration de l'équation de continuité dans le volume de contrôle conduit à :

$$\int_s^n \int_w^e \frac{\partial U}{\partial X} dX dY + \int_s^n \int_w^e \frac{\partial V}{\partial Y} dX dY = (U_e - U_w) \Delta Y + (V_n - V_s) \Delta X = 0 \quad (\text{II. 35})$$

où encore en posant:

$F_e = U_e \Delta Y$, $F_w = U_w \Delta Y$, $F_n = V_n \Delta X$, $F_s = V_s \Delta X$, qui ne sont autres que les débits adimensionnels à travers les faces du volume de contrôle:

$$F_e - F_w + F_n - F_s = 0 \quad (\text{II.36})$$

Par la suite, en retranchant, membre à membre les équations(II.30) et (II.36), multipliée par ϕ_p de on a:

$$\begin{aligned} (\phi_p^{t+1} - \phi_p^t) \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta t} + (J_e^{t+1} - F_e \phi_p) - (J_w^{t+1} - F_w \phi_p) + (J_s^{t+1} - F_s \phi_p) - (J_s^{t+1} - F_s \phi_p) \\ = \bar{S}_\phi \Delta X \Delta Y \end{aligned} \quad (\text{II.37})$$

Selon Patankar [5], la discrétisation des termes diffusifs et convectifs permet de les exprimer, en fonction des valeurs de ϕ_p aux nœuds P, W, E, S, N, par les relations suivantes:

$$J_e^{t+1} - F_e \phi_p = a_e (\phi_p - \phi_e), \quad J_w^{t+1} - F_w \phi_p = a_w (\phi_e - \phi_p) \quad (\text{II.38})$$

$$J_n^{t+1} - F_n \phi_p = a_n (\phi_p - \phi_n), \quad J_s^{t+1} - F_s \phi_p = a_s (\phi_s - \phi_p) \quad (\text{II.39})$$

Ces expressions traduisent le fait que la valeur du flux global à la frontière (i) est une moyenne pondérée des grandeurs qui se situent en amont et en aval de la frontière en question.

Les coefficients de discrétisations a_i ($i = e, w, n, s$) incorporent les flux convectifs et diffusifs, et doivent surtout être tous positifs, d'après la deuxième règle de base de Patankar [5] pour la méthode des volumes finis. Cependant, les relations (II.38) et (II.39) peuvent violer une telle règle en créant des coefficients négatifs. Pour surmonter ceci, les a_i ($i = e, w, n, s$) de (II.38) et (II.39) sont exprimés en fonction du nombre de Peclet, Pe . Soient :

$$a_e = D_e A(|Pe_e|) + \max(-F_e, 0), \quad a_w = D_w A(|Pe_w|) + \max(+F_w, 0), \quad (\text{II.40})$$

$$a_n = D_n A(|Pe_n|) + \max(-F_n, 0), \quad a_s = D_s A(|Pe_s|) + \max(+F_s, 0),$$

où D_i et Pe_i sont respectivement les conductances et les nombres de Peclet locaux, dont les expressions sont comme suit :

$$D_e = \left(\frac{\Gamma}{\delta X} \right)_e \Delta Y, \quad D_n = \left(\frac{\Gamma}{\delta X} \right)_n \Delta X, \quad D_w = \left(\frac{\Gamma}{\delta X} \right)_w \Delta Y, \quad D_s = \left(\frac{\Gamma}{\delta X} \right)_s \Delta X \quad \text{et} \quad Pe_s = \frac{F_i}{D_i} \quad (\text{II.41})$$

Pour ce qui est de la fonction $A(|Pe_i|)$, le tableau II.3 en précise l'expression pour les schémas les plus utilisés dans la discrétisation des termes convectifs.

Schéma	$A(Pe_i)$
Centré	$1 - 0,5 Pe_i $
Décentré amont (Upwind)	1
Hybride	$A(Pe_i) = \sup(0, 1 - 0,1 Pe_i)$
En loi de puissance	$A(Pe_i) = \sup(0, 1 - 0,1 Pe_i)$
Exponentiel	$A(Pe_i) = Pe_i / (\exp(Pe_i) - 1)$

Tableau II.3: expressions de la fonction $A(|Pe_i|)$.

Dans notre cas, nous avons opté le schéma numérique Upwind second ordre pour les raisons suivantes:

- Bonne approximation de la solution exacte ;
- Bonne stabilité et meilleur précision, comparativement aux autres schémas;

Finalement, la forme discrétisée définitive associée à l'équation aux dérivées partielles (II. 20) est la suivante:

$$a_p \phi_p = a_e \phi_e + a_w \phi_w + a_n \phi_n + a_s \phi_s + b \quad (\text{II. 42})$$

avec

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s - \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta t} \quad \text{et} \quad b = \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta t} \phi_p^t + \bar{S}_\phi \Delta X \Delta Y \quad (\text{II. 43})$$

II.3.2. Résolution des équations gouvernantes

II.3.2.1. Algorithme SIMPLER (Semi-Implicit-Method for Pressure-Linked Equations)

Selon Patankar [3], la résolution des équations gouvernantes, discrétisées au même nœud, peut donner lieu à un profil oscillatoire de pression (problème du damier), différent de celui réel, ce qui nécessite l'emploi d'un:

- Maillage principal (Figure II.2) pour les grandeurs scalaires, comme la pression, la température et la concentration du radon;
- Maillage décalé pour les grandeurs vectorielles, comme la vitesse; vers la droite pour la composante U et vers le haut pour la composant V (Figure II.2)

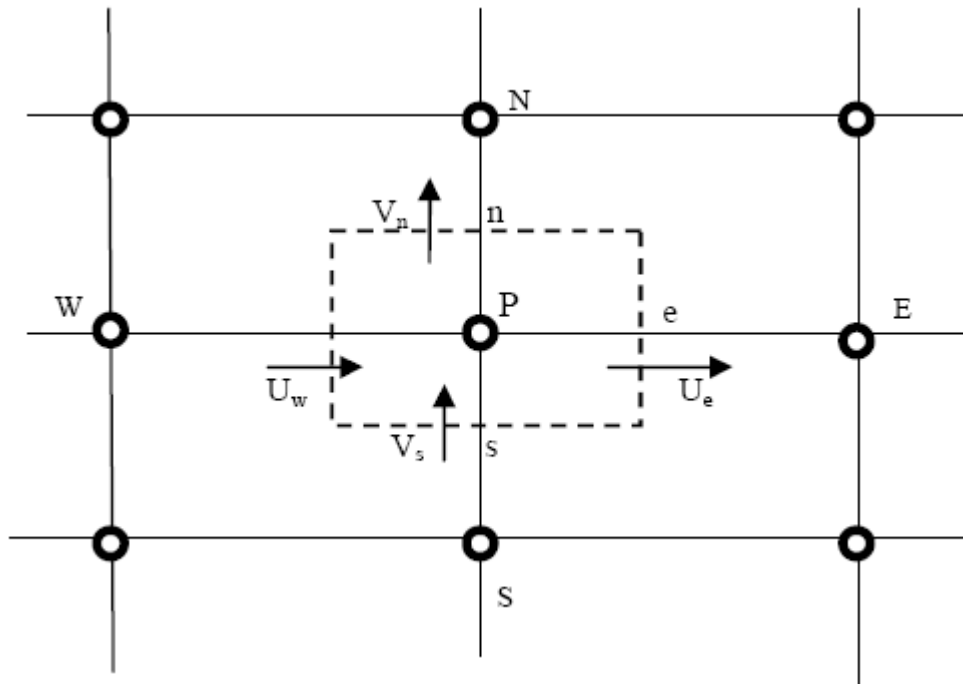


Figure II.2: Volume de contrôle montrant les entités vectorielles.

L'intégration des équations de quantité de mouvement se fait sur les volumes de contrôle du maillage décalé.

D'autres part, en remplaçant ϕ par U , V , dans l'équation (II.20), et en intégrant sur les volumes de contrôle de la figure II.2, il vient:

$$a_e U_e = \sum a_{nb} U_{nb} + (P_p - P_e) A_e \quad \text{et} \quad a_n V_n = \sum a_{nb} V_{nb} + (P_p - P_n) A_n + b_T \quad (\text{II.44})$$

où l'on peut remarquer la présence de différences de pressions et les faces, A_e et A_n , des volumes de contrôle des maillages décalés dans les termes sources. Un tel système ne peut être résolu que si la pression est connue ou estimé. Quand c'est le cas, le champ de vitesse, obtenu après la résolution de l'équation (II.44), satisfèra l'équation de continuité. Comme cette pression n'est pas connue et qu'il n'y pas d'équation caractéristique combinée à des conditions aux limites appropriées pour la déterminer, il est nécessaire de préconiser une procédure pour contourner cette difficulté. Pour ce faire, Patankar [5] ont proposé l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit-Method for Pressure-Linked Equations). Celui-ci consiste à estimer un champ de pression P^* qui permet de déterminer un champ de vitesse (U^*, V^*) ne vérifiant pas, en général, l'équation de continuité. D'où la nécessité de corriger la pression itérativement jusqu'à satisfaction de cette équation.

Soient P^* et C^* les champs initiaux de pression et de concentration, et (U^*, V^*) les champs de vitesse résultant des équations de la quantité de mouvement suivantes:

$$a_e U_e^* = \sum a_{nb} U_{nb}^* + (P_P^* - P_E^*) A_e + b_c \quad \text{et} \quad a_n V_n^* = \sum a_{nb} V_{nb}^* + (P_P^* - P_N^*) A_n + b_{c^*} \quad (\text{II.45})$$

(U^*, V^*) ne satisfait pas l'équation de continuité et il faut corriger les vitesses et la pression comme suit :

$$P = P^* + P', \quad U = U^* + U' \quad \text{et} \quad V = V^* + V' \quad (\text{II.46})$$

où P' , U' et V' sont les corrections à porter.

L'introduction de l'équation (II.46) dans l'équation (II.45), en tenant compte de l'équation (II.44), conduit à

$$a_e U_e' = \sum a_{nb} U_{nb}' + (P_P' - P_E') A_e + b_c \quad \text{et} \quad a_n V_n' = \sum a_{nb} V_{nb}' + (P_P' - P_N') A_n \quad (\text{II.47})$$

et l'élimination des termes $\sum a_{nb} U_{nb}'$ et $\sum a_{nb} V_{nb}'$ dans l'équation (II.47) mène à:

$$U_e' = d_e (P_P' - P_E') \quad \text{et} \quad V_n' = d_n (P_P' - P_N') \quad (\text{II.48})$$

où

$$d_e = A_e / a_e \quad \text{et} \quad d_n = A_n / a_n \quad (\text{II.49})$$

Finalement, les vitesses corrigées s'expriment par:

$$U_e = U_e^* + d_e (P_P' - P_E') \quad \text{et} \quad V_n = V_n^* + d_n (P_P' - P_N') \quad (\text{II.50})$$

D'autre part, pour ce qui est de la pression, l'injection de l'équation (II.50) dans l'équation (II.35) permet d'aboutir à l'équation de correction suivant :

$$a_P P_P' = a_E P_E' + a_W P_W' + a_N P_N' + a_S P_S' + b_{P'} \quad (\text{II.51})$$

où

$$a_E = d_e \Delta Y, \quad a_W = d_w \Delta Y, \quad a_N = d_n \Delta X \quad \text{et} \quad a_S = d_s \Delta X \quad (\text{II.52})$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (\text{II.53})$$

$$b_{P'} = (U_w^* - U_e^*) \Delta Y + (V_s^* - V_n^*) \Delta X \quad (\text{II.54})$$

II.3.2.2. Résumé de l'algorithme SIMPLE

La séquence des opérations essentielles constituant l'algorithme SIMPLE est la suivante :

- 1) préciser des champs initiaux de pression et de concentration, P^* et C^* ;
- 2) résoudre l'équation (II.45) pour obtenir (U^*, V^*) ;

- 3) résoudre l'équation (II. 51) pour obtenir P' ;
- 4) utiliser l'équation (II. 46) pour avoir P ;
- 5) injecter la valeur de P dans l'équation (II. 45) pour avoir (U, V) ;
- 6) résoudre l'équation (II. 42) pour avoir T et C ;
- 7) utiliser p , remplacer T^* par T et retourner à l'étape (2);

Répéter les calculs jusqu'à convergence de toutes les variables. Celle-ci est considérée acquise lorsque $\sum_{i,j} |\phi^{k+1}(i, j) - \phi^k(i, j)| / |\phi^k(i, j)| < \varepsilon$ ou ε est la précision des calculs.

II.3.2.3. Algorithme SIMPLER (SIMPLE-Revised)

Dans la version révisée de SIMPLE, seule la correction de la pression P' est utilisée pour corriger la vitesse.

La supériorité de l'algorithme SIMPLER par rapport à SIMPLE réside dans le fait que la déduction de l'équation de la pression (II. 51) ne fait intervenir aucune simplification. Dans SIMPLE, la déduction de l'équation de correction de la pression (II. 51) passe par l'annulation des termes $\sum a_{nb} U'_{nb}$ et $\sum a_{nb} V'_{nb}$. Par conséquent le champ de pression de SIMPLER est plus proche de la réalité que celui de SIMPLE, puisqu'en général l'estimation d'un champ de vitesse initial est plus facile que celle d'un champ de pression. On note ici que l'algorithme SIMPLER ne nécessite pas de champ de pression initial. La pression est directement générée à partir de l'initiation du champ de vitesse.

II.3.2.4. Présentation matricielle des équations

Sous forme matricielles, les équations gouvernantes se présentent comme suit:

$$a_p(i, j)\phi_p(i, j) = a_e(i, j)\phi_e(i + 1, j) + a_w(i, j)\phi_w(i - 1, j) + a_n(i, j)\phi_n(i, j) \\ + a_n(i, j)\phi_n(i, j + 1) + a_s(i, j)\phi_p(i, j - 1) + B(i, j) \quad (\text{II.55})$$

Ou encore :

$$[A][\phi] = [B] \quad (\text{II.56})$$

où:

- $[A]$ est une matrice rectangulaire de taille $(N_i - 2) \times (N_j - 2)$;
- $[\phi]$ est le vecteur des inconnues $\phi(i, j)$;
- $[B]$ est le vecteur source.

Le système d'équations précédent doit être résolu sous certaines conditions aux limites bien déterminées.

II.4. Approche analytique

Dans une chambre ventilée, le coefficient de diffusion du radon n'est pas pris en compte et l'équation de transport de la concentration du radon dans un bâtiment ou une chambre de volume V est décrite:

$$C(t) = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{EA}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{II.57})$$

avec E est le taux d'exhalation ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$), A est la surface de la chambre (m^2), V le volume de la chambre (m^3), λ_{Rn} est la constante de désintégration du radon (s^{-1}) et λ_v est le taux de ventilation.

A l'état d'équilibre, l'équation (II.57) est réduite à:

$$C = C_0 + \frac{EA}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)} \quad (\text{II.58})$$

Cette équation implique également que la valeur minimale de la concentration de radon à l'intérieur est égale à la concentration du radon à l'extérieur.

Lorsque $C_0=0$, le niveau de concentration du radon à l'intérieur peut être calculé comme suit:

$$C = \frac{EA}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)} \quad (\text{II.59})$$

II.5. Procédure expérimentale

Les murs, les sols et les plafonds sont les sources du radon dans l'air intérieur. Par conséquent, une expérience a été réalisée pour mesurer le taux d'exhalation du radon à partir des matériaux de construction de la chambre en utilisant la méthode des Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN). Les matériaux de construction utilisés sont le plâtre, béton et marbre.

II.5.1. Détermination de l'activité volumique de radium-226 dans les échantillons des matériaux de construction

Afin d'évaluer l'activité volumique en radium-226 dans les échantillons des matériaux de construction, nous avons utilisé dans le présent travail deux types de détecteurs solides de traces nucléaires (DSTN) de types CR-39 et LR-115 II.

Nous avons placé en contact direct environ de 20 gramme d'échantillon avec des détecteurs solides de traces nucléaires de type CR-39 et LR-115 II pendant 30 jours dans des enceintes cylindriques de 3 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur (Figure. II.3). Pendant ce temps d'exposition, les détecteurs solides de traces nucléaires sont bombardés par les particules alphas émises par l'uranium-238, thorium-232 et leurs descendants. Après leur irradiation, les films exposés ont été développés dans deux solutions (NaOH) de soude dans des conditions optimales de développement, assurant une bonne sensibilité des détecteurs solides de traces nucléaires et une bonne reproductibilité des densités de traces enregistrées sur ces détecteurs: la première solution de normalité de 2,5 mol. l⁻¹ à 60° C pendant 2 heures pour les films LR-115 II et la deuxième solution de normalité de 6,25 mol. l⁻¹ à 70° C pendant 7 heures pour les détecteurs CR-39 [6]. Après ce traitement chimique, les densités de traces enregistrées sur le CR-39 et le LR-115 II, sont dénombrées au moyen d'un microscope optique avec le grossissement x40.

Dans nos conditions expérimentales de développement, l'épaisseur résiduelle du détecteur LR-115 II est de 5 μm qui correspond à la limite minimale d'énergie ($E_{\min} = 1,6$ MeV) et à la limite maximale d'énergie ($E_{\max} = 4,7$ MeV) pour l'enregistrement des traces des particules alpha sur le film LR-115 II [7]. Toutes les particules alpha émises par les séries d'uranium-238 et du thorium-232 qui atteignent la surface du détecteur LR-115 II sous un angle inférieur à son angle critique d'enregistrement θ'_c avec une énergie résiduelle entre 1,6 MeV et 4,7 MeV sont enregistrées comme traces-trous brillantes. Le détecteur CR-39 est sensible à toutes les particules alpha qui atteignent sa surface sous un angle inférieur à son angle critique d'enregistrement θ_c .

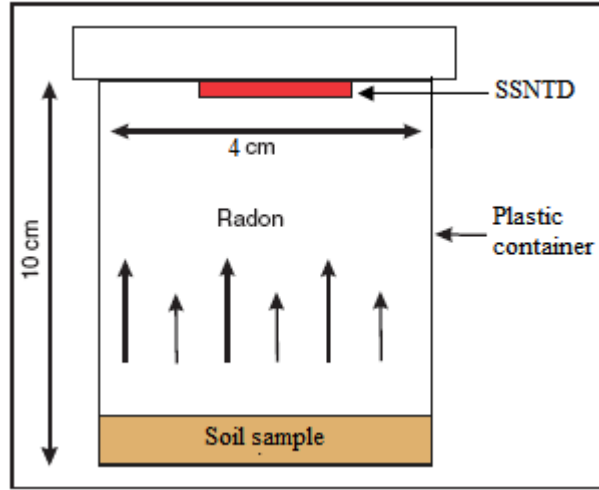


Figure II.3: Dispositif expérimentale de détection de particules alpha par DSTN.

Les valeurs moyennes des angles critiques d'enregistrement des particules alpha sur les détecteurs CR-39 et LR-115 II sont données par [6, 7]:

$$\langle \theta_c \rangle = \frac{1}{E_{\alpha j}} \int_0^{E_i} \theta_{c_j}(E_j^{\text{Res}}) dE_j^{\text{Res}} \quad (\text{II. 60})$$

Pour le CR-39

et

$$\langle \theta'_c \rangle = \frac{1}{\Delta E} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \theta'_c(E_j^{\text{Res}}) dE_j^{\text{Res}} \quad (\text{II. 61})$$

Pour le LR-115 II

où :

E_j est l'énergie initiale d'une particule alpha d'indice j , $\theta_{c_j}(E_j^{\text{Res}})$ et $\theta'_{c_j}(E_j^{\text{Res}})$ représentent les équations analytiques des angles critiques d'enregistrement $\langle \theta_c \rangle$ et $\langle \theta'_c \rangle$ en fonction de l'énergie résiduelle de particule alpha (E_j^{Res}). L'énergie résiduelle d'une particule alpha est déterminée à partir de la courbe parcours-énergie dans le matériau de construction.

Les valeurs moyennes des angles critiques d'enregistrement des particules alpha émises par les séries d'uranium-238 et du thorium-232 dans les détecteurs CR-39 et LR-115 II sont données sur le tableau II.4:

Radionucléides	Energie initiale de la particule α (MeV)	Valeurs moyennes des angles critiques (degrés)	
		$\langle \theta_c \rangle$	$\langle \theta'_c \rangle$
^{232}Th	4,01	$77,20 \pm 0,4$	$48,00 \pm 2$
^{238}U	4,19	$76,80 \pm 0,4$	$48,00 \pm 2$
^{230}Th	4,62	$75,90 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{234}U	4,77	$75,60 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{226}Ra	4,78	$75,60 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{210}Po	5,30	$74,60 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{228}Th	5,42	$74,40 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{222}Rn	5,49	$74,30 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{224}Ra	5,71	$73,80 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{218}Po	6,00	$73,30 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{212}Bi	6,05	$73,20 \pm 0,5$	$48,00 \pm 2$
^{220}Rn	6,29	$72,80 \pm 0,6$	$48,00 \pm 2$
^{216}Po	6,78	$71,90 \pm 0,6$	$48,00 \pm 2$
^{214}Po	7,68	$70,30 \pm 0,7$	$48,00 \pm 2$
^{212}Po	8,78	$68,50 \pm 0,7$	$48,00 \pm 2$

Tableau II.4: Les valeurs moyennes de l'angle critique d'enregistrement des particules alpha dans les détecteurs solides de traces nucléaires CR-39 et LR-115.

Les parcours des particules alpha émises par les noyaux des séries d'uranium-238 et du thorium-232 dans les échantillons des matériaux de construction sont calculés à l'aide de programme TRIM [8] et sont donnés sur le tableau II.5:

	Radionucléides	Energie (E _j) (MeV)	K _j	Parcours R _j en (μm)		
				Plâtre	Béton	Marbre
Famille de l'uranium-238	²³⁸ U	4,19	1	13,91	20,49	14,04
	²³⁰ Th	4,62	1	15,92	23,46	16,55
	²³⁴ U	4,77	1	16,65	24,54	17,31
	²²⁶ Ra	4,78	1	16,70	24,61	17,36
	²¹⁰ Po	5,30	1	19,36	28,53	20,12
	²²² Rn	5,49	1	20,37	30,03	21,17
	²¹⁸ Po	6,00	1	23,22	34,24	24,13
	²¹⁴ Po	7,68	1	33,79	49,93	35,14
	Famille du thorium-232	²³² Th	4,01	1	13,10	19,30
²²⁸ Th		5,42	1	20,00	29,47	20,78
²²⁴ Ra		5,71	1	21,58	31,81	22,42
²¹² Bi		6,05	0,36	23,50	34,66	24,42
²²⁰ Rn		6,29	1	24,91	36,74	25,89
²¹⁶ Po		6,78	1	27,89	41,17	28,99
²¹² Po		8,78	0,64	41,72	61,73	43,43

Tableau II.5: Parcours des particules alpha émises par les radionucléides de la famille de l'uranium-238 et de celle du thorium-232 dans les différents échantillons des matériaux de construction.

Les taux de densités de traces globales (traces.cm².s⁻¹), dus aux particules alpha émises par les séries du radium-226 et du thorium-232 dans les différents échantillons des matériaux de construction, enregistrés sur les détecteurs CR-39 et LR-115 II, sont donnés par [9]:

$$D_G^{LR} = 0,5 d_s \Delta R \sin^2 \langle \theta'_c \rangle A_c(^{226}\text{Ra}) \left[4 + 3 \frac{A_c(^{232}\text{Th})}{A_c(^{226}\text{Ra})} \right] \quad (\text{II. 62})$$

$$D_G^{CR} = 0,25 d_s \sin^2 \langle \theta_c \rangle A_c(^{226}\text{Ra}) \left[\sum_{j=1}^8 k_j R_j + \frac{A_c(^{232}\text{Th})}{A_c(^{226}\text{Ra})} \sum_{j=1}^7 k_j R_j \right] \quad (\text{II. 63})$$

avec d_s est la densité de l'échantillon donnée en (g/cm³), $A_c(^{226}\text{Ra})$ et $A_c(^{232}\text{Th})$ sont respectivement les activités de radium-226 et de thorium-232, R_j est le parcours de la particule alpha d'énergie E_j dans les échantillons des matériaux de construction (Tableau

II.5), K_j est le rapport d'embranchement correspondant à un noyau de désintégration des séries du radium-226 et en thorium-232 (Tableau II.5), et $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$. R_{\min} et R_{\max} sont les parcours des particules alpha correspondant à la valeur minimale (E_{\min}) et à la valeur maximale (E_{\max}) de la fenêtre d'énergie ΔE . Les parcours des particules alpha émises par les séries du d'uranium-238 et du thorium-232 dans les matériaux de construction sont déterminés à l'aide du programme TRIM [8].

En combinant les équations (II.62) et (II.63), nous obtenons une relation entre les densités de traces enregistrés sur les détecteurs solides de traces nucléaires CR-39 et LR-115 type II et le rapport de l'activité de thorium-232 sur celle du radium-226 [10].

$$\frac{A_c(^{232}\text{Th})}{A_c(^{226}\text{Ra})} = \frac{0,5 \sin^2 \langle \theta_c \rangle \sum_{j=1}^8 k_j R_j - 4\gamma' \Delta R_s \sin^2 \langle \theta'_c \rangle}{\left[3\gamma' \Delta R \sin^2 \langle \theta'_c \rangle - 0,5 \sin^2 \langle \theta_c \rangle \sum_{j=1}^7 k_j R_j \right]} \quad (\text{II.64})$$

avec $\gamma' = \frac{D_G^{\text{CR}}}{D_G^{\text{LR}}}$

D'où on obtient l'activité du radium-226 par la relation suivant [10]:

$$A_c(^{226}\text{Ra}) = \frac{2 D_G^{\text{LR}}}{\Delta R d_s \sin^2 \langle \theta'_c \rangle \left[4 + 3 \frac{A_c(^{232}\text{Th})}{A_c(^{226}\text{Ra})} \right]} \quad (\text{II.65})$$

La mesure des densités de traces de particules alpha D_G^{CR} et D_G^{LR} enregistrées respectivement sur les détecteurs solides de traces nucléaires CR-39 et LR-115 type II, et le calcul des valeurs moyennes des angles critiques d'enregistrement $\langle \theta_{c_i} \rangle$ et $\langle \theta'_{c_i} \rangle$ des particules alpha émises par les séries d'uranium-238 et du thorium-232, nous permettent aisément d'évaluer dans un première temps le rapport $\frac{A_c(^{232}\text{Th})}{A_c(^{226}\text{Ra})}$. A l'aide de ce rapport et grâce à l'expression (II.65), nous déduisons les activités spécifiques du radium-226, $A_c(^{226}\text{Ra})$, dans les différents échantillons des matériaux de construction.

Les parcours des particules alpha émises par les noyaux des séries d'uranium-238 et du thorium dans les échantillons des matériaux de construction sont calculés à l'aide du programme TRIM [8].

Les résultats obtenus par LR-115 et CR-39 des teneurs de radium dans les échantillons de matériaux de construction étudiés sont présentés dans le tableau II.6:

Echantillons	$D_G^{CR} \times 10^3$ (tr. cm ⁻² .s ⁻¹)	$D_G^{LR} \times 10^3$ (tr. cm ⁻² .s ⁻¹)	$A_c(^{226}\text{Ra})$ (Bq. kg ⁻¹)
Plâtre	1,06±0,21	0,32±0,05	1,37±0,21
Béton	1,98±0,20	0,61±0,06	2,55±0,26
Marbre	1,37±0,21	0,42±0,06	1,77±0,27

Tableau II.6: Densité de traces obtenues par CR-39 et LR-115 et les teneurs en radium (²²⁶Ra) dans les échantillons des matériaux de construction [10].

II.5.2. Détermination de l'activité volumique et le taux d'exhalation du radon dans les échantillons des matériaux de construction

Pour évaluer les activités volumiques du radon (A_c^{222}) présents naturellement à l'extérieur des échantillons de matériaux de construction, nous avons placé le DSTN à une distance de 9 cm au-dessus de l'échantillon de matériau de construction pendant 30 jours. Pendant ce temps d'exposition, les particules alpha émises par le radon et leurs descendants dans l'air bombardent le détecteur solide de traces nucléaires. Après son irradiation, le détecteur exposé a été développé dans les deux solutions de soude mentionnées plus haut. Les taux de densités de traces enregistrées sont évalués. Les taux de densités de traces globales dus aux particules alpha émises par les séries du radon (trois émetteurs alpha) dans l'air, enregistrées sur le détecteur LR-115 II, sont donnés par [11]:

$$D^*(LR) = \frac{A_c(^{222}\text{Rn})}{4} \sin^2\theta_c [R_{\max} - R_{\min}] \quad (\text{II.66})$$

$A_c(^{222}\text{Rn})$ est l'activité volumique en radon(²²²Rn) , exprimées en Bq.m⁻³, R_{\max} et R_{\min} sont les parcours maximales et minimales des particules alpha dans l'air qui sont calculés à l'aide du programme TRIM [8] (Tableau II.7), ils correspondent respectivement aux valeurs d'énergie pour laquelle les traces sont observables sur le détecteur LR-115.

Epaisseur Résiduelle (μm)	R_{\min} (cm)	R_{\max} (cm)
3	0,46	3,83
4	0,61	3,52
5	0,80	3,44
6	0,98	2,71
7	1,07	2,66
8	1,29	2,53
9	1,42	2,31
10	1,60	2,02

Tableau II.7: Le parcours maximal (R_{\max}) et minimal (R_{\min}) des particules alpha émises par les radionucléides des série d'uranium et celle du thorium en fonction de l'épaisseur résiduelle du détecteur LR-115 type II dans le volume de gaz des échantillons de matériaux de construction.

Le taux d'exhalation du radon est donné par [9]:

$$E = \frac{A_c(^{222}\text{Rn})VT\lambda}{A \left[T - \frac{1}{\lambda(1 - e^{-\lambda T})} \right]} \quad (\text{II. 67})$$

où E est le taux d'exhalation du radon par le matériau de construction, $A_c(^{222}\text{Rn})$ est l'activité du radon mesurée par le film LR-115 II, V est le volume de la capsule en plastique (m^3), λ est la constante de désintégration pour le radon, T est le temps d'exposition (h) et A est la zone du conteneur en plastique (m^2).

Les résultats obtenus des activités du radon et des taux d'exhalation dans les échantillons des matériaux de construction sont regroupés dans le tableau II.8 :

Echantillons	D_T^{LR} (tr. $\text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	$A_c(^{222}\text{Rn})$ (Bq. m^{-3})	E (mBq. $\text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
Plâtre (plafond)	4,96±0,75	150,60±23,05	139,67±21,79
Béton (mur)	9,22±0,94	280,20±28,70	259,86±26,61
Marbre (sol)	6,39±0,99	194,30±30,10	180,20±27,91

Tableau II.8: Les activités volumiques ainsi que le taux d'exhalation du radon dans les échantillons des matériaux de construction en utilisant LR-115 [10].

II.6. Evaluation des équivalents de dose annuelle engagée dans le système respiratoire dus aux descendants de courte période du radon suite à l'inhalation de l'air intérieur par les membres du public.

Selon le modèle de la Commission Internationale de la Protection Radiologique (CIPR 66) [12], le système respiratoire humain est divisé en deux grandes régions: la région thoracique (TH) et la région extra-thoracique (ET) (Figure II.4) [12].

La région thoracique est divisée en quatre sous-régions, à savoir: La région alvéolaire-interstitielle (AI), la région bronchiolaire (bb), la région bronchique (BB), et les tissus lymphatiques.

La région extra-thoracique est divisée en trois sous-régions à savoir: Les voies nasales antérieures (ET_1), les régions nasales postérieures, le larynx, le pharynx et la bouche (ET_2) et les tissus lymphatiques.

Il y a dix compartiments dans la région thoracique numérotés de 1 à 10 respectivement: AI_1 , AI_2 , AI_3 , bb_1 , bb_2 , bb_{seq} , BB_1 , BB_2 , BB_{seq} et LN_{TH} . La région extra-thoracique comporte quatre compartiments numérotés de 11 à 14 respectivement: ET_2 , ET_{seq} , LN_{TH} et ET_1 .

Les radionucléides produits par désintégration du radon inhalé sont attachés aux particules de diamètre aérodynamique médian en activité (DAMA), appelé aussi en anglais Activity Median Aerodynamic Diameter (AMAD) [13], de 330 nm avec un écart-type géométrique $\sigma_g = 2,5$ dans l'air intérieur, et se déposent principalement dans les régions extra-thoracique (74 %), (3 %) dans les bronchiolaires et (5 %) dans les alvéolaires, le reste étant exhalé [14].

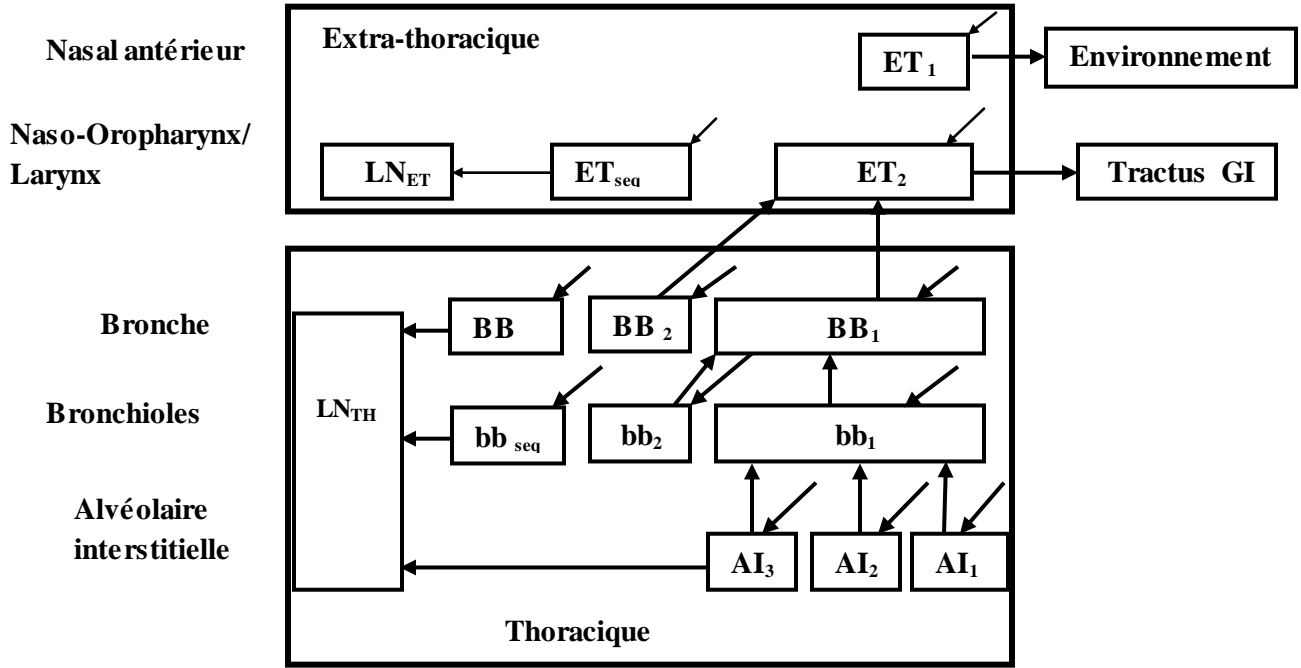


Figure II.4: Modèle compartimental de la CIPR 66 du système respiratoire humain [12].

Le taux de variation de l'activité α du $j^{\text{ème}}$ descendant du radon dans le compartiment i du système respiratoire à tout moment est donné par la relation suivante [12]:

$$\frac{dA_c^i(j)}{dt} = F_d(i)I_0(j) + \sum_n \lambda_{n,i} A_c^n(j) - \left(\sum_n \lambda_{i,n} + \lambda_j \right) A_c^i(j) \quad (\text{II.68})$$

où :

$F_d(i)$ est la fraction de déposition dans le compartiment (i) du système respiratoire des différents membres du public [12].

$I_0(j) = BA_c(j)$. B est le taux de respiration moyen pour différents membres du public. $A_c(j)$ ($Bq \cdot m^{-3}$) est l'activité volumique alpha du $j^{\text{ème}}$ descendant du radon dans l'air intérieur.

$\lambda_{i,n} = m_{i,n} + S_s$. $m_{i,n}$ est le taux de clairance dû au transport des particules du compartiment i vers le compartiment n [12].

S_s est le taux de clairance dû à l'absorption de particule dans le sang. Le taux d'absorption d'une matière dans le sang est le même dans toutes les régions du système respiratoire, sauf dans les voies nasales antérieures (ET_1) où aucune absorption ne se produit.

$\lambda_{n,i} = 0$ pour $i = 0, 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 12$ et 14 [12].

$\lambda_{n,i} = m_{n,i} + S_s$. $m_{n,i}$ est le taux de clairance dû au transport des particules du compartiment n vers le compartiment i.

λ_j : est la constante radioactive du $j^{\text{ème}}$ descendant du radon en (s^{-1}).

Nous avons déterminé les valeurs de $F_d(AI)$, $F_d(BB_2)$, $F_d(BB_{1+seq})$, $F_d(bb_2)$, $F_d(bb_{1+seq})$, $F_d(ET_1)$ et $F_d(ET_2)$ pour les AMAD 330 nm par extrapolation pour différents individus: les enfants âgés de 5 ans, 10 ans et pour les adultes (hommes et femmes), pour des taux de respirations selon l'activité repos-assis.

Les activités α dues au $j^{\text{ème}}$ descendant du radon dans chacun des 14 compartiments du système respiratoire, en fonction du temps, sont obtenues en résolvant l'équation différentielle (II. 68).

Le taux d'équivalent de dose alpha en ($Sv.s^{-1}$) dans un tissu T du système respiratoire d'un individu, dû à l'inhalation du $j^{\text{ème}}$ descendant du radon est donné par l'expression suivante:

$$H_T(j)(t) = A_c^T(j)(t) \cdot D_{SP}^T(j) \cdot Q \quad (II.69)$$

où :

$A_c^T(j)(t)$ (Bq) est l'activité volumique alpha de $j^{\text{ème}}$ descendant du radon dans le tissu T du système respiratoire.

$D_{SP}^T(j)$ est la dose spécifique alpha en Gray (Gy) déposée par 1 Bq du $j^{\text{ème}}$ descendant du radon dans le tissu T et Q est le facteur de pondération radiologique qui égale à 20 pour les particules alpha [14].

La dose spécifique alpha $D_{SP}^T(j)$ est donnée par [14]:

$$D_{SP}^T(j) = k \frac{K_j \cdot R_j \cdot S_j}{m_T} \quad (II.70)$$

où :

m_T est la masse du tissu cible T,

K_j est le rapport d'embranchement du $j^{\text{ème}}$ descendant,

R_j est le parcours de la particule α émise par le $j^{\text{ème}}$ descendant du radon dans le tissu T,

S_j est le pouvoir d'arrêt du tissu T pour la particule α émise,

K est le facteur de conversion ($k=1,6 \cdot 10^{-10}$).

Les pouvoirs d'arrêt et les parcours des particules alpha sont déterminés à l'aide du programme TRIM [8] (Tableau II.9) en utilisant la composition chimique des tissus données par la CIPR publication 89 (Tableau II.10) [15].

Radionucléide	E_j (MeV)	R_j (μm)	S_j ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^{-1}$)
^{218}Po	6,00	56,42	714,30
^{214}Po	7,68	82,50	598,50

Tableau II.9: Valeurs du pouvoir d'arrêt du poumon et parcours des particules alpha émises par les radionucléides ^{218}Po et ^{214}Po [8].

%	H	C	N	O	Na	P	S	Cl	K
Trachée	10,50	25,60	2,70	0,20	0,10	0,20	0,30	0,20	0,20
Larynx	5,60	9,90	2,20	4,40	0,50	2,20	0,90	0,30	-
Poumons	10,30	0,50	3,10	74,90	0,20	0,20	0,30	0,30	0,20

Tableau II.10: Composition des tissus des enfants et des adultes [15].

L'équivalent de dose dans un tissu T du système respiratoire pour le $j^{\text{ème}}$ descendant du radon est donné par:

$$H_T(j) = \int_0^{t_e} H_T(j)(t) dt \quad (\text{II. 71})$$

où t_e est le temps d'exposition du tissu T.

Les équivalents de dose annuelle engagée due aux descendants de courte période du radon, dans les régions thoracique et extra-thoracique suite à l'inhalation de l'air intérieur sont donnés, respectivement par [12]:

$$H_{\text{TH}}(j) = A_{\text{BB}} H_{\text{BB}}(j) + A_{\text{bb}} H_{\text{bb}}(j) + A_{\text{AI}} H_{\text{AI}}(j) + A_{\text{LN}_{\text{TH}}} H_{\text{LN}_{\text{TH}}}(j) \quad (\text{II. 72})$$

et

$$H_{\text{ET}}(j) = A_{\text{ET}_1} H_{\text{ET}_1}(j) + A_{\text{ET}_2} H_{\text{ET}_2}(j) + A_{\text{LN}_{\text{ET}}} H_{\text{LN}_{\text{ET}}}(j) \quad (\text{II. 73})$$

où :

$H_{BB}(j)$, $H_{bb}(j)$, $H_{AI}(j)$ et $H_{LN_{TH}}(j)$ sont respectivement les équivalents de dose dans les tissus de la région thoracique BB, bb, AI et LN_{TH} .

$H_{ET_1}(j)$, $H_{ET_2}(j)$ et $H_{LN_{ET}}(j)$ sont respectivement les équivalents de dose dans les tissus de la région extra-thoracique ET_1 , ET_2 et LN_{ET} .

$A_{BB} = 0,333$, $A_{bb} = 0,333$, $A_{AI} = 0,333$ et $A_{LN_{ET}} = 0,001$ sont les facteurs de pondération assignés pour la répartition du détriment radiologique dans les tissus de la région thoracique [12].

$A_{ET_1} = 0,001$, $A_{ET_2} = 1$, $A_{LN_{ET}} = 0,001$ sont les facteurs de pondération assignés pour la répartition du détriment radiologique dans les tissus de la région extra-thoracique [12].

La dose efficace annuelle engagée exprimée en (mSv/an par heure d'exposition) due aux descendants de courte période du radon suite à l'inhalation de l'air extérieur par les individus est donnée par la relation suivante [16]:

$$E = 0,12[H_{TH}(^{218}\text{Po}) + H_{TH}(^{214}\text{Po}) + 0,025[H_{ET}(^{218}\text{Po}) + H_{ET}(^{214}\text{Po})] \quad (\text{II. 74})$$

Cette dose efficace annuelle engagée exprimée en (mSv/an/heure d'exposition) due aux descendants du radon pour les membres du public peut être déterminée à l'aide de la formule suivante [17]:

$$E = A_c(^{222}\text{Rn}).F. t. D \quad (\text{II. 75})$$

où: $A_c(^{222}\text{Rn})$ est la valeur moyenne de l'activité volumique du radon (^{222}Rn) dans l'air l'intérieur (Bq.m^{-3}), $F=0,4$ est le facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants dans l'air intérieur, $t=1\text{h} / \text{an}$ et $D = 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ mSv} (\text{Bq.m}^{-3} \cdot \text{h})^{-1}$ est le facteur de conversion de dose [18].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit, en premier lieu, les équations gouvernant le transfert de chaleur et du radon par convection turbulent. Les systèmes d'équations résultants ont été présentés sous leurs formes générales. Ces systèmes permettent de prédire les grandeurs gouvernantes l'écoulement. Nous avons aussi couplé les systèmes d'équations obtenus au modèle $k-\varepsilon$ pour traiter la turbulence. La résolution analytique de ces systèmes n'est possible que pour des cas très simples. Pour cela, nous avons présenté la méthode des volumes finis qui a été utilisée afin de linéariser les systèmes d'équations. Les systèmes algébriques résultants ont été associés à l'algorithme SIMPLER dans le but de prédire correctement les

champs de vitesse et de pression, et satisfaire ainsi les équations de continuité et de quantité de mouvement. Ensuite, nous avons évalué les activités volumiques ainsi que le taux d'exhalation du radon dans les différents échantillons des matériaux de construction en utilisant la méthode des efficacités de détection des détecteurs solides de traces nucléaires de types CR-39 et LR-115 II. A la fin, nous avons présenté le modèle pour l'évaluation des équivalents de dose annuelle engagée dans le système respiratoire due au ^{218}Po et ^{214}Po descendants de courte période du radon.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à étudier l'influence de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur et sur le confort thermique dans une cavité ventilée.

Référence

- [1] J. Boussinesq, Théorie analytique de chaleur, 2, Gauthier Villars, Paris, (1903).
- [2] F. M. White, Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill, (2011).
- [3] K. Akbari, J. Mahmoudi, Numerical simulation of radon transport and indoor air conditions effects. Int. J. Sci. Eng. Res. 3, 2229–5518, (2012).
- [4] W. P. Jones, B. E. Lander, The calculation of low- Reynolds number phenomena with a two-equation model of turbulence. International Journal of Heat and Mass Transfer, 16, 1119-1130, (1973).
- [5] S. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere, Washington DC, (1980).
- [6] M. A. Misdag, H. Khajmi, F. Aitnouh, S. Berrazzouk, W. Bourzik, A new method for evaluating uranium and thorium contents in different natural material samples by calculating the CR-39 and LR-115 type II SSNTD detection efficiencies for the emitted α -particles. Nucl. Instrum. Methods B 171, 350-359, (2000).
- [7] M. A. Misdag, H. Ezzahery, A. Bakhchi, A. Ktata, A. Merzouki, N. Youbi, Determination of uranium and thorium content inside different material using track detectors and mean critical angles. App. Radiat. Isot. 51, 209-215, (1999).
- [8] J. P. Biersack, J. F. Ziegler, IBM Research, Version 98 (New York: TRIM), (1998).
- [9] L. Oufni, Determination of the radon diffusion coefficient and radon exhalation rate in Moroccan quaternary samples using the SSNTD technique. J. Radioanal. Nucl. Chem. 256, 581–586, (2003).
- [10] R. Rabi, L. Oufni, M. Amrane, Modeling of indoor ^{222}Rn distribution in ventilated room and resulting radiation doses measured in the respiratory tract, Journal of Radiation Research and Applied Sciences 10 273-282, (2017).
- [11] L. Oufni, M.A. Misdag, M. Amrane, Radon level and radon effective dose rate determination in Moroccan dwellings using SSNTDs, Radiation Measurements 40 118 – 123, (2005).

- [12] ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection, ICRP Publication 66 (Oxford: Pergamon Press) (1994).
- [13] J. Porstendorfer, and A.Reineking, Radon: characteristics in air and dose conversion factors. Health Phys. 76(3), 300–305 (1999).
- [14] ICRP. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. ICRP Publication 89 (Oxford: Pergamon Press) (2002).
- [15] ICRP, Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection reference values. Ann. ICRP 32 (3-4), ICRP Publication 89, (2002).
- [16] M. Amrane, M. A. Misdaq, J. Ouguidi, Study of the geological and meteorological conditions on the concentrations of ^{222}Rn and ^{220}Rn measured in outdoor air in various rural zones (Morocco) by using solid state nuclear track detectors and resulting radiation dose to the rural population. 6th International Symposium Naturally Occurring Radioactivity Material NORM 6, March 22-26, Marrakech, Morocco, (2010).
- [17] UNSCEAR. Sources and effects of ionising radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly (New York: United Nations) (2000).
- [18] Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations atomiques, Sources and effects of ionizing radiation (UNSCEAR Publications, New York) (1993).

CHAPITRE III:

**ETUDE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT DU
RADON ET SES DESCENDANTS DANS DES
CAVITES OUVERTES**

Introduction

De nos jours, dans le domaine du bâtiment, le recours à la modélisation et à la simulation numérique est devenu primordiale afin de limiter les coûts liés à l'expérimentation. Néanmoins, les calculs numériques encourrent des temps de calculs considérables et nécessitent des moyens matériels très puissants. Dans le but d'optimiser les temps de calculs, nous avons choisi de mener nos simulations dans des volumes plus au moins petits. En effet, l'étude numérique des phénomènes physiques présents dans le bâtiment peut être amenée à l'échelle des cavités qui peut fournir une première approximation. De ce fait, Nous avons considéré des cavités ouvertes. Ces cavités ont la particularité d'être le siège de gradients de température et de la concentration du gaz radioactif, radon-222 (^{222}Rn).

Dans ce chapitre, nous étudions les transferts de chaleur et de radon (^{222}Rn) à l'intérieur des cavités en utilisant la Méthode des Volumes Finis (MVF). La première partie du chapitre concerne l'analyse de l'influence de la ventilation en fonction des indices du confort thermique et de qualité de l'air intérieur dans une cavité ouverte remplie d'un mélange binaire air- ^{222}Rn en régime laminaire et permanent. En premier lieu, nous confrontons nos résultats avec les données de la littérature. Ensuite, nous examinons l'influence des nombres Re et Ra sur le confort et le comportement de l'écoulement dans quatre configurations distinctes. Il convient de noter que l'approximation de Boussinesq est admise dans tous les cas traités ici. La deuxième partie porte sur les déterminons des activités volumiques alpha correspondent aux fractions attachées et non attachées des descendants de courte période du radon dans l'air intérieur.

III.1 Modèle physique et conditions aux limites

La figure III.1 présente les configurations considérées, afin d'étudier numériquement la convection mixte laminaire. Il s'agit d'une cavité rectangulaire remplie d'air chauffée par la paroi droite, tandis que les parois verticale gauche et horizontales sont adiabatiques. L'air est introduit dans la cavité à T_e via une ouverture ($h_e=0,2$ cm) située en bas de la paroi verticale droite, tandis que la sortie est placée selon la configuration étudiée.

L'air pénètre dans la cavité à une température $T_e=288$ K et à une concentration nulle, et y sort naturellement. Des concentrations en ^{222}Rn sont imposées le long des parois verticales et horizontales (Tableau II.8).

Rappelons que nous visons à étudier l'influence de la ventilation et du chauffage sur le comportement de l'écoulement et du transfert de chaleur.

A l'état initial, les propriétés physiques de l'air sont présentées dans le tableau III.1. Elles sont calculées à la température de référence $T_0=288$ K.

Nous étudions ici, pour chacune des configurations, l'influence de la température de chauffage T_H sur l'efficacité ε_T et le comportement de l'écoulement. En effet, nous avons fait varier la température T_H entre 293 K ($Ra=6,05 \cdot 10^4$) et 313 K ($Ra=3,02 \cdot 10^5$) avec un pas de 5 K.

$T_0(K)$	$\rho_0(Kgm^{-3})$	$C_{p0}(J Kg^{-1}K^{-3})$	$\lambda_0(Wm^{-1}K^{-1})$	$\mu_0(Kg m^{-1}K^{-1})$	$\beta_T(K^{-1})$	Pr
288	1,2257	1005	0,0254	$1,78 \cdot 10^{-5}$	0,00347	0,71

Tableau III.1: Propriétés physiques de l'air à $T_0=288K$.

avec ρ_0 , T_0 , C_{p0} , λ_0 , μ_0 , et β_T désignent les paramètres physiques de référence du fluide air_222Rn.

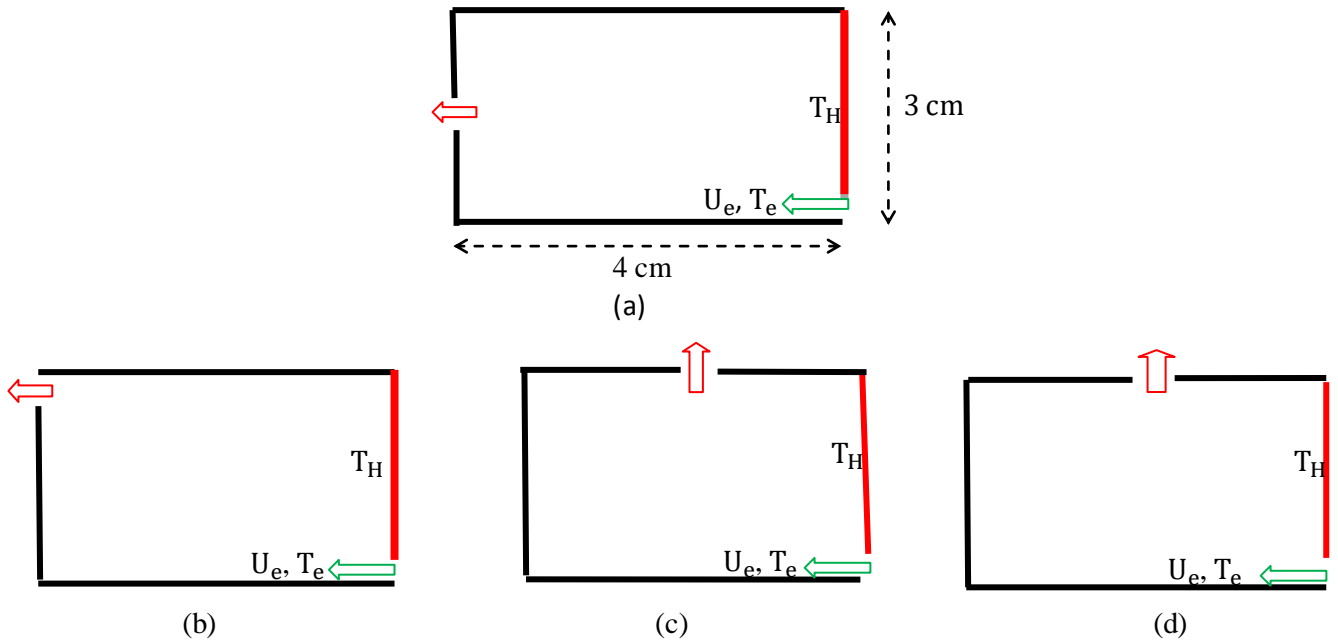


Figure III.1: Configurations et conditions aux limites considérées: (a) configuration 1, (b) configuration 2, (c) configuration 3 et (d) configuration 4.

III.2 Sensibilité du maillage

La résolution d'un problème et l'obtention d'une solution numérique stable nécessite la construction d'une grille contenant un nombre suffisant de mailles. En effet, le résultat obtenu doit être indépendant du maillage. De ce fait, nous avons réalisé plusieurs tests pour chacune des configurations à $Re=500$ et $Ra=3,02.10^5$ ($T_H=313$ K). En effet, nous avons considéré quatre grilles de maillage quadratiques et uniformes (60×60 , 70×70 , 80×80 et 90×90). Les résultats obtenus par ces maillages sont très proches (Tableaux III.2 et III.3). Cependant, le maillage 90×90 donne un résultat très précis mais nécessite un temps d'exécution du programme de calcul élevé par rapport aux autres maillages. A l'issue de ces résultats, nous avons retenu la grille 70×70 pour l'ensemble des calculs.

Maillage	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
60×60	295,44	294,90	294,34	293,28
70×70	295,45	294,91	294,36	293,30
80×80	295,46	294,96	294,38	293,31
90×90	295,48	294,99	294,40	293,34

Tableau III. 2: Valeurs moyenne des températures (K). ($Re=500$ et $Ra=3,02.10^5$).

Maillage	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
60×60	186,44	186,48	196,88	197,33
70×70	186,45	186,50	196,89	197,35
80×80	186,48	186,51	196,90	197,38
90×90	186,49	186,52	196,91	197,40

Tableau III. 3: Valeurs moyenne des concentrations ($Bq.m^{-3}$). ($Re=500$ et $Ra=3,02.10^5$).

III.3 Confrontation avec les données de littérature

Pour démontrer la validation et la précision de notre model et de son code numérique, nous avons fait une comparaison avec les résultats obtenus par les auteurs M Corcione et al. [1] et Rahman et al, [2]. Ces résultats sont comparés par le nombre de Nusselt et le nombre de Sherwood (les tableaux III.4 et III.5). On remarque bien qu'il y a une concordance satisfaisante avec des différences minimales observées.

Pr	Ra	Le	N	M Corcione et al [1]		Présent travail		Error (%)
				Nu	Sh	Nu	Sh	
1,00	10 ⁴	1,00	0,50	1,77	1,77	1,76	1,76	0,37
10,00	10 ⁴	1,00	0,50	1,77	1,77	1,76	1,76	0,19
10,00	10 ⁶	1,00	0,50	7,65	7,65	7,65	7,56	0,00

Tableau III. 4: Comparaison des résultats avec ceux des références [1].

Pr	Ri	Re	Nusselt moyenne (\overline{Nu})		
			Rahman et al. [2]	Présent travail	Error (%)
0,71	2,00	100,00	1,92	1,96	2,11
0,71	1,00	100,00	1,82	1,90	7,29

Tableau III. 5: Comparaison des résultats avec ceux des références [2].

avec $Ri = \frac{g \beta_T (T_H - T) H}{U_0^2}$ est le nombre de Richardson, $N = \frac{\beta_S \Delta C}{\beta_T \Delta T}$ est le rapport de flottabilité, $Le = \frac{\alpha}{D}$ est le nombre de Lewis, $Nu = \int_0^H -\frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} dY$ est le nombre de Nusselt, $Sh = \int_0^H \frac{\partial C}{\partial X} \Big|_{X=0} dY$ est le nombre de Sherwood [1].

III.4 Résultats

L'analyse des quatre configurations illustrées sur la figure III.1 permet d'étudier l'influence des paramètres pertinents gouvernant l'écoulement et le positionnement de la grille de sortie d'air. En effet, pour chacune des configurations, nous avons étudié l'influence du nombre Re, du nombre Ra sur la qualité de l'air et sur le confort thermique à l'intérieur.

III.4.1 Influence du nombre de Re

Pour montrer l'effet du nombre Re, nous avons fixé la température de chauffage 297 K ($Ra=1.10^5$) et on fait varier la vitesse d'entrée d'air entre 0,0275 m.s⁻¹ et 0,825 m.s⁻¹. Ces valeurs de la vitesse donnent un nombre de Re compris entre 50 et 1500.

La figure III.2 montre les profils des lignes de courant pour différentes valeurs de Re . Nous remarquons que, pour $Re=100$ et 200 , l'écoulement est gouverné par le jet d'air provenant de l'entrée. L'air pénètre horizontalement dans la cavité en bas de la paroi verticale droite et change de direction en bas de la paroi verticale droite et devient parallèle à celle-ci pour atteindre la sortie. Ce mouvement d'air forme un écoulement en L. Deux structures importantes se forment à gauche de ce mouvement. La première structure est située tout près du jet et s'agrandi avec Re et occupe tout le volume à $Re=500$. La seconde structure est au niveau de la paroi verticale gauche et disparaît à $Re=500$. Cette structure est entraînée par la convection thermique naturelle provoquée par la température de chauffage imposé au niveau de la paroi gauche. Lorsqu'en augmentant le nombre de Re l'écoulement s'accélère, l'intensité de la convection thermique naturelle devient de moins en moins influençant devant la convection forcée et la structure centrale tend à dominer et à occuper tout le volume.

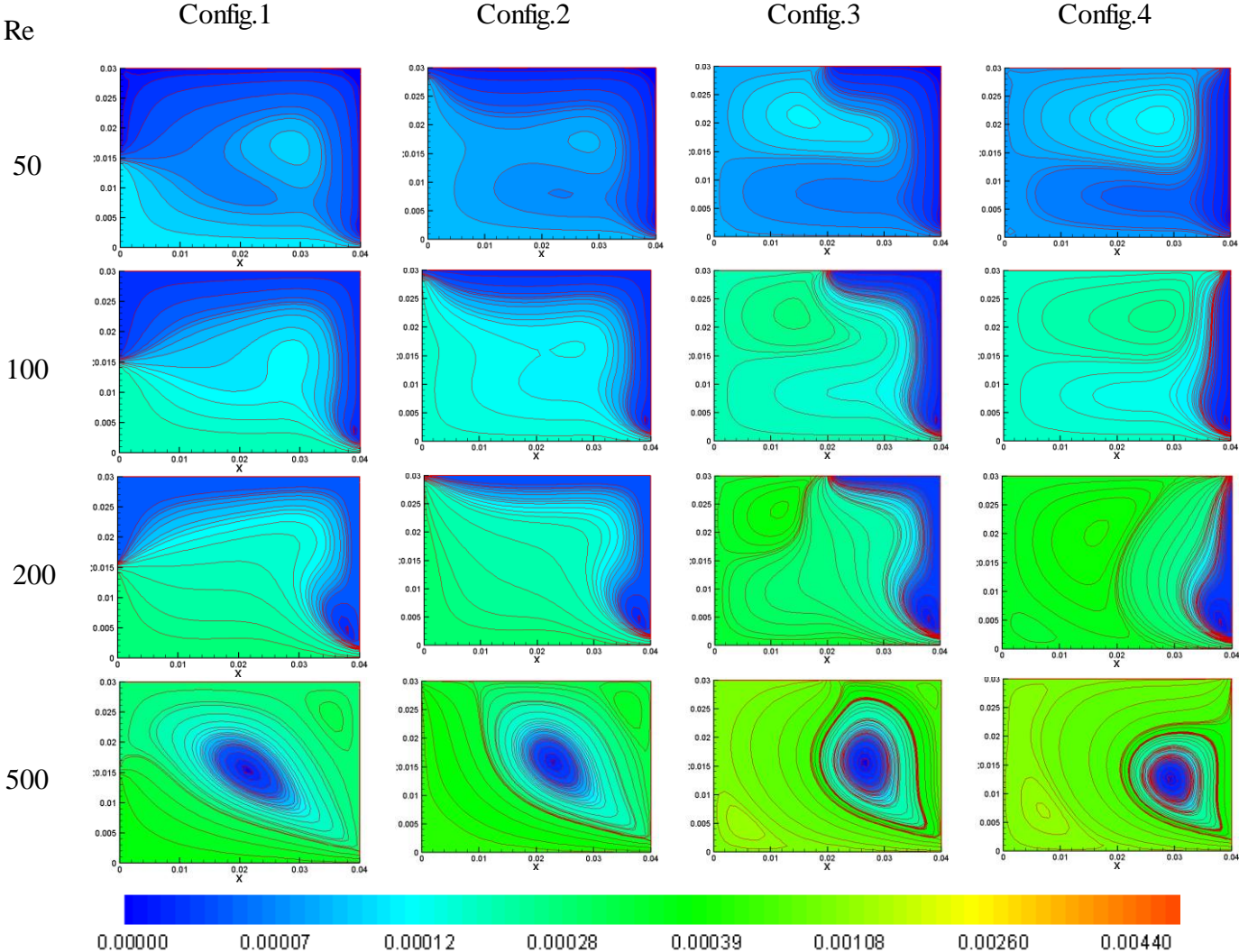


Figure III.2. Lignes de courant [3].

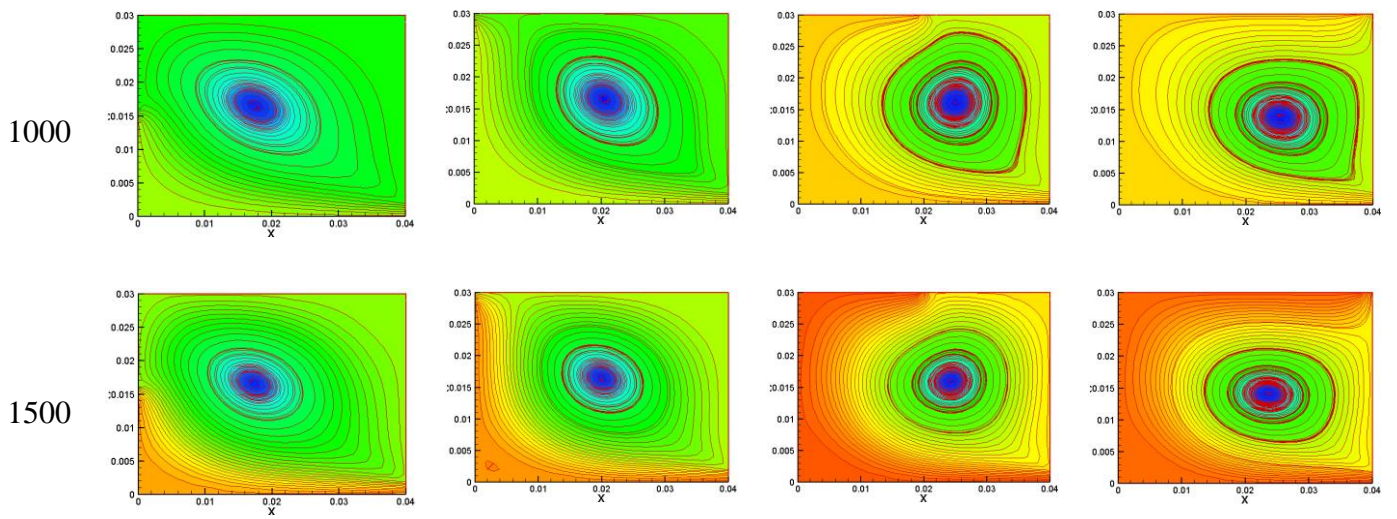


Figure III.2. Continue.

La figure III.3 illustre les isothermes pour différentes valeurs de Re . Nous constatons que la température est maximale au voisinage de la paroi horizontale supérieure et de la paroi verticale droite en raison de l'air chaud qui tend à remonter vers le haut. Alors qu'elle est faible au voisinage de la paroi horizontale inférieure et de la paroi verticale gauche à cause de l'air frais qui pénètre dans la cavité via l'entrée. Egalement, nous observons que les valeurs de la température diminuent notablement avec Re [3].

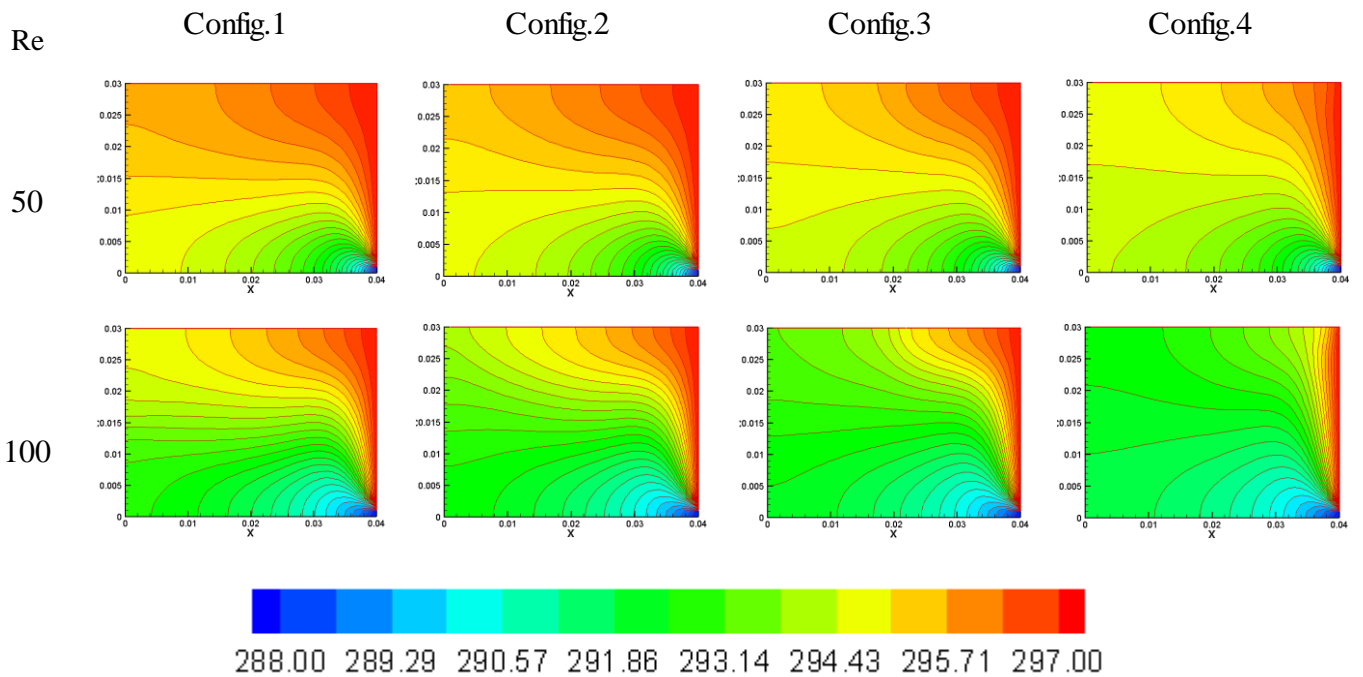


Figure III.3: Contour de la température (K) [3].

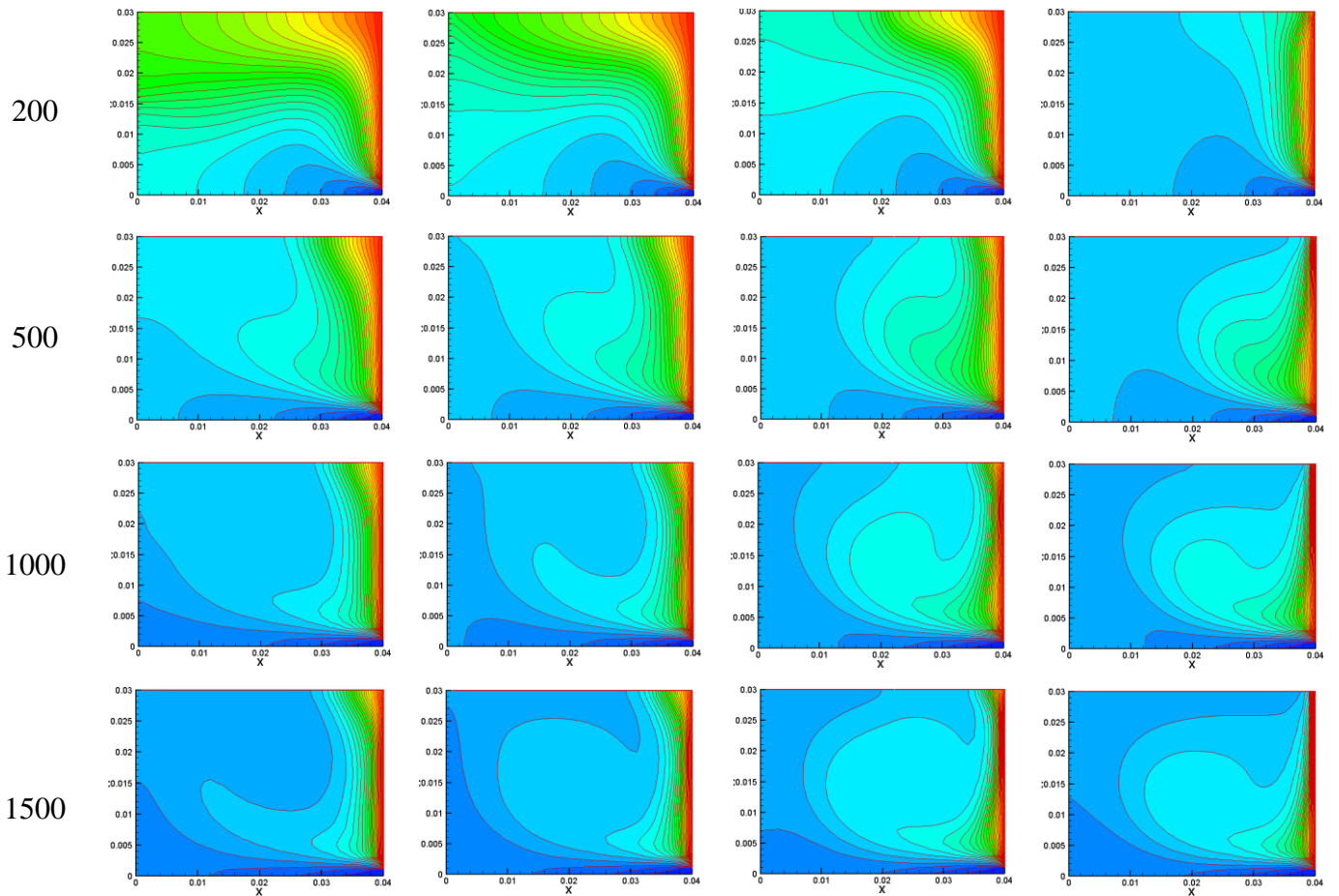


Figure III.3: Continue

La figure III.4 montre les iso-concentrations pour un nombre de Re variant entre 50 et 1500. Nous remarquons que, pour toutes les configurations, plus la ventilation augmente plus la concentration du radon (^{222}Rn) dans la cavité diminue. Les concentrations maximales du radon se situent au voisinage de la paroi verticale gauche et droit. Tandis que les basses concentrations se trouvent à l'entrée d'air et au niveau de la paroi horizontale inférieure. Ceci explique la dilution de la cavité à ces endroits. Egalement, nous trouvons que plus le nombre de Re augmente plus la cavité est diluée au voisinage des parois horizontale inférieure et verticale droite. Ceci est dû à l'augmentation du débit de ventilation qui permet de diluer l'air intérieur et donc une diminution de la concentration du radon [3].

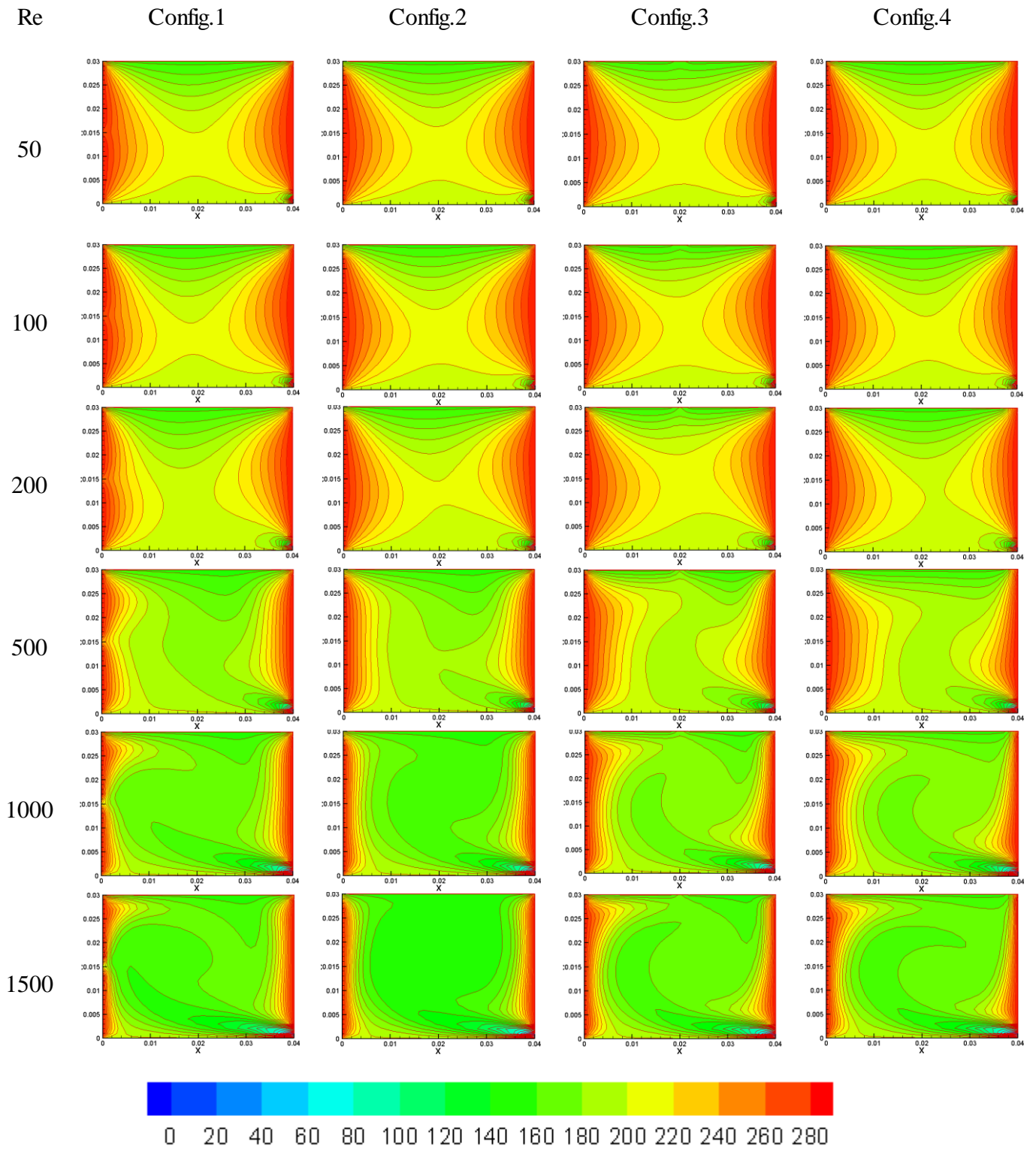


Figure III.4: Contour de la concentration du ^{222}Rn (Bq.m⁻³) [3].

Les tableaux III.6 et III.7 présentent les valeurs moyennes de la température (\bar{T}) et de la concentration (\bar{C}) à l'intérieur de cavité étudiée en fonction du nombre Re. Nous observons que les températures et les concentrations diminuent progressivement en fonction du nombre de Re pour les quatre configurations. Ceci explique que le débit de ventilation a un impact

important sur la distribution des températures et des concentrations du radon. En effet, l'augmentation du débit de ventilation favorise l'homogénéisation de l'air intérieur.

Re	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
50	295,07	294,44	294,79	294,51
100	293,74	293,40	293,02	292,39
200	292,02	291,51	290,95	290,16
500	290,61	290,53	290,48	290,16
1000	290,04	290,03	290,14	289,96
1500	289,81	289,81	289,95	289,78

Tableau III. 6: Températures moyennes (K).

Re	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
50	212,29	213,44	215,01	213,53
100	210,88	213,11	215,46	212,58
200	206,77	210,36	214,09	209,95
500	193,57	196,01	204,33	203,91
1000	180,93	178,04	188,96	189,28
1500	172,43	166,12	178,29	178,00

Tableau III.7: Concentrations moyennes du ^{222}Rn (Bq.m^{-3}).

Sur la figure III.5, nous traçons les évolutions de ε_T et ε_C en fonction de Re. Rappelons que ε_C est le rapport de la différence entre la concentration du radon à l'air extrait (C_s) et la concentration du radon à l'air insufflé (C_e), et la différence de la concentration moyenne du radon de l'air intérieur (\bar{C}) et la concentration du radon à l'air insufflé (C_e) ($\varepsilon_C = \frac{C_s - C_e}{\bar{C} - C_e}$). Nous remarquons que l'augmentation de Re améliore l'efficacité de la ventilation, à évacuer de la chaleur et à diluer le mélange air- ^{222}Rn . Ceci est dû à l'amplification de l'écoulement en fonction de Re. En effet, l'intensité de l'écoulement joue un rôle important sur l'homogénéisation du mélange air- ^{222}Rn [4].

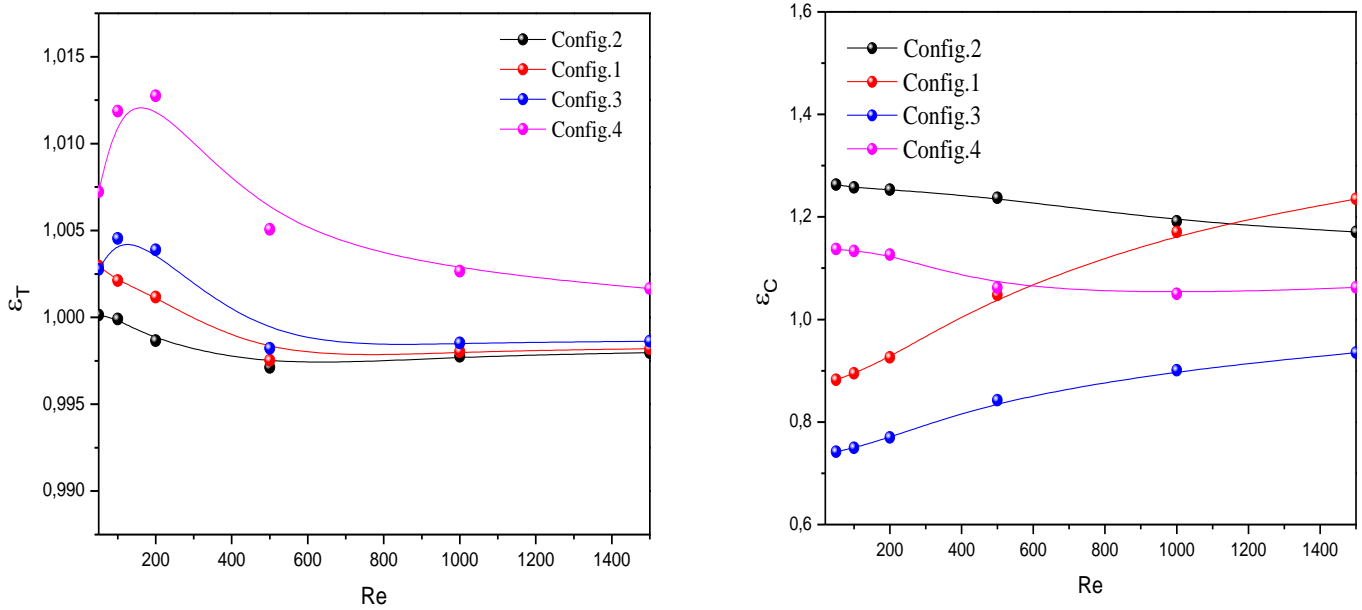


Figure III. 5: Evolution de ε_T et ε_C en fonction de Re [4].

Dans le tableau III.8, nous montrons les valeurs de l'indice de qualité de l'air intérieur I_{QAI} des configurations étudiées en fonction de Re . Nous observons que la ventilation assure une bonne qualité de l'air intérieur pour $Re \geq 500$.

Re	I_{QAI}			
	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
50	1,06	1,06	1,07	1,06
100	1,05	1,06	1,07	1,06
200	1,03	1,05	1,07	1,04
500	0,96	0,98	1,02	1,01
1000	0,90	0,89	0,94	0,94
1500	0,86	0,83	0,89	0,89

Tableau III.8: Indice de qualité de l'air intérieur en fonction de Re [4].

III.4.2 Influence du nombre de Ra

Afin d'étudier l'effet des nombres de Ra. Nous avons augmenté la température de chauffage T_H de 293 K à 313 K avec un pas de 5 K. La vitesse d'entrée d'air a été fixée à $0,38 \text{ m.s}^{-1}$ ($Re=700$).

Le tableau III.9, présente les nombres de Ra en fonction de la température de chauffage T_H .

T_H (k)	Ra
293	$6,05.10^4$
298	$1,21.10^5$
303	$1,81.10^5$
308	$2,42.10^5$
313	$3,02.10^5$

Tableau III. 9: Nombres Ra correspondants aux températures de chauffage T_H .

La figure III.6 montre les lignes de courant en fonction du nombre Ra pour $Re=700$. Nous observons que l'écoulement est stable en fonction des variations de Ra. Ceci est dû à la prédominance de la convection naturelle.

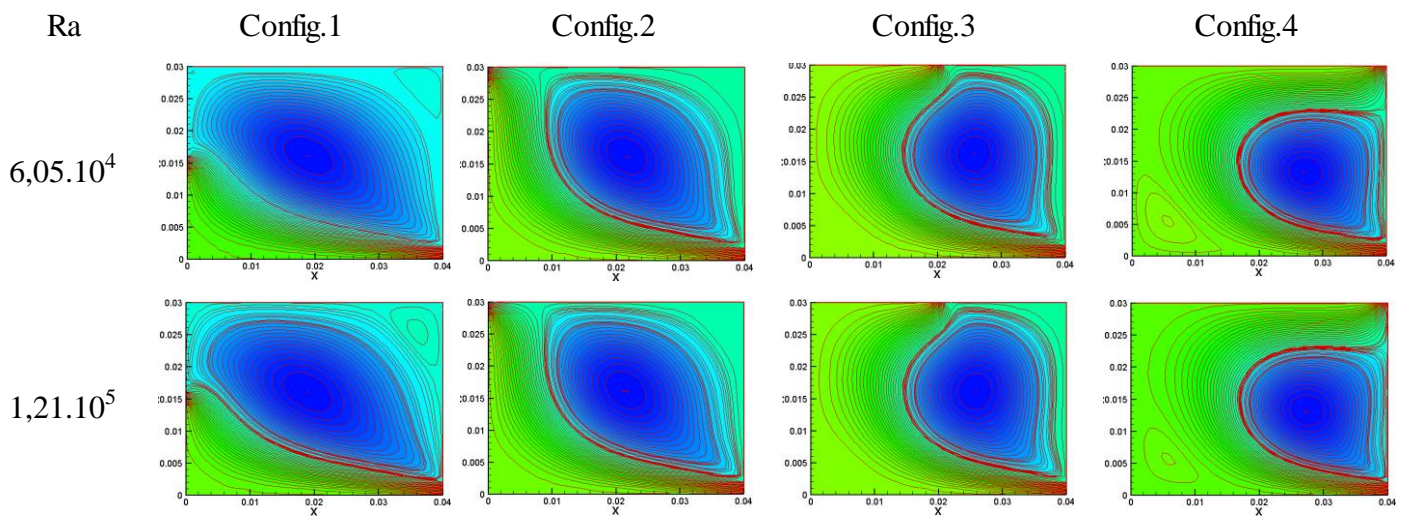


Figure III.6: Lignes de courant [3].

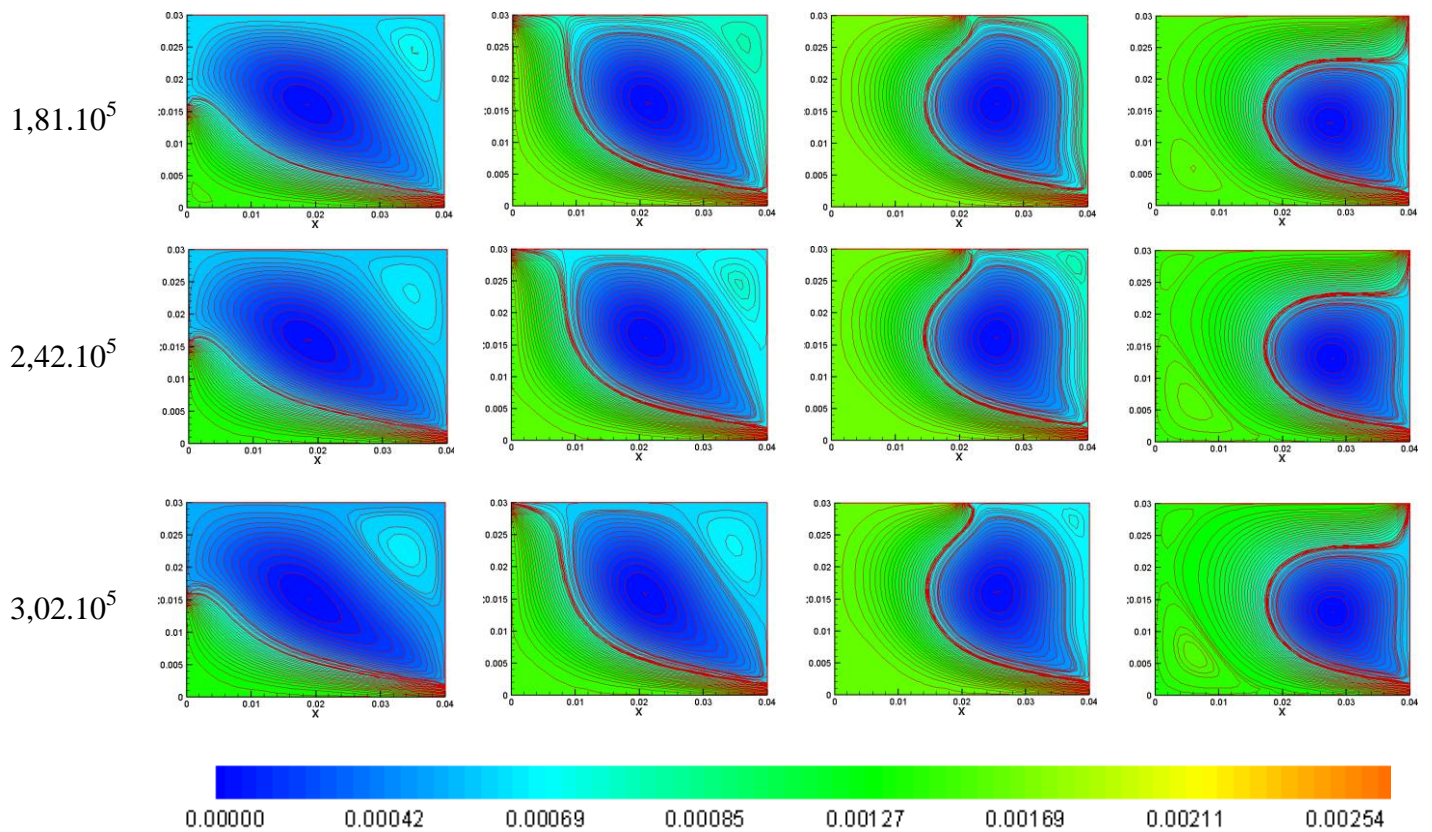


Figure III.6. Continue

La figure III.7 montre les isothermes pour différentes valeurs de Ra. Nous remarquons que, pour toutes les configurations, plus Ra augmente plus la température de la cavité augmente. Les températures maximales se situent au voisinage de la paroi verticale droite. Tandis que les basses températures se trouvent à l'entrée d'air et à la moitié gauche de la cavité. Ceci explique le rafraîchissement de la cavité à ces endroits [3].

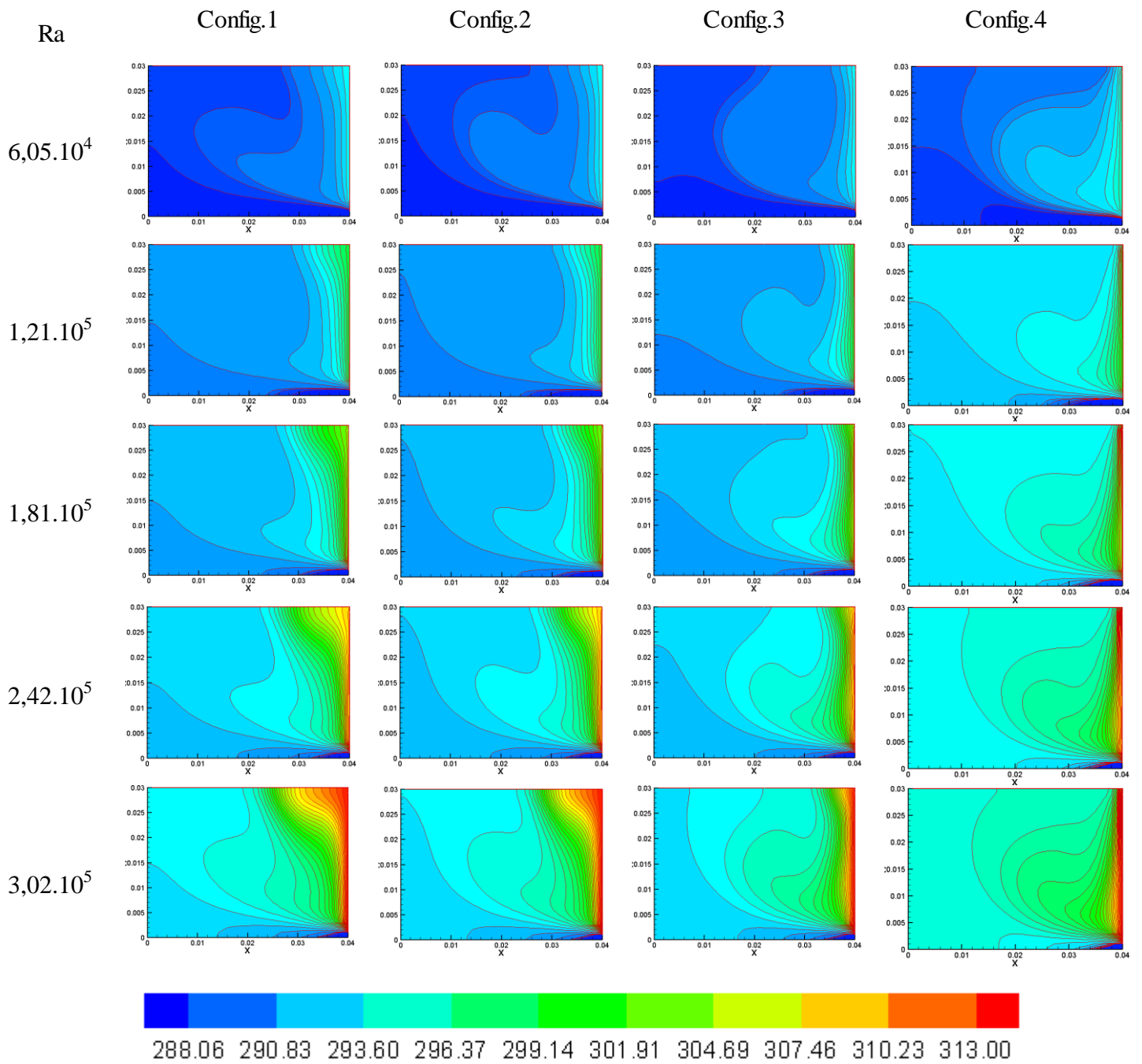


Figure III.7: Contour de la température (K) [3].

La figure III.8 illustre les iso-concentrations pour des nombres de Ra allant de $6,05 \cdot 10^4$ à $3,02 \cdot 10^5$. Nous remarquons que les isoconcentrations varient très légèrement avec l'augmentation de Ra [3].

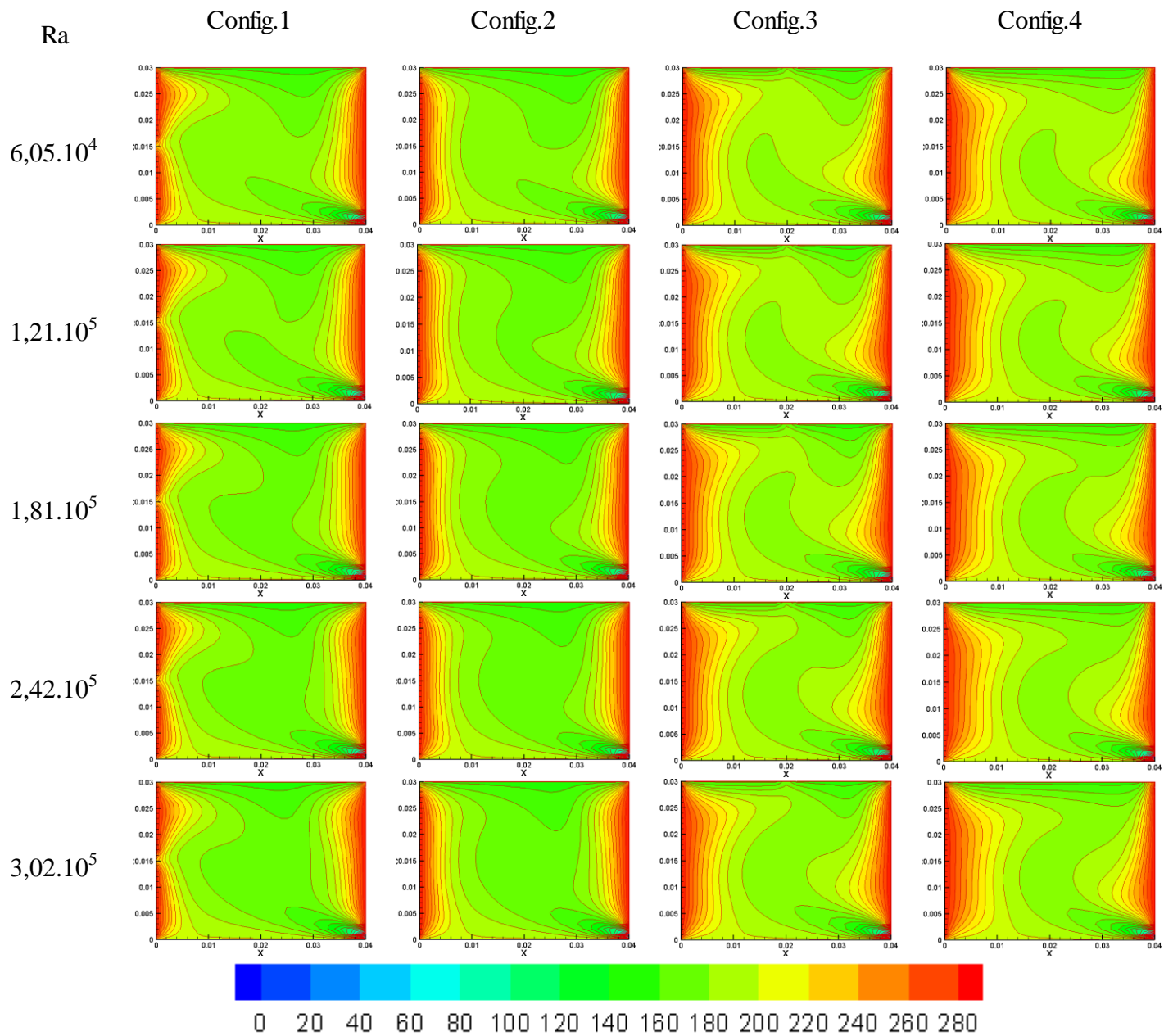


Figure III.8: Contour de la concentration (Bq.m⁻³) [3].

Les tableaux III.10 et III.11 représente, respectivement, les températures et les concentrations moyennes du ²²²Rn pour différentes valeurs de Ra. Nous remarquons que les concentrations moyennes du ²²²Rn restent constantes quand Ra augmente. Tandis que les températures moyennes augmentent considérablement.

Ra	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
$6,05.10^4$	289,27	289,26	289,30	289,17
$1,21.10^5$	290,57	290,53	290,57	290,32
$1,81.10^5$	291,95	291,82	291,82	291,43
$2,42.10^5$	293,54	293,19	293,05	292,52
$3,02.10^5$	295,31	294,80	294,28	293,57

Tableau III. 10: Températures moyennes (K) [3].

Ra	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
$6,05.10^4$	188,31	188,49	198,01	198,30
$1,21.10^5$	187,78	188,08	197,74	198,14
$1,81.10^5$	187,16	187,56	197,43	197,97
$2,42.10^5$	186,60	186,95	197,07	197,80
$3,02.10^5$	186,22	186,48	196,64	197,61

Tableau III. 11: Concentrations moyennes du ^{222}Rn (Bq.m^{-3}) [3].

La figure III.9 présente l'évolution de l'efficacité de la ventilation à évacuer de la chaleur (ϵ_T) et à éliminer des polluants (ϵ_C) en fonction de Ra et ce, pour toutes les configurations considérées. A partir de cette figure, nous distinguons que la configuration 4 fournit la meilleure l'efficacité de la ventilation à évacuer de la chaleur (ϵ_T) et la configuration 2 semble meilleure à diluer le mélange air- ^{222}Rn . Nous remarquons aussi que plus Ra augmente, plus l'efficacité de la ventilation (ϵ_T) diminue. Ceci peut s'expliquer par le fait que la température moyenne dans la cavité augmente avec Ra.

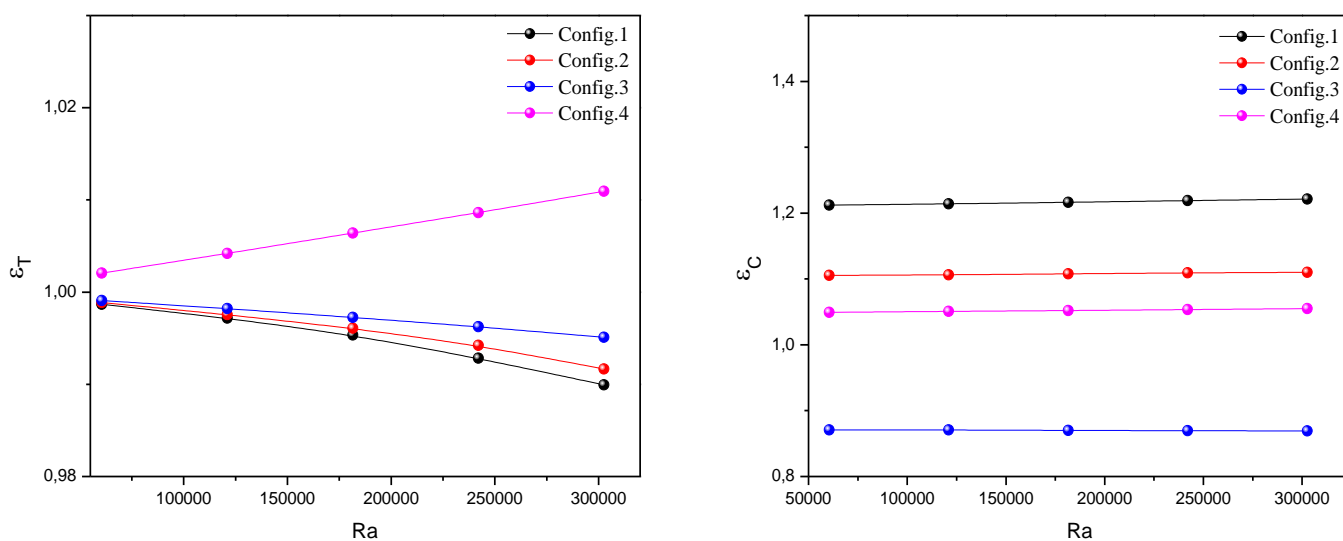


Figure III. 9: Evolution de ε_T et ε_C en fonction de Ra [3].

Le tableau III.12 ci-dessous montre les valeurs de l'indice de qualité de l'air intérieur I_{QAI} en fonction du Ra. Nous constatons que toutes les configurations offrent une bonne qualité de l'air quelques soit la valeur de Ra ($I_{QAI} \ll 1$).

Ra	I_{QAI}			
	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
$6,05 \cdot 10^4$	0,941	0,942	0,990	0,991
$1,21 \cdot 10^5$	0,938	0,940	0,988	0,990
$1,81 \cdot 10^5$	0,935	0,937	0,987	0,989
$2,42 \cdot 10^5$	0,933	0,934	0,985	0,989
$3,02 \cdot 10^5$	0,931	0,932	0,983	0,988

Tableau III. 12: Indice de qualité de l'air intérieur [3].

III.4.3 Influence de la position des ouvertures

Pour étudier l'influence de la position des ouvertures, nous examinons les configurations présentées dans la figure III.1. Nous montrons dans les figures ci-après les résultats obtenus en termes de ε_T , de ε_C et de I_{QAI} .

La figure III.10 illustre l'évolution de l'efficacité ε_C des quatre configurations en fonction de Re et ce pour différents nombres de Ra. Nous constatons que les quatre configurations fournissent une efficacité ε_C globalement supérieure à l'unité, ceci dit que la ventilation évacue suffisamment le polluant intérieur. A noter que la configuration.2 fournit la meilleure efficacité.

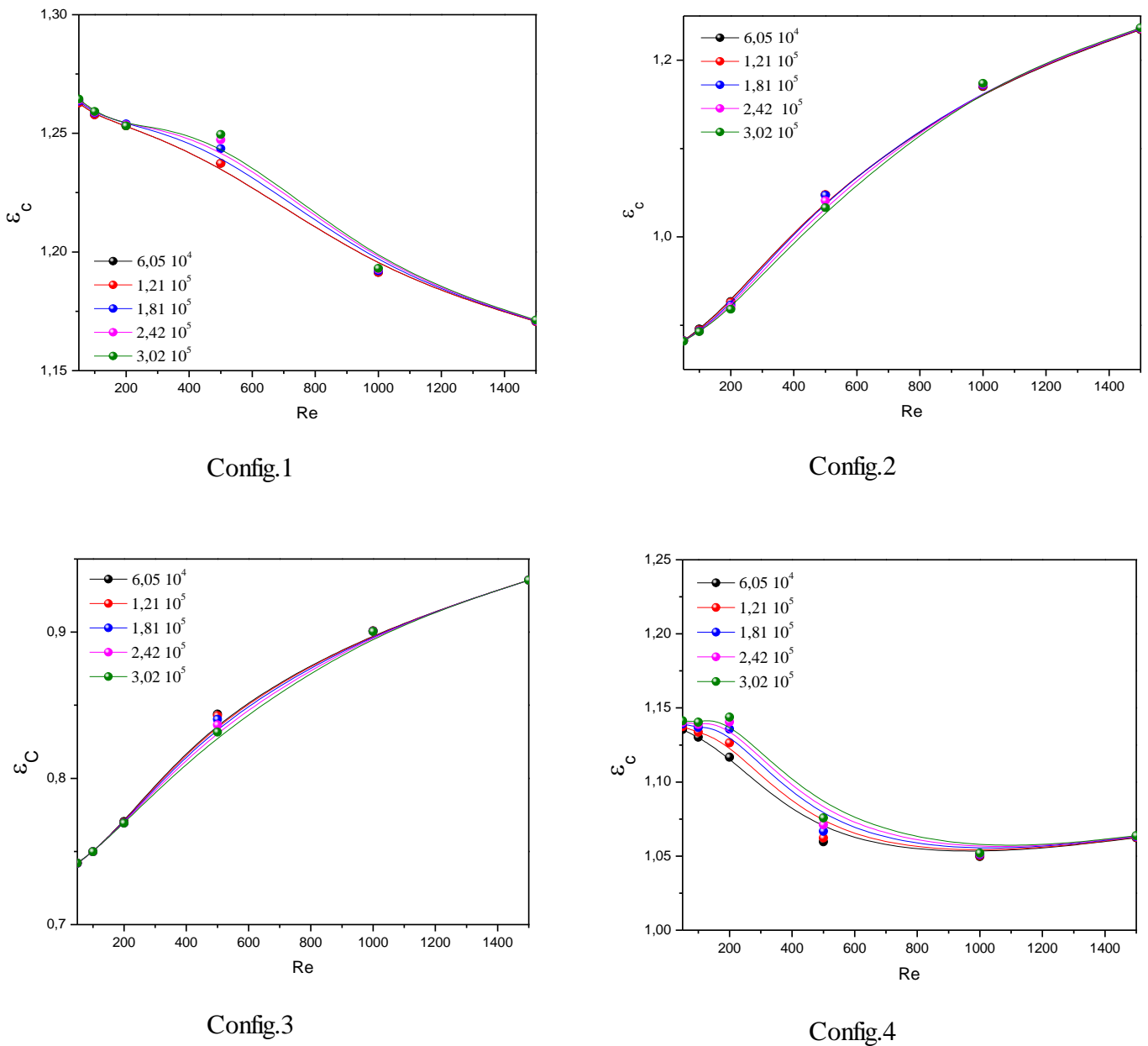
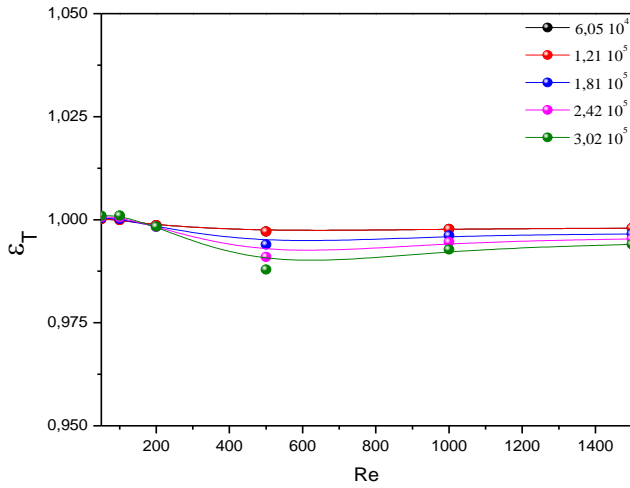


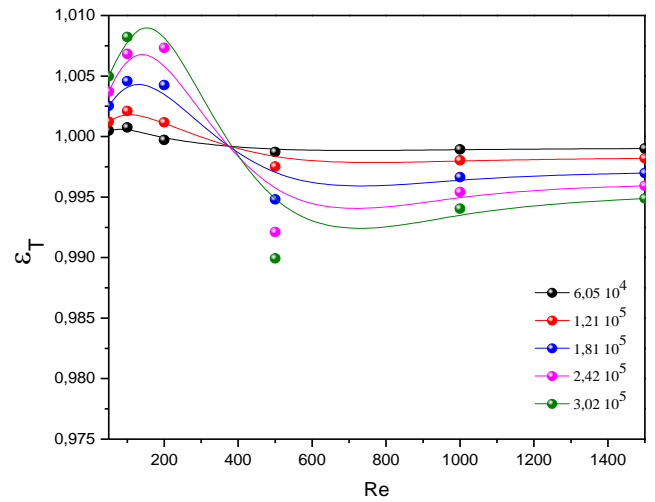
Figure III. 10: Evolution de ε_C en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra [3].

La figure III.11 illustre l'évolution de l'efficacité ε_T des quatre configurations en fonction de Re et ce pour différents nombres de Ra. Nous constatons que ε_T est pratiquement stable avec Re. Alors qu'elle est sensible aux variations de Ra en raison de l'augmentation de la

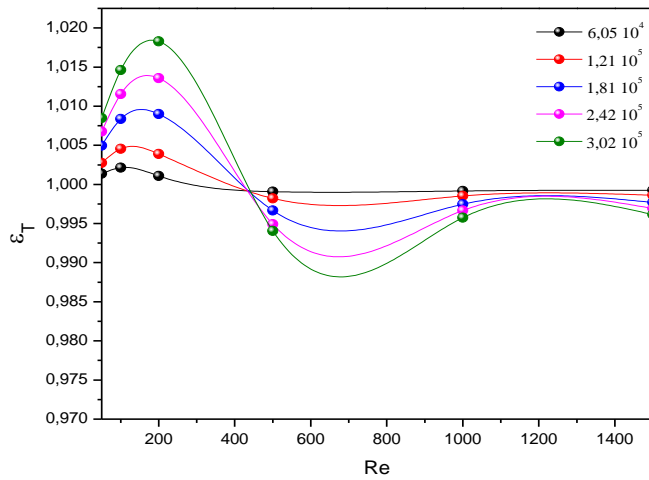
température de chauffage. Egalement, nous trouvons que la configuration 4 fournit une meilleure efficacité. En effet ε_T est largement supérieur à 1.



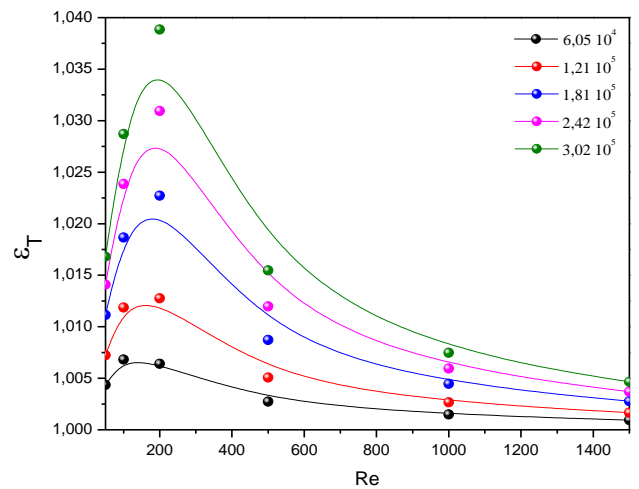
Config.1



Config.2



Config.3

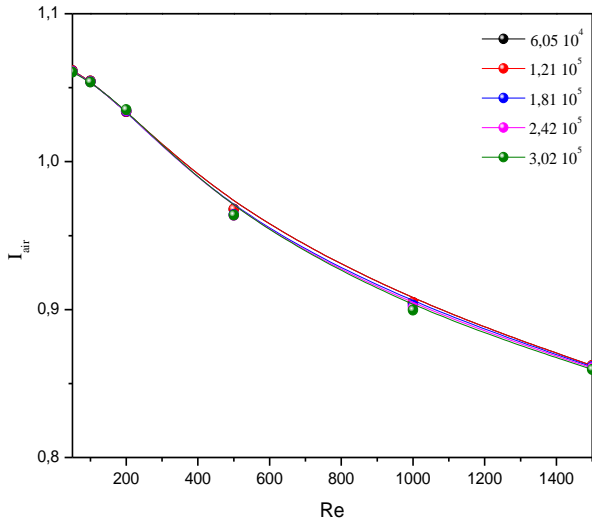


Config.4

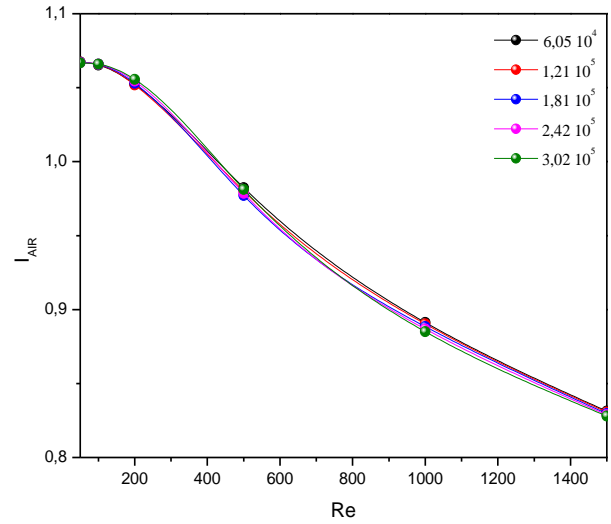
Figure III. 11: Evolution de ε_T en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra [3].

La figure III.12 présente l'évolution de la qualité de l'air au milieu de la cavité pour les quatre configurations. Nous observons que la qualité de l'air fournie par la configuration 4 est supérieure par rapport aux autres. La configuration 2 fournit une qualité de l'air inférieure à celle donnée par les autres configurations. Tandis que les configurations 1 et 3 donnent une qualité de l'air identique et légèrement supérieure à celle fournie par la configuration 2. Pour

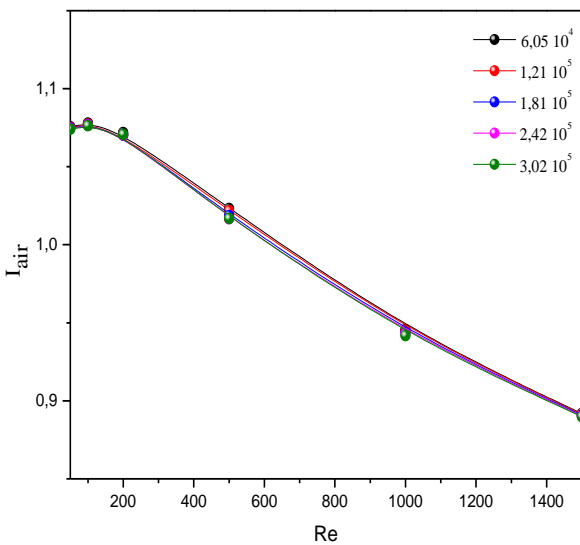
un premier aperçu, nous pouvons dire que la configuration 2 est meilleure que les autres en terme de qualité de l'air.



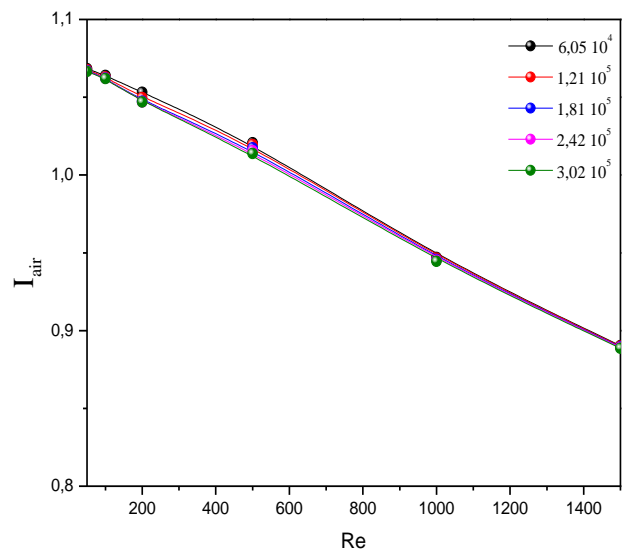
Config.1



Config.2



Config.3



Config.4

Figure III. 12: Evolution de I_{air} en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra .

A l'issue de ces résultats, nous trouvons que le scénario 2 fourni une meilleure efficacité de ventilation à évacuer le ^{222}Rn et assure une bonne qualité de l'air.

III.4.4 Comportement des descendants du radon

Comme dans la section précédente, nous avons fait varier le coefficient d'attachement X entre 20 h^{-1} et 100 h^{-1} avec un pas de 20 h^{-1} en fixant la vitesse d'entrée à $0,38 \text{ m.s}^{-1}$ et la température de chauffage à $T_H=297 \text{ K}$. Nous présentons dans le contenu de ce paragraphe uniquement les résultats relatifs à la configuration 2.

Sur la figure III.13, nous montrons les profils des fractions libres et attachées des ^{218}Po et ^{214}Pb pour différentes valeurs de coefficient X . Nous constatons que, la concentration des fractions libres augmente considérablement avec X . Tandis que la concentration des fractions attachées diminue. Nous constatons aussi que, les concentrations maximales se situent au voisinage des parois verticale droit et horizontale supérieure. Tandis que les basses concentrations se trouvent à l'entrée d'air et à la moitié gauche de la cavité. Ceci explique la dilution de la concentration du radon dans ces endroits de la cavité étudiée (conf.2).

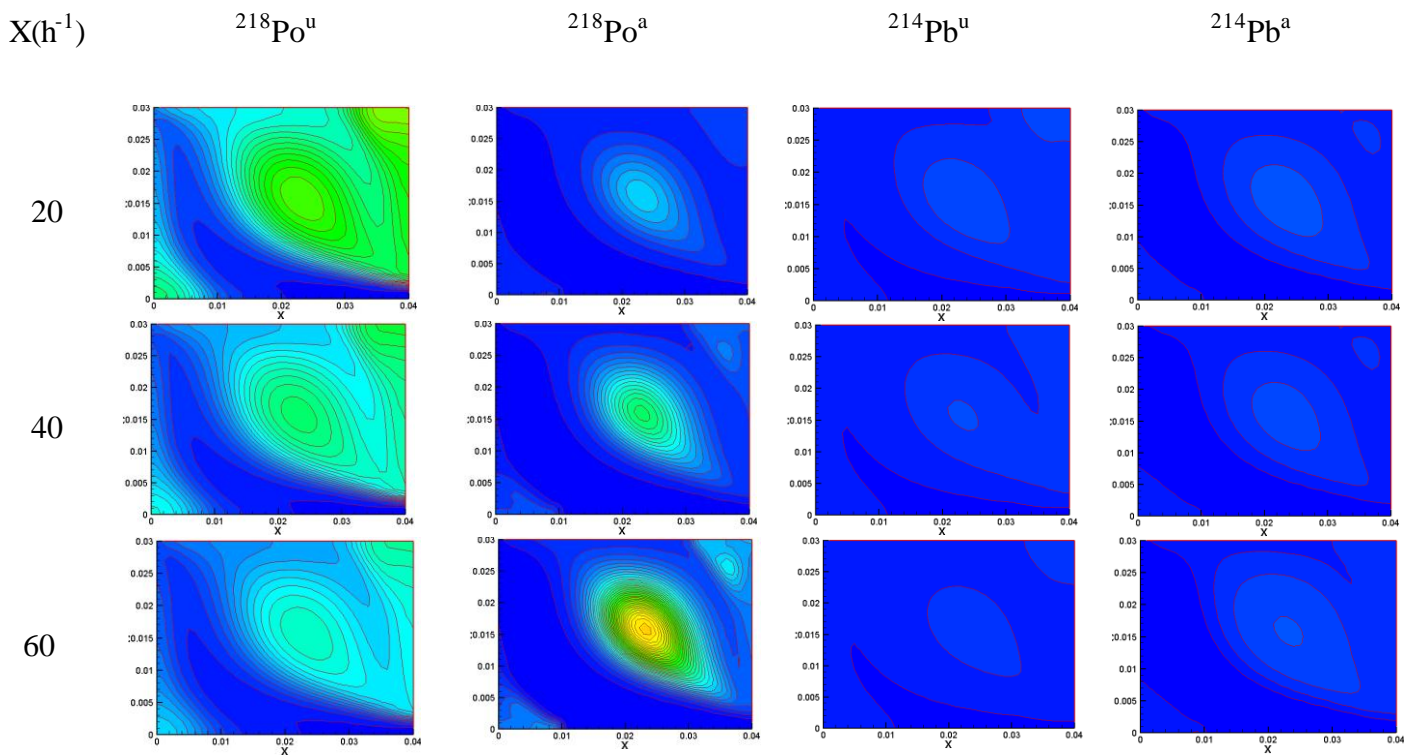
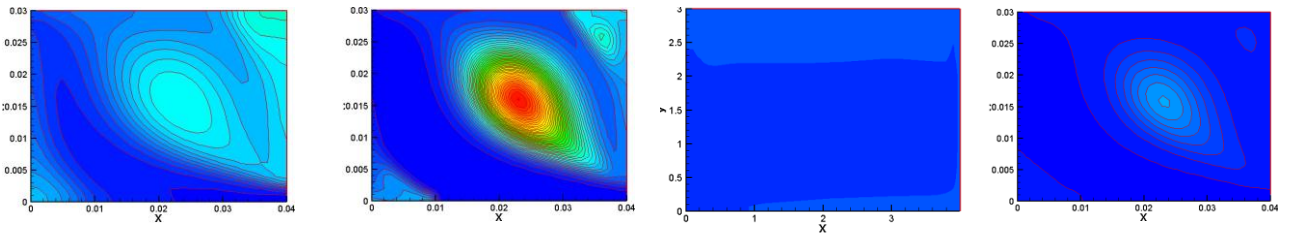


Figure III. 13: Iso-concentrations pour ^{218}Po et ^{214}Pb [4].

80



100

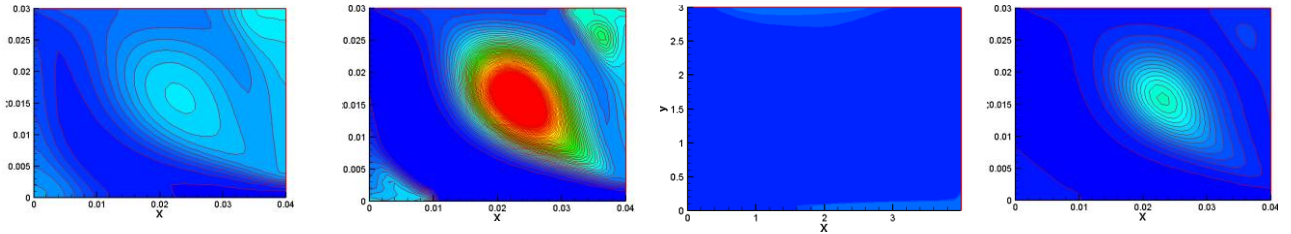


Figure III. 13: Continue

Le tableau III.13 présente les valeurs moyennes des fractions libres et des fractions attachées à l'intérieur de cavité étudiée en fonction du coefficient X. Nous observons que les concentrations des fractions libres diminuent progressivement en fonction du nombre de X, tandis que les concentrations des fractions attachées augmentent. Ceci indique que l'augmentation des concentrations des particules d'aérosols dans la cavité induit à une diminution de la fraction libre et une évolution de la fraction attachée, du fait de l'attachement des particules nanométriques des descendants du radon dès leur formation sur les aérosols.

X(h ⁻¹)	²¹⁸ Po ^u	²¹⁸ Po ^a	²¹⁴ Pb ^u	²¹⁴ Pb ^a	²¹⁴ Bi ^u	²¹⁴ Bi ^a
20	9,542	11,910	0,680	5,600	0,032	5,880
40	7,030	17,530	0,523	8,470	0,017	8,767
60	5,574	20,816	0,422	10,192	0,010	10,459
80	4,589	22,813	0,350	11,224	0,007	11,463
90	4,226	23,626	0,324	11,656	0,006	11,883
100	3,916	24,320	0,301	12,025	0,005	12,241

Tableau III. 13: Facteur d'équilibre et la fraction libre en fonction du coefficient

d'attachement [5, 6, 7].

La figure III.14 montre la variation du facteur d'équilibre et la fraction libre en fonction du coefficient d'attachement. On remarque que l'augmentation des concentrations des particules d'aérosols dans la chambre induit une évolution du facteur d'équilibre et une diminution de la fraction libre, on remarque aussi que la fraction libre des radionucléides

^{214}Po et ^{214}Bi est inférieure à celle des autres descendants. Ceci est dû au fait que le ^{214}Pb et ^{214}Bi ne libèrent pas d'énergie de recul suffisante pour le détachement [6,7].

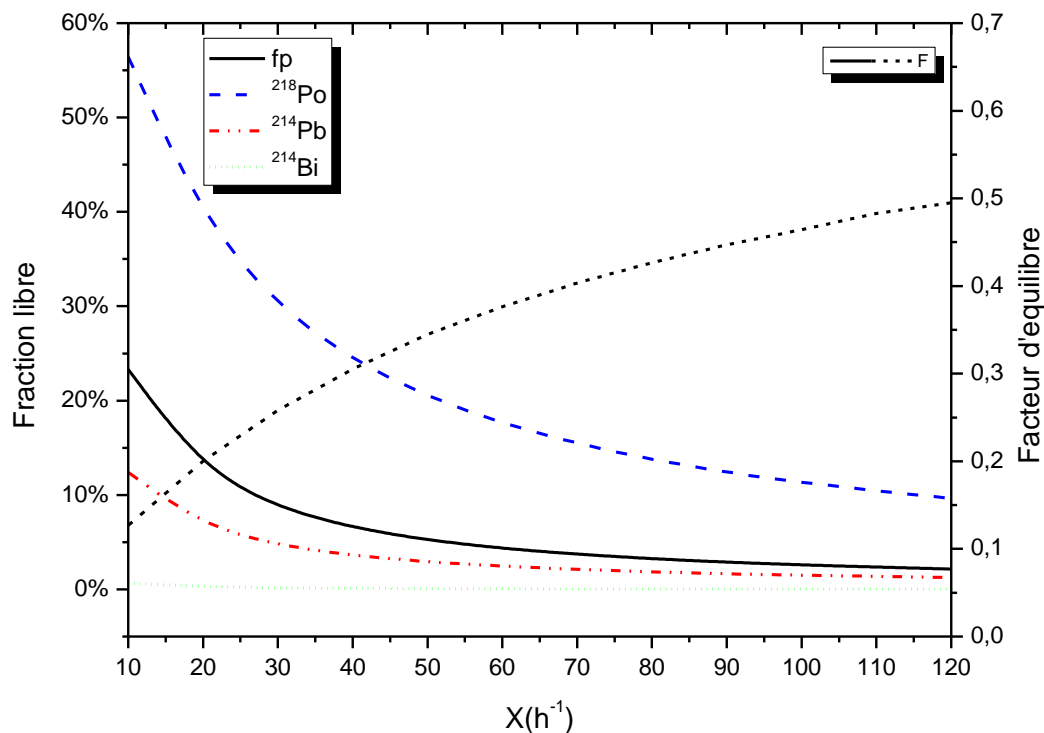


Figure III.14: Variation du facteur d'équilibre et la fraction libre en fonction de taux d'attachement X [4].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le transfert du radon (^{222}Rn) par convection dans des cavités ventilées où l'influence de ventilation et des sources de chaleur sur le confort thermique et sur la qualité de l'air intérieur a été examinée. Afin d'analyser la sensibilité des paramètres pertinents liés à la ventilation (ε_T , ε_c et I_{QAI}), nous avons considéré différentes valeurs du nombre de Rayleigh thermique (Ra), du nombre de Reynolds (Re). L'influence de la ventilation est traitée en considérant différentes configurations. Les résultats obtenus ont indiqué que les nombres Ra et Re ont des effets importants sur les distributions de, température, de concentration, la dynamique de l'écoulement et les paramètres de la

ventilation (ε_T , ε_c et I_{QAI}). Egalement, l'emplacement des bouches de ventilation influence considérablement l'efficacité de la ventilation.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons, au premier lieu, à l'influence de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur et sur le confort thermique dans une pièce ventilée et conditionnée par un flux de chaleur imposé sur l'une de ces parois verticales. Nous avons achevé ce chapitre en déterminant la dose efficace annuelle due aux descendants du radon de courte période (^{218}Po et ^{214}Po).

Références

- [1] M. Corcione, S. Grignaffini, A. Quintino, Correlations for the double-diffusive natural convection in square enclosures induced by opposite temperature and concentration gradients *Int. J. Heat Mass Transf.*, 81, 811 (2015).
- [2] M. M. Rahman, M. A. Alim, M. A. H. Mamun, M. K. Chowdhury, Numerical study of opposing mixed convection in a vented enclosure, *J. Eng. Appl. Sci.* 2, 2 (2007).
- [3] R. Rabi, L. Oufni, A theoretical investigation of the distribution of indoor radon concentrations. *Indian Journal of Physics*, 91, 471-479, (2017).
- [4] R. Rabi and L. Oufni A theoretical and experimental investigation of spatial distribution of radon in a typical ventilated room, *M_APAN-Journal of Metrology Society of India*, June, 33, 123–130, (2018)
- [5] M. Amrane, L. Oufni, M. A. Misdaq, Attached and unattached fractions of short lived radon decay products in outdoor environments: effect on the human respiratory system. *Radiat. Prot. Dosim.* 162, 400–409, (2014).
- [6] S. Spotar, N. Ibrayev, A. Uyzbayeva Non-Uniformity of the Indoor Radon Concentration under a Convective Mixing Mechanism. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* (2018).
- [7] J. E. Lee, H. C. Park, H. S. Choi, S. Y. Cho, T. Y. Jeong, A numerical study on the performance evaluation of ventilation systems for indoor radon reduction. *Korean J. Chem. Eng.*, 33(3), 782-794, (2016).

CHAPITRE IV:

**ETUDE NUMERIQUE DE L'EFFET DE LA
VENTILATION SUR LA QUALITE DE L'AIR
INTERIEUR ET DU CONFORT THERMIQUE**

Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions les transferts de chaleur et de masse à l'intérieur des pièces en utilisant le code Fluent 6,1. La première partie du chapitre concerne l'étude de l'influence de la ventilation sur la qualité de l'air intérieur dans des pièces ouvertes remplies d'un mélange binaire air- ^{222}Rn en régime turbulent et permanent. Les résultats des simulations seront validés par les données expérimentales. Ensuite, nous analysons l'influence des paramètres adimensionnels pertinents comme les nombres de Reynolds (Re) et du nombre de Rayleigh (Ra) sur le confort et le comportement du radon dans quatre configurations distinctes. Enfin, Nous effectuons des comparaisons avec des données de la solution analytiques. La deuxième partie porte sur l'étude de l'influence de la ventilation et le coefficient d'attachement X sur le comportement des descendants du radon ainsi que leur facteur d'équilibre. Ensuite, nous déterminons aussi l'équivalent de dose annuelle engagée dans les tissus du système respiratoire suite à l'inhalation des produits de filiation de courte période du radon. Il convient de noter que l'approximation de Boussinesq est admise dans tous les cas traités ici.

IV.1 Code Fluent

Fluent est un code qui permet de modéliser et de simuler numériquement les écoulements thermo-fluides incompressibles ou non, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert de chaleur (conduction, convection, diffusion et rayonnement) et le transfert de masse. Son domaine d'application est très large. Ainsi, il peut mettre en œuvre les écoulements de fluides dans l'environnement du bâtiment en fonction de différentes contraintes d'ordre structurelle, mécanique et thermique. Il est conçu pour traiter des géométries aussi simples que complexes bi- et tridimensionnelle (2D et 3D). Il est basé sur la résolution des équations de conservation décrites dans le chapitre II en utilisant la méthode des volumes finis. Il dispose de plusieurs schémas de discrétisation tels que le schéma amont de premier ordre [1], le schéma QUICK [2] (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) et le schéma WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) [3].

Le principe de fonctionnement du code Fluent repose sur trois modules essentiels à savoir le postpreprocessor (création des données d'entrée), le solver (exécution des calculs et analyses) et le postprocessor (affichage). La figure IV.1 présente le lien existant entre ces trois modules.

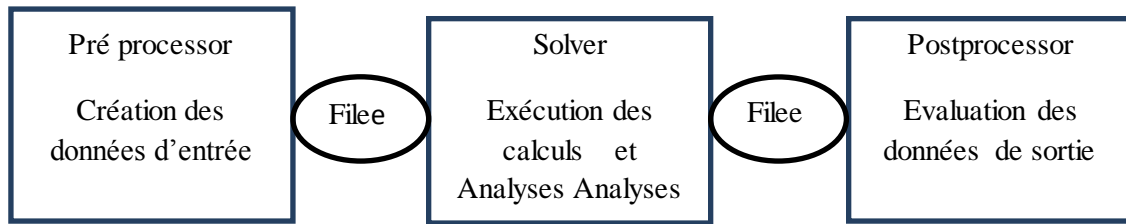


Figure IV.1: Modules de fonctionnement du code Fluent.

La figure IV.2 illustre l'organigramme de résolution d'un écoulement.

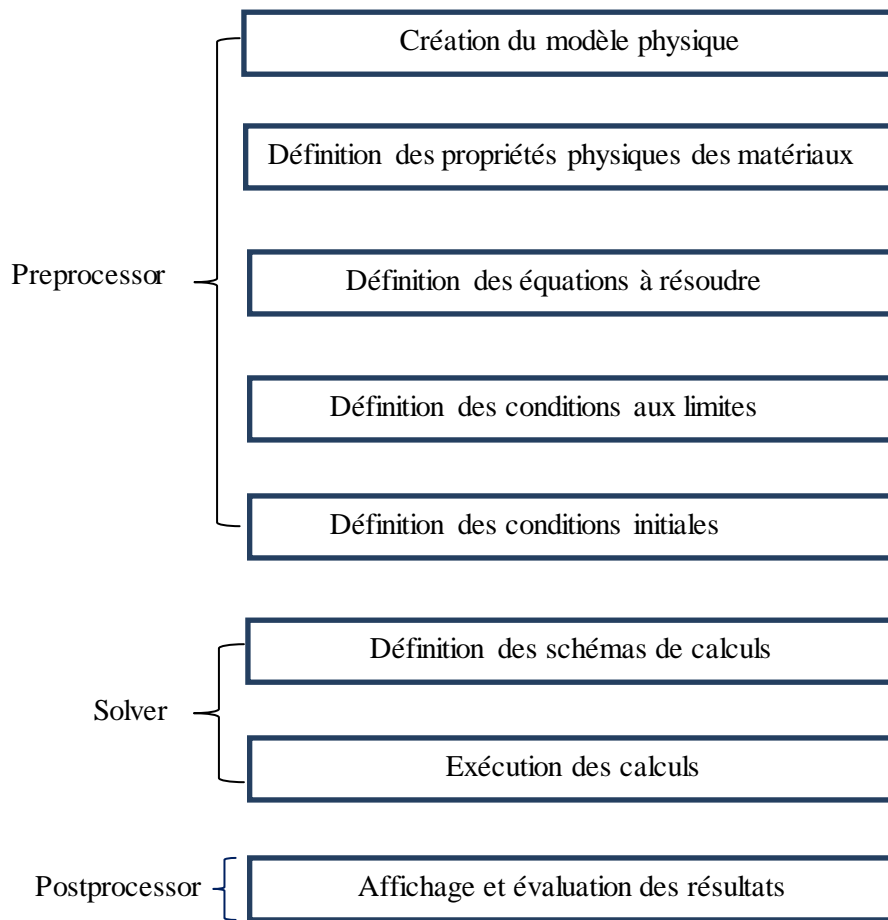


Figure IV.2: Organigramme de calcul.

IV.2 Modèle physique et conditions aux limites

Nous considérons une chambre ventilée de dimensions (4m×3m×3m), remplie d'un mélange air-²²²Rn. La paroi verticale droite à une épaisseur de 1 cm, un flux de chaleur est imposé sur sa surface extérieure. Les autres parois sont adiabatiques et imperméables. L'entrée d'air est située en bas de la paroi verticale droite, tandis que la sortie est placée selon la configuration étudiée. En effet, différentes configurations ont été analysées en fonction de

l'emplacement de la grille de sortie d'air (Figure IV.3). A signaler que l'emplacement de la grille de sortie et sa distance de la grille d'entrée sont des paramètres importants pour la répartition des champs thermiques et du radon.

L'air pénètre dans la chambre à une température de 24° C et à une concentration nulle en ^{222}Rn via une ouverture ($h_e=20$ cm). Afin d'étudier l'influence des paramètres caractérisant l'écoulement sur la qualité de l'air et sur le confort thermique, nous avons fait varier le flux de chaleur entre 15 W.m^{-2} et 75 W.m^{-2} et la vitesse d'entrée d'air entre $0,0365 \text{ m.s}^{-1}$ et 3 m.s^{-1} . Ces valeurs de flux et de la vitesse donnent un nombre de Ra compris entre $9,33 \cdot 10^8$ et $4,66 \cdot 10^9$ et un nombre de Re compris entre 500 et 40000. Les murs, le sol et le plafond ont été pris comme source du radon. Par conséquent, une expérience a été réalisée pour mesurer le taux d'exhalation du radon à partir des matériaux de construction de la chambre en utilisant les Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN) (voir chapitre II). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.1:

Echantillons	$D_T^{\text{CR}} \times 10^3$ (tr. cm $^{-2}$.s $^{-1}$)	$D_T^{\text{LR}} \times 10^3$ (tr. cm $^{-2}$.s $^{-1}$)	$A_c(^{226}\text{Ra})$ (Bq. kg $^{-1}$)	$A_c(^{222}\text{Rn})$ (Bq. m $^{-3}$)	E (mBq. m $^{-2}$.h $^{-1}$)
Plâtre (plafond)	1,06±0,21	0,32±0,05	1,37±0,21	150,60±23,05	139,67±21,79
Béton (mur)	1,98±0,20	0,61±0,06	2,55±0,26	280,20±28,70	259,86±26,61
Marbre (sol)	1,37±0,21	0,42±0,06	1,77±0,27	194,30±30,10	180,20±27,91

Tableau IV.1: Activités volumiques ainsi que le taux d'exhalation du radon dans les échantillons des matériaux de construction [4].

Il convient de noter que, dans ce cas, les nombres de Rayleigh thermique (Ra), le nombre Reynolds (Re) et le taux de ventilation (λ_v) sont donnés, respectivement, par les relations:

$$\text{Ra} = \frac{\rho_0 g \beta_T q H^4}{\lambda_0 \mu_0 \alpha_0} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_0 u_{in} H_{in}}{\mu_0} \quad (\text{IV.2})$$

$$\lambda_v = \frac{u_{in} S_e}{V} \quad (\text{IV.3})$$

avec u_{in} , H_{in} et q désignant respectivement la vitesse de l'air frais, la hauteur de ouverture située en bas de la paroi verticale droite (Figure IV.3) et le flux de chaleur. L'énergie

cinétique turbulente K_{in} et le taux de dissipation visqueuse ε_{in} à l'entrée d'air sont définies respectivement par:

$$K_{in} = 1,5(0,04 u_{in})^{2,0} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{in} = (k_{in})^{0,5} / (0,1H_{in})$$

La figure IV.3 illustre les quatre chambres et les conditions aux limites correspondantes.

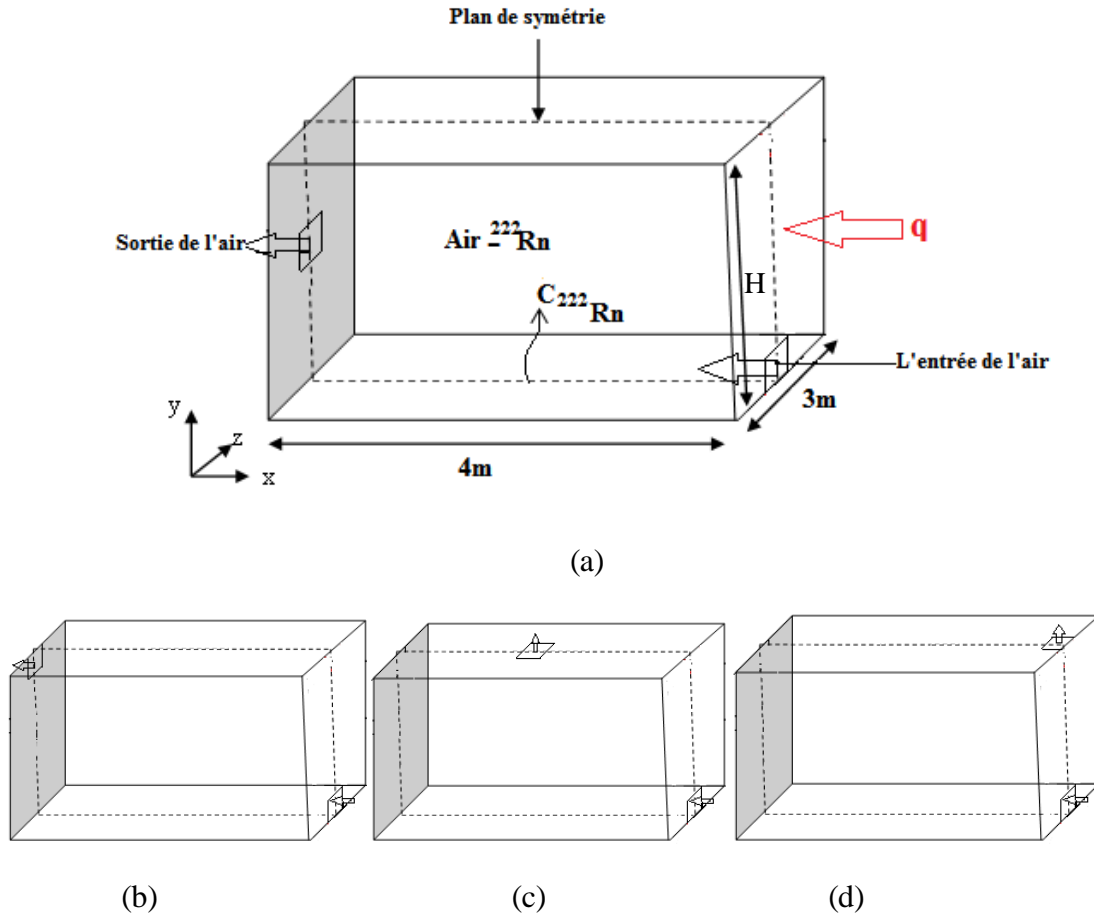


Figure IV.3: Configurations et conditions aux limites considérées: (a) configuration 1, (b) configuration 2, (c) configuration 3, (d) configuration 4.

Le tableau IV.2 ci-dessous présente les propriétés physiques du mélange air-²²²Rn calculées à la température de référence $T_0=297$ K.

Air - ²²² Rn à $T_0=297$ K								
ρ_0 (Kg m^{-3})	C_{p0} ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-3}$)	λ_0 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	μ_0 ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	β_T (K^{-1})	β_s	Pr	Sc	Le
1,226	1004,94	0,0254	$1,781 \cdot 10^{-5}$	0,00347	-0,342	0,71	1,04	1,47

Tableau IV.2: Propriétés physiques du mélange air -²²²Rn à $T_0=297$ K.

avec ρ_0 , T_0 , C_{p0} , λ_0 , μ_0 , β_T et β_s désignent les paramètres physiques de référence du fluide air_222Rn.

IV.3 Schémas numériques et méthode de résolution

Les équations de conservation décrites dans le chapitre II ont été discrétisés par la méthode des volumes finis. Le maillage employé est quadratique structuré (Figure IV.4). Les termes d'advection sont discrétisés en utilisant le schéma QUICK. Les termes de diffusion sont traités à l'aide du schéma centré d'ordre 2 (second-order central difference scheme). L'algorithme SIMPLER a été utilisé pour le couplage pression-vitesse. Le système d'équations algébriques a été résolu à l'aide de la méthode itérative MICCG.

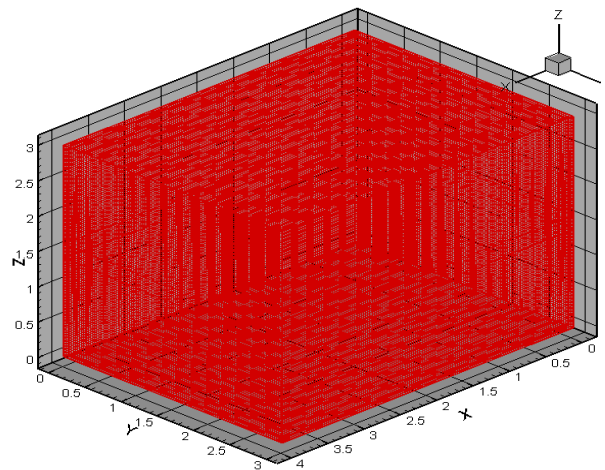


Figure IV.4: Grille de maillage [5].

IV.4 Sensibilité du maillage

La sensibilité des résultats par rapport au maillage a été vérifiée pour $Ra=2,79.10^9$, $Re=40000$ pour les quatre configurations. Nous avons considéré quatre grilles de maillage ($50 \times 50 \times 50$, $60 \times 60 \times 60$, $70 \times 70 \times 70$, $80 \times 80 \times 80$). Les figures IV.5, IV.6 et IV.7 montrent les profils de température, de concentration et de vitesse tracés à $Z=1,5$ et à $X=1,5$. Ces profils concernent la configuration 2 (Figure IV.3). On remarque que les grilles $70 \times 70 \times 70$ et $80 \times 80 \times 80$ donnent des résultats similaires, les profils sont quasiment confondus. Le tableau IV.3 montre les valeurs moyennes de la température, la concentration et le champ de vitesse pour chaque grille, nous avons observé que la différence maximale entre les grilles $70 \times 70 \times 70$ et $80 \times 80 \times 80$ est inférieure à 1%. En ce qui concerne les autres configurations, nous avons

abouti au même constat. A l'issue de ces résultats, nous avons retenu la grille de maillage $80 \times 80 \times 80$ pour l'ensemble des calculs.

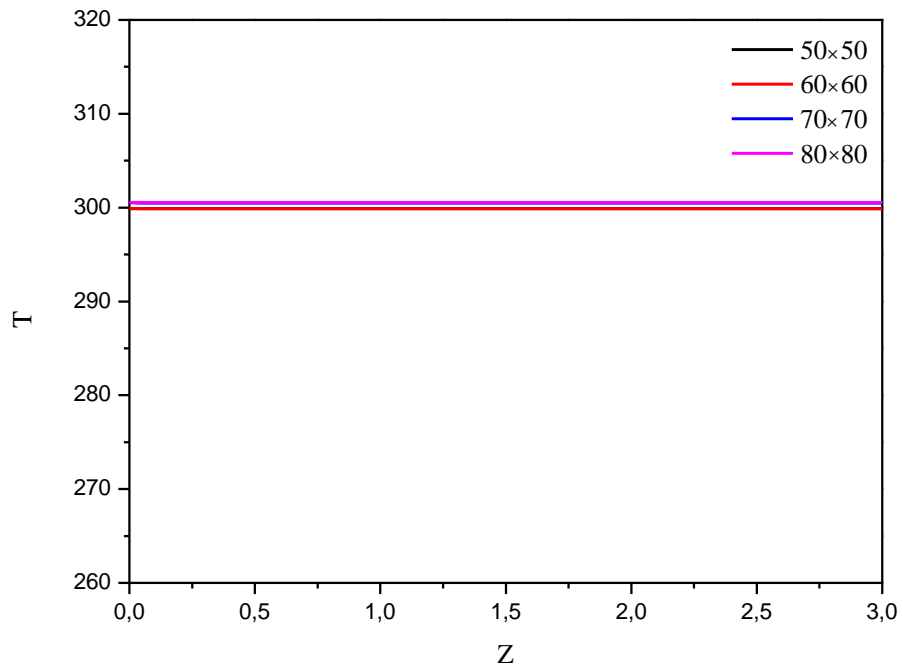


Figure IV.5: Profils de température T; Configuration 2 [5].

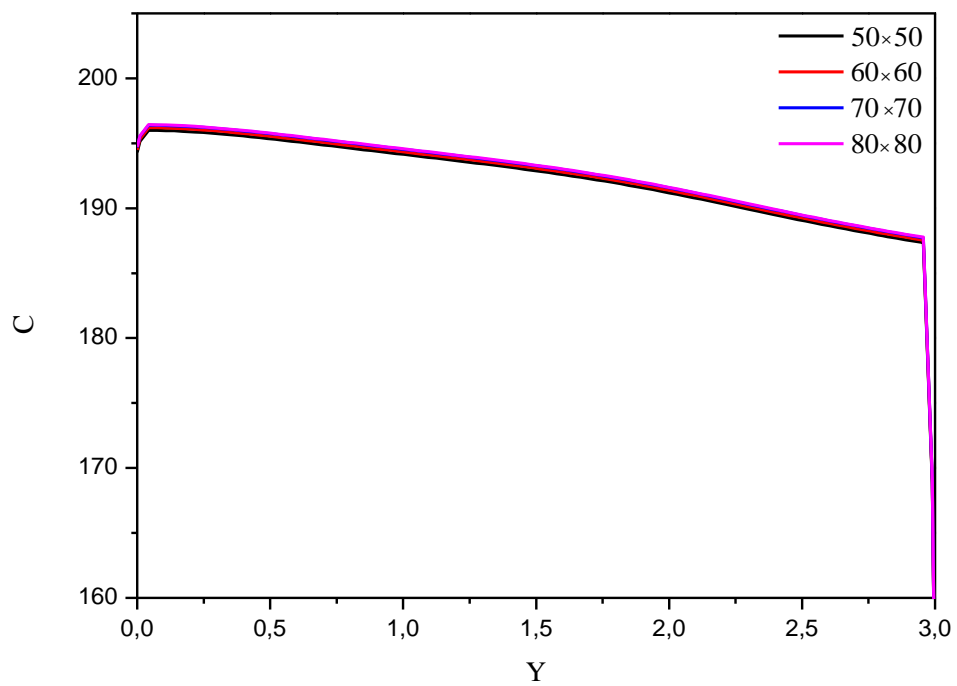


Figure IV.6: Profils de concentration C; Configuration 2 [5].

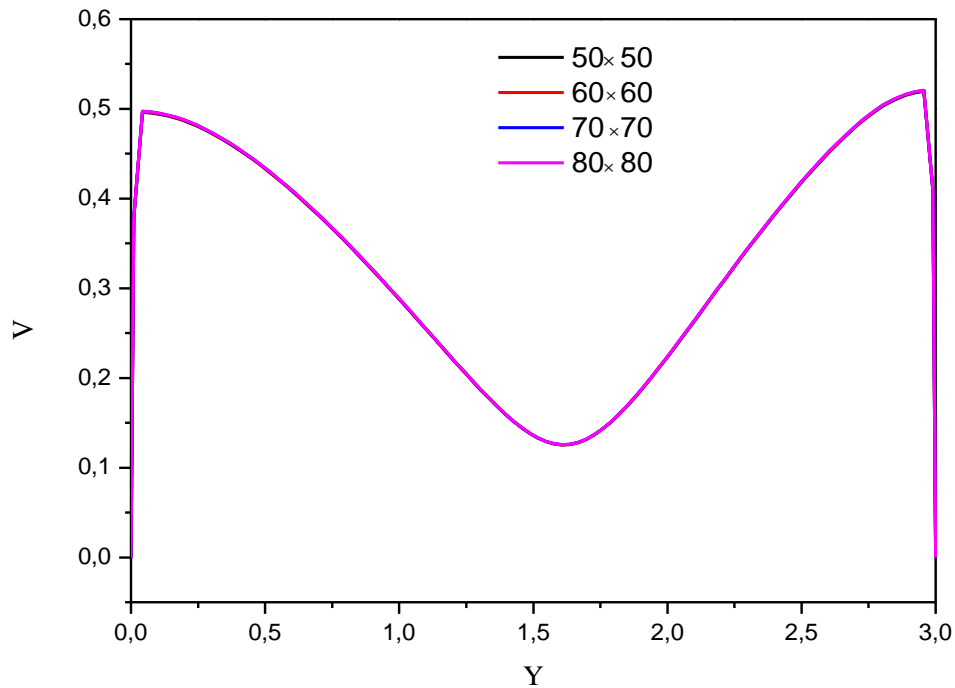


Figure IV.7: Profils de champs de vitesses; Configuration 2 [5].

Maillage	50×50×50	60×60×60	70×70×70	80×80×80
\bar{T}	300,73	300,67	300,37	300,07
\bar{C}	192,75	192,71	192,52	192,33
\bar{V}	0,35	0,35	0,35	0,35

Tableau IV.3: Valeurs moyennes de la température, la concentration et la vitesse [5].

IV.5 Convergence des calculs

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables; vitesse, température... du problème entre la présente itération et l'itération précédente.

Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans FLUENT (residual) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent 10^{-3} . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à 10^{-4} voir 10^{-6} . La figure IV.8 montre l'évolution des résidus de calcul en fonction des itérations. Nous remarquons que les résidus diminuent de façon régulière exceptée sur une petite période (entre 200 et 600 itérations). Notre calcul converge donc bien. Nous nous sommes arrêtés aux environ de 1500 itérations.

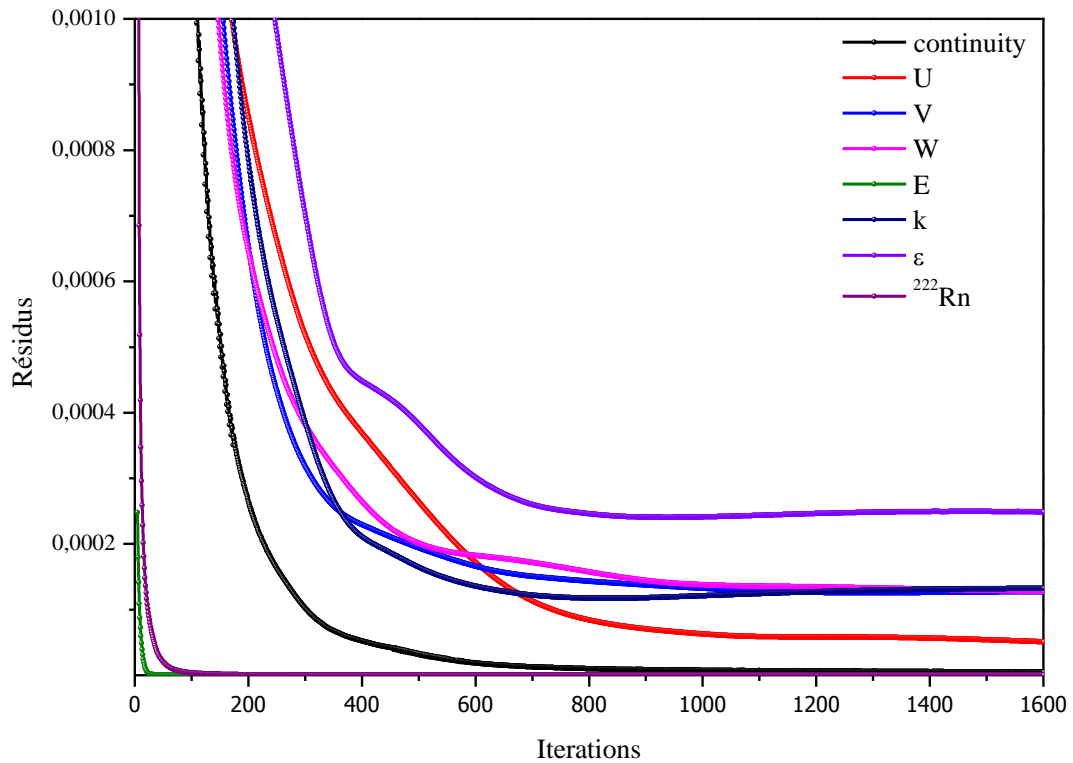


Figure IV.8: Allures de l'évolution des résidus de calcul [5].

Le tableau IV.4 présente les valeurs de rapport du débit massique entre l'entrée et la sortie des configurations étudiées. Nous observons que le rapport du débit massique entre l'entrée et la sortie est négligeable, démontrant ainsi la convergence des résultats.

Re	Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3	Configuration 4
	$Q_{int}-Q_{out}$	$Q_{int}-Q_{out}$	$Q_{int}-Q_{out}$	$Q_{int}-Q_{out}$
500	$-4,33 \cdot 10^{-19}$	$2,16 \cdot 10^{-19}$	$-6,50 \cdot 10^{-19}$	0
1000	$1,73 \cdot 10^{-18}$	$2,34 \cdot 10^{-18}$	0	$-8,67 \cdot 10^{-19}$
2000	$2,60 \cdot 10^{-18}$	$8,67 \cdot 10^{-19}$	$1,73 \cdot 10^{-18}$	$-1,73 \cdot 10^{-18}$
5000	$6,93 \cdot 10^{-18}$	$-1,04 \cdot 10^{-17}$	0	$-3,46 \cdot 10^{-18}$
7000	$-3,46 \cdot 10^{-18}$	0	$-3,46 \cdot 10^{-18}$	$1,04 \cdot 10^{-17}$
10000	$-1,38 \cdot 10^{-17}$	$6,93 \cdot 10^{-18}$	$-1,38 \cdot 10^{-17}$	0
30000	$-4,16 \cdot 10^{-17}$	$-1,38 \cdot 10^{-17}$	$1,38 \cdot 10^{-17}$	$-1,38 \cdot 10^{-17}$
40000	0	$-2,77 \cdot 10^{-17}$	0	$-3,46 \cdot 10^{-18}$

Tableau IV.4: Rapport du débit massique entre l'entrée et la sortie.

IV.6 Validation numérique du modèle

Afin de valider notre modèle, nous avons effectué des comparaisons entre les résultats obtenus à l'aide du code fluent avec ceux présentés par Zhuo et al. [6]. Le tableau IV.5 montre la concentration moyenne du radon comparée avec celles obtenues par Zhuo et al. [6]. Ces comparaisons montrent une bonne concordance entre les résultats obtenus par Fluent et ceux présentés par Zhuo et al. [6].

Paramètre	Exhalation ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Vitesse (m.s^{-1})	Diffusion (m.s^{-1})	La concentration moyenne du radon (Bq.m^{-2})		
				W. Zhuo et al. [6]	Analytique	Présent travail
$^{222}\text{Rn-1w}$	0,01	-0,12	$5,00.10^{-3}$	19,00	18,50	18,00
$^{222}\text{Rn-6w}$	0,01	-0,12	$5,00.10^{-3}$	97,80	115,20	105,00

Tableau IV.5: Comparaison des résultats avec ceux des références [6].

IV.7 Résultats

L'analyse des quatre configurations illustrées sur la figure IV.3 permet d'étudier l'influence des paramètres importants gouvernant l'écoulement et le positionnement de la grille de sortie d'air. En effet, pour chacune des configurations, nous avons étudié l'influence du nombre Re et du nombre Ra sur la qualité de l'air et sur le confort thermique à l'intérieur.

IV.7.1 Influence des nombres de Ra et de Re

L'influence du nombre Ra sur la qualité de l'air et le confort thermique a été étudiée pour les quatre configurations. Le nombre Ra est calculé à base du flux de chaleur imposé au niveau de la paroi verticale gauche. Nous avons considéré cinq flux de chaleur ($q=15, 30, 45, 60$ et 75 W.m^{-2}) qui donnent lieu à des nombres de $Ra= 9,33.10^8, 1,86.10^9, 2,79.10^9, 3,73.10^9$ et $4,66.10^9$.

Nous présentons ici les isothermes, les iso-concentrations, les champs de vitesses et les paramètres de la ventilation (efficacité de la ventilation à éliminer le polluant (^{222}Rn) (ϵ_C), efficacité de la ventilation à éliminer de la chaleur (ϵ_T) et indice de qualité de l'air intérieur (I_{QAI})). Ces résultats sont illustrés pour des valeurs de Re allant de 500 à 40000 et le nombre de Ra variant entre $9,33.10^8$ et $4,66.10^9$.

IV.7.2 Isothermes, iso-concentrations et champs de vitesses

Les figures IV.9 à IV.12 montrent les isothermes pour le cas des nombres de $Ra= 9,33.10^8$, $1,86.10^9$, $2,79.10^9$ et $4,66.10^9$ et le nombre de Re varie entre 500 et 40000. Nous remarquons que, pour toutes les configurations, plus le flux de chaleur \dot{q} augmente plus la température de la pièce augmente. Les températures maximales se situent au voisinage de la paroi verticale gauche. Tandis que les basses températures se trouvent à l'entrée d'air et à la moitié droite de la pièce. Ceci explique le rafraichissement de la pièce à ces endroits. Egalement, Nous trouvons que plus le nombre de Re augmente plus la pièce est rafraichi au voisinage des parois horizontale inférieure et verticale droite. Ceci est dû à l'augmentation du débit de ventilation qui permet de diluer l'air intérieur. Alors qu'au niveau de la paroi gauche, les températures sont maximales et se rapprochent de la condition au limite imposée en termes de flux de chaleur. Au voisinage de la paroi horizontale supérieure, les températures diminuent progressivement avec l'augmentation de Re . Les isothermes ont tendance à se resserrer au niveau de la paroi verticale gauche.

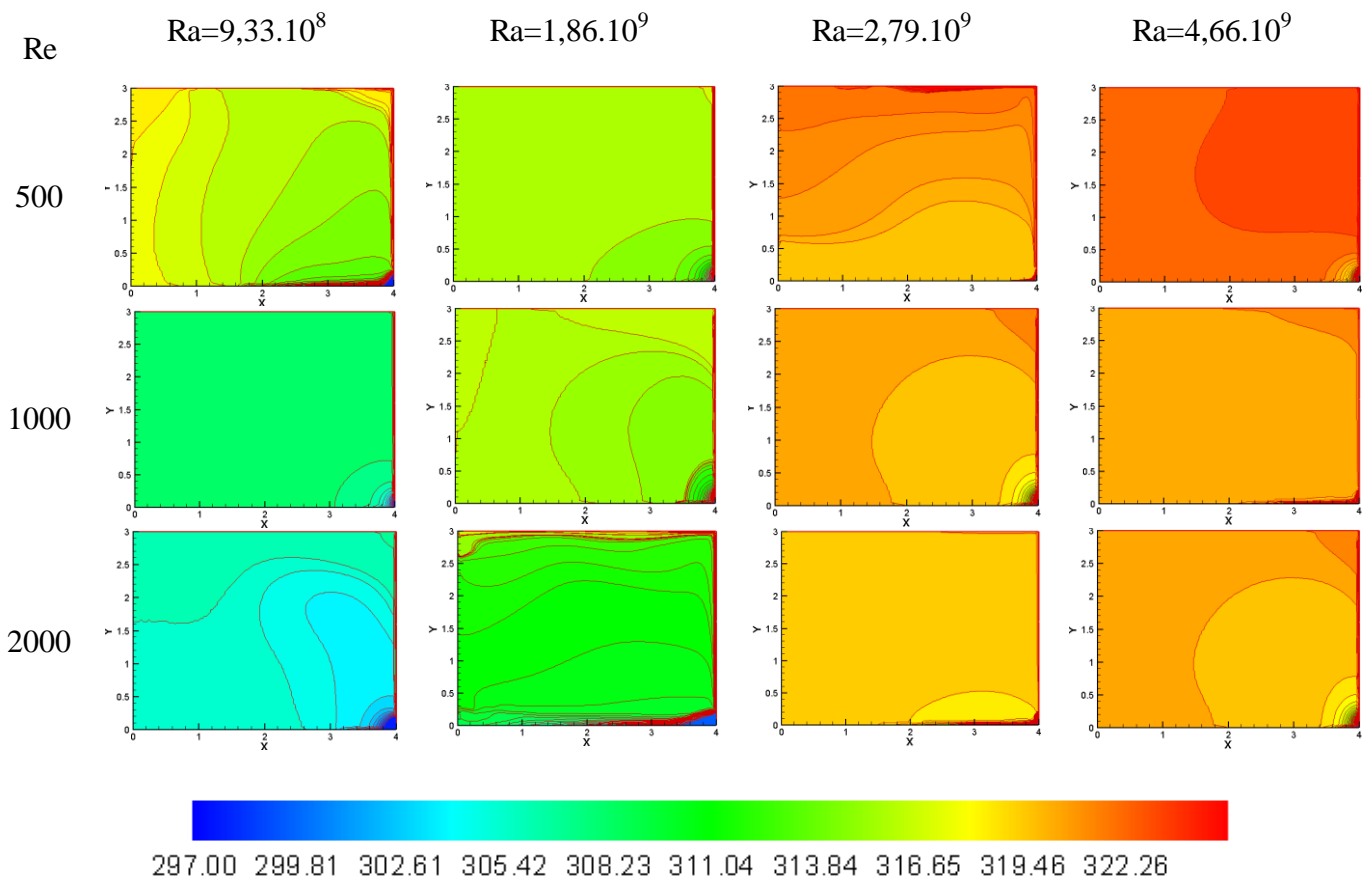


Figure IV. 9: Isothermes (K), pour la configuration 1 [5].

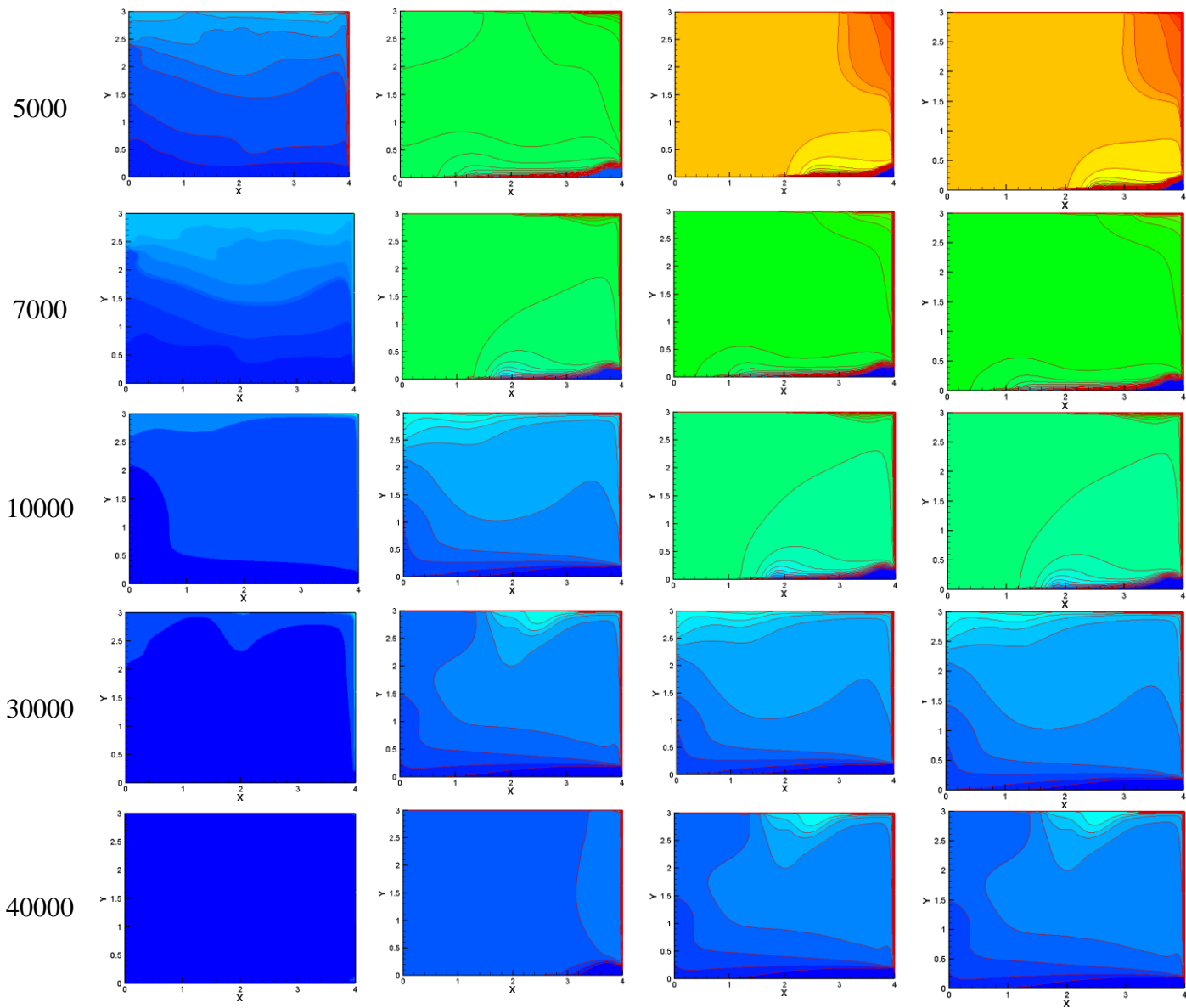


Figure IV. 9: Continue

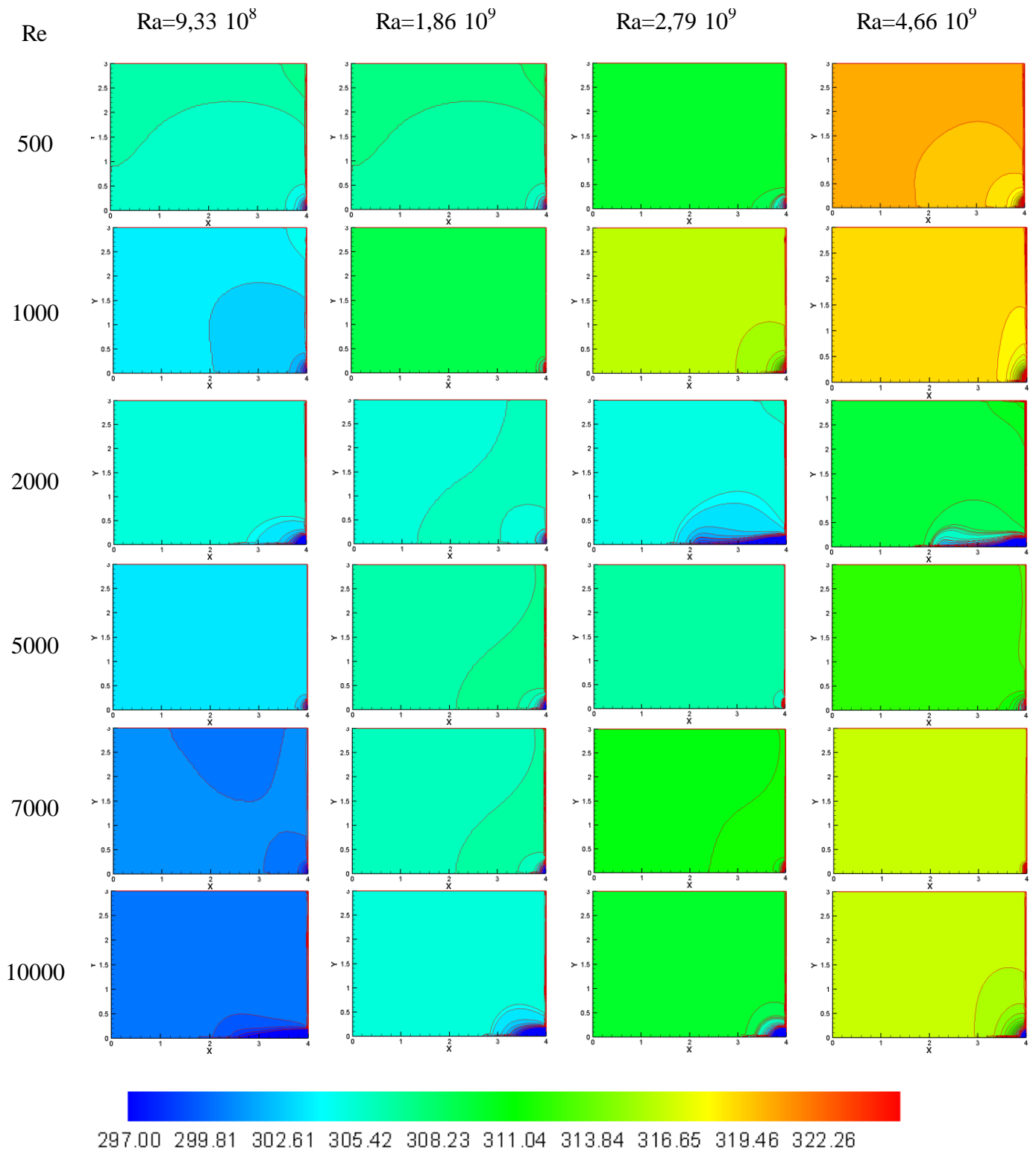


Figure IV.10: Isothermes (K), pour la configuration 2 [5].

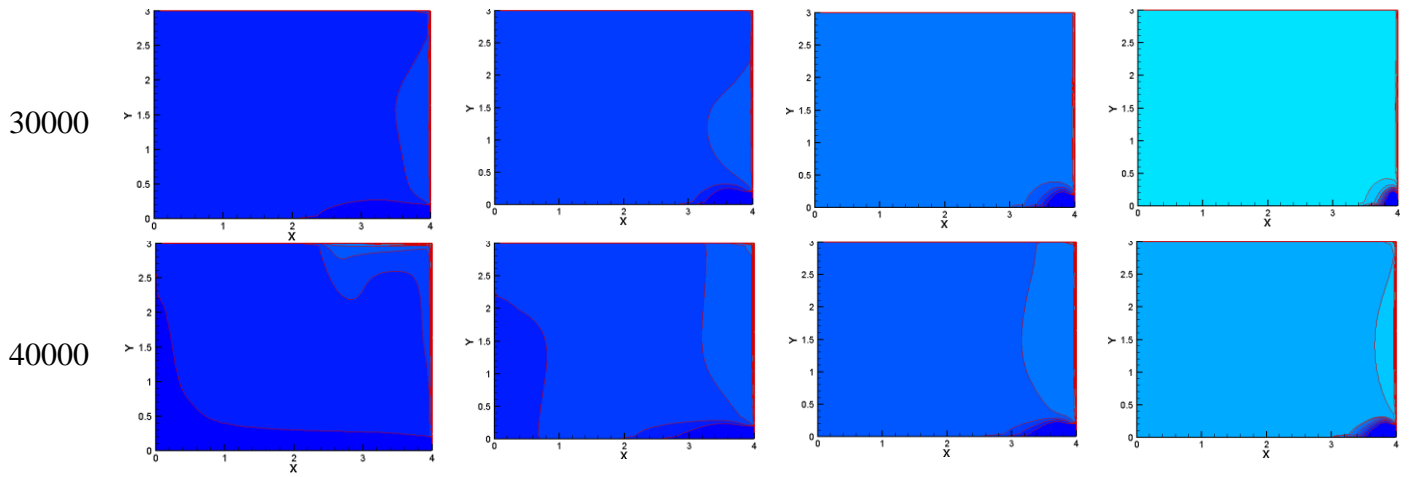


Figure IV.10: Continue

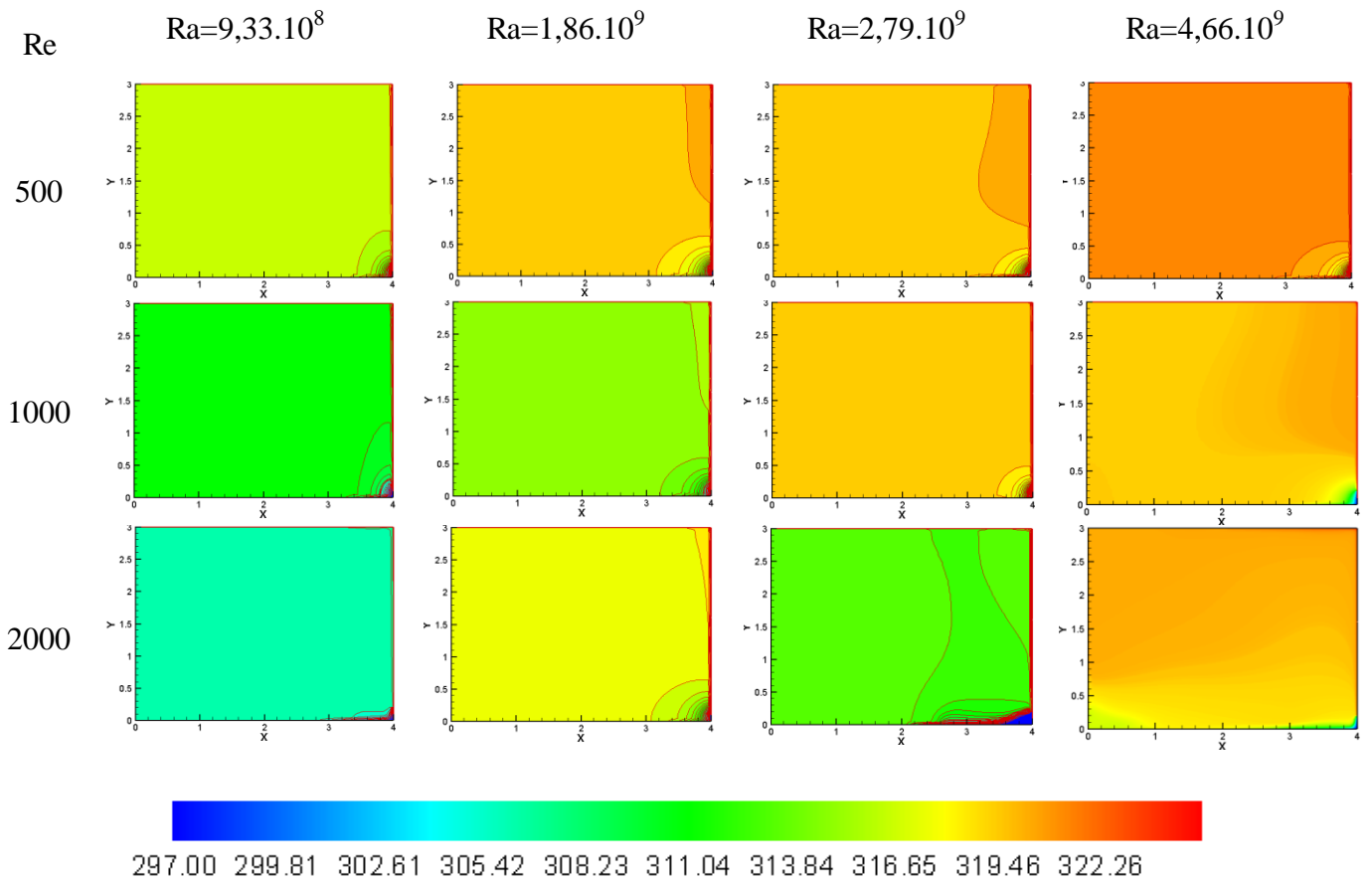


Figure IV.11: Isothermes (K), pour la configuration 3 [5].

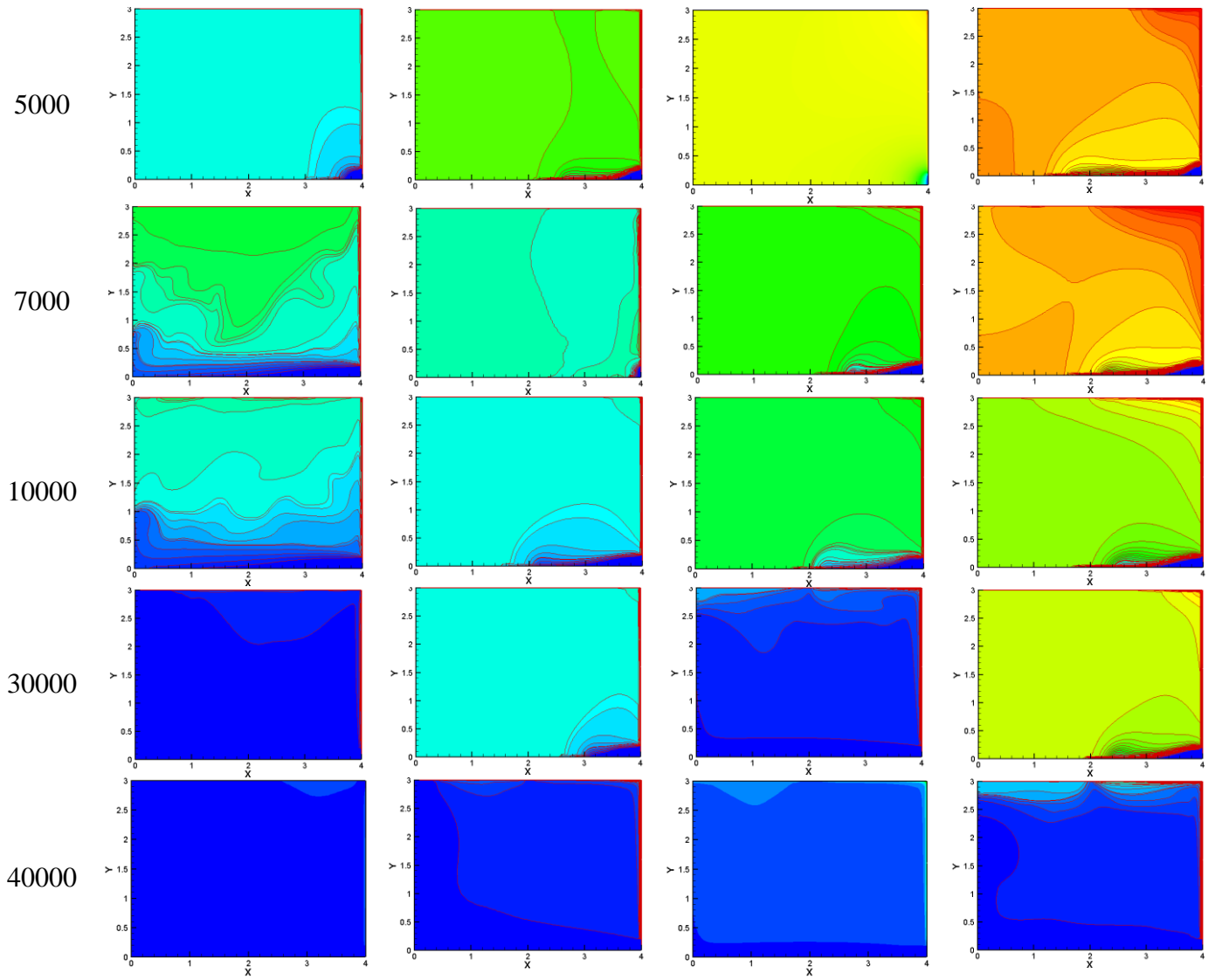


Figure IV.11: Continue

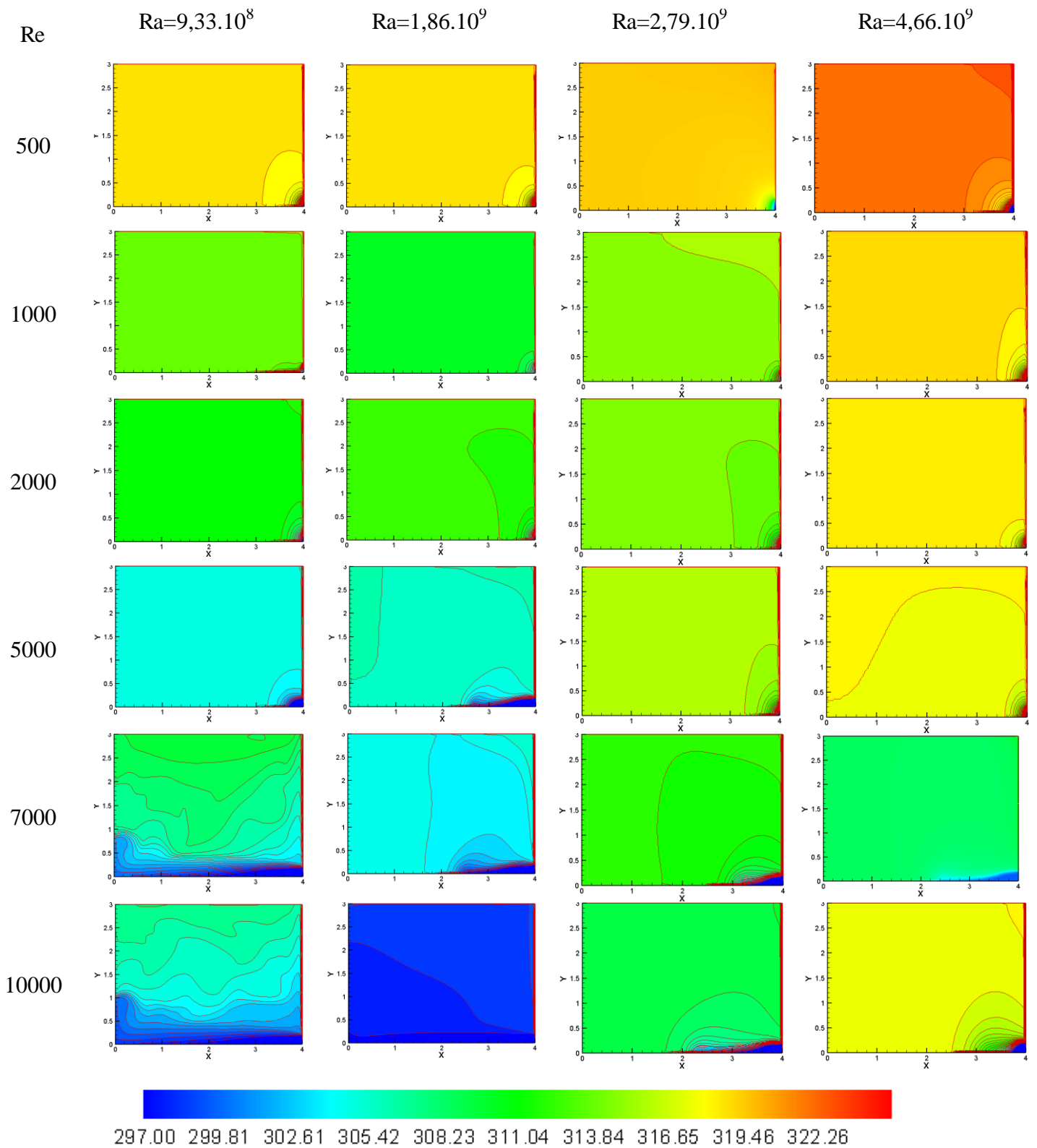


Figure IV.12: Isothermes (K), pour la configuration 4 [5].

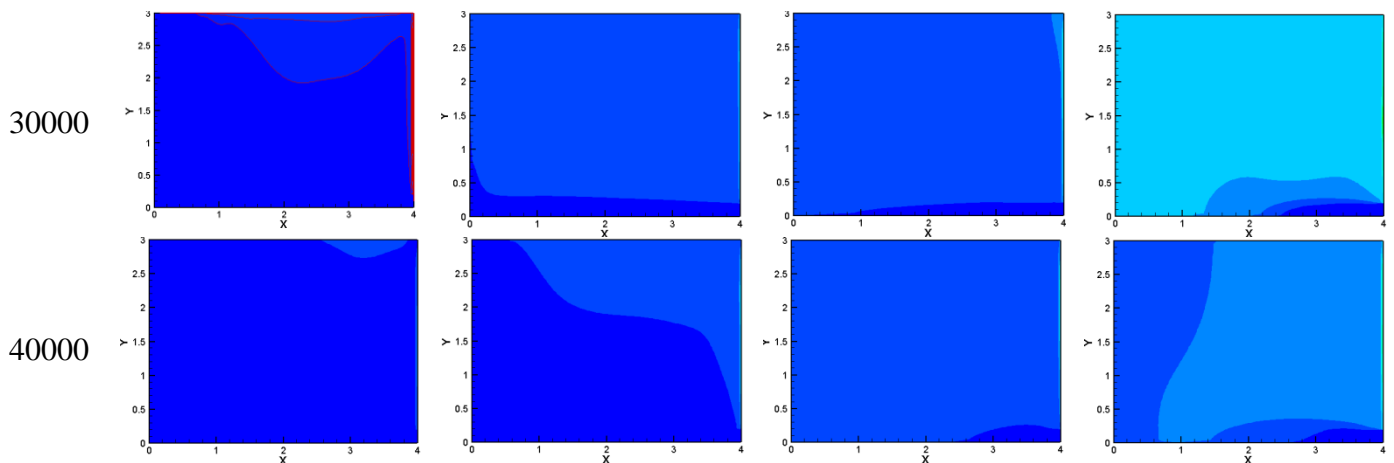


Figure IV.12: Continue

Les figures IV.13 à IV.16 illustrent les iso-concentrations pour le cas des nombres de $Ra=9,33.10^8$, $1,86.10^9$, $2,79.10^9$ et $4,66.10^9$ et de $Re=500, 1000, 2000, 5000, 7000, 10000, 3000$ et 40000 . Nous remarquons que plus le nombre de Ra augmente plus la diffusion du ^{222}Rn est importante. En effet, pour $Ra=9,33.10^8$, les concentrations du ^{222}Rn sont élevées au voisinage de la paroi gauche ($\geq 230 \text{ Bq.m}^{-3}$). Alors qu'elles sont de l'ordre de 200 Bq.m^{-3} au milieu de la pièce et très faibles au voisinage de la paroi verticale droite et de la paroi horizontale inférieure (140 Bq.m^{-3}). Pour $Ra=5,72.10^9$, le ^{222}Rn est beaucoup plus diffusé, sa concentration au milieu de la chambre est de l'ordre de 230 Bq.m^{-3} . Cela est dû à l'intensification de l'écoulement en fonction du nombre Ra qui entraîne le transport du ^{222}Rn .

En fonction du nombre de Re , nous remarquons que plus celui-ci augmente plus la pièce est diluée. En effet, l'augmentation du débit de ventilation favorise le transport et l'évacuation du ^{222}Rn [5].

En fonction de l'emplacement de la grille de sortie, nous observons que plus celle-ci est proche de la paroi verticale gauche plus la pièce est mieux balayée, autrement dit, plus le ^{222}Rn est évacué [5].

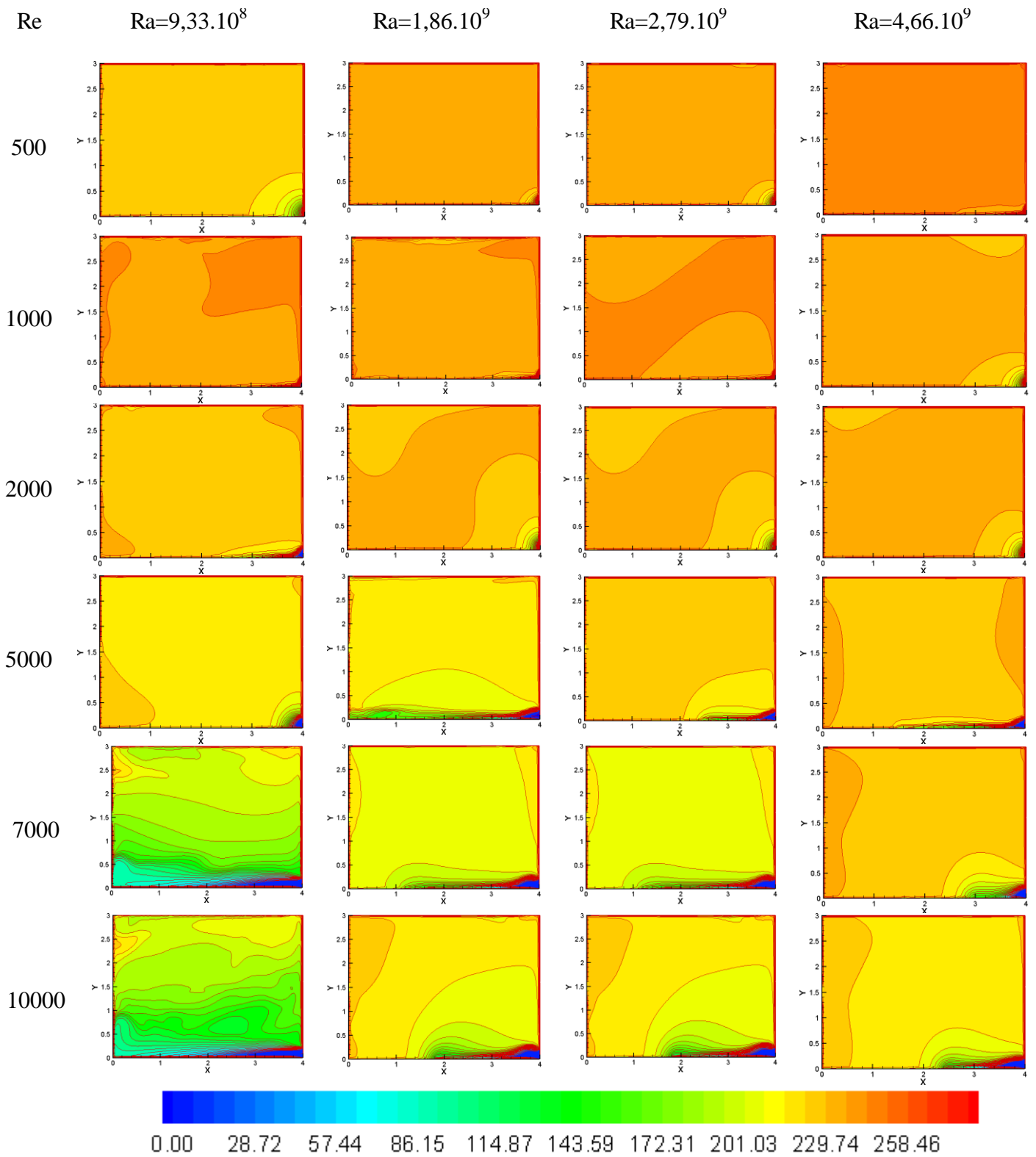


Figure IV.13: Iso-concentrations ($Bq.m^{-3}$), pour la configuration 1 [5].

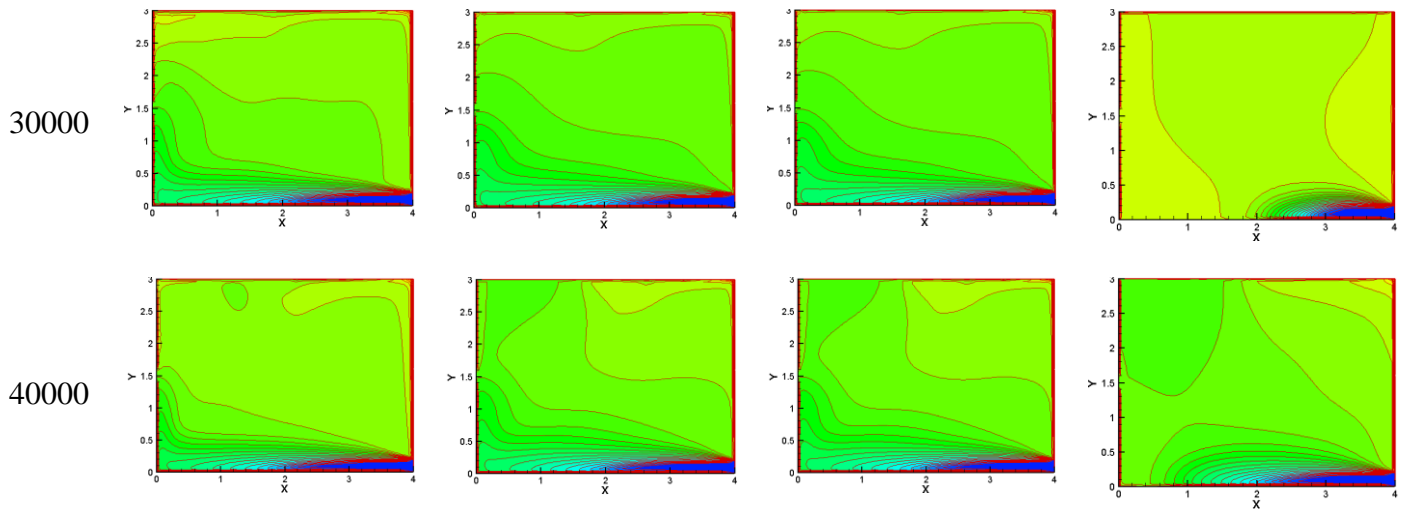
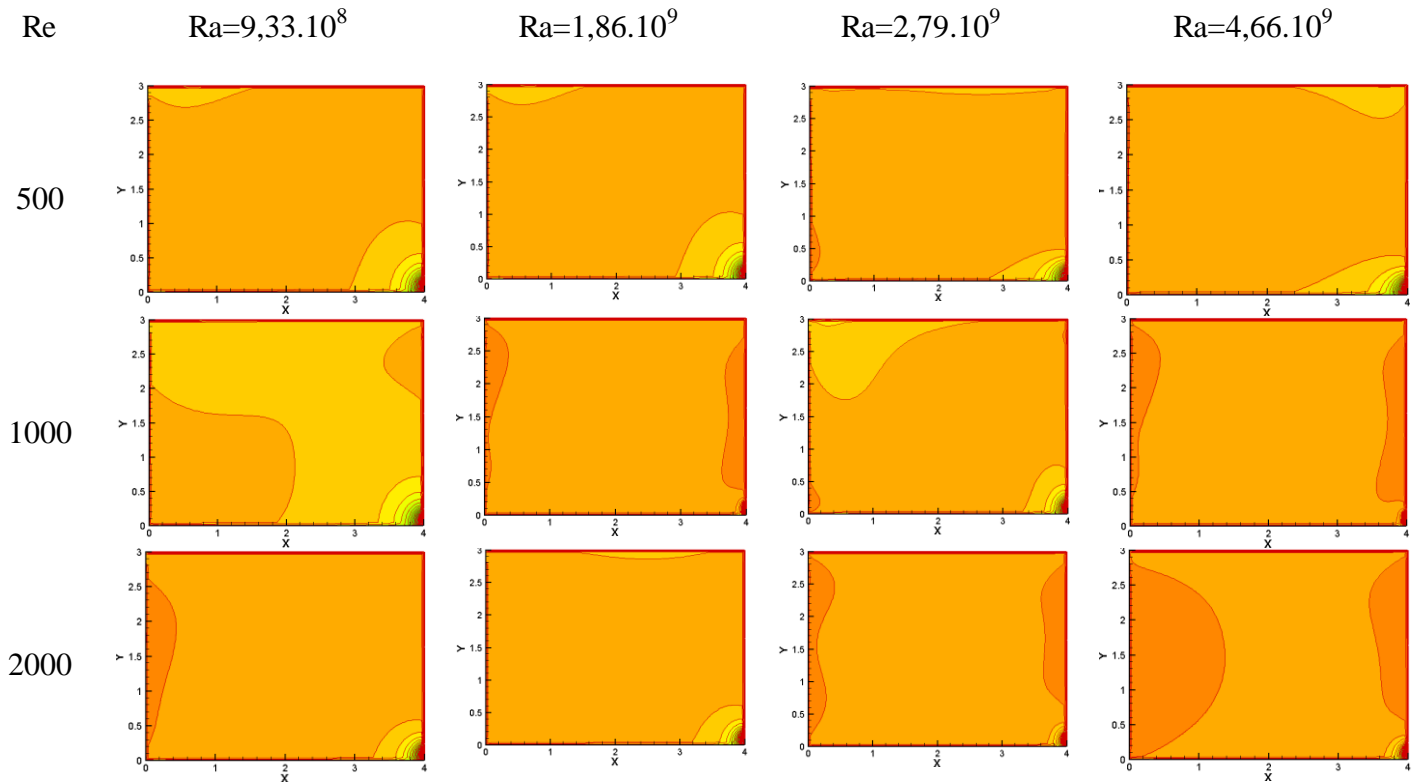


Figure IV.13: Continue



0.00 28.72 57.44 86.15 114.87 143.59 172.31 201.03 229.74 258.46

Figure IV.14: Iso-concentrations (Bq.m^{-3}), pour la configuration 2 [5].

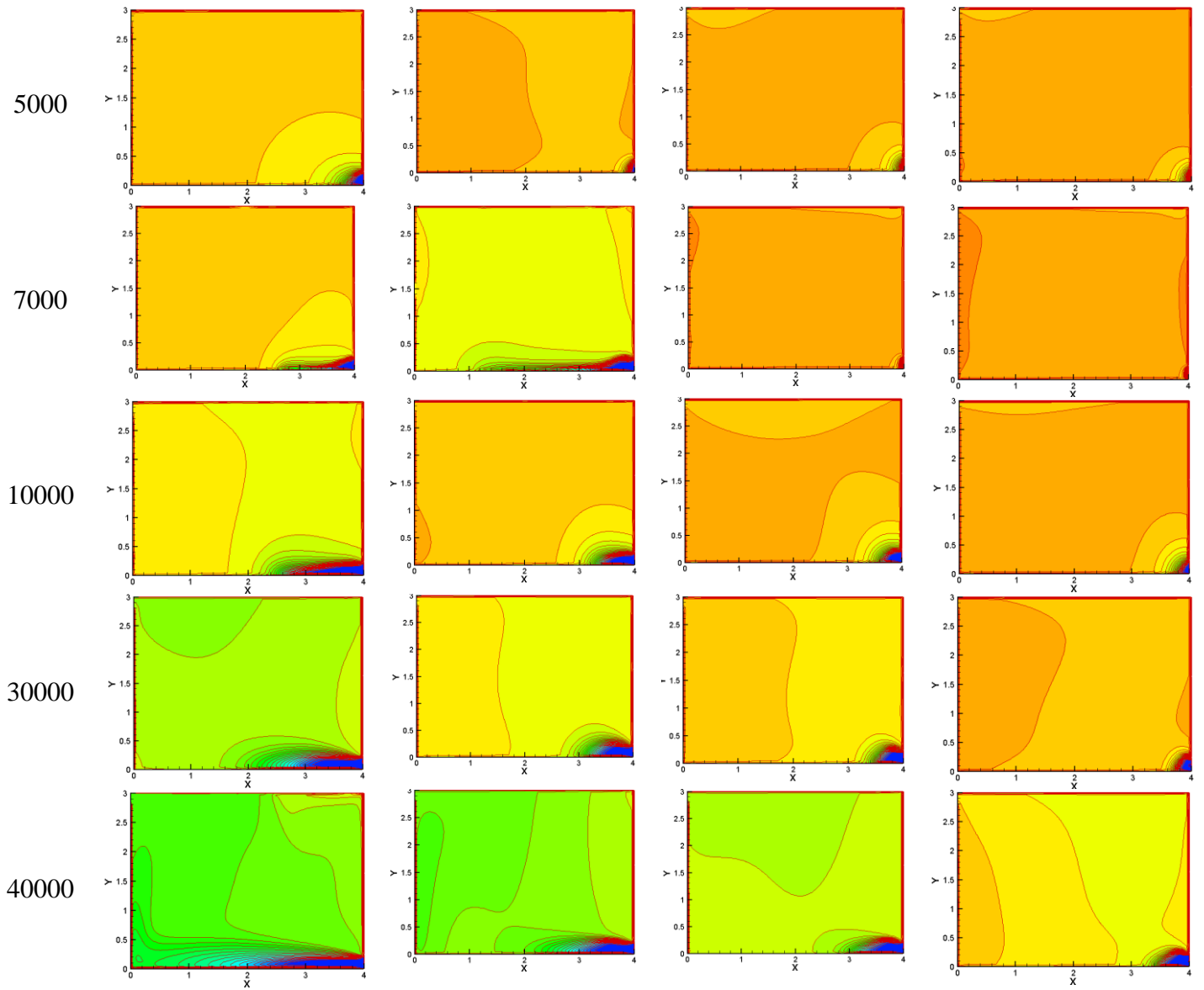


Figure IV.14: Continue

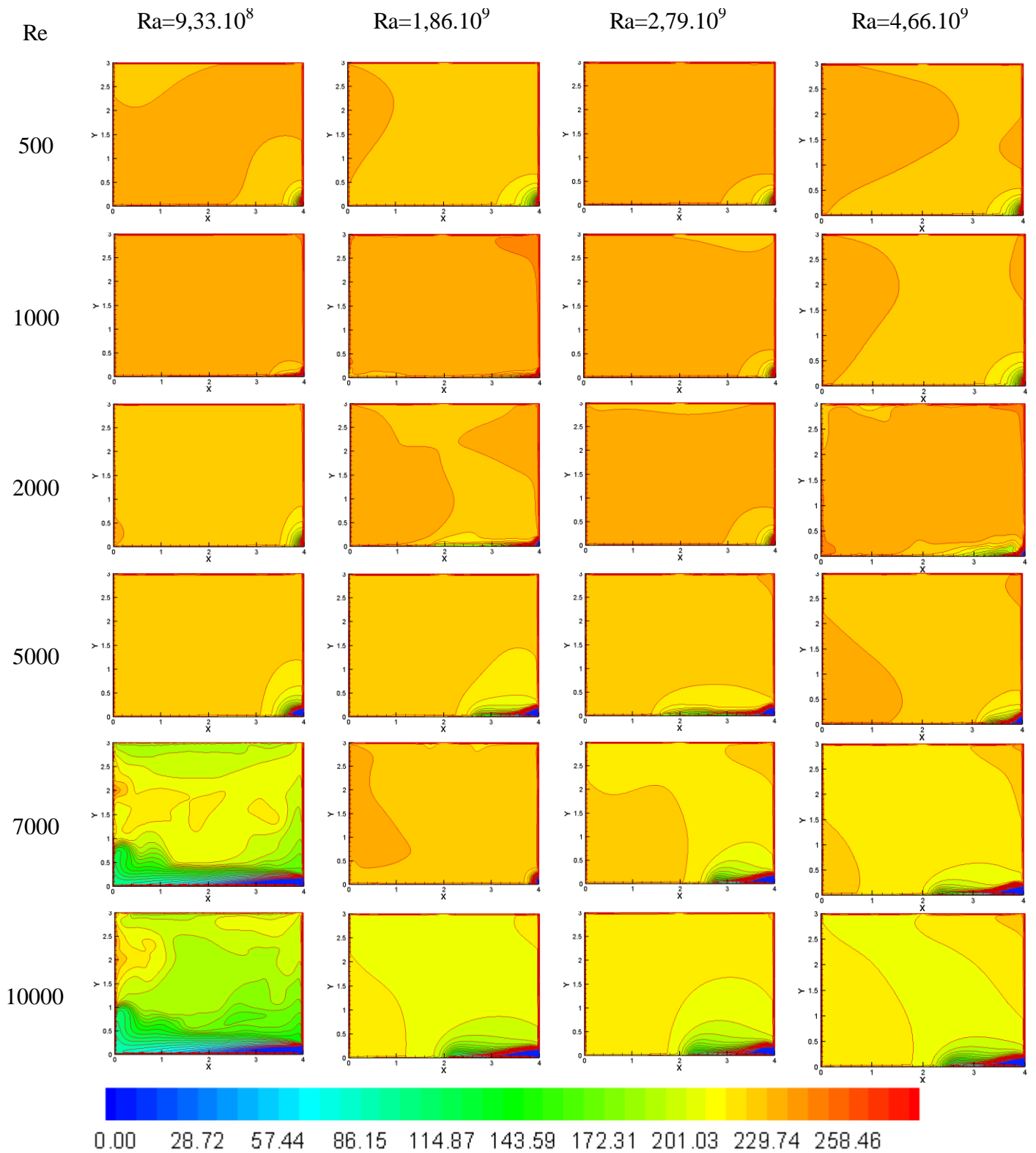


Figure IV.15: Iso-concentrations ($Bq.m^{-3}$), pour la configuration 3 [5].

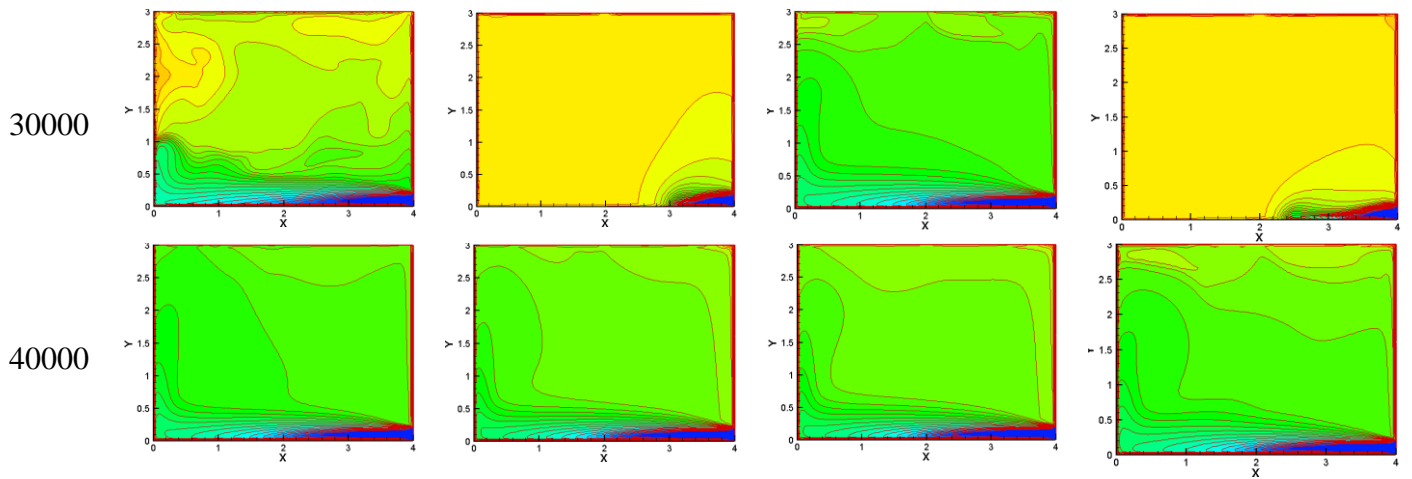


Figure IV.15: Continuum.

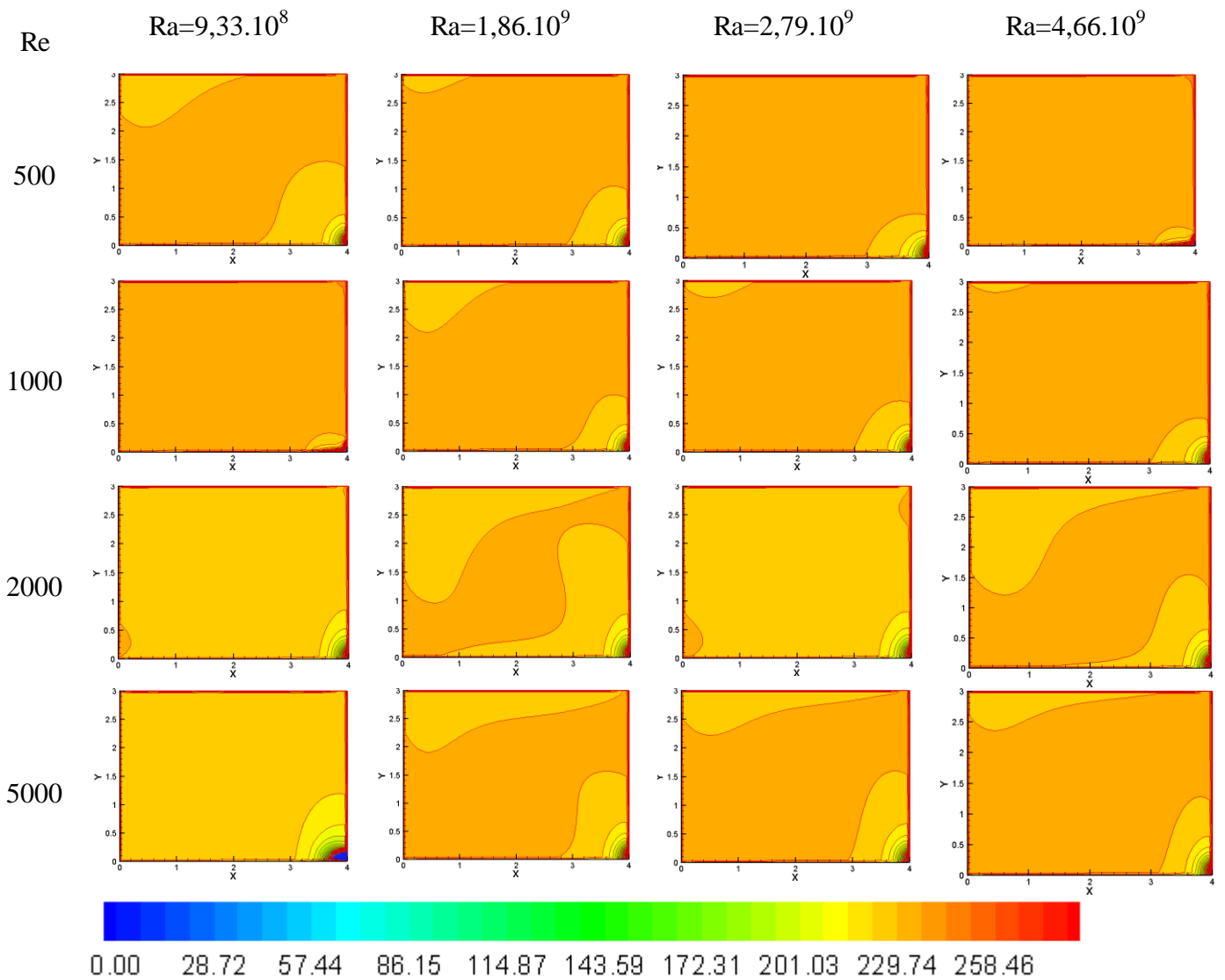


Figure IV.16: Iso-concentrations ($Bq.m^{-3}$), pour la configuration 4 [5].

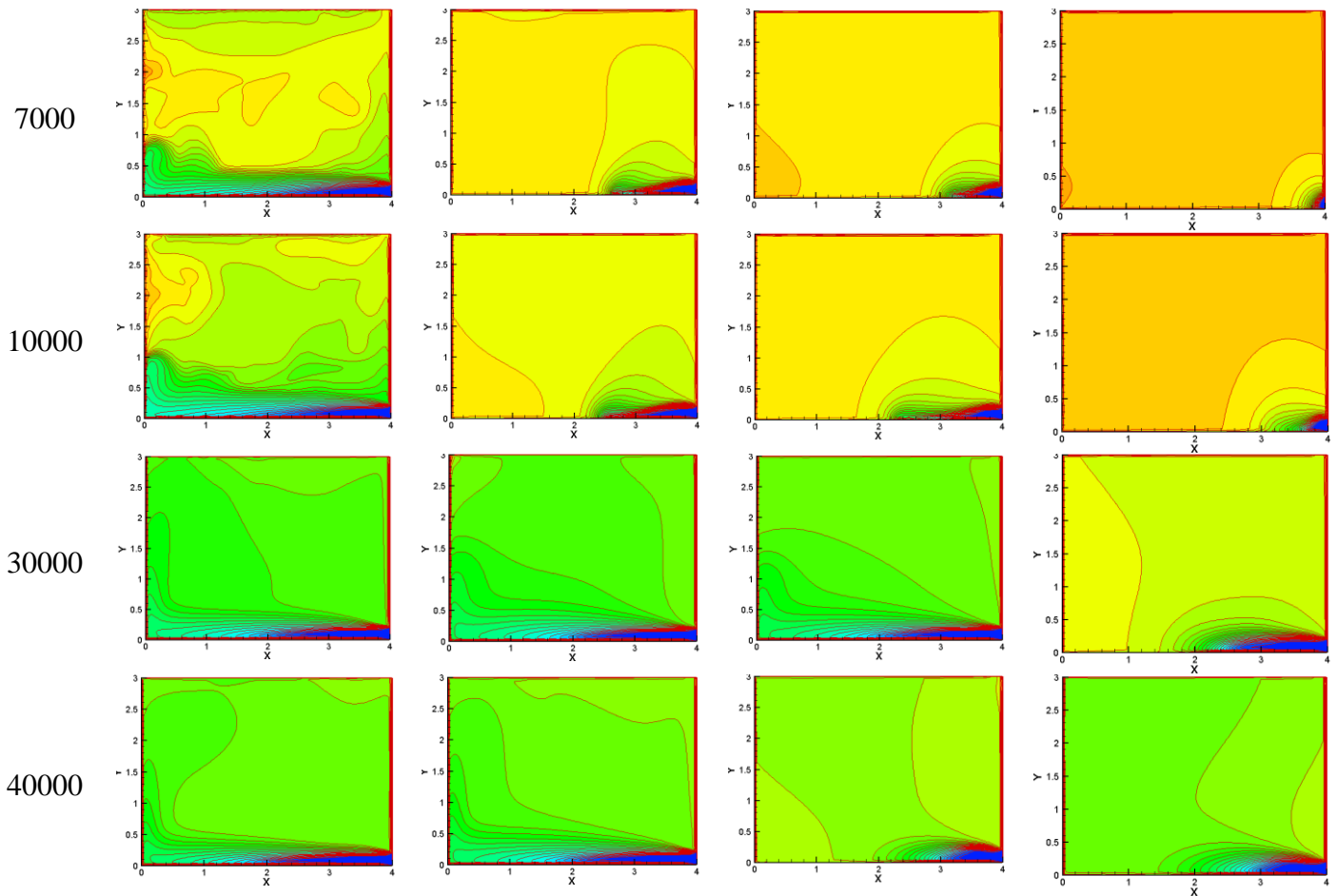


Figure IV.16: Continue

D'après ces résultats, on constate que, pour les faibles nombre de Re, les concentrations du ^{222}Rn augmentent considérablement en fonction de Ra. Alors que, pour les nombre de Re élevés, le nombre Ra entraîne une légère influence sur le transport de ^{222}Rn . Ceci indique que, pour Re élevé, la convection forcée est le moteur principal de l'écoulement. En conclusion, pour les faibles nombres de Re, la convection naturelle agit parfaitement et favorise la diffusion du ^{222}Rn . Pour les nombres de Re élevés, la convection forcée agit favorablement à l'évacuation du ^{222}Rn [5].

Sur les figures IV.17 à IV.20, nous présentons les champs de vitesses pour le cas des nombres de Ra= $9,33 \cdot 10^8$, $1,86 \cdot 10^9$, $2,79 \cdot 10^9$ et $4,66 \cdot 10^9$ et de Re=500, 1000, 2000, 5000, 7000, 10000, 3000 et 40000. Les champs de vitesses indiquent que l'écoulement s'intensifie en fonction du nombre de Ra, pour un Re donné, dans la plage $500 \leq \text{Re} < 7000$. Nous remarquons la formation d'une petite structure le long de la paroi verticale gauche. Cette structure s'élargi en augmentant le nombre de Ra et occupe une bonne partie de la pièce. Au niveau de la paroi verticale droite et horizontale inférieure, l'écoulement est entraîné

uniquement par la convection forcée. En effet, l'air pénètre parallèlement à la paroi horizontale inférieure, change de direction tout près de la paroi verticale droite et devient parallèle à celle-ci pour atteindre la sortie. Entre ces deux structures, nous observons une autre structure qui tend à disparaître en augmentant le nombre Re. Celle-ci est la structure de transition entre la convection naturelle et la convection forcée [5].

En ce qui concerne les variations de Re, les champs de vitesses indiquent que l'augmentation du nombre Re entraîne une nette intensification de l'écoulement. Il convient de noter qu'à partir de $Re=7000$, les structures décrites précédemment disparaissent et la convection forcée devient de plus en plus dominante au fur et à mesure que Re augmente [5].

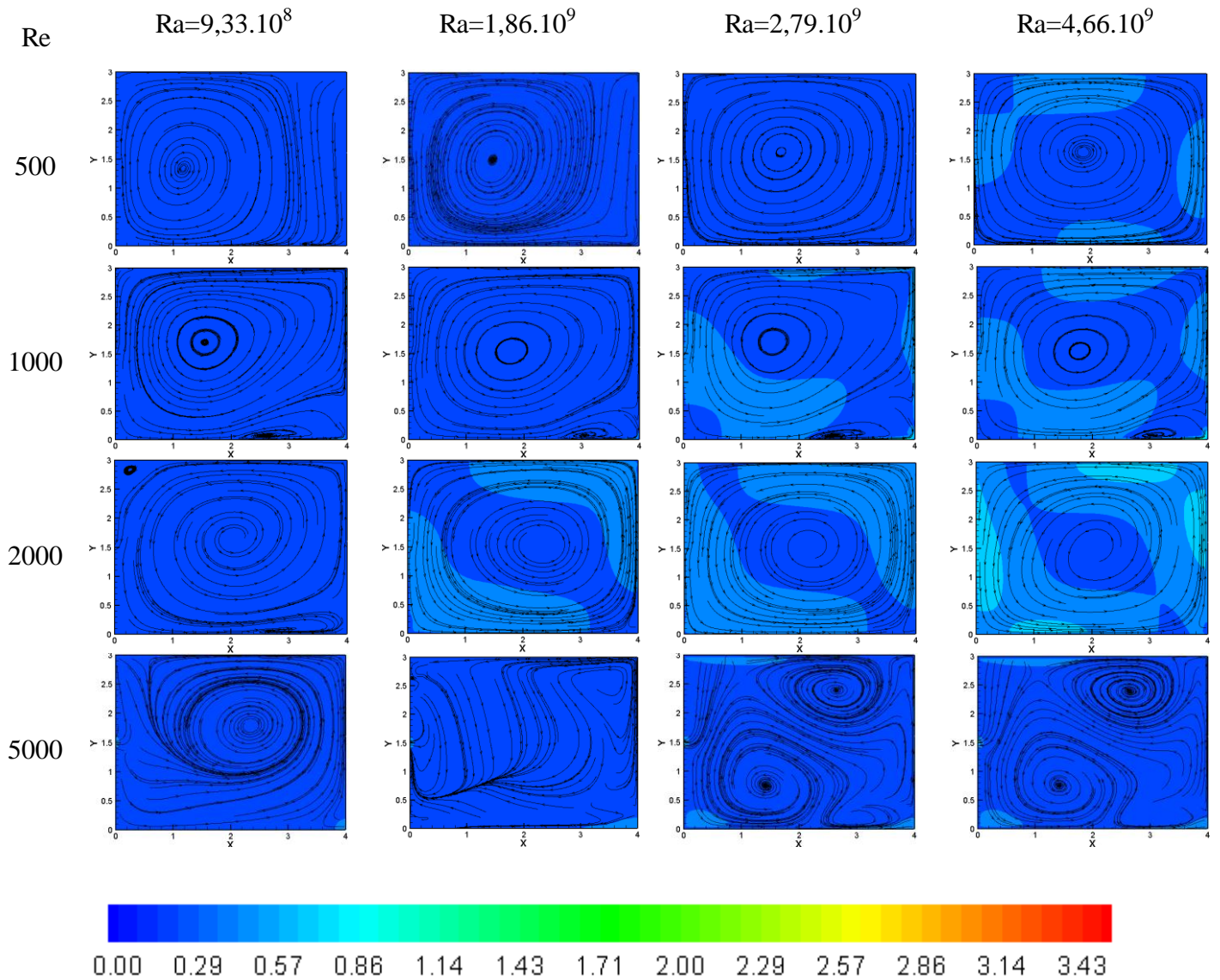


Figure IV.17: Champs de vitesses ($m \cdot s^{-1}$), pour la configuration 1 [5].

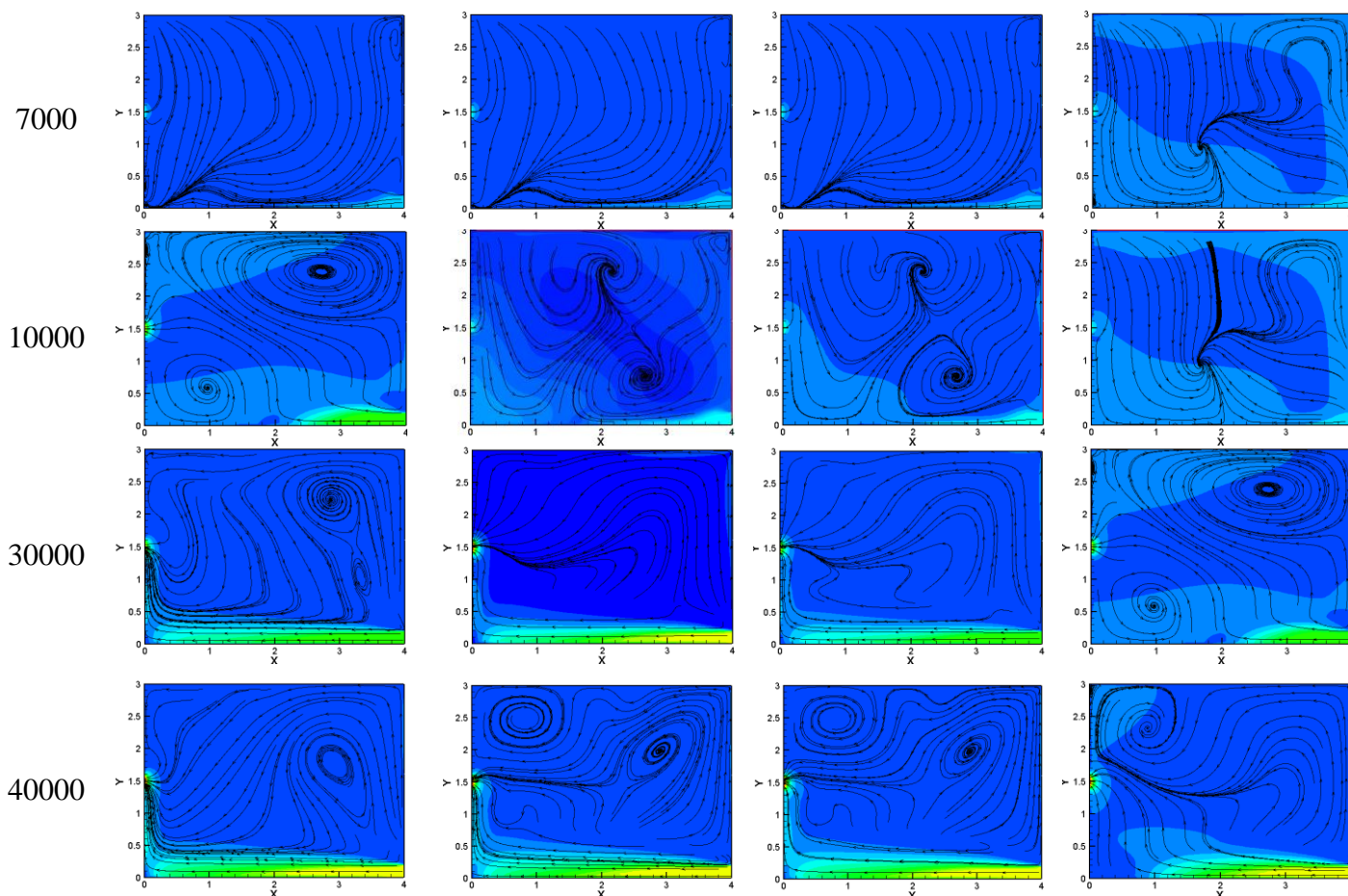


Figure IV.17: Continue.

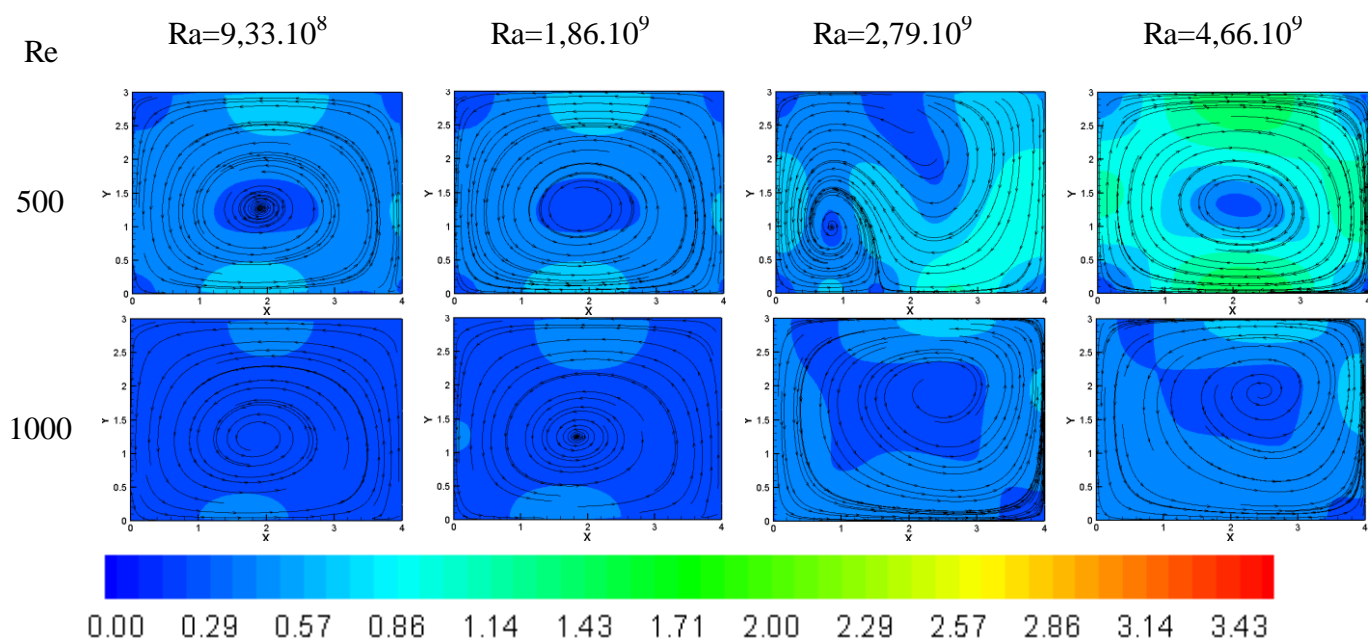


Figure IV.18: Champs de vitesses (m.s^{-1}), pour la configuration 2 [5].

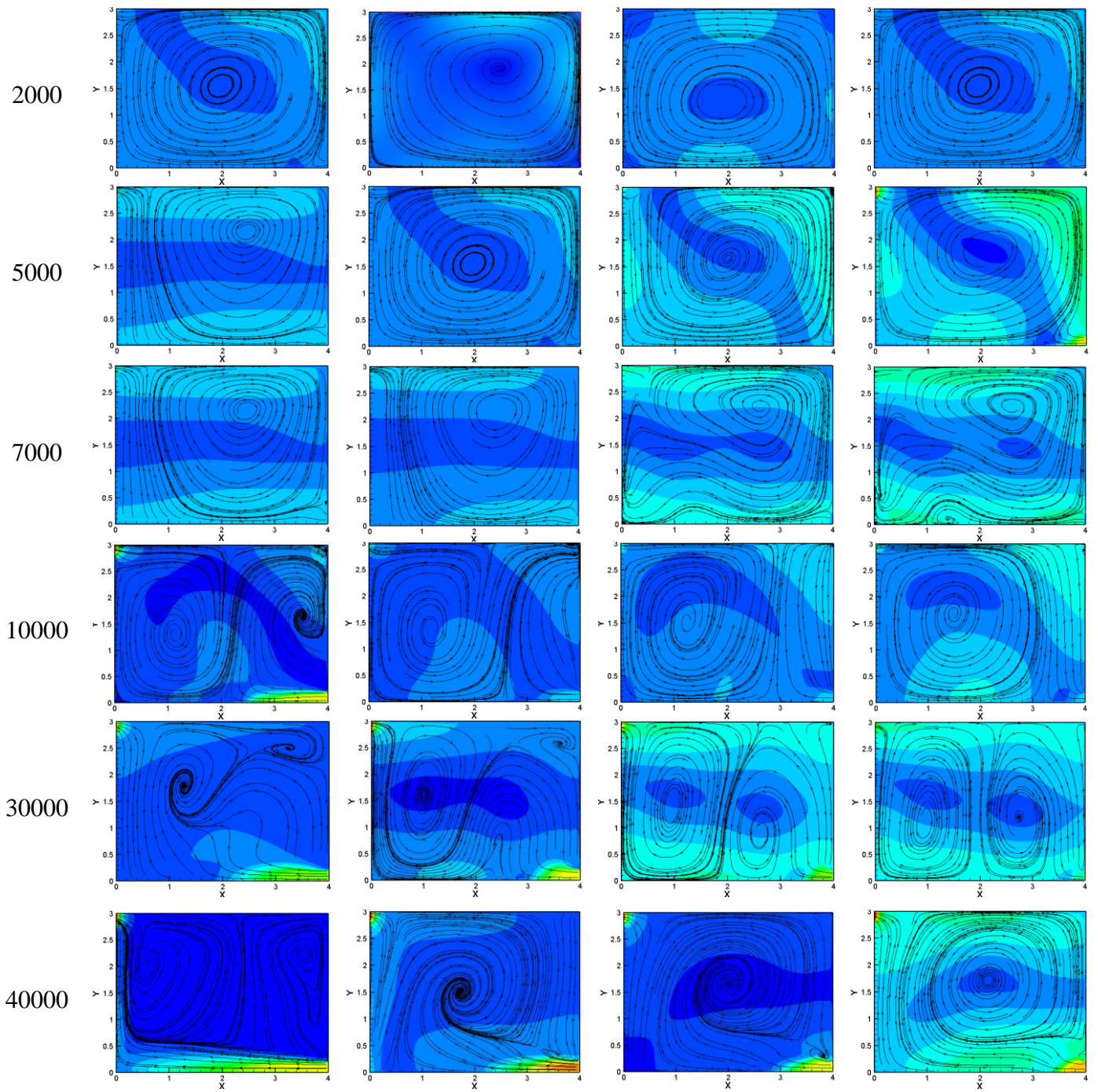


Figure IV.18: Continue

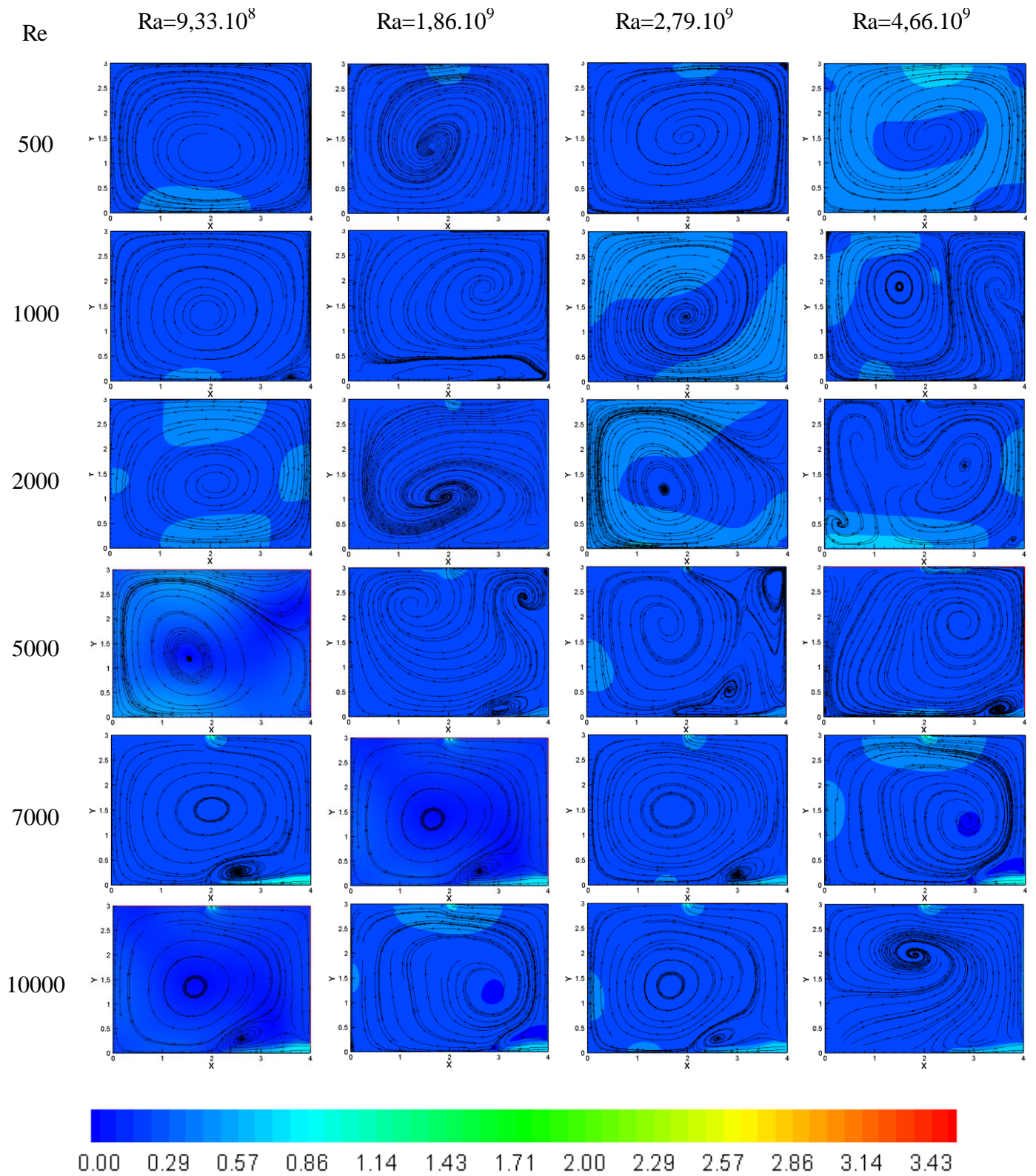


Figure IV.19: Champs de vitesses ($m.s^{-1}$), pour la configuration 3 [5].

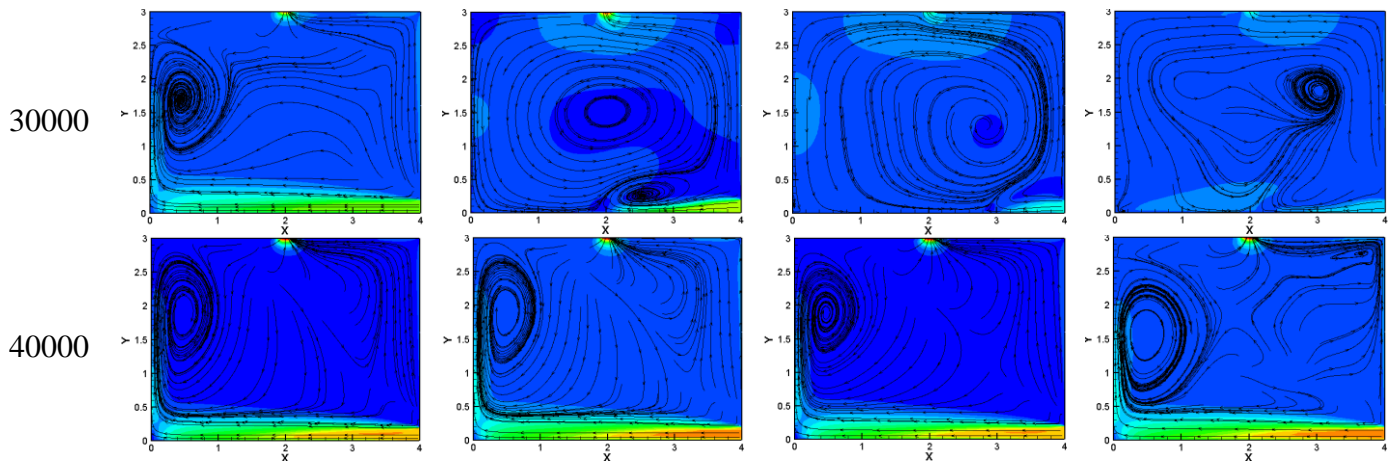


Figure IV.19: Continuum.

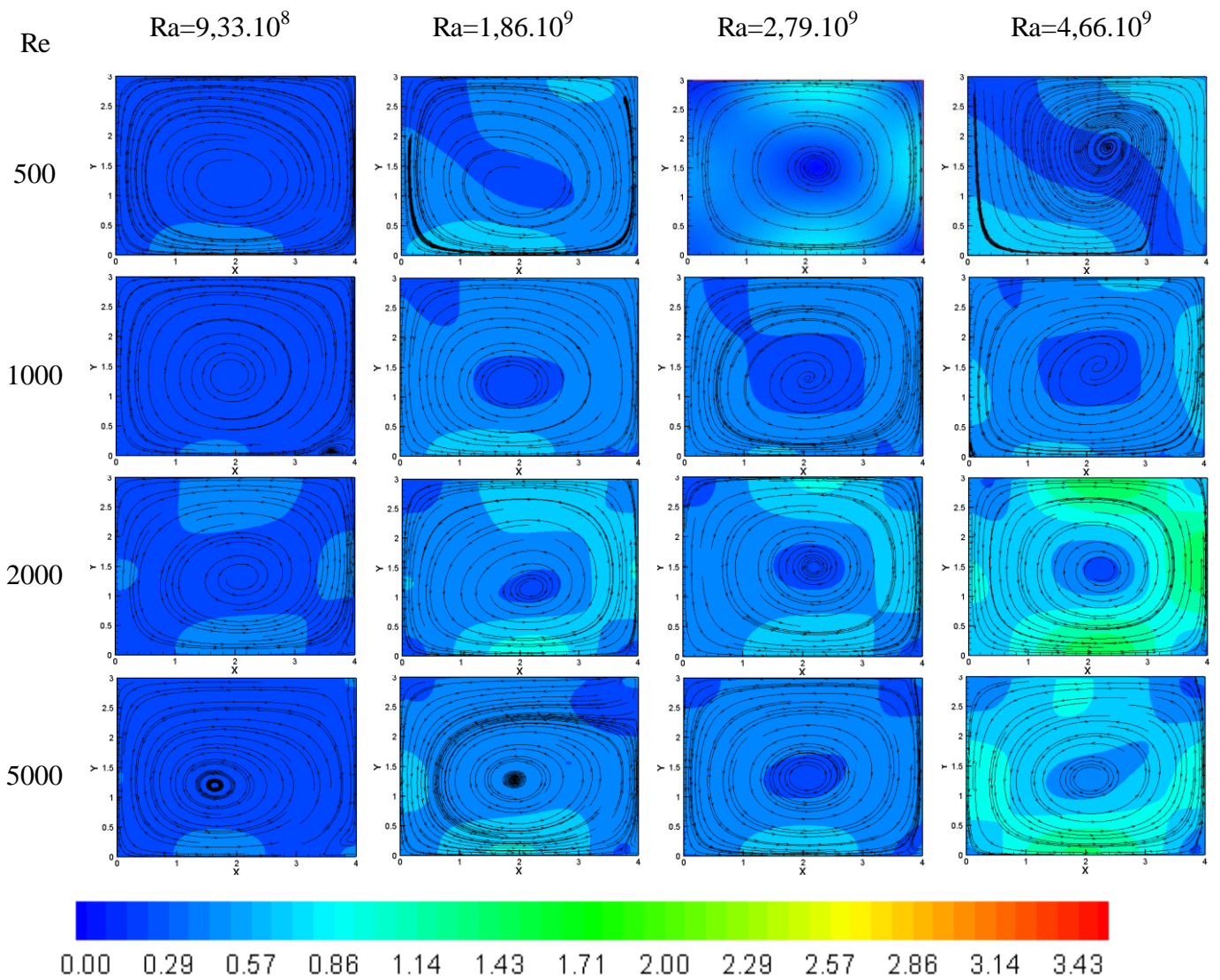


Figure IV.20: Champs de vitesses (m.s^{-1}), pour la configuration 4 [5].

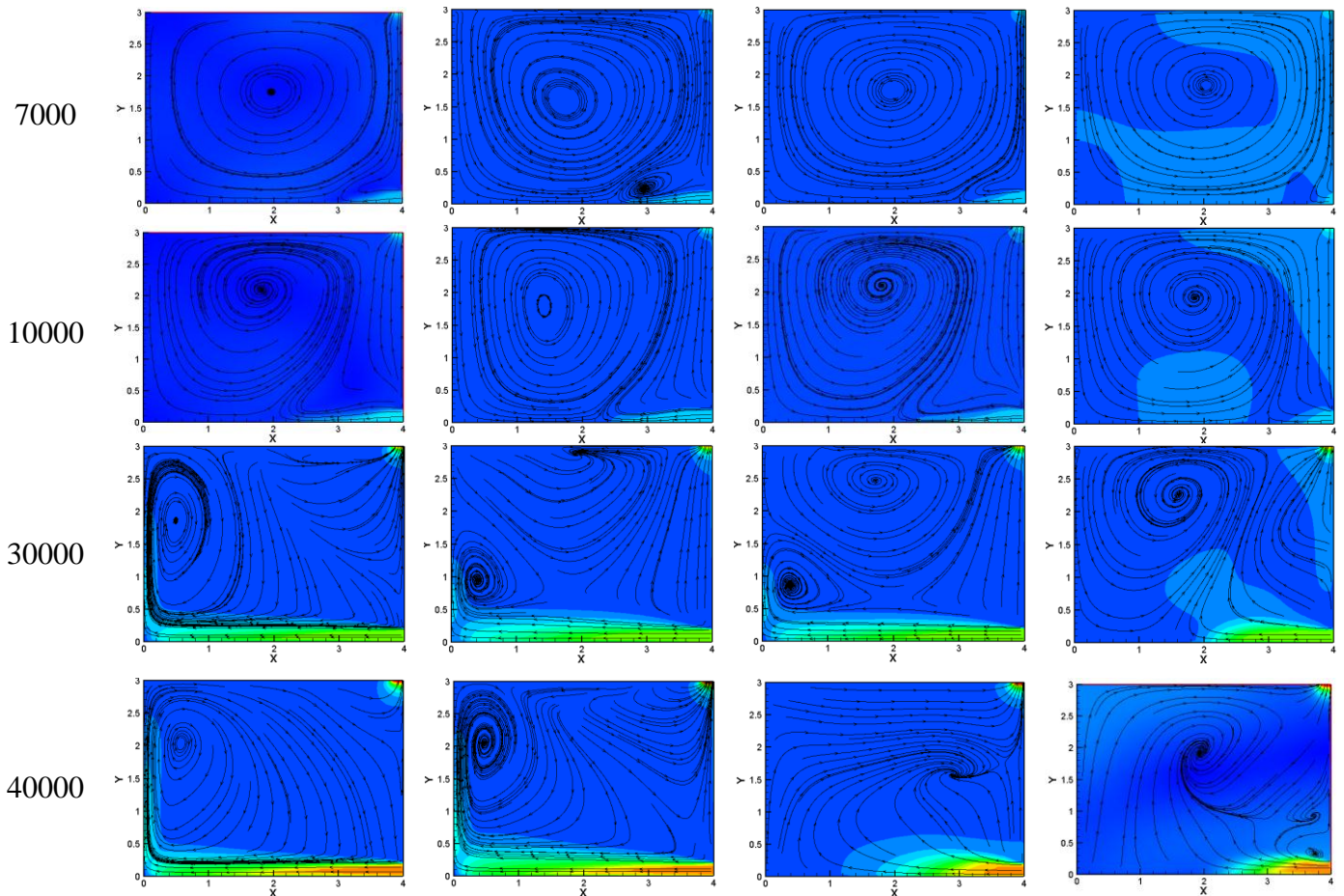


Figure IV.20: Continue.

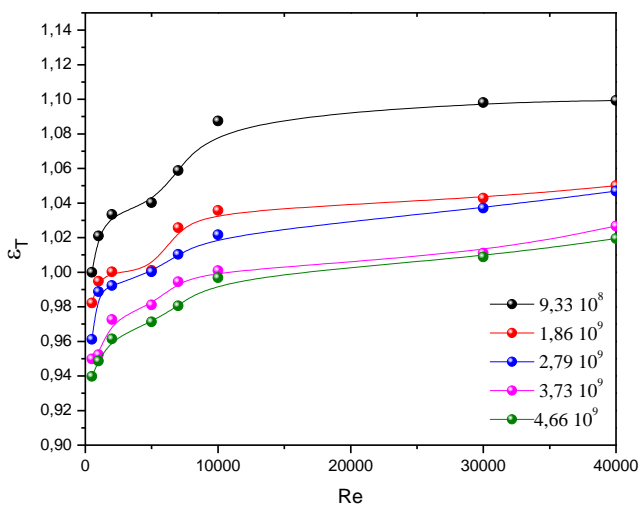
D'après ces résultats, nous constatons que, pour les faibles nombre de Re, l'écoulement s'intensifie en fonction du nombre de Ra. Ceci indique que la convection naturelle est d'un apport important sur l'écoulement. Alors que, pour les nombre de Re élevés, le nombre Ra n'a aucune influence sur l'écoulement. En effet, le flux d'air entre avec une certaine vitesse et crée une force d'écoulement supplémentaire aux forces de flottabilité, par conséquent, plus la vitesse d'entrée d'air augmente plus le mode d'écoulement est régi par la convection forcée et devient le moteur essentiel de l'écoulement.

IV.7.3 Efficacité de la ventilation et indice de qualité de l'air intérieur

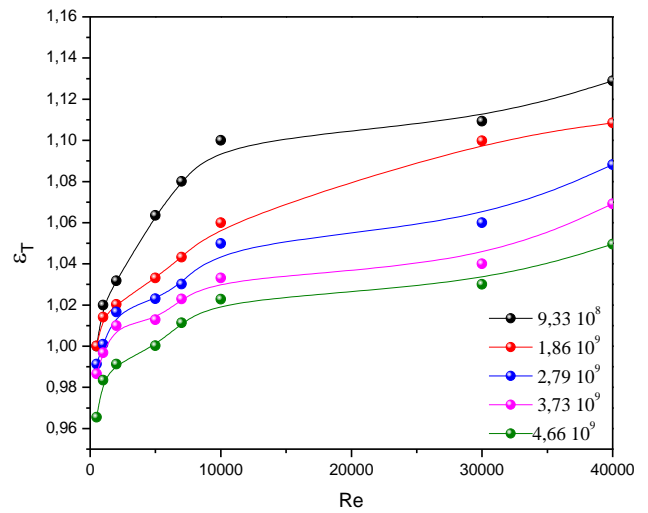
Nous nous intéressons dans ce paragraphe à l'influence du nombre de Ra sur les paramètres essentiels de la ventilation qui sont l'efficacité de la ventilation à éliminer de la chaleur et à évacuer le ^{222}Rn (ϵ_T et ϵ_C) et l'indice de qualité de l'air (I_{QAI}). Nous présentons l'évolution de ces paramètres en fonction du nombre Re pour différentes valeurs du nombre de Ra.

La figure IV.21 montre l'évolution de l'efficacité de la ventilation à évacuer de la chaleur (ε_T) en fonction du nombre Re pour différents nombres de Ra. Nous remarquons que l'efficacité ε_T augmente légèrement avec Re pour toutes les valeurs de Ra. Cela indique que l'augmentation du taux de renouvellement d'air favorise le rafraîchissement de la pièce. Nous remarquons aussi que plus Ra augmente, plus l'efficacité de la ventilation diminue. Ceci peut s'expliquer par le fait que la température moyenne de la pièce augmente avec Ra.

Les quatre configurations fournissent une efficacité ε_T globalement supérieure à l'unité (sauf dans le cas des configurations 1 et 3 lorsque $Re < 500$), ceci dit que la ventilation évacue suffisamment la chaleur intérieure. A noter que la configuration.4 fournit la meilleure efficacité.

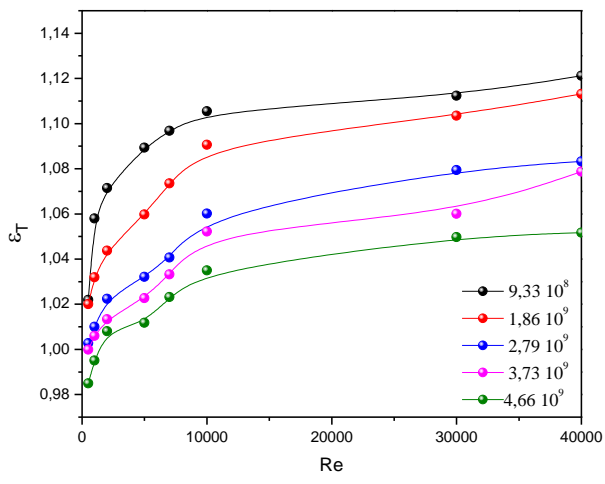


Config.1

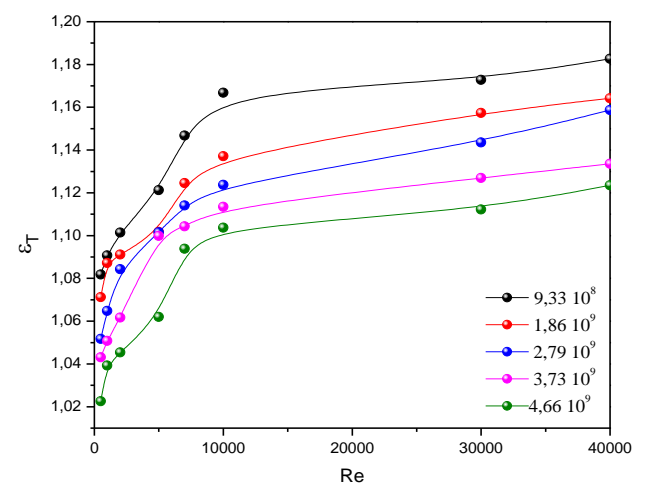


Config.2

Figure IV.21: Evolution de ε_T en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra [5].



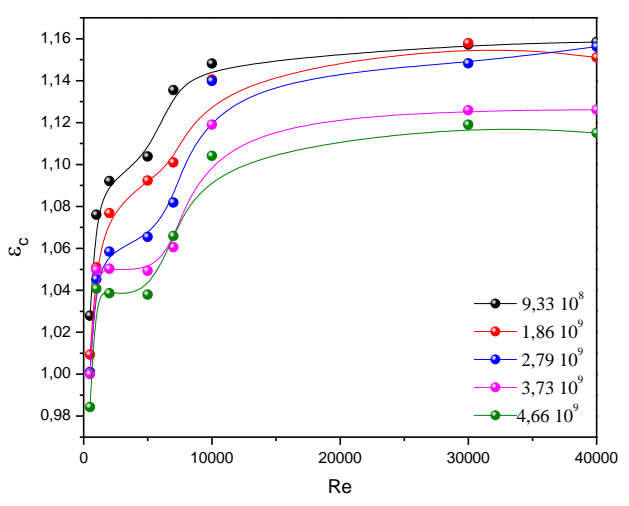
Config.3



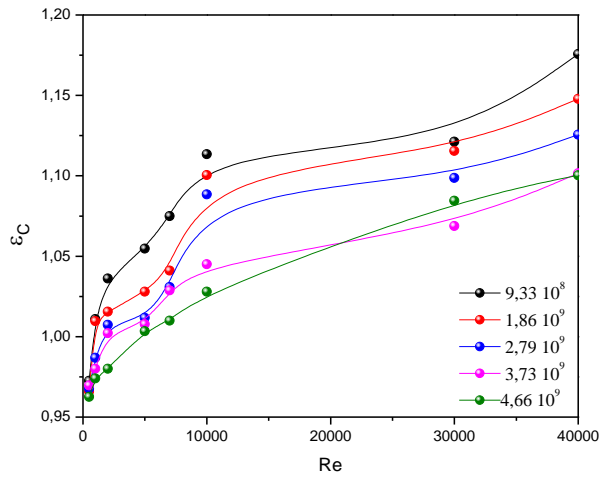
Config.4

Figure IV.21: Continue

Sur la figure IV.22, nous traçons les évolutions de ε_C en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra . Nous remarquons que l'augmentation de Re améliore l'efficacité de la ventilation à évacuer de la chaleur et à diluer le mélange air- ^{222}Rn . Ceci est dû à l'amplification de l'écoulement en fonction de Ra . En effet, l'intensité de l'écoulement joue un rôle important sur l'homogénéisation du mélange air- ^{222}Rn .

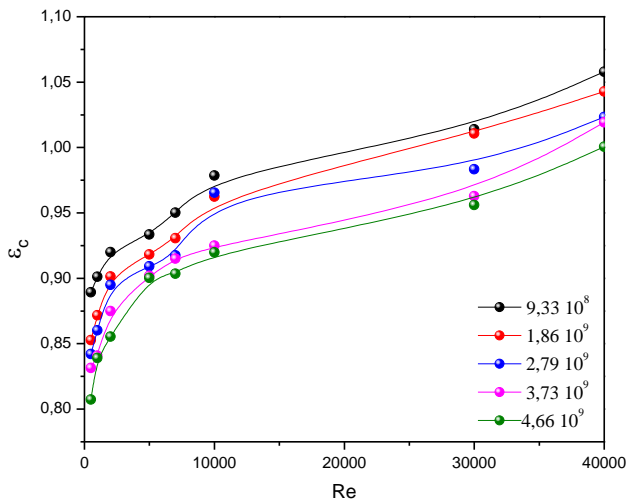


Config.1

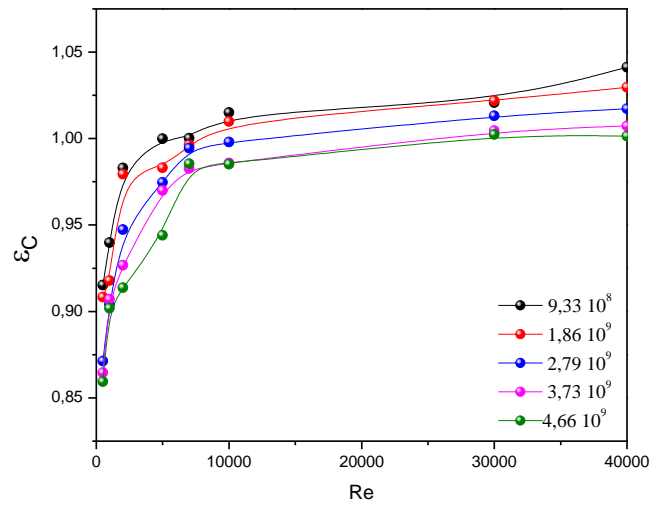


Config.2

Figure IV.22: Evolution de ε_C en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra [5].



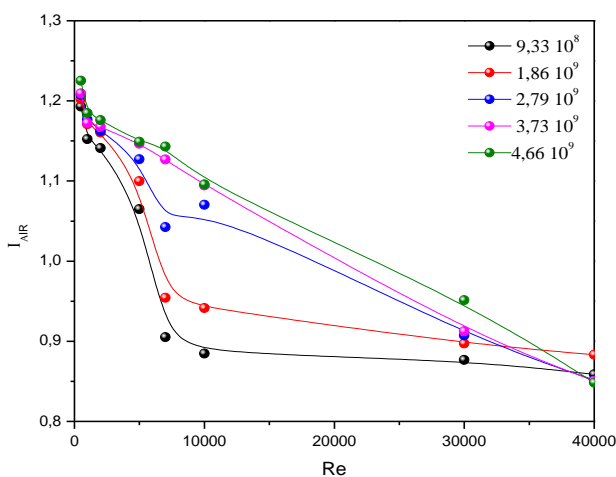
Config.3



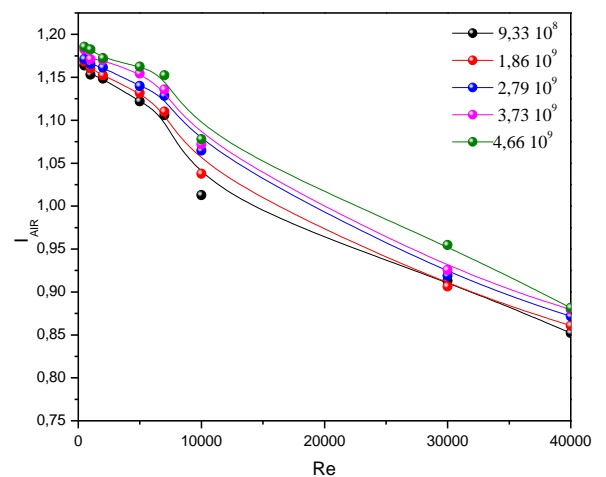
Config.4

Figure IV.22: Continue

La figure IV.23 illustre les variations de l'indice de qualité de l'air I_{QAI} en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra . Nous remarquons que l'indice I_{QAI} diminue en fonction du Re , ceci est valable pour toutes les configurations et pour toutes les valeurs de Ra . Ceci indique que plus le débit de ventilation augmente plus la pièce est diluée. Pour $Re > 10000$, nous trouvons que l'indice I_{QAI} est inférieur à 1. Cela exprime que la qualité de l'air est bonne malgré que $\epsilon_C < 1$.

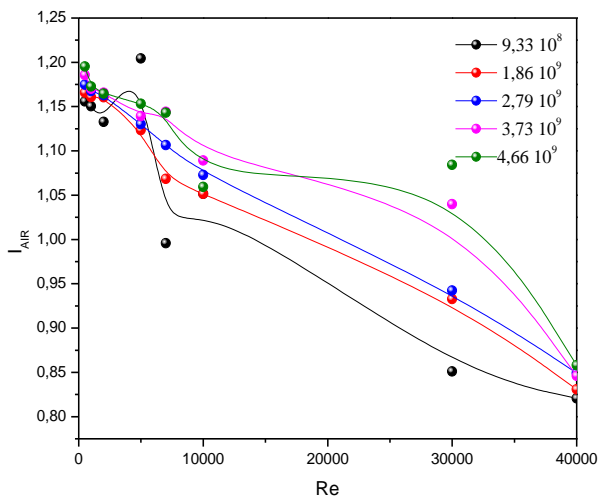


Config.1

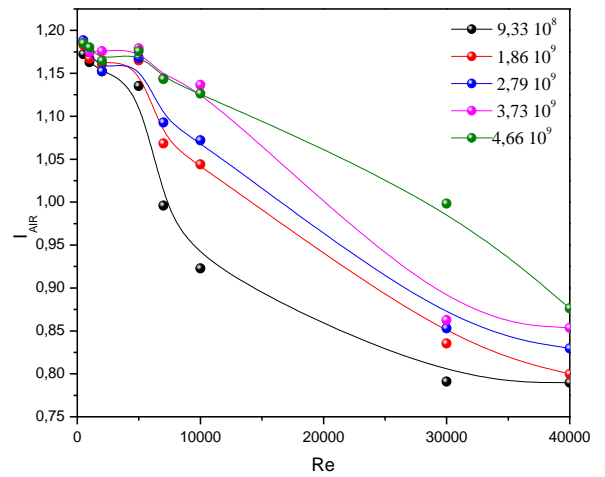


Config.2

Figure IV.23: Evolution de I_{AIR} en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra [5].



Config.3



Config.4

Figure IV.23: Continue

IV.7.4 Influence de l'emplacement de la bouche de sortie d'air

Comme nous l'avons annoncé au début de ce chapitre, afin d'analyser l'influence de la ventilation sur les paramètres ε_T , ε_C et I_{QAI} , nous avons étudié quatre scénarios de ventilation (Figure IV.3). Nous présentons dans cette partie les températures et les concentrations moyennes à l'intérieur des quatre configurations. Egalement, nous montrons l'évolution des paramètres ε_T , ε_C et I_{QAI} en fonction du nombre de Re pour un nombre de $Ra=2,79.10^9$.

Les tableaux IV.6 et IV.7 présentent les valeurs moyennes de la température (\bar{T}) et de la concentration (\bar{C}) à l'intérieur des pièces étudiées en fonction du nombre Re. Nous observons que les températures et les concentrations diminuent progressivement en fonction du nombre de Re pour les quatre configurations. Ceci explique que le débit de ventilation a un impact important sur la distribution des températures et des concentrations. En effet, l'augmentation du débit de ventilation favorise l'homogénéisation de l'air intérieur. En fonction de l'emplacement de la sortie d'air, nous trouvons que \bar{T} diminue au fur et à mesure que la sortie se rapproche de la paroi verticale gauche. Autrement dit, \bar{T} , diminue avec le rapprochement de l'ouverture de la grille de sortie des sources de chaleur.

	Re	Température moyenne (K)				
		Ra=9,33.10 ⁸	Ra=1,86.10 ⁹	Ra=2,79.10 ⁹	Ra=4,66.10 ⁹	Ra=9,33.10 ⁸
Config.1	500	306,73	324,29	325,71	336,01	337,10
	1000	305,02	320,41	323,62	331,87	471,14
	2000	304,95	316,02	319,61	319,72	327,18
	5000	304,41	313,07	319,32	326,38	333,71
	7000	299,31	303,07	310,52	315,02	319,54
	10000	292,86	289,55	307,68	311,59	315,40
	30000	298,78	298,71	301,57	302,57	303,64
	40000	298,07	299,05	300,62	301,59	302,45
Config.2	500	303,90	306,32	307,91	309,37	310,93
	1000	303,84	306,73	306,92	307,09	308,11
	2000	303,74	304,86	303,22	307,09	306,11
	5000	303,38	304,53	304,72	307,21	309,21
	7000	301,53	302,05	302,26	303,65	306,11
	10000	300,72	301,43	302,15	301,87	305,60
	30000	298,44	299,48	300,71	301,95	303,19
	40000	298,24	299,15	300,07	300,88	301,67
Config.3	500	309,59	314,19	326,77	328,05	334,74
	1000	309,90	313,40	324,51	327,25	329,87
	2000	309,59	310,43	322,90	323,60	325,00
	5000	307,82	308,91	319,27	322,76	324,04
	7000	305,70	305,01	310,42	314,16	318,76
	10000	304,25	304,25	308,11	311,30	314,23
	30000	297,78	304,34	298,67	311,88	315,68
	40000	297,67	298,03	298,86	298,47	298,55
Config.4	500	315,80	315,90	323,56	326,62	330,68
	1000	312,00	313,27	321,97	324,89	328,38
	2000	309,59	310,43	311,76	313,60	315,00
	5000	304,14	309,41	310,28	315,00	315,96
	7000	305,70	305,01	309,65	314,16	318,76
	10000	303,85	303,61	307,31	311,10	314,76
	30000	297,64	298,61	299,34	300,17	302,71
	40000	297,23	297,86	299,28	300,04	300,67

Tableau IV.6: Températures moyennes (K) [5].

	Re	Concentration moyenne (Bq.m ⁻³)				
		Ra=9,33.10 ⁸	Ra=1,86.10 ⁹	Ra=2,79.10 ⁹	Ra=4,66.10 ⁹	Ra=9,33.10 ⁸
Config.1	500	238,57	240,41	241,43	241,87	245,03
	1000	230,48	234,17	235,31	234,49	236,97
	2000	228,21	232,09	232,46	233,54	235,20
	5000	212,99	219,99	225,42	229,27	229,77
	7000	181,05	190,85	208,49	225,34	228,60
	10000	176,94	188,28	214,06	218,85	219,14
	30000	175,33	179,44	181,48	182,48	190,24
	40000	171,76	176,64	170,32	170,12	169,67
Config.2	500	232,77	233,67	234,27	236,50	237,10
	1000	230,64	232,08	233,05	234,22	236,49
	2000	229,68	230,45	232,30	233,98	234,49
	5000	224,38	226,35	227,97	230,89	232,47
	7000	221,19	221,99	225,71	227,13	230,49
	10000	202,55	207,52	212,95	214,40	215,60
	30000	182,56	181,27	183,78	185,11	190,92
	40000	170,42	172,13	174,33	175,88	176,33
Config.3	500	231,14	233,12	234,93	237,10	239,06
	1000	230,07	232,14	233,49	234,03	234,52
	2000	226,54	232,11	232,55	233,16	232,90
	5000	240,89	224,68	226,02	227,82	230,64
	7000	199,17	213,66	221,31	228,83	228,63
	10000	210,31	210,31	214,58	217,83	211,84
	30000	170,19	186,52	188,47	207,98	216,82
	40000	164,15	166,17	169,85	169,19	171,59
Config.4	500	234,44	236,65	237,66	237,08	237,00
	1000	232,60	233,41	234,95	234,97	236,00
	2000	230,45	232,11	230,44	235,16	232,90
	5000	227,05	233,01	233,59	235,84	235,14
	7000	199,17	213,66	218,53	228,83	228,63
	10000	184,56	208,77	214,38	227,29	225,27
	30000	158,17	167,08	170,59	172,52	199,67
	40000	157,92	159,97	165,91	170,68	175,25

Tableau IV.7: Concentration moyenne (Bq.m⁻³) [5].

La figure IV.24 illustre l'évolution des paramètres ε_T , ε_C et I_{QAI} en fonction du nombre de Re pour les quatre pièces pour $Ra=2,79.10^9$. Nous remarquons que les paramètres sont presque identiques pour les configurations 3 et 4 en raison de l'emplacement des ouvertures de sortie qui sont très proches. ε_T , est nettement amélioré par le fait que l'ouverture de sortie se rapproche des sources de chaleur. Tandis que, l'indice ε_C diminue en fonction du rapprochement de l'ouverture de sortie de la paroi verticale gauche. Egalement, Nous remarquons que la configuration 2 fournit une bonne qualité de l'air intérieur.

Après avoir analysé tous les résultats des quatre configurations, nous avons trouvé que la configuration 2 fournit une bonne qualité de l'air intérieur et une meilleure efficacité en termes d'évacuation du polluant. Ceci est lié à l'emplacement de l'ouverture de sortie d'air qui est proche de source de masse.

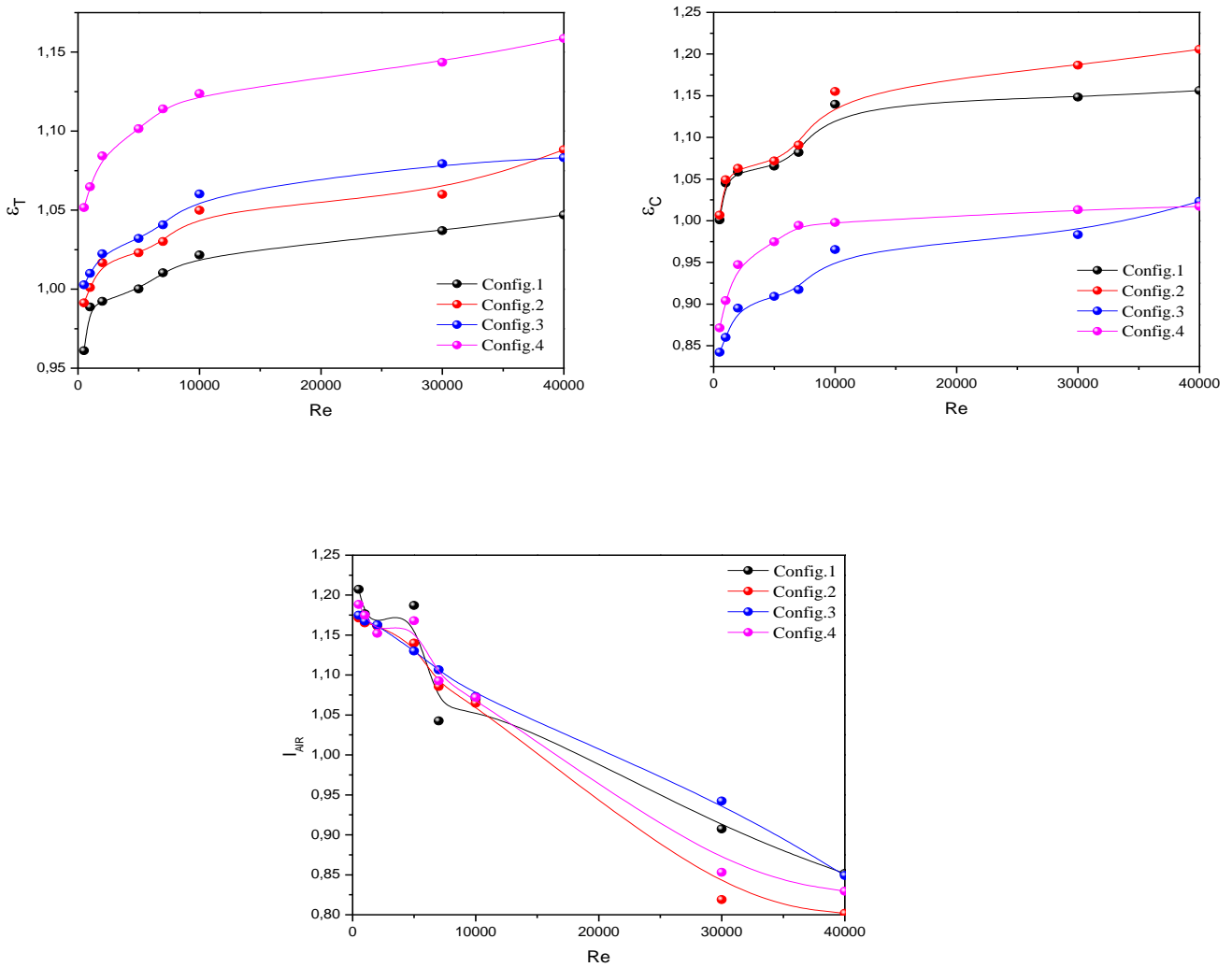


Figure IV.24: Evolution de ε_T , ε_C et I_{QAI} en fonction de Re pour différentes configurations [5].

IV.8 Validation de la solution analytique

Afin de valider la solution analytique (Equation II-59), les résultats numériques sont comparés à ceux obtenus analytiquement comme présenté dans le tableau IV.8. Nous constatons que les résultats se comparent très favorablement.

Re	Concentration moyenne (Bq.m ⁻³)		
	Solution analytique	Simulation numérique	Différence (%)
500	279,34	234,44	19,15
600	204,18	229,27	10,94
700	170,25	213,43	20,23

Tableau IV.8 Comparaison entre les deux modèles analytique et numérique (config.2 et $q=15 \text{ W.m}^{-2}$).

IV.9 Comportement des descendants du radon

IV.9.1 Influence du nombre de Re et Ra

Comme dans la section précédente, nous avons fait varier la vitesse d'entrée d'air entre $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ et 3 m.s^{-1} , et le flux de chaleur entre 15 W.m^{-2} et 75 W.m^{-2} , en fixant le coefficient d'attachement à 50 h^{-1} . Nous présentons dans le contenu de cette section uniquement les résultats relatifs à la configuration 2 (Figure IV.3).

Sur la figure IV.25 nous montrons les contours de la concentration de la fraction attachée et libre du ^{218}Po tracé au plan médian vertical, pour le cas des nombres de $\text{Ra}= 9,33.10^8$, $1,86 \cdot 10^9$, $2,79.10^9$ et $4,66.10^9$ et de $\text{Re}=500, 1000, 2000, 5000, 7000, 10000, 3000$ et 40000 . Nous observons que la concentration est rapidement diminuée au voisinage des parois inférieure et gauche. Cette diminution est provoquée par l'introduction de l'air frais. Au milieu de la pièce, la concentration est pratiquement homogène. Aussi, nous constatons qu'autour de l'entrée d'air, la concentration est faible et avoisine $\approx 10 \text{ Bq.m}^{-3}$. Aussi, nous constatons que la concentration diminue progressivement dans tout le domaine avec Re.

En fonction du Ra. Nous remarquons que les iso-concentrations sont pratiquement les mêmes mais leurs valeurs augmente considérablement. Ceci peut s'expliquer par le fait que la concentration moyenne du radon dans la chambre augmente avec Ra [4].

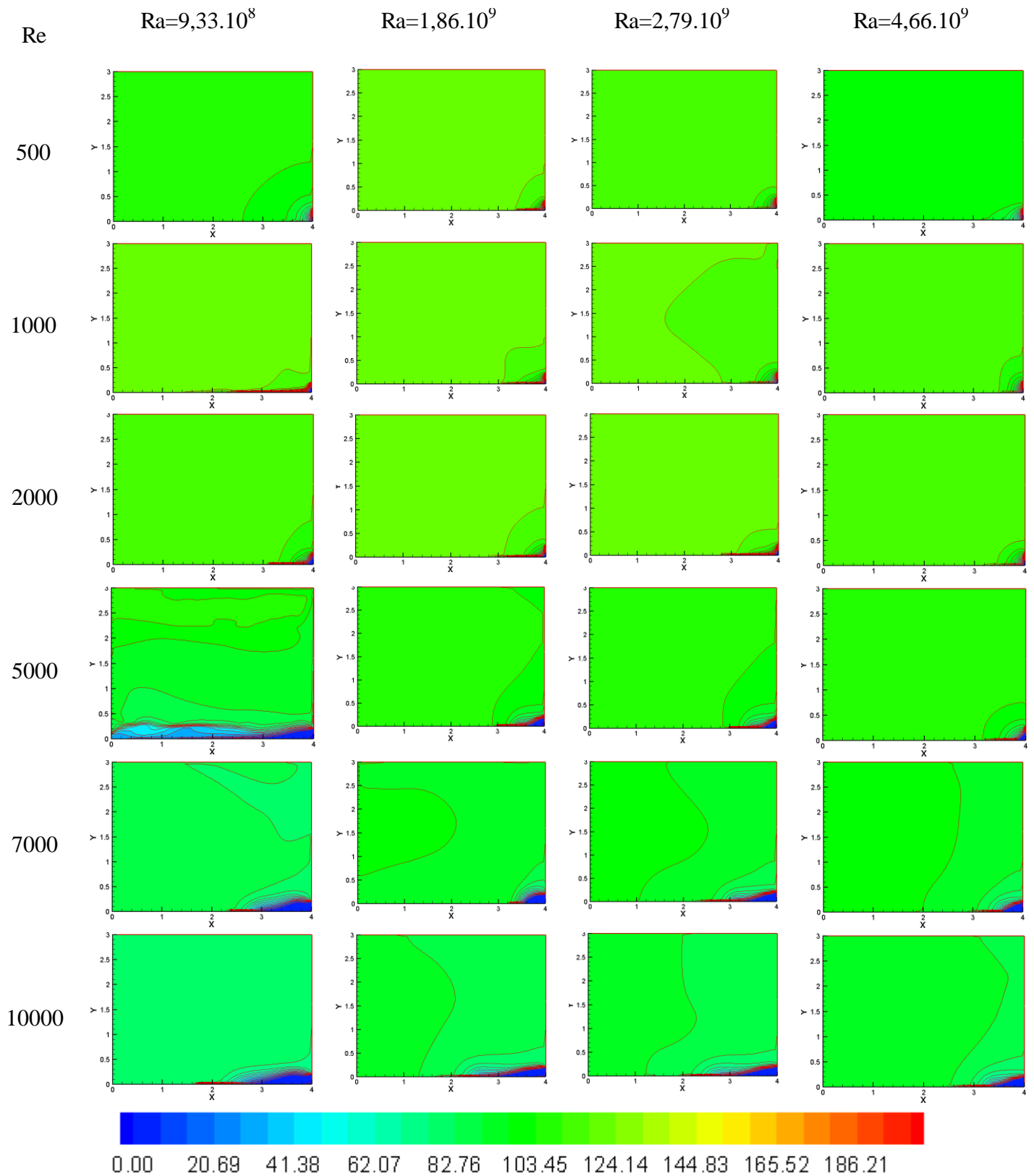


Figure IV.25: Contours de la concentration du $^{218}\text{Po}^a$ ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) au plan médian vertical [4].

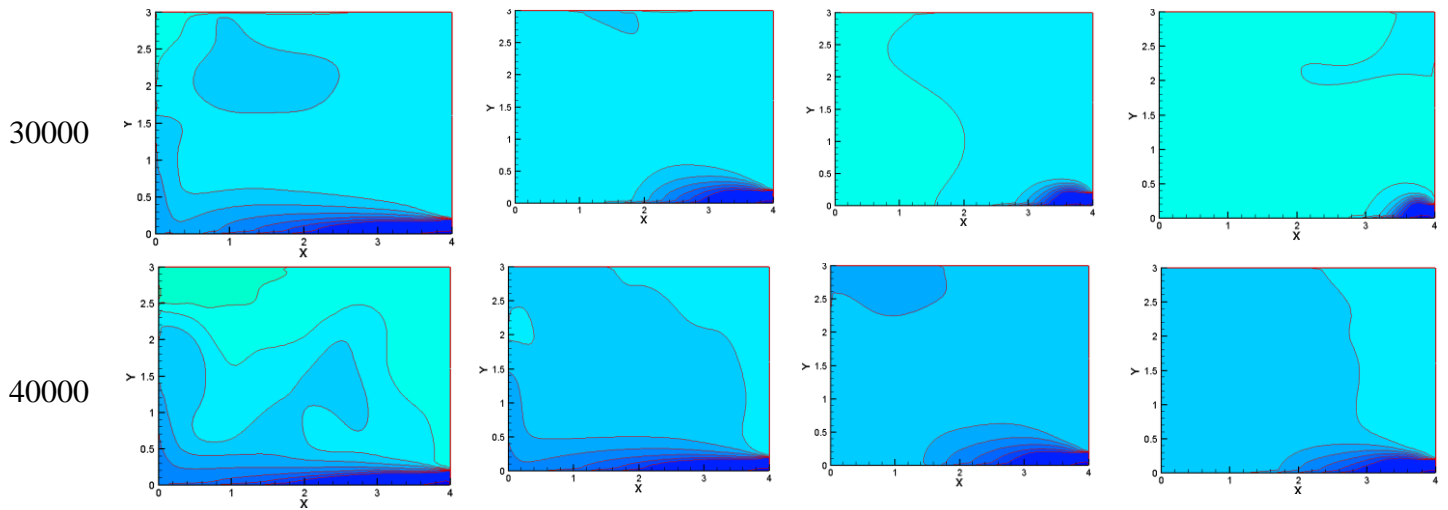


Figure IV.25: continue

Les tableaux IV.9 et IV.10 présentent les valeurs moyennes de la fraction attaché et libre à l'intérieur du ^{218}Pb et du ^{214}Pb en fonction de Re pour différentes valeurs de Ra. Nous observons que la fraction attachée et libre diminuent progressivement en fonction du nombre de Re. Ceci explique que le débit de la ventilation a un impact important sur la distribution des concentrations du radon et ses descendants. En effet, l'augmentation du débit de ventilation favorise le transport et l'évacuation du radon et ses descendants [4].

Re	Fraction attachée					Fraction libre				
	Ra=9,33 10^8	Ra=1,86 10^9	Ra=2,79 10^9	Ra=4,66 10^9	Ra=9,33 10^8	Ra=9,33 10^8	Ra=1,86 10^9	Ra=2,79 10^9	Ra=4,66 10^9	Ra=9,33 10^8
500	104,94	119,65	120,28	104,11	100,82	32,76	34,28	36,87	33,24	33,21
1000	120,79	118,41	119,72	115,82	113,83	34,33	34,22	35,16	34,39	34,25
2000	112,51	118,22	117,14	117,99	115,96	33,05	34,00	34,39	35,17	34,94
5000	91,22	104,89	105,45	108,49	107,16	28,95	33,06	33,25	34,17	33,76
7000	83,23	94,42	94,76	96,29	96,38	28,23	32,04	32,18	32,68	32,70
10000	78,60	87,48	88,47	90,80	91,40	27,62	30,96	31,27	32,04	32,25
30000	43,16	43,23	46,13	49,90	52,02	20,50	21,52	23,67	25,45	26,52
40000	43,00	39,19	35,84	38,93	38,82	19,63	21,26	20,53	21,77	22,92

Tableau IV.9: Concentration moyenne du ^{218}Pb ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) [4].

Re	Fraction attachée					Fraction libre				
	Ra=9,33 10 ⁸	Ra=1,86 10 ⁹	Ra=2,79 10 ⁹	Ra=4,66 10 ⁹	Ra=9,33 10 ⁸	Ra=9,33 10 ⁸	Ra=1,86 10 ⁹	Ra=2,79 10 ⁹	Ra=4,66 10 ⁹	Ra=9,33 10 ⁸
500	21,56	55,58	63,24	18,51	14,34	0,056	0,064	2,60	0,055	0,053
1000	59,07	50,38	61,93	37,76	33,25	0,065	0,064	2,53	0,062	0,061
2000	40,35	42,02	60,68	36,20	31,95	0,060	0,064	2,48	0,063	0,062
5000	16,82	19,99	38,57	20,81	20,52	0,048	0,056	2,24	0,058	0,057
7000	9,44	10,67	26,12	10,86	10,90	0,044	0,050	2,03	0,051	0,051
10000	7,17	7,64	21,39	8,06	8,12	0,041	0,463	1,90	0,048	0,048
30000	0,97	0,82	4,70	0,86	0,90	0,021	0,021	1,03	0,025	0,026
40000	0,71	0,55	3,03	0,50	0,42	0,021	0,019	0,81	0,019	0,019

Tableau IV.10: Concentration moyenne du ²¹⁴Pb (Bq.m⁻³) [4].

La figure IV.26 montre l'évolution du facteur d'équilibre et la fraction libre en fonction du nombre de Reynolds (Re). Nous remarquons que l'augmentation de la ventilation dans la chambre induit une évolution de la fraction libre et une diminution du facteur d'équilibre. Cela démontre qu'une plus grande partie des descendants du radon est évacuée par la ventilation. Notons que les valeurs moyennes de la fraction libre du ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb et ²¹⁴Bi sont dans l'ordre de 27 %, 9% et 1%, respectivement.

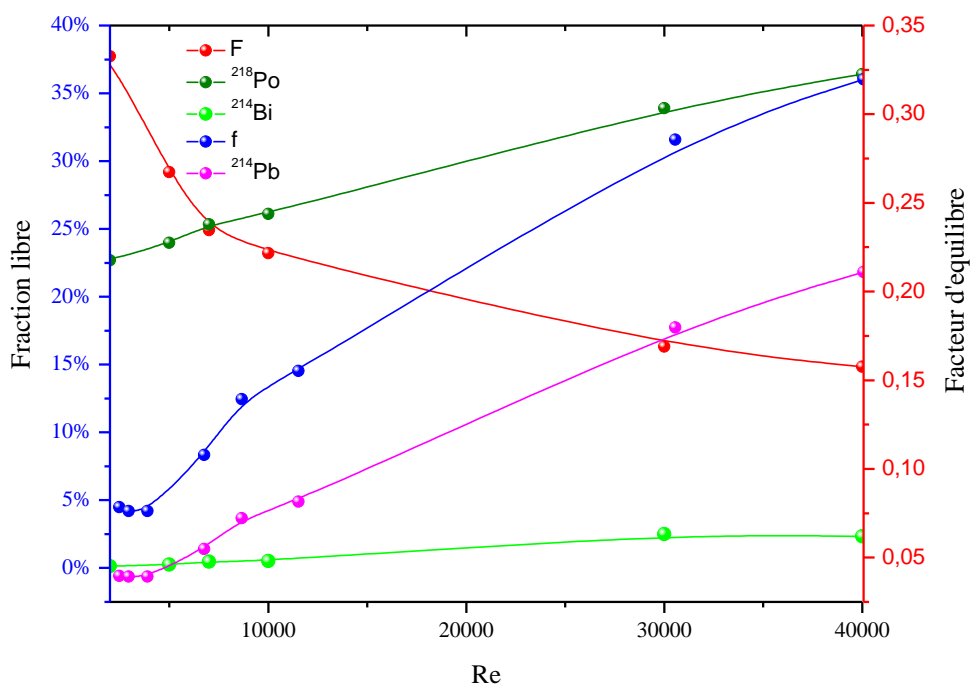


Figure IV.26: Variation du facteur d'équilibre et la fraction libre en fonction de Re [4].

IV.9.2 Influence du taux d'attachement X

Pour montrer l'effet du taux d'attachement (X), Nous avons fixé la vitesse d'entrée d'air et le flux de chaleur à $0,17 \text{ m.s}^{-1}$ et 45 W.m^{-2} , respectivement, et on fait varier le taux d'attachement entre 10 et 110 h^{-1} avec un pas de 10 h^{-1} .

La figure IV.27 montre les iso-concentrations de la fraction libre et attachée du ^{218}Po tracées au plan médian vertical ($Z=1,5 \text{ m}$). Nous observons que la concentration du ^{218}Po libre diminue légèrement quand X augmente. Tandis que, la concentration du ^{218}Po attachée augmente considérablement. Ceci indique que l'augmentation des concentrations des particules d'aérosols dans la chambre induit une diminution de la fraction libre et une évolution de la fraction attachée, du fait de l'attachement des particules nanométriques des descendants du radon dès leur formation sur les aérosols [4].

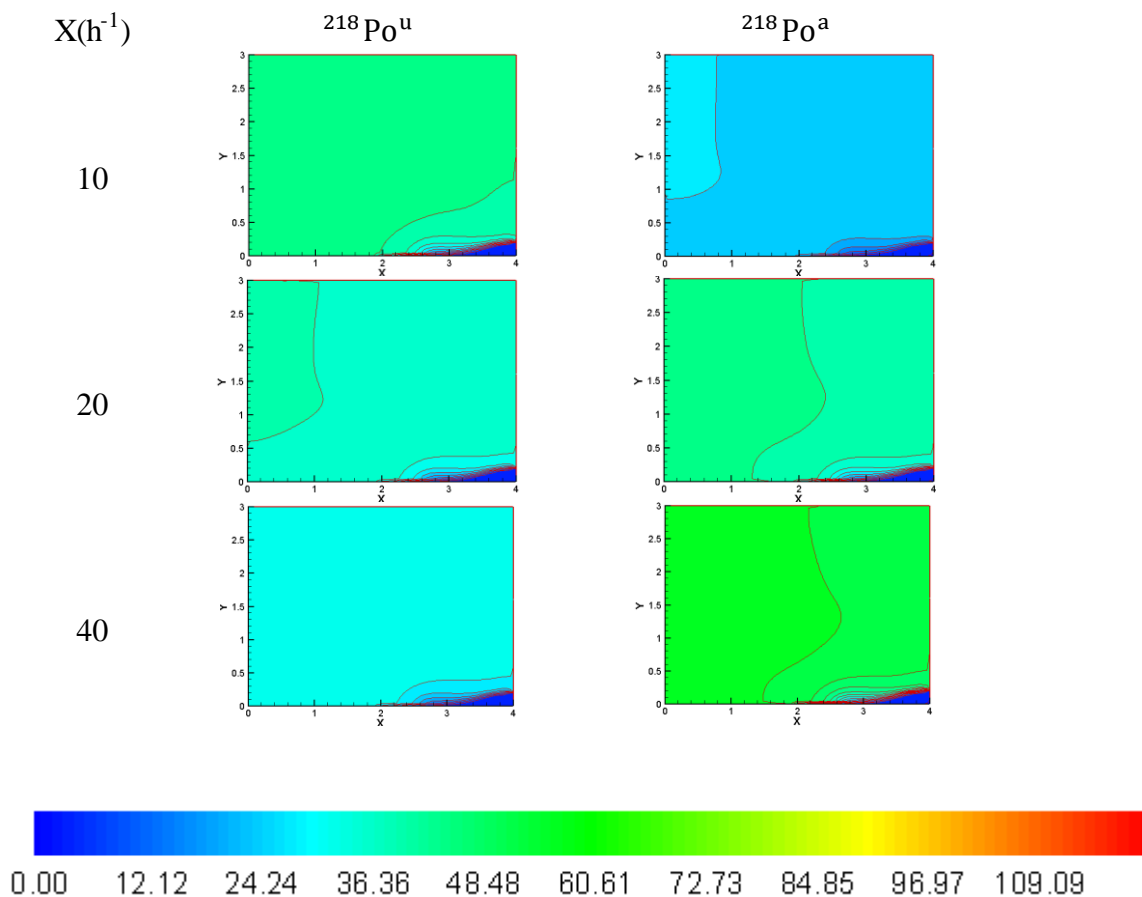


Figure IV.27: Contours de la concentration du ^{218}Po (Bq.m^{-3}) au plan ($Z = 1,50 \text{ m}$) [4].

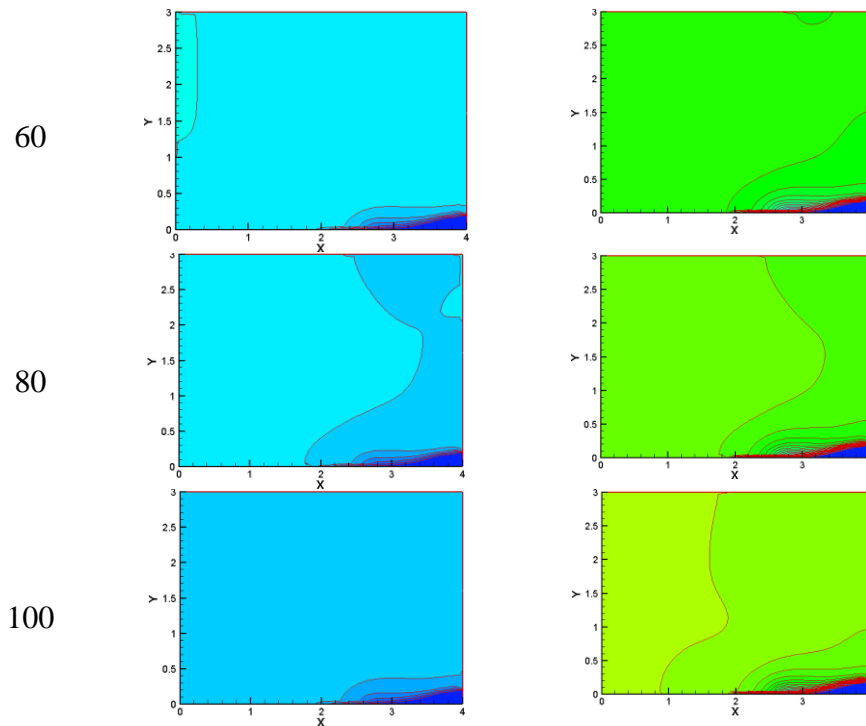


Figure IV.27: continue

Le tableau IV.11 présente les concentrations moyennes des descendantes du radon obtenues pour chaque coefficient d'attachement X. Nous observons que les concentrations des fractions attachées augmentent progressivement en fonction de X, tandis que les concentrations des fractions libres diminuent.

Le taux d'attachement X(h ⁻¹)	Fraction attachée			Fraction libre		
	²¹⁸ Po	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²¹⁸ Po	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi
10	30,02	6,25	2,36	53,07	2,67	0,12
20	51,14	11,31	4,21	45,19	2,46	0,09
30	66,80	15,37	5,67	39,35	2,25	0,07
40	78,88	18,67	6,83	34,85	2,06	0,05
50	88,47	21,39	7,78	31,27	1,90	0,04
60	96,28	23,67	8,57	28,36	1,76	0,03
70	103,03	25,68	9,26	26,00	1,64	0,03
80	108,52	27,34	9,83	23,97	1,53	0,02
90	113,25	28,79	10,32	22,23	1,44	0,02
100	116,92	29,92	10,69	20,66	1,35	0,02
110	120,44	31,02	11,06	19,35	1,27	0,01

Tableau IV.11: Concentration moyenne des descendantes (Bq.m⁻³) du radon pour différentes taux d'attachement [4].

La figure IV.28 montre la variation du facteur d'équilibre et la fraction libre en fonction du coefficient d'attachement. On remarque que l'augmentation des concentrations des particules d'aérosols dans la chambre induit une évolution du facteur d'équilibre et une diminution de la fraction libre. Nous constatons que les descendants du radon: ^{218}Po , ^{214}Pb et ^{214}Po sont attachés aux aérosols de l'air intérieur respectivement avec des pourcentages de 78,86%; 55,56% et 16,44%. Nous remarquons aussi que le pourcentage d'attachement aux aérosols du radionucléide ^{214}Po est plus faible que ceux des autres descendants. Ceci est dû au fait que le ^{214}Po est un descendant du ^{214}Bi , émetteur de particules bêta, qui ont un facteur de recul négligeable [4].

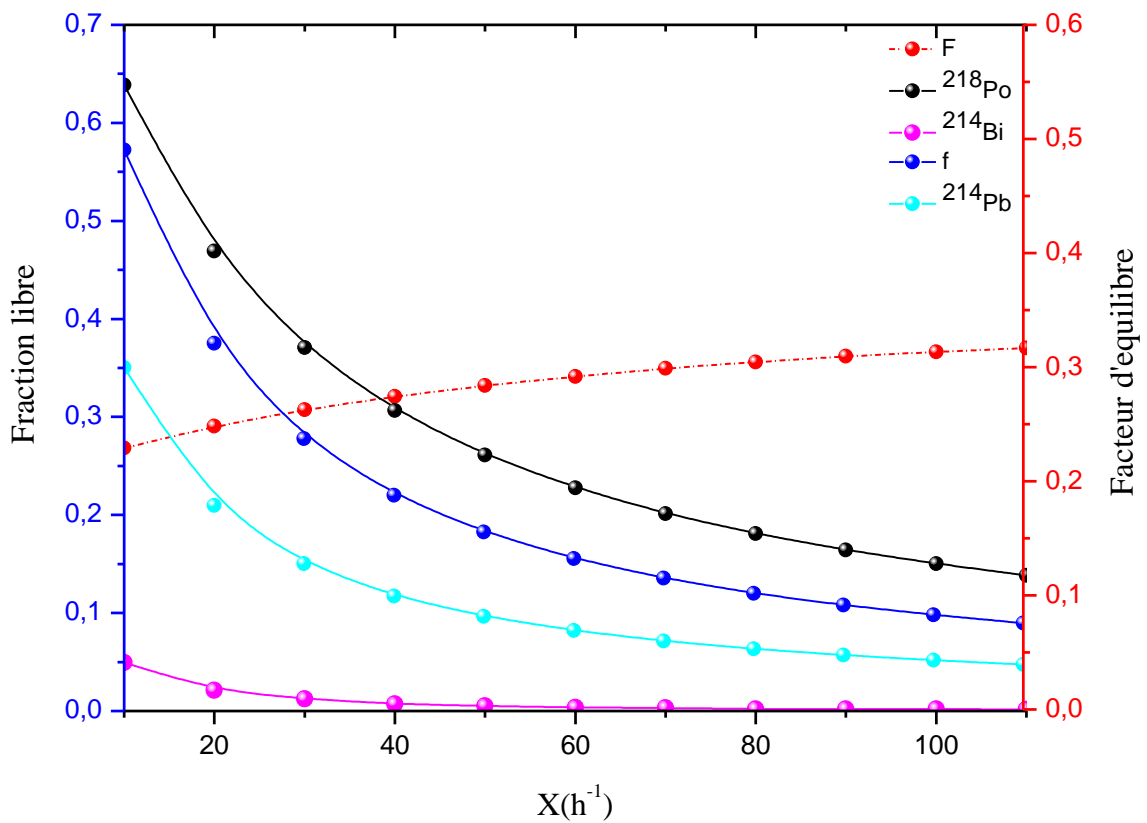


Figure IV.28: Variation du facteur d'équilibre et la fraction libre en fonction de taux d'attachement X [4].

IV.10 Taux d'équivalent de dose dans le système respiratoire de différents groupes d'âges des membres de public dus aux descendants du radon de courte période.

Les taux d'équivalent de dose engagée annuelle par heure d'exposition dus aux descendants du radon de courte période ^{218}Po ($H_T(^{218}\text{Po})$) et ^{214}Po ($H_T(^{214}\text{Po})$) ont été évalués dans le système respiratoire pour les différents groupes d'âge des membres du public suite à l'inhalation de l'air intérieur en utilisant la méthode décrite dans le chapitre II (paragraphe III-6). Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux IV.12, IV.13, IV.14 et IV.15.

Après inhalation de l'air dans la chambre, des quantités de ^{218}Po et ^{214}Po sont déposées dans les régions extra-thoracique et thoracique. Selon le modèle de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR-66) [7], une quantité du ^{218}Po est transférée de la région thoracique (TH) vers la région extra-thoracique (ET), puisque ce radionucléide a une période de 3,05 min. Par conséquent, les taux d'équivalents de dose engagée dans la région extra-thoracique (ET) dus au ^{218}Po sont supérieurs à ceux dans la région thoracique pour tous les groupes d'âges des membres du public (Tableaux IV.12, IV.13, IV.14 et IV.15).

Nous constatons que les taux d'équivalent de dose engagée dans le système respiratoire dus au ^{218}Po sont plus grands que ceux dus au ^{214}Po dans les deux régions ET et TH. Cela est dû au fait que le ^{214}Po a une période très petite ($1,64 \cdot 10^{-4}\text{s}$) comparée au temps d'exposition des différents tissus: il provient essentiellement de la désintégration du ^{218}Po présent dans les régions thoracique et extra-thoracique.

D'après les résultats donnés dans les tableaux IV.12, IV.13, IV.14 et IV.15, on constate que:

- Les équivalents de doses annuelles engagées dus aux ^{218}Po ($H_T(^{218}\text{Po})$) et ^{214}Po ($H_T(^{214}\text{Po})$) sont nettement plus grands dans les tissus des Grosses branches (BB) et les Bronchioles (bb) que dans les tissus d'Alvéoles, interstitiel (AI) de la région thoracique malgré ces derniers tissus (Alvéoles, interstitiel AI) montre une intégrale d'activité plus importante que les tissus de la région extra-thoracique (BB et bb). Cela est dû à la prédominance de masse du tissu: les derniers tissus (Alvéoles, interstitiel AI) montrent les masses plus inférieures que les précédents tissus (Grosses branches BB et les Bronchioles bb).

- Dans la région extra-thoracique les équivalents de doses annuelles engagées dus aux ^{218}Po $H_T(^{218}\text{Po})$ et ^{214}Po $H_T(^{214}\text{Po})$ sont plus élevés dans les tissus nasales postérieures ET_2 (le larynx, le pharynx et la bouche) que dans et les voies nasales antérieures ET_1 , malgré ces dernières tissus présentent des masses plus petites et une intégrale d'activité plus élevée que les tissu premières (nasales postérieures ET_2). Cela est dû au fait que les premières tissus présentent un facteur de pondération de la répartition du détriment radiologique que les dernières tissus (nasales antérieures ET_1).
- les équivalents de doses annuelles engagées $H_T(^{218}\text{Po})$ et $H_T(^{214}\text{Po})$ dans les tissus Bronchiolaires (bb) sont plus grands pour un mâle adulte que pour une femelle adulte, il est dû à la prédominance de l'intégrale d'activité.
- les équivalents de doses annuelles engagées $H_T(^{218}\text{Po})$ et $H_T(^{214}\text{Po})$ sont négligeables dans les tissus Ganglions lymphatiques de la région thoracique (LN_{TH}) et de la région extra-thoracique (LN_{ET}). C'est dû au fait que ces tissus présentent des faibles intégrales d'activités et faibles facteurs de pondération de la répartition du détriment radiologique.

Les doses effectives annuelles dues aux descendants du radon suite à l'inhalation de l'air intérieur par les membres de public dans la chambre étudiée ont été évalués en utilisant le modèle basé sur l'équation (II-74) et la formule donnée par Le Comité Scientifique des Nations Unies sur les Effets des Radiations Atomiques, (UNSCEAR-2000) [8] (équation II-75). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.16.

Les doses Effectives moyennes obtenues en utilisant le modèle exposée ici (l'équation II-74) pour différents groupes d'âge d'individus dans l'air intérieur ont été trouvées en bon accord avec ceux obtenues en utilisant le modèle d'UNSCEAR-2000 [8] pour les membres du public générale.

Re	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	AI	bb	BB	ET ₁	ET ₂	AI	bb	BB	ET ₁	ET ₂
500	$1,04.10^{-8}$	$1,47.10^{-6}$	$4,29.10^{-7}$	$4,73.10^{-7}$	$1,77.10^{-5}$	$2,95.10^{-15}$	$4,36.10^{-13}$	$1,18.10^{-13}$	$1,33.10^{-13}$	$6,43.10^{-12}$
1000	$1,03.10^{-8}$	$1,46.10^{-6}$	$4,25.10^{-7}$	$4,69.10^{-7}$	$1,76.10^{-5}$	$2,93.10^{-15}$	$4,33.10^{-13}$	$1,17.10^{-13}$	$1,32.10^{-13}$	$6,38.10^{-12}$
2000	$1,02.10^{-8}$	$1,46.10^{-6}$	$4,23.10^{-7}$	$4,67.10^{-7}$	$1,75.10^{-5}$	$2,92.10^{-15}$	$4,31.10^{-13}$	$1,16.10^{-13}$	$1,31.10^{-13}$	$6,35.10^{-12}$
5000	$9,92.10^{-9}$	$1,41.10^{-6}$	$4,11.10^{-7}$	$4,53.10^{-7}$	$1,70.10^{-5}$	$2,83.10^{-15}$	$4,18.10^{-13}$	$1,13.10^{-13}$	$1,27.10^{-13}$	$6,16.10^{-12}$
7000	$9,42.10^{-9}$	$1,34.10^{-6}$	$3,90.10^{-7}$	$4,30.10^{-7}$	$1,61.10^{-5}$	$2,69.10^{-15}$	$3,97.10^{-13}$	$1,07.10^{-13}$	$1,21.10^{-13}$	$5,85.10^{-12}$
10000	$9,18.10^{-9}$	$1,31.10^{-6}$	$3,80.10^{-7}$	$4,19.10^{-7}$	$1,57.10^{-5}$	$2,62.10^{-15}$	$3,86.10^{-13}$	$1,04.10^{-13}$	$1,18.10^{-13}$	$5,70.10^{-12}$
30000	$7,37.10^{-9}$	$1,05.10^{-6}$	$3,05.10^{-7}$	$3,37.10^{-7}$	$1,26.10^{-5}$	$2,10.10^{-15}$	$3,10.10^{-13}$	$8,42.10^{-14}$	$9,47.10^{-14}$	$4,58.10^{-12}$
40000	$7,32.10^{-9}$	$1,04.10^{-6}$	$3,03.10^{-7}$	$3,34.10^{-7}$	$1,25.10^{-5}$	$2,09.10^{-15}$	$3,08.10^{-13}$	$8,36.10^{-14}$	$9,41.10^{-14}$	$4,55.10^{-12}$

Tableau IV.12: Taux d'équivalent de dose engagée (Sv.an⁻¹) dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des homes suite à l'inhalation de l'air dans la chambre [4].

Re	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	AI	bb	BB	ET ₁	ET ₂	AI	bb	BB	ET ₁	ET ₂
500	$7,39.10^{-9}$	$1,25.10^{-6}$	$3,99.10^{-7}$	$3,84.10^{-7}$	$1,40.10^{-5}$	$2,14.10^{-15}$	$3,55.10^{-13}$	$1,03.10^{-13}$	$1,10.10^{-13}$	$5,10.10^{-12}$
1000	$7,34.10^{-9}$	$1,24.10^{-6}$	$3,96.10^{-7}$	$3,81.10^{-7}$	$1,39.10^{-5}$	$2,12.10^{-15}$	$3,52.10^{-13}$	$1,02.10^{-13}$	$1,10.10^{-13}$	$5,06.10^{-12}$
2000	$7,31.10^{-9}$	$1,24.10^{-6}$	$3,94.10^{-7}$	$3,80.10^{-7}$	$1,38.10^{-5}$	$2,11.10^{-15}$	$3,50.10^{-13}$	$1,02.10^{-13}$	$1,09.10^{-13}$	$5,04.10^{-12}$
5000	$7,08.10^{-9}$	$1,20.10^{-6}$	$3,82.10^{-7}$	$3,68.10^{-7}$	$1,34.10^{-5}$	$2,05.10^{-15}$	$3,40.10^{-13}$	$9,92.10^{-14}$	$1,06.10^{-13}$	$4,89.10^{-12}$
7000	$6,73.10^{-9}$	$1,14.10^{-6}$	$3,63.10^{-7}$	$3,50.10^{-7}$	$1,27.10^{-5}$	$1,95.10^{-15}$	$3,23.10^{-13}$	$9,42.10^{-14}$	$1,00.10^{-13}$	$4,64.10^{-12}$
10000	$6,55.10^{-9}$	$1,11.10^{-6}$	$3,54.10^{-7}$	$3,40.10^{-7}$	$1,24.10^{-5}$	$1,90.10^{-15}$	$3,14.10^{-13}$	$9,17.10^{-14}$	$9,83.10^{-14}$	$4,52.10^{-12}$
30000	$5,26.10^{-9}$	$8,95.10^{-7}$	$2,84.10^{-7}$	$2,73.10^{-7}$	$1,00.10^{-5}$	$1,52.10^{-15}$	$2,52.10^{-13}$	$7,37.10^{-14}$	$7,89.10^{-14}$	$3,63.10^{-12}$
40000	$5,23.10^{-9}$	$8,89.10^{-7}$	$2,82.10^{-7}$	$2,71.10^{-7}$	$9,93.10^{-6}$	$1,51.10^{-15}$	$2,51.10^{-13}$	$7,32.10^{-14}$	$7,84.10^{-14}$	$3,60.10^{-12}$

Tableau IV.13: Taux d'équivalent de dose engagée (Sv.an⁻¹) dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des femmes suite à l'inhalation de l'air dans la chambre [4].

Re	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	AI	bb	BB	ET ₁	ET ₂	AI	bb	BB	ET ₁	ET ₂
500	$1,40 \cdot 10^{-8}$	$1,55 \cdot 10^{-6}$	$4,66 \cdot 10^{-7}$	$6,28 \cdot 10^{-7}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$	$3,99 \cdot 10^{-15}$	$4,36 \cdot 10^{-13}$	$1,33 \cdot 10^{-13}$	$1,77 \cdot 10^{-13}$	$8,87 \cdot 10^{-12}$
1000	$1,39 \cdot 10^{-8}$	$1,54 \cdot 10^{-6}$	$4,62 \cdot 10^{-7}$	$6,23 \cdot 10^{-7}$	$2,49 \cdot 10^{-5}$	$3,96 \cdot 10^{-15}$	$4,33 \cdot 10^{-13}$	$1,32 \cdot 10^{-13}$	$1,76 \cdot 10^{-13}$	$8,80 \cdot 10^{-12}$
2000	$1,38 \cdot 10^{-8}$	$1,53 \cdot 10^{-6}$	$4,60 \cdot 10^{-7}$	$6,21 \cdot 10^{-7}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$3,94 \cdot 10^{-15}$	$4,31 \cdot 10^{-13}$	$1,31 \cdot 10^{-13}$	$1,75 \cdot 10^{-13}$	$8,77 \cdot 10^{-12}$
5000	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$4,46 \cdot 10^{-7}$	$6,02 \cdot 10^{-7}$	$2,41 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-15}$	$4,18 \cdot 10^{-13}$	$1,27 \cdot 10^{-13}$	$1,70 \cdot 10^{-13}$	$8,50 \cdot 10^{-12}$
7000	$1,27 \cdot 10^{-8}$	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$4,24 \cdot 10^{-7}$	$5,72 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{-5}$	$3,63 \cdot 10^{-15}$	$3,97 \cdot 10^{-13}$	$1,21 \cdot 10^{-13}$	$1,61 \cdot 10^{-13}$	$8,07 \cdot 10^{-12}$
10000	$1,24 \cdot 10^{-8}$	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$4,13 \cdot 10^{-7}$	$5,57 \cdot 10^{-7}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$3,54 \cdot 10^{-15}$	$3,86 \cdot 10^{-13}$	$1,18 \cdot 10^{-13}$	$1,57 \cdot 10^{-13}$	$7,86 \cdot 10^{-12}$
30000	$1,00 \cdot 10^{-8}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$3,31 \cdot 10^{-7}$	$4,47 \cdot 10^{-7}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-15}$	$3,10 \cdot 10^{-13}$	$9,48 \cdot 10^{-14}$	$1,26 \cdot 10^{-13}$	$6,31 \cdot 10^{-12}$
40000	$9,93 \cdot 10^{-9}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$3,29 \cdot 10^{-7}$	$4,44 \cdot 10^{-7}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$2,82 \cdot 10^{-15}$	$3,08 \cdot 10^{-13}$	$9,41 \cdot 10^{-14}$	$1,25 \cdot 10^{-13}$	$6,27 \cdot 10^{-12}$

Tableau IV.14: Taux d'équivalent de dose engagée ($\text{Sv} \cdot \text{an}^{-1}$) dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des enfants 10 ans suite à l'inhalation de l'air dans la chambre [4].

Re	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	AI	bb	BB	ET ₁	ET ₂	AI	bb	BB	ET ₁	ET ₂
500	$2,14 \cdot 10^{-8}$	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$5,62 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$4,29 \cdot 10^{-5}$	$6,06 \cdot 10^{-15}$	$4,73 \cdot 10^{-13}$	$1,55 \cdot 10^{-13}$	$3,03 \cdot 10^{-13}$	$1,57 \cdot 10^{-11}$
1000	$2,12 \cdot 10^{-8}$	$1,68 \cdot 10^{-6}$	$5,57 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$4,25 \cdot 10^{-5}$	$6,01 \cdot 10^{-15}$	$4,69 \cdot 10^{-13}$	$1,54 \cdot 10^{-13}$	$3,00 \cdot 10^{-13}$	$1,56 \cdot 10^{-11}$
2000	$2,11 \cdot 10^{-8}$	$1,68 \cdot 10^{-6}$	$5,55 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$4,23 \cdot 10^{-5}$	$5,99 \cdot 10^{-15}$	$4,67 \cdot 10^{-13}$	$1,53 \cdot 10^{-13}$	$2,99 \cdot 10^{-13}$	$1,55 \cdot 10^{-11}$
5000	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$	$5,38 \cdot 10^{-7}$	$9,92 \cdot 10^{-7}$	$4,11 \cdot 10^{-5}$	$5,81 \cdot 10^{-15}$	$4,53 \cdot 10^{-13}$	$1,48 \cdot 10^{-13}$	$2,90 \cdot 10^{-13}$	$1,50 \cdot 10^{-11}$
7000	$1,95 \cdot 10^{-8}$	$1,54 \cdot 10^{-6}$	$5,11 \cdot 10^{-7}$	$9,42 \cdot 10^{-7}$	$3,90 \cdot 10^{-5}$	$5,51 \cdot 10^{-15}$	$4,30 \cdot 10^{-13}$	$1,41 \cdot 10^{-13}$	$2,75 \cdot 10^{-13}$	$1,43 \cdot 10^{-11}$
10000	$1,90 \cdot 10^{-8}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$4,98 \cdot 10^{-7}$	$9,17 \cdot 10^{-7}$	$3,80 \cdot 10^{-5}$	$5,37 \cdot 10^{-15}$	$4,19 \cdot 10^{-13}$	$1,37 \cdot 10^{-13}$	$2,68 \cdot 10^{-13}$	$1,39 \cdot 10^{-11}$
30000	$1,52 \cdot 10^{-8}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$4,00 \cdot 10^{-7}$	$7,37 \cdot 10^{-7}$	$3,05 \cdot 10^{-5}$	$4,31 \cdot 10^{-15}$	$3,37 \cdot 10^{-13}$	$1,10 \cdot 10^{-13}$	$2,15 \cdot 10^{-13}$	$1,12 \cdot 10^{-11}$
40000	$1,51 \cdot 10^{-8}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$3,97 \cdot 10^{-7}$	$7,32 \cdot 10^{-7}$	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$4,28 \cdot 10^{-15}$	$3,34 \cdot 10^{-13}$	$1,09 \cdot 10^{-13}$	$2,14 \cdot 10^{-13}$	$1,11 \cdot 10^{-11}$

Tableau IV.15: Taux d'équivalent de dose engagée ($\text{Sv} \cdot \text{an}^{-1}$) dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des enfants 5 ans suite à l'inhalation de l'air dans la chambre [4].

Re	UNSCEAR-2000 [8]	Dose efficaces (Sv.an ⁻¹ par heure d'exposition)				
		Cette méthode				
		H-adulte	f-adulte	Enfant -10	Enfant-5	Moyenne
500	$8,47.10^{-7}$	$6,65.10^{-7}$	$5,91.10^{-7}$	$8,87.10^{-7}$	$1,33.10^{-6}$	$8,69.10^{-7}$
1000	$8,40.10^{-7}$	$6,60.10^{-7}$	$5,87.10^{-7}$	$8,80.10^{-7}$	$1,32.10^{-6}$	$8,62.10^{-7}$
2000	$8,36.10^{-7}$	$6,57.10^{-7}$	$5,84.10^{-7}$	$8,77.10^{-7}$	$1,31.10^{-6}$	$8,58.10^{-7}$
5000	$8,11.10^{-7}$	$6,37.10^{-7}$	$5,67.10^{-7}$	$8,50.10^{-7}$	$1,27.10^{-6}$	$8,32.10^{-7}$
7000	$7,70.10^{-7}$	$6,05.10^{-7}$	$5,38.10^{-7}$	$8,07.10^{-7}$	$1,21.10^{-6}$	$7,90.10^{-7}$
10000	$7,50.10^{-7}$	$5,90.10^{-7}$	$5,24.10^{-7}$	$7,86.10^{-7}$	$1,18.10^{-6}$	$7,70.10^{-7}$
30000	$6,02.10^{-7}$	$4,73.10^{-7}$	$4,21.10^{-7}$	$6,31.10^{-7}$	$9,48.10^{-7}$	$6,18.10^{-7}$
40000	$5,98.10^{-7}$	$4,70.10^{-7}$	$4,18.10^{-7}$	$6,27.10^{-7}$	$9,41.10^{-7}$	$6,14.10^{-7}$

Tableau IV.16: Résultats obtenus pour la dose efficace due aux descendants du radon ²¹⁸Po et ²¹⁴Po pour différents groupes d'âges vivent dans la chambre en utilisant notre méthode et le modèle de l'UNSCEAR-2000 [4].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux applications mettant en œuvre notre démarche numérique. La première partie concerne l'étude de l'influence de la ventilation sur la qualité de l'air et sur le confort thermique dans des pièces ventilées en régime turbulent. La paroi gauche de ces pièces est une paroi opaque conductrice d'une épaisseur de 1 cm. Sa surface extérieure est maintenue à un flux de chaleur constant. Les autres parois sont adiabatiques et imperméables. Dans le but d'examiner la sensibilité des paramètres pertinents de ventilation (ϵ_T , ϵ_C et I_{QAI}), nous avons considéré différentes valeurs des nombres de Rayleigh thermique (Ra) et de Reynolds (Re). Dans ce cadre, nous avons aussi étudié le rôle de l'emplacement des ouvertures d'entrée et de sortie d'air. Les résultats obtenus ont indiqué que les nombres de Rayleigh et de Reynolds jouent un rôle important sur les distributions de température et de concentration du radon. Egalement, l'emplacement des bouches des ouvertures influence considérablement l'efficacité de la ventilation. Nous avons trouvé que la configuration 4 fournit la meilleure efficacité que les autres. Ceci s'explique par le fait que la grille de sortie d'air est très proche des sources de chaleur. En termes de qualité de l'air les quatre configurations assurent une bonne qualité de l'air. Enfin, nous avons trouvé que les résultats analytiques s'accordent parfaitement avec ceux numériques. Dans la deuxième partie, nous avons aussi examiné l'effet des nombres de Re, Ra et du coefficient d'attachement X sur les distributions des descendantes du radon ainsi que sur le facteur d'équilibre. Les résultats ont montré que le nombre de Re et le coefficient d'attachement X ont une grande influence à la

fois sur la distribution des descendants du radon et sur le facteur d'équilibre. Par ailleurs, un nouveau modèle pour la détermination de la dose efficace annuelle due au ^{218}Po et ^{214}Po , descendants du radon de courte période, a été développé et testé.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons, au premier lieu, à l'influence de la ventilation, la température et l'humidité relative sur la concentration et la distribution du radon et ses descendants dans une maison ventilée. Nous achevons ce chapitre en déterminant la dose efficace annuelle due au ^{218}Po et ^{214}Po , descendants du radon de courte période.

References

- [1] S. V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Taylor & Francis, (1980).
- [2] B. P. Leonard, A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 19, 59–98, (1979).
- [3] X. D. Liu, S. Osher, T. Chan, Weighted essentially non-oscillatory schemes, J. Comp. Physics, 115, 200-212, (1994).
- [4] R. Rabi, L. Oufni, M. Amrane, Modeling of indoor ^{222}Rn distribution in ventilated room and resulting radiation doses measured in the respiratory tract, Journal of Radiation Research and Applied Sciences 10, 273-282, (2017).
- [5] R. Rabi, L. Oufni, A numerical study of indoor ^{222}Rn -air quality in a ventilated room, projet de publication à soumettre à une revue international dans le courant de 2018.
- [6] W. Zhou, T. Iida, J. Moriizumi, T. Aoyagi, Simulation of the concentrations and distributions of indoor radon and thoron. Radiat. Prot. Dosim. 93, 357–368, (2001).
- [7] ICRP, Human respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Pergamon, Oxford, UK, (1994).
- [8] UNSCEAR, Sources and effects of ionising radiation. Report to the General Assembly, Volume I. New York, (2000).

CHAPITRE V:

**ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DE L'EFFET
DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES SUR LE
RADON ET SES DESCENDANTS DANS UNE HABITATION**

Introduction

Dans ce chapitre, nous analysons l'influence des paramètres météorologiques sur le comportement du radon et ses descendants à l'intérieur d'un bâtiment. L'étude portera essentiellement sur l'effet de la ventilation, la température et l'humidité relative sur la concentration et la distribution du radon et ses descendants dans l'air intérieur. Une comparaison sera faite pour valider le modèle de la simulation par la méthode numérique avec la solution analytique et les résultats de mesure. Enfin, nous déterminons aussi l'équivalent de dose annuelle engagée dans les tissus du système respiratoire suite à l'inhalation des produits de filiation de courte période du radon.

V.1. Modèle physique

Nous considérons un domaine rectangulaire tridimensionnel de longueur 20 m et de hauteur 6 m, comme illustré sur la figure V.1. Une maison qui est modélisée explicitement avec sa forme géométrique dans le centre du domaine. Le plan de la maison est illustré sur la figure V.2. Elle se compose d'un salon, deux chambres, une cuisine, une salle de bain et une toilette dont les surfaces sont respectivement 28, 20, 12, 2 et 2 m².

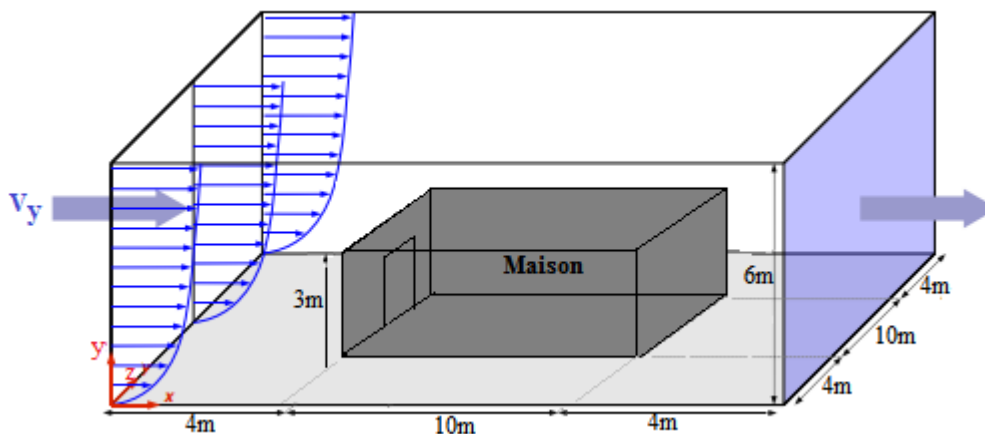


Figure V.1: Géométrie du module physique.

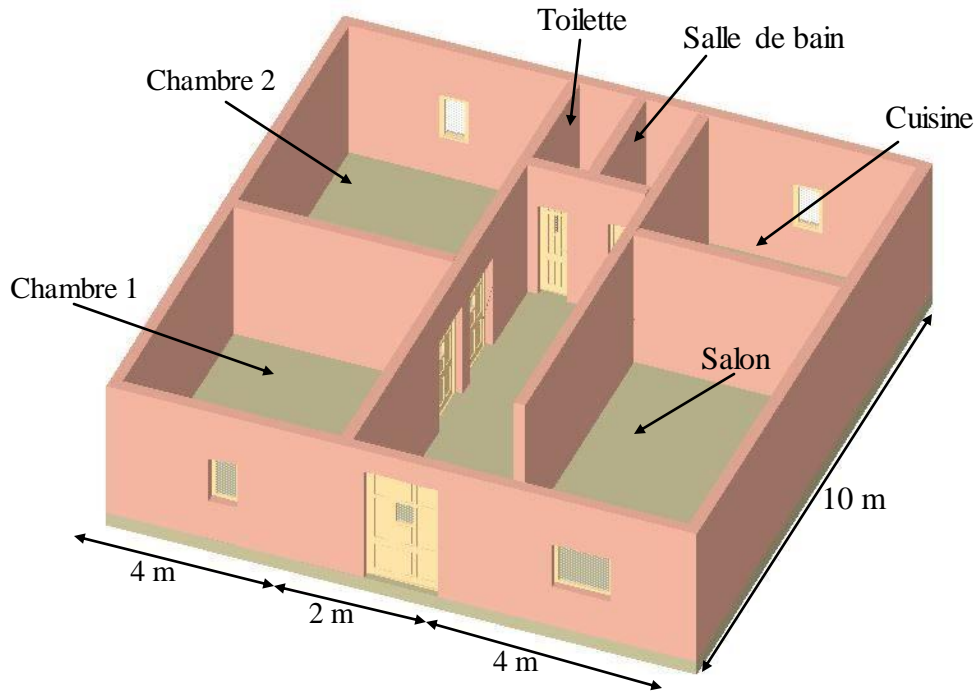


Figure V.2: Géométrie du plan de la maison.

V.2. Schémas numériques et méthode de résolution

Les équations de conservation décrites dans le chapitre II ont été discrétisées par la méthode des volumes finis. Le maillage employé est quadratique structuré (Figure V.3). Les termes d'advection sont discrétisés en utilisant le schéma QUICK. Les termes de diffusion sont traités à l'aide du schéma centré d'ordre 2 (second-order central difference scheme). L'algorithme SIMPLER a été utilisé pour le couplage pression-vitesse.

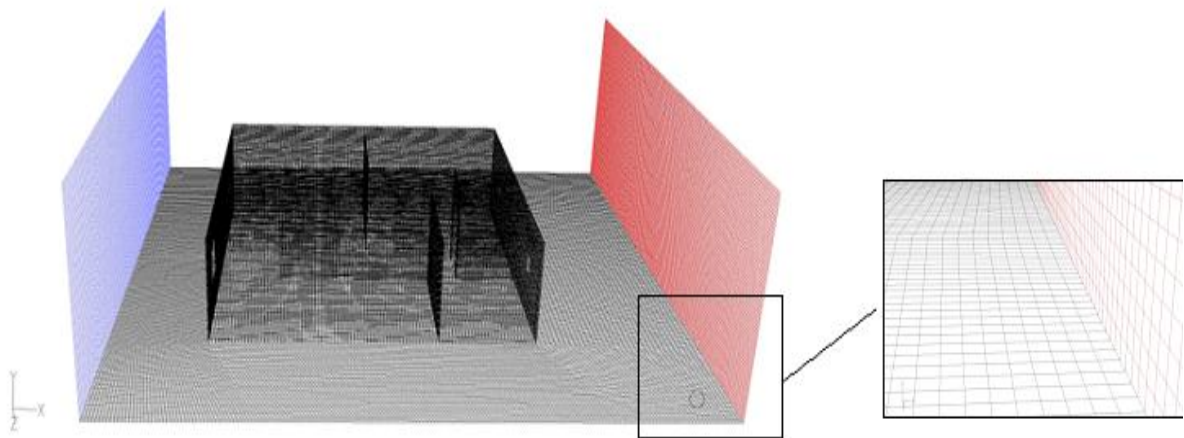


Figure V.3: Maillage quadratique structuré.

V.3. Conditions aux limites

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable dépendante.

V.3.1. Conditions d'entrée

Le profil de la vitesse du vent imposé à l'entrée du domaine est décrit par le modèle de la loi Log [1]:

$$u(y) = \frac{u_0}{k} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (\text{V.1})$$

où k est la constante de Von Karman ($k=0,4$), y est la distance à la surface, y_0 est la rugosité de la surface aérodynamique et u_0 est la vitesse de friction.

L'énergie cinétique turbulente k et la viscosité cinématique sont données respectivement par [2] :

$$k(y) = \frac{u_0^2}{\sqrt{c_\mu}}, \quad \varepsilon(y) = \frac{u_0^3}{k(y + y_0)} \quad (\text{V.2})$$

V.3.2. Conditions de sortie et de symétrie

La sortie et les faces latérales du domaine sont caractérisées par des conditions de symétrie: condition de flux nuls pour les scalaires (condition de type Neumann homogène) et vitesse normale nulle.

V.3.3. Conditions des parois et sol

V.3.3.1. Concentration du radon

Les taux d'exhalations des matériaux de construction qui sont mesurés dans le chapitre précédent sont utilisés comme conditions aux limites dans le modèle de simulation (CFD).

V.3.3.2. La température

Pour étudier l'influence de la température sur la concentration du radon, nous avons fixé la température des murs à une valeur constante qui varie entre 15° et 22° C.

V.3.3.3. L'humidité relative

L'humidité relative est définie dans le modèle en déterminant la fraction de masse de la vapeur d'eau. La fraction de masse de la vapeur d'eau est définie comme le rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse totale dans un volume spécifique. Tout volume spécifique contient du radon, de la vapeur d'eau et de l'air. Par conséquent, la masse totale est la somme des masses de toutes ces espèces.

L'humidité relative est définie comme le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau à la pression de vapeur saturée de l'eau à une température donnée [3].

$$RH = \frac{P_{H_2O}}{P_{Sat}} \times 100 \quad (V.3)$$

où RH est l'humidité relative du mélange, le P_{H_2O} est la pression partielle de la vapeur d'eau dans le mélange, et P_{Sat} est la pression de vapeur de saturation de l'eau à la température du mélange.

Étant donné que la pression de vapeur saturée de l'eau change avec la température, pour une valeur spécifique d'humidité relative, la pression partielle de la vapeur d'eau varie également avec les variations de température. Cela signifie que la fraction de masse de la vapeur d'eau à une humidité relative spécifique varie selon la température.

La pression de vapeur saturée de l'eau à une température donnée peut être obtenue à partir de l'équation d'Antoine [3]:

$$P_{sat} = 10^{\left(A - \frac{B}{C+T}\right)} \quad (V.4)$$

où P_{Sat} est une pression de vapeur saturée en mmHg, T est la température en Celsius et A, B et C sont des constantes.

Pour la température de l'eau entre 1° C et 100° C, A, B et C sont 8,071, 1730,63 et 233,426 respectivement.

mmHg peut être converti en Pascal comme suit:

$$p(\text{Pa}) = \frac{p(\text{mmHg})}{13,595 \times 9,807} = \frac{p(\text{mmHg})}{133,322} \quad (V.5)$$

Par conséquent, la pression de vapeur saturée d'eau entre 1° C et 100° C peut être obtenue à partir de l'expression suivante:

$$p(\text{Pa}) = \frac{10^{\left(8,071 - \frac{1730,63}{233,43 + T(^{\circ}\text{C})}\right)}}{133,322} \quad (\text{V.6})$$

La fraction de masse de vapeur d'eau dans le mélange pour $T = 15^{\circ}\text{C}$ et $\text{RH} = 30\%$ est calculée en utilisant l'équation:

$$T = 15^{\circ}\text{C} \rightarrow P_{\text{sat}} = \frac{10^{\left(8,071 - \frac{1730,63}{233,426 + 15}\right)}}{133,322} = 1697,65 \text{ Pa} \quad (\text{V.7})$$

Ainsi, en utilisant la définition de la pression partielle des rendements de la vapeur d'eau :

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{sat}} \times \text{RH} \times 0,01 = 1697,65 \times 30 \times 0,01 = 509,30 \text{ Pa} \quad (\text{V.8})$$

La teneur en radon est négligeable par rapport à la vapeur d'eau et l'air, par conséquent, la pression partielle du radon est approximativement nulle.

La pression partielle d'air peut être calculée à l'aide de la loi de Dalton sur les pressions partielles. Selon cette loi:

$$p_{\text{Total}} = p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{Air}} + \overbrace{p_{\text{radon}}}^{\approx 0} = p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{Air}} \quad (\text{V.9})$$

Les calculs sont effectués à la pression atmosphérique, donc la pression totale est d'environ 101,3 kPa. La pression partielle d'air devient:

$$p_{\text{Air}} = p_{\text{Total}} - p_{\text{H}_2\text{O}} = 101300,0 - 509,30 = 100790,70 \text{ Pa} \quad (\text{V.10})$$

À la pression atmosphérique et à la température intérieure, l'air et la vapeur d'eau se comportent approximativement comme un gaz parfait. Pour tout volume (V), la masse de chaque espèce peut être obtenue à partir de la loi du gaz parfait comme suit:

$$m = \frac{pV}{RT} \quad (\text{V.11})$$

où p est la pression absolue en Pa, V est le volume en m^3 , R est la constante de gaz en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, T est la température absolue en K et m est la masse de gaz en kg.

Les constantes de gaz pour la vapeur d'eau et l'air sont d'environ $461,50 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $287,00 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ respectivement [3].

La fraction de masse de la vapeur d'eau peut être calculée comme suit:

$$\text{MF}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{Total}}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{Air}}} = \frac{1}{1 + \frac{m_{\text{Air}}}{m_{\text{H}_2\text{O}}}} \quad (\text{V.12})$$

avec MF est la fraction de masse.

En utilisant la loi idéale sur le gaz:

$$MF_{H_2O} = \frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{pV}{RT}\right)_{Air}}{\left(\frac{pV}{RT}\right)_{H_2O}}} = \frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{p}{R}\right)_{Air}}{\left(\frac{p}{R}\right)_{H_2O}}} = \frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{100790,7}{287}\right)_{Air}}{\left(\frac{509,3}{461,5}\right)_{H_2O}}} = 0,00313 \text{ ou } 0,31\% \text{ (I.13)}$$

Pour les autres cas, les calculs sont effectués de manière similaire. Les résultats sont présentés dans le tableau V.1:

RH(%)	T(°C)	P _{sat} (Pa)	P _{H₂O} (Pa)	P _{Air} (Pa)	MF _{H₂O}
30	15	1697,65	509,30	100790,70	0,00313
	17	2055,75	616,73	100683,27	0,00379
	20	2478,18	743,45	100556,55	0,00458
	22	2800,18	840,05	100459,95	0,00517
	25	3158,04	947,41	100352,59	0,00584
40	15	1697,65	679,06	100620,94	0,00418
	17	2055,75	822,30	100477,70	0,00506
	20	2478,18	991,27	100308,73	0,00611
	22	2800,18	1120,07	100179,93	0,00690
	25	3158,04	1263,22	100036,78	0,00779
...
80	15	1697,65	1358,12	99941,88	0,00838
	17	2055,75	1644,60	99655,40	0,01016
	20	2478,18	1982,54	99317,46	0,01226
	22	2800,18	2240,14	99059,86	0,01387
	25	3158,04	2526,43	98773,57	0,01566

Tableau V.1: Fraction massique de la vapeur d'eau pour différentes températures et humidités relatives.

V.4. Résultats numériques

V.4.1. Effet du maillage sur les solutions numériques

La sensibilité des résultats par rapport au maillage a été vérifiée avant de passer aux calculs. Pour ce faire, nous avons pris en compte trois différents maillages (2 026 990, 2 902 409 et 3 777 828 cellules). Les résultats obtenus après la convergence pour chaque maillage sont présentés dans le tableau V.2. Il est clair que la variation de la concentration moyenne du radon entre les maillages 2 026 990 et 3 777 828 est négligeable.

Maillage	Chambre 1	Chambre 2	Salle de bain	Toilette	Cuisine	Salon
2 026 990	20,73	22,82	90,27	68,77	19,67	11,52
2 902 409	20,64	22,72	89,87	68,47	19,58	11,46
3 777 828	20,58	22,65	89,60	68,27	19,52	11,42

Tableau V.2: Tests de précision avec T=25° C et RH=30% [4].

V.4.2. Effets de la ventilation

Afin d'étudier l'effet de la ventilation sur la concentration et la distribution du radon et ses descendants à l'intérieur de la maison, nous avons pris en considération deux cas: les fenêtres de maison fermées (exemple: en hiver) et le cas où elles sont ouvertes (exemple: en été).

Les figures V.4 et V.5 montrent les iso-concentrations du radon dans la maison pour les deux cas étudiés respectivement, tracés au plan médian horizontal (Y=1,5 m). Nous observons que la concentration du radon diminue en augmentant la ventilation. Cette diminution est provoquée par l'introduction de l'air frais. Au milieu de la maison, la concentration est pratiquement homogène. Nous constatons aussi que les pièces de service sont plus polluées que les pièces principales (séjour, chambres). Cela est dû au fait que le taux de ventilation diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée de la maison (Figure. V.6).

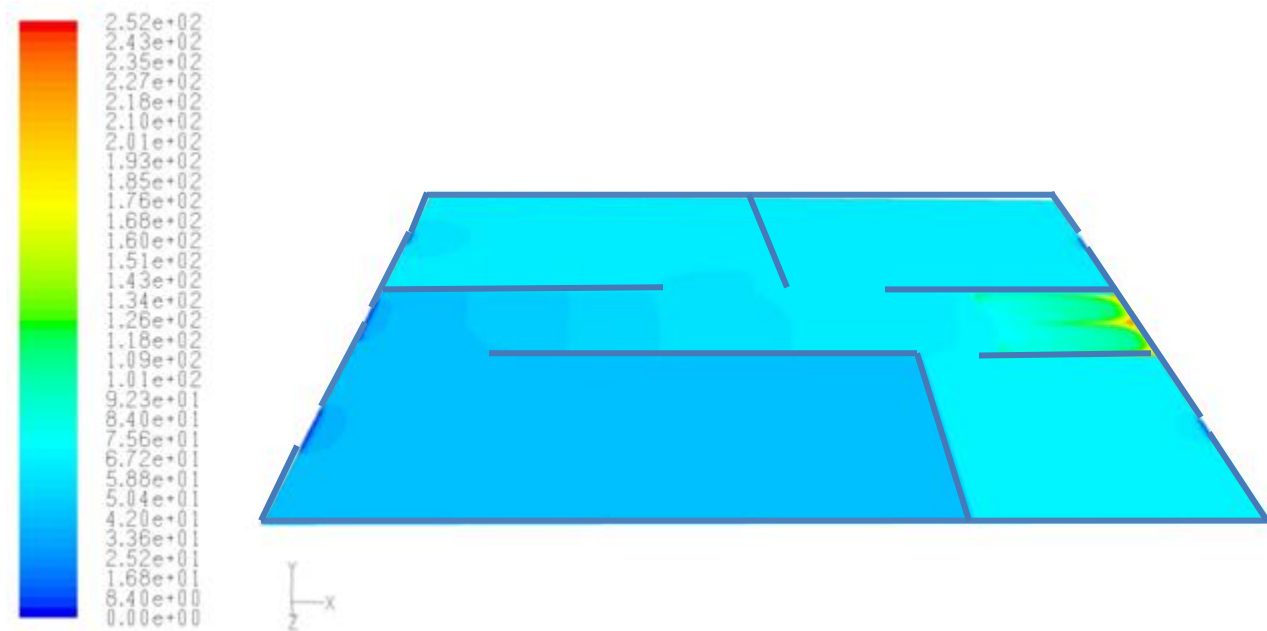


Figure V.4: Iso-concentrations du radon ($Bq.m^{-3}$) au plan (Y = 1,50 m) dans la maison fermée [4].

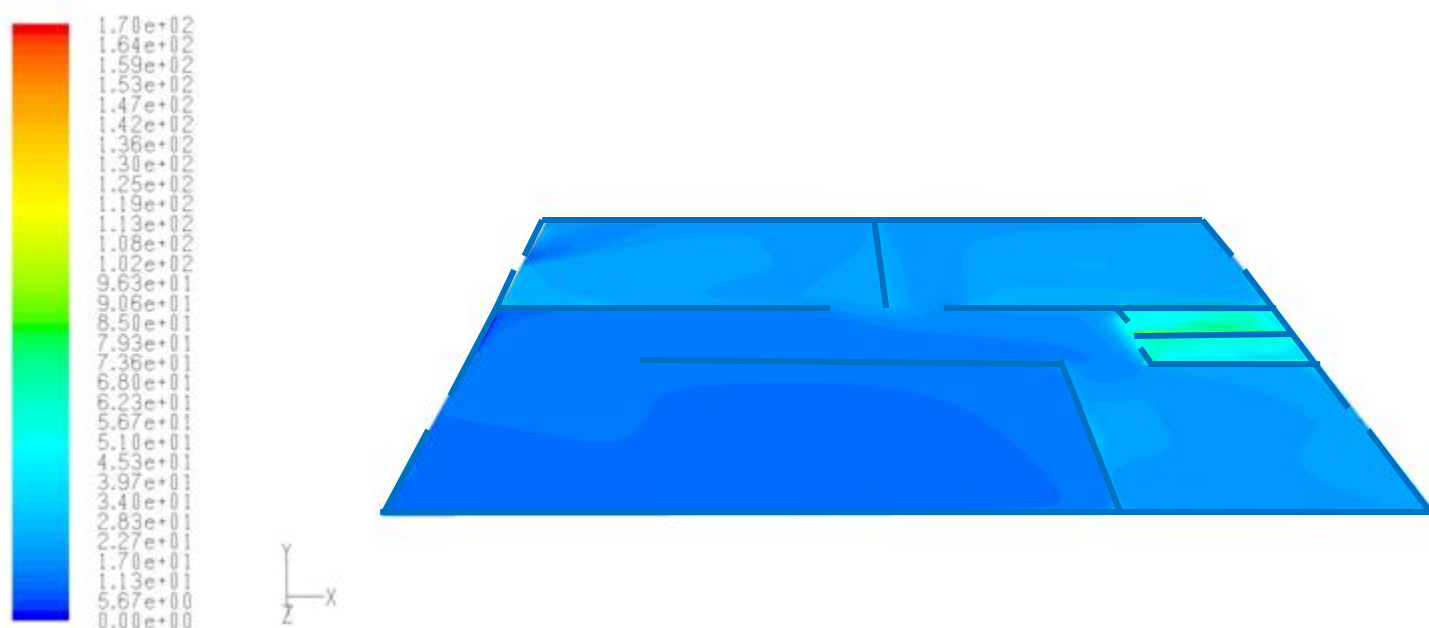


Figure V.5: Iso-concentrations du radon ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) au plan ($Y = 1,50 \text{ m}$) dans la maison ouverte [4].

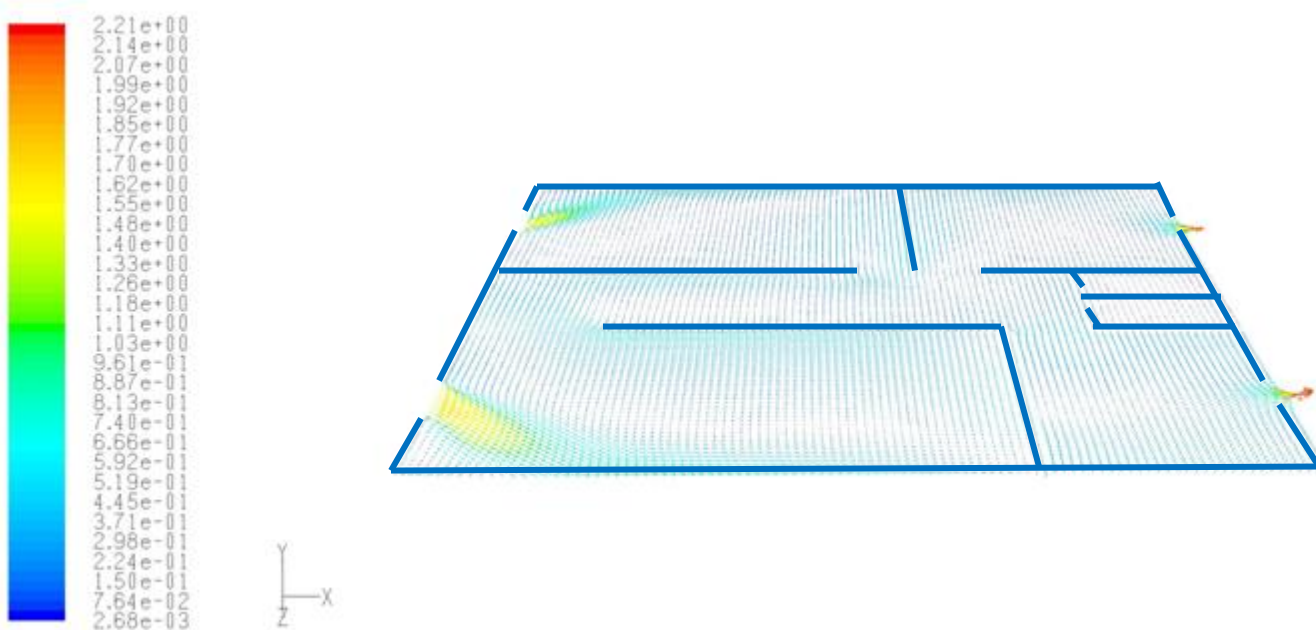


Figure V.6: Champs de vitesses ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) au plan ($Y = 1,50 \text{ m}$) dans la maison [4].

Dans les tableaux V.3 et V.4, nous présentons les concentrations moyennes du radon et ses descendants ainsi que le facteur d'équilibre pour différents cas de ventilation. Nous constatons que la ventilation dilue suffisamment le radon et ses descendants dans la maison.

Endroit	^{222}Rn	^{218}Po	^{214}Pb	^{214}Bi	\bar{F}
Chambre 1	67,13	44,94	26,18	22,97	0,40
Chambre 2	69,48	46,51	27,10	23,78	0,40
Salle de bain	143,31	95,94	55,90	49,05	0,40
Toilette	140,35	93,96	54,74	48,04	0,40
Cuisine	75,61	50,62	29,49	25,88	0,40
Salon	42,49	28,44	16,57	14,54	0,40

Tableau V.3: Facteur d'équilibre et la concentration moyenne du radon (Bq.m^{-3}) et ses descendants dans la maison fermée [5].

Endroit	^{222}Rn	^{218}Po	^{214}Pb	^{214}Bi	\bar{F}
Chambre 1	20,73	13,09	5,12	3,24	0,25
Chambre 2	22,82	14,41	5,64	3,57	0,25
Salle de bain	90,27	58,37	26,41	18,90	0,29
Toilette	68,77	44,02	18,74	12,63	0,27
Cuisine	19,67	12,34	4,70	2,88	0,24
Salon	11,52	7,14	2,52	1,46	0,22

Tableau V.4: Le facteur d'équilibre et la concentration moyenne du radon (Bq.m^{-3}) et ses descendants dans la maison ouverte [5].

Les données montrent aussi que la salle de bain et la cuisine accumulent des concentrations plus importantes que les autres chambres. Cela est dû au fait que le volume de la chambre a un effet sur la concentration du radon, en effet: lorsque le volume de la chambre augmente, la concentration du radon diminue [7] (Figure V.7).

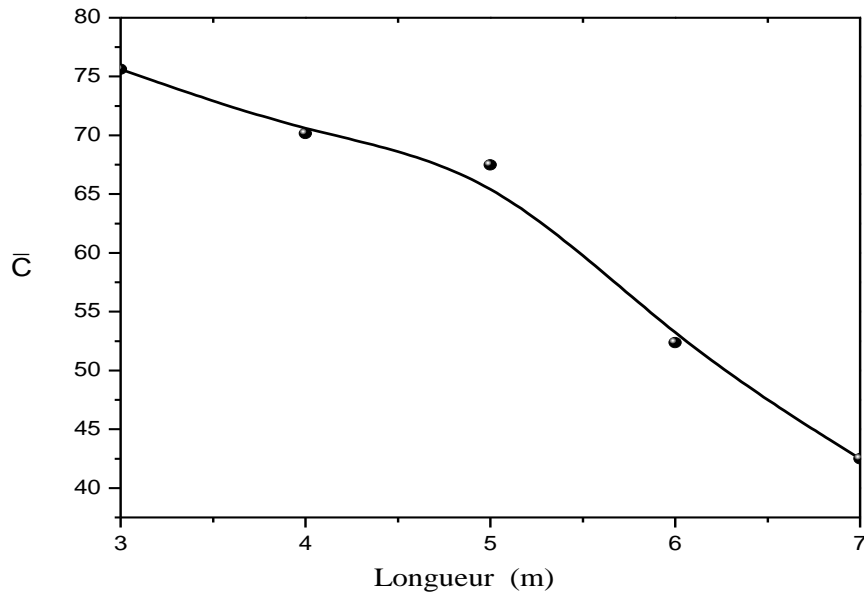


Figure V.7: Effet de volume sur la concentration moyenne du radon (Bq.m⁻³) [4].

Les figures V.8, V.9 et V.10 illustrent les iso-concentrations des ²¹⁸Po et ²¹⁴Po ainsi que la distribution du facteur d'équilibre, tracées au plan médian horizontal. Nous remarquons que les descendants ²¹⁸Po et ²¹⁴Po ont une distribution similaire à celle du radon, des résultats similaires ont été trouvés par d'autres auteurs [6]. Nous constatons aussi que le facteur d'équilibre est plus important dans la salle de bain et la cuisine. Ceci s'explique par le fait que le taux de ventilation est faible dans ces locaux (Figure.V.6).

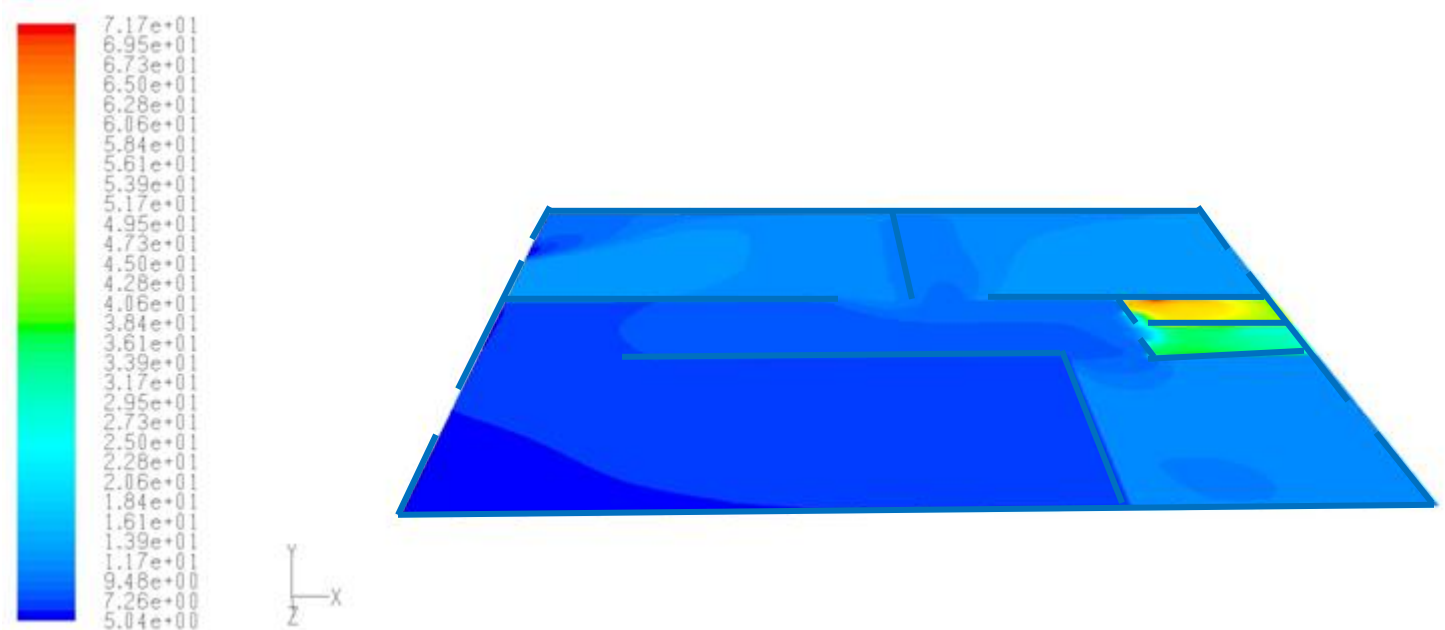


Figure V.8: Iso-concentrations du ²¹⁸Po (Bq.m⁻³) au plan (Y = 1,50 m) dans la maison ouverte [4].

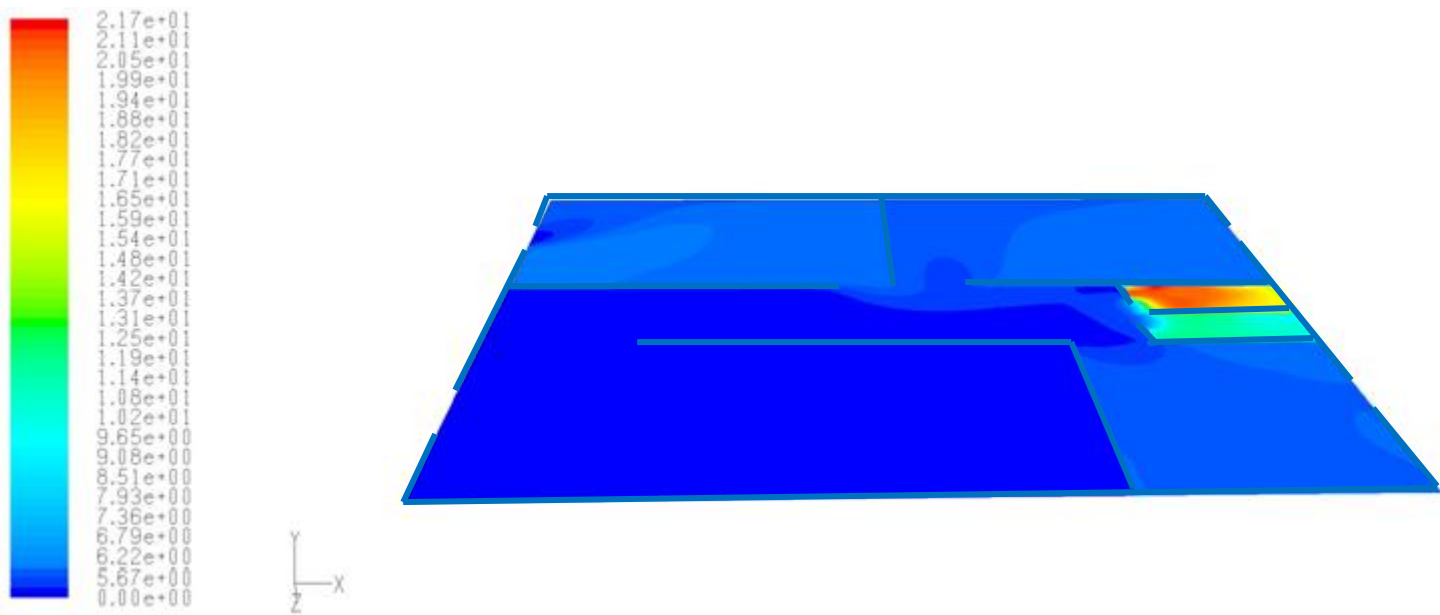


Figure V.9: iso-concentrations du ^{214}Po ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) au plan ($Y=1,50\text{ m}$) dans la maison ouverte [4].

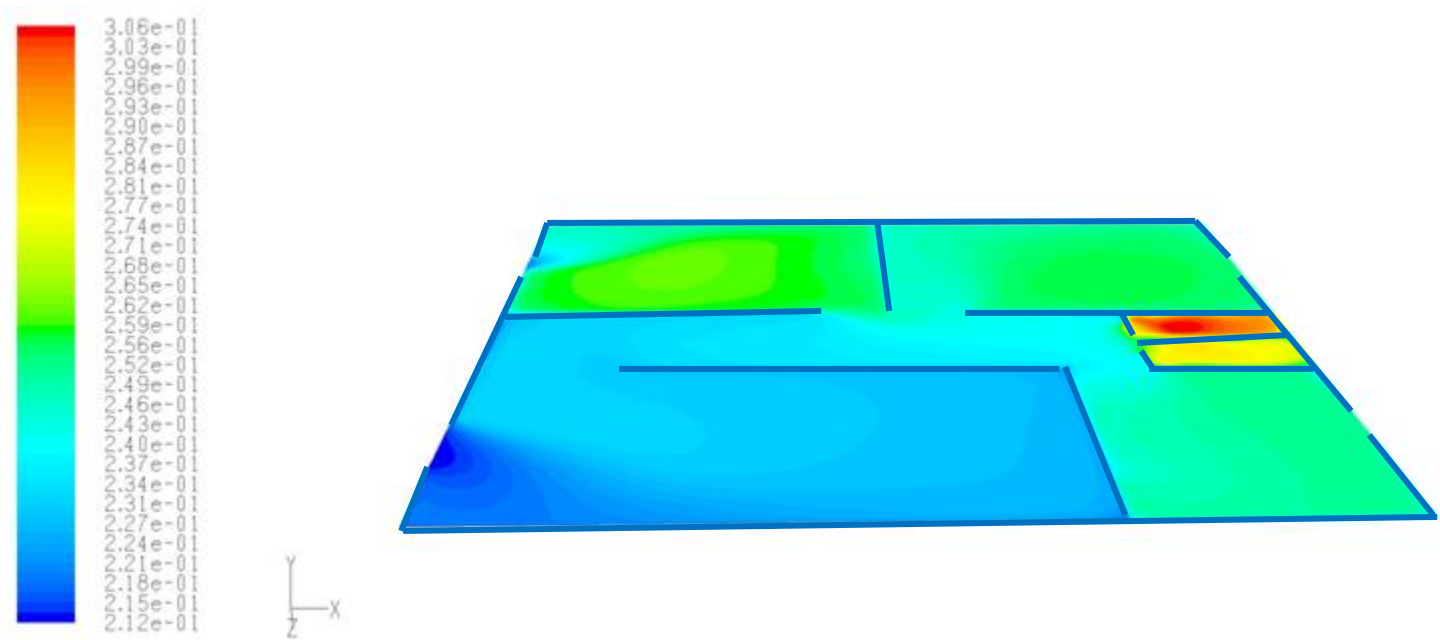


Figure V.10: Contours du facteur d'équilibre au plan ($Y=1,50\text{ m}$) dans la maison ouverte [5].

V.4.3. Effet de la température

L'influence de la température sur la concentration et la distribution du radon et ses descendants à l'intérieur de la maison a été étudiée. Nous avons considéré cinq températures

dont les valeurs sont 15, 17, 20, 22 et 25° C, avec une ventilation naturelle et une l'humidité relative d'ordre de 30 %.

Les tableaux V.5 et V.6, représentent les valeurs moyennes de la concentration et le facteur d'équilibre à l'intérieur de la maison en fonction de la température. Nous observons que la concentration moyenne du radon ainsi que le facteur d'équilibre dans la salle de bain augmentent considérablement avec la température. Tandis que dans le reste de la maison elles sont pratiquement stables. Ceci est dû à la prédominance de la convection forcé dans ces endroits.

Température (°C)	Chambre 1	Chambre 2	Salle de bain	Toilette	Cuisine	Salon
15	20,07	22,26	39,30	31,98	19,39	11,42
17	20,20	22,62	48,37	38,75	19,39	11,45
20	20,73	22,82	90,27	68,77	19,67	11,52
22	20,45	22,74	60,09	61,40	19,54	11,44
25	20,23	22,66	37,45	31,38	19,47	11,60

Tableau V.5: Concentration moyenne du radon (Bq.m^{-3}) pour différentes températures avec RH = 30% [4].

Température (°C)	Chambre 1	Chambre 2	Salle de bain	Toilette	Cuisine	Salon
15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,22
17	0,25	0,25	0,27	0,26	0,24	0,22
20	0,25	0,25	0,29	0,27	0,24	0,22
22	0,25	0,25	0,28	0,25	0,24	0,22
25	0,25	0,25	0,27	0,24	0,24	0,22

Tableau V.6: Facteur d'équilibre moyenne du radon (Bq m^{-3}) pour différentes températures avec RH = 30% [5].

Sur la figure V.11, nous présentons l'évolution de la concentration moyenne du radon pour différentes valeurs de température dans la salle de bain. Nous remarquons que la concentration du radon intérieure diminue lorsque la différence de température entre

l'intérieur et l'extérieur augmente. Cette diminution est provoquée par l'introduction de l'air frais (l'air intérieur dilué par l'air extérieur de faible concentration du radon).

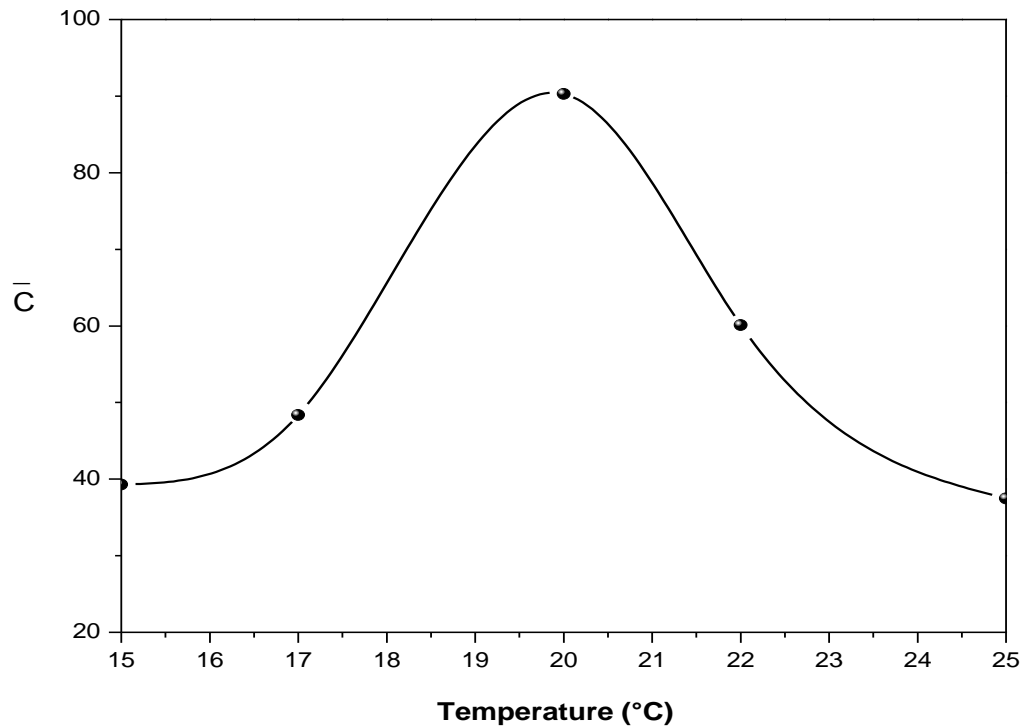


Figure V.11. Concentration moyenne du radon (Bq.m^{-3}) dans la salle de bain pour $15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 25^{\circ}\text{C}$ [4].

Pour avoir une idée claire sur les effets du changement de la température sur la distribution du radon et ses descendants à l'intérieur de la maison, nous présentons les iso-concentrations du radon pour deux températures 15°C et 25°C respectivement (les figures V.12 et V.13). En comparant ces figures, nous constatons que l'augmentation de la température entraîne une légère influence sur la distribution intérieure du radon dans le salon. Ceci est dû à la prédominance de la convection forcée (Figure V.14) [4].

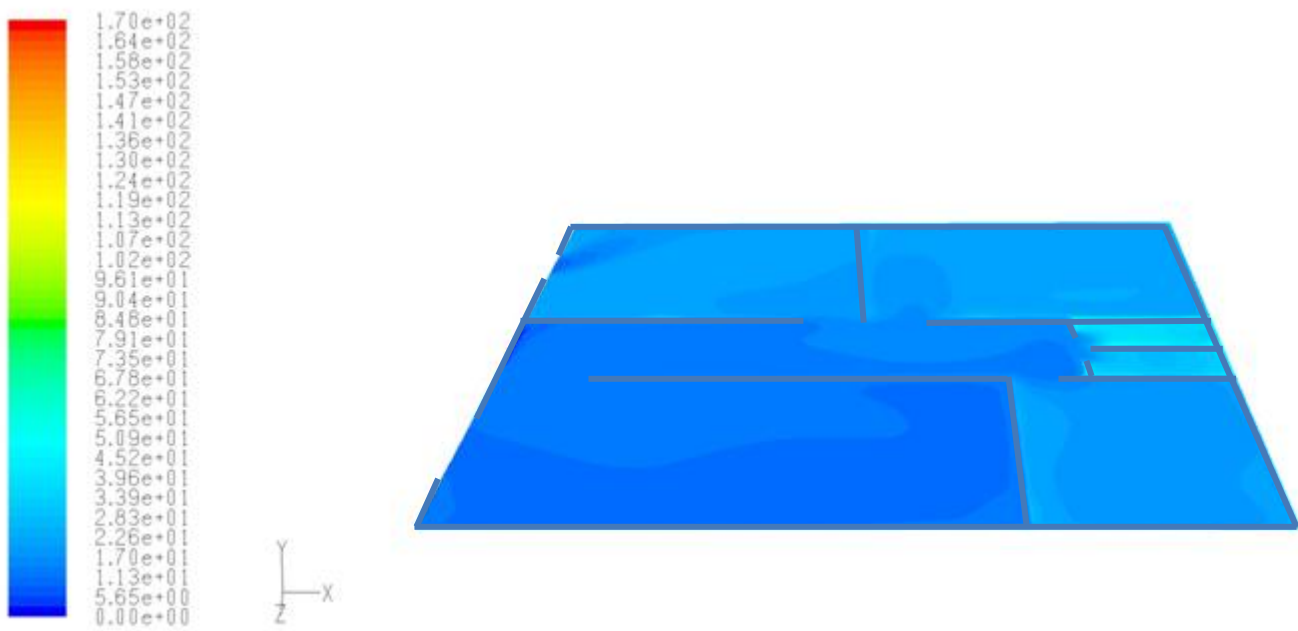


Figure V.12: Iso-concentrations du radon au plan (Y=1,5 m) pour T = 15° C [4].

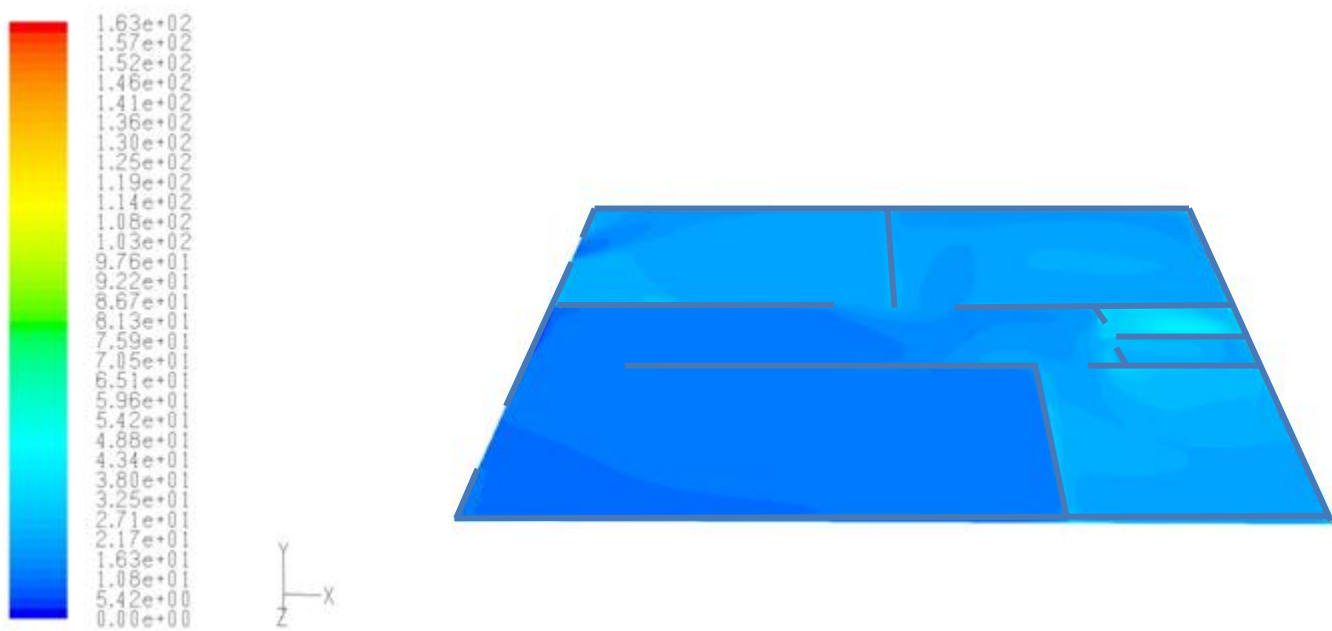


Figure V.13: Iso-concentrations du radon au plan (Y=1,5 m) pour T = 25° C [4].

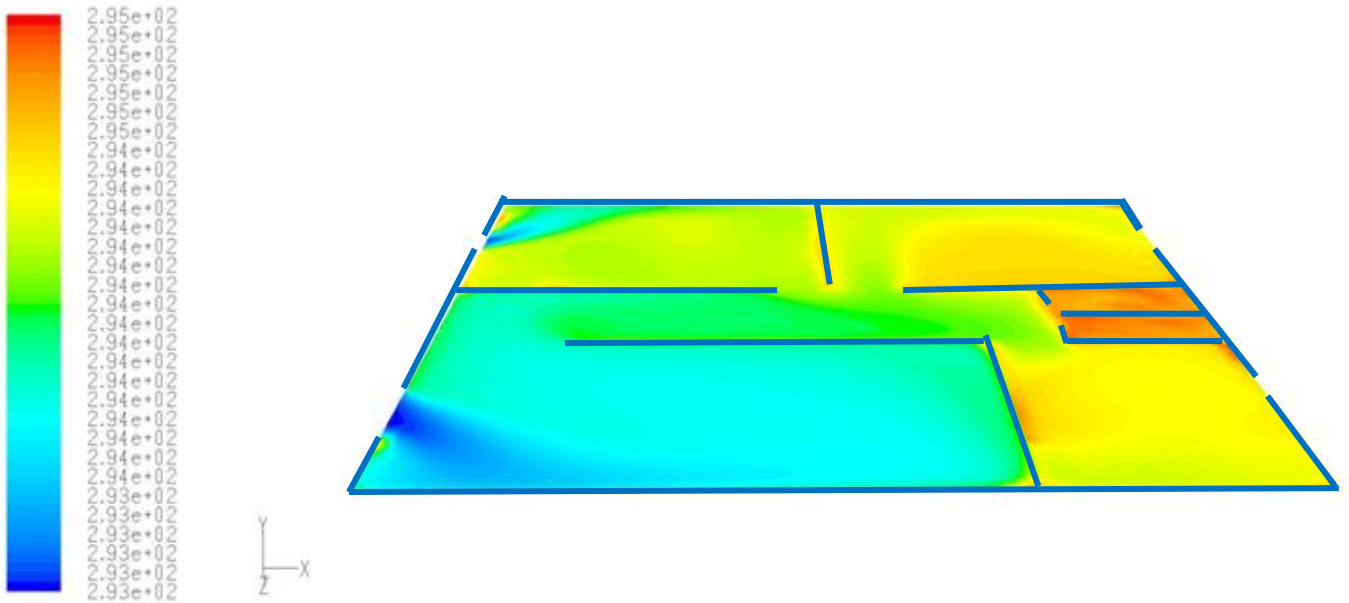


Figure V.14. Isothermes au plan (Y=1,5 m) [4].

V.4.4. Effet de l'humidité relative

Afin d'étudier l'effet de l'humidité relative sur la concentration et la distribution du radon et ses descendants à l'intérieur de la maison, nous avons considéré différentes valeurs: 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 % et 80 %, avec une ventilation naturelle et une température d'ordre de 20 °C. Les tableaux V.7 et V.8 présentent les valeurs moyennes de la concentration du radon et du facteur d'équilibre à l'intérieur de la maison étudiée en fonction de l'humidité relative. Nous observons que la concentration du radon augmente progressivement avec l'augmentation de l'humidité relative. En effet, quand l'humidité augmente dans l'air intérieur, le coefficient de diffusion diminue, ce qui réduit la longueur de diffusion du radon et par conséquent réduit son transfert vers des zones à faible concentration.

L'humidité relative (%)	Chambre 1	Chambre 2	Salle de bain	Toilette	Cuisine	Salon
30	20,73	22,82	90,27	68,77	19,67	11,52
40	20,78	22,87	91,28	72,03	19,74	11,56
50	20,83	22,90	93,52	79,94	19,87	11,57
60	20,88	22,92	105,18	86,22	20,17	11,64
70	20,91	22,98	110,49	93,35	20,30	11,67
80	20,96	22,99	115,00	96,01	20,40	11,69

Tableau V.7: Concentration moyenne du radon (Bq.m^{-3}) pour différentes humidité relatives pour $T = 20^\circ \text{C}$ [4].

L'humidité relative (%)	Chambre 1	Chambre 2	Salle de bain	Toilette	Cuisine	Salon
30	0,25	0,25	0,29	0,27	0,24	0,22
40	0,31	0,31	0,36	0,34	0,30	0,28
50	0,35	0,35	0,41	0,38	0,34	0,31
60	0,37	0,37	0,43	0,40	0,36	0,33
70	0,39	0,39	0,45	0,42	0,38	0,35
80	0,41	0,41	0,47	0,45	0,40	0,37

Tableau V.8: Facteur d'équilibre moyenne du radon (Bq.m^{-3}) pour différentes humidité relatives pour $T = 20^\circ \text{C}$ [5].

La figure V.15 montre l'évolution du facteur d'équilibre moyenne en fonction l'humidité relative, nous constatons que le facteur d'équilibre augmente au fur et à mesure que l'humidité relative augmente. Ceci peut être interprété par l'attachement des descendantes du radon aux minuscules gouttes d'eau suspendues dans l'air [5].

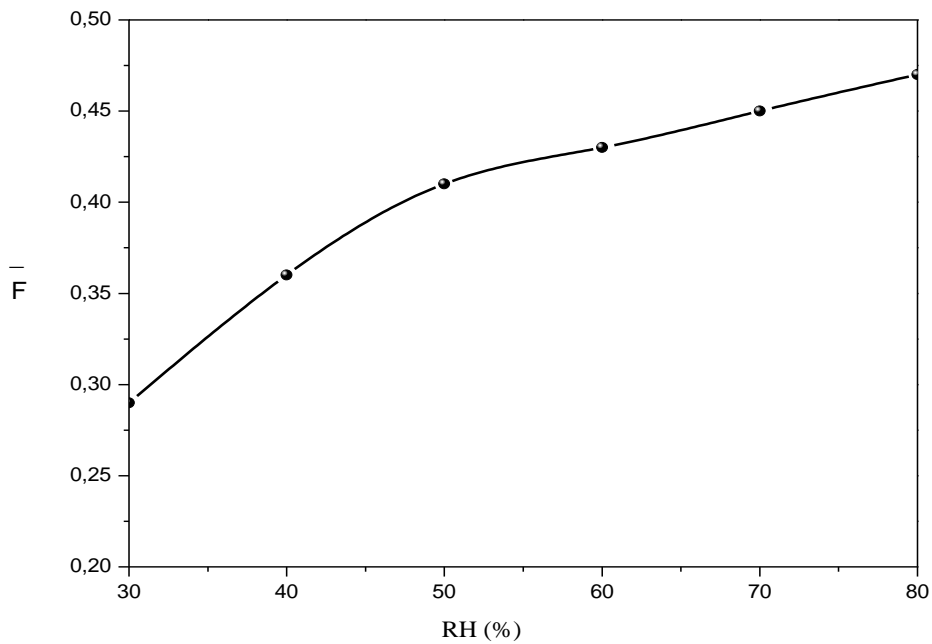


Figure.V.15. Facteur d'équilibre moyenne dans la salle de bain pour $30 \% \leq RH \leq 80 \%$ [5].

Afin d'avoir une idée de l'effet de l'humidité relative sur la distribution du radon, nous présentons les iso-concentrations du radon à différents taux d'humidité relative (40 % et 60 %) qui sont illustrés sur les figures V.16 et V.17. En comparant ces figures, nous constatons que la concentration du radon augmente légèrement en fonction de l'humidité relative.

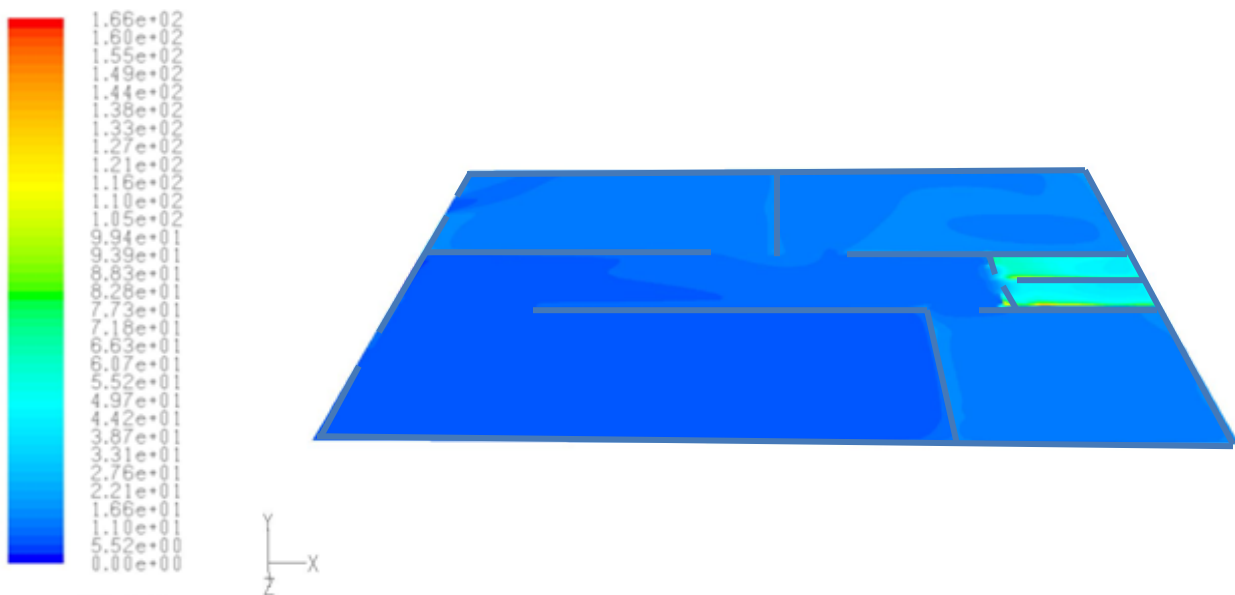


Figure V.16: Iso-concentrations du radon au plan (Y=1,5 m) pour RH=40 % [4].

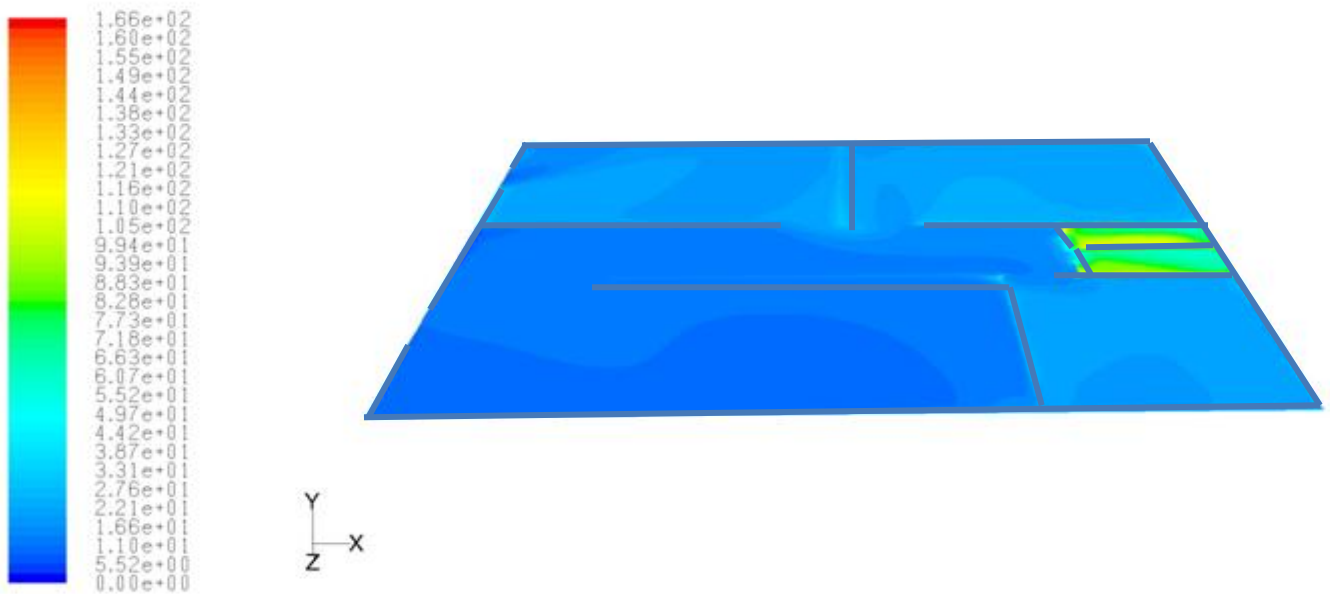


Figure V.17: Iso-concentrations du radon au plan (Y=1,5 m) pour RH=60 % [4].

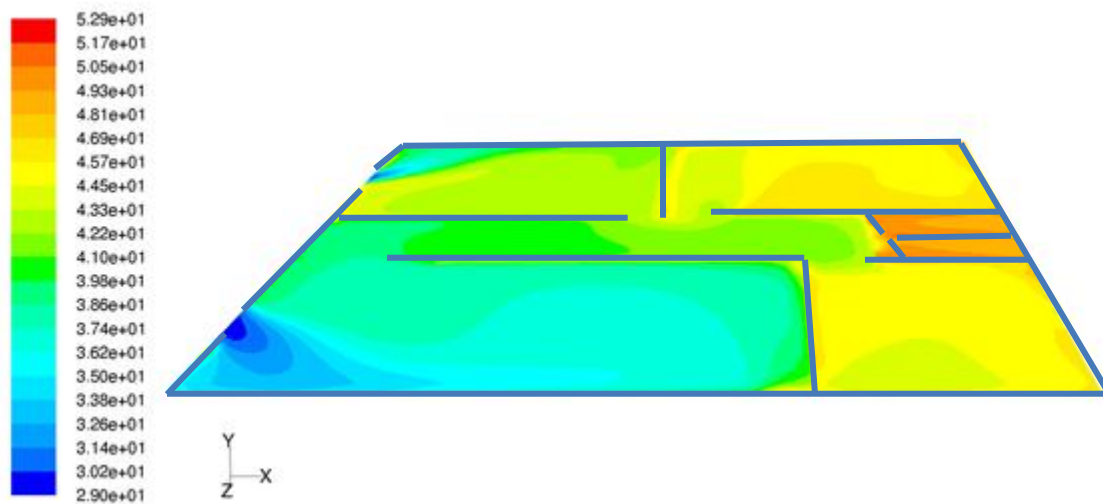


Figure V.18: Contours de l'humidité relative au plan (Y=1,5 m) [4].

V.5. Résultats expérimentaux

Pour confirmer l'impact de la ventilation sur le niveau du radon, nous avons effectué une mesure en continue de l'activité volumique du radon à l'intérieur de la maison dans le salon durant deux jours du moi de avril 2016 en utilisant Radon Scout Plus [11]. Nous avons placé le moniteur Radon Scout Plus à une hauteur de 1,5 m du sol et en prenant un pas de 60 minutes. Les résultats obtenus montrent une différence significative entre les deux cas (Figure

V.19). La moyenne obtenue à l'état ouverte est $11,25 \text{ Bq.m}^{-3}$ avec 54 Bq.m^{-3} comme une valeur maximale obtenue à 9 h 53 min. Tandis que la moyenne dans le cas fermé est de $29,54 \text{ Bq.m}^{-3}$ avec une valeur maximale de 80 Bq.m^{-3} obtenue à 15 h 02 min. D'après ces résultats, on peut déduire que la ventilation a une influence sur la concentration de radon. Parallèlement à ces mesures, différents paramètres météorologiques ont été également mesurés à savoir, la température et l'humidité relative. Une corrélation négative a été observée entre la température de l'air et la concentration intérieure du radon (Figure V.20) avec un coefficient de corrélation d'environ $R^2 = 0,46$. Mais une corrélation positive a été observée entre l'humidité relative et la concentration intérieure du radon (Figure V.21), avec un coefficient de corrélation d'environ $R^2 = 0,51$ [4].

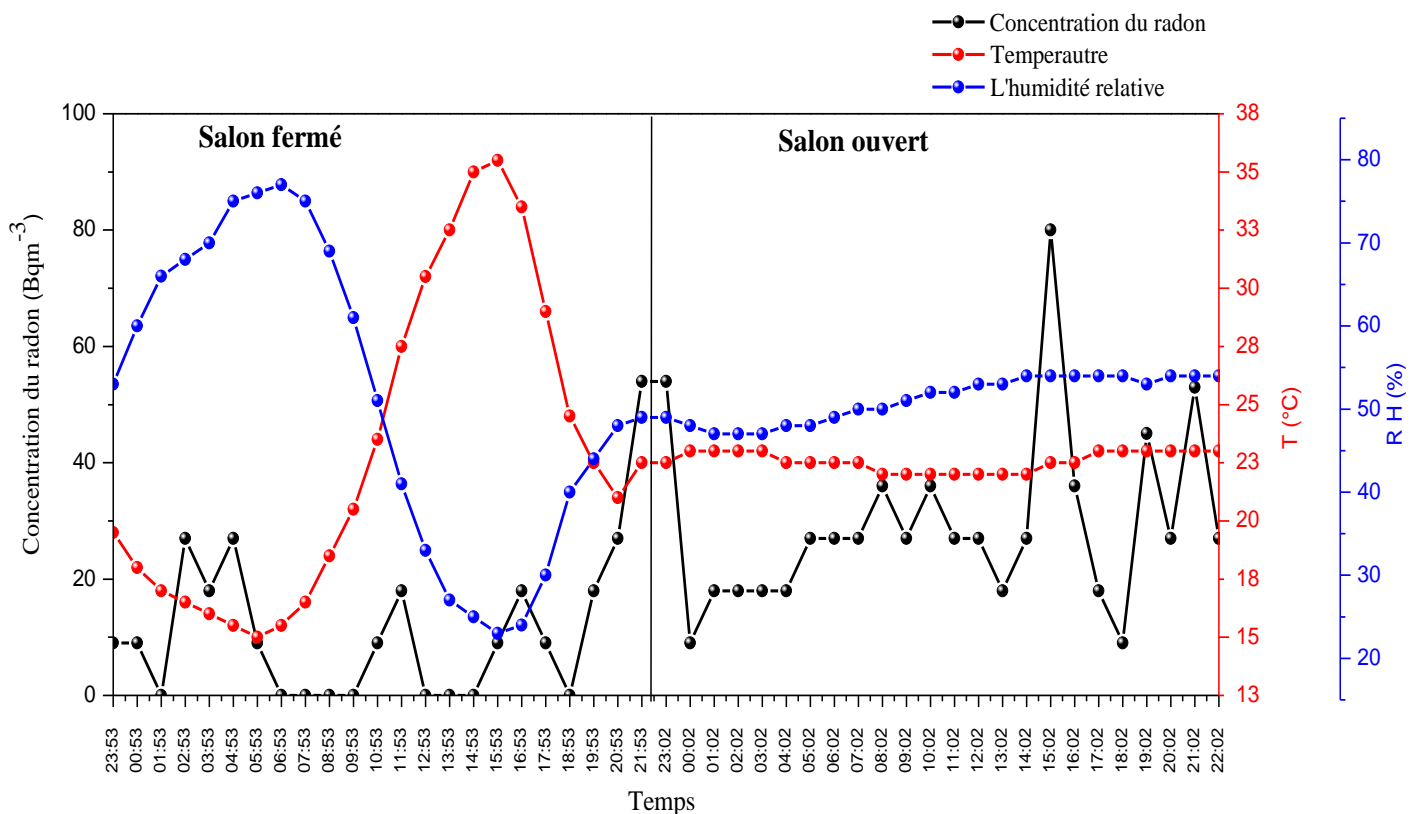


Figure V.19: Concentrations en radon dans le salon en Avril 2016 [4].

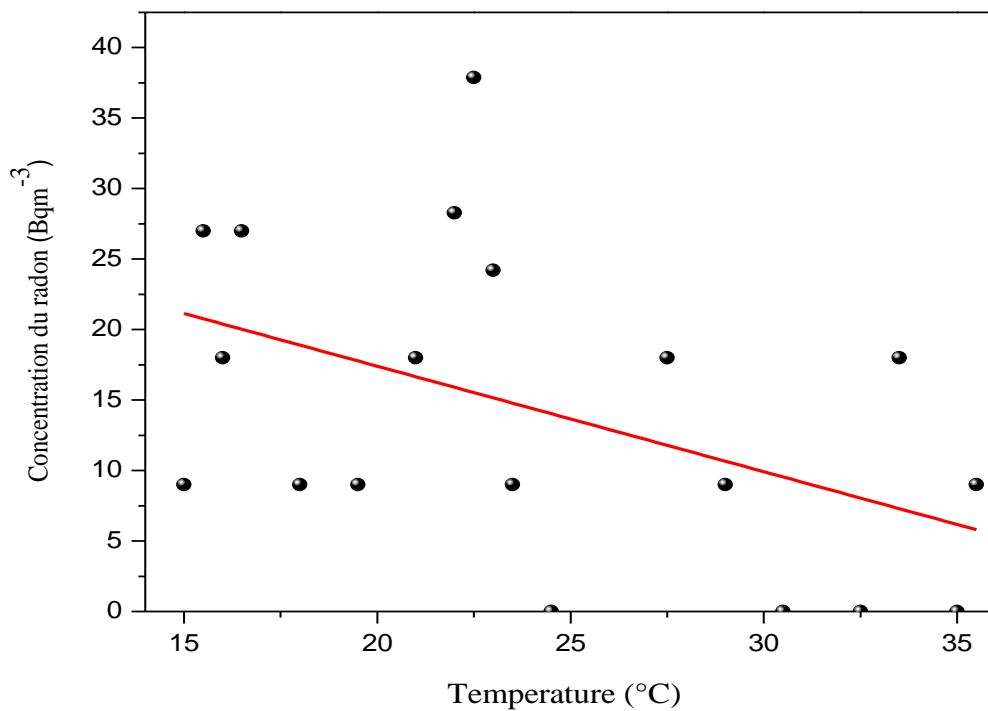


Figure V.20: Variation de la concentration du radon en fonction de la température [4].

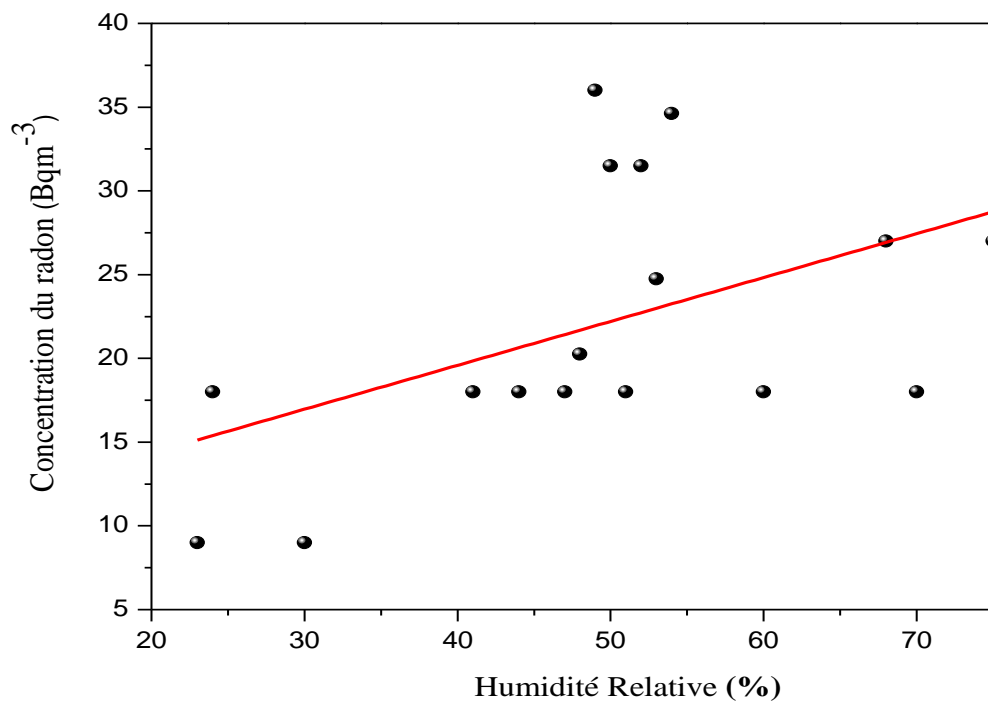


Figure V.21: Variation de la concentration du radon en fonction de l'humidité [4].

V.6. Validation du modèle et comparaison des résultats

La validation du programme de calcul joue un rôle très important pour s'assurer des résultats obtenus. Pour cela, nous avons comparé les résultats de la présente étude avec des résultats expérimentaux et la solution analytique (Equation II.59).

Dans la figure V.22, nous comparons les concentrations du radon obtenues par le modèle numérique et analytique avec celles obtenues expérimentalement. Les mesures ont été effectuées dans trois espaces différents de la maison (Salon, Chambre 1 et salle de bain). Nous constatons que l'accord est excellent entre les résultats de la simulation et les données expérimentales.

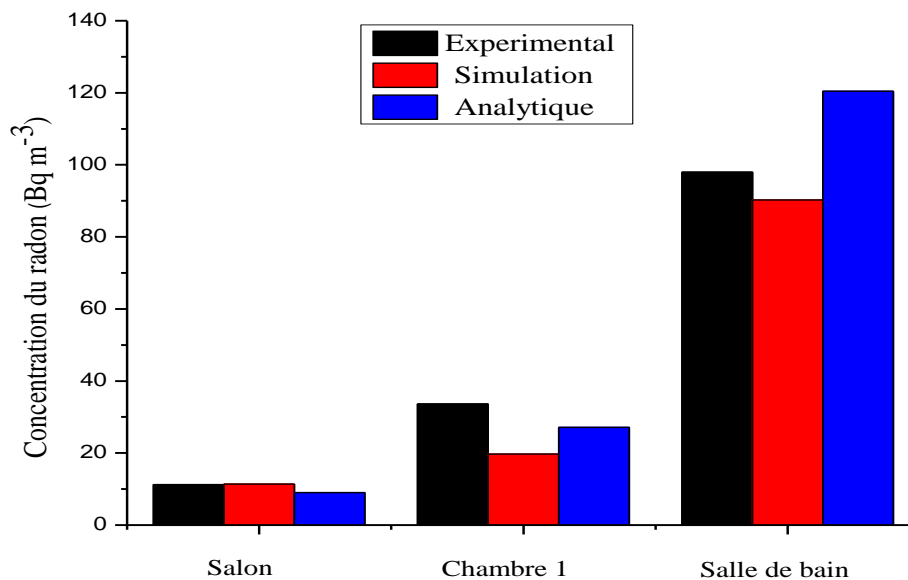


Figure V.22: Concentration moyenne de radon à l'intérieur de chaque espace dans la maison [4].

V.7. Débit d'équivalent de dose des descendants du radon dans le système respiratoire

Les taux d'équivalent de dose engagée dues aux descendants du radon de courte période ^{218}Po (H_T (^{218}Po)) et ^{214}Po (H_T (^{214}Po)) ont été évalués dans le système respiratoire pour les différents groupes d'âges suite à l'inhalation de l'air de la maison en utilisant les relations (II.65) et (II.68) du chapitre II. Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux V.9, V.10, V.11, V.12, V.13, V.14, V.15, V.16 et V.17.

Les taux d'équivalents de dose engagée dans la région extra-thoracique (ET) dus au ^{218}Po sont supérieurs à ceux dans la région thoracique.

Nous constatons que les taux d'équivalent de dose engagée dans le système respiratoire dus au ^{218}Po sont plus grands que ceux dus au ^{214}Po .

Nous constatons que les taux d'équivalent de dose engagée dans le système respiratoire augmentent quand l'activité volumique alpha due au radon (l'activité alpha due aux ^{218}Po et ^{214}Po) augmente dans l'air dans la maison.

Nous notons que les taux d'équivalent de dose sont plus grands pour les enfants que pour les femmes et les hommes pour tous les tissus des deux régions. Ceci est dû à la prédominance de la masse.

Les doses efficaces annuelles dues aux descendants du radon suite à l'inhalation de l'air par les différents groupes d'âges dans la maison sont déterminées en utilisant notre méthode (formule II.74) et la formule de l'UNSCEAR-2000 [6] (formule II.75). Les résultats obtenus pour la dose efficace moyenne obtenue par la méthode exposée ici pour les différents groupes d'âges dans la maison sont en bon accord avec ceux obtenues en utilisant le modèle de l'UNSCEAR-2000 [6].

Endroit	²¹⁸ Po					²¹⁴ Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	H _{AI} (Sv.an ⁻¹)	H _{bb} (Sv.an ⁻¹)	H _{BB} (Sv.an ⁻¹)	H _{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H _{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H _{AI} (Sv.an ⁻¹)	H _{bb} (Sv.an ⁻¹)	H _{BB} (Sv.an ⁻¹)	H _{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H _{ET2} (Sv.an ⁻¹)
Chambre 1	2,95.10 ⁻⁹	4,22.10 ⁻⁷	1,22.10 ⁻⁷	1,35.10 ⁻⁷	5,06.10 ⁻⁶	8,44.10 ⁻¹⁶	1,24.10 ⁻¹³	3,37.10 ⁻¹⁴	3,79.10 ⁻¹⁴	1,83.10 ⁻¹²
Chambre 2	3,05.10 ⁻⁹	4,36.10 ⁻⁷	1,26.10 ⁻⁷	1,39.10 ⁻⁷	5,24.10 ⁻⁶	8,73.10 ⁻¹⁶	1,28.10 ⁻¹³	3,49.10 ⁻¹⁴	3,93.10 ⁻¹⁴	1,90.10 ⁻¹²
Salle de bain	6,30.10 ⁻⁹	9,01.10 ⁻⁷	2,61.10 ⁻⁷	2,88.10 ⁻⁷	1,08.10 ⁻⁵	1,80.10 ⁻¹⁵	2,65.10 ⁻¹³	7,21.10 ⁻¹⁴	8,11.10 ⁻¹⁴	3,92.10 ⁻¹²
Toilette	6,17.10 ⁻⁹	8,82.10 ⁻⁷	2,55.10 ⁻⁷	2,82.10 ⁻⁷	1,05.10 ⁻⁵	1,76.10 ⁻¹⁵	2,60.10 ⁻¹³	7,06.10 ⁻¹⁴	7,94.10 ⁻¹⁴	3,83.10 ⁻¹²
Cuisine	3,32.10 ⁻⁹	4,75.10 ⁻⁷	1,37.10 ⁻⁷	1,52.10 ⁻⁷	5,70.10 ⁻⁶	9,51.10 ⁻¹⁶	1,40.10 ⁻¹³	3,80.10 ⁻¹⁴	4,27.10 ⁻¹⁴	2,06.10 ⁻¹²
Salon	1,87.10 ⁻⁹	2,67.10 ⁻⁷	7,74.10 ⁻⁸	8,55.10 ⁻⁸	3,20.10 ⁻⁶	5,34.10 ⁻¹⁶	7,88.10 ⁻¹⁴	2,13.10 ⁻¹⁴	2,40.10 ⁻¹⁴	1,16.10 ⁻¹²

Tableau V.10: Taux d'équivalent de dose engagée dues aux ²¹⁸Po et ²¹⁴Po dans les différents tissus du système respiratoire des homes suite à l'inhalation de l'air dans la maison fermé [5].

Endroit	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)
Chambre 1	$2,11.10^{-9}$	$3,58.10^{-7}$	$1,13.10^{-7}$	$1,09.10^{-7}$	$4,01.10^{-6}$	$6,12.10^{-16}$	$1,01.10^{-13}$	$2,95.10^{-14}$	$3,16.10^{-14}$	$1,45.10^{-12}$
Chambre 2	$2,18.10^{-9}$	$3,71.10^{-7}$	$1,17.10^{-7}$	$1,13.10^{-7}$	$4,15.10^{-6}$	$6,33.10^{-16}$	$1,04.10^{-13}$	$3,05.10^{-14}$	$3,27.10^{-14}$	$1,50.10^{-12}$
Salle de bain	$4,50.10^{-9}$	$7,66.10^{-7}$	$2,43.10^{-7}$	$2,34.10^{-7}$	$8,56.10^{-6}$	$1,30.10^{-13}$	$2,16.10^{-13}$	$6,30.10^{-14}$	$6,75.10^{-14}$	$3,10.10^{-12}$
Toilette	$4,41.10^{-9}$	$7,50.10^{-7}$	$2,38.10^{-7}$	$2,29.10^{-7}$	$8,38.10^{-6}$	$1,27.10^{-5}$	$2,11.10^{-13}$	$6,17.10^{-14}$	$6,62.10^{-14}$	$3,04.10^{-12}$
Cuisine	$2,37.10^{-9}$	$4,04.10^{-7}$	$1,28.10^{-7}$	$1,23.10^{-7}$	$4,51.10^{-6}$	$6,89.10^{-16}$	$1,14.10^{-13}$	$3,32.10^{-14}$	$3,56.10^{-14}$	$1,64.10^{-12}$
Salon	$1,33.10^{-9}$	$2,27.10^{-7}$	$7,21.10^{-8}$	$6,94.10^{-8}$	$2,53.10^{-6}$	$3,87.10^{-16}$	$6,41.10^{-14}$	$1,87.10^{-14}$	$2,00.10^{-14}$	$9,21.10^{-13}$

Tableau V.11: Taux d'équivalent de dose engagée dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des femmes suite à l'inhalation de l'air dans la maison fermé [5].

Endroit	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)
Chambre 1	$4,01.10^{-9}$	$4,43.10^{-7}$	$1,32.10^{-7}$	$1,79.10^{-7}$	$7,17.10^{-6}$	$1,13.10^{-15}$	$1,24.10^{-13}$	$3,79.10^{-14}$	$5,06.10^{-14}$	$2,53.10^{-12}$
Chambre 2	$4,15.10^{-9}$	$4,58.10^{-7}$	$1,37.10^{-7}$	$1,85.10^{-7}$	$7,42.10^{-6}$	$1,17.10^{-5}$	$1,28.10^{-13}$	$3,93.10^{-14}$	$5,24.10^{-14}$	$2,62.10^{-12}$
Salle de bain	$8,56.10^{-9}$	$9,46.10^{-7}$	$2,83.10^{-7}$	$3,83.10^{-7}$	$1,53.10^{-5}$	$2,43.10^{-15}$	$2,65.10^{-13}$	$8,11.10^{-14}$	$1,08.10^{-13}$	$5,40.10^{-12}$
Toilette	$8,38.10^{-9}$	$9,26.10^{-7}$	$2,78.10^{-7}$	$3,75.10^{-7}$	$1,50.10^{-5}$	$2,38.10^{-15}$	$2,60.10^{-13}$	$7,94.10^{-14}$	$1,05.10^{-13}$	$5,29.10^{-12}$
Cuisine	$4,51.10^{-9}$	$4,99.10^{-7}$	$1,49.10^{-7}$	$2,02.10^{-7}$	$8,08.10^{-6}$	$1,28.10^{-15}$	$1,40.10^{-13}$	$4,27.10^{-14}$	$5,70.10^{-14}$	$2,85.10^{-12}$
Salon	$2,53.10^{-9}$	$2,80.10^{-7}$	$8,41.10^{-8}$	$1,13.10^{-7}$	$4,54.10^{-6}$	$7,21.10^{-16}$	$7,88.10^{-14}$	$2,40.10^{-14}$	$3,20.10^{-14}$	$1,60.10^{-12}$

Tableau V.12: Taux d'équivalent de dose engagée dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des enfants 10 ans suite à l'inhalation de l'air dans la maison fermé [5].

Endroit	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)
Chambre 1	$6,12.10^{-9}$	$4,85.10^{-7}$	$1,60.10^{-7}$	$2,95.10^{-7}$	$1,22.10^{-5}$	$1,73.10^{-15}$	$1,35.10^{-13}$	$4,43.10^{-14}$	$8,65.10^{-14}$	$4,48.10^{-12}$
Chambre 2	$6,33.10^{-9}$	$5,02.10^{-7}$	$1,66.10^{-7}$	$3,05.10^{-7}$	$1,26.10^{-5}$	$1,79.10^{-15}$	$1,39.10^{-13}$	$4,58.10^{-14}$	$8,95.10^{-14}$	$4,64.10^{-12}$
Salle de bain	$1,30.10^{-8}$	$1,03.10^{-8}$	$3,42.10^{-7}$	$6,30.10^{-7}$	$2,61.10^{-5}$	$3,69.10^{-15}$	$2,88.10^{-13}$	$9,46.10^{-14}$	$1,84.10^{-13}$	$9,58.10^{-12}$
Toilette	$1,27.10^{-8}$	$1,01.10^{-8}$	$3,35.10^{-7}$	$6,17.10^{-7}$	$2,55.10^{-5}$	$3,61.10^{-15}$	$2,82.10^{-13}$	$9,26.10^{-14}$	$1,80.10^{-13}$	$9,38.10^{-12}$
Cuisine	$6,89.10^{-9}$	$5,46.10^{-7}$	$1,80.10^{-7}$	$3,32.10^{-7}$	$1,37.10^{-5}$	$1,94.10^{-15}$	$1,52.10^{-13}$	$4,99.10^{-14}$	$9,74.10^{-14}$	$5,05.10^{-12}$
Salon	$3,87.10^{-9}$	$3,07.10^{-7}$	$1,01.10^{-7}$	$1,87.10^{-7}$	$7,74.10^{-6}$	$1,09.10^{-15}$	$8,55.10^{-14}$	$2,80.10^{-14}$	$5,47.10^{-14}$	$2,84.10^{-12}$

Tableau V.13: Taux d'équivalent de dose engagée dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des enfants 5 ans suite à l'inhalation de l'air dans la maison fermé [5].

Endroit	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)
Chambre 1	$9,12.10^{-10}$	$1,30.10^{-7}$	$3,78.10^{-8}$	$4,17.10^{-8}$	$1,56.10^{-6}$	$2,60.10^{-16}$	$3,84.10^{-14}$	$1,04.10^{-14}$	$1,17.10^{-14}$	$5,67.10^{-13}$
Chambre 2	$1,00.10^{-9}$	$1,43.10^{-7}$	$4,16.10^{-8}$	$4,59.10^{-8}$	$1,72.10^{-6}$	$2,87.10^{-16}$	$4,23.10^{-14}$	$1,14.10^{-14}$	$1,29.10^{-14}$	$6,24.10^{-13}$
Salle de bain	$3,97.10^{-9}$	$5,67.10^{-7}$	$1,64.10^{-7}$	$1,81.10^{-7}$	$6,81.10^{-6}$	$1,13.10^{-15}$	$1,67.10^{-15}$	$4,54.10^{-14}$	$5,10.10^{-14}$	$2,46.10^{-12}$
Toilette	$3,02.10^{-9}$	$4,32.10^{-7}$	$1,25.10^{-7}$	$1,38.10^{-7}$	$5,19.10^{-6}$	$8,64.10^{-16}$	$1,27.10^{-15}$	$3,46.10^{-14}$	$3,89.10^{-14}$	$1,88.10^{-12}$
Cuisine	$8,65.10^{-10}$	$1,23.10^{-7}$	$3,58.10^{-8}$	$3,95.10^{-8}$	$1,48.10^{-6}$	$2,47.10^{-16}$	$3,64.10^{-14}$	$9,89.10^{-15}$	$1,11.10^{-14}$	$5,38.10^{-13}$
Salon	$5,07.10^{-10}$	$7,24.10^{-8}$	$2,10.10^{-8}$	$2,31.10^{-8}$	$8,69.10^{-7}$	$1,44.10^{-16}$	$2,13.10^{-14}$	$5,79.10^{-15}$	$6,52.10^{-15}$	$3,15.10^{-13}$

Tableau V.14: Taux d'équivalent de dose engagée dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des homes suite à l'inhalation de l'air dans la maison ouverte [5].

Endroit	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)
Chambre 1	$6,51.10^{-10}$	$1,10.10^{-7}$	$3,52.10^{-8}$	$3,38.10^{-8}$	$1,23.10^{-6}$	$1,89.10^{-16}$	$3,12.10^{-14}$	$9,12.10^{-15}$	$9,77.10^{-15}$	$4,49.10^{-13}$
Chambre 2	$7,17.10^{-10}$	$1,21.10^{-7}$	$3,87.10^{-8}$	$3,73.10^{-8}$	$1,36.10^{-6}$	$2,08.10^{-16}$	$3,44.10^{-14}$	$1,00.10^{-14}$	$1,07.10^{-14}$	$4,95.10^{-13}$
Salle de bain	$2,83.10^{-9}$	$4,82.10^{-7}$	$1,53.10^{-7}$	$1,47.10^{-7}$	$5,39.10^{-6}$	$8,23.10^{-16}$	$1,36.10^{-13}$	$3,97.10^{-14}$	$4,25.10^{-14}$	$1,95.10^{-12}$
Toilette	$2,16.10^{-9}$	$3,67.10^{-7}$	$1,16.10^{-7}$	$1,12.10^{-7}$	$4,10.10^{-6}$	$6,27.10^{-16}$	$1,03.10^{-13}$	$3,02.10^{-14}$	$3,24.10^{-14}$	$1,49.10^{-12}$
Cuisine	$6,18.10^{-10}$	$1,05.10^{-7}$	$3,34.10^{-8}$	$3,21.10^{-8}$	$1,17.10^{-6}$	$1,79.10^{-16}$	$2,96.10^{-14}$	$8,65.10^{-15}$	$9,27.10^{-15}$	$4,26.10^{-13}$
Salon	$3,62.10^{-10}$	$6,15.10^{-8}$	$1,95.10^{-8}$	$1,88.10^{-8}$	$6,88.10^{-7}$	$1,05.10^{-16}$	$1,73.10^{-14}$	$5,07.10^{-15}$	$5,43.10^{-15}$	$2,49.10^{-13}$

Tableau V.15: Taux d'équivalent de dose engagée dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des femmes suite à l'inhalation de l'air dans la maison ouverte [5].

Endroit	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)
Chambre 1	$1,23.10^{-9}$	$1,36.10^{-7}$	$4,10.10^{-8}$	$5,54.10^{-8}$	$2,21.10^{-6}$	$3,52.10^{-16}$	$3,84.10^{-14}$	$1,17.10^{-14}$	$1,56.10^{-14}$	$7,82.10^{-13}$
Chambre 2	$1,36.10^{-9}$	$1,50.10^{-7}$	$4,52.10^{-8}$	$6,09.10^{-8}$	$2,43.10^{-6}$	$3,87.10^{-16}$	$4,23.10^{-14}$	$1,29.10^{-14}$	$1,72.10^{-14}$	$8,61.10^{-13}$
Salle de bain	$5,39.10^{-9}$	$5,96.10^{-7}$	$1,78.10^{-7}$	$2,41.10^{-7}$	$9,65.10^{-6}$	$1,53.10^{-15}$	$1,67.10^{-13}$	$5,10.10^{-14}$	$6,81.10^{-14}$	$3,40.10^{-12}$
Toilette	$4,10.10^{-9}$	$4,54.10^{-7}$	$1,36.10^{-7}$	$1,83.10^{-7}$	$7,35.10^{-6}$	$1,16.10^{-15}$	$1,27.10^{-13}$	$3,89.10^{-14}$	$5,19.10^{-14}$	$2,59.10^{-12}$
Cuisine	$1,17.10^{-9}$	$1,29.10^{-7}$	$3,89.10^{-8}$	$5,25.10^{-8}$	$2,10.10^{-6}$	$3,34.10^{-16}$	$3,64.10^{-14}$	$1,11.10^{-14}$	$1,48.10^{-14}$	$7,42.10^{-13}$
Salon	$6,88.10^{-10}$	$7,60.10^{-8}$	$2,28.10^{-8}$	$3,07.10^{-8}$	$1,23.10^{-6}$	$1,95.10^{-16}$	$2,13.10^{-14}$	$6,52.10^{-15}$	$8,69.10^{-15}$	$4,34.10^{-13}$

Tableau V.16: Taux d'équivalent de dose engagée dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des enfants 10 ans suite à l'inhalation de l'air dans la maison ouverte [5].

Endroit	^{218}Po					^{214}Po				
	Région thoracique			Région extra-thoracique		Région thoracique			Région extra-thoracique	
	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)	H_{AI} (Sv.an ⁻¹)	H_{bb} (Sv.an ⁻¹)	H_{BB} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET2} (Sv.an ⁻¹)	H_{ET1} (Sv.an ⁻¹)
Chambre 1	$1,89.10^{-9}$	$1,49.10^{-7}$	$4,95.10^{-8}$	$9,12.10^{-8}$	$3,78.10^{-6}$	$5,34.10^{-16}$	$4,17.10^{-14}$	$1,36.10^{-14}$	$2,67.10^{-14}$	$1,38.10^{-12}$
Chambre 2	$2,08.10^{-9}$	$1,65.10^{-7}$	$5,45.10^{-8}$	$1,00.10^{-7}$	$4,16.10^{-6}$	$5,88.10^{-16}$	$4,59.10^{-14}$	$1,50.10^{-14}$	$2,94.10^{-14}$	$1,52.10^{-12}$
Salle de bain	$8,23.10^{-9}$	$6,52.10^{-7}$	$2,15.10^{-7}$	$3,97.10^{-7}$	$1,64.10^{-5}$	$2,32.10^{-15}$	$1,81.10^{-13}$	$5,96.10^{-14}$	$1,16.10^{-13}$	$6,03.10^{-12}$
Toilette	$6,27.10^{-9}$	$4,97.10^{-7}$	$1,64.10^{-7}$	$3,02.10^{-7}$	$1,25.10^{-5}$	$1,77.10^{-15}$	$1,38.10^{-13}$	$4,54.10^{-14}$	$8,86.10^{-14}$	$4,59.10^{-12}$
Cuisine	$1,79.10^{-9}$	$1,42.10^{-7}$	$4,70.10^{-8}$	$8,65.10^{-8}$	$3,58.10^{-6}$	$5,07.10^{-16}$	$3,95.10^{-14}$	$1,29.10^{-14}$	$2,53.10^{-14}$	$1,31.10^{-12}$
Salon	$1,05.10^{-9}$	$8,33.10^{-8}$	$2,57.10^{-8}$	$5,07.10^{-8}$	$2,10.10^{-6}$	$2,97.10^{-16}$	$2,31.10^{-14}$	$7,60.10^{-15}$	$1,48.10^{-14}$	$7,70.10^{-13}$

Tableau V.17: Taux d'équivalent de dose engagée dues aux ^{218}Po et ^{214}Po dans les différents tissus du système respiratoire des enfants 5 ans suite à l'inhalation de l'air dans la maison ouverte [5].

Endroit	Dose efficaces (Sv.an ⁻¹ par heure d'exposition)					UNSCEAR-2000 [6]
	Cette méthode					
	Homme adulte	Femme adulte	Enfant de 10 ans	Enfant de 5 ans	Moyenne pour membres du public	Membres du public
Chambre 1	1,89 10 ⁻⁷	1,68 10 ⁻⁷	2,53 10 ⁻⁷	3,79 10 ⁻⁷	2,48 10 ⁻⁷	2,41 10 ⁻⁷
Chambre 2	1,96 10 ⁻⁷	1,74 10 ⁻⁷	2,62 10 ⁻⁷	3,93 10 ⁻⁷	2,56 10 ⁻⁷	2,50 10 ⁻⁷
Salle de bain	4,05 10 ⁻⁷	3,60 10 ⁻⁷	5,40 10 ⁻⁷	8,11 10 ⁻⁷	5,29 10 ⁻⁷	5,15 10 ⁻⁷
Toilette	3,97 10 ⁻⁷	3,53 10 ⁻⁷	5,29 10 ⁻⁷	7,94 10 ⁻⁷	5,18 10 ⁻⁷	5,05 10 ⁻⁷
Cuisine	2,13 10 ⁻⁷	1,90 10 ⁻⁷	2,85 10 ⁻⁷	4,27 10 ⁻⁷	2,79 10 ⁻⁷	2,72 10 ⁻⁷
Salon	1,20 10 ⁻⁷	1,06 10 ⁻⁷	1,60 10 ⁻⁷	2,40 10 ⁻⁷	1,57 10 ⁻⁷	1,52 10 ⁻⁷

Tableau V.18: Résultats obtenus pour la dose efficace due aux descendants du radon ²¹⁸Po et ²¹⁴Po pour différents groupes d'âges vivent dans la maison dans le cas fermé en utilisant notre méthode et le modèle de l'UNSCEAR-2000 [5].

Endroit	Dose efficaces (Sv.an ⁻¹ par heure d'exposition)					UNSCEAR-2000 [6]
	Cette méthode					
	Homme adulte	Femme adulte	Enfant de 10 ans	Enfant de 5 ans	Moyenne pour membres du public	Membres du public
Chambre 1	5,86 10 ⁻⁸	5,21 10 ⁻⁸	7,82 10 ⁻⁸	1,17 10 ⁻⁷	7,65 10 ⁻⁸	7,46 10 ⁻⁸
Chambre 2	6,45 10 ⁻⁸	5,74 10 ⁻⁸	8,61 10 ⁻⁸	1,29 10 ⁻⁷	8,43 10 ⁻⁸	8,21 10 ⁻⁸
Salle de bain	2,55 10 ⁻⁷	2,27 10 ⁻⁷	3,40 10 ⁻⁷	5,10 10 ⁻⁷	3,33 10 ⁻⁷	3,24 10 ⁻⁷
Toilette	1,94 10 ⁻⁷	1,73 10 ⁻⁷	2,59 10 ⁻⁷	3,89 10 ⁻⁷	2,54 10 ⁻⁷	2,47 10 ⁻⁷
Cuisine	5,56 10 ⁻⁸	4,94 10 ⁻⁸	7,42 10 ⁻⁸	1,13 10 ⁻⁷	7,26 10 ⁻⁸	7,08 10 ⁻⁸
Salon	3,26 10 ⁻⁸	2,89 10 ⁻⁸	4,34 10 ⁻⁸	6,52 10 ⁻⁸	4,25 10 ⁻⁸	4,14 10 ⁻⁸

Tableau V.19: Résultats obtenus pour la dose efficace due aux descendants du radon ²¹⁸Po et ²¹⁴Po pour différents groupes d'âges vivent dans la maison dans le cas ouverte en utilisant notre méthode et le modèle de l'UNSCEAR-2000 [5].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié numériquement et expérimentalement l'effet des paramètres météorologiques sur de la concentration et la distribution du radon et ses descendants dans un bâtiment. Les effets de la ventilation, la température, et l'humidité relative ont été examinés. Nous avons constaté que la concentration et la distribution du radon diminue au fur et à mesure que le taux de ventilation augmente, ainsi que, lorsque le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur augmente, cependant, elle augmente avec une augmentation de l'humidité relative. Les résultats obtenus par les simulations CFD ont été accordés avec ceux obtenus expérimentalement dans un écart maximal de 16%.

Nous avons montré aussi que les taux d'équivalent de dose engagée dans le système respiratoire humain dus aux ^{218}Po et ^{214}Po augmentent lorsque l'activité du radon augmente à l'intérieur.

Un nouveau modèle pour la détermination de la dose efficace annuelle due aux ^{218}Po et ^{214}Po descendants du radon de courte période a été proposé et testé.

Références

- [1] W. P. Jones, B. E. Lander, The calculation of low- Reynolds number phenomena with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16, 1119-1130, (1973).
- [2] H. Majdoubi, T. Boulard, H. Fatnassi, L. Bouirden, Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1050–1062, (2009).
- [3] D. Sonntag, Important new values of physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90 and Psychrometer Formula. *Viena: Zeitschrift fur Meteorologie*, (1990).
- [4] R. Rabi, L. Oufni, Study of radon dispersion in typical dwelling using CFD modeling combined with passive-active measurements. *Radiat. Phys. Chem.* 139, 40–48, (2017).
- [5] R. Rabi, L. Oufni Evaluation of indoor radon equilibrium factor using CFD modeling and resulting annual effective dose, *Radiation Physics and Chemistry*, 145, 213-221, (2018).
- [6] UNSCEAR, (2000). Sources and effects of ionising radiation. Report to the General Assembly, Volume I. New York.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail de thèse était d'apporter une contribution à la modélisation numérique et une étude expérimentale du comportement du radon et de ses descendants dans les locaux. Une étude de l'influence de la ventilation sur le confort thermique et sur la qualité de l'air intérieur a été réalisée. Différents scénarios de ventilation ont été considérés afin d'optimiser les paramètres pertinents de la ventilation (efficacité de la ventilation (ε_T , ε_C) et indice de qualité de l'air intérieur (I_{AIR})).

De nos jours, dans le domaine du bâtiment, le recours à la modélisation et à la simulation numérique est devenu primordiale afin de limiter les coûts liés à l'expérimentation. Néanmoins, les calculs numériques encourent des temps de calculs considérables et nécessitent des moyens matériels très puissants. Dans le but d'optimiser les temps de calculs, nous avons choisi de mener nos simulations dans des volumes plus au moins petits. En effet, l'étude numérique des phénomènes physiques présents dans le bâtiment peut être amenée à l'échelle des cavités qui peut fournir une première approximation. De ce fait, nous avons considéré des cavités ouvertes. Ces cavités ont la particularité d'être le siège de gradients de température et de concentration du radon.

Dans un premier temps, après avoir présenté les techniques de modélisation existantes, nous avons décidé de réaliser les simulations en résolvant les équations de conservation. Il s'agit des équations gouvernant les écoulements thermo-convectifs. En se basant sur l'approximation de Boussinesq, il a été développé un modèle mathématique décrivant le problème général. Le système d'équations résultant a été discrétisé par l'approche des volumes finis. Les effets de turbulence ont été traités par le modèle k-epsilon et le couplage pression-vitesse a été assuré en utilisant l'algorithme SIMPLER. Nous avons aussi évalué les activités volumiques ainsi que le taux d'exhalation du radon dans les différents échantillons des matériaux de construction en utilisant la méthode des efficacités de détection des détecteurs solides de traces nucléaires de types CR-39 et LR-115 II.

Ensuite, nous avons réalisé une étude de l'influence de la ventilation sur la qualité de l'air et sur le confort thermique. Nous avons traité deux cas d'études. La première étude concerne l'analyse des transferts thermiques et du radon par convection dans des cavités ventilées en régimes laminaire et permanent. L'influence de la ventilation sur la qualité de l'air et le

confort thermique a été examinée. Afin d'analyser la sensibilité des paramètres pertinents liés à la ventilation (ε_T , ε_C et I_{AIR}), nous avons considéré différentes valeurs du nombre de Rayleigh thermique (Ra) et du nombre de Reynolds (Re). L'influence de la ventilation est traitée en considérant différents scénarios. Les résultats obtenus ont indiqué que les nombres Ra et Re ont des effets importants sur les distributions de température et de concentration du radon, la dynamique de l'écoulement et les paramètres de la ventilation (ε_T , ε_C et I_{AIR}). Egalement, l'emplacement des bouches de ventilation influence considérablement l'efficacité de la ventilation. Dans la deuxième partie, nous avons examiné la qualité de l'air à l'intérieur d'une chambre tridimensionnelle remplie d'un mélange air- ^{222}Rn en régime turbulent. Quatre scénarios de ventilation ont été testés afin de distinguer le scénario optimal en termes d'efficacité et de qualité de l'air, nous avons trouvé que le flux de chauffage, et l'emplacement des ouvertures d'entrée et de sortie influencent considérablement la dynamique de l'écoulement, l'efficacité de la ventilation (ε_T et ε_C) et la qualité de l'air intérieur (I_{AIR}). Il convient de signaler qu'à travers ces études, plusieurs tests de validation numérique ont été réalisés.

Enfin, nous avons étudié numériquement et expérimentalement en utilisant Radon Scout Plus l'influence de la ventilation, température et l'humidité relative sur la concentration et la distribution du radon et ses descendants à l'intérieur d'une habitation. Les résultats obtenus ont montré que la ventilation, la température et l'humidité relative ont des effets importants sur les distributions de concentration du radon et ses descendants. Nous avons trouvé que la concentration du radon et ses descendants diminue tout en augmentant le taux de ventilation, ainsi que, lorsque le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur augmente, cependant, il augmente avec l'augmentation de l'humidité relative. Egalement, nous avons confronté les résultats obtenus par la simulation avec ceux obtenus expérimentalement. De ceci, on constate une bonne concordance entre les résultats obtenus numériquement et expérimentalement.

Comme application, nous avons développé et testé un nouveau modèle pour la détermination des doses efficaces dues aux ^{218}Po et ^{214}Po , suite à l'inhalation de l'air intérieur par les membres du public. Nous avons conclu que les enfants d'âge compris entre 5 et 10 ans sont les plus exposés aux doses de radiations émises par le ^{218}Po et ^{214}Po .

Comme perspectives, nous envisageons étendre le travail :

- à l'étude numérique de la variation journalière du comportement du radon et ses descendants dans d'une cimenterie.
- à la modélisation numérique du radon dans une nappe phréatique.
- à l'étude de la cartographie des concentrations moyennes du radon dans les habitations de la région Beni Mellal-Khénifra.
- à l'étude de la dispersion atmosphérique du radon à l'échelle nationale.