REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. YAHIA FARES De Médéa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie des Procédés et

Environnement

Projet de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie des procédés

Option : pollution chimique et gestion environnementale

THEME

Contribution à L'étude des transferts d'une solution aqueuse de nitrate(NO_3^-) à travers deux couches de terre

Etudié et présenté par :

Mr : Mamoudou Gadé Souleymane

Proposé et dirigé par :

Dr N.Hadidi

Promotion : juin 2014

Dedicaces

Avec l'esprit de cohésion on retrouve toujours ses aspirations, une façon de dédié ce modeste travail à tous ceux qui ont contribué d'une manière quelconque dans le cadre de me faire booster sur le plan académique.

A mes très chers parents pour leurs sacrifices inlassables et dévoués. Qu'Allah vous récompense du Paradis éternel et vous préserve !

A mes frères et sœurs surtout le grand frère Soumana et ma petite sœur Nafissa pour leurs aptitudes à me soutenir sur tous les plans.

A ma tante Raki sans oublier mon admirable fiston Hama Seydou.

A mes amis et proches.

A tous mes enseignants qui n'ont ménagé aucun effort dans le cadre de mes études.

Merci à tous !!!

Souleymane Mamoudou Gadé

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ici toute ma reconnaissance à mon encadreur Dr N.hadidi pour la confiance et pour la liberté d'initiative qu'il m'a toujours accordée. Ses qualités professionnelles et humaines m'ont énormément appris. Travailler avec lui fut une réelle chance et un réel plaisir pour moi et je ne sais comment lui exprimer ma gratitude.

Mes remerciements sincères aux membres du jury pour avoir acceptés d'examiner ce travail.

Que tous ceux qui m'ont apporté leur aide pour la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

A tous ceux qui m'ont accompagnée pendant ces années, même pour un bout de chemin.

Table des matières

Liste des figures I

Liste des tableaux III

Nomenclature et symboles IV

Résumé

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les milieux poreux et le phénomène d'eutrophisation

I.1.Introduction 1

I.2.Définition :qu'est ce que le nitrate ? 1

I.3.Sources et niveaux environnementaux 2

I.3.1.Les eaux et les sols 2

I.3.2.L'atmosphère 3

I.3.3.Biosynthèse endogène de nitrates 3

I.3.4.Eau d'alimentation 4

I.3.5.Les aliments 4

I.3.6.Les rejets 5

I.4.Les propriétés des nitrates 7

I.5.Mouvement des nitrates 8

I.5.1.Dans le sol 8

I.5.2.Dans les nappes 9

I.6.Méthodes scientifiques de mesures 10

I.7.Les effets des nitrates 11

I.7.1.Effets connus sur l'environnement 11

I.7.2.Effets connus sur la santé humaine 12

I.7.3.Effets indirects 14

I.8.Réglementation en vigueur 14

I.9.Recommandation en vertu des principes de précautions 15

I.10.Définitions eutrophisation 16

I.11.Discussion autour du thème d'eutrophisation....17
I.12.Les causes de l'eutrophisation....18
I.13.Caractéristiques et manifestations de l'eutrophisation....19
I.14.Les conséquences de l'eutrophisation....22
I.15.Les moyens de lutte contre l'eutrophisation....24
I.16.Conclusion....28

Chapitre II : Notions sur les milieux et leurs applications

II.1.Introduction....30
II.2.Définitions relative aux milieux poreux....32
II.2.1Milieux poreux....32
II.2.2.Notion de volume élémentaire (V.E.R)....33
II.2.3.Propriétés structurales et thermophysiques d'un milieu poreux....34
II.2.3.1.La porosité....34
II.2.3.2.La perméabilité....35
II.2.3.3.La tortuosité....36
II.2.3.4.La surface spécifique....37
II.2.3.5.La conductivité thermique effective....37
II.3.Modèles d'écoulement dans les milieux poreux....39
II.3.1.La loi de Darcy....39
II.3.2.Formulation de Forchheimer....39
II.3.3.Formulation de Brinkman....40
II.3.4.Modèle général....40
II.4.Milieux poreux multicouches....40
II.5.Mousses métalliques....41
II.5.1.Applications....43
II.5.1.Electrode poreuse....43
II.5.2.Echangeur de chaleur....43
II.5.3.Filtration....44

II.5.1.4.Purification de l'eau 44

II.5.1.5.Applications biomédicales 45

II.6.Conclusion 46

Chapitre III : Formulation Mathématique

III.1.Introduction 47

III.2.Le transfert de masse par diffusion moléculaire 48

III.2.1.Equation de la diffusion massique 50

III.3.Couplage avec la convection thermique 51

III.4.Modèle physique 53

III.5.Equations gouvernantes 54

III.5.1.Equation de continuité 54

III.5.2.Equation de conservation de la quantité de mouvement 54

III.5.3.Equation de l'énergie 54

III.5.4.Equation de concentration 54

III.6.Conditions aux limites 55

III.7.Adimensionnement des équations 55

III.8.Conclusion 56

Chapitre IV : Modélisation Numérique

IV.1.Introduction 58

IV.2.Principe de la méthode des volumes finis 58

IV.2.1.Equation différentielle gouvernante 58

IV.2.1.1.Equation de continuité 58

IV.2.2.Maillage et volume de controle 59

IV.2.3.Discrétisation des équations de conservation 59

IV.2.3.1. Flux de diffusion–convection 61

IV. 2.3.2. Simplification de l'expression du flux 62

IV. 2.3.3. Linéarisation du terme source 62

IV. 2.3.4. Equation finale de discrétisation 63

IV. .3.5.Méthode de résolution des équations algébriques 64

IV.2.4. Considérations pour le champ dynamique 65

IV.2.4.1.Notion de maillage décalé 65

IV.2.5. Discrétisation des équations dynamiques 66

IV.2.5.1. Equations du mouvement. 66

IV.2.5.2.Correction des vitesses de la pression.....66

IV.2.5.3.Equation de correction de pression 67

IV.3.Algorithme SIMPLER.....68

IV.4 .Technique de sous-relaxation 70

IV.5. Critère de convergence 71

IV.6 Schémas d'interpolation 71

IV.7 Application de la méthode des volumes finis à notre problème 72

IV.7.1 Discrétisation des équations du mouvement 72

IV.7.1.1. Equation du mouvement en X 72

IV.7.1.2. Equation du mouvement en Y 73

IV.7.2. Equation de correction de pression 75

IV.7.3. Discrétisation de l'équation de l'énergie 76

IV.7.4. Discrétisation de l'équation du soluté 77

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1.Sensibilité du code de calcul au maillage et validation 78

V.2.Lignes de courant-isothermes –isoconcentrations 79

V.3.Lignes de courant, isothermes et isoconcentrations (cas de la cavité inclinée). 85

V.4. Nombres de Nusselt et Sherwood moyens (cavité inclinée) 85

V.5.Conclusion……...87

Conclusion générale et perspectives

Références Bibliographiques

Listes des figures

Figure I.1 : Représentation schématique du phénomène d'eutrophisation……21

Figure.I.2 : Schéma représentant le processus du fonctionnement du limno……26

Figure II.1 : Milieux poreux consolidés……32

Figure II.2 : Milieux poreux non consolidés……32

Figure II.3 : volume élémentaire représentatif (V.E.R)……33

Figure II.4 : Définition schématique de la tortuosité…..……37

Figure II.5 : Modèle série de la conductivité thermique effective…….…..…….38

Figure II.6 : Modèle parallèle de la conductivité thermique effective……..…...……39

Figure II.7 : Milieu poreux multicouche disposés verticalement……41

Figure II.8 : Milieu poreux multicouche disposés horizontalement……41

Figure II.9 : Filtration horizontale……41

Figure II.10 : Filtre gravitaire rapide……...……...41

Figure II.11 : Mousse métallique mise en forme pour intégration dans un échangeur de chaleur de type « tube coaxiaux »…….44

Figure II.12 : Utilisation du matériau mousse métallique par secteur d'activité……45

Figure. III.1: transfert de masse par diffusion moléculaire dans un mélange gazeux……48

Figure. III.2: Couplage thermosolutale le long d'une plaque verticale……..52

Figure III.3. Modèle physique et système de coordonnée……..53

Figure V.1 : Variation des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour

Da= [10^{-10}-10^{0}], N=0 ,Ra=7x10^{6}et différente valeurs de α ……..80

Figure V.2 : Variation des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour

Da_1= [10^{-10}-10^{0}], N=1 Ra=7x10^{6}, et différente valeurs de α ……80

Figure V.3. Variation des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour

Da_1= [10^{-10}-10^{0}], N=3,Ra=7x10^{6} et différente valeurs de α ……..……81

Figure V.4. Variation des nombres de Nusselt moyens pour

Da_1= [10^{-10}-10^{0}], N=3 et différente valeurs de α ……...81

Figure V.5. Variation des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour

Da_1= [10^{-10}-10^{0}], N=3 et différente valeurs de α ……...82

Figure V.6 : représente les lignes de courant pour

N=3,-3, Da=[10^{-6},10^{-4},10^{-2}] et Ra=7.10^{6} ……..82

Figure V.7 : représente les lignes de courant pour

N=3,-3, α=[10,30,60], Ra=7.10^{6} et Da=10^{-2} ……83

Figure V.8 : représente les isothermes pour N=3,-3, Da=[10^{-6},10^{-4},10^{-2}] et Ra=7.10^{6} …..83

Figure V.9 : représente les isothermes pour N=3,-3, α=[10,30,60], Ra=7.10^{6} et Da=10^{-2}..84

Figure V.10 : représente les Isoconcentrations pour

N=3,-3, Da=[10^{-6},10^{-4},10^{-2}] et Ra=7.10^{6}……84

Figure V.11 : représente les isothermes pour

N=3,-3, α=[10,30,60], Ra=7.10^{6} et Da=10^{-2}……..85

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Une pollution par des composés azotés de la ressource liée aux activités humaines…….6

Tableau I.2 : Une pollution par des composés azotés de la ressource liée aux activités de surfaces……6

Tableau I.3 : Manifestation de l'eutrophisation en fonction de la typologie du cours d'eau…20

Tableau II.1 : les domaines d'application pour phénomène de transport dans les milieux poreux……...…….30

Tableau II.2 : Valeurs moyennes de porosité de quelques matériaux……..……35

Tableau II.3 : Valeurs moyennes de perméabilité de quelques matériaux……..36

Tableau V.1 : Sensibilité du code de calcul au maillage cas du modèle vertical ($\alpha = 0^{\circ}$) pour Ra=10^7, R_K=0.1, Pr=7, N=1, Le=10, Ram= 10^2, ε_1 = 0.5 et ε_2 = 1…….78

Tableau V.2. Comparaison du nombre de Nusselt dans le cas du régime de Darcy-Brinkman en convection thermique pour *Pr* = 0.71, N=0, ε =0.5…….....79

NOMENCLATURE

Nomenclature

a Diffusivité thermique, [m^2s^{-1}]

C Concentration dimensionnelle du soluté

C_0 (C_L) Concentration dimensionnelle du soluté sur la paroi active

D_{a_i} Nombre de Darcy, $D_{a_i} = K_i / L^2$

k Conductivité thermique, W/m°C

K_i Perméabilité du milieu poreux, m^2

L dimension de la cavité, m

Le Nombre de Lewis, $\mathrm{Le} = a_{\mathrm{eff_i}} / \mathrm{D}_{\mathrm{eff_i}}$

$\mathrm{Nu_b}$ Nombre de Nusselt moyen, $Nu_b = \int_0^1 \left[\frac{\partial \theta}{\partial X}\right]_{X=0} dY$

N Rapport des forces de volume, $\mathrm{N} = \beta_C \Delta C / (\beta_T \Delta T)$

p Pression, [Pa]

P Pression adimensionnelle, $\mathrm{P} = \mathrm{pL}^2 / (\rho_f . a^2 / \varepsilon^2)$

Pr Nombre de Prandtl, $\mathrm{P_r} = \nu_f / a_{\mathrm{eff_i}}$

Ra Nombre de Rayleigh, $Ra = g.\beta_T \cdot L^3 \Delta T / \nu_f . a_{eff1}$

Ra_m Nombre de Rayleigh modifié, $Ra_m = RaDa_1$

$\mathrm{R_c}$ Rapport des conductivités thermiques, $\mathrm{R_c} = \mathrm{k_{eff_i}} / \mathrm{k_{eff_1}}$

$\mathrm{R_\nu}$ Rapport de la viscosité effective à celle du fluide, $\mathrm{R_\nu} = \mu_{\mathrm{eff_i}} / \mu_f$

R_K Rapport des perméabilités des couches poreuses, $R_K = K_2 / K_1$

$\mathrm{Sh_b}$ Nombre de Sherwood moyen $Sh_b = \int_0^1 \left[\frac{\partial S}{\partial X}\right]_{X=0} dY$

S Concentration adimensionnelle, $S = \left(C - (C_0 + C_L)/2\right) / (C_0 - C_L)$

T Température, [°C]

$T_0 (T_L)$ Température sur la paroi active, [°C]

u Vitesse axiale, (m/s)

U Vitesse adimensionnelle suivant la direction X, $U = uL/a$

v Vitesse transversale, [m/s]

V Vitesse adimensionnelle suivant la direction Y, $V = v\,L/a$

x Coordonnée axiale, [m]

X Coordonnée horizontale adimensionnelle, $X = x/L$

y Coordonnée transversale, [m]

Y Coordonnée verticale adimensionnelle, $Y = y/L$

Symboles grecs

α Angle d'inclinaison de la cavité,

β_T Coefficient d'expansion thermique, [K^{-1}]

β_S Coefficient d'expansion solutale

ρ Masse volumique, [Kg m^{-3}]

μ_{eff} Viscosité équivalente dans le modèle de Brinkman, [Kg m^{-1} S^{-1}]

ν Viscosité cinématique, [m^2 s^{-1}]

ε Porosité

τ Tortuosité

θ Température adimensionnelle, $\theta = \left(T - (T_0 + T_L)/2\right)/\left(T_0 - T_L\right)$

ϕ Variable dépendente

Γ Coefficient de diffusion

ΔT différence de température, $\Delta T = T_0 - T_L$, [°C]

Δc Différence de concentration, $\Delta c = c_0 - c_L$

Indices

b Moyen

E, e Est

eff Effectif

f Fluide

i Couche poreuse

N, n Nord

Nb	Nœuds voisins
P	Nœud principal
S, s	Sud

RESUME

Le présent travail est une étude de la convection double diffusive générée dans une cavité carrée et renfermant deux couches de milieu poreux disposées horizontalement l'ensemble cavité-couches poreuses pouvant occuper différentes positions par rapport à l'horizontal. Chaque couche poreuse est considérée homogène, isotrope et saturée par le même fluide (solution de nitrate). Les parois verticales sont soumises à des conditions de température et de concentration uniformes alors que les parois horizontales sont adiabatiques et imperméables. Les équations de base décrivant la convection double diffusive au sein de l'enceinte sont résolues numériquement par la méthode des volumes finis. Les résultats numériques sont analysés en termes de lignes de courant, des isothermes, des isoconcentrations et des nombres de Nusselt et Sherwood moyens. Une analyse d'échelle est appliquée dans cette étude, nous avons établi des corrélations qui sont en bon accord avec les résultats numériques pour une large gamme des paramètres.

Mots clés : double diffusive, convection thermosolutale, milieux poreux, multicouches, inclinée, Bicouches

ABSTRACT:

The present work is a study of the double diffusive convection generated in a square cavity and containing two coats(layers) of porous environment(middle) arranged horizontally the set(group) porous cavities-coats(-layers) which can occupy various positions with regard to(compared with) the horizontal. Every porous coat(layer) is considered homogeneous, isotropic and saturated by the same fluid (solution of nitrate). The vertical walls are subjected(submitted) to uniform conditions of temperature and concentration while the horizontal walls are adiabatic and waterproof(impervious). The describing basic equations the convection doubles diffusive within the surrounding wall(speaker) are numerically resolved by the method of the finished volumes. The digital results(profits) are analyzed in terms of lines of running(roaming), isotherms, isoconcentrations and numbers of Nusselt and average Sherwood. An analysis of scale(ladder) is applied in this study, we established correlations which are in good agreement with the digital results(profits) for a wide range of the parameters.

Keywords: double-diffusive, thermosolutal convection, porous medium, bi-layered,inclined cavity

ملخص

من هذا العمل هو دراسة حالة توازن حراري وانتشاري مزدوج يعمل بنظام الحمل الحراري المتولد في مربع يحتوي تجويف كوتس (طبقات) من البيئة (وسط) مرتبة أفقياً مجموعة (مجموعة) تجويفات ضيقة بين كوتس (على الطبقات التي يمكن أن تشغل مناصب مختلفة فيما يتعلق (بالمقارنة مع الوضع الأفقي. معطف كل المسامية (الطبقة) تعتبر متجانسة، العمودي تتعرض الجدران (المقدمة) إلى شروط موحدة درجات الحرارة .(تقييدات حدّ مشبعة من نفس سائل الأزوت الحل وقد وصف المعادلات الأساسية في حالة توازن حراري .(غير آبه) adiabatic والتركيز الأفقي مع الجدران العازلة للماء وانتشاري تضاعف ظاهرة الحمل الحراري داخل سور (رئيس) من الناحية العددية حل طريقة الانتهاء. النتائج الرقمية ومتوسط nusselt (الأرباح) تحليل بشأن خطوط تشغيل (معرف التجوال , الأيسوثرم، خطط امتحانات عدد من التجمعات في هذه الدراسة، فقد أنشأنا علاقات جيدة مع النتائج الرقمية (الأرباح) على مجموعة (تحليل الحجم (السلالم .Sherwood واسعة من المعايير.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'étude du mode de convection naturelle en milieu fluide ou poreux s'est particulièrement développée ces dernières années vues son intérêt pour la résolution de certains problèmes technologiques importants.

Convection naturelle : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultantes des différences de température sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur). On note que le mouvement du fluide par convection naturelle dans une cavité horizontale a été largement étudié à cause de son application dans différents domaines. On peut citer :

- ✓ Pour un milieu fluide : collecteurs d'énergie solaire, refroidissement des équipements électriques et stockage des liquides et des gaz.
- ✓ Pour les milieux poreux : séchage, isolation thermique, échangeurs de chaleur.

Le travail qui fait l'objet de cette étude concerne justement la convection double diffusive générée dans une cavité carrée remplie par deux couches de milieu poreux disposées horizontalement surnagées par un fluide (solution aqueuse de nitrates).

Notre étude se porte plus particulièrement sur l'influence, à des nombres de Rayleigh modérés, de certains paramètres géométriques et physiques, du nombre de Lewis sur la structure de l'écoulement et les transferts de chaleur et de masse.

Le présent travail est structuré de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous donnons des généralités sur les nitrates et le phénomène d'eutrophisation à savoir définitions, caractéristiques, paramètres influençant et quelques mesures importantes.

Dans le deuxième chapitre nous définissons les caractéristiques des milieux poreux, nous exposons les travaux expérimentaux, théoriques et numériques antérieurs et nous présentons quelques domaines d'applications.

Le troisième chapitre concerne la formulation mathématique du problème où les équations gouvernantes, les hypothèses simplificatrices, et les conditions aux limites associées seront

présentées. Ensuite, nous établissons les équations adimensionnelles et nous définissons les principales grandeurs adimensionnelles caractérisant notre modèle.

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté les méthodes numériques de résolution, les équations différentielles aux dérivées partielles. Nous avons choisi la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations régissant notre modèle.

Dans le cinquième chapitre nous discutons les résultats obtenus, en se basant sur l'écoulement naturel dans deux types de configurations géométriques : cavité non inclinée et cavité inclinée. Nous validons les résultats numériques par comparaison avec des travaux antérieurs. Ensuite, nous examinons l'influence des paramètres de contrôle du problème sur l'évolution de la structure de l'écoulement et sur le transfert thermique et massique.
Le travail est bouclé enfin par une conclusion générale et les perspectives.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES NITRATES ET LE PHENOMENE D'EUTROPHISATION

Généralités sur les nitrates et le phénomène d'eutrophisation

I.1. Introduction

Alors qu'à l'équilibre naturel l'azote représente le principal composant de la biosphère (environ 78%), ce dernier constitue paradoxalement à l'heure actuelle l'une des substances principales de nuisance à l'environnement malgré son appartenance à un cycle naturel très complexe. Il figure parmi les composés d'intérêt prioritaire des lois de protection de l'environnement de la plupart des pays du monde. En effet, le terme de pollution azotée se justifie par le déversement abusif, direct ou indirect par l'homme, d'impuretés dérivées de l'azote dans l'atmosphère, dans les eaux naturelles et souterraines. Son introduction accrue dans les différents milieux récepteurs est préjudiciable à la santé humaine, nuisible aux ressources biologiques terrestres comme aquatiques et à l'ensemble des écosystèmes naturels.

Les sols contiennent souvent des quantités énormes de composés azotés qui, une fois transformés en nitrates, sont absorbés par les plantes sauvages ou cultivées bouclant ainsi un cycle naturel.

Tout pourrait être équilibré si les activités humaines ne venaient pas s'ajouter à ce cycle naturel par l'apport de fertilisants en grande quantité pour les cultures ou la concentration de déjections humaines dans les agglomérations et animales dans les élevages. Les excédents non absorbés par la nature sont à l'origine d'une infiltration de l'azote dans les sols et peuvent entrainer une pollution.

I.2. Définition : qu'est ce que le nitrate ?

Les nitrates (autrefois nommés *nitre*, souvent synonyme de salpêtre) sont les sels de l'acide nitrique. La formule chimique de l'ion nitrate est NO_3^-.
Les nitrates (NO_3^-) sont des composés chimiques constitués d'azote et d'oxygène. Ils résultent du cycle de l'azote qui est une substance nutritive indispensable à la vie végétale : la nitrification. [1]

La nitrification est le processus biologique résultant de l'activité de micro-organismes (bactéries) qui oxydent séquentiellement l'azote ammoniacal (NH_4^+) en nitrite (NO_2^-) (Nitrosomonas) puis en nitrate (NO_3^-) (Nitrobacter).[2]

Celui-ci peut être amené à se retrouver dans le sol via différentes voies. L'oxydation par les microorganismes des plantes, du sol ou de l'eau rend l'azote assimilable par les plantes sous

forme de nitrates. Ainsi toutes les sources d'azote sont potentiellement capables de se retrouver sous forme de nitrate. Dans d'autres conditions, notamment en milieu acides, des nitrites (NO_2^-) sont naturellement formés à partir des nitrates. A leur tour les nitrites, peuvent se combiner aux amines et aux amides pour former ce que l'on appelle des nitrosamines. Ne pas confondre nitrates et nitrites NO_2^- sels de l'acide nitreux, ou résultat de la réduction des nitrates par des bactéries spécifiques.

I.3. Sources et niveaux environnementaux

I.3.1. Les eaux et les sols

Les nitrates sont présents dans le sol à l'état naturel : ils proviennent notamment de la décomposition de la matière azotée de végétaux par des bactéries présentes dans le sol. Certaines activités humaines participent cependant à l'augmentation de ces concentrations: changement d'occupation des sols (labourage d'une prairie, défrichage d'une forêt par exemple), mais surtout apport d'engrais azotés pour l'agriculture (directement sous forme de nitrates, soit d'ammoniac, comme les effluents d'élevage).[3]

La majeure partie de l'azote présent dans le sol est consommée par les végétaux. Toutefois, une fraction des nitrates présents dans les sols est lessivée par l'eau de pluie et peut rejoindre directement les cours d'eau par ruissellement ou s'infiltrer vers les nappes souterraines au rythme de 1 à 2 mètres par an. Les eaux sont alors polluées par cet excédent de nitrates, ce qui constitue l'une des causes majeures de la dégradation des eaux naturelles à long terme. Les concentrations en nitrates des eaux souterraines et superficielles sont généralement inférieures à 1 $mg.L^{-1}$ dans les systèmes exempts d'activité humaine et la concentration naturelle en $N\text{-}NO_3^-$ des cours d'eau est inférieure à 0,2 $mg.L^{-1}$.[3]

La principale source de contamination des sols et des eaux par les nitrates est l'apport d'engrais azotés sur les cultures. Ces apports peuvent être effectués en utilisant divers types d'engrais azotés qui peuvent fournir de l'azote soit sous forme de nitrates (assimilable par la plante mais également beaucoup plus lessivable), soit sous formes d'urée, d'ammonium ou de lisier, qui seront progressivement transformées en nitrates. Les systèmes de traitements des eaux usées déficients, tout comme la décomposition de matières organiques animales ou végétales issues produites par l'activité humaine, peuvent être une source de contamination par les nitrates.[3]

I.3.2. L'atmosphère

Les nitrates aérosols sont des particules secondaires formées dans l'atmosphère par des transformations chimiques au cours desquelles les oxydes d'azote (NOx) réagissent avec des substances déjà présentes dans l'air, comme l'ammoniac. Le processus naturel de dénitrification conduit à charger l'atmosphère en oxydes d'azote. Le dioxyde d'azote alors formé est rapidement transformé en acide nitrique, lui-même converti en nitrate d'ammonium et nitrate de calcium. Des nitrates sont formés à partir du N_2 atmosphérique lors d'orages. Les éclairs provoquent une formation d'oxydes d'azote et sont à l'origine d'une nitrification abiotique. L'acide nitrique formé se combine ultérieurement à l'ammoniac présent dans l'atmosphère et donne des microcristaux de nitrate d'ammonium qui sont ramenés à la surface du sol par les précipitations sous formes de pluies ou de neiges. Les divers processus de combustion liés à l'activité anthropique (en particulier l'utilisation de véhicules à moteur), conduisent à enrichir l'atmosphère en oxydes d'azote. Comme c'est le cas pour les oxydes d'azotes issus de sources naturelles, ceux-ci sont transformés en nitrate d'ammonium et nitrate de calcium. Cette concentration atmosphérique en nitrates peut être particulièrement accrue au voisinage des grandes agglomérations où la circulation routière est importante. On a ainsi trouvé des concentrations dans l'habitat variant de 1,1 à 5,6 $\mu g.m^{-3}$. Dans l'atmosphère extérieure on mesurait aux Pays Bas des concentrations comprises entre 1 et 14 $\mu g.m^{-3}$. Les concentrations extrêmes en nitrates atmosphériques relatées dans la littérature s'étalent entre 0,1 et 40 $\mu g.m^{-3}$ .Il a été estimé que pour des régions avec une forte concentration en composés azotés dans l'air, même si tous ces composés étaient inhalés par un adulte, la somme des apports de $N\text{-}NO_3^-$ par cette voie ne serait que d'approximativement 0,1 $mg.jour^{-1}$ [1]

I.3.3. Biosynthèse endogène de nitrates

Dès le début du XXème siècle, Mitchell et al. (1916) observaient que les quantités de nitrates rejetées dans l'urine des mammifères pouvaient être supérieures aux quantités ingérées, ce qui permettait de suspecter une synthèse endogène des nitrates. La biosynthèse endogène de nitrates à partir de la L-Arginine a été mise en évidence plus récemment. L'importance de cette source de nitrate est décrite par Hill comme étant probablement pour l'individu, la principale source d'exposition aux nitrates lorsque le système immunitaire est stimulé de façon approprié. Un adulte sain excrète par les urines 62 mg de nitrate issu de sa production endogène chaque jour.[1]

I.3.4. Eau d'alimentation

De par leur forte solubilité dans l'eau, les nitrates se retrouvent souvent dans l'eau du robinet à des concentrations proches des limites autorisées. En effet, l'utilisation d'engrais azotés qui s'est fortement développée depuis 1950 conduit à une augmentation des teneurs en NO_3^- dans les eaux de surfaces et souterraines. Par conséquent, les teneurs élevées en azote des nappes se répercutent sur les eaux brutes utilisées pour la production d'eau potable. Des études menées dans divers pays d'Europe, attribuent à l'eau de consommation 25 % des apports de nitrate à l'organisme. Etant donné la très grande gamme de teneurs en nitrates rencontrée dans l'eau de consommation selon les régions ou pays concernés (Hill, 1991), la proportion des apports de nitrates imputable à l'eau est très variable. L'organisation mondiale pour la santé précise que dans les régions où les concentrations en nitrate dans l'eau sont inférieures à 10 $mg.L^{-1}$, l'exposition par ingestion de légumes est plus élevée. Cependant, l'eau devient la principale source de nitrate lorsque les concentrations en nitrates dans l'eau dépassent la concentration maximale conseillée par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) dans les eaux de boisson et fixée à 50 $mg.L^{-1}$. Dans de nombreux pays, les teneurs en nitrates sont inférieures à 10 $mg.L^{-1}$ dans les eaux de consommation provenant d'eaux de surfaces. Cependant, pour 15 pays Européens étudiés en 1985, il a été estimé qu'entre 0,5 à 10 % de la population étaient exposés à des niveaux de nitrates supérieurs à 50 $mg.L^{-1}$ dans l'eau d'alimentation. Pour une consommation d'eau de 1,5 litre par jour, l'apport de nitrate imputable à l'eau d'alimentation peut être estimé à environ 75 $mg.j^{-1}$ lorsque les concentrations dans l'eau sont proches de ce seuil.[1]

I.3.5. Les aliments

Les aliments, en particulier les légumes, les fruits et les viandes salées (et dans une moindre mesure les poissons et les produits laitiers) peuvent contenir une dose élevée de nitrates. La teneur en NO_3^- des végétaux est influencée par l'azote disponible dans le sol ou apporté par fertilisation, la variété cultivée et les conditions de croissance incluant la saison (les nitrates étant métabolisés en présence de lumière, les cultures sous serres ou d'hiver sont généralement plus chargées en nitrates).

Dans les fromages et les charcuteries, les nitrates sont issus des additifs utilisés comme agents de conservation comme par exemple le nitrate de sodium (E251) ou le nitrate de potassium (E252). Les nitrates de sodium ou de potassium sont également utilisés pour le traitement des viandes car ils stabilisent la couleur des viandes rouges, inhibent certaines détériorations et le

développement de microorganismes anaérobiques toxiques, ralentissent l'oxydation de la viande et contribuent à exhausser la saveur. Ces deux additifs alimentaires sont interdits d'utilisation en boucherie (morceaux de viandes débitées et viandes hachées) et ne sont pas autorisés dans le corned-beef. L'ajout de nitrates dans les aliments pour bébés est strictement interdit.

Il a été estimé que les teneurs en nitrates sont en générale comprises entre 2,7 et 945 $mg.kg^{-1}$ pour les viandes et moins de 3 et 27 $mg.kg^{-1}$ pour les produits laitiers. Certains végétaux et fruits peuvent couramment en contenir entre 200 et 2500 $mg.kg^{-1}$. Il est cependant important de rappeler que la consommation de légumes verts, parce qu'ils contiennent des fibres et d'autres composés antioxydants, sont conseillés pour prévenir la formation de cancers.[1]

I.3.6. Les rejets

Les rejets d'effluents domestiques chargés de matières organiques fermentescibles par des habitations isolées et les agglomérations urbaines sont à l'origine d'une partie de la pollution des eaux par les nitrates. Les concentrations moyennes en nitrates dans les urines rejetées ont rarement été étudiées en Europe. Des études menées entre 1985 et 1989 relataient une excrétion de nitrate comprise entre 32 et 96 $mg.j^{-1}$. La plus grande partie des nitrates ingérés sont excrétés dans les urines sous formes de nitrates, ammonium ou urée. Wagner et al. (1983) ont évalué que 60 % des nitrates ingérés étaient excrétés dans l'urine. En Europe, il est estimé qu'un individu rejette en moyenne 15 g d'azote sous forme organique et ammoniacal par jour. Cette estimation est à l'origine de la notion d'Equivalent Habitant azote (EqH). Cette donnée est utilisée afin de dimensionner les stations d'épuration destinées à traiter les eaux usées des agglomérations urbaines. L'azote organique et ammoniacal rejeté est susceptible d'être oxydé en NO_3^-.[1]

Les composés azotés en général, les nitrates en particulier proviennent essentiellement d'activités agricole, domestique et industrielle, réparties en des sources diffuses ou localisées comme le récapitule les tableaux suivants :[4]

Tableau 1 : Une pollution par des composés azotés de la ressource liée aux activités humaines.[4]

Eaux	**Composés azotés concernés**	**Type de pollution**	**Source de pollution**
Eaux superficielles des rivières, canaux, lacs et étangs	-Ammonium -Ammoniaque dissoute -Azote organique	Ponctuelle	-Rejets industriels et domestiques -Rejets effluents d'élevage
	- Nitrates -Nitrites	Ponctuelle et diffuse	Alimentation des eaux superficielles par des nappes polluées
Eaux souterraines		Diffuse	-‹‹Fuites›› des zones industrielles et habitées -Activités agricoles et intensives
	NO_3^- presque uniquement	Macro ponctuelle ou macro diffuse	Même source que ci-dessus : rejets industriels,domestique, de l'agriculture[101]

Tableau 2 : Une pollution par des composés azotés de la ressource liée aux activités de surfaces.

Teneurs	**Activités et occupation des sols**
Très élevées et croissantes	Occupation urbaine et industrielle dense et/ou agriculture intensive.
Moyennes	Agriculture traditionnelle moyennement intensive, habitat rural dispersé.

Faibles	Forêt et zone d'élevage intensif avec des prairies permanente peu fertilisées.

I.4. Propriétés des nitrates

L'ion nitrate est la forme thermodynamiquement stable de l'azote combiné dans les conditions de la surface. Il peut être réduit en azote moléculaire N_2 ou en oxydes d'azote (N_20 notamment) lors de l'étape "bouclant" le cycle externe de l'azote : la dénitrification.

Les nitrates présentent certaines caractéristiques qui permettent de mieux comprendre l'évolution des teneurs qui sont observées ces dernières années :

*Les nitrates sont très stables et très solubles dans l'eau. Elles ne constituent aucun sédiment.

*Mobilité à travers les particules du sol ce qui facilite l'entraînement des nitrates vers les nappes d'eau. La pénétration dans les sols est lente. La vitesse de migration est environ 1 m par an.

* Faible rétention par les particules du sol.

*Déplacement avec le flux d'eau.

*La teneur en nitrate dans les nappes est influencée par les variations des apports avec un retard correspondant au temps de transfert.

*L'entraînement des nitrates se fait par les pluies drainant c'est-à-dire celles qui tombent après que le déficit hydrique du sol a été comblé. Mécanismes de pollution de l'eau.

Toutes les sources précédemment citées vont, à plus ou moins long terme, être au contact du sol. Le stockage et le transfert de l'eau et des éléments dissous déterminent une grande partie des fonctions du sol. [4]

La présence de pores permet de distinguée deux voies : L'eau de pluie arrivant au sol peut soit ruisseler en surface et rejoindre directement les cours d'eau et ainsi emporter avec elle les nitrates. Soit l'eau peut s'infiltrer en profondeur dans le sol et les substrats géologiques et y emporter les nitrates. Dans ce cas les plantes absorbent une partie de l'eau nitratée mais pas la totalité. Etant extrêmement solubles dans l'eau, ils sont entraînés par les précipitations et

s'infiltrent dans la nappe phréatique. Ils résident alors un certain temps dans la nappe avant de rejoindre finalement les rivières.

Les conditions d'aération et de température conditionnent le développement de l'activité biologique. Qu'il s'agisse des propriétés de stockage et de transfert, les propriétés des sols sont étroitement liées à leur structure, c'est-à-dire à la façon dont les constituants minéraux et organiques sont assemblés les uns par rapport aux autres.

Au niveau le plus fin, la structure dépend de l'arrangement intime des particules élémentaires.

À des échelles plus macroscopiques, on peut identifier différents niveaux d'organisation depuis l'agrégat millimétrique résultant directement de l'assemblage de particules élémentaires jusqu'à des assemblages de taille décimétrique à parfois métrique.

Une partie de la structure du sol est un héritage des conditions de formation des sols. La distribution en taille des particules joue un rôle sur la porosité mais, dans les sols cultivés, c'est l'action de l'homme qui est la plus visible (labour, lit de semence, passages de roues, etc.). L'action de l'homme se traduit directement (pratiques culturales) mais aussi indirectement (action de la plante et de l'activité de la faune) par une évolution de la structure. Avec le temps, cette évolution peut aller dans le sens d'une dégradation ou d'une régénération.[4]

I.5. Mouvement de nitrate

I.5.1. Dans les sols

Les sols agricoles contiennent beaucoup d'azote, surtout sous forme organique fortement liée au complexe argilo-humique et peu mobile Les formes minérales, ammoniacales et nitriques surtout sont, par contre, très mobiles. L'azote apporté en fertilisation annuelle ne représente qu'une petite quantité par rapport à la réserve du sol. Les réactions de minéralisation et de réorganisation font varier constamment la réserve d'azote minéral susceptible d'être lessivée. De plus, des quantités importantes d'azote fuient sous forme gazeuse par volatilisation ammoniacale ou dénitrification. La sur fertilisation n'a donc que peu d'effet proportionnel sur la réserve globale d'azote et son effet sur la réserve d'azote minéral dépend de la durée d'équilibre entre ses apports et la réserve antérieure.

Le transfert des nitrates dans les sols résulte d'un grand nombre de facteurs interdépendants: facteurs climatologiques (importance des précipitations, leur répartition dans le temps,

températures, évapotranspiration), facteurs agrologiques (propriétés physicochimiques, hydrodynamiques et microbiologiques des sols), facteurs agronomiques (type de culture, travaux culturaux, niveau de fertilisation, couverture végétale, profondeur d'enracinement).

Le temps de transfert du nitrate dans les sols est mal connu. Il est d'autant plus difficile à évaluer que le cycle de l'azote met en jeu plusieurs processus complexes, qui l'immobilisent en partie sous forme organique.

De nombreux auteurs ont suivi les effets de l'addition de fertilisants organiques sur la production de nitrates, les conséquences financières de l'usage intensif des engrais chimiques non adaptés aux besoins des cultures, la migration des nitrates dans le sol et ses effets polluants sur l'environnent.[4]

I.5.2. Dans les nappes

Le nitrate, très soluble, transite sous forme dissoute dans l'eau du sol, dans les domaines non saturés et saturés. En non saturé, on considère souvent que le transfert de solutés se fait par piston flow : l'eau de pluie qui s'infiltre déplace l'eau déjà présente dans le sol vers la base du profil, et après chaque averse, le front de migration descend en fonction du volume infiltré et peut se mélanger avec l'eau déjà présente. Il faut rajouter à cela les transferts par les macro-pores, qui agissent comme des courts circuits et peuvent diminuer considérablement le temps de transfert du soluté. On considère aussi que toute la porosité du sol n'est pas utilisée pour le transfert de l'eau et de solutés, et qu'une partie est ainsi immobilisée temporairement. En saturé, le déplacement du soluté se fait en partie par convection avec l'eau, et en partie par dispersion, suivant le gradient de concentration du solutés (Knox *et al*., 1993).[4]

I.6. Méthodes scientifiques de mesures

Le dosage des nitrates impose que la mesure soit réalisée dans les plus courts délais après le prélèvement car le NO_3^- peut rapidement être réduit.

Les ions nitrates peuvent être dosés directement. Ces méthodes directes présentent souvent un manque de sensibilité et sont affectées par diverses matrices interférentes. Afin de palier à ces deux inconvénients, NO_3^- est souvent préalablement réduit en NO_2^-. Ce sont donc les concentrations en nitrites qui sont évaluées. Cette approche nécessite donc une détermination des teneurs en nitrites présentes dans l'échantillon avant réduction des nitrates. Les

concentrations en nitrates se déduisent alors de la différence entre les concentrations en nitrites avant et après réduction (Slack, 1987).[1]

L'une des méthodes les plus courantes de détermination des teneurs en nitrates consiste à réduire les nitrates en nitrites à travers une colonne de cadmium. Les nitrites sont ensuite dosés par spectrophotométrie d'absorption moléculaire après diazotation de l'amino-4-benzènesulfonamide (sulfanilamide) en conditions acides avec le dichlorure de N-(naphtyl-1) diamino-1 ,2-éthane (N-1-naphtyléthylènediamine) (Slack, 1987 ; Rodier, 1996).[1]

Les nitrates peuvent également être dosés directement par spectrophotométrie d'absorption moléculaire. Ainsi, en présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium coloré en jaune et susceptible d'un dosage spectrophotométrique (Rodier, 1996). Dans les eaux, les nitrates peuvent également être dosés par chromatographie ionique ou directement par spectrophotométrie d'absorbance moléculaire dans l'UV lorsque la teneur en matières organiques est faible (APHA, 1976).

Dans les denrées alimentaires, des méthodes basée sur la réduction enzymatique (Schmidt et al., 1992), la chromatographie gazeuse (Ross et Hotchkiss, 1985), l'HPLC (Reece et Hird,

2000) ou l'électrophorèse capillaire (Öztekin et al., 2002) peuvent également être utilisées.

Les méthodes de dosages des nitrates préconisées par les normes françaises et européennes dépendent de la matrice analysée qui peut être de l'eau (AFNOR NF EN ISO 13395 T90-012 et EN ISO 13395 :1996) ou des denrées alimentaires diverses (AFNOR NF EN ISO14673-1 VO4-172-1 et suivantes pour le lait et les produits laitiers, NF EN 12014-2 V03-010-2 pour les légumes et produits à bases de légumes, NF EN 12014-7 V03-010-7 et suivantes pour les produits carnés, NF EN 12014-5 VO3-010-5 pour les aliments à base de légumes pour bébés et petits enfants).[1]

I.7. Les effets des nitrates

I.7.1. Effets connus sur l'environnement

L'effet principal des nitrates sur l'environnement consiste à favoriser la croissance végétale. Cet impact, qui peut apparaître bénéfique dans un premier temps, s'avère désastreux pour les écosystèmes aquatiques lorsque la prolifération végétale est poussée à l'excès. Le processus d'eutrophisation, qui correspond à un enrichissement naturel des milieux aquatiques en éléments nutritifs et à une augmentation de la productivité végétale, est alors

considérablement accéléré. L'eutrophisation du milieu nécessite la présence d'éléments nutritifs (carbone, azote, phosphore) indispensables à la croissance des végétaux aquatiques.[1]

Le carbone est toujours présent à des concentrations suffisantes pour permettre le développement végétal. En milieux aquatiques, la croissance des végétaux est limitée par l'élément dont la concentration dans le milieu est la plus faible par rapport aux besoins des végétaux. Cet élément limitant est généralement le phosphore ou parfois l'azote. C'est donc en rejetant de l'azote et/ou du phosphore dans l'eau que l'activité anthropique va induire une accélération de l'eutrophisation. Lorsque les concentrations en azote et phosphore du milieu aquatique sont élevées, la production d'algues microscopiques (phytoplancton) et de végétaux fixés (macrophytes) est exacerbée. La quantité de matière organique présente dans le milieu aquatique s'accroît démesurément. A la mort de ces végétaux, la matière organique se décompose en consommant tout l'oxygène de la colonne d'eau, induisant ainsi l'anoxie du milieu aquatique. La plupart des animaux vivants dans ces milieux ne peuvent pas survivre dans une eau dépourvue d'oxygène. L'écosystème aquatique est ainsi conduit à disparaître. Si l'on utilise souvent le terme d'eutrophisation pour décrire cet état de dégradation des milieux aquatiques, le terme d'eutrophisation accélérée apparaît plus précis et le terme de dystrophie est parfois usité.

L'enrichissement des écosystèmes aquatiques en éléments azotés (mais également en phosphore) conduit à leurs disfonctionnement et à la perturbation des populations animales ou végétales qui y sont naturellement inféodés. Ainsi, diverses études ont mis en évidence des corrélations entre les teneurs en nitrates dans l'eau ou les quantités d'engrais azotés épandus et le déclin des populations d'amphibiens (Oldham et al., 1997 ; Bishop et al., 1999 ; Rouse et al., 1999). Cette modification des populations peut également conduire au développement de microorganismes pathogènes ou sécrétant des toxines qui rendent impropre l'eau à divers usages (récréatifs, production d'eau potable) ou peuvent considérablement accroître les coûts des traitements des eaux. Un deuxième effet, moins aisément quantifiable pour l'instant, est la participation des nitrates, via leur dénitrification, à la formation de gaz à effet de serre. Son évaluation est en cours d'étude actuellement à travers différents programmes de recherches sur les changements globaux.[1]

I.7.2. Effets connus sur la santé humaine

Le principal risque pour la santé humaine associé à l'ingestion de nitrates est lié à la faculté de l'organisme humain de transformer les nitrates en nitrites. Cette réduction de NO_3^- en NO_2^- est le fait de bactéries ayant une activité nitrate réductase. Il ne semble pas exister d'études relatant un effet toxique chronique des nitrates qui ne soient pas lié aux effets des nitrites.

Risque de méthémoglobinémie

Les nitrites formés par réduction des nitrates sont susceptibles de se fixer sur l'hémoglobine (Hill, 1991 ; L'hirondel et L'hirondel, 2002). Celle-ci est alors oxydée en méthémoglobine. Le transport de l'oxygène vers les tissus qui en ont besoin ne se fait plus. Cette maladie est dénommée méthémoglobinémie. Chez l'adulte, ce risque est très faible car une enzyme réduit la méthémoglobine en hémoglobine. En revanche, cette enzyme n'est pas activée chez le nourrisson et ne devient fonctionnelle que vers trois à quatre mois. De plus le pH dans l'estomac du nourrisson est plus élevé que celui d'un adulte car les sécrétions gastriques acides sont plus faibles durant les premiers mois de la vie. Ce pH élevé semble permettre un développement plus aisé des bactéries ayant une activité nitrate réductase. Par conséquent lorsqu'il y a ingestion d'une forte quantité de nitrate dans des conditions favorisant sa conversion en nitrites, la méthémoglobine s'accumule. L'enfant développe alors une coloration bleue de la peau qui débute par les lèvres, puis les bouts des doigts, et peut éventuellement s'étendre à l'ensemble du corps. Pour cette raison, cette pathologie qui est plus fréquente chez le nourrisson, est aussi appelée syndrome du bébé bleu ou maladie bleue du nourrisson. Certains auteurs affirment que la réduction des nitrates en nitrites n'est pas possible dans le tube digestif et que les risques imputés aux nitrates sont considérablement surestimés (L'hirondel et L'hirondel, 2002 ; Testud, 2004). Dès 1945, Comly (1945), mettait en relation des cyanoses chez des nourrissons ayant été alimentés avec de l'eau à fortes teneurs en nitrates (plus de 350 mg.L-1). En considérant que 80 % des nitrates sont réduits en nitrites chez les nourrissons, et une formation de 10 % de méthémoglobine, Corré et Breimer (1979) ont estimé la dose toxique pour l'enfant à 1,5-2,7 mg de nitrate par kg.[1]

Cependant, dans les cas de méthémoglobinémie rapportée, la somme des nitrates ingérés était plus élevée : entre 33 et 150 mg.kg-1 (Walker, 1990 ; WHO, 2003). Les femmes enceintes et les individus souffrant d'une déficience en glucose-6-phosphate déhydrogénase ou metHb réductase sont également particulièrement sensibles à cette pathologie. Un apport suffisant de vitamine C (acide ascorbique) par l'alimentation, réduit les risques de développement de la

maladie (Super et al., 1981). La vitamine C peut d'ailleurs être utilisée dans le traitement de la méthémoglobinémie mais son action est souvent trop lente pour agir efficacement.[1]

Risque carcinogène

Les nitrates sont susceptibles de présenter un risque lié à leur transformation en nitrites et éventuellement en nitrosamines dans le tractus digestif. Les propriétés carcinogènes de ces substances ont été découvertes il y a un demi siècle (Magee et Barnes, 1956 ; Magee et Barnes, 1967). Il n'existe pas de données qui démontrent avec certitude les effets carcinogènes des nitrates via la formation de nitrosamines chez l'animal (WHO, 1995). Les études épidémiologiques et toxicologique n'ont pas mis en évidence de relations certaines entre ingestion de nitrates et risque de cancers (Cantor, 1997 ; Messinga et al., 2003).

Démontrer avec certitude une telle relation est particulièrement difficile étant donné le temps de latence entre la cause et le dépistage de la pathologie qui peut dépasser 20 ans (Hill, 1991). Cette démonstration est rendue encore plus ardue par la grande variabilité dans la durée et l'espace des teneurs en NO_3^- dans l'eau et les aliments. Cependant, les tests chez de nombreuses espèces animales ont montré l'effet carcinogène d'un grand nombre de nitrosamines (WHO, 1995). Diverses études permettent de suspecter fortement la responsabilité de teneurs élevées en nitrates dans l'eau et les aliments, et le développement de cancers de la prostate, du pharynx, de l'oesophage ou du colon (Cantor, 1997 ; Gulis et al.,2001). En absence de certitudes absolues, ces résultats imposent de prendre les précautions nécessaires afin de préserver la santé humaine.[1]

I.7.3. Effets indirects

Dans les eaux marines littorales, l'accroissement des concentrations de nitrates entraîne l'apparition d'une prolifération algale qui peut être toxique pour l'homme directement et/ou indirectement par la consommation de coquillages. En France, la région Bretagne est particulièrement touchée depuis quelques années par la prolifération d'Ulves qui sont des algues à l'origine des « marées vertes ». Dans les eaux douces, l'eutrophisation accélérée (induite par les pollutions azotés mais aussi phosphatées) du milieu peut conduire au développement de phytoplanctons producteurs d'hépatotoxines et de neurotoxines.[1]

I.8. Réglementation actuelle

La JECFA (association d'experts de la FAO et de l'OMS) et la commission européenne ont fixé entre 0 et 3,65 milligrammes de nitrates par kg et par jour la dose journalière admissible (DJA) pour l'homme. Pour un individu de 70 kg, cela correspond à 255 mg de nitrates par jour. A titre de comparaison, l'OMS (WHO, 1995) estime entre 120 et 300 mg la dose journalière ingérée quotidiennement par un adulte Européen. La DJA fixée par l'agence Américaine de protection de l'environnement (EPA) est fixée à environ 7,1 $mg.kg^{-1}.j^{-1}$. [1]

L'eau de consommation

La valeur guide maximale de l'OMS pour les teneurs en nitrate dans les eaux de consommation est de 50 $mg.L^{-1}$. Le décret 2001-1220 du 20 décembre 2001 fixe pour la France les concentrations maximales en nitrates dans l'eau de consommation à 50 $mg.L^{-1}$. La valeur guide recommandée par l'Europe est de 25 $mg.L^{-1}$. L'agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) fixe cette limite à 45 $mg.L^{-1}$(10 $mg.L^{-1}$ de $N\text{-}NO_3^-$).[1]

Les aliments

Les teneurs en nitrates dans les viandes sont également réglementées. La législation européenne (Directive de l'Union Européenne 95/2) suggère de limiter les additifs en début de traitement des viandes et impose une limite résiduelle de 250 mg de nitrates par kilogramme de viande.[1]

En France, l'arrêté du 15 septembre 1964 (JOFR du 3 octobre 1964, p. 8924), la circulaire du 29 janvier 1965, le CSHPF du 23 mai 1978 et le code des usages II 39-3-124, réglementent les conditions et doses d'emploi de ces additifs en fonction des groupes de produits traités (pâtes et conserves de viandes, produits de la salaison non soumis à une maturation dessiccation, produits de la salaison soumis à une maturation dessiccation) (RREDA, 1989).[1]

La législation Française limite les teneurs en nitrates dans les charcuteries à 150 $mg.kg^{-1}$ et dans les aliments pour bébés à 50 $mg.kg^{-1}$. La Commission Européenne fixe les concentrations maximales admises dans les épinards frais et les laitues cultivées sous serre récoltés entre le 1er novembre et le 31 mars à respectivement 3000 et 4500 $mg.kg^{-1}$. Ces teneurs sont abaissées respectivement à 2500 et 3500 $mg.kg^{-1}$ pour ceux collectés entre le 1^{er}

avril et le 31 octobre. La limite est de 2000 $mg.kg^{-1}$ pour les épinards cuisinés ou congelés et de 2500 $mg.kg^{-1}$ pour les laitues cultivées en plein air.[1]

I.9. Recommandation en vertu des principes de précaution

Compte tenu des études qui confirment le risque d'effets nocifs aigus (méthémoglobinémie aiguë du nourrisson) à partir de 50 $mg.L^{-1}$ de nitrates dans l'eau de consommation (Fan et al., 1987 ; Fan et Steinberg, 1996), il apparaît recommandable pour les populations à risque (nourrissons, femmes enceintes ou qui allaitent, personnes âgées dont l'acidité gastrique est diminuée, etc.) de s'alimenter à partir d'eau garantissant une teneur en nitrates inférieure à ce seuil. Il a également été montré que les nourrissons alimentés au sein présentent une flore intestinale caractérisée par une activité nitrate réductase moindre que les bébés alimentés au biberon (Hill, 1991). Le risque de méthémoglobinémie pourrait donc être accru chez ces derniers. Il apparaît recommandable d'assurer au nourrisson jusqu'à l'âge minimum de trois mois une alimentation au sein susceptible de minimiser le développement de bactéries nitratoréductrices et d'éviter d'exposer directement l'enfant à un apport de nitrate issu de l'eau d'alimentation. Les nitrates pouvant se retrouver dans le lait maternel, les mamans qui allaitent doivent éviter de boire de l'eau riche en nitrates. En général, l'apport de nitrate par le lait maternel semble négligeable. Green et al. (1981) ont estimé la concentration dans le lait maternel à 1,4 $mg.L^{-1}$ de nitrate. Dans le cas d'une alimentation au biberon, il est indispensable de s'assurer de l'absence ou de la très faible teneur en nitrate dans l'eau utilisée pour la préparation des aliments. Pour un enfant qui serait nourris avec une alimentation préparée à partir d'une eau contenant 50 $mg.L^{-1}$ de nitrate, l'ingestion de nitrate serait proche de 8,5 mg de nitrates par kilo et par jour (WHO, 2003). Cet apport serait près de six fois la dose toxique pour un nourrisson calculé selon Corré et Breimer (1979) et plus de deux fois supérieure à l'apport maximal journalier admissible définit par la JECFA pour un adulte. Il convient de rappeler que le nourrisson est beaucoup plus sensible à l'ingestion de nitrate que l'adulte. Il apparaît également prudent de limiter l'usage de légumes connus pour renfermer de fortes teneurs en NO_3^- (carottes, épinards, betteraves) pour l'alimentation des nourrissons de moins de quatre mois. Si certains auteurs (L'hirondel et L'hirondel, 2002 ; Testud, 2004) réfutent en partie les risques de méthémoglobinémie et de cancer imputés aux nitrates, tous les auteurs s'entendent sur l'importance de s'assurer d'une grande hygiène lors de la préparation d'aliments pour nourrissons afin d'éviter une contamination par les bactéries nitro-réductrices.

L'alimentation du nourrisson doit donc être préparée avec des aliments en parfait état de conservation, en utilisant des ustensiles propres. L'aliment ne doit pas avoir séjourné à température ambiante durant une longue période avant d'être ingéré.

Les données actuelles des études épidémiologiques ne permettent pas de tirer une conclusion définitive sur les risques cancérogènes liés à une forte consommation de nitrates. Le risque est cependant loin d'être écarté. Le principe de précaution impose donc de limiter l'apport de nitrates que ce soit par l'intermédiaire d'aliments et/ou d'eaux contaminés.[1]

I.10. Définitions eutrophisation

À l'origine, le terme eutrophisation désigne un processus naturel de vieillissement d'un lac sous l'effet de l'accumulation de matériaux exogènes véhiculés par le ruissellement des eaux de surface. C'est donc à la base un phénomène naturel d'enrichissement des eaux.
Le terme eutrophisation a été employé de plus en plus fréquemment, depuis les années 1970, pour décrire l'enrichissement artificiel des plans d'eau par l'apport de substances nutritives (Composés phosphorés et azotés) qui favorisent le développement végétal.
Cette dégradation est à l'origine un phénomène naturel extrêmement lent, qui intervient dans l'évolution du lac. Cependant ce processus peut être fortement accéléré par des apports anthropiques de *nutriments* d'origine agricole, domestique ou encore industrielle.

Les directives européennes définissent l'eutrophisation comme suit :
Directive ERU : *" c'est l'enrichissement de l'eau en éléments nutritifs, notamment des* ***composés de l'azote et/ou du phosphore****, provoquant un développement accéléré des algues et des végétaux d'espèces supérieures qui entraîne une perturbation indésirable de l'équilibre des organismes présents dans l'eau et a une dégradation de la qualité de l'eau en question".*
Directive Nitrates : *" c'est l'enrichissement de l'eau en* ***matières azotées****, provoquant un développement accéléré des algues et des végétaux supérieurs qui perturbe l'équilibre des organismes présents dans l'eau et entraîne une dégradation de la qualité de l'eau en question".*
La principale différence entre les deux définitions a trait aux éléments nutritifs pris en compte. Cela peut s'expliquer par le cadre de chacune des directives. En effet, la directive ERU (Eaux Résiduaires Urbaines) qui concerne les effluents domestiques et industriels ne peut pas faire la part des choses entre azote et phosphore. La directive Nitrate s'axe, elle, sur la protection de l'environnement dans le cadre des pressions agricoles. Or, les fertilisants utilisés sur les

cultures sont composés essentiellement de matières azotées. Il est donc logique que cette dernière directive mette l'accent sur cet élément chimique et ses dérivés.

Ces définitions juridiques sont donc très proches l'une de l'autre mais sont à différencier des définitions scientifiques disponibles.

Globalement, l'eutrophisation peut être assimilée à une prolifération végétale excessive.[5]

I.11. Discussion autour du thème d'eutrophisation

L'eutrophisation est un phénomène naturel comme l'étymologie du mot le sous-entend. Le terme d'eutrophisation provient du grec "eu" signifiant bien, dans de bonnes conditions et de "trophê" signifiant nourriture. Ainsi un milieu qualifié d'eutrophe est originellement un milieu naturellement riche en éléments nutritifs, sans caractère négatif.[5]

Aucun élément étymologique du terme ne fait référence à une aggravation du phénomène causée par l'homme, que ce soit par son activité agricole, son activité industrielle, son mode de vie ou par son existence même. De plus, ce n'est pas parce qu'il y a eutrophisation qu'il y a forcément déséquilibre du milieu : un cours d'eau peut être naturellement riche en nutriments du fait de son origine (nature de la roche), présenter une forte quantité de végétaux aquatiques sans que cela ne mette en danger la vie des populations aquatiques quelles qu'elles soient.

Mais, ce phénomène peut être créé, accéléré ou amplifié par l'homme. Dans ce cas là, il aboutit souvent à un état de dystrophie (déséquilibre du milieu) pouvant provoquer la mort de des organismes aérobies par manque d'oxygène la nuit. L'origine humaine et la rapidité du développement du phénomène permettent de différencier eutrophisation naturelle et celle anthropique entraînant la dystrophie, communément appelée (à tort) eutrophisation.[5]

Les définitions scientifiques de l'eutrophisation anthropique peuvent être assimilées à celle de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) :

"*L'eutrophisation est un accroissement de la biomasse végétale du à un enrichissement des eaux en éléments nutritifs qui entraîne des dégradations et des nuisances manifestes (accumulations de micro-algues, poussées intenses de phytoplancton, coloration des eaux, fortes désoxygénations, changements d'espèces, perte de biodiversité)*".

Le terme eutrophisation dans les textes réglementaires doit être considéré comme faisant référence à l'eutrophisation anthropique amenant la dystrophie du milieu.[5]

I.12. Les causes de l'eutrophisation

Nous pouvons différencier deux types de causes d'eutrophisation: les causes naturelles et les causes artificielles (dont l'Homme est responsable).

- ***Les causes artificielles***
  - ***La dystrophisation*** est un phénomène très proche de l'eutrophisation (on l'emploi aussi sous le nom d'hyper-eutrophisation).Contrairement à cette dernière la dystrophisation est beaucoup plus rapide car le milieu reçoit beaucoup plus de nutriments et de matières organiques biodégradables. Ils proviennent souvent des phosphates contenus dans les détergents et les engrais agricoles. Elle se développe de la même manière que l'eutrophisation.
  - Les eaux ménagères sont responsables elles aussi comme les eaux de cuisine et de lessive qui contiennent du savon graisse et du détergent.
  - Les eaux agricoles dans les élevages tel le fumier qui est riche en matières organiques azotées et dont certains composés peuvent être entrainés à cause de leurs solubilités dans l'eau par la pluie.[6]
- ***Les causes naturelles***

  Certaines causes naturelles de l'eutrophisation sont en fait complémentaires, c'est-à-dire que s'il y'a une il y'a l'autre qui va avec.
  - Le milieu aquatique est eutrophique quand il ya désoxygénation des eaux profondes. Cela est due au non brassage des eaux et donc au non renouvellement de l'oxygène dans ce milieu, c'est le confinement.
  - Ce dernier facteur associé à un autre peut être plus désastreux. En effet la température joue un rôle joue important dans l'eutrophisation car plus il chaud moins il y'a de l'oxygène et donc il y'a plus rapidement un dépôt d'algues qui se forme.
  - On peut ajouter à cela l'éclairement que subit le plan d'eau car les algues (comme toutes les plantes) sous l'effet d'un éclairage plus important se développent plus rapidement.
  - Dans les plans d'eau qui ont subi une eutrophisation, les algues prolifèrent puis sédimentent, leurs dégradations entrainent une perte d'oxygène et le milieu devient alors réducteur et certains éléments comme le phosphore peuvent être

relarguer et le phénomène d'eutrophisation s'accélère de lui-même puisque le phosphore libéré favorise la croissance des algues.[6]

I.13. Caractéristiques et manifestations de l'eutrophisation

Le processus d'eutrophisation peut être décomposé en différentes étapes. La première est un approvisionnement du milieu en nutriments supérieur à la normale. Celui-ci induit alors la multiplication rapide des végétaux aquatiques (algues, macrophytes…) mais aussi bactéries.

A partir du moment où les végétaux sont implantés, on assiste à un fonctionnement cyclique :

Pendant la journée : production d'oxygène par tous les organismes capables de faire la photosynthèse conduisant à une sursaturation des eaux en oxygène et à une augmentation du pH.

Pendant la nuit : la respiration des organismes et la décomposition des matières produites (algues mortes) par les bactéries consomment l'oxygène produit la journée et peuvent être si importantes qu'elles conduisent à l'épuisement du stock d'oxygène. On assiste alors à la mort des organismes aérobies les plus fragiles.[5]

Le fonctionnement cyclique peut ne pas avoir lieu si trop de plantes flottantes (telles que des lentilles d'eau) se développent. En effet, celles-ci empêchent les échanges avec l'atmosphère ainsi que la photosynthèse par les plantes plus en profondeur puisqu'elles bloquent les rayons du soleil. Le milieu devient alors hypoxique (contenant peu d'oxygène disponible) puis anoxique (privé d'oxygène disponible) très rapidement pouvant provoquer la mort des organismes aérobies (macrophytes, insectes, crustacés, mollusques, poissons…).

La principale manifestation observable à l'oeil nu de l'eutrophisation est donc le développement excessif d'organismes végétaux (algues, zooplancton, macrophytes…). Celui-ci peut prendre différentes formes selon la typologie du cours d'eau comme le montre le *Tableau 3*.[5]

Tableau 3 : Manifestation de l'eutrophisation en fonction de la typologie du cours d'eau.

Forme végétale	Aspect	Milieux concernés
Phytoplancton (algues microscopiques en suspension)	Coloration de l'eau (verte, brune, rouge selon les espèces) réduction de la transparence	Plans d'eau (lacs, lagunes), cours d'eau lents et parfois milieu marin
Diatomées fixées (algues microscopiques)	Dépôts sur les fonds des cours d'eau, galets glissants	Cours d'eau lents ou rapides
Algues filamenteuses fixées	Grandes algues envahissant parfois toute la masse d'eau. Cladophores : longs filamenteux de plusieurs mètres	Cours d'eaux
Macro algues vertes marines (ulves)	Aspect de laitues	Lagunes languedociennes
Végétaux supérieurs (potamots, renoncules, myociphylles, etc…)	Allures de végétaux terrestres	Tronçons de cours d'eau lents à fond déposés et plans d'eau

Source : agence de l'eau RMC. Note Technique SDAGE N°2 – Eutrophisation des milieux aquatiques : Bilan des connaissances et stratégies de lutte. Décembre 1996 [5]

Un autre aspect est la dégradation des qualités organoleptiques de l'eau : l'aspect, la couleur, l'odeur et la saveur sont altérés négativement.

La *Figure 1* suivante synthétise bien le phénomène d'eutrophisation.

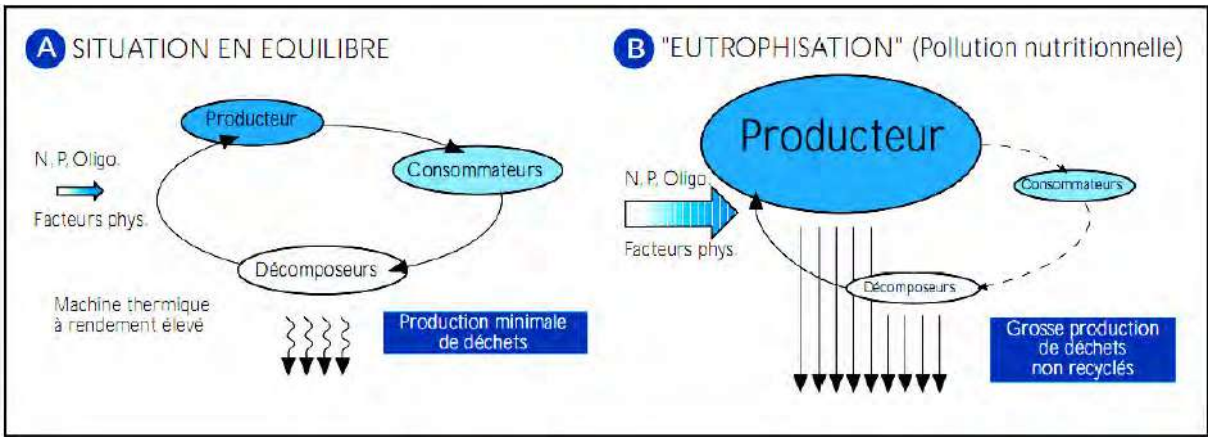


Figure 1 : Représentation schématique du phénomène d'eutrophisation

Source : agence de l'eau RMC. Note Technique SDAGE N°2 – Eutrophisation des milieux aquatiques : Bilan des connaissances et stratégies de lutte. Décembre 1996 [5]

D'autres effets moins visibles mais bien présents sont les modifications de plusieurs indices de qualité et de la biodiversité (les individus sensibles disparaissent au profit des organismes moins exigeants en termes de qualité).

L'effet invisible le plus important est la variation de l'oxygène pendant la journée. C'est par cela qu'on peut distinguer les milieux eutrophisés des milieux dystrophiques. Dans un milieu eutrophisé, la variation de l'oxygène (que ce soit le taux de saturation ou la quantité dissoute) dans l'eau sera de plus faible amplitude que celle dans un milieu dystrophique, avec une valeur minimale de concentration en oxygène plus haute.

Les études sur la dystrophie des cours d'eau ont montré que c'est le phosphore qui est le nutriment limitant le développement du phénomène dans les cours d'eau. Il semble peu judicieux d'axer la lutte contre la pollution sur le seul paramètre azoté, non limitant, comme le fait la directive Nitrates. Il faudrait lutter en premier lieu contre le phosphore.

En revanche, la directive ERU impose le traitement des composés azotés et/ou des composés phosphorés par les Stations de Traitement des Eaux Usées (STEU), permettant potentiellement de limiter les rejets de ces deux nutriments. C'est l'étude au cas par cas des milieux récepteurs qui permet de décider pour quel(s) nutriment(s) il faut optimiser le traitement. Cependant, il a été démontré qu'une concentration de phosphore relativement faible dans l'eau (0,15mg/l de PO4) suffit à subvenir aux besoins nutritifs des organismes d'un cours d'eau dystrophique. Puisque les STEU ne peuvent pas éliminer la totalité du

phosphore, il y aura toujours, quel que soit le traitement, suffisamment de phosphore pour ne pas inhiber complètement le développement végétal.[5]

I.14. Les conséquences de l'eutrophisation

- ***Déséquilibre écologique***

  L'anoxie (suppression de l'oxygène, pauvreté en oxygène) de la partie inferieure d'un plan d'eau aura pour conséquence l'élimination de certaines espèces aquatiques, d'où une déstabilisation de la chaine alimentaire accompagnée d'une réduction de la diversité spécifique du milieu. On observe en particulier la disparition des espèces nobles comme les salmonidés (saumon, truite…)

- ***Asphyxie du milieu***

  Le jour les végétaux produisent beaucoup d'oxygène par photosynthèse et ils en consomment peu par respiration.

  La nuit seule la respiration continue. Si la quantité des végétaux du cours d'eau est très importante, le matin, tout l'oxygène de l'eau peut avoir été consommé. Les poissons et certains insectes aquatiques peuvent mourir alors par asphyxie.

- ***Apparition de composés toxiques***

  Le pH, lié à la photosynthèse a des valeurs fortes dans la journée. Si en plus les températures sont élevées et les teneurs en ammoniac (NH_4) sont fortes, il apparait de l'ammoniac gazeux (NH_3) très toxiques pour les poissons.

- ***Potabilisation difficile***

  L'utilisation des eaux qui ont subit une eutrophisation pour la production d'eau potable pose de sérieux problèmes sur les installations de potabilisation.

- ***Destruction d'habitats***

  Les végétaux colmatent les fonds des cours d'eau détruisant les milieux de vie des invertébrés et les zones de frais des poissons.

- ***Pollution organique différée***

  A leur mort, les végétaux dérivent et entrent en putréfaction (quand ça pourrie), constituant ainsi une pollution organique.

- ***Loisirs perturbés***

  Les activités de loisirs sur les plans d'eau sont fortement perturbées par l'envahissement des berges par des algues fixées et par la prolifération planctonique qui forme en surface des fleurs d'eau, sorte de « mousse verte » nauséabonde, poussées par le vent vers les berges.

- ***La toxicité***

  Ces substances chimiques sont à la fin :

  - Toxiques, donc nocives pour les êtres humains (organismes aquatiques et Hommes)
  - Persistants, donc stables dans le temps
  - Bio accumulables, c'est-à-dire les organismes aquatiques ont la capacité de concentrer et de stocker les matières chimiques à partir de l'eau et de la nourriture

De plus, ces micropolluants ont la propriété de se fixer de façon réversible sur les sédiments, ils jouent alors le rôle de réservoir de polluants. Sous certaines conditions physico-chimiques, les sédiments peuvent relarguer ces particules dans le milieu aquatique, et cela parfois pendant plusieurs années.

On distingue deus types de toxicités :

- La toxicité aigue (ou létale) : elle résulte de l'absorption en une seule fois ou en plusieurs fois très rapprochées d'une dose importante dont l'effet nocif est immédiat. L'effet d'une substance sur une espèce se caractérise par la dose létale 50(DL50), c'est-à-dire la dose qui entraine la mort de 50 % des organismes soumis à son administration. Cette mesure est effectuée au laboratoire. Les résultats obtenus sont très éloignés de la vérité « terrain », puisque les doses létales sont très largement supérieures aux concentrations environnementales.
- La toxicité chronique ou à long terme (ou sublétale) : l'absorption répétée de dose très faibles de substances entraine une toxicité du fait de leur accumulation dans l'organisme. C'est essentiellement la toxicité chronique qui nous intéresse dans le cas des micropolluants, bien que la toxicité aigue puisse également exister, lors de pollutions accidentelles par exemple, ou un apport massif et ponctuel de substances toxiques affecte tous les aspects de la vie aquatique.

- ***Avantages***

  Il faut cependant signaler que l'eutrophisation vue sous l'angle d'une forte augmentation de la productivité primaire peut être, dans certains cas, considérée comme avantageuse :

- C'est le cas dans les bassins de pisciculture, telle qu'elle est pratiquée en Chine, lors de la production de poissons consommateurs d'algues ou d'autres végétaux.
- La vase est un matériau particulièrement « adéquat » pour une utilisation agricole. Riche en matière organique, elle peut être réutilisée après dessalement entant que terre végétale agricole.

  L'opération de dessalement requiert toutefois la mobilisation d'une surface importante qui ne pourra être rentable qu'au delà d'une année. Le CAT de Maguelonne a ainsi fait pousser du blé sur des produits du dragage du canal « du Rhône à Sète » un an après son extraction.[6]

I.15. Les moyens de lutte contre l'eutrophisation

- ***La diminution des apports des bassins versants***

  La diminution des apports des bassins versant consiste à réduire différentes sortes de pollution causée par l'Homme comme par exemple, en réduisant les rejets des stations d'épuration (dénitrification) ainsi que les rejets industriels (déphosphoration).De plus il est important de sensibiliser les agriculteurs afin d'utiliser une fertilisation raisonnée en prenant des bonnes habitudes, c'est-à-dire, de ne pas mettre de l'engrais ou autres produits chimiques avant des pluies plus ou moins fortes.

- ***La diminution du confinement***

  Des aménagements hydrauliques cherchent à améliorer la circulation des eaux, par des ouvrages, ou par des moyens mécaniques. Ils permettent de réduire la stagnation des eaux et des problèmes qui y sont liés, comme les accumulations d'algues.

  Dans le cas des lacs et des étangs situés sur le littoral, un rejet en mer est une solution qui se heurte à de nombreuses contraintes réglementaires. Le point d'immersion sera choisi de façon à minimiser l'impact du rejet sur l'environnement. C'est pour cela qu'il est situé relativement éloigné de la cote.

  Réciproquement, l'alimentation d'une lagune en eau de mer par pompage peut être une solution alternative à la construction d'un grau. Cette technique s'applique essentiellement à des étangs ou à des lagunes qui sont soumises à une forte fréquentation touristiques, afin d'améliorer le cadre paysagé et éviter les nuisances (odeurs, développement d'algues…).

- ***Les actions « in situ »***
  - ***Les dragages***

Dans un milieu lagunaire, comme en mer ou en zone portuaire, les dragages sont nécessaires pour creuser des bassins portuaires ou encore un grau afin d'entretenir des ouvrages hydrauliques ou bien pour éliminer un dépôt de sable à l'entrée d'une lagune. De plus les dragages sont très utiles pour enlever des sédiments ou se sont accumulé les éléments défavorables (matières organiques, divers polluants…). Cependant cette technique n'est pas utilisable dans tous les cas à cause des difficultés d'accès des zones à draguer (profondeur, faible surface accessible de la berge…). Enfin les couts de ces opérations à cause des matériels principalement limitent l'utilisation de cette technique.

- ***Le ramassage des algues***

  La collecte des algues dans les lagunes permet entre autres :

  -d'écourter les périodes de recouvrement de ces algues dans les plans d'eau. En effet, elles ralentissent les courants d'eau ce qui favorise ainsi le confinement ;

  -d'enlever des plans d'eau une grande partie de l'azote et du phosphore contenus dans ces algues pour leur croissance ;

  -de rendre plus esthétique l'étendue d'eau à la population (touristes…).

  Le ramassage de ces algues se fait à l'aide de bateaux-faucardeurs-collecteurs.

  D'autres engins, moins répandus sont aussi utilisés mais ne sont pas tout aussi performants.

  La main d'œuvre et les matériels nécessaires pour organiser le ramassage limitent l'utilisation de cette technique à cause du cout.

- ***Les produits chimiques***

  Mondialement des procédés plus variés ont été utilisés comme l'utilisation de produits chimiques à base de fer ou d'aluminium qui rendent le phosphore inactif mais on peut se poser des questions sur l'innocuité du traitement surtout quand il faut le répéter.

- ***L'assèchement temporaire d'un point d'eau***

  Dans certains plans d'eau de petit volume, un procédé consiste à faire baisser le niveau de l'eau, voire assécher temporairement le plan d'eau, ce qui permet de retirer plus facilement les sédiments ou de les couvrir d'un matériau isolant.

- ***L'aquatechnique***
  - ***Le limno***

    Il traite les couches d'eau profondes et y maintient une teneur minimale en oxygène dissous. Il préserve l'équilibre thermique des plans d'eau profonds.

    De l'air est envoyé sous pression dans un diffuseur (1) placé à la base de l'appareil. Les bulles d'air montent et entrainent avec elles une masse d'eau importante (2). Celle-ci est ré oxygéné au contact des bulles lors de la montée dans l'appareil (3). Puis l'eau est renvoyée par le bas dans le fond de la retenue (4) tandis que l'air en excès s'échappe par l'évent (5).

    Il est utilisé dans les étangs et les lacs profonds (15 à 20 mètres).

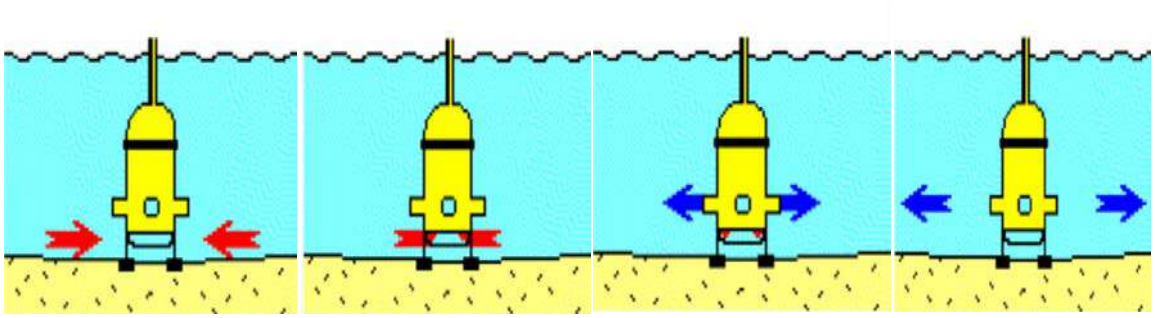


Figure.I.2 :Schéma représentant le processus du fonctionnement du limno.[6]

La destrification

L'air est envoyé sous pression dans un réseau de canalisations immergées reposant sur le fond du plan d'eau. Ces canalisations perforées forment des rideaux de bulles. En montant les bulles entrainent avec elles par effet d'air lift une masse d'eau importante. Celle-ci est ré oxygéné dans un premier temps au contact des bulles puis par contact avec l'atmosphère. Les couches froides du fond sont progressivement mélangées aux eaux de surface. Elle est utilisée pour les étangs et lacs à profondeur moyenne (5 à 10 mètres) et on l'utilise en même temps que le limno.

Il est utilisé pour de faibles taux d'eutrophisation, quand l'eutrophisation est plus prononcé on utilise alors le limno. Schéma du processus ci-dessous :

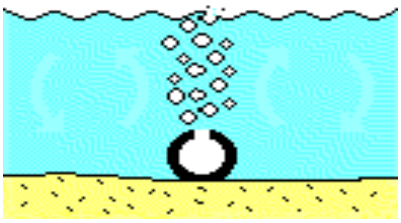


Figure.I.3 :Schéma représentant le processus du fonctionnement du limno.

- ***Actions biologiques***
  - ***Introduction de carpes consommatrice d'algues [6]***

Certains poissons peuvent permettre de contrôler les macrophytes, c'est le cas par exemple de la carpe chinoise herbivore appelée aussi sous le nom « amour blanc ». Originaire d'Asie cette espèce exclusivement carnivore dans les premières semaines, devient exclusivement herbivore dès que le poisson a atteint la longueur de 25-30 mm. Malgré cela, on peut considérer que cette carpe, majoritairement herbivore, n'entre pas en compétition alimentaire avec les autres espèces. L'introduction d'une espèce de ce type peut s'avérer intéressant, il est toutefois important de signaler qu'une partie de la masse végétale ingérée réintégrera les eaux sous forme de fèces, donc de matière organique transformée, ce qui aura pour conséquence une fertilisation du milieu. De plus il est difficile d'avoir une action sélective sur les plantes envahissantes avec cette méthode car les carpes ne consomment pas forcement en priorité les végétaux qui posent problèmes.

  - ***Ajout de bactéries***

Il est souvent essentiel de coupler cette mesure avec l'installation d'un aérateur avant de procéder à l'application de bactéries. Les bactéries requièrent un milieu oxygéné pour survivre, croître et se reproduire en se nourrissant de matière organique et d'algues présentes dans le lac. Avant d'introduire des bactéries dans le plan d'eau il est indispensable de faire des analyses de l'eau et des vases à traiter pour s'assurer de l'efficacité du traitement.[6]

- **La bio manipulation**

Une technique pour lutter contre la prolifération algale consiste à influencer la structure de la communauté planctonique, c'est la bio manipulation. En favorisant la dominance de certaines populations zooplanctoniques tels que les daphnies par exemple, on peut observer une diminution des cyanobactéries filamenteuses et coloniales.

La bio manipulation, en réduisant par exemple, la densité des poissons de la famille des cyprinidés, peut avoir un effet sur le phytoplancton de trois manières différentes. Cette opération permet de réduire la fraction de nutriments disponibles, de favoriser le développement des herbivores zooplanctoniques (*Daphnia* sp.) et de réduire la turbidité de l'eau. Cette technique n'a cependant pas d'influence sur les végétaux supérieurs.[7]

I.16. Conclusion

Les nitrates sont présents dans le sol et à l'état naturel, comme résidus de la vie des végétaux, des animaux et des hommes. Les engrais en apportent sous la forme de produits de synthèse industriels. Les nitrates sont extrêmement solubles ; ils pénètrent le sol et les eaux souterraines ou se déversent dans les cours d'eau par ruissellement. Ils constituent l'une des causes majeures de la dégradation des eaux à long terme.

Nous voyons donc que la cause principale de l'eutrophisation est l'emploi d'engrais dans l'agriculture, et que des solutions existent. Mais même si elles étaient toutes appliquées dès aujourd'hui, aucun effet immédiat ne serait ressenti. Il est fondamental de garder à l'esprit qu'une pollution azotée observée aujourd'hui peut être la conséquence d'actions datant d'une dizaine d'années. C'est pourquoi, compte tenu de l'étendue de la pollution actuelle, il faut s'attendre à un temps de réponse long de plusieurs dizaines d'années. Le problème n'est donc pas de trouver de nouvelles techniques agricoles pour produire tout en préservant la qualité des eaux, mais de les faire adopter.

Ceci, ajouté à un meilleur traitement des eaux usées dans les stations d'épuration, réduirait fortement le problème de l'eutrophisation.

Au vu de ces données, les connaissances sur les effets à long terme de ces nitrates doivent être approfondies. De plus, d'un point de vue environnemental, il est nécessaire de poursuivre les efforts de réduction du taux de nitrates dans l'eau destinée à la consommation humaine car les nitrates sont des indicateurs d'une dégradation du milieu, et peuvent être accompagnés de pesticides beaucoup plus difficiles à doser et à éliminer, dont les effet à long terme sont encore bien moins connus.

Mais là où le paradoxe naît, c'est lorsque l'on apprend d'un côté que la consommation de végétaux (contenant des nitrates), riches en vitamines et en fibres, est recommandée par les organismes de Santé Publique et que d'un autre côté, le nitrate constitue une source potentielle de nitrite dont la toxicité est reconnue, provoquant la méthémoglobinémie chez le nourrisson

et la femme enceinte. Ne faudrait-il pas par souci de cohérence baisser le taux des apports en nitrates aux végétaux ?

CHAPITRE II

NOTIONS SUR LES MILIEUX POREUX ET LEURS APPLICATIONS

Notions sur les milieux poreux et leurs applications.

II.1. Introduction :

Durant les dernières années, les écoulements dans les milieux poreux n'ont cessé d'avoir une importance de plus en plus grandissante jusqu'à devenir un pôle d'attraction durant la dernière décennie. En effet un grand nombre de chercheurs ont porté un intérêt particulier aux milieux poreux. Ceci est dû au fait que les transferts massiques et thermique dans ces milieux occupent une place de plus en plus importante dans plusieurs secteurs de l'industrie et des technologies avancées.

Les premières recherches qui ont été menées dans ce domaine ont toutes portées sur des écoulements monophasiques, pour ensuite englober les écoulements polyphasiques durant ces dernières années.

Les phénomènes de transferts massiques et thermiques dans les milieux poreux (en monophasiques où en polyphasiques) interviennent dans de nombreuses applications et touche à des domaines multiples (voir tableau II.1)

Tableau II.1 : les domaines d'application pour phénomène de transport dans les milieux poreux.

Domaine d'utilisation	**Applications**
Mécanique	-Isolation thermique -Capacité de séchage -Récupération de l'énergie géométrique -Accroissement du transfert de chaleur par modification de surface -Lubrification -Réacteurs nucléaires utilisant des gaz de refroidissement s'écoulant à travers des particules radioactives -Fusion et solidification des alliages binaires -Déshumidification -Pré chauffeurs et stabilisateurs de flamme poreux -Stockage de l'énergie solaire -Pots catalytiques dans le domaine de l'automobile

Genie-chimique	-Réacteurs chimiques -Filtration -Adsorption -L'échange d'ions -Les réactions catalytiques sur une surface solide -Séchage -Réacteurs chromatographiques -Convertisseurs catalytiques pour la réduction de la pollution de l'air des produits de combustion -Transfert de masse à travers les membranes
Environnement	-Ecoulement des eaux souterraines -contamination des eaux souterraines -Ecoulement d'eau, de vapeur d'eau et d'air à travers des matériaux de construction -Recyclage de déchets nucléaires -Irrigation -Nettoyage des sols par injection de vapeur
Géologie	-Migration des eaux et minéraux -Exploitation de l'énergie géothermique
Pétrole	-Ecoulement de gaz et pétrole dans les réservoirs d'hydrocarbures -Accroissement de la production de gaz naturel
Médecine	-Stimulation du transport des gaz dans l'organisme [8].

Un exemple concret, d'application des écoulement polyphasiques en milieux poreux, est l'exploitation des gisements d'hydrocarbures qui fait appel à différents procédés , parmi lesquels on trouve des méthodes thermiques qui consistent à injecter un fluide chaud (eau chaude , vapeur chaude , gaz….) au sein du gisement . Ces méthodes tendent à faciliter l'écoulement des fluides dans le réservoir en réduisant la viscosité dans l'huile brute. Actuellement, l'injection de vapeur est la plus utilisée. En 1988 par exemple, aux états unis, 72%de la production par l'application des méthodes améliorées était récupérée par l'injection de vapeur [9].

Comme autre exemple, le cas d'un écoulement dans un milieu poreux avec changement de phase (ébullition). Phénomène qui se rencontre entre autres lors de la stimulation

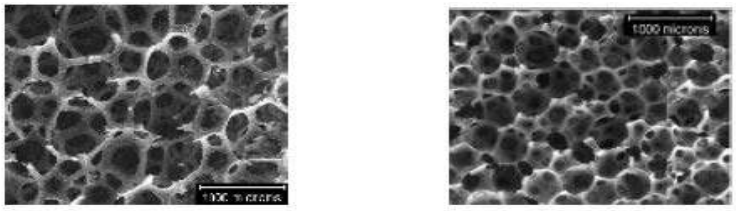
d'accidents nucléaires (désintégration du cœur radioactif en débris poreux, particulièrement ou entièrement saturés en liquide de refroidissement) [10].

II.2. Définitions relatives aux milieux poreux

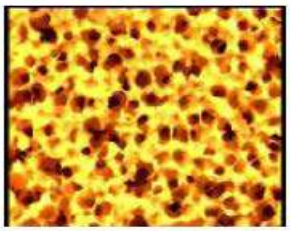
II.2.1. Milieu poreux :

Un milieu poreux est un massif formé de cavités de volume et de surface variées, interconnectées, partiellement ou totalement entre eux par des petits canaux, en prenant comme exemple de formation de particules sphériques, de textures fibreuses, etc., entre lesquels les vides forment l'espèce proprement dit (les vides sont appelés pores).

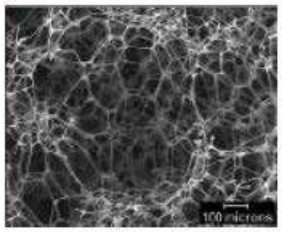
- Un milieu poreux se présente généralement sous les deux formes suivantes: milieux poreux consolidés, dans lesquels la phase solide est formée de grains cimentés figure II.1 [11], (calcaire, grés, la céramique….).
- Milieux poreux non consolidés, dans lesquels la phase solide est formée de grains non soudés entre eux figure II.2 [11], (fibres métalliques, gravier, sable, billes….).



Une mousse de polyuréthanne.

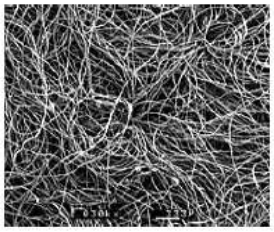


Une mousse de cuivre.



Une mousse de mélanine.

Figure II.1. milieux poreux consolidés



Fibres métalliques.

Figure II.2. milieux poreux non consolidés

Les milieux poreux incluent entre autres: les filtres à sable dans l'industrie de traitement de l'eau, les roches réservoirs d'hydrocarbures et les matériaux de génie civil.

Une des caractéristiques majeures de la plupart des corps poreux est de permettre la circulation des fluides dans les cavités du milieu poreux, on distingue pour cela deux (02) types de milieu poreux :

- Le milieu poreux saturé, où la matrice solide est complètement remplie par les fluides comme le sol imbibé d'eau.

- Le milieu poreux où plusieurs fluides, miscibles ou non, coexistent au sein des cavités, comme le sol partiellement saturé d'eau, le mélange eau-huile dans les roches pétrolières (écoulement polyphasiques).

II.2.2. Notion de volume élémentaire représentatif (V.E.R)

En pratique, l'utilisation des équations différentielles à l'échelle macroscopique d'un milieu poreux s'avère impossible à cause de la géométrie de ce milieu qui se caractérise par la non uniformité de la dimension du vide et de distribution dans la partie centrale de la matrice poreuse. Il est par conséquent nécessaire d'effectuer un changement d'échelle.

On définit ainsi un volume élémentaire représentatif de grande dimension par rapport aux dimensions moyennes des pores où les grandeurs et paramètres telles que la vitesse, la pression, la température, la porosité, sont de valeurs moyennes.
Autrement dit on peut considérer, par la suite, que le milieu poreux est un ensemble de V.E.R. Cette conceptualisation introduite par J. Bear permet de raisonner en terme de milieu continu équivalent.

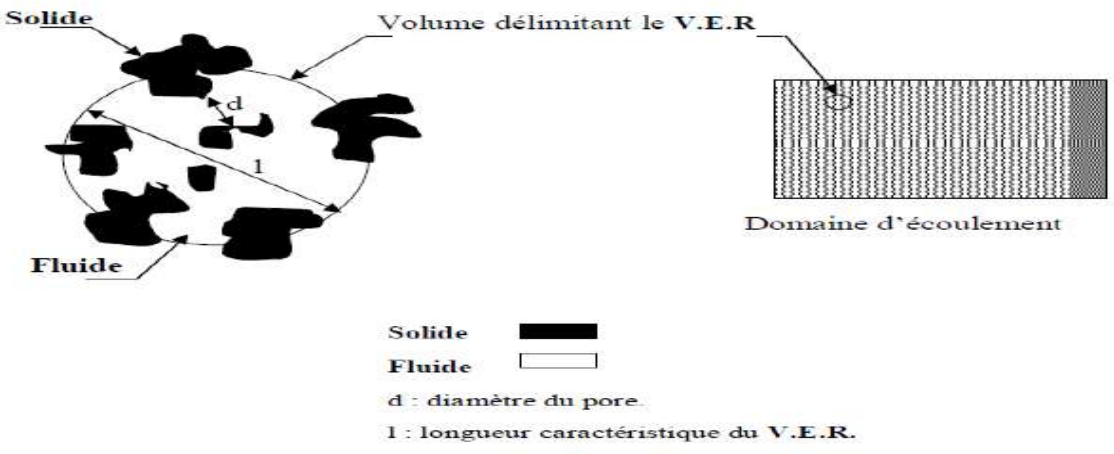


Figure II.3. Volume élémentaire représentatif (V.E.R.)

II.2.3. Propriétés structurales et thermophysique d'un milieu poreux

Différentes grandeurs géométriques et thermo-physiques sont utilisées pour caractériser l'écoulement et le transfert de chaleur se produisant dans un milieu poreux, nous pouvons citer :

II.2.3. 1.La porosité

La porosité totale (ε_T) dans un milieu poreux est définie comme étant le rapport du volume occupé par les espèces vides au volume total (matrice + vide) correspondant :

$$\varepsilon_T = \frac{V_P}{V_T} \tag{II.1}$$

Avec:

V_P : Volume des espèces vides

V_T : Volume total

En général, la porosité totale ne présente pas d'intérêt, car seuls les pores accessibles jouent un rôle actif. On définit donc la porosité effective ou utile :

$$\varepsilon_e = \frac{V_{PU}}{V_T} \tag{II.2}$$

Avec:

V_{PU} : Volume des pores accessibles ou utiles (c'est à dire communiquant entre eux).

Le tableau III.2 nous donne quelques valeurs de la porosité de certains matériaux d'après les résultats expérimentaux de [12].

SUBSTANCE	POROSITE
Matériau mousseux	0,98
Fibre de verre	0,88 – 0,93
Fil à tisser	0,68 – 0,76
Grain de silice	0,65
Poudre d'ardoise noire	0, 57 – 0,66
Cuir	0,56 – 0,59
Terre	0,43 – 0,54
Sable	0,37 – 0,70
Empilement de sphères	0,36 – 0,43
Filtre à cigarette	0,17 – 0,49
Brique	0,16 – 0,34

Tableau II.2. Valeurs moyennes de porosité de quelques matériaux

II.2.3. 2. La perméabilité :

Elle caractérise l'aptitude du milieu poreux à laisser circuler le fluide à travers les pores dans le cas de la présence d'un gradient de pression.

Lorsque le milieu poreux ne contient qu'un seul liquide, la perméabilité absolue K, est donnée par la loi de H.Darcy [13].

$$K = \frac{-\left(\frac{Q}{S}\right).\mu}{\partial P / \partial x} \qquad \text{(II.4)}$$

$\frac{Q}{S}$: Vitesse de filtration (vitesse Darcienne) dans le milieu poreux ;

Q : Débit s'écoulant à travers le milieu poreux (m^3/s);

S : Surface de la section droite (m^2);

μ : Viscosité dynamique (Pa.s).

$\frac{\partial P}{\partial x}$: Gradient de pression dans le sens de l'écoulement.

L'unité de la perméabilité est le m², mais elle est souvent exprimée en Darcy:

1 Darcy= 9.87×10^{-13} m².

La perméabilité est déterminée expérimentalement en fonction des paramètres géométriques.

Le tableau II.3 représente certaines valeurs moyennes de perméabilité de quelques matériaux [13].

SUBSTANCE	PERMEABILITE
Briques	$4{,}8\ 10^{-15}$ à $2{,}2\ 10^{-13}$
Cuir	$9{,}5\ 10^{-14}$ à $1{,}2\ 10^{-13}$
Poudre d'ardoise noire	$8{,}9\ 10^{-14}$ à $1{,}2\ 10^{-13}$
Terre	$2{,}9\ 10^{-13}$ à $1{,}4\ 10^{-11}$
Fibre de verre	$2{,}4\ 10^{-11}$ à $5{,}1\ 10^{-11}$
Sable	$2{,}0\ 10^{-11}$ à $1{,}8\ 10^{-08}$
Fibre à tisser	$3{,}8\ 10^{-09}$ à $1{,}0\ 10^{-08}$
Cigarette	$1{,}0$ à 10^{-09}

Tableau II.3. Valeurs moyennes de perméabilité de quelques matériaux [14,15]

II.2.3.3. La tortuosité

Dans un milieu poreux formé d'un empilement de grains solides, la vitesse réelle locale du fluide n'est pas tout à fait parallèle à la direction moyenne de l'écoulement du fait des obstacles constitués par la phase solide. Le fluide contourne les différentes particules s'opposant à son passage.

Le trajet suivi par un filet fluide est $L_m > L$ où L est la longueur du milieu poreux.

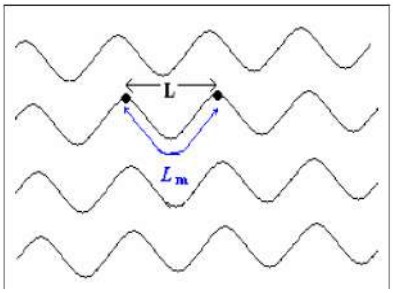


Figure II.4. Définition schématique de la tortuosité

On appelle tortuosité le rapport entre la longueur moyenne du chemin parcouru par une particule fluide et la longueur de l'échantillon (voir figure II.4).

$$\tau = \frac{L_m}{L}$$

Dans le cas des milieux poreux constitués d'empilement de particules sphériques, la tortuosité varie peu et reste sensiblement égale à $\pi/2$.

II.2.3.4. La surface spécifique

La surface spécifique est définie comme l'aire totale des vides rapportée à l'unité de volume, soit:

$$A_S = \frac{\text{Aire totale des vides}}{\text{Volume totale du milieu}}$$

Ce paramètre sert d'élément comparatif pour différents milieux poreux de volume total V.

II.2.3.5. Conductivité thermique effective

Vu la complexité de la structure des milieux poreux ainsi que la présence des différentes phases (solide et fluide), la modélisation du transfert de chaleur à travers les milieux poreux nécessite l'introduction de la notion de conductivité thermique effective k_e . En effet, les phases solides et fluide présentes dans le milieu poreux contribuent généralement avec des proportions différentes au mode de conduction (le plus souvent $k_{solide} > k_{fluide}$).
Cette conductivité effective dépend de la porosité et des conductivités thermiques des phases solides k_s et fluide k_f .

De manière générale, il n'existe pas de modèles exacts de conductivité thermique effective qui peuvent être appliquées aux cas pratiques d'écoulement dans les milieux poreux. Les modèles existants sont plutôt des modèles approchés construits pour des géométries

simples en utilisant des hypothèses simplificatrices et en se basant sur des données expérimentales. Les modèles proposés sont tous des combinaisons pondérées des modèles série et parallèles basés sur l'analogie électrique.

➢ Dans le modèle série, le flux de chaleur traverse successivement les phases solide et fluide. La résistance thermique du milieu est alors égale à la somme des résistances thermiques dans chacune des phases; Figure. II.5.

$$\frac{1}{k_C} = \frac{\varepsilon}{k_f} + \frac{1-\varepsilon}{k_s} \tag{II.5}$$

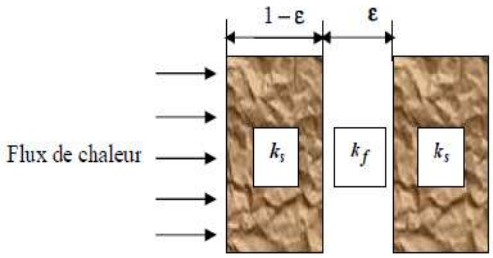


Figure II.5. Modèle série de la conductivité thermique effective

➢ Dans le modèle parallèle, le flux de chaleur traverse en même temps les deux phases qui sont parallèles. La conductivité effective est égale à la somme des conductivités thermiques dans chacune des phases; Figure. II.6.

$$k_e = (1-\varepsilon)k_S + \varepsilon k_f \tag{I.6}$$

La conductivité thermique effective est toujours comprise entre celle du fluide et celle du solide.

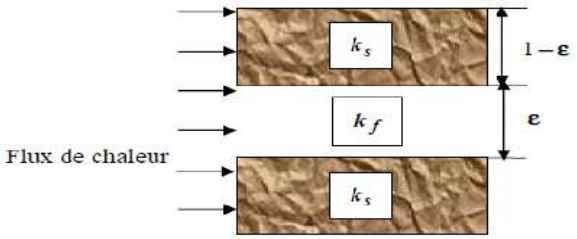


Figure II.6. Modèle parallèle de la conductivité thermique effective

❖ **Conductivité thermique équivalente**

La conductivité équivalente est une fonction complexe des conductivités du solide et du fluide. Le moyen efficace permettant de déterminer k_e est la mesure expérimentale dans les conditions d'utilisation en régime permanent. Pour plus de détail sur l'évaluation de la conductivité, nous pouvons citer les travaux de référence [17].

II.3.Modèles d'écoulement dans les milieux poreux

Les lois des écoulements en milieu poreux ne constituent que des approximations. On s'intéresse en général qu'aux phénomènes à l'échelle macroscopique. Plusieurs lois phénoménales sont utilisées.

II.3.1.La loi de Darcy

Établie par Darcy sur la base d'observations expérimentales, c'est une relation empirique qui décrit macroscopiquement les écoulements dans les milieux poreux, moyennant la vitesse de filtration.

$$\vec{V} = \frac{k}{\nu}\left(-\frac{\vec{\nabla}P}{\rho}\right) + \vec{g} \qquad \text{(II.7)}$$

où k est la perméabilité et ν la viscosité cinématique du fluide. L'équation de Darcy a été vérifiée pour les écoulements de faible vitesse. La valeur du nombre de Reynolds est utilisée comme critère pour caractériser la transition d'un régime d'écoulement laminaire à un régime turbulent. Pour cela on a défini un nombre de Reynolds de pore pour les écoulements en milieu poreux. En définissant d comme longueur caractéristique qui représente la dimension caractéristique des pores, le nombre de Reynolds s'écrit :

$$R_e = V.\frac{d}{\nu} \qquad \text{(II.8)}$$

En termes de détermination de d, Collins (1961) a proposé l'expression $d = \sqrt{k/\varepsilon}$ alors que Ward (1964) a plutôt suggéré que $d = \sqrt{k}$ quelle que soit la porosité.

II.3.2.Formulation de Forchheimer

La formulation de Darcy-Forchheimer (1950) la plus couramment utilisée, pour décrire l'écoulement d'un fluide incompressible à travers un milieu poreux homogène et isotrope, en régime stationnaire et en présence de pesanteur, est la suivante :

$$\nabla P = \rho g - \frac{\mu}{k}\vec{V} + \frac{b\rho}{\sqrt{k}}|\vec{V}|\vec{V} \qquad \text{(II.9)}$$

où **b** est un paramètre caractéristique de la géométrie du milieu poreux,appelé paramètre de Forcheimer. Résultant de la prise de moyenne, cette formulation introduit un terme convectif qui exprime la contribution inertielle devenant importante avec les **(** R_e **)** croissant.

II.3.3. Formulation de Brinkman

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K}\vec{V} + \mu_{\text{eff}}\nabla^2\vec{V} + \rho\vec{g} \qquad \text{(II.10)}$$

Cette loi empirique est connue sous le nom de formulation de Darcy-Brinkman, fortement utile pour le cas des hautes porosités. Le premier terme de droite de l'équation ci dessus contenant la viscosité μ est le terme de Darcy et le deuxième contenant la viscosité effective μ_{eff} est appelé le terme de Brinkman. La difficulté dans l'utilisation de ce modèle réside dans l'évaluation de la viscosité équivalente du milieu μ_{eff}. En effet cette grandeur est fonction non seulement de la porosité du milieu mais aussi de sa géométrie (tortuosité). Brinkman a assimilé la viscosité équivalente du milieu à celle du fluide ($\mu_{eff} \approx \mu$). Cette approximation a été prouvée expérimentalement et elle est en accord avec les travaux de la référence [18,19]. Le modèle de Brinkman permet ainsi d'imposer la condition de non glissement au champ de vitesse de filtration, au niveau des parois imperméables.

II.3.4.Modèle général

On généralise les trois dernières équations en introduisant un terme transitoire et le terme convectif $(\vec{V}\ \nabla)\vec{V}$ ce qui conduit à l'équation suivante :

$$\frac{\rho}{\varepsilon}\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon^2}(\vec{V}\ \nabla)\vec{V} = -\nabla P + \rho g - \frac{\mu}{k}\vec{V} + \frac{b\rho}{\sqrt{k}}|\vec{V}\ |\vec{V} + \mu_{eff}\nabla^2\vec{V} \qquad \text{(II.11)}$$

Cette équation est équivalente à l'équation de Navier Stokes issue du bilan de quantité de mouvement en milieu fluide. Il faut également noter que la complexité d'un écoulement en milieu poreux peut être le résultat des effets d'inertie et de viscosité, et d'une variation importante de la porosité au niveau des parois.

II.4. Milieux poreux multicouches

Dans beaucoup de situations pratiques, les milieux poreux ne sont pas homogène,mais, plutôt ils sont constitués de plusieurs couches disposées soit verticalement ou horizontalement comme le montre les figures II-7 et II-8.

Les propriétés de ces couches étant différentes (perméabilité et conductivité), une influence significative sur le taux de transfert thermique et l'écoulement du fluide peut avoir lieu. Dans de telles situations, chaque couche est caractérisée par une épaisseur d_i.

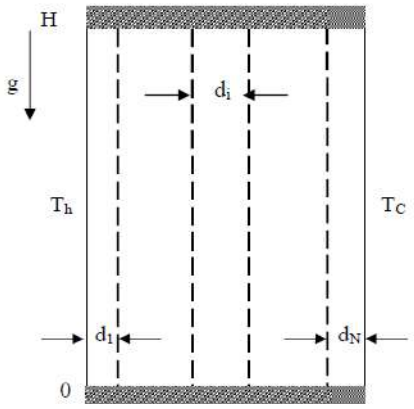


Figure II.7. Milieu poreux multicouche disposés verticalement

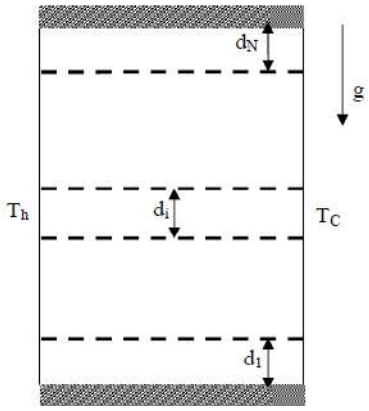


Figure II.8. Milieu poreux multicouche disposés horizontalement

On peut citer leur utilisation dans l'industrie pour le traitement de potabilisation des eaux de surface par filtration (Clarification après traitement de coagulation–floculation–séparation, Déferrisation–démanganisation, Décarbonatation, Nitrification–dénitrification) et l'adsorption de composés organiques ou minéraux (charbon actif–alumine activée) sur des milieux poreux de types sable, gravier, antracite, terre de diatomée ou bien sur des filtres monocouches, filtres bicouches et filtres multicouches.

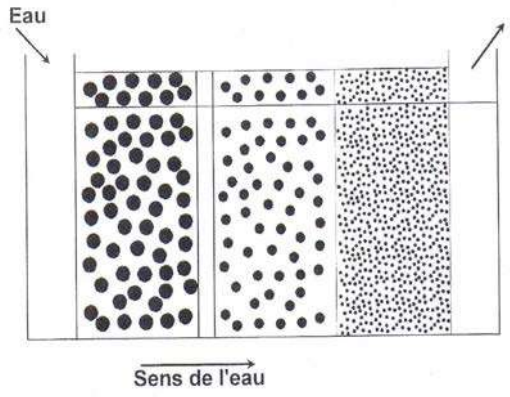


Figure II.9. Filtration horizontale

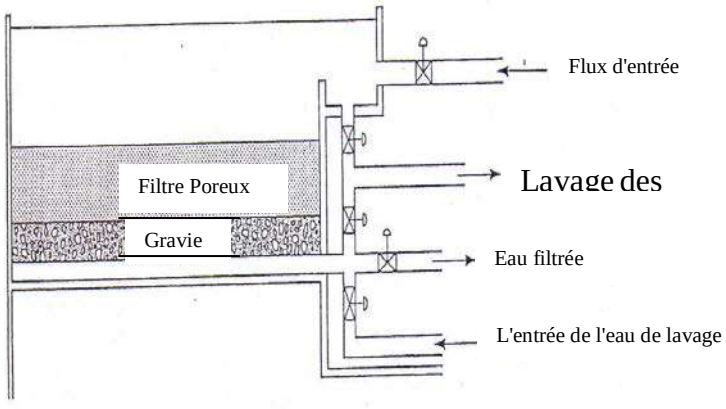


Figure II.10. Filtre gravitaire rapide

II.5.Mousses Métalliques

Les structures tridimensionnelles cellulaires à forte porosité telles que les mousses métalliques permettent d'obtenir des gains substantiels en terme d'intensification de transferts de chaleur, de mélanges et de réactions chimiques. Ces matériaux peuvent assurer simultanément un rôle mécanique, thermique, catalytique… Cet ensemble de qualité conduit à

des réductions importantes de coûts, de masse et offrent ainsi des opportunités d'applications dans des domaines aussi variés que nombreux: automobile, spatial, piles à combustible, génie chimique, etc. [20-24]. Les travaux concernant les matériaux fortement poreux sont encore relativement peu nombreux et récents [25-27]. Du fait de leur nouveauté, de leur structure particulière, et de la variabilité de texture liée aux différentes voies d'élaboration, les mousses métalliques sont encore mal caractérisées du point de vue des propriétés de transport. L'évaluation précise des propriétés thermophysiques et de transferts devient critique pour diverses applications. L'émergence récente d'utilisation potentielle des mousses dans les technologies nouvelles motive la mise en place d'outils de caractérisations performants.

L'étude des transferts de chaleur et des écoulements dans ce type matériau est des plus complexe. La structure des mousses ne permet pas d'étude analytique exacte. L'absence d'outils morphologiques permettant de caractériser la microstructure réelle des mousses conduit dans une majorité d'études à idéaliser les mousses (ensemble de brins aléatoirement orientés, cellules périodiques, réseau cubique [28], réseau hexagonal [21] et [29]. Un nombre de résultats montrent que ce type d'approche est souvent insuffisant pour identifier les paramètres géométriques influents. Du point de vue des écoulements, de gros efforts aussi bien expérimentaux que théoriques sont effectués depuis une quinzaine d'années pour approfondir les connaissances.

Il existe de nombreux procédés d'élaboration de mousses solides [23], [30-31]. L'élaboration de méthodes de fabrication des mousses métalliques pour des applications ciblées est un sujet de recherche à part entière [32]. Les méthodes typiques de production de ce matériau sont les suivantes :

- injection de gaz ou utilisation d'un agent moussant dans un métal liquide,
- solidification eutectique solide-gaz,
- métallisation d'une mousse organique (électrodéposition par exemple),
- métallurgie des poudres (compactage/ frittage de poudre métallique…),
- moulage sur des structures organiques ou des sels (frittés de grains),
- réplication sur mousse à cellules ouvertes de polyuréthane déposé sur le métal, [33]

Il existe aussi des mousses « lotus-type foam » pour lesquelles on oriente la croissance des bulles dans une direction et dont la topologie est plutôt représentative d'un réseau de tubes parallèles.

II.5.1. Applications

Nous citons quelques applications où l'utilisation du matériau mousse métallique apporte une valeur ajoutée certaine aux systèmes qui l'utilisent. Compte tenu de la relative jeunesse du matériau, la recherche de secteur potentiel d'utilisation du matériau est un sujet de recherche à part entière qui contribue chaque jour à l'élargissement du champ applicatif des « mousses métalliques ». Par conséquent, la liste des applications présentées ci-dessous ne saurait être exhaustive.

II.5.1.1.Electrode poreuse

L'utilisation de mousse métallique comme électrode de batterie est l'une des premières applications historiques (Ni-MH). Plus récemment, l'utilisation des électrodes en mousses métalliques a été étendue aux piles à combustibles. La distribution des réactifs gazeux et l'évacuation de l'eau formée sont des éléments clés du fonctionnement des piles à combustible de type « piles à membranes échangeuses de protons » (PEMFC). L'emploi de mousses métalliques à pores ouverts, en remplacement des classiques structures à canaux, constitue une alternative prometteuse. En effet, leur porosité élevée favorise l'accès des gaz aux électrodes (surface accessible supérieure à 90% au lieu de 60 à 70% pour les canaux), autorisant à priori une utilisation optimale des surfaces catalysées. Leur emploi est également susceptible de faciliter l'intégration de certaines fonctions telles que le refroidissement (fonction échangeur de chaleur).

Des tests exploratoires ont confirmé l'intérêt des mousses métalliques qui, dans des conditions similaires, ont permis d'atteindre pendant quelques dizaines d'heures de fonctionnement des performances supérieures à celles obtenues avec des distributeurs à canaux [34].

II.5.1.2.Echangeur de chaleur

Les échangeurs compacts permettent de réduire l'encombrement, le poids et le coût des dispositifs d'échange thermique. Ils prennent une place de plus en plus importante dans tous les domaines de l'industrie et en particulier dans les secteurs de l'électronique, de l'automobile, de l'aéronautique et de la cryogénie. La conductivité thermique du métal, les propriétés de mélangeur de la structure [35], un rapport perte de pression / surface d'échange performant, sont autant d'atouts pour ce type d'application [36].



Figure II.11 : Mousse métallique mise en forme pour intégration dans un échangeur de chaleur de type « tube coaxiaux »

II.5.1.3.Filtration

L'utilisation de mousses métalliques pour des applications de type « filtration » possède un potentiel applicatif fort. Les faibles pertes de pression en écoulement associées à une surface spécifique non négligeable rendent le matériau performant lorsqu'il s'agit de filtrer un écoulement « fluide / solide ». La nature métallique de la phase solide autorise entre autres de bons niveaux de performance lorsqu'il s'agit de filtration d'écoulement « haute température ». Ghidossi *et al* [37], montrent que l'utilisation de mousses métalliques constitue une alternative séduisante pour la filtration des fumées à haute température issues des incinérateurs, des fonderies et des centrales thermiques. Les expériences menées par ces auteurs dans des mousses dont la phase solide est constituée d'un alliage composé de nickel et de chrome montrent une forte capacité de rétention du matériau vis-à-vis de particules solides fluidisées. Ces performances résultent d'une part de la structure géométrique du milieu et d'autre part de la nature chimique de l'alliage utilisé. Enfin, en fonction de la nature du métal choisi, le filtre peut facilement être nettoyé des particules retenues soit par voie thermique (combustion), soit par voie chimique (acide) sans dégradation des propriétés structurelles.

II.5.1.4. Purification de l'eau

L'utilisation de mousses de « cuivre – argent » pour la purification de l'eau est une nouvelle voie de développement. Le contact entre liquide et les métaux peut agir contre les bactéries et les algues transportées par le fluide (par exemple les legionnelles, les streptocoques…). L'utilisation de telles mousses présente un intérêt certain sur tous les circuits d'eau qui nécessitent une qualité d'eau irréprochable : stations thermales, eau potable, tours de refroidissement…

II.5.1.5. Applications biomédicales

L'institut des matériaux industriels (IMI) a récemment développé un procédé de fabrication de mousses métalliques. La structure ouverte de ce type de matériau est particulièrement adaptée pour la fabrication d'implants ou de systèmes d'ancrage poreux. En fait, les propriétés et structures des matériaux obtenues sont similaires à celles des os. La structure, la résistance à la corrosion, la biocompatibilité et les propriétés mécaniques de ces mousses de titane en font un matériau de choix pour la fabrication d'implants et de systèmes d'ancrage pour des applications orthopédiques et dentaires [38]. Le taux d'utilisation du matériau mousse métallique par secteur est donné dans la figure suivante:

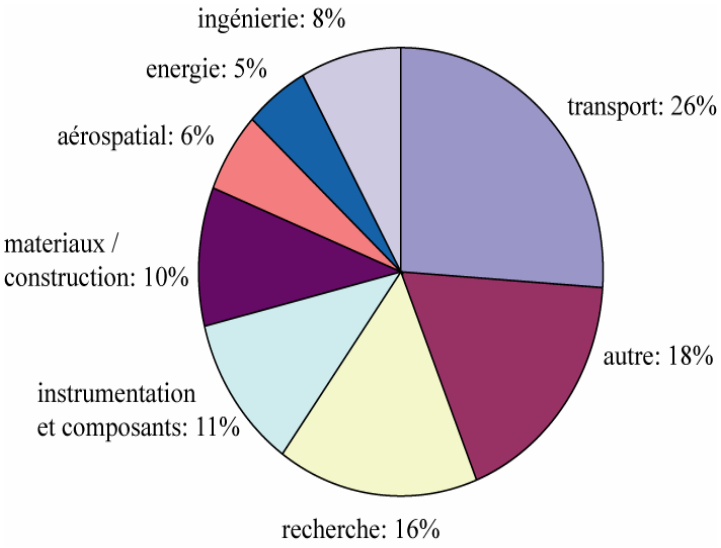


Figure II.12 : Utilisation du matériau mousse métallique par secteur d'activité [39]

Parmi les nombreux problèmes de génie des procédés que rencontrent l'ingénieur et le pharmacien travaillant dans les industries chimiques, pétrolières, pharmaceutiques, cosmétiques et agroalimentaires, l'écoulement d'un ou de plusieurs fluides à travers un milieu poreux fixe ou mobile et tient une place prépondérante. Il suffit de citer les principaux procédés unitaires du génie des procédés (séchage, fluidisation, sédimentation, cristallisation, distillation, échange d'ions, extraction liquide-liquide...) pour voir le nombre pléthorique de canalisations, de colonnes, de cuves et de réacteurs au sein desquels le ou les procédés sont réalisés. De même, pour les industries de la santé, la formulation nécessite la conception, le développement, la production et l'écoulement de matériaux poreux (ou non poreux) fonctionnant par leur composition, leur préparation et leur agencement pour délivrer une action et rendre un service (par exemple la galénique).

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, ont été rappelées les notions de base se rapportant aux milieux poreux ainsi que les modèles d'écoulement. Par ailleurs, les applications pratiques des milieux poreux dans divers domaines ont été examinées ainsi que les régimes d'écoulement.

Le prochain chapitre sera consacré à la formulation mathématique du modèle à étudier.

CHAPITRE III
FORMULATIONS MATHEMATIQUES

Formulation Mathématique

III.1. Introduction:

Le transport d'un constituant d'une solution fluide d'une région de haute concentration à une région de concentration plus faible est appelé transfert de masse. On peut comprendre son mécanisme en faisant une analogie avec la transmission de chaleur. La masse est diffusée dans une direction où le gradient de concentration existant va en diminuant et cesse lorsque le gradient de concentration s'annule. Dans ce chapitre, nous présentons brièvement les notions de base du transfert de masse utilisées dans notre étude.

Le transfert de masse peut s'effectuer en phase gazeuse ou en phase liquide, soit par diffusion moléculaire dans des fluides au repos (la diffusion solutale), soit par des courants dans des fluides en écoulement (la convection solutale).

Les mouvements de convection de double-diffusion ou convection thermosolutale sont générés par les gradients de densité qui sont dus à la fois au champ de température, et au champ de concentration. Ce dernier peut apparaître dans un fluide ayant deux (ou plusieurs) composants diffusant dans le mélange à différentes vitesses et qui contribuent au gradient vertical de densité. Ce phénomène de convection double diffusive apparaît dans des situations réelles diverses: croissance de cristaux destinés à l'industrie des semi-conducteurs, processus de séchage, processus de fusion-solidification de mélanges binaires, stockage des gaz liquide ou oxydation des surfaces métalliques, diffusion souterraine des polluants, enfouissement souterrain des déchets radioactifs, stockage de certains produits agricoles, extraction de pétrole.... On estime actuellement que ce phénomène des transferts convectifs de masse et de chaleur constitue un domaine très actif et d'importants travaux ont été effectués encore très récemment tant au niveau expérimental que numérique. La diversité des configurations et le nombre important de paramètres qui interviennent dans ce type d'écoulement nous donne un grand choix de domaine d'études.

La plupart des études existantes traitant de la convection d'origine thermique sont basées sur le modèle de Darcy. De plus ces études supposent le caractère isotrope et homogène des matériaux poreux. Dans beaucoup de cas, la loi de Darcy se trouve inadéquate et l'anisotropie géométrique des grains ou des fibres est rencontrée dans de nombreux milieux poreux, comme les formations rocheuses, les sols sédimentaires, les matériaux d'isolation thermique et

les structures dendritiques formées lors de la solidification de mélanges à plusieurs composants. La majorité des travaux antérieurs qui se sont intéressés à la description des phénomènes de convection double diffusive traitent de la convection naturelle thermosolutale dans les milieux formés de couches poreuses horizontales ou verticales thermiquement et/ou hydrauliquement anisotropes .Des études thermiquement et/ou hydrauliquement anisotropes récentes prennent en compte le caractère anisotrope et hétérogène des milieux poreux. L'absence d'études qui traitent de la convection naturelle thermosolutale dans une enceinte constitué de milieux poreux multi-couches avec différentes perméabilités dans des cavités carrées et inclinées nous a motivé pour rechercher des résultats concernant ce type de cavité. Notre étude porte plus particulièrement sur l'influence, à des nombres de Rayleigh modérés, de certains paramètres géométriques et physiques, du nombre de Lewis sur la structure de l'écoulement et les transferts de chaleur et de masse.

Dans un premier temps nous donnons quelques notions fondamentales sur le transfert de masse et son couplage avec la convection thermique. Nous présentons par la suite notre modèle mathématique.

Nous nous intéressons à la convection double diffusive générée dans une cavité carrée inclinée, infiniment longue, constituée d'un milieu poreuses multi-couches (deux couches de milieu poreux), de propriétés physiques différentes. Avec des conditions limites classiques (conditions de Dirichlet en température et concentration sur les parois verticales) en régime stationnaire.

III.2. Le Transfert de masse par diffusion moléculaire

Le transfert de masse par diffusion moléculaire est analogue à la transmission de chaleur par conduction. Il peut avoir lieu dans un fluide au repos mais également dans un fluide en écoulement. Si l'on considère par exemple une cavité contenant deux gaz A et B à la même température, même pression et séparés initialement par une cloison Figure III.1:

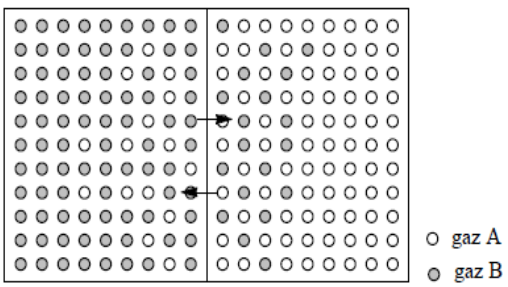


Figure. III.1: transfert de masse par diffusion moléculaire dans un mélange gazeux

Un transfert de masse s'effectue, dés qu'on met ces deux gaz en contact, dans le sens décroissant de la concentration.

En régime permanent, la concentration en chaque point ne varie pas avec le temps, et suivant la loi de Fick:

$$\vec{\dot{m}}_A = -D_{AB}\overrightarrow{gradC_A} \qquad \text{(III.1)}$$

où $\vec{\dot{m}}_A$ est la densité de flux massique en kg/(s m^2).

Cette équation est appelé la loi de Fick et relie la densité du flux massique $\dot{m}_A$ échangé par diffusion solutale au gradient de concentration et à la diffusivité massique D_{AB} du composant A dans B.

Remarquons que la loi de Fick est analogue à celle de Fourrier qui détermine la densité du flux thermique transféré par conduction dans un milieu homogène de conductivité λ.

$$\vec{q} = -\lambda\overrightarrow{gradT} \qquad \text{(III.2)}$$

$\vec{q}$ est la densité du flux thermique exprimée en W/m^2

λ: est la conductivité thermique exprimée en W/m.K

T est la température [K]

La diffusion solutale peut être influencée par des paramètres extérieurs, tel que les gradients de température (effets de Soret, effet Dufour), les gradients de pression où les réactions chimiques. Dans notre étude, nous supposerons que ces effets extérieurs sont négligeables et que la diffusion solutale ne dépend que du gradient de concentration.

En diffusion solutale, on travaille généralement sur le concept de concentration d'un élément e dans un mélange. Cette concentration représente la masse de l'élément e dans le mélange de volume V_d et elle est exprimée en kg de solvant (l'élément e) par m^3de solution (le mélange).

$$C_e = \frac{m_e}{V_d} = \rho_e \qquad \text{(III.3)}$$

La densité de flux massique locale d'un élément e dans un mélange s'exprime.

$$\vec{\dot{m}}_e = \rho_e\overrightarrow{V_e} \qquad \text{(III.4)}$$

où $\overrightarrow{V_e}$ représente la vitesse des particules du composant e dans un système de coordonnées fixes. La vitesse moyenne massique $\vec{V}$ est alors définie comme le rapport de la somme des flux massiques élémentaires à la densité totale du mélange.

$$\rho.\vec{V} = \vec{\dot{m}} = \sum \vec{\dot{m}} = \sum \rho_e \vec{V_e} \quad \text{(III.5)}$$

$$\vec{V} = \frac{1}{\rho} \sum \rho_e \vec{V} \quad \text{(III.6)}$$

On définit alors le flux massique de l'élément e relativement par rapport à un repère se déplaçant à la vitesse massique moyenne par:

$$\overrightarrow{\dot{M}_e} = \rho_e \left(\overrightarrow{V_e} - \vec{V} \right)$$

(III.7)

Si $\vec{\dot{m}}$ est le flux absolu de l'élément e, $\overrightarrow{\dot{M}}$ est le flux diffus; il représente le mouvement de l'élément relativement au mouvement moyen du mélange et on peut écrire:

$$\overrightarrow{\dot{m}_e} = \overrightarrow{\dot{M}_e} + \rho_e \vec{V} \quad \text{(III.8)}$$

L'équation (III.8) nous montre qu'il y a deux contributions pour le flux absolu de l'élément e, l'une due à la diffusion (mouvement de l'élément e par rapport au mouvement moyen du mélange) et l'autre due au mouvement moyen du mélange.

III.2.1. Equations de la diffusion massique

L'équation de conservation de la masse globale du mélange s'écrit:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\rho_e \vec{V} \right) = 0 \quad \text{(III.9)}$$

soit, encore, en distinguant la contribution de chacun des éléments: L'équation relative à l'ensemble des éléments du mélange s'écrit:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\sum \rho_e \overrightarrow{V_e} \right) = 0 \quad \text{(III.10)}$$

L'équation de la conservation de la masse pour chaque élément e du mélange sur un volume de contrôle est:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\rho_e \overrightarrow{V_e} \right) = 0 \quad \text{(III.11)}$$

En tenant compte de l'équation (III.7), l'équation (III.11) s'écrira:

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \left(\rho_e \vec{V} \right) = -\nabla \overrightarrow{\dot{M}_e} \quad \text{(III.12)}$$

En remplaçant le flux massique M_e par son expression donnée par la loi de Fick (III.1) et en introduisant le concept de la concentration défini par l'équation (III.3), on obtient l'équation de la diffusion de chaque constituant e du mélange.

$$\frac{\partial C_e}{\partial t} + \vec{V}.\nabla C_e = \mathrm{D}\,\Delta\, C_e \qquad \text{(III.13)}$$

Dans notre étude le mélange ne contient qu'un seul élément, dans tout ce qui va suivre on omettra l'indice e pour la concentration, on écrira donc l'équation (III.13) comme suit:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V}.\nabla C = D\Delta C \qquad \text{(III.14)}$$

Lorsque l'écoulement du fluide est assez faible pour contribuer au transfert de masse, l'équation (III.15) s'écrit sous la forme réduite suivante:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla C \qquad \text{(III.15)}$$

De même cette diffusivité est analogue à la conductivité thermique (exprimée en kJ/kg.K), si on compare la loi de Fick (III.1) et la loi de Fourrier (III.2) donnant respectivement la densité du flux solutal et la densité du flux thermique.

III.3. Couplage avec la convection thermique

Pour expliquer le comportement de deux écoulements dus simultanément à la diffusion thermique et à la diffusion solutale, prenons l'exemple simple d'une plaque plane verticale maintenu à une température Tp et baignant dans un fluide à une température T∞. Si Tp> T∞, le fluide près de la paroi s'échauffe ce qui entraîne une diminution de sa densité, et par conséquent un mouvement ascendant s'établit le long de la paroi, du fait de la poussée d'Archimède. C'est le cas de la convection thermique pure. Supposons maintenant que ce même fluide contient un constituant d'une concentration C∞ et que la plaque est soumise à une concentration Cp de ce même constituant, Quatre cas peuvent intervenir suivant la nature du fluide et des conditions aux limites. En effet le comportement du fluide le long de la paroi est influencé par le signe d'expansion solutal du constituant (soluté) βc et par le taux de concentration de la paroi par rapport à la solution. Selon ces paramètres, les forces de volume thermiques et solutales peuvent coopérer ou s'opposer suivant les configurations suivantes:

- Le cas où le fluide prés de la paroi est moins concentré (Cp<C∞), sa densité plus faible entraînerai un mouvement ascendant, cet écoulement solutal qui est du à un gradient de concentration coopère avec l'écoulement thermique si βc >0 et s'oppose si βc <0.
- Le cas où le fluide prés de la paroi est plus concentré (Cp>C∞), il devient plus lourd et

descend le long de la plaque, cet écoulement se trouve confronté à l'écoulement thermique si $\beta c > 0$ mais s'entraident si $\beta c < 0$.

Les quatre configurations sont représentées sur la figure III.2

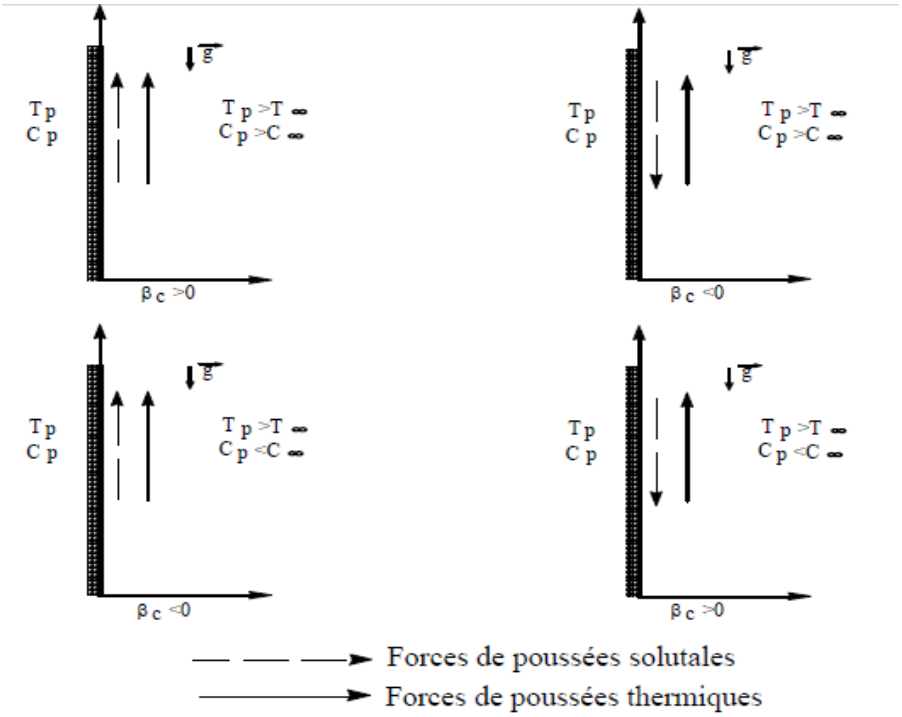


Figure. III.2: Couplage thermosolutale le long d'une plaque verticale

Bejan [95] présente des résultats concernant ce même type d'écoulement naturel d'un fluide le long d'une plaque verticale soumise à des gradients horizontaux de température et de concentration.

Nous considérons dans notre étude que les transferts de chaleur et de masse ne sont couplés que par la vitesse de l'écoulement et n'interagissent pas entre eux directement. Dans le cas contraire nous serons en présence de l'effet Soret et Dufour. Ce phénomène apparaît lorsque les gradients de température et de concentration sont élevés.

Dans ce chapitre nous décrivons et formulons le modèle physique, les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées.

Le travail qui fait l'objet de cette étude concerne justement la convection double diffusive générée dans une cavité carrée remplie par deux couches de milieu poreux disposées horizontalement. Par une modélisation numérique, les

résultats des calculs sont présentés et commentés en termes de lignes de courant, des isothermes, des isoconcentrations et des transferts thermiques et massiques moyens.

III.4. Modèle Physique

Le modèle physique étudié est présenté dans la figure 3, deux couches de milieux poreux sont disposées horizontalement occupant l'espace formé par une cavité carrée et un fluide (solution de nitrate) surnage au dessus de ces derniers constituant ainsi le domaine d'étude.
Quelques hypothèses sont considérées pour ce cas de modèle physique:

- Ecoulement laminaire 2D et stationnaire.
- Les couches de milieux poreux sont considérées homogènes, isotropes et saturées par le même fluide.
- Les propriétés thermo-physiques sont considérées constantes
- Hypothèse de Boussinesq admise.
- Un équilibre thermodynamique local a lieu entre le fluide et le milieu poreux.
- Le modèle de Darcy- Brinkman est adopté. Les parois inférieure et supérieure de la cavité sont adiabatiques et imperméables alors que les faces latérales sont maintenues à des conditions de température et de concentration constantes.

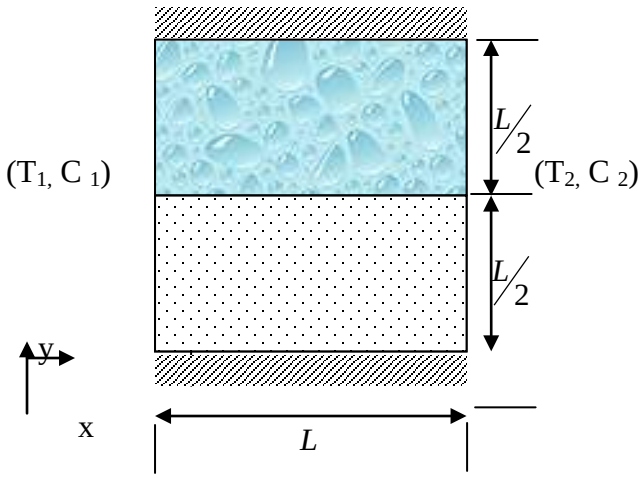


Figure III.3. modèle physique et système de coordonnée

A cet effet, une convection double diffusive prend naissance dans la cavité partiellement poreuse. Les équations gouvernantes formulées dans les sections qui suivent sont écrites en tenant compte des hypothèses précédentes :

III.5. Equations gouvernantes

III.5.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial u_i}{\partial x}+\frac{\partial v_i}{\partial y} \qquad \text{(III.20)}$$

III.5.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement

- **Suivant x**

$$\rho_f\left(u_i\frac{\partial u_i}{\partial x}+v_i\frac{\partial u_i}{\partial y}\right)=-\varepsilon^2\frac{\partial p_i}{\partial x}-\varepsilon^2\frac{\mu_f}{K_i}u_i+\varepsilon^2\mu_{eff_i}\left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2}\right)+\varepsilon^2\left(\beta_T\left(T-T_{ref}\right)+\beta_C\left(C-C_{ref}\right)\right)\rho_f.g.\sin\alpha \qquad \text{(III.21)}$$

- **Suivant y**

$$\rho_f\left(u_i\frac{\partial v_i}{\partial x}+v_i\frac{\partial v_i}{\partial y}\right)=-\varepsilon^2\frac{\partial p_i}{\partial y}-\varepsilon^2\frac{\mu_f}{K_i}v_i+\varepsilon^2\mu_{eff_i}\left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+\varepsilon^2\left(\beta_T\left(T-T_{ref}\right)+\beta_C\left(C-C_{ref}\right)\right)\rho_f.g.\cos\alpha \qquad \text{(III.22)}$$

III.5.3.Equation de l'énergie

$$\left(\rho.cp\right)_f\left[u_i\frac{\partial T_i}{\partial x}+v_i\frac{\partial T_i}{\partial y}\right]=k_{eff}\left[\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2}\right] \qquad \text{(III.23)}$$

III.5.4.Equation de concentration

$$\left[u_i\frac{\partial C_i}{\partial x}+v_i\frac{\partial C_i}{\partial y}\right]=D_{eff}\left[\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2}\right]$$

(III.24)

L'indice i désigne la couche poreuse, $i=1$correspond à la couche 1 et $i=2$ à la couche fluide 2. Dans le cas du modèle physique avec les couches poreuses horizontales, on pose: $\alpha=0^\circ$. On désignera le modèle physique de la figure 1a par modèle horizontal .

III.6.Conditions aux limites

Pour la résolution du problème physique, nous avons besoin d'associer aux équations mathématiques régissant le phénomène de convection naturelle, un nombre adéquat de conditions aux limites.

Les conditions aux limites se traduisent sous forme mathématique comme suit:

III.7. Adimensionnement des équations

En général, l'adimensionnement est une méthode qui peut permettre de réduire le nombre de paramètres influençant les phénomènes physiques et de généraliser les résultats à obtenir.

Afin de ne pas alourdir les équations gouvernantes par l'indice i on a omis l'indice (i). Ainsi en introduisant les grandeurs adimensionnelles suivantes:

L : Longueur de la cavité.

$\Delta T = T_1 - T_2$: Ecart de température de référence entre les parois.

$\Delta C = C_1 - C_2$: Ecart de Concentration de référence entre les parois.

a : Diffusivité thermique.

$$X^* = \frac{x}{L} \quad , \quad Y^* = \frac{y}{L} \quad , \; U^* = \frac{uL}{a} \quad , \quad V^* = \frac{vL}{a} \quad , \quad \theta = \frac{T - T_{ref}}{T_1 - T_2} \quad , \quad S = \frac{C - C_{ref}}{C_1 - C_2} \quad ;$$

$$P^* = p \frac{L^2}{\left(\frac{\rho_f . a^2}{\varepsilon^2} \right)} \qquad \text{Avec:} \qquad T_{ref} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad , \quad C_{ref} = \frac{C_1 + C_2}{2}$$

Afin de ne pas trop encombrer l'écriture des équations les exposants (*) relatifs aux variables adimensionnelles seront omis par la suite.

En procédant à une mise sous forme adimensionnelle des équations gouvernantes, celles-ci s'écrivent sous la forme suivante:

L'ensemble des équations gouvernant la conservation de la masse, la quantité de mouvement, de l'énergie et de l'espèce chimique s'écrivent pour chacune des couches, sous forme adimensionnelle comme suit :

$$\frac{\partial U_i}{\partial X} + \frac{\partial V_i}{\partial Y} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_i^2} \left[U_i \frac{\partial U_i}{\partial X} + V_i \frac{\partial U_i}{\partial Y} \right] = -\frac{\partial P_i}{\partial X} - \frac{\Pr}{Da_i} . U_i + Rv \Pr . \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial Y^2} \right) \qquad (2)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_i^2}\left[U_i\frac{\partial V_i}{\partial X}+V_i\frac{\partial V_i}{\partial Y}\right]=-\frac{\partial P_i}{\partial Y}-\frac{\Pr}{Da_i}.U_i+Rv\Pr.\left(\frac{\partial^2 V_i}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V_i}{\partial Y^2}\right)+Ra\Pr[\theta_i+NS_i] \quad (3)$$

$$U_i\frac{\partial \theta_i}{\partial X}+V_i\frac{\partial \theta_i}{\partial Y}=Rc.\left(\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial Y^2}\right) \quad (4)$$

$$U_i\frac{\partial S_i}{\partial X}+V_i\frac{\partial S_i}{\partial Y}=\frac{1}{Le}.\left(\frac{\partial^2 S_i}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 S_i}{\partial Y^2}\right) \quad (5)$$

L'indice i désigne les couches, il prend les valeurs 1 ou 2. Les paramètres apparaissant dans ces équations sont définis dans la nomenclature.

Les conditions aux limites se traduisent mathématiquement sous forme adimensionnelle par :

Pour Y=0 $0\leq X\leq 1$ $U_i=V_i=0$ $\left.\frac{\partial \theta_i}{\partial Y}\right|=0$ $\left.\frac{\partial S_i}{\partial Y}\right|=0$ (7)

Pour Y=1 $0\leq X\leq 1$ $U_i=V_i=0$ $\left.\frac{\partial \theta_i}{\partial Y}\right|=0$ $\left.\frac{\partial S_i}{\partial Y}\right|=0$ (8)

Pour X= 0 $0\leq Y\leq 1$ $U_i=V_i=0$ $\theta_i=-0.5$ $S_i=-0.5$ (9)

Pour X= 1 $0\leq Y\leq 1$ $U_i=V_i=0$ $\theta_i=0.5$ $S_i=0.5$ (10)

A côté des conditions aux limites, on associe aussi les conditions de continuité aux interfaces.

La mise sous forme adimensionnelle des équations gouvernante a donnée naissance à un groupement adimensionnel tel que le nombre de Darcy (Da_i) de chaque couche poreuse, le nombre de Rayleigh (Ra) ainsi que le nombre de Prandtl (Pr). Les autres paramètres sont définis dans la nomenclature.

Bien que dans les équations gouvernantes adimensionnées, c'est le nombre de Rayleigh fluide qui est défini, dans la suite on utilisera le nombre de Rayleigh modifié Ra_m (basé sur le nombre Rayleigh fluide Ra et le nombre de Darcy de la première couche poreuse $Ra_m= Ra\ Da_1$).

III.8.Conclusion:

Une fois les équations régissant le problème physique posé, avec les conditions aux limites associées, sont mises sous leurs formes adimensionnelles, et étant donné leur présentation sous forme d'équations aux dérivées partielles qui ne peuvent prétendre à une résolution analytique directe, nous avons donc opté pour une résolution numérique. Celle-ci permettra de transformer les équations aux dérivées en équations algébriques. Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE IV
MODELISATION NUMERIQUE

Modélisation numérique

IV.1. Introduction

La procédure numérique retenue pour la résolution du système d'équations couplées précédentes ((III.16)-(III.19)) gouvernant la convection thermosolutale dans la cavité poreuse est la méthode des volumes finis, Patankar [95]. Elle utilise une formulation des équations en variables primitives (vitesse–pression).

IV.2. Principe de la méthode des volumes finis

IV.2.1. Equation différentielle gouvernante

Les phénomènes physiques impliquant l'écoulement d'un fluide, le transfert de chaleur et le transfert de masse, sont gouvernés par les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, d'énergie et des espèces chimiques,... etc. Ces principes sont exprimés par des équations différentielles. Si on note par ϕ la variable dépendante, les équations de conservation en régime stationnaire possèdent une forme commune, qui est donnée par:

$$\nabla.\left(\rho\vec{V}\phi\right)=\nabla.\left(\Gamma\vec{\nabla}\phi\right)+S \qquad \text{(IV.1)}$$

Avec:

$\nabla.\left(\rho\vec{V}\phi\right)$: Terme convectif.

$\nabla.\left(\Gamma\vec{\nabla}\phi\right)$: Terme de diffusion.

S : Terme source.

Γ : Coefficient de diffusion.

ϕ : est la variable dépendante généralisée (vitesse, température, Concentration).

IV.2.1.1. Equation de continuité

La difficulté majeure dans le calcul du champ de vitesse, réside dans le champ de pression, qui est inconnu. Cependant, ce champ de pression est implicitement spécifié dans l'équation de continuité.

Quand ce champ de pression est substitué dans les équations du mouvement, le champ de vitesse résultant satisfait l'équation de continuité. Le couplage entre le champ de pression et le champ de vitesse est utilisé dans l'élaboration d'une procédure de calcul pour le champ dynamique.

IV.2.2. Maillage et volume de contrôle

La méthode des volumes finis consiste à diviser le domaine de calcul en un certain nombre de volumes de contrôle. Il existe plusieurs types de maillage, on peut citer le maillage uniforme, le maillage non uniforme et aussi le maillage à zones, et c'est pour le maillage non uniforme que nous avons opté dans notre travail. La figure IV.1 indique la subdivision d'un domaine en volumes de contrôle.

La variable dépendante considérée est calculée aux noeuds. Les équations algébriques définies en ces noeuds, sont obtenues par intégration des équations de conservation à travers les volumes de contrôle, pour chaque noeud.

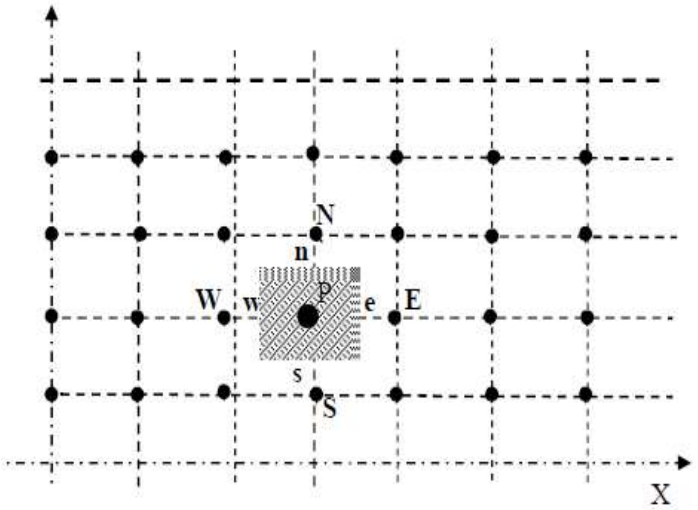


Figure IV.1. Subdivision du domaine d'étude en volumes de contrôle

IV.2.3. Discrétisation des équations de conservation

Pour une situation bidimensionnelle, en régime permanent, l'équation différentielle (IV.1) peut s'écrire, en considérant une direction (i), sous la forme suivante:

$$\rho.u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i}\right) + S \qquad \text{(IV.2)}$$

En combinant les flux convectifs et diffusifs (IV.1), le flux total (convection-diffusion) J_i s'écrit alors:

$$\frac{\partial J_i}{\partial x_i} = S \qquad \text{(IV.3)}$$

Avec

$$J_i = \rho.u_i\phi - \Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x_i} \tag{IV.4}$$

Les différents termes des équations de conservation obtenues dans notre cas sont rapportés dans le tableau IV-1.

Equation	ϕ	Γ	S
Continuité	1	0	0
Mouvement/X	U	$R_v \Pr$	$-\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\Pr}{Da}U + Ra\Pr[\theta + NS]\sin\alpha$
Mouvement/Y	V	$R_v \Pr$	$-\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\Pr}{Da}V + Ra\Pr[\theta + NS]\cos\alpha$
Energie	θ	R_C	0
Concentration	S	$1/Le$	0

Tableau IV.1 : Définition des différents termes des équations de conservation

En intégrant l'équation (IV.3) à travers le volume de contrôle représenté dans la figure IV.2, on obtient:

$$J_W A_W - J_e A_e + J_S A_S - J_n A_n = \overline{S}\Delta V = \overline{S}\Delta X\Delta Y \tag{IV.5}$$

Dans l'équation (IV.5), les quantités $J_{e,w,n,s}$ représentent les flux totaux sur les faces des volumes de contrôle, S est le terme source, et ΔV le volume. Les $A_{e,w,n,s}$ sont les aires de chaque face du volume de contrôle.

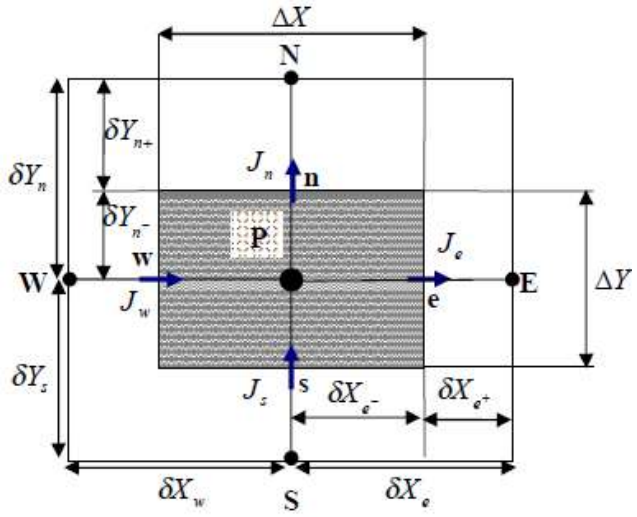


Figure IV.2. Volume de contrôle représentatif

Avec :

$$J_e = \int_n^s (J_X)_e \, dY = \left[U\phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial X} \right]_e \Delta Y \tag{IV.6}$$

$$J_w = \int_n^s (J_X)_w \, dY = \left[U\phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial X} \right]_w \Delta Y \tag{IV.7}$$

$$J_n = \int_w^e (J_Y)_n \, dY = \left[V\phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right]_n \Delta X \tag{IV.8}$$

$$J_s = \int_w^e (J_Y)_S \, dX = \left[V\phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right]_s \Delta X \tag{IV.9}$$

IV.2.3.1. Flux de diffusion -convection:

Considérons la région entre les points P et E de la figure IV.2. Si un problème unidimensionnel de convection - diffusion est résolu entre les points P et E, un profil exponentiel de ϕ est obtenu comme solution exacte. La solution exponentielle conduit à:

$$J_e = F_e \left(\phi_P + \frac{(\phi_P - \phi_E)}{\exp(P_e) - 1} \right) \tag{IV.10}$$

Où le nombre de Peclet, P_e est donné par:

$$P_e = \frac{F_e}{D_e} \tag{IV.11}$$

$F_e = \rho U_e A_e$ est le débit d'écoulement, et D_e la conductance de diffusion.

Le coefficient de diffusion Γ_e est évalué par une moyenne harmonique [88] à travers le volume de contrôle. L'expression de D_e est alors:

$$D_e = A_e\left(\frac{\left(\delta X_{e^-}\right)}{\Gamma_P}+\frac{\left(\delta X_{e^+}\right)}{\Gamma_E}\right)^{-1} \qquad \text{(IV.12)}$$

Les distances δX_{e^-} et δX_{e^+} [95] sont représentées sur la figure IV.2.

IV.2.3.2. Simplification de l'expression du flux:

L'équation (IV.12) peut s'écrire sous la forme suivante:

$$J_e = F_e\phi_p + \left\{D_e A\left(\left|P_e\right|\right)+\left[-F_e,0\right]\right\}\left(\phi_P-\phi_E\right) \qquad \text{(IV.13)}$$

Avec

$$A\left(\left|P_e\right|\right)=\frac{\left|P_e\right|}{\left(\exp\left(\left|P_e\right|\right)-1\right)} \qquad \text{(IV.14)}$$

Le calcul des exponentielles est assez long, de plus il n'est pas exact pour les situations bidimensionnelles et tridimensionnelles avec terme source. Pour ces raisons, des approximations pour l'expression du flux ont été utilisées [95].

IV.2.3.3. Linéarisation du terme source:

Souvent le terme source S dépend de la variable ϕ. Il est exprimé comme une fonction linéaire de ϕ_P. La méthode de la tangente [95] est recommandée dans la linéarisation du terme source, elle consiste à écrire:

$$\overline{S} = \overset{*}{S}+\left[\frac{dS}{d\phi}\right]^*\left(\phi_P-\phi_p^*\right) \qquad \text{(IV.15)}$$

La formule de linéarisation peut s'écrire alors:

$$\overline{S} = Sc + S_P\phi_P \qquad \text{(IV.16)}$$

S_P est le coefficient de ϕ_P. Sc est la partie de S qui ne dépend pas explicitement de ϕ_P. Le symbole $\left(^*\right)$est utilisé pour noter la valeur de ϕ_P à une itération donnée. Il est souhaitable lors de la linéarisation que S_p soit négatif, car un S_p positif peut causer une divergence.

Les valeurs des termes sources linéarisés (Sc et S_P) pour les différentes équations sont résumées dans le tableau IV.2.

Equation	ϕ	*Sc*	*Sp*
Continuité	1	0	0
Mouvement/X	U	$-\frac{\partial P}{\partial X}+Ra\,\Pr[\theta+NS]\sin\alpha$	$-\frac{\Pr}{Da_i}$
Mouvement/Y	V	$-\frac{\partial P}{\partial Y}+Ra\,\Pr[\theta+NS]\cos\alpha$	$-\frac{\Pr}{Da_i}$
Energie	θ	0	0
Concentration	S	0	0

Tableau IV.2. Expressions des termes sources linéarisés (*Sc* et *Sp*) pour les différentes équations

IV.2.3.4. Equation finale de discrétisation:

L'intégration de l'équation de continuité donne :

$$F_e - F_w + F_n - F_s = 0 \qquad \text{(IV.17)}$$

Où F_e, F_w, F_n et F_s sont les débits volumiques à travers les faces du volume de contrôle.
Multiplions l'équation (IV-17) par ϕ_p elle devient :

$$F_e\phi_P - F_w\phi_P + F_n\phi_P - F_s\phi_P = 0 \qquad \text{(IV.18)}$$

D'autre part, la linéarisation du terme source donne :

$$\overline{S} = Sc + S_P\phi_P \qquad \text{(IV.19)}$$

La combinaison entre les équations (IV-5) et (IV-18) donne :

$$(J_e - F_e\phi_P) - (J_w - F_w\phi_P) + (J_n - F_n\phi_P) - (J_s - F_s\phi_P) = (Sc + S_P\phi_P)\Delta X\Delta Y \qquad \text{(IV.20)}$$

Sachant que :

$$J_e - F_e\phi_P = \{D_e A(|P_e|) + [-F_e, 0]\}(\phi_P - \phi_E) \qquad \text{(IV.20a)}$$
$$J_w - F_w\phi_P = \{D_w A(|P_w|) + [F_w, 0]\}(\phi_W - \phi_P) \qquad \text{(IV.20b)}$$
$$J_n - F_n\phi_P = \{D_n A(|P_n|) + [-F_n, 0]\}(\phi_P - \phi_N) \qquad \text{(IV.20c)}$$
$$J_S - F_s\phi_P = \{D_s A(|P_s|) + [F_s, 0]\}(\phi_s - \phi_P) \qquad \text{(IV.20d)}$$

On obtient l'équation discrétisée:

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_S\phi_S + a_N\phi_N + b \qquad \text{(IV.21)}$$

Avec:

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [-F_e, 0] \quad \text{(IV.21a)}$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [+F_w, 0] \quad \text{(IV.21b)}$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + [-F_s, 0] \quad \text{(IV.21c)}$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + [+F_n, 0] \quad \text{(IV.21d)}$$

$$b = Sc\Delta X\Delta Y \quad \text{(IV.21e)}$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S - S_P\Delta X\Delta Y \quad \text{(IV.21f)}$$

Le symbole $[a,b]$ représente le miximum entre a et b et $A(|P_i|)$ la fonction d'interpolation qui diffère d'un schéma à un autre.

Avec :

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{\delta X_e}\Delta Y \quad , F_e = U_e\Delta Y \quad , \; P_e = \frac{F_e}{D_e}$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w}{\delta X_w}\Delta Y \quad , F_w = U_w\Delta Y \quad , \; P_w = \frac{F_w}{D_w} \quad \text{(IV.22)}$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n}{\delta Y_n}\Delta X \quad , F_n = V_n\Delta X \quad , \; P_n = \frac{F_n}{D_n}$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s}{\delta Y_s}\Delta X \quad , F_s = V_s\Delta X \quad , \; P_s = \frac{F_s}{D_s}$$

D_i, F_i et P_i représentent respectivement la diffusion, le débit volumique et le rapport du transfert par convection au transfert par diffusion.

L'équation (IV.21) peut se mettre sous la forme générale suivante :

$$a_P\phi_P = \sum a_{nb}\phi_{nb} + b \quad \text{(IV.23)}$$

L'indice nb note les noeuds voisins de P, et la sommation est faite à travers tous les noeuds voisins (e, w, n, s).

IV.2.3.5.Méthode de résolution des équations algébriques:

La méthode de résolution adoptée dans la présente étude est la technique ligne par ligne, qui combine entre une méthode directe (algorithme de Thomas) et une méthode itérative (Gauss Seidel) [95-98]. Elle est utilisée pour la résolution des équations algébriques. Elle consiste à

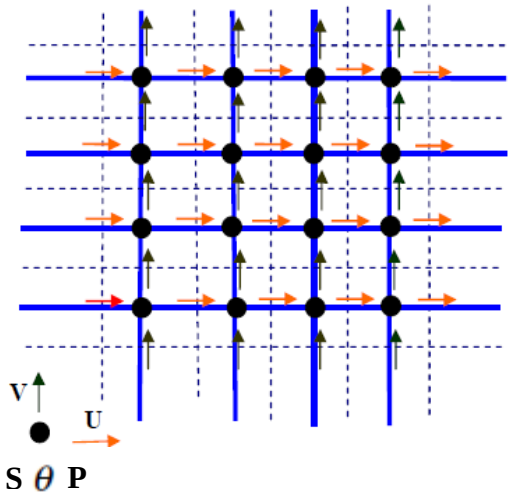
appliquer l'algorithme de Thomas pour trouver les valeurs de ϕ pour une direction et une position donnée. Les valeurs de ϕ des noeuds des positions avoisinantes sont estimées; lorsque toutes les positions seront considérées, une itération est accomplie par la technique ligne par ligne. Le processus peut être répété en choisissant les positions dans l'autre direction.

IV.2.4. Considérations pour le champ dynamique

L'analyse des équations gouvernantes pour les composantes de vitesse u_i révèle que ces dernières ne peuvent être obtenues directement par la résolution des équations du mouvement. En effet, ces équations contiennent le gradient de pression $-\frac{\partial P}{\partial x_i}$ qui est un terme source important, lequel n'est pas exprimé en terme de u_i ou d'autres variables. Cependant, la pression est indirectement spécifiée à travers l'équation de continuité. Une autre difficulté surgit aussi pour les équations du mouvement et de continuité. Si les vitesses et les pressions sont calculées aux mêmes nœuds, plusieurs champs physiques irréels peuvent être considérés comme solutions. L'un des remèdes pour cet inconvénient est le maillage décalé proposé par Patankar [95].

IV.2.4.1.Notion de maillage décalé

La figure IV.3 montre une partie d'un maillage adapté au cas bidimensionnel. Dans le maillage décalé, les composantes de vitesse sont portées sur les faces des volumes de contrôle. Toutes les autres variables ϕ, y compris la pression, sont calculées aux nœuds principaux.



FigureIV.3. Représentation d'un maillage décalé

IV.2.5. Discrétisation des équations dynamiques

IV.2.5.1. Equations du mouvement

Les volumes de contrôle correspondant à U et V sont mentionnés dans la figure IV.4.

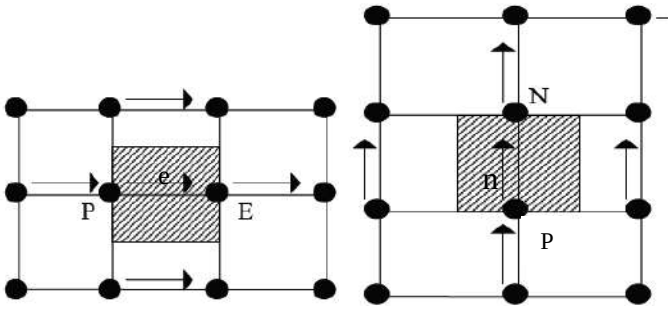


Figure IV.4 Volume de contrôle pour U et V

L'intégration des deux équations de quantité de mouvement suivant les directions X et Y donne :

$$a_e U_e = \sum a_{nb} U_{nb} + b + (P_P - P_E) A_e$$

(IV.24)

$$a_n V_n = \sum a_{nb} V_{nb} + b + (P_P - P_N) A_n$$

A_e, A_n représentent les surfaces sur les quelles agissent les forces de pression.

$(P_P - P_E) A_e$, $(P_P - P_N) A_n$: Sont les forces de pression agissant sur les deux faces du volume de contrôle.

La résolution nécessite la connaissance de la pression.

Le champ de vitesse obtenu ne satisfera l'équation de continuité que si la pression est correcte. Au choix initial $P*$ correspond la solution $U*, V*$

$$a_e U_e^* = \sum a_{nb} U_{nb}^* + b + (P_P^* - P_E^*) A_e$$

(IV.25)

$$a_n V_n^* = \sum a_{nb} V_{nb}^* + b + (P_P^* - P_N^*) A_n$$

IV.2.5.2.Correction des vitesses de la pression

L'objectif est de corriger la pression estimée P^* telle que la vitesse obtenue U^*, V^* s'approchera progressivement de la valeur qui satisfera l'équation de continuité.

Soit P la pression exacte :

$$P = P^* + P'$$
$$U = U^* + U' \quad \text{(IV.26)}$$
$$V = V^* + V'$$

P' : Correction de pression et U', V' *:* correction des vitesses.

Nous avons:

$$a_e U_e = \sum a_{nb} U_{nb} + b + (P_P - P_E) A_e \quad \text{(IV.27)}$$

$$a_e U_e^* = \sum a_{nb} U_{nb}^* + b + (P_P^* - P_E^*) A_e \quad \text{(IV.28)}$$

Faisons la soustraction entre ces deux équations :

$$a_e U_e' = \sum a_{nb} U_{nb}' + (P_P' - P_E') A_e \quad \text{(IV.29)}$$

L'une des hypothèses simplificatrices introduites par Patanker [95] est de supposer que le terme $\sum a_{nb} U_{nb}'$ est négligeable.

$$a_e U_e' = (P_P' - P_E') A_e \quad \text{(IV.30)}$$

Où: encore $U_e' = (P_P' - P_E') d_e$ (IV.31)

L'équation (IV-26) représente la formule de correction de vitesse, avec $d_e = \frac{A_e}{a_e}$

Donc : $U_e = U_e^* + (P_P' - P_E') d_e$ (IV.32)

De la même manière $V_n = V_n^* + (P_P' - P_N') d_n$ (IV.33)

Avec: $d_n = \frac{A_n}{a_n}$

IV.2.5.3.Equation de correction de pression

Le problème maintenant est comment trouver la correction de pression P' ?

L'équation de continuité est donnée par :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad \text{(IV.34)}$$

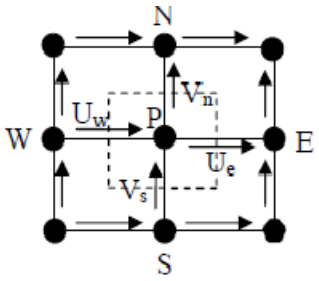


Figure IV.5. Volume de contrôle lié à P

Intégration sur un volume de contrôle autour de P donne :

$$(U_e - U_w)\Delta Y + (V_n - V_s)\Delta X = 0 \qquad \text{(IV.35)}$$

Substitution des vitesses par $U = U^* + U'$, $V = V^* + V'$

D'où :

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + b \qquad \text{(IV.36)}$$

$$a_E = d_e \Delta Y \qquad \text{(IV.36a)}$$

$$a_W = d_w \Delta Y \qquad \text{(IV.36b)}$$

$$a_N = d_n \Delta X \qquad \text{(IV.36c)}$$

$$a_S = d_s \Delta X \qquad \text{(IV.36d)}$$

$$b = (U^*_w - U^*_e)\Delta Y + (V^*_s - V^*_n)\Delta X \qquad \text{(IV.36f)}$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \qquad \text{(IV.36e)}$$

Le terme b devrait tendre vers zéro à la convergence.

IV.3.Algorithme SIMPLER

(SIMPLER: Semi **I**mplicit **M**ethod for **P**ressure **L**inked equation **R**evised), l'algorithme est développé pour permettre d'améliorer la vitesse de convergence.

- **Equation de pression**

  Equation du mouvement :

$$a_e U_e = \sum a_{nb} U_{nb} + b + (P_P - P_E)A_e \qquad \text{(IV.37)}$$

Où

$$U_e = \left(\frac{\sum a_{nb} U_{nb} + b}{a_e} \right) + (P_P - P_E)d_e \qquad \text{(IV.38)}$$

On définit $\hat{U}_e$ pseudo vitesse comme : $$\hat{U}_e = \left(\frac{\sum a_{nb} U_{nb} + b}{a_e} \right)_e \quad \text{(IV.39)}$$

Donc $$U_e = \hat{U}_e + (P_P - P_E) d_e \quad \text{(IV.40)}$$

D'une manière similaire:

$$V_e = \hat{V}_e + (P_P - P_N) d_n \quad \text{(IV.41)}$$

- **L'équation de continuité :**

L'intégration de l'équation de continuité sur un volume de contrôle donne lieu à :

$$(U_e - U_w)\Delta Y + (V_n - V_s)\Delta X = 0 \quad \text{(IV.42)}$$

Substitutions U_i et V_i par $\hat{U}_i + (P_P - P_E) d_i$ et $\hat{V}_i + (P_P - P_N) d_i$ tel que i représente e, w, n, et s. D'où l'équation de pression :

$$a_P P_P = a_W P_W + a_E P_E + a_S P_S + a_N P_N + b \quad \text{(IV.43)}$$

Avec:

$$a_E = d_e \Delta Y \quad \text{(IV.43a)}$$

$$a_W = d_w \Delta Y \quad \text{(IV.43b)}$$

$$a_N = d_n \Delta X \quad \text{(IV.43c)}$$

$$a_S = d_s \Delta X \quad \text{(IV.43d)}$$

$$b = (\hat{U}_w - \hat{U}_e)\Delta Y + (\hat{V}_s - \hat{V}_n)\Delta X \quad \text{(IV.43e)}$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad \text{(IV.43f)}$$

Remarque :

Aucun terme n'a été négligé pour aboutir à l'équation de pression.

Dans le cas de la convection naturelle, le champ dynamique est couplé avec le champ thermique. Les différentes étapes de l'algorithme Simpler, dans ce cas, sont les suivants :

1- Choix initial des vitesses U^* ,V^* et de température θ^* de soluté S^* .

2- Calculer les coefficients des équations du mouvement et obtenir les pseudo vitesses

$$\hat{U}_e = \frac{\sum a_{nb} U_{nb} + b}{a_e}$$

3- Calculer les coefficients dans les équations de pression et résoudre celles-ci pour obtenir P

4- Utiliser cette pression comme choix initial P^* et résoudre les équations du mouvement pour obtenir U^*, V^*.

5-Calculer le terme b et résoudre l'équation de correction de pression pour obtenir P'.

6- Corriger les vitesses $U_i = U_i^* + (P_P' - P_i')$ mais pas la pression.

7-Résoudre les équations d'énergie et solutale pour obtenir θ *et* S.

8- Prendre ces valeurs comme nouveau choix initial et retourner à l'étape 2.

9- Répéter le processus jusqu'à convergence.

IV.4 Technique de sous-relaxation

Les coefficients de sous relaxation sont utilisés dans les équations algébriques pour éviter la divergence du système fortement non linéaire.

Elle consiste à diminuer la variation de la grandeur physique ϕ d'une itération à une autre par l'introduction d'un coefficient de sous relaxation α_ϕ .

Toutes les équations de conservation sont écrites après discrétisation sous la forme générale suivante :

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \tag{IV.44}$$

Si nous notons ϕ_P^* la valeur de ϕ_P à l'itération précédente, il est possible d'écrire :

$$\phi_P = \phi_P^* + \left[\frac{\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_P} \right] - \phi_P^* \tag{IV.45}$$

Le terme entre parenthèses de cette équation représente le changement survenu à ϕ_P pendant une itération. Cette variation peut être alors amortie par l'introduction d'un facteur de sous relaxation α_ϕ de la manière suivante :

$$\phi_P = \phi_P^* + \alpha_\phi \left[\frac{\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b}{a_P} \right] - \phi_P^* \tag{IV.46}$$

Tous les facteurs de sous relaxation doivent être compris entre 0 et 1. Plus ils sont faibles, plus la sous relaxation est forte et la convergence lente. Mais plus ils sont élevés, plus la sous relaxation est faible avec des risques d'instabilités et divergence du processus itératif.

Il n'existe pas de règles pour choisir les coefficients de sous relaxation, cela peut dépendre de la nature du problème, du nombre et de la taille des volumes de contrôle ainsi

que de la procédure itérative choisie. Il faut cependant savoir que le choix de ces facteurs est essentiel pour aboutir à la convergence du processus itératif.

IV.5 Critère de convergence

On dit qu'un processus itératif atteint la convergence lorsque les itérations ultérieures ne produisent aucun changement significatif sur les variables dépendantes ϕ. Pratiquement, on exprime cette convergence par un test d'arrêt du processus itératif appelé critère de convergence qui dépend de la nature du problème et des objectifs du calcul. Un critère de convergence est imposé en terme d'erreur relative pour les variables U, V, P, θ et S. Et qui décrit pour chaque variable :

$\max\left|\frac{\phi-\phi^*}{\phi^*}\right| \leq 10^{-4}$, ainsi que pour le terme b de l'équation de correction pression, avec $|b| \leq 10^{-5}$.

IV.6 Schémas d'interpolation

Dans les coefficients de l'équation algébrique (IV.15), nous avons rencontré le terme $A(|P_i|)$qui représente la fonction d'interpolation utilisée pour l'évaluation de la variable dépendante ϕ à une interface du volume de contrôle.

$A(|P|)$ Prendra une fonction selon le schéma choisi et qui est récapitulée dans le tableau IV.3.

Schéma	$A\|P\|$
Centré	1-0.5$\|P\|$
Upwind	1
Hybride	$[0,(1-0.5\|P\|)]$
Power-Law	$[0,(1-0.5\|P\|)^5]$
Exponentiel	$\frac{P}{\exp\|P\|-1}$

Tableau IV.3. Les expressions de $A|P|$ selon le schéma d'interpolation

Limitations :

- ☒ **Le schéma centré :** il est limité aux problèmes à faible nombre de Peclet, $|P| \leq 2$
- ☒ **Le schéma Upwind :**
- non approprié pour les faibles nombres de $|P|$
- Pour les grandes valeurs de $|P|$**,** la diffusion est surestimée (normalement $\frac{d\phi}{dX} \to 0$).

- **Schéma hybride :** Le schéma hybride est une combinaison de deux schémas précédents, il se réduit à l'approximation centrée lorsque $|P| < 2$, et devient identique au schéma Upwind lorsque $|P| > 2$. L'erreur maximale est pour $|P| \approx 2$

- **Schéma Power-law** : Ce schéma est recommandé pour les problèmes de convection-diffusion, il s'avère très efficace puisqu'il approche beaucoup mieux la solution exacte. Dans notre cas, nous avons utilisé le schéma Power-law.

IV.7 Application de la méthode des volumes finis à notre problème

On rappelle les équations qui régissent le mouvement:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \qquad \text{(IV.47)}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_i^2}\left[U_i \frac{\partial U_i}{\partial X} + V_i \frac{\partial U_i}{\partial Y}\right] = -\frac{\partial P_i}{\partial X} - \frac{\Pr}{Da_i}.U_i + Rv\,\Pr.\left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial Y^2}\right) + Ra\,\Pr[\theta_i + NS_i]\sin\alpha \qquad \text{(IV.48)}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_i^2}\left[U_i \frac{\partial V_i}{\partial X} + V_i \frac{\partial V_i}{\partial Y}\right] = -\frac{\partial P_i}{\partial Y} - \frac{\Pr}{Da_i}.U_i + Rv\,\Pr.\left(\frac{\partial^2 V_i}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial Y^2}\right) + Ra\,\Pr[\theta_i + NS_i]\cos\alpha \qquad \text{(IV.49)}$$

$$U_i \frac{\partial \theta_i}{\partial X} + V_i \frac{\partial \theta_i}{\partial Y} = Rc.\left(\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial Y^2}\right) \qquad \text{(IV.50)}$$

$$U_i \frac{\partial S_i}{\partial X} + V_i \frac{\partial S_i}{\partial Y} = \frac{1}{Le}.\left(\frac{\partial^2 S_i}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 S_i}{\partial Y^2}\right) \qquad \text{(IV.51)}$$

IV.7.1 Discrétisation des équations du mouvement

IV.7.1.1. Equation du mouvement en X

Comme on l'a déjà signalé, l'équation du mouvement dans la direction X sera intégrée dans le volume de contrôle décalé vers la droite, figure IV.6. D'après cette figure, on peut noter que les nœuds w', P' et e' correspondent respectivement aux noeuds P, e et E. L'intégration de l'équation du mouvement dans la direction X à travers le volume de contrôle de la figure IV.6 et après arrangement donne:

$$a_{P'}U_{P'} = a_{E'}U_{E'} + a_{W''}U_{W'} + a_{N'}U_{N'} + a_{S'}U_{S'} + (P_P - P_E)\Delta Y' + b' \qquad \text{(IV.52)}$$

Les coefficients a_i sont définis par les équations (IV.21), alors que les expressions des conductances diffusives et les débits volumiques sont donnés par:

$$\left.\begin{aligned} D_{e'} &= \left(\frac{\Gamma}{\delta X'}\right)_{e'} \Delta Y' & F_{e'} &= U_{e'}\Delta Y' \\ D_{w'} &= \left(\frac{\Gamma}{\delta X'}\right)_{w'} \Delta Y' & F_{w'} &= U_{w'}\Delta Y' \\ D_{n'} &= \left(\frac{\Gamma}{\delta Y'}\right)_{n'} \Delta X' & F_{n'} &= V_{n'}\Delta X' \\ D_{s'} &= \left(\frac{\Gamma}{\delta Y'}\right)_{s'} \Delta X' & F_{s'} &= V_{s'}\Delta X' \end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.53)}$$

Avec $\Gamma = R_v \,\mathrm{Pr}$, $b' = Sc\Delta X'\Delta Y'$ et les valeurs de Sc et Sp sont données dans le tableau (IV.2)

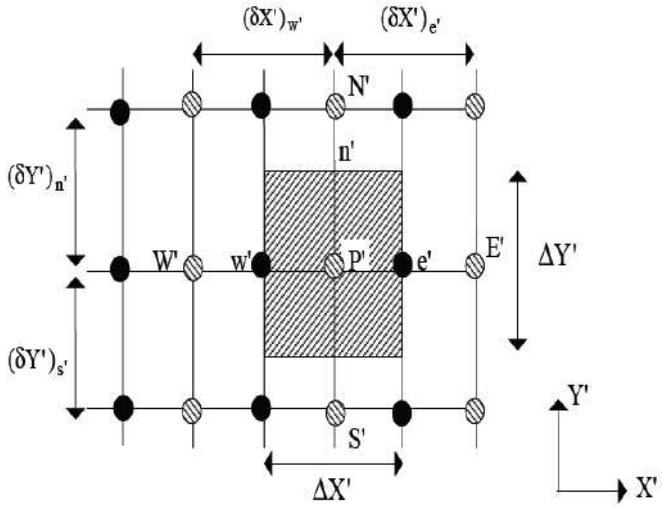


Figure IV.6. Schéma du volume de contrôle pour U

IV.7.1.2. Equation du mouvement en Y

L'intégration de l'équation du mouvement dans la direction Y est faite dans le volume de contrôle décalé vers le haut, figure IV.7, et les nouveaux noeuds seront désignés par P", E", W" et N" et les interfaces par e",w", n" et s". D'après cette figure, on peut noter que les noeuds s", P", et n" correspondent respectivement aux noeuds P, n et N.

En utilisant les mêmes démarches d'intégration qu'en X, la discrétisation de l'équation du mouvement dans la direction Y est obtenue comme suit:

$$a_{P''}V_{P''} = a_{E''}V_{E''} + a_{W''}V_{W''} + a_{N''}V_{N''} + a_{S''}V_{S''} + \left(P_P - P_N\right)\Delta Y'' + b'' \qquad \text{(IV.54)}$$

Où les coefficients a_i " sont définis dans les équations (IV.21), et les expressions des flux diffusifs et les débits volumiques prennent la forme:

$$\left.\begin{aligned} D_{e''} &= \left(\frac{\Gamma}{\delta X''}\right)_{e''} \Delta Y'' & F_{e''} &= U_{e''}\Delta Y'' \\ D_{w''} &= \left(\frac{\Gamma}{\delta X''}\right)_{w''} \Delta Y'' & F_{w''} &= U_{w''}\Delta Y'' \\ D_{n''} &= \left(\frac{\Gamma}{\delta Y''}\right)_{n''} \Delta X'' & F_{n''} &= V_{n''}\Delta X'' \\ D_{s''} &= \left(\frac{\Gamma}{\delta Y''}\right)_{s''} \Delta X'' & F_{s''} &= V_{s''}\Delta X'' \end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.55)}$$

Avec $\Gamma = R_v \,\mathrm{Pr}$, et le terme source est donné par:

$$b'' = Sc\Delta X''\Delta Y'' \quad \text{(IV.56)}$$

La valeur de $\theta_{P''}$ et $S_{P''}$ aux interfaces sera calculée de la manière suivante pour le cas du modèle horizontal:

$$\left.\begin{aligned} \theta_{P''} &= fe\,\theta_P + (1-fe)\theta_N \\ S_{P''} &= fe\,S_P + (1-fe)S_N \end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.57)}$$

et fe est un facteur d'interpolation [95] définis par:

$$fe = \frac{Y_N - Y_{P''}}{Y_N - Y_P} \quad \text{(IV.58)}$$

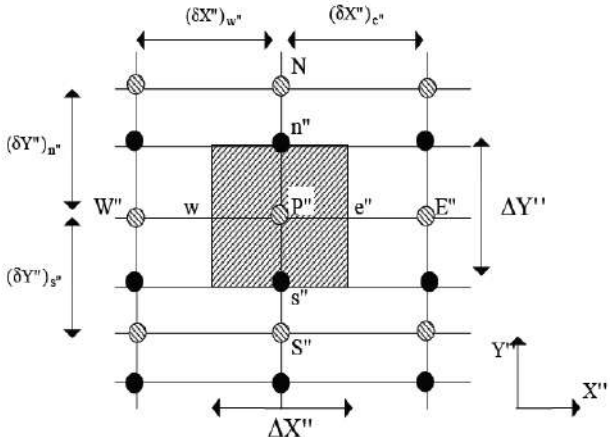


Figure IV.7. Schéma du volume de contrôle pour V

D'une manière similaire, on détermine θ et S pour le cas du modèle vertical.

IV.7.2. Equation de correction de pression

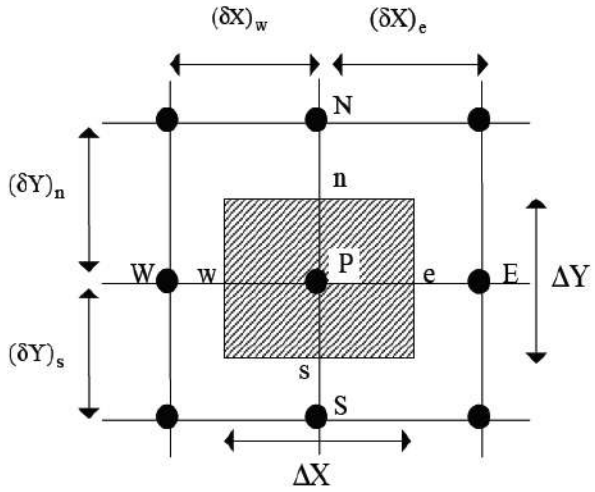


Figure IV.8. Schéma du volume de contrôle pour P

L'intégration de l'équation de continuité pour le volume de contrôle de la figure IV.8 donne:

$$\int_s^n \int_w^e \frac{\partial U}{\partial X} dXdY + \int_s^n \int_w^e \frac{\partial V}{\partial Y} dXdY = 0 \qquad \text{(IV.60)}$$

soit après intégration et simplification, et en utilisant les mêmes démarches que celles faites dans c), l'équation précédente prend la forme:

$$a_P P'_P = a_E P'_P + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + b_{P'} \qquad \text{(IV.61)}$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \qquad \text{(IV.62)}$$

$$\left.\begin{aligned} a_E &= d_e \Delta Y \\ a_W &= d_w \Delta Y \\ a_N &= d_n \Delta X \\ a_S &= d_S \Delta Y \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.63)}$$

Avec:

$$\left.\begin{aligned} d_e &= \frac{A_e}{a_e} = \frac{\Delta Y}{a_e} \\ d_w &= \frac{A_w}{a_w} = \frac{\Delta Y}{a_w} \\ d_n &= \frac{A_n}{a_n} = \frac{\Delta X}{a_n} \\ d_s &= \frac{A_s}{a_s} = \frac{\Delta X}{a_s} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.64)}$$

Avec

$$b_{P'} = \left(U_w^* - U_e^*\right)\Delta Y + \left(V_s^* - V_n^*\right)\Delta X \quad \text{(IV.65)}$$

L'indice (*) désigne la valeur des variables de l'itération précédente. On fait le même raisonnement pour obtenir le champ de pression, on obtient alors :

$$a_P P_P = a_W P_W + a_E P_E + a_S P_S + a_N P_N + b_P \quad \text{(IV.66)}$$

Avec :

$$\left.\begin{aligned} a_E &= d_e \Delta Y \\ a_W &= d_w \Delta Y \\ a_N &= d_n \Delta X \\ a_S &= d_s \Delta X \end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.67)}$$

Avec :

$$b_P = \left(\hat{U}_w - \hat{U}_e\right)\Delta Y + \left(\hat{V}_s - \hat{V}_n\right)\Delta X \quad \text{(IV.68)}$$

Avec:

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad \text{(IV.69)}$$

$$\left.\begin{aligned} \hat{U}_{P'} &= \frac{\sum_{nb'} a_{nb'} U_{nb'}}{a_{P'}} \\ \hat{V}_{P''} &= \frac{\sum_{ab''} a_{nb''} V_{nb''}}{a_{p''}} \end{aligned}\right\} \quad \text{(IV.70)}$$

IV.7.3. Discrétisation de l'équation de l'énergie

L'intégration de l'équation de l'énergie est faite dans le volume de contrôle correspondant aux noeuds principaux, figure IV.8.

$$\int_s^n \int_w^e U \frac{\partial \theta}{\partial X} dX dY + \int_s^n \int_w^e V \frac{\partial \theta}{\partial Y} dX dY = R_k \int_s^n \int_w^e \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) dX dY \quad \text{(IV.71)}$$

Après intégration et arrangement des termes, l'équation de l'énergie discrétisée s'écrit comme:

$$a_P \theta_P = a_W \theta_W + a_E \theta_E + a_S \theta_S + a_N \theta_N \quad \text{(IV.72)}$$

Où les coefficients a_i sont définis dans les équations (IV.21), les flux diffusifs et les débits volumiques prennent la forme:

$$\left.\begin{array}{ll} D_e = \left(\frac{\Gamma}{\delta X}\right)_e \Delta Y & F_e = U_e \Delta Y \\ D_w = \left(\frac{\Gamma}{\delta X}\right)_w \Delta Y & F_w = U_w \Delta Y \\ D_n = \left(\frac{\Gamma}{\delta Y}\right)_n \Delta X & F_n = V_n \Delta X \\ D_s = \left(\frac{\Gamma}{\delta Y}\right)_s \Delta X & F_s = V_s \Delta X \end{array}\right\} \quad \text{(IV.73)}$$

$\Gamma = R_k$

IV.7.4. Discrétisation de l'équation du soluté

L'intégration de l'équation du soluté est faite dans le volume de contrôle correspondant aux noeuds principaux, figure IV.8.

$$\int_s^n \int_w^e U \frac{\partial S}{\partial X} dX dY + \int_s^n \int_w^e V \frac{\partial S}{\partial Y} dX dY = \frac{1}{Le} \int_s^n \int_w^e \left(\frac{\partial^2 S}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial Y^2} \right) dX dY \quad \text{(IV.74)}$$

Après intégration et arrangement des termes, l'équation de l'énergie discrétisée s'écrit comme:

$$a_P S_P = a_W S_W + a_E S_E + a_S S_S + a_N S_N \quad \text{(IV.75)}$$

Où les coefficients a_i sont définis dans les équations (IV.21), les flux diffusifs et les débits volumiques prennent la forme:

$$\left.\begin{array}{ll} D_e = \left(\frac{\Gamma}{\delta X}\right)_e \Delta Y & F_e = U_e \Delta Y \\ D_w = \left(\frac{\Gamma}{\delta X}\right)_w \Delta Y & F_w = U_w \Delta Y \\ D_n = \left(\frac{\Gamma}{\delta Y}\right)_n \Delta X & F_n = V_n \Delta X \\ D_s = \left(\frac{\Gamma}{\delta Y}\right)_s \Delta X & F_s = V_s \Delta X \end{array}\right\} \quad \text{(IV.76)}$$

$\Gamma = \frac{1}{Le}$

CHAPITRE V

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Résultats et Discussions

Dans cette section, les résultats de la simulation numérique se rapportant au modèle physique sont analysés et commentés.

Dans toutes les simulations de cette étude, nous avons considéré une solution aqueuse de nitrate comme fluide saturant la couche poreuse ($\mathrm{Pr} = 7$). La porosité ε, le rapport des conductivités thermiques des deux couches (poreuse et fluide) et le nombre de Lewis sont respectivement fixés à 0.5, 1et 120.83. Le rapport de la viscosité effective à la viscosité fluide ($R\nu$) est pris égal à l'unité. Par ailleurs, Nous nous sommes placés dans les deux cas d'un écoulement convectif où la contribution des forces de volume dues à la concentration vient s'ajouter à celle des forces de volume dues à la température. C'est la convection double diffusive avec un rapport des forces de volume $N > 0$ (convection thermosolutale coopérante) et même dans le cas où $N < 0$ convection thermosolutale opposée. Nous avons traité l'effet de la variation du rapport des forces de volume sur les transferts (N est varié de 0 à 3) et un autre paramètre a été introduit, à savoir l'inclinaison de l'ensemble cavité-couches poreuses par rapport à l'horizontal. Nous avons pris une large étendue des perméabilités (Da) et du nombre de Rayleigh modifié $\mathrm{Ra_m}$, ils varient respectivement dans les proportions suivantes : $10^{-10} \le Da \le 1$ et $7\times10^{-4} \le \mathrm{Ra_m} \le 7\times10^{6}$. Les résultats des calculs numériques sont présentés en termes de lignes de courants, des isothermes, des isoconcentrations et des transferts thermiques et massiques moyens.

V.1.Sensibilité du code de calcul au maillage et validation

Pour trouver le nombre de noeuds adéquat, nous avons effectué plusieurs exécutions pour les modèles horizontal et vertical. Un maillage de (82×82) noeuds donne un bon compromis entre le temps d'exécution et la précision des résultats. Un exemple de calcul est présenté dans le tableau V.1.

Maillage	22x22	42x42	62x62	82x82	102x102
Nu	10.92	11.05	10.93	10.87	10.85
Sh	44.09	47.56	47.22	47.05	46.97

Tableau V.1. Sensibilité du code de calcul au maillage cas du modèle vertical ($\alpha = 0^\circ$) pour Ra=10^7, R_K=0.1, Pr=7, N=1, Le=10, Ram= 10^2, ε_1 = 0.5 et ε_2 = 1

Le code de calcul est validé par rapport à plusieurs cas limites de la littérature [67], [87], [103,104]. Une très bonne concordance est à noter. Les résultats comparatifs sont résumés dans le tableau V.2 en termes des valeurs du nombre de Nusselt et Sherwood moyens.

	Da	10^{-8}	10^{-5}	10^{-2}
Bennacer et al [80]	$Ra_m = 500$	8.80	8.37	3.26
Lauriat et al. [97]		8.84	8.41	3.30
Présent code		8.94	8.42	3.26
Bennacer et al. [80]	$Ra_m = 10^3$	13.48	12.26	4.18
Lauriat et al. [97]		13.41	12.42	4.26
Présent Code		13.51	12.41	4.18

Tableau V.2. Comparaison du nombre de Nusselt dans le cas du régime de Darcy-Brinkman en convection thermique pour $Pr = 0.71$, N=0, $\varepsilon = 0.5$.

V.2.Lignes de courant-isothermes –isoconcentrations

Les structures d'écoulement, des isothermes et des isoconcentrations sont présentées dans les figures V.8 à V.11. Pour une situation présentant une faible valeur de (Da) , une résistance significative à l'écoulement dans la première couche est à noter. Ce comportement est dû à la faible perméabilité de la première couche poreuse. A cet effet, la circulation du fluide dans la couche 2 est plus favorable et la convection thermosolutale est plus prononcée dans cette deuxième couche.

Pour une valeur de Da égale à 10^{-2}, les lignes de courant sont de forme elliptique prolongée et multicellulaires dans toute cavité. La couche limite hydrodynamique prend place sur les parois verticales. La convection thermosolutale est bien prononcée dans les deux couches.

Pour des valeurs de Da plus élevées, telle que $Da = 10^{-4}$, la convection thermosolutale est bien prononcée dans la première couche avec une couche limite hydrodynamique sur les parois verticales. Le même comportement est observé pour N négative.

Les isothermes sont déformées et un gradient de température intensif prend place dans la deuxième couche tandis que les isoconcentrations sont déformées dans les deux couches avec formation d'une couche limite solutale sur les parois verticales car le nombre de Lewis est élevé (Le=120.83) et la convection est d'origine solutale (N=3). Les isothermes dans la première couche sont parallèles aux parois verticales, indiquant que le transfert de chaleur tend vers une situation diffusive.

Pour une valeur de Da égale à 10^{-4}, les lignes de courant sont de forme elliptique et multicellulaire prolongée et une cellule rotative remplit entièrement la cavité; cette cellule est dirigée vers la diagonale lorsque l'angle d'inclinaison augmente. La couche limite hydrodynamique prend place sur les parois. Les isothermes sont déformées et prennent place sur la diagonale de la cavité, la couche limite thermique tend à se former, localisée respectivement sur les parties basses et hautes des parois latérales. Les isoconcentrations sont elles aussi déformées et prennent place sur toute la cavité avec un resserrement notable sur les parois verticales de la cavité. Une couche limite solutale prend place sur les parois latérales car le nombre de Lewis est élevé.

En passant à un Da égal à 10^{-2}, la structure des isolignes est très affectée. En effet, la convection thermosolutale est bien prononcée dans les deux couches. La perméabilité de la couche 2 est très favorable aussi bien aux transferts massiques que thermiques. Les couches limites thermiques sont localisées sur les parties basses et hautes des parois latérales mais les couches limites solutales prennent place sur toute la longueur des parois latérales de la cavité. On note la tendance vers une situation de non dépendance des structures d'écoulement, des isothermes et des isoconcentrations avec la perméabilité K pour une inclinaison fixée.

L'effet de l'angle d'inclinaison sur la structure d'écoulement, des isothermes et des isoconcentrations est très appréciable. En effet, pour un Da fixé, en passant de $\alpha = 0^\circ$ à $\alpha = 30^\circ$ puis à 60°, l'intensité de la convection thermosolutale augmente avec l'inclinaison.

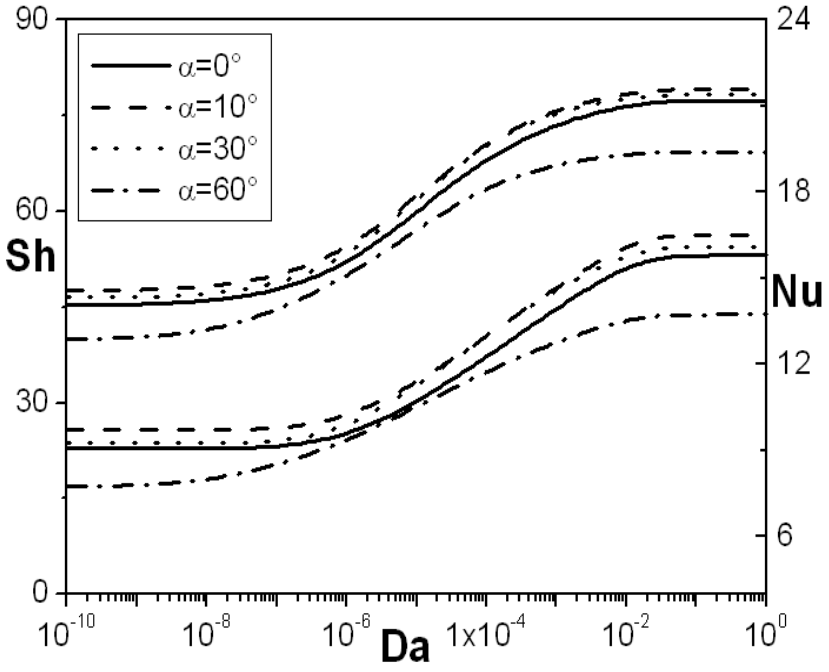


Figure V.1. Variation des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour Da= [10^{-10}-10^{0}], N=0 ,Ra=7x10^{6}et différente valeurs de α

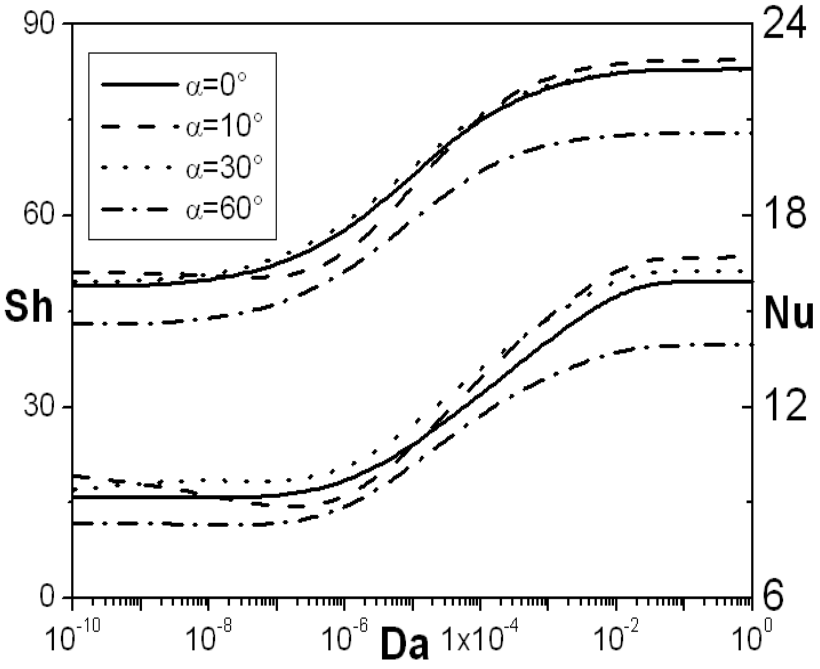


Figure V.2. Variation des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour Da_1= [10^{-10}-10^{0}], N=1 Ra=7x10^{6}, et différente valeurs de α

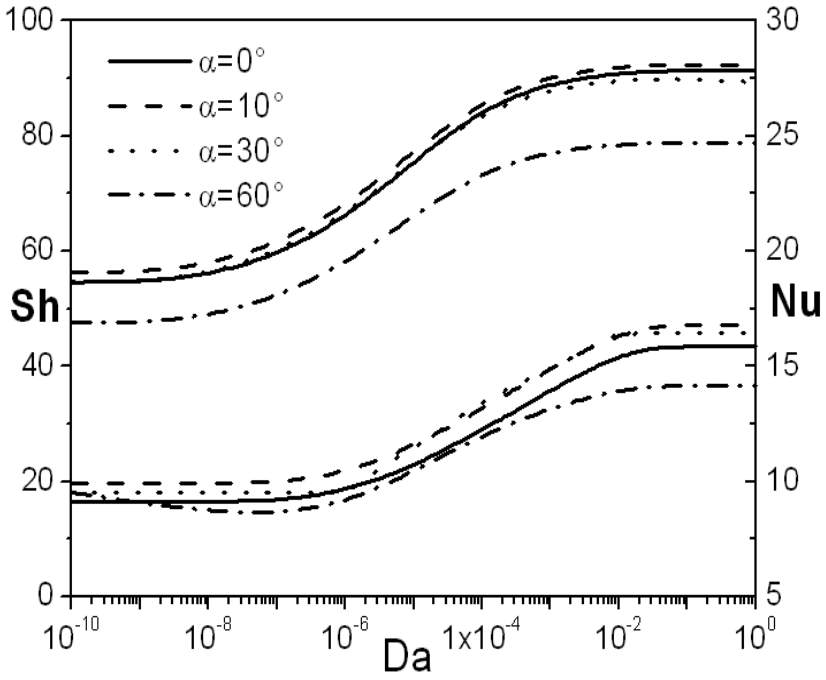


Figure V.3. Variation des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour $Da_1 = [10^{-10}\text{-}10^{0}]$, N=3,$Ra=7x10^{6}$ et différente valeurs de α

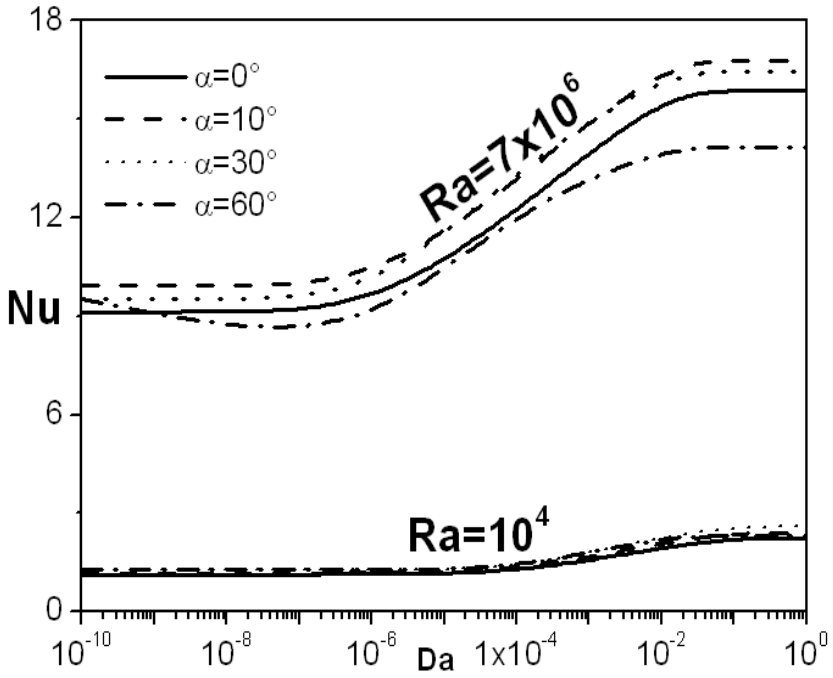


Figure V.4. Variation des nombres de Nusselt moyens pour $Da_1 = [10^{-10}\text{-}10^{0}]$, N=3 et différente valeurs de α

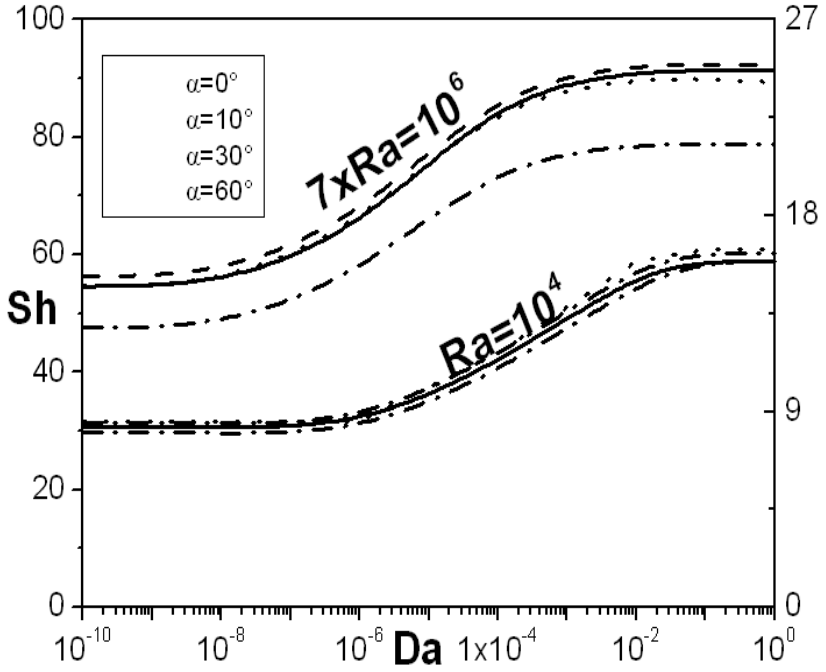


Figure V.5. Variation des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour $Da_1 = [10^{-10}\text{-}10^{0}]$, N=3 et différente valeurs de α

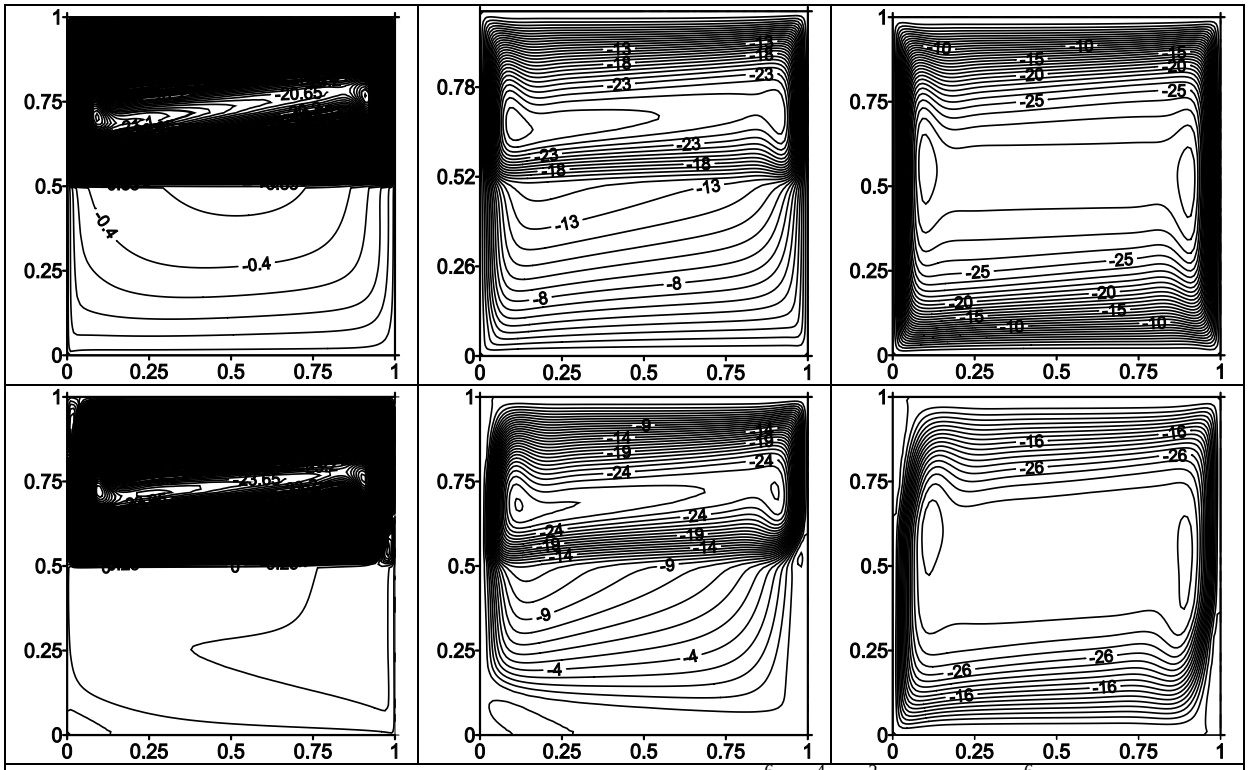


Fig V.6 : représente les lignes de courant pour N=3,-3, Da=[10^{-6},10^{-4},10^{-2}] et Ra=7.10^{6}

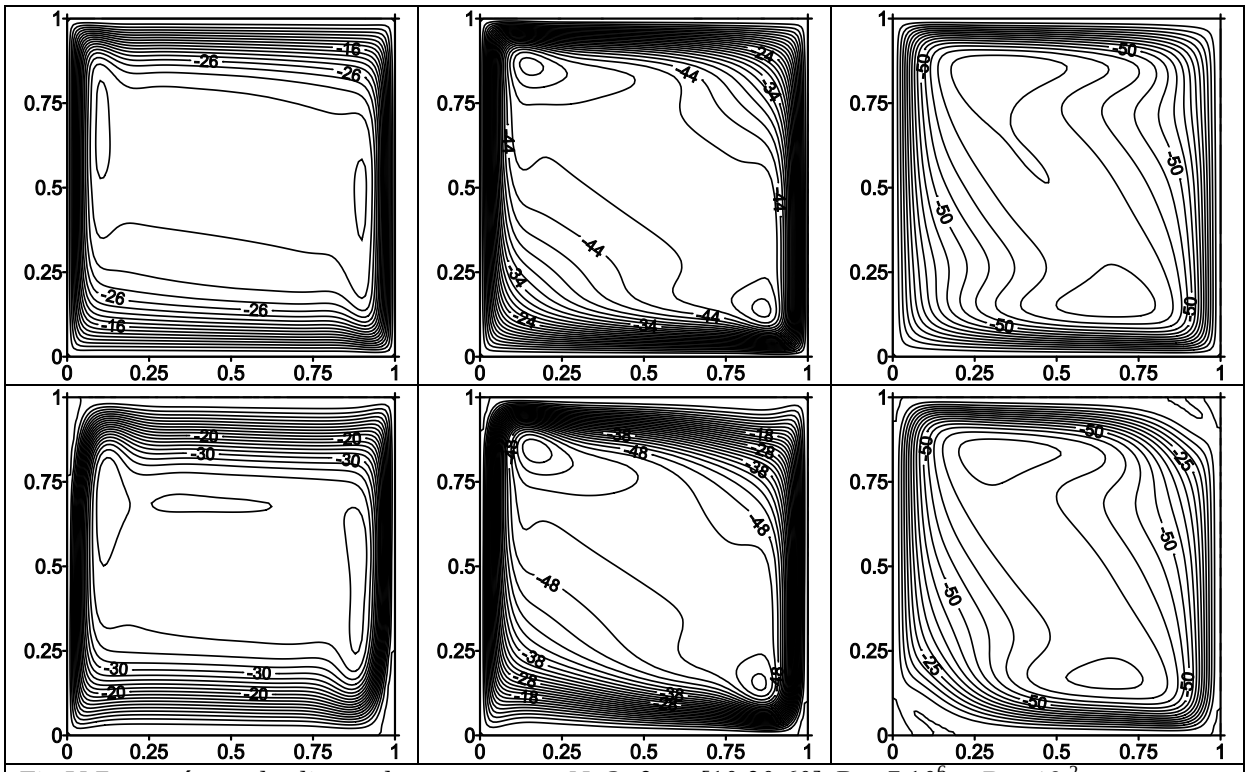


Fig V.7 : représente les lignes de courant pour N=3,-3, α=[10,30,60], Ra=7.10^6 et Da=10^{-2}

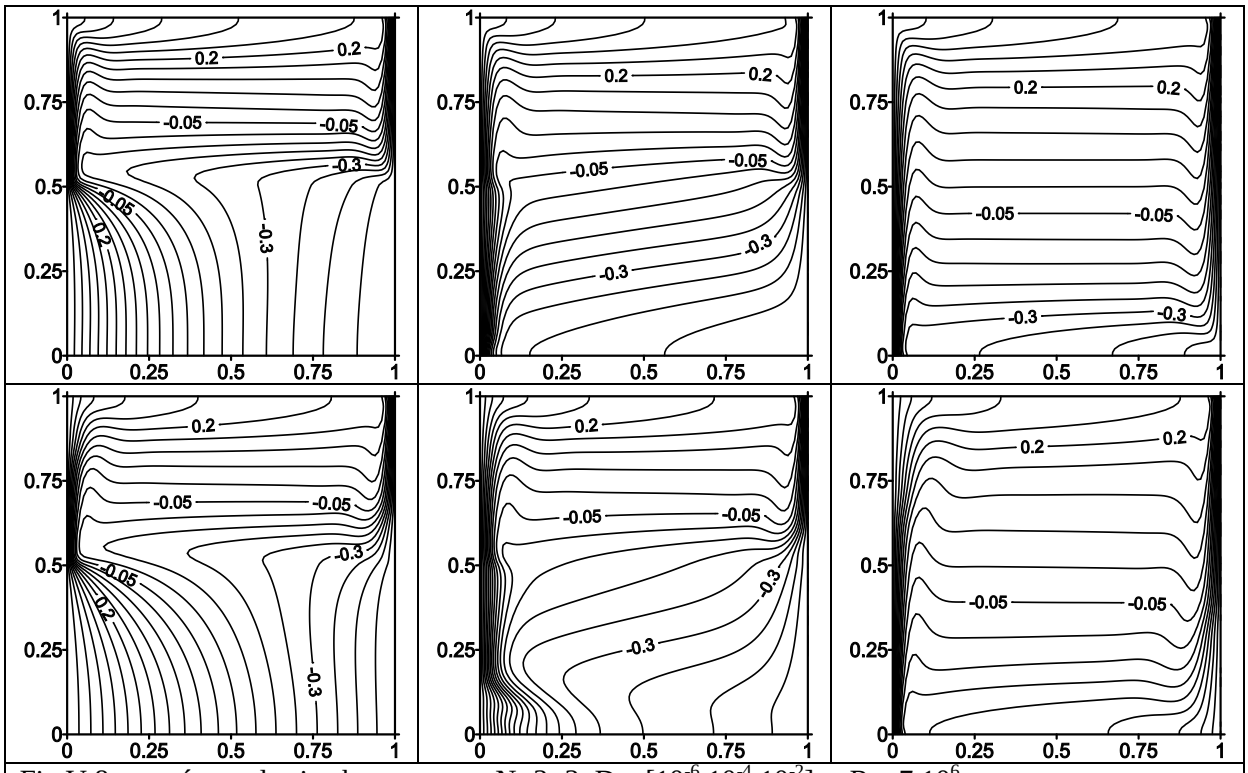


Fig V.8 : représente les isothermes pour N=3,-3, Da=[10^{-6},10^{-4},10^{-2}] et Ra=7.10^6

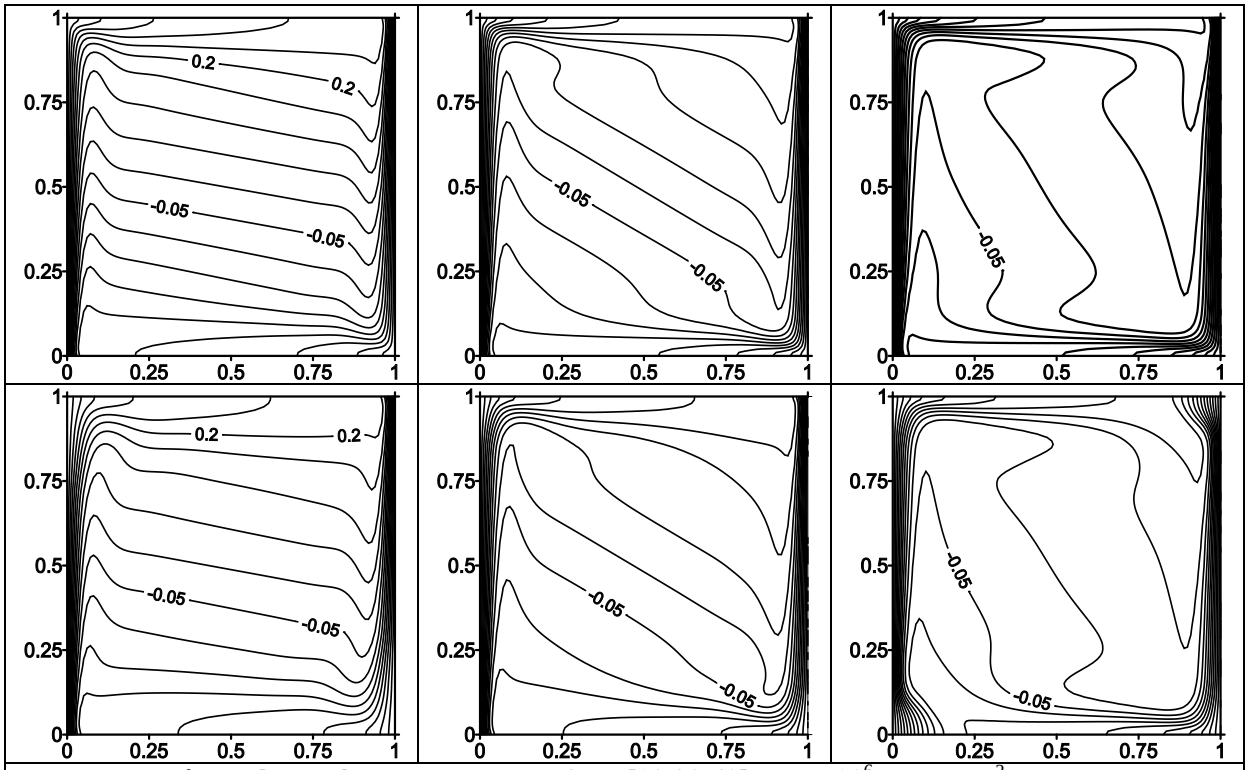


Fig V.9 : représente les isothermes pour N=3,-3, α=[10,30,60], Ra=7.10^6 et Da=10^{-2}

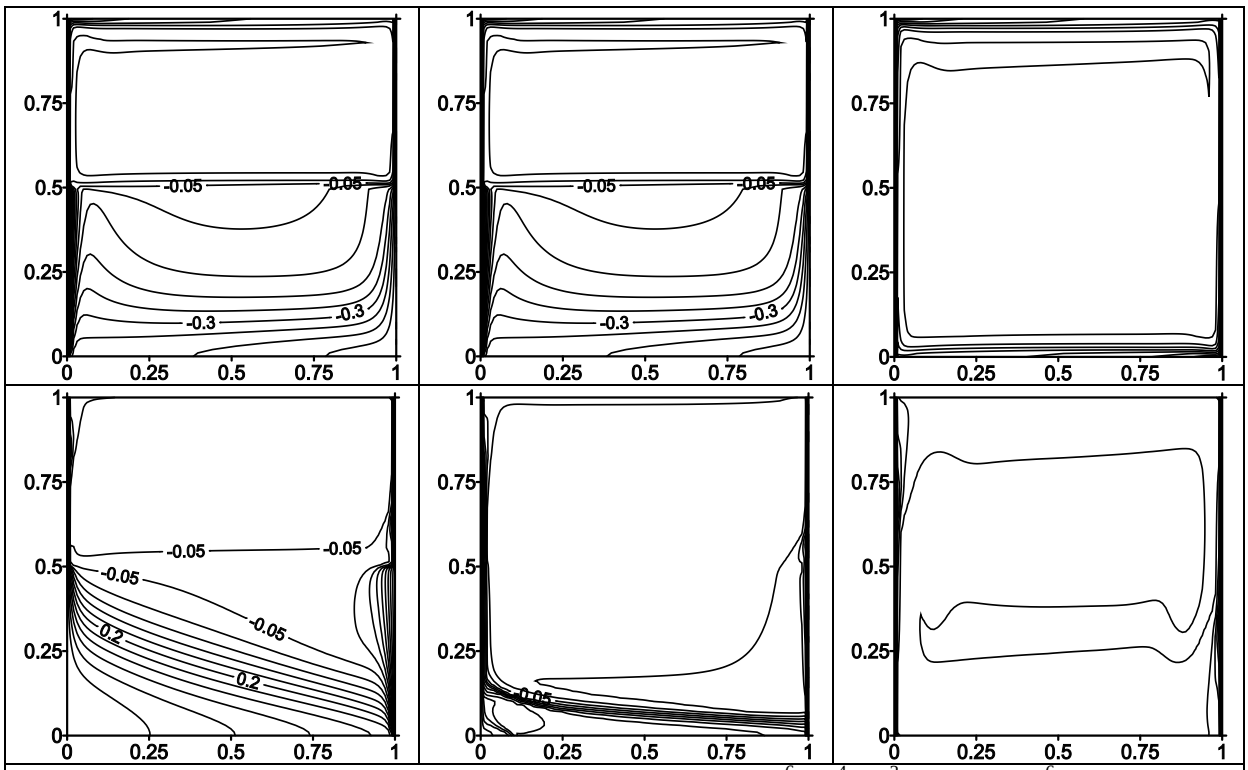


Fig V.10 : représente les Isoconcentrations pour N=3,-3, Da=[10^{-6},10^{-4},10^{-2}] et Ra=7.10^6

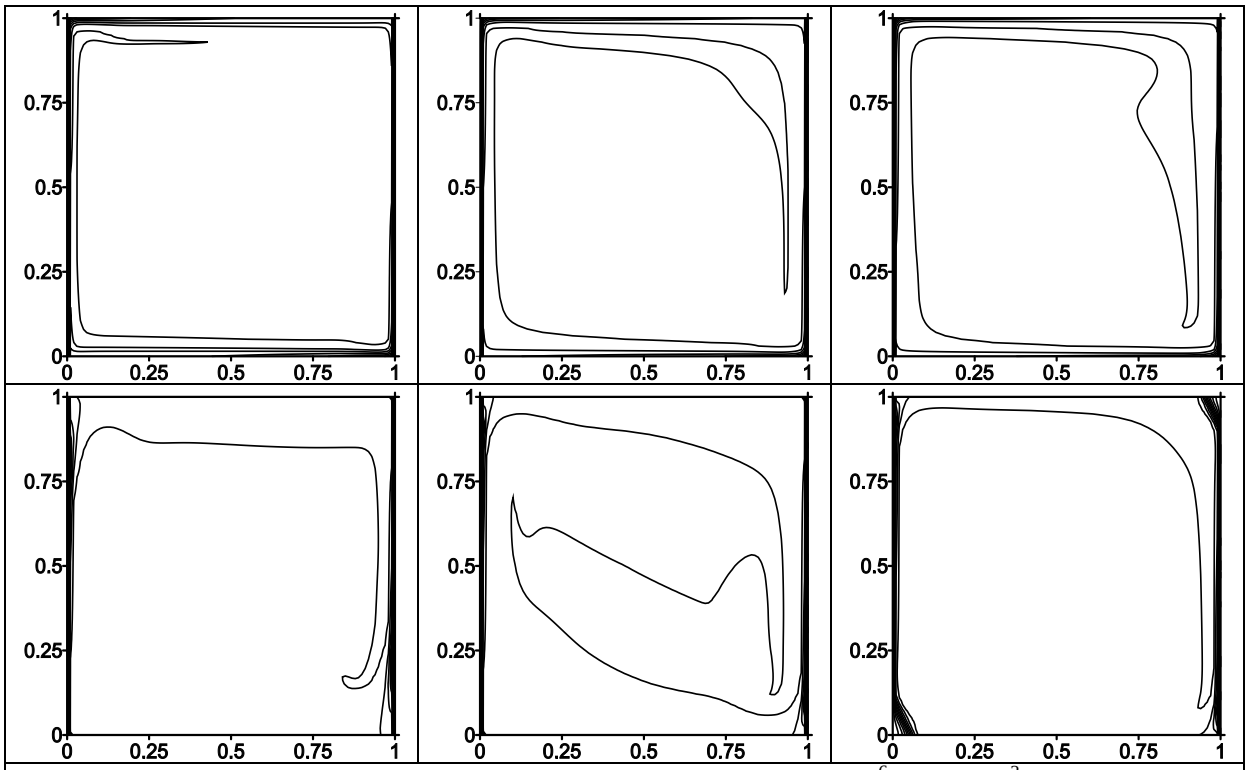


Fig V.11 : représente les isothermes pour N=3,-3, α=[10,30,60], Ra=7.10^6 et Da=10^{-2}

V.3.Lignes de courant, isothermes et isoconcentrations (cas de la cavité inclinée)

Pour le cas où la cavité est inclinée, nous avons analysé l'effet de l'inclinaison de la cavité sur les transferts indépendamment des autres paramètres. Ensuite nous avons étudié les effets, sur les transferts thermique et massique, du nombre de Rayleigh (Ra), du rapport des forces du volume (N) pour différents angles d'inclinaison de la cavité. Les résultats de la simulation numérique sont présentés sous forme de courbes et englobent l'allure des lignes de courant, des isothermes et des isoconcentrations. Les transferts thermique et massique sont traduits par les nombres de Nusselt et Sherwood moyens.

V.4. Nombres de Nusselt et Sherwood moyens (cavité inclinée)

L'évolution des transferts thermique et massique de l'ensemble de la cavité poreuse en fonction des perméabilités K pour différentes valeurs de Ra et α est présentée dans les figures V.4 et V.5. Les effets de Da sur les transferts sont notables. Pour les faibles valeurs de Da inférieures à un Da critique (pratiquement une valeur critique de Da pour chaque Ra), les

transferts sont principalement diffusifs. Ce comportement est dû à la résistance à l'écoulement et aux transferts qu'oppose notamment la couche 1 qui présente une faible perméabilité. L'écoulement convectif est alors de moins en moins prononcé avec la décroissance de Da ce qui induit un régime conductif sur l'ensemble de la cavité. La même allure est observée pour le transfert de masse. Pour des valeurs de Da supérieures à 10^{-6}, les transferts s'intensifient et tendent vers des valeurs limites maximales constantes et indépendantes de Da. Ces valeurs correspondent à un écoulement en couche limite. Pour des valeurs de Da plus élevées, telle que Da = 10^{-2}, on note la non dépendance des structures d'écoulement, des isothermes et des isoconcentrations avec la perméabilité K. En effet, les structures restent les mêmes. Par ailleurs, ce comportement induit des transferts asymptotiques.

La variation de la perméabilité met donc en évidence trois régimes de transferts, un écoulement diffusif pur pour les faibles valeurs de Da, un écoulement qui s'intensifie de plus en plus avec l'accroissement de Da (pour Da modéré) et un régime complètement couche limite indépendant de Da. La transition entre les deux régimes convectifs se fait pour une valeur de raccordement notée Da^c. Cette valeur critique est d'autant plus élevée que Ra est faible. Le transfert de matière est plus élevé que le transfert de chaleur ceci est dû au nombre de Lewis (*Le* = 120.83). La figure V.5 montre que le transfert thermique est affecté par l'angle d'inclinaison sur une certaine plage de Da et de Ra. Pour des valeurs de $Ra \leq 10^4$, le transfert de chaleur reste inaffecté par les différentes inclinaisons prise par la cavité. Cependant pour $Ra \geq 10^6$, le transfert thermique augmente d'une manière significative en inclinant l'ensemble cavité- couches (poreuse et fluide) de 0° à 60°. Cette augmentation est beaucoup plus prononcée pour Ra = $7x10^6$.

Ce comportement résulte du fait que les forces de volume s'accroissent dans les deux directions x et y, quand la cavité est inclinée, contribuant ainsi à une meilleure situation de transfert. L'optimal est atteint pour $\alpha = 10°$. L'effet de l'angle d'inclinaison sur le transfert massique est présenté dans la figure V.5. Ce transfert de masse est traduit en termes de nombre de Sherwood moyen. On notera l'existence en général de trois régimes à savoir un diffusif, un convectif et un du type complètement couche limite. Pour des valeurs élevées de Ra, pratiquement $Ra \geq 7x10^6$, le régime diffusif disparaît. L'effet de l'angle d'inclinaison sur le transfert massique est très notable. En effet, une valeur optimale pour α existe pour laquelle Sh_b est maximal. Cette valeur correspond à $\alpha = 10^\circ$. En contre partie, une valeur

médiocre de α est à noter pour laquelle Sh_b est le plus faible, cette valeur correspond à l'inclinaison $\alpha = 60^\circ$. Néanmoins pour $Ra = 10^4$, les courbes de Sh_b pour $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 30^\circ$ sont presque confondues.

L'influence du rapport des forces de volume N sur les transferts thermique et massique est présentée dans les figures V.1 et V.2. Pour une valeur fixée de N et les valeurs d'angles d'inclinaison explorées, les transferts thermique et massique augmentent avec l'accroissement de Da. Pour un Da fixé et en régime diffusif, on constate une augmentation de Nu_b et de Sh_b avec l'accroissement de N, elle reste cependant modérée. Mais au-delà de ce régime, les transferts s'intensifient. En effet, les forces d'origine solutale et thermique sont coopérantes. L'inclinaison de la cavité par rapport à l'horizontal, influe considérablement sur le taux de transferts pour des valeurs de Da élevées. Nu_b est maximal pour $\alpha = 10°$ quand N =0,1et 3. Cependant pour Sh_b le même comportement est observé pour le transfert massique maximal a lieu pour une inclinaison de $\alpha = 10°$ et est minimal pour $\alpha = 60°$.

V.5.Conclusion

Dans ce chapitre on a discuté les résultats obtenus sur la simulation du modèle se basant sur la méthode des volumes finis afin de traiter les différents types de conditions aux limites. Les résultats obtenus permettent de valider la méthode.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la convection naturelle (simulation numérique de la convection thermosolutale) dans une cavité carrée poreuse contenant une solution aqueuse de nitrates. Les parois verticales de cette cavité sont soumises à des conditions de température et de concentration uniformes alors que les parois horizontales sont adiabatiques et imperméables.

Pour cela on a procédé par une étude de généralités concernant les nitrates et l'aspect eutrophisation ainsi que les milieux poreux, ce qui nous a permis de cerner théoriquement le phénomène à étudier.

Ainsi, un modèle et un code de simulation relatif aux écoulements de convection naturelle avec transfert de masse et thermique a été proposé en se basant sur la méthode des volumes finis afin de traiter les différents types de conditions aux limites analysés dans le chapitre 3.

Le modèle élaboré permet de déterminer les lignes de courant, les vitesses selon l'axe des x et des y, les profils de température et des isoconcentrations ainsi le nombre de Nusselt et sherwood dans tout le domaine étudié.

Lors de cette étude entreprise nous avons étudié l'influence de certains paramètres comme le nombre de Rayleigh Ra, le nombre de Darcy Da, le rapport des forces de volumes N, l'inclinaison α de la cavité sur le nombre de Nusselt et sherwood et les profils des isoconcentrations et de température.

D'après l'ensemble des résultats numériques ont peut conclure que :

Trois régimes de transferts avec la variation de la perméabilité apparaissent: un écoulement diffusif pur pour les faibles valeurs de Da, un écoulement qui s'intensifie de plus en plus avec l'accroissement de Da (pour Da modéré) et un régime complètement couche limite indépendant de Da. Le transfert de matière et de chaleur est considérable en inclinant l'ensemble cavité- couches (poreuse et fluide) pour $Ra = 7x10^6$ et $\alpha = 10°$ quand N =0,1et 3 pour des valeurs de Da élevées. Aussi le transfert de matière est plus élevé que le transfert de chaleur dû au nombre de Lewis (Le = 120.83).

Ce code, basé sur la méthode des volumes finis appliquée à des maillages structurés et décalés, fait la preuve de son efficacité pour résoudre des problèmes de convection naturelle.

Plusieurs extensions de ce travail sont envisageables :

Des études de stabilité des solutions devraient être conduites, notamment lorsque les forces solutales et thermiques sont opposées et en ce qui concerne l'influence de l'allongement sur les transitions vers des états stationnaires dans des cavités remplies d'air.

Les performances du code de calcul pourraient être sensiblement améliorées en reconsidérant les méthodes d'intégration temporelles et les méthodes de résolution des systèmes linéaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographique

[1] Damien Banas et Jean Christophe LATA, les Nitrates, laboratoire d'écologie, systématique et évolution, UMR8075_CNRS/ENG REF/université Paris-sud, 11 sept 2009.

[2] Groupe scientifique sur l'eau, Nitrates/Nitrites, institut national de santé publique du Québec, juin 2003(site internet : www.inspq.qc.ca/eau-potable).

[3] Tableau de bord régional santé – environnement, fiche II les Nitrates, ORS paca, 2004 (site internet : www.ars.paca.santé.fr).

[4] Bouala Nabila, Hadj Hassan Benouada, Benziane Ahmed et Derrich Zoubir, variabilité et répartition des nitrates dans les systèmes aquifères :cas du bassin sebkha d'Oran, laboratoire de matériaux, sol et thermique section géologie appliquée, faculté architecture et de génie civil, université des sciences et de la technologies d'Oran, 15/11/2011 volume :N°3 :111106

[5] Jeanne Bavard, Etude de la mise en place d'un réseau de mesure d'évaluation des processus dystrophiques en rivières du Languedoc Roussillon, Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme d'ingénieur et de Master université de Strasbourg 2010.

[6] Caroline Alabert, Lio Castor, L'eutrophisation de l'étang de l'Or, Travaux personnels encadrés pp 15 -18(site internet : www.laroche-lycee.free.fr)

[7] Sébastien Devidal, solutions curatives pour la restauration de lacs présentant des signes d'eutrophisation, rapport de stage de fin d'étude pour l'obtention d'un diplôme de Master environnement université de Rouen France, Février 2007.

[8] H.P.C.Darcy, "Les Fontaines Publiques De La Ville De Dijon". V. Dalmont, Paris (1956).

[9] A.E.Scheidegger,"The Physics Of Trough Porous Media". University Of Toronto (1960).

[10] I. F.Macdonald, M.S.El Sayed, K.Mow and F.A.L.Dullien, Ind. Eng. Chem. Fundamentals, 6, 393, (1979).

[11] Site internet: www. Heat Transfer. TORONTO. UC.COM

[12] A.E.Scheidrgger, "The physics of flow through porous media", University of Toronto Press, 3rd edition (1974)

[13] F. A. L.Dullien, ″Porous Media: Fluid Transport And Pore Structure″, Academic Press New York (1979).

[14] O.Reynolds, ″Papers On Mechanical And Physical Subjects″ , Cambridge University Press (1900).

[15] A.L. Dullien, “Porous media, fluid transport and pore structure”, Academic Press, 2nd Edition (1992)

[16] A.Tobbal, R.Bennacer et R.Cabrillac, Effet de l’anisotropie des matériaux poreux sur les phénomènes de transfert de chaleur et de masse,Proceedings du 13ème Congrès Français de Mécanique, Vol. II, pp. 457-460, 1997.

[17] H.Beji, Etude Numérique de la convection naturelle en milieu poreux saturé : Modélisation du nombre de Darcy et introduction de la dispersion dynamique, thèse de Doctorat, Université Paris 6, 1989.

[18] C.Beckerman et R.Viskanta, Double-diffusive convection during dendritic solidification of binary mixture, PhysicoChem. Hydrodyn., Vol . 10, pp.195-213, 1988.

[19] G.Neale et W.Nader, Practical significance of Brinkman’s extension of Darcy’s law: coupled parallel flows within a channel and bounding porous medium, The Canadian J. Chem. Eng., Vol. 52, pp. 475-478, 1974

[20] Lu, T. J., H. A. Stone, et al. "Heat transfer in open- cell metal foams." Acta Materialia 46(10): 3619-3635. (1998)

[21] Calmidi, V. V. and R. L. Mahajan "Forced convection in high porosity metal foams." Journal of Heat Transfer 122: 557-565. (2000).

[22] Zhu, H. X., J. R. Hobdel, et al. "Effects Of Cell Irregularity On The Elastic Properties Of Open-Cell Foams." Acta Material 48(10): 4893-4900. (2000).

[23] Banhart, J. "Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foams." Progress in materials Science 46: 559-632. (2001).

[24] Boomsma, K. and D. Poulikakos "On the effective thermal onductivity of three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam." International Journal of Heat and Mass Transfer 44: 827-836. (2001).

[25] Madani, B., F. Topin, et al. "Flow laws in metallic foams: experimental determination of inertial and viscous contribution." Jounal of porous media 10**(**1). (2006).

[26] Topin, F., J.-P. Bonnet, et al. "Experimental analysis of multiphase flow in metallic foam: convective boiling, flow laws and heat transfer." Advanced material Engineering 8(9): 890-899. (2006).

[27] Vicente, J., F. Topin, et al. "Open celled material structural properties measurement: from morphology to transport properties." Material transaction

47(9): 2195-2202. (2006).

[28] Du Plessis, P., A. Montillet, et al. "Pressure Drop Prediction for Flow through High Porosity Metallic Foams." Chem. Eng. Sci. 49: 3545-3553. (1994).

[29] Boomsma, K., D. Poulikakos, et al. "Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure." International Journal of Heat and Fluid Flow 24 825-834. (2003).

[30] Vilar, E. O. and F. Coeuret ."Mass tranfer to flow-through thin electrodes under laminar flow." Electrochimica Acta. 40(5): 585-590. (1995).

[31] Ashby, M. F., A. G. Evans, et al. Metal foams: A design guide Boston, MA,Butterworth – Heinemann. (2000)

[32] JIMIC-4. METFOAM2005, Kyoto, Japan. (2005)

[33] These Bonnet

[34] Riva, R. and J. P. Poirot-Crouveziez ."Des concepts innovants pour les plaques bipolaires." Clefs C.E.A. 50-51: 76-80. (2004).

[35] Ferrouillat, S., P. Tochon, et al. (2006). "Micromixing enhancement by turbulence: Application to multifunctional heat exchangers." Chemical Engineering and Processing 45: 633–640.

[36] Tadrist, L., M. Miscevic, et al. "About the Use of Fibrous Materials in Compact Heat Exchangers." Experimental Thermal and Fluid Science 28: 193 – 199. (2004).

[37] Ghidossi, R., J.-P. Bonnet, et al. Particle separation from hot gases incinerator using metalllic foams. ICSST'07. (2007).

[38] JIMIC-5 .Metfoam 2007, Montreal, Canada. (2007).

[39] Utilisation du matériau mousse métallique par secteur d'activité [33] C. Beghein, F. Haghighat, F. Allard, Numerical study of double-diffusive natural convection in a square cavity, Int. J. Heat Mass Tran. 35 833–846, 1992.

[40] A. D. Nield, Onset of thermohaline convection in a porous medium.Water Resources Res., Vol. 4, pp. 553-560 (1968).

[41] J. W. Taunton, E. N. Lightfoot et T. Green, Thermohaline instability and salt fingers in porous medium.Phys. Fluids, Vol. 15, pp. 748-753 (1972).

[42] B. J. Muray et C. F. Chen, Double – diffusive convection in a porous medium.J. Fluid Mech., Vol. 230, pp. 147-166 (1989).

[43] N. Rudraiah, P. K. Srimani et R. Friedrich, Finite amplitude convection in a two components fluid-porous layer.Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 715-722 (1982).

[44] J. Y. Jang et W. J. Chang, The flow and the vortex instability of horizontal natural convection in porous medium resulting from combined heat and mass buoyancy effects.Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 769-777 (1988).

[45] O. V. Trevisan et A. Bejan, Mass and heat transfer by high Rayleigh number convection in a porous medium heated from below. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp. 2341-2356 (1987).

[46] F. Chen et C. F. Chen, Double – diffusive fingering convection in a porous .Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, pp. 793-807 (1993).

[47] A. Bejan et K. R. Khair, Heat and mass transfer by natural convection in a porous medium.Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp. 909-918 (1985).

[48] F. C. Lai et F. A. Kulacki, Coupled heat and mass transfer by natural convection from vertical surfaces in porous media. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, pp. 1189-1194 (1991).

[49] F. Alavyoon, On natural convection in vertical porous enclosures due to prescribed fluxes of heat and mass at the vertical boundaries. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, pp. 2479-2498 (1993).

[50] F. Alavyoon, Y. Masuda et S. Kimura, On natural convection in vertical porous enclosures due to opposing fluxes of heat and mass at the vertical walls.Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, pp. 195-206 (1994).

[51] M. Mamou, P. Vasseur, et E. Bilgen, Multiple solutions for double – diffusive convection in a vertical porous enclosure. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30(10), pp. 1787-1798 (1995b).

[52] N. Bian, P. Vasseur, E. Bilgen, et F. Meng, Effect of an electromagnetic field on natural convection in an inclined porous layer.Int. J. Heat and Fluid Flow Vol. 17(1), pp. 36-44 (1996).

[53] V. Prassad et A. Tuntomo, Inertia effects on natural convection in a vertical porous cavity.Num. Heat Transfer, Vol. 11, pp. 295-320 (1987).

[54] P. Nithiarasu, K. N. Seetharamu et T. Sundararajan, Double –diffusive natural convection in an enclosure filled with fluid –saturated porous medium: A generalized Non – Darcy Approach.Num. Heat Transfer, Vol. A(30), pp. 413-426 (1996).

[55] D. Angirasa et G. P. Peterson, Combined heat and mass transfer by natural convection with opposing buoyancy effects in a fluid saturated porous medium. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40(12), pp. 2755-2773 (1997).

[56] D. A. Nield, Onset of convection in a fluid layer overlying a layer of a porous medium.J. Fluid Mech. ,Vol.81, pp. 513-522 (1977).

[57] D. A. Nield, The boundary correction for the Rayleigh – Darcy problem: Limitation of the Brinkman equation. J. Fluid Mech. ,Vol.128, pp. 37-46 (1983).

[58] C. W. Somerton et I. Catton, On the thermal instability of superposed porous and fluid layers. J. Heat Transfer. , Vol.104, pp. 160-165 (1982)

[59] F. Chen et C. F. Chen, Onset of finger convection in a horizontal porous layer underlying a fluid layer.J. Heat Transfer, Vol.110, pp. 403-409 (1988).

[60] T. Nishimura, T. Takumi, T. Shiraishi, M. Kawamura et H.Oze, Numerical analysis of natural convection in a rectangular enclosure horizontally divided into fluid and porous regions. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29(6), pp. 889-898 (1986).

[61] K. B. Benhadja, Convection Thermosolutale au sein d'une Cavité Poreuse Saturée par un Fluide non Newtonien binaire, Ecole Polytechnique de Montréal,thèse (2001).

[62] A. A. Merrikh and A. A. Mohamad, Non-Darcy effects in buoyancy driven flows in an enclosure filled with vertically layered porous media. Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol.45, PP. 4305-4313, (2002)

[63] Y. Ould-Amer et al Convection naturelle dans un milieu poreux multicouche. JITH 2007, Albi : France PP .1-4, (2007)

[64] Karimi Fard Mohammad : Instabilités terminologues en milieu poreux dans des cavités rectangulaires .Thèse doctorat Université de Toulouse 3, Toulouse, France,1998

[65] R. Bennacer et al:On the thermal anisotropy affecting transfers in a multilayer porous medium . C. R. Acad. Sc. Mecanique 332, pp. 539-546 (2004).

[66] O.V. Trevisan, A.Bejan, Natural convection with combined heat and mass transfer buoyancy effets in a porous medium, Int..J . Heat mass transfer 28,1597-1611, 1985.

[67] M.C Charrier-Mojtabi, M. Karimi-Fard, A.Mojtabi, Naissance de régimes de convection thermosolutale dans une cellule rectangulaire poreuse, C.R.Acad.Sci. t. 324(1997) 9-17Paris.

[68] D. Gobin, R. Bennacer, Double diffusion in a vertical fluid Layer: onset of the convection regime. Phys .Fluids 6 (1) , 59-67. (1994)

[69] W. Shyy, M.H.Chen, Double diffusive flow in enclosures, Phys.Fluids A 3 (11) 2592-2607 (1991)

[70] R. Younsi, A. Harkati et D. Kalache, Numerical simulation of double diffusive natural convection in porous cavity: Opposing flow.Arabian J. for Sc. and Eng. , Vol. 26(2b), pp. 145-155 (2002).

[71] V. Prassad et A. Tuntomo, Inertia effects on natural convection in a vertical porous cavity.Num. Heat Transfer, Vol. 11, pp. 295-320 (1987).

[72] A. Bejan et D. Poulikakos, The non-Darcian regime for vertical boundary layer natural convection in porous medium.Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27(5), pp. 717-722 (1984).

[73] G. Lauriat et V. Prassad, Non – Darcian effect on natural convection in a vertical porous enclosure. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32(11), pp. 2135-2148 (1989).

[74] P. Vasseur et L. Robillard, The Brinkman model for boundary layer regime in a rectangular cavity with uniform heat flux from the side. Int. J. Heat and Fluid Flow Vol. 30(4), pp. 717-727 (1987).

[75] N. D. Rosenberg et F. J. Spera, Thermohaline convection in a porous medium heated from below.Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 1261-1273 (1992).

[76] R. Younsi, A. Harkati et D. Kalache, Numerical simulation of heat and mass transfer in trapezoidal porous cavity heated from below .7th European days on contemporary thermodynamics, 312-319 (2001).

[77] Z. G. Du et E. Bilgen, Natural convection in vertical cavities with partially filled heat – generating porous media. Num. Heat Transfer, Vol. A(18), pp. 371-386 (1990).

[78] A. J. Chamkha, H. Al-Naser, Double-diffusive convection in an inclined porous enclosure with opposing temperature and concentration gradients, Int. J. Therm. Sci. 40, 227–244, 2001.

[79] D. Akrour, R. Bennacer et M.Betrouni M., Effet d'hystérésis en convection thermosolutal avec des gradients croisés (Etang de stockage). Rev. Energ. Ren., vol. 3 pp. 39-47, 2000.

[80] M.Bourich, M.Hasnaoui, A.Amahmid. Double-diffusive natural convection in a porous enclosure partially heated from below and differentially salted. International Journal of Heat and fluid flow, vol. 25, pp. 1034-1046, 2004.

[81] D.Gobin., B.Goyeau, A.Neculae., convective heat solute transfer in partially porous cavities. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 48, pp. 1898-1908, 2005.

[82] R. Bennacer and A. Tobbal, Coupled heat and mass transfer in vertical anisotropic porous layer, Proceedings of the fourth Int. Congress. On Advanced Computational Methods in Heat Transfer, 493-502, 1996.

[83] A. Tobbal., R. Bennacer and R. Cabrillac., Effet de l'anisotropie des matériaux poreux sur les phénomènes de transferts de chaleur et de masse, Proceedings du 13ème Congrès Français de Mécanique, II, 457-460, 1997.

[84] A. Tobbal. et R Bennacer., Heat and mass transfer in anisotropic porous layer, Res. Trends J., Trends in Heat. Mass & Momentum Transfer, 3, 129-137, 1997a.

[85] A. Tobbal. and R. Bennacer., Effet de l'anisotropie thermique et hydraulique des milieux poreux sur les phénomènes de transferts, Proceedings du 3ème Colloque Franco- Québecois, 227-232, 1997b

[86] R. Bennacer, A.Tobbal et H.Beji, Convection naturelle thermosolutale dans une cavité poreuse anisotrope : formulation de Darcy-Brinkman. Rev. Energ. Ren. vol.5, pp. 1-21, 2002.

[87] R. Bennacer, H.Beji M. A.A Mohamed., Double diffusive in a vertical enclosure inserted with two saturated porous layers confining a fluid layer. International Journal of thermal Sciences, vol. 42, pp.141-151, 2003.

[88] S.Sivasankaran, P. Kandaswamy, O.Ng C. Double-diffusive convection of anomalous density fluids in a porous cavity. Transp. Porous Med., vol. 71, pp. 133-145, 2008.

[89] A.C. Baytas, A.F. Baytas, D.B. Ingham, I. Pop, Double diffusive natural convection in an enclosure filledwith a step type porous layer: Non-Darcy flowInt. J. Therm. Sci. 48,665–673,2009.

[90] K. Al-Farhany, A. Turan, Non-Darcy effects on conjugate double-diffusive natural convection in a variable porous layer sandwiched by finite thickness walls.Int. J. of HeatandMassTransfer, Vol.54, pp., 2868-2879, 2011.

[91] K. Al-Farhany, A. Turan, Numerical study of double diffusive natural convective heat and mass transfer in an inclined rectangular cavity filled with porous medium,Int.Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 39, pp. 174-181, 2012.

[92] Y.Ould-Amer, R. Bennacer, Free Convection Across A Bilayered And Inclined Porous Cavity Submitted To Nonsymmetrical Heating, J. Porous Media, Vol 15 pp., 5-97,2012.

[93] A.Bejan, Convection heat transfer, John Wiley and Sons 1984.

[94] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Mc-Graw-Hill, New York, 1980.

[95] J. P. Roache, Résolution numérique des équations aux derives partielles.

[96] A. Gourdin et M. Boumhart, Méthodes numériques appliqués.

[97] D. Euvrard, Analyse numérique en mécanique des fluides.

[98] N.Hadidi, Y.Ould-Amer **,** Contribution à l'étude de la convection double diffusive dans une cavité poreuse bicouche, The first International Congress on Materials and Environment 5-7 octobre 2010 Sidi fradj Algérie.

[99] N.Hadidi, Y.Ould-Amer, Convection naturelle de chaleur et de masse bidimensionnelle dans une cavité poreuse bicouche, JITH 24-26 septembre 2011Telemcen Algérie.

[100] N.Hadidi, Y.Ould-Amer, Convection thermosolutale bidimensionnelle dans une cavité poreuse renfermant deux couches poreuses disposées verticalement Revue de Mécanique Appliquée et ThéoriqueVol. 2, 4. 385-396 2011

[101] N.Hadidi, Y.Ould-Amer,Etude de la convection thermosolutale dans une cavité poreuse inclinée remplie de deux couches poreuses verticales **,**EMP ,JCh4 29-30 Mars 2011Bordj el bahri Algérie.

[102] B. Goyeau, J. P. Songbe and D. Gobin, Numerical study of double-diffusive natural convection in a porous cavity using the Darcy-Brinkman formulation, Int. J. Heat MassTransfer, 39, 1363-1378, 1996.

[103] G. Lauriat et V. Prasad , Natural convection in a vertical porous cavity : a numerical study for Brinkman-extended Darcy formulation, J. Heat Transfer , 109, 688-696, 1987

[104] France Nature Environnement, Nitrates, croix rouge française, 2001. Site internet : www.fne.asso.fr

[105] Institution Interdépartementale du Bassin de l'Huisne, IDEA Recherche & ASCONIT Consultants, Rapport final, Septembre 2004(site internet : www.sagehuisne.org)

[106] Anne Christine Le Gall, Effets des dépôts atmosphériques de soufre et d'azote sur les sols et les eaux douces en France, Unité de modélisation et analyse économique pour la gestion des risques Direction des risques chroniques INERIS France, **INERIS** DRC – 04-45928-ALe-049-v4.doc , 22 novembre 2004.

[107] Loubna ABDESSALAMI, Modélisation rétrospective de l'eutrophisation côtière en réponse aux changements des activités humaines sur le bassin versant de la Seine et de l'Escaut au cours des 50 dernières années, Travail de fin d'étude En vue de l'obtention du grade académique de Diplômée d'études Spécialisées en Gestion de l'Environnement , Année Académique : 2003-2004.