



# MÉMOIRE

En vue de l'obtention du

---

Présenté et Soutenu par :  
***MAHFERTINE Zineddine***

Intitulé  
***Étude paramétrique d'un écoulement  
souterrain complètement développé***

---

Diplôme de Master

***Spécialité : Hydrogéologie***

*Soutenu le : 24 / 06 / 2019*

*Devant le jury composé de :*

|                 |     |           |
|-----------------|-----|-----------|
| ZEROUAL Ibrahim | MCA | Président |
| TALHI Abdelkrim | MCB | Examineur |
| HAMI Khelifa    | MCA | Encadreur |

## *Remerciement*

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du département des Sciences de la Terre et de l'Univers du centre universitaire *Ali KAFI, Tindouf* sous la direction du *Dr. HAMI Khalifa*, maître de conférences et directeur d'Institut des Sciences et de la Technologie chez le CUTindouf.

J'exprime une très grande gratitude au *Dr. HAMI Khalifa* le directeur de ce mémoire d'avoir bien voulu m'encadrer, un réel plaisir de travailler avec lui, ses conseils pendant toute la durée de ce mémoire étaient toujours judicieux.

Mes remerciements vont également au président du jury Monsieur *Dr. ZEROUAL Ibrahim* et le *Dr. TALHI Abdelkrim*, des maîtres de conférences chez CUTindouf, pour avoir du temps d'acceptent l'évaluation mon travail et de participent à mon jury de soutenance.

J'exprime ma profonde reconnaissance mes enseignants du département de géologie. Et d'une façon spéciale à Monsieur *Dr. ZEROUAL Ibrahim*, chef de département des Sciences de la Terre et de l'Univers chez CU Tindouf.

Je tiens à remercier vivement Monsieur *BOUSSAID Abdelfattah* maitre de conférences à l'université des frères Mentouri Constantine pour sa disponibilité, ses conseils et nos discussions qui ont été assez fructueuses ainsi que pour m'avoir fait bénéficier de ses connaissances.

Ensuite, je voudrais remercier vivement Mes chers parents qui m'ont encouragé et soutenu dans la poursuite de mes études pendant ces longues années, mes frères et sœurs, et toute ma famille.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

## *Dédicace*

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

J'ai quelque chose de gravé dans la tête, Dans la mémoire, Dans le cœur. Quelque chose de pur, de magnifique, C'est mon secret. Ce secret, c'est notre amitié Qui durera pour l'éternité, Même si tu n'es plus de ce monde, à la mémoire de ***Lensari Mouhamed***

Je dédie aussi ce travail à : Mes frères, mes sœurs et leur famille, Tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'estiment.

## **Résumé**

Dans le présent travail, une étude paramétrique est proposée pour déterminer le comportement dynamique d'un écoulement souterrain complètement développé dans une nappe captive alimentée par un débit constant et par différentes valeurs de porosité. Pour traiter la problématique proposée, on utilise un code du champ dynamique CFD (*Fluent*), qui est basé sur la résolution des équations de bases (conservation de la masse et conservation de quantité de mouvement) couplées par l'équation de Darcy.

### **Mots-clés :**

Écoulement souterrain, Nappe captive, Equations de conservation, Equation de Darcy, Fluent

## **Abstract**

In the present work, a parametric study is proposed to determine the dynamic behavior of a completely developed underground flow in captive aquifer fed by a constant flow and by different values of porosity. To deal with the proposed problem, we use a CFD dynamic field code (*Fluent*), which is based on the resolution of the basic equations (mass conservation and motion quantity conservation) coupled by the Darcy equation.

### **Keywords:**

Underground flow, Captive tablecloth, Conservation equations, Darcy's equation, Fluent.

## ملخص

قمنا في هذا العمل العمل ، بإقتراح دراسة عددية لتحديد السلوك الديناميكي لتدفق المياه الجوفية (المياه الأسيرة) تم تطويره بالكامل يغذيها منبع ثابت وقيم مسامية مختلفة. للتعامل مع المشكلة المقترحة ، نستخدم كود حقل ديناميكي CFD (Fluent) ، والذي يستند إلى حل المعادلات الأساسية (لإنحفاظ الكتلة وإنحفاظ كمية الحركة) إلى جانب معادلة دارسي.

## كلمات مفتاحية

تدفق تحت الأرض ، المياه الجوفية الأسيرة ، معادلات الإنحفاظ (الكتلة و كمية الحركة) ، معادلة دارسي ، Fluent

## Sommaire

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| Résumé .....                | III  |
| Sommaire .....              | VI   |
| Liste des tableaux .....    | X    |
| Liste des figures .....     | XI   |
| Liste des Symboles .....    | XIII |
| Introduction générale ..... | 1    |

### Chapitre 1 : Généralité et théorie sur l'hydrodynamique souterraine

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Introduction .....                                  | 2  |
| 1. 2. Aquifère réservoir d'eau souterraine.....          | 2  |
| 1.3. Cycle hydrologique .....                            | 2  |
| 1.4. Classification des aquifères.....                   | 3  |
| 1.4.1. Classification selon la structure du milieu.....  | 4  |
| 1.4.1.1. Les aquifères poreux .....                      | 4  |
| 1.4.1.2. Les aquifères fissurés .....                    | 4  |
| 1.4.1.3. Les aquifères karstiques .....                  | 4  |
| 1.4.2. Classification selon la typologie des nappes..... | 4  |
| 1.4.2.1. Aquifère à nappe libre.....                     | 4  |
| 1.4.2.2. Aquifère à nappe captive.....                   | 5  |
| 1.4.2.3. Aquifère à nappe semi-captive.....              | 5  |
| 1.5. Généralités sur les milieux poreux .....            | 6  |
| 1.5.1. Définition d'un milieu poreux.....                | 6  |
| 1.5.2. Les Pores.....                                    | 6  |
| 1.5.3. L'eau et le sol .....                             | 7  |
| 1.5.4. Les différents types de liaisons eau/sol.....     | 7  |
| 1.5.4.1. Types d'eau dans le milieu souterrain .....     | 7  |
| 1.6. Caractéristiques du milieu poreux.....              | 8  |
| 1.6. 1. La granulométrie.....                            | 9  |
| 1.6.2. Infiltration.....                                 | 9  |
| 1.6.3. Porosité.....                                     | 9  |
| 1.6. 4. Indice des vides.....                            | 11 |

|   |    |
|---|----|
| 1.6. 5. Teneur en eau.....  | 11 |
| 1.6. 6. Coefficient d’emménagement .....  | 11 |
| 1.6.7. Coefficient de saturation $S_r$ .....  | 12 |
| 1.6. 8. La masse volumique des grains .....   | 12 |
| 1.6.9. La masse volumique sèche .....   | 12 |
| 1.6. 10. La conductivité hydraulique ou perméabilité .....  | 12 |
| 1.6. 11. La transmissivité.....   | 14 |
| 1.7. Étude d’Homogénéité et Isotropie.....  | 14 |
| 1.7.1. Homogénéité et Isotropie.....  | 14 |
| 1.7.2. Homogénéité et hétérogénéité.....  | 14 |
| 1.7.3. Isotropie et anisotropie.....  | 15 |
| 1.8. Types d’aquifères homogènes et isotropes.....  | 15 |
| 1.8.1. Aquifère homogène et isotrope.....   | 15 |
| 1.8.2. Aquifère homogène et anisotrope.....   | 15 |
| 1.8.3. Aquifère hétérogène et isotrope.....   | 15 |
| 1.8.4. Aquifère hétérogène et anisotrope.....   | 16 |
| 1.9. Loi fondamentale de l’écoulement (loi de Darcy) .....  | 16 |
| 1.9.1. L’expérience de Darcy .....  | 16 |
| 1.9.2. Condition de validité de la loi de darcy .....   | 17 |
| 1.10. La relation entre Le coefficient de perméabilité $K$ et La perméabilité intrinsèque $k$ ..... | 17 |
| 1.11. Conclusion.....   | 19 |

## **Chapitre 2: Modélisation de l’écoulement souterrain en vue d’application à la CFD**

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Introduction .....                             | 20 |
| 2.2. Objectif de la modélisation .....              | 20 |
| 2.3. Les modèles d’écoulement souterrain .....      | 21 |
| 2.4. Processus d’analyse.....                       | 22 |
| 2.4.1. Méthodes de résolution de ces équations..... | 22 |
| 2. 4.1.1. Méthodes analytique .....                 | 23 |
| 2.4.1.2. Méthodes graphiques .....                  | 24 |
| 2.4.1.3. Méthodes analogique.....                   | 24 |
| 2.4.1.4. Méthodes numériques.....                   | 24 |

---

|  |    |
|--|----|
| 2.4.2. Méthodes de discrétisation .....                              | 25 |
| 2.4.2.1. Méthode des éléments finis .....                            | 25 |
| 2.4.2.2. Méthode des différences finis .....                         | 25 |
| 2.2.2.3. Méthode des volumes finis .....                             | 25 |
| 2.5. Équations d'écoulement des eaux souterraines .....              | 26 |
| 2.6. Mécanique des Fluides Numérique CFD .....                       | 28 |
| 2.7. Dynamique des fluides et équations de conservation en jeu ..... | 29 |
| 2.7.1. Dynamique des fluides.....                                    | 29 |
| 2.7.2. Perspectives actuelles.....                                   | 29 |
| 2.7.3. Étude des phénomènes.....                                     | 30 |
| 2.7.4. Applications de la dynamique des fluides .....                | 30 |
| 2.7.5. L'hypothèse de la continuité.....                             | 30 |
| 2.7.6. Équations de la dynamique des fluides.....                    | 31 |
| 2.7.7. Choix d'une description du fluide.....                        | 31 |
| 2.7.8. Fluide compressible et incompressible .....                   | 32 |
| 2.7.9. La viscosité.....   | 32 |
| 2.7.10. Écoulement constant et non constant.....                     | 32 |
| 2.7.11. Écoulement laminaire et turbulence.....                      | 33 |
| 2.7.12. Autres approximations .....                                  | 33 |
| 2.8. Implémentation sous <i>Fluent</i> .....                         | 33 |
| 2.8.1. Présentation de <i>Fluent</i> .....                           | 33 |
| 2.8.2. Procédure sous <i>Fluent</i> .....                            | 34 |
| 2.9. Forme générale des équations de conservation .....              | 36 |
| 2.10. La résolution numérique.....                                   | 36 |
| 2.10.1. Le schéma de discrétisation .....                            | 36 |
| 2.10.1.1. Avantages de la méthode de volume fini.....                | 37 |
| 2.10.1.2. Points clés de la méthode.....                             | 37 |
| 2.11. Conclusion.....  | 37 |

**Chapitre 3 : Etude de cas par le CFD**

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1. Introduction .....   | 38        |
| 3.2. Création de la géométrie du modèle étudié sous <i>GAMBIT</i> ..... | 38        |
| 3.2.1. Création des coordonnées des points de la géométrie .....        | 38        |
| 3.2.2. Création de la surface de la géométrie étudiée .....             | 39        |
| 3.2.3. Définition des conditions aux limites.....                       | 39        |
| 3.3. Implantation du modèle étudié sous Fluent.....                     | 40        |
| 3.3.1. Influence de taille de maillage sur le nombre des éléments ..... | 40        |
| 3.3.2. Etude de convergence de la solution.....                         | 41        |
| 3.3.3. Sensibilité de maillage .....                                    | 42        |
| 3.3.4. Test de validation de l'écoulement de Darcy.....                 | 44        |
| 3.3.5. Choix du maillage du cas étudié.....                             | 44        |
| 3.3.6. Étude de la vitesse résultante.....                              | 45        |
| 3.3.7. Etude de la vitesse verticale( $V_y$ ).....                      | 46        |
| 3.3.8. Etude de la vitesse horizontale( $V_x$ ).....                    | 47        |
| 3.3.9. Champ des lignes de courant.....                                 | 48        |
| 3.3.10. Champ de vitesse résultante .....                               | 48        |
| 3.4. Conclusion.....  | 49        |
| <b>Conclusion générale.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b>                                | <b>51</b> |
| <b>Annexe .....</b>   | <b>54</b> |

## Liste des tableaux

### Chapitre 1

|  |   |
|--|---|
| <b>Tableau 1.1.</b> Répartition de l'eau dans le milieu souterrain ..... | 8 |
|--|---|

### Chapitre 3

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 3.1.</b> Les coordonnées des points nécessaires pour créer la surface de la géométrie étudiée..... | 38 |
| <b>Tableau 3.2.</b> Définition des conditions aux limites. ....   | 40 |
| <b>Tableau 3.3.</b> La relation entre la dimension de maillage et le nombre des éléments.....                 | 41 |
| <b>Tableau 3.4.</b> Teste de maillage .....   | 44 |
| <b>Tableau 3.5.</b> Choix des lignes de référence.....  | 45 |

## Liste des figures

### Chapitre 1

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1.1.</b> Le cycle de l'eau.....   | 3  |
| <b>Figure 1.2.</b> Les trois Types d'aquifères .....  | 4  |
| <b>Figure 1.3.</b> Nappe libre .....  | 5  |
| <b>Figure 1.4.</b> Nappe captive.....   | 5  |
| <b>Figure 1.5.</b> Nappe semi-captive.....  | 5  |
| <b>Figure 1.6.</b> Représentation d'un milieu poreux.....   | 6  |
| <b>Figure 1.7.</b> Les trois éléments constitutifs du sol.....  | 7  |
| <b>Figure 1.8.</b> Types d'eau dans le milieu souterrain.....   | 7  |
| <b>Figure 1.9.</b> La viscosité dynamique $\mu$ et le coefficient de perméabilité $K$ en fonction de la température.....  | 13 |
| <b>Figure 1.10.</b> Caractéristique physiques d'un milieu poreux.....   | 15 |
| <b>Figure 1.11.</b> Expérience de Darcy .....   | 16 |
| <b>Figure 1.12.</b> Signification du coefficient de perméabilité, $K$ et de la perméabilité intrinsèque $k$ , dans un volume représentatif élémentaire (VRE)..... | 18 |

### Chapitre 2

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 2.1.</b> Processus d'analyse utilisant un modèle numérique.....                             | 23 |
| <b>Figure 2.2.</b> Organigramme des méthodes de résolution.....                                       | 24 |
| <b>Figure 2.3 :</b> Schéma unidimensionnel illustrant un volume élémentaire entourant un nœud .....   | 25 |
| <b>Figure 2.4.</b> Schéma (2D) illustrant un volume de control.....                                   | 26 |
| <b>Figure 2.5.</b> Schéma (3D) illustrant un volume de control.....                                   | 26 |
| <b>Figure 2.6.</b> Volume élémentaire représentatif pour l'écoulement à travers un milieu poreux..... | 27 |
| <b>Figure 2.7.</b> Élément d'un fluide.....   | 34 |

### Chapitre 3

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 3.1.</b> La géométrie du modèle choisi.....   | 39 |
| <b>Figure 3.2.</b> Présentation des conditions aux limites.....                                 | 39 |
| <b>Figure 3.3.</b> Variation des nombres des éléments en fonction de la taille de maillage..... | 41 |
| <b>Figure 3.4.</b> Positionnement du point de référence.....                                    | 42 |
| <b>Figure 3.5.</b> Évolution de la vitesse en fonction de nombre des itérations.....            | 42 |

**Figure 3.6.** L'évolution de la vitesse en fonction de la largeur de la nappe pour différentes taille de maillage...43

**Figure 3.7.** Erreur relatif de la vitesse pour des différents maillages.....43

**Figure 3.8.** Illustration du maillage choisi.....44

**Figure 3.9.** Position des lignes de référence.....45

**Figure 3.10.** Variation de la vitesse résultante en fonction de la largeur de la nappe pour différentes lignes de référence.....46

**Figure 3.11.** Variation de la vitesse verticale  $V_y$  en fonction de la largeur de la nappe pour différentes porosité.....47

**Figure 3.12.** Choix de la ligne de référence horizontale.....47

**Figure 3.13.** Comportement de la vitesse horizontale  $V_x$  en fonction de la longueur de la nappe.....48

**Figure 3.14.** Représentation des les lignes de courant.....48

**Figure 3.15.** Représentation le champ de la vitesse résultante .....49

Liste des Symboles

| symbole         | Définition                         | Unité   |
|-----------------|------------------------------------|---------|
| $A$             | La section d'écoulement            | $m^2$   |
| $A_i$           | Surface unitaire                   | $m^2$   |
| $b$             | Épaisseur de l'aquifère            | $m$     |
| $Bi$            | Force de flottabilité              | -       |
| $C_C$           | Coefficient de courbure            | -       |
| $C_r$           | Porosité effective                 | %       |
| $C_U$           | Coefficient d'uniformité           | -       |
| $D$             | Diamètre des grains                | $mm$    |
| $d_{10}$        | Diamètre correspondant à 10%       | $mm$    |
| $d_{30}$        | Diamètre correspondant à 30%       | $mm$    |
| $d_{60}$        | Diamètre correspondant à 60%       | $mm$    |
| $dh$            | La différence de charge            | $m$     |
| $e$ :           | Indice des vides                   | %       |
| $Fi$            | Force de volume                    | -       |
| $g$             | L'accélération de la pesanteur     | $m/s^2$ |
| $H$             | La hauteur piézométrique           | $m$     |
| $i$             | Le gradient hydraulique            | -       |
| $K$             | Coefficient de perméabilité        | $m/s$   |
| $K_h$           | Conductivité horizontale           | $m/s$   |
| $K_V$           | Conductivité verticale             | $m/s$   |
| $k$             | Perméabilité intrinsèque           | $m^2$   |
| $K_x, K_y, K_z$ | La perméabilité des axes x, y et z | $m/s$   |
| $l$             | La longueur de l'échantillon       | $m$     |
| $M_s$           | La masse des grains solides        | $Kg$    |
| $N$             | Facteur de forme                   | -       |
| $n$             | La porosité                        | %       |
| $n_e$           | Porosité efficace                  | %       |
| $Q$             | Le débit                           | $m^3/s$ |
| $Re$            | Nombre de Reynolds                 | -       |
| $S_\Phi$        | Terme source                       | -       |
| $S_r$           | Coefficient de saturation          | $m^2/s$ |
| $T$             | La transmissivité                  | $m^2/s$ |
| $U$             | Hauteur à la pression              | $m$     |
| $V$             | La vitesse                         | $m/s$   |
| $V_e$           | Volume de l'eau gravitaire         | $m^3$   |
| $V_r$           | Volume d'eau de rétention          | $m^3$   |
| $V_s$           | Le volume des grains solide        | $m^3$   |

| symbole       | Définition                            | Unité    |
|---------------|---------------------------------------|----------|
| $V_T$         | Le volume total du matériau           | $m^3$    |
| $V_t$         | Volume totale apparent                | $m^3$    |
| $V_V$         | Le volume des vides                   | $m^3$    |
| $V_w$         | Le volume de l'eau dans le sol        | $m^3$    |
| x, y, z       | Les trois directions                  | -        |
| z             | L'hauteur                             | m        |
| $\rho_s$      | La masse volumique des grains solides | $Kg/m^3$ |
| $\rho_d$      | La masse volumique sèche              | $Kg/m^3$ |
| $\rho$        | La masse volumique du fluide          | $Kg/m^3$ |
| $\rho_{eau}$  | La masse volumique de l'eau           | $Kg/m^3$ |
| $\gamma$      | Poids volumique                       | $KN/m^3$ |
| $\gamma_w$    | Le poids volumique d'eau              | $KN/m^3$ |
| $\mu$         | La viscosité dynamique de fluide      | $Kg/m.s$ |
| $\mu_{eau}$   | Viscosité dynamique d'eau             | $kg/m.s$ |
| $\nu_{eau}$   | Viscosité cinématique d'eau           | $m^2/s$  |
| $\varphi$     | La charge hydraulique                 | m        |
| $\theta$      | Teneur en eau                         | -        |
| $\Delta h$    | La charge hydraulique unitaire        | m        |
| $\Gamma$      | Coefficient de la diffusivité         | -        |
| $\Gamma_\phi$ | Coefficient effectif de diffusion     | -        |
| $\phi$        | La variable                           | -        |
| $\delta_{ij}$ | Fonction de Darcy                     | -        |
| $\tau_{ji}$   | La loi de comportement                | -        |

---

*Introduction  
générale*

---

## **Introduction générale**

L'hydrodynamique souterraine a fait l'objet de nombreuses études de la littérature rapprochant plusieurs domaines de la science de la Terre et de l'Univers telle que : la géologie, hydrogéologie, hydrologie et hydrochimie. Leurs problématiques sont classées selon le sens et la direction de l'écoulement du cours d'eau.

Pour mieux caractériser le comportement de l'écoulement dans une aquifère homogène et isotrope dans des différentes échelles temporelles et spatiales, on a recours à l'hydrodynamique qui propose des solutions pour décrire et modéliser l'écoulement souterrain à travers le milieu aquifère et la simulation de comportement du système en appuyant sur les outils informatiques pour modéliser, simplifier, interpréter et faire des approches à la réalité, mais la modélisation nécessite toujours à faire la validation entre la réalité, la théorique et l'expérimental, sans oublier d'ajuster les conditions initiales et aux limites.

Ils existent plusieurs logiciels qui sont employés dans la modélisation telle que Fluent, le code numérique adoptée pour la modélisation du présent mémoire. Ce logiciel est basé sur la discrétisation par la méthode des volumes finis.

Notre cas d'étude consiste à exposer un cas simple où nous avons un écoulement souterrain complètement développé dans une nappe poreuse alimentée par une source d'eau.

Le présent travail est organisé par une introduction générale, trois chapitres et une conclusion générale plus des futures perspectives.

Une généralité sur les écoulements souterraine a été présentée dans le premier chapitre, l'objectif de celle-ci est de comprendre les phénomènes mis en jeu pour les types d'écoulements des eaux dans les aquifères et le comportement dynamique (vitesse et pression) à travers un compromis entre la modélisation mathématique et l'hydrogéologie.

La méthode utilisée dans ce travail de mémoire fait l'objet du deuxième chapitre, Le CFD (« Computational Fluid Dynamics ») est une branche de la mécanique des fluides qui utilise des méthodes numériques et des algorithmes pour analyser et résoudre des problèmes qui impliquent des fluides en mouvement. Bref, les équations différentielles qui gouvernent le transport de la masse, de la quantité de mouvement, des variables turbulentes et de l'énergie sont résolues numériquement.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulations obtenues plus l'interprétation de ces résultats qui touche l'aspect hydrogéologique du phénomène étudié.

*Chapitre 1 :*

*Généralité et théorie sur  
l'hydrodynamique souterraine*

## **1.1. Introduction**

La principale motivation pour l'étude des eaux souterraines a traditionnellement été son importance en tant que ressource. Les eaux souterraines sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol.

Le mouvement de l'eau dans le sous sol est une étape d'un grand circuit sur la terre (le cycle global de l'eau). Les paramètres qui conditionnent les écoulements dans les sols saturés sont : la gravité et les forces de frottement au niveau des grains.

Ce premier chapitre a pour objectif d'introduire d'une manière large des connaissances sur les écoulements souterrains.

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'écoulement souterrain. Dans le but d'aboutir à l'étude de l'écoulement à travers un milieu poreux, il convient tout d'abord de présenter les différents paramètres caractérisant ces milieux.

## **1. 2. Aquifère réservoir d'eau souterraine**

L'aquifère est un complexe de deux constituants en interaction : le réservoir et l'eau souterraine. La première fonction du réservoir est l'emménagement souterrain réglant le stockage et la libération de l'eau gravitaire. Le réservoir est identifié par les caractéristiques et la genèse de ses vides. Pores et fissures .elles permettent de distinguer le milieu poreux et le milieu fissuré.

La granulométrie, est la technique d'étude de roches meubles, accède à la morphologie des vides par deux paramétrées des grains : le diamètre efficace et le coefficient d'uniformité. Le complexe réservoir /eau souterraine ou aquifère, est caractérisé, en laboratoire par la porosité efficace et sur le terrain par le coefficient d'emménagement.

Pour former un aquifère la présence de deux constituants, ou phases, est nécessaire : la formation hydrogéologique perméable ou réservoir et l'eau souterraine. Le terme, eau souterraine, désigne toute l'eau contenue ou circulant dans le réservoir. La fraction mobile est la nappe d'eau souterraine .A signaler éventuellement des gaz avec essentiellement de l'air.

La première fonction du réservoir est capacitive. Elle caractérise le stockage ou la libération de l'eau souterraine. Ces deux actions sont groupées sous le terme d'emménagement souterrain de l'eau. La libération de l'eau du réservoir est provoquée par l'action de la force [1].

## **1.3. Cycle hydrologique**

Le cycle hydrologique est la circulation constante (sur terre, sous terre et dans l'atmosphère) de l'eau, depuis l'océan jusque sur terre en passant par l'atmosphère et à nouveau vers l'océan. Voir figure 1.1.

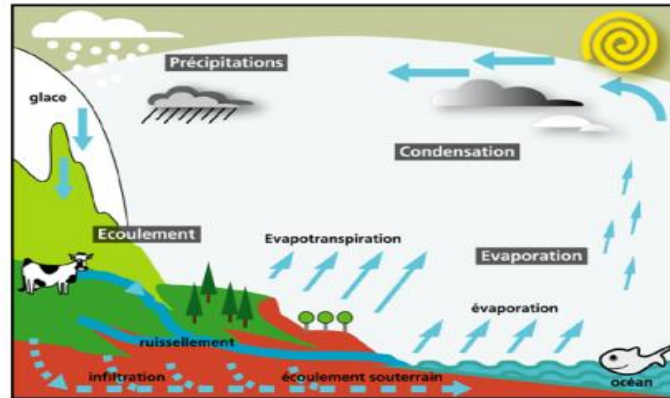


Figure 1.1. Le cycle de l'eau [2].

Le cycle de l'eau s'organise comme suit:

- ☞ Évaporation des mers, des rivières et des lacs et transpiration biologique des plantes (globalement appelés évapotranspiration);
- ☞ Formation de nuages stockant l'eau sous forme gazeuse et transport par le vent (mouvements des masses d'air) ;
- ☞ Précipitation au dessus des terres (pluie ou neige) ;
- ☞ Une partie des pluies ou de la fonte des glaces s'infiltrate dans la terre et séjourne dans les nappes phréatiques (infiltration et/ou percolation) ;
- ☞ Le trop plein de la nappe ressort sous forme de source ;
- ☞ Le reste des pluies ruisselle (ruissellement de surface ou écoulement hypodermique, dans la couche proche de la surface) pour rejoindre les rivières par les berges ;
- ☞ Une partie de l'eau des rivières est stockée dans des lacs. Il y a éventuellement réalimentation des nappes ;
- ☞ Le surplus retourne à la mer.

#### 1.4. Classification des aquifères

Un aquifère est une formation géologique ou une roche, suffisamment poreuse et/ou fissurée (pour stocker de grandes quantités d'eau) tout en étant suffisamment perméable pour que l'eau puisse y circuler librement. Pour se représenter un aquifère, il faut imaginer un vaste réservoir naturel de stockage d'eau souterraine [3].

Un aquifère est un milieu solide contenant de l'eau pouvant circuler de façon naturelle ou être mobilisée de façon artificielle (pompage). Les aquifères peuvent être classées comme confinés ou non confinés, selon l'absence ou la présence d'une nappe phréatique [4], et la structure du milieu.

### 1.4.1. Classification selon la structure du milieu

Les aquifères sont constituées de matériaux granuleux non consolidé (milieu poreux) ou bien par des roches compactées (consolidé) fissurées.

#### 1.4.1.1. Les aquifères poreux

L'eau est contenue dans les pores ouverts de la roche et peut y circuler librement (Sables, graviers, grès, etc.). La perméabilité est matricielle. Les argiles sont des roches qui peuvent contenir une grande quantité d'eau du fait de leur porosité élevée mais qui ne la laissent pas circuler librement (faible perméabilité voire imperméabilité) [3].

#### 1.4.1.2. Les aquifères fissurés

L'eau est contenue et circule dans les failles, fissures ou diaclases de la roche (calcaires, granites, coulées volcaniques, etc.). La perméabilité est fissurale [3].

#### 1.4.1.3. Les aquifères karstiques

Sont des systèmes complexes particuliers associant une zone superficielle plus ou moins fissurée et insaturée (en eau) servant de zone d'infiltration, et une zone inférieure fissurée puisque il contient des roches solubles dans l'eau comme le calcaire et le roche carbonatées... etc. Cette propriété donne naissance à de nombreux phénomènes, appelés *karstiques* [5]. présentant également des conduits, grottes etc. Cette zone est saturée en dessous d'un certain niveau et l'eau circule avec de grandes vitesses comparativement aux systèmes poreux [3]. Voir figure 1.2.

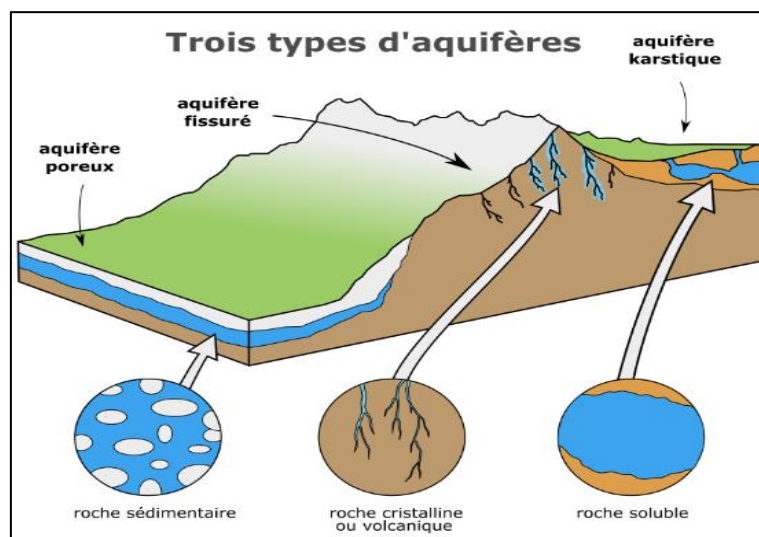


Figure 1.2. Les trois Types d'aquifères [6].

### 1.4.2. Classification selon la typologie des nappes

#### 1.4.2.1. Aquifère à nappe libre

Aussi appelée aquifère non confiné, dans lequel sa surface phréatique sert de limite supérieure. En fait au-dessus de la surface phréatique, nous avons une frange capillaire qui est souvent négligée dans les études d'eaux souterraines. Voir figure 1.3.

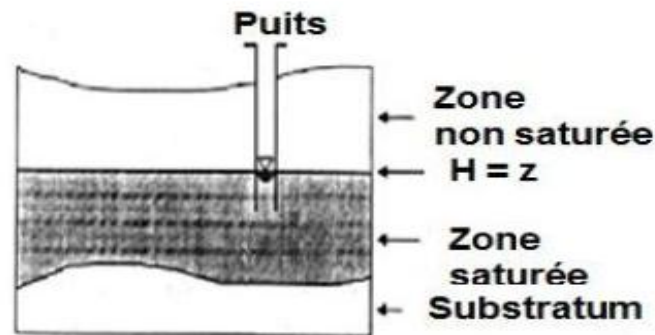


Figure 1.3. Nappe libre [1].

### 1.4.2.2. Aquifère à nappe captive

Un aquifère à nappe captive, également connu sous le nom d'aquifère sous pression, est borné d'en haut et d'en bas par des formations imperméables. Le substratum à la base et le toit au sommet. Voir figure 1.4.

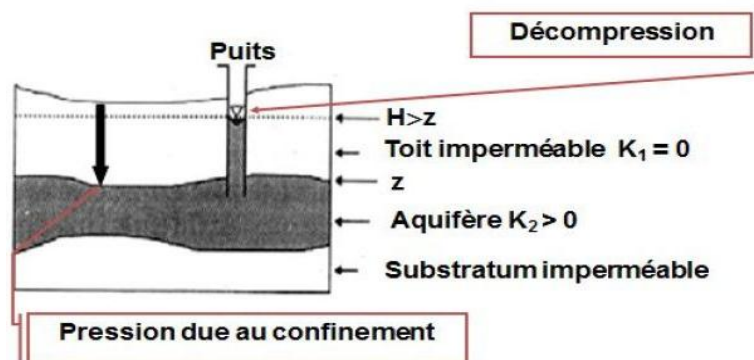


Figure 1.4. Nappe captive [1].

### 1.4.2.3. Aquifère à nappe semi-captive

Dans ce type d'aquifère, le toit et/ou le substratum sont constitués par une formation hydrogéologique semi-perméable. Celle ci permet, dans des conditions hydrodynamiques favorables des échanges d'eau ou de pression avec l'aquifère superposé. Voir figure 1.5.

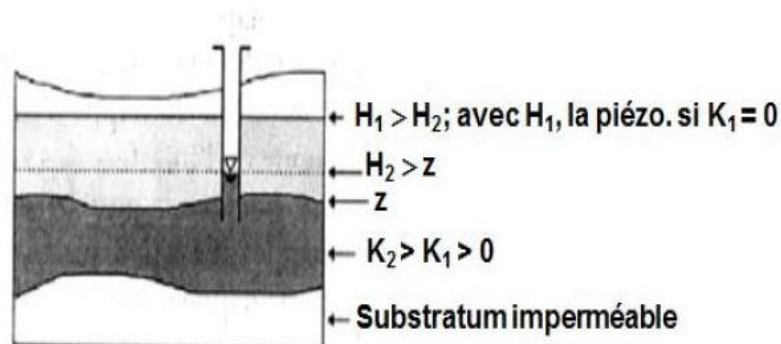


Figure 1.5. Nappe semi-captive [1].

## 1.5. Généralités sur les milieux poreux

Nous intéressons dans cette étude à l'écoulement dans les milieux poreux aquifères. Un aquifère est une formation géologique contenant de l'eau et à travers laquelle, en conditions normales, une quantité significative de cette eau s'écoule. Un milieu poreux est un matériel constitué par une matrice solide et des vides, appelés pores. Le pourcentage de vide d'une roche définit sa porosité totale. Ces vides peuvent être occupés par de l'eau, de l'air ou d'autres fluides [7].

Dans notre étude nous intéressons aux milieux saturés en eau c'est-à-dire dans lesquels tous les vides sont remplis d'eau. En hydrogéologie, l'analyse de la porosité n'est pas exclusivement géométrique mais se réfère également à l'eau contenue dans le milieu poreux, à ses liaisons physiques avec la matrice solide et à ses mouvements possibles. En effet, la porosité totale d'une roche n'est pas une condition suffisante à l'écoulement d'eau. C'est l'interconnexion des pores ainsi que les relations fluides-solide qui définiront la circulation du fluide [8].

### 1.5.1. Définition d'un milieu poreux

La catégorie des terrains poreux comprend en premier lieu toutes les alluvions fluviales ou glaciaires, les masses d'éboulis et tous les remblais artificiels. On peut également y rattacher les formations gréseuses et les conglomérats perméables.

Ces terrains sont formés de grains cimentés ou non entre eux, ils sont parcourus par un réseau très dense de canaux interstitiels [9], un milieu poreux est usuellement défini comme étant un milieu solide contenant des pores, remplis soit par l'eau ou par l'air.

### 1.5.2. Les Pores

Sont des espaces vides pouvant être interconnectés ou séparés dont les formes et les dimensions sont d'une grande diversité. La porosité interconnectée est formée de deux portions principales : des cellules poreuses reliées par d'étroites canalisations appelées les gorges des pores ou canalicules [10]. Voir figure 1.6.

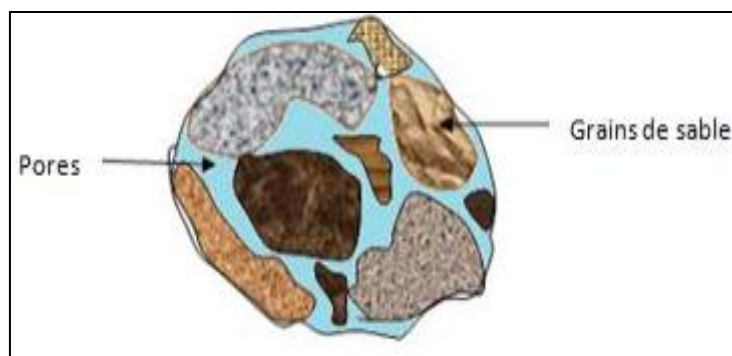


Figure 1.6. Représentation d'un milieu poreux [10].

### 1.5.3. L'eau et le sol

Un volume de sol donné et constitué de trois phases: une phase solide, une phase liquide et phase gazeuse. Les valeurs respectives de ces trois phases déterminent l'état hydrique du sol à un moment donné, voir la Figure 1.7.

| <u>Volumes</u> |                | <u>Poids</u> |
|----------------|----------------|--------------|
| Va             | Air            | Wa=0         |
| Vw             | Eau            | Ww           |
| Vs             | Grains solides | Ws           |

Figure 1.7. Les trois éléments constitutifs du sol [11].

### 1.5.4. Les différents types de liaisons eau/sol

Selon la nature des forces agissant sur l'eau et la localisation dans le milieu souterrain, on distingue généralement plusieurs types d'eau, lesquels sont décrits ci-dessous, figure 1.8.

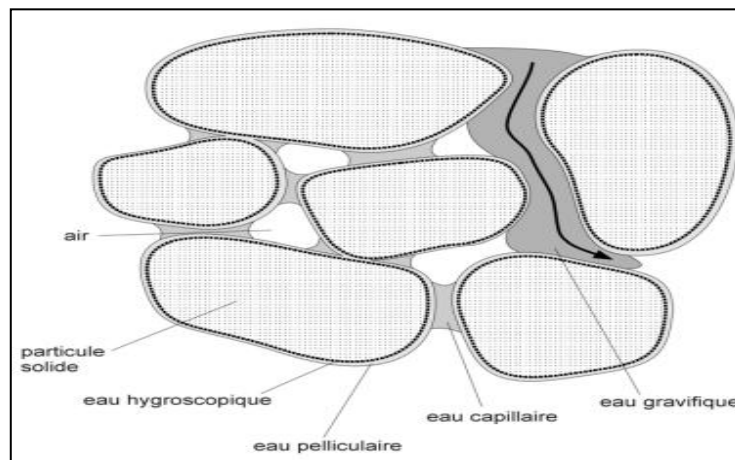


Figure 1.8. Types d'eau dans le milieu souterrain [7].

#### 1.5.4.1. Types d'eau dans le milieu souterrain

##### ☞ Eau hygroscopique

Fixée par absorption à la surface des particules du sol, il formant un film très mince autour les particules solides du sol. (L'eau inutilisable par les plantes).

##### ☞ Eau pelliculaire

Entoure les particules de sol et leur eau hygroscopique ; elle ne peut pas davantage se déplacer par gravité .elle ne peut être extraite que par centrifugation ou chauffage. Cette eau

pourrait donc être ignorée dans les calculs de bilans, si elle n'était à prendre en compte dans certaines méthodes de mesures de la teneur en eau des sols, notamment par étuvage [13].

☞ **Eau capillaire**

Retenue par les forces de capillarité dans les interstices entre les particules du sol et suivant sa position par rapport au niveau de la nappe on peut définir :

✓ **L'eau capillaire isolée**

Qui se trouve dans les zones situées au-dessus de la nappe que n'occupe qu'une partie des pores, l'autre partie étant occupée par l'air.

✓ **L'eau capillaire continue**

Située immédiatement au-dessus de la nappe et constituant ce qu'on appelle souvent « la frange capillaire ».

☞ **Eau gravitaire ou eau libre**

L'eau gravitaire ou l'eau libre est l'eau susceptible de se déplacer au sein du milieu poreux sous l'effet de la gravité terrestre et de transmettre les variations de pression hydrostatique. Le tableau 1.1 présente tous les précédents.

**Tableau 1.1.** Répartition de l'eau dans le milieu souterrain [14].

|                    |                           | Eau hygroscopique | Eau pelliculaire | Eau capillaire |          | Eau gravifique |
|--------------------|---------------------------|-------------------|------------------|----------------|----------|----------------|
|                    |                           |                   |                  | isolée         | continue |                |
| Zone d'aération    | Zone d'évapotranspiration |                   |                  |                |          |                |
|                    | Zone de rétention         |                   |                  |                |          |                |
|                    | Frange capillaire         |                   |                  |                |          |                |
| Zone de saturation |                           |                   |                  |                |          |                |

**1.6. Caractéristiques du milieu poreux**

Les milieux poreux naturels sont essentiellement les alluvions constituées de matériaux granuleux ou bien par des roches compactées fissurées. On dit qu'un milieu poreux est homogène quand, en n'importe quel point, la résistance à l'écoulement est la même, par rapport à une direction donnée. Le concept d'homogénéité est fondamental pour l'étude théorique.

Le milieu poreux est dit isotrope, si quelle que soit la direction considérée, la résistance à l'écoulement ou toute autre propriété est la même dans toutes les directions. La plupart des milieux poreux naturels sont anisotropes [15].

### 1.6. 1. La granulométrie

C'est l'étude qui permet de la distribution de la masse solide d'un sol en séparant les grains par diamètre. Le tamisage est la partie préliminaire de l'analyse granulométrique qui nous permet de tracer une courbe granulométrique, une telle courbe permet de définir :

- ✓ La dimension effective des grains qui correspond à l'ouverture du tamis qui laisse passer 10% du poids de l'échantillon
- ✓ Le coefficient d'uniformité granulométrique  $C_U$  du sol considéré qui est le quotient des deux dimensions des mailles du tamis laissant passer respectivement 60% et 10% du poids de l'échantillon.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1.1)$$

$C_U$  : Coefficient d'uniformité.

$d_{60}$  : Diamètre correspondant à 60%

$d_{10}$  : Diamètre correspondant à 10%

- Le coefficient de courbure :

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (1.2)$$

$C_C$  : Coefficient de courbure.

$d_{30}$  : Diamètre correspondant à 30%

Le diamètre caractéristique,  $d_n$  [mm], et mesuré par la valeur lue en abscisse, correspondant à un pourcentage en poids cumulés, choisit arbitrairement en ordonnées.

La granulométrie à elle seul ne suffit pas pour caractériser un terrain. Son comportement hydraulique dépend également, et souvent fortement, de la forme des grains et de leur arrangement.

### 1.6.2. Infiltration

Quand l'eau arrive à la surface du sol, elle tend de pénétrer dans le sol par infiltration. Le flux infiltré est limité par l'infiltrabilité locale de la surface. L'eau entre dans le sol soit par l'effet de la gravité soit par l'effet de gradient de pression si le sol n'est pas saturé.

L'infiltrabilité, ou la capacité d'infiltration du sol, est proportionnelle au gradient hydraulique total et à la conductivité hydraulique au potentiel hydrique considéré [16].

### 1.6.3. Porosité

La porosité est un paramètre hydrodynamique important, qui caractérise la propriété d'un milieu comportant des vides interconnectés ou non La porosité d'une roche en place

noté  $n$ , est définie par le rapport du volume des vides sur volume total de la roche. Elle exprimé en % :

$$n = \frac{V_V}{V_T} \quad (1.3)$$

- $n$  : La porosité en [%],
- $V_V$  : Le volume des vides [ $m^3$ ],
- $V_T$  : Le volume total du matériau [ $m^3$ ], c'est-à-dire la somme du volume de solide et du volume des pores [9].

#### ☞ Porosité efficace $n_e$ :

La porosité efficace est définie comme la fraction de la porosité correspondant à la contenance en eau gravitaire [17].

C'est le volume de l'eau gravitaire  $V_e$ , que l'échantillon peut contenir à l'état saturé, puis libéré sous l'effet d'égouttage complet, à son volume total  $V_T$ . Elle dépend essentiellement de l'arrangement de la surface spécifique des grains. Elle est donnée en pourcentage, par la formule [13] :

$$n_e = \frac{V_e}{V_T} \quad (1.4)$$

- $V_e$  : volume de l'eau gravitaire [ $m^3$ ],
- $V_T$  : volume total [ $m^3$ ],
- $n_e$  : porosité efficace [%].

#### ☞ Porosité effective $C_r$

Appelée aussi capacité de rétention. C'est le rapport du volume de rétention  $V_r$  (eau non égoutable par gravité) au volume totale apparent  $V_t$ . Elle est donnée en pourcentage par la formule [18] :

$$C_r = \frac{V_r}{V_t} \quad (1.5)$$

- $C_r$  : porosité effective [%],
- $V_r$  : volume d'eau de rétention [ $m^3$ ],
- $V_t$  : volume totale apparent [ $m^3$ ].

#### ☞ Porosité cinématique :

Elle désigne le rapport de l'eau non liée aux grains, l'eau pouvant circuler et le volume total de la roche. Elle n'est pas mesurable pratiquement. Ce concept est proche de la porosité efficace, définit comme un rapport de volume [19].

#### 1.6. 4. Indice des vides

Un autre paramètre caractérisant la proportion de pores dans un matériel est l'indice des vides «  $e$  » qui est défini par le rapport du volume des vides  $V_V$  sur celui des solides  $V_S$  :

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad (1.6)$$

- $e$ : indice des vides.
- $V_V$ : volume des vides [ $\text{m}^3$ ].
- $V_S$ : volume solides [ $\text{m}^3$ ].

Ce paramètre est d'usage courant en géotechnique car il a l'avantage d'utiliser un volume de référence (celui des solides) qui demeure constant contrairement au volume total qui peut varier considérablement dans des matériaux fortement compressibles tels que les silts et argiles.

Le lien entre la porosité et l'indice des vides est exprimé par :

$$n = \frac{e}{e+1} \quad (1.7)$$

- $n$ : porosité,
- $e$ : indice des vides.

#### 1.6. 5. Teneur en eau

On désigne la physique des milieux poreux par la teneur en eau  $\theta$ . C'est la quantité d'eau liquide contenue dans un échantillon de matière. Elle est définie comme étant le rapport du volume de l'eau contenue dans le sol  $V_w$  sur le volume des grains solides  $V_S$  [15] :

$$\theta = \frac{V_w}{V_S} \quad (1.8)$$

- $V_w$  : Le volume de l'eau dans le sol [ $\text{m}^3$ ],
- $V_S$  : Le volume des grains solide [ $\text{m}^3$ ],
- $\theta$ : Teneur en eau.

#### 1.6. 6. Coefficient d'emménagement

Le coefficient d'emménagement est défini par le rapport entre la hauteur de la tranche d'eau immédiatement libérable par la roche aquifère sous l'effet de dépression et, la hauteur d'abaissement correspondant du niveau piézométrique. Il est sans dimension, en termes de volumes par la formule [17] :

$$S = \frac{V_w}{\Delta h \cdot A} \quad (1.9)$$

- $V_w$  : Volume d'eau libéré [ $\text{m}^3$ ].
- $\Delta h$ : la charge hydraulique unitaire [m].

- $A$  : surface unitaire [ $m^2$ ].

### 1.6.7. Coefficient de saturation $S_r$

C'est le rapport entre le volume occupé par l'eau,  $V_e$  et le volume,  $V_v$  des vides :

$$S_r = \frac{V_e}{V_v} \quad (1.10)$$

- $S_r$  : coefficient de saturation,
- $V_e$  : volume de l'eau [ $m^3$ ],
- $V_v$  : volume des vides [ $m^3$ ].

### 1.6.8. La masse volumique des grains

La masse volumique  $\rho_s$  est la masse des grains solides  $M_s$  divisée par le volume de la phase solide  $V_s$  : [20]

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (1.11)$$

- $\rho_s$  : la masse volumique [ $Kg/m^3$ ],
- $M_s$  : la masse des grains solides [ $Kg$ ],
- $V_s$  : volume de la phase solide [ $m^3$ ].

### 1.6.9. La masse volumique sèche

La masse volumique sèche  $\rho_d$  est le rapport entre la masse des grains solides  $M_s$  et le volume total du milieu poreux  $V_t$  : [20]

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (1.12)$$

- $\rho_d$  : la masse volumique sèche [ $Kg/m^3$ ],
- $M_s$  : la masse des grains solides [ $Kg$ ],
- $V_t$  : volume total du milieu poreux [ $m^3$ ].

### 1.6.10. La conductivité hydraulique ou perméabilité

#### ☞ Définition

La perméabilité est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique. Elle exprime la résistance du milieu à l'écoulement du fluide (eau) qui le traverse. La perméabilité  $k$  dépend avant tout de la dimension des interstices [21].

Ce sont donc la dimension et la distribution des grains du milieu poreux qui joueront un rôle primordial sur la valeur de  $k$ .

- Si la granulométrie est uniforme :  $u = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 10$  , les grains ont presque le même diamètre

- Si la granulométrie est étendue :  $u > 10$  , ce sont les éléments fins qui déterminent la perméabilité.

D'autres grandeurs influencent sur la valeur de  $k$ , mais de manière moins importante ; ce sont la porosité et la température .La perméabilité est mesurée par deux paramètres, à savoir :

- Le coefficient de perméabilité.
- La perméabilité intrinsèque.

#### ☞ Le coefficient de perméabilité

Le coefficient de perméabilité peut être donné par l'expression suivante:

$$K = N. d_{10}^2. \frac{\gamma}{\mu} \quad (1.13)$$

- $K$  : Coefficient de perméabilité [m/s],
- $N$  : Facteur de forme, sans dimension,
- $d_{10}$  : Diamètre efficace des grains [mm],
- $\gamma$  : Poids volumique [KN/m<sup>3</sup>],
- $\mu$  : viscosité dynamique [kg/m.s].

Cette expression englobe les caractéristiques du milieu et du liquide. Elle comporte deux couples de résistances à l'écoulement correspondant à deux groupes de facteurs :

- Les caractéristiques du milieu fluide en mouvement ou coefficient du fluide avec deux facteurs principaux à savoir :

✓ La viscosité dynamique du liquide qui exprime la résistance du liquide à l'écoulement.

✓ Le poids volumique  $\gamma = \rho. g$

Les caractéristiques du milieu, avec  $N. d_{10}^2$  , exprimant la perméabilité intrinsèque. Le facteur principal est la viscosité dynamique. Elle décroît rapidement avec l'augmentation de la température. Le coefficient de perméabilité, fonction inverse, croît avec la température

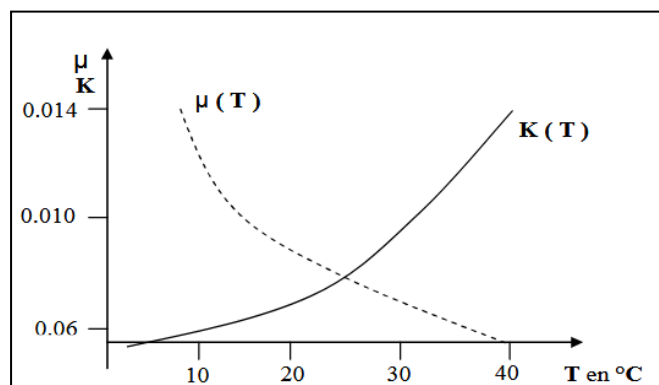


Figure 1.9. La viscosité dynamique  $\mu$  et le coefficient de perméabilité  $K$  en fonction de la température [1].

On note que, la perméabilité d'un sol est liée à la dimension des pores, c'est-à-dire à la granulométrie du sol et à l'état de serrage des grains. Pour les sols grossiers comme les sables, une approximation rapide est donnée par la formule de HAZEN :

$$k = 100 \cdot d_{10}^2 \quad (1.14)$$

Où  $d_{10}$  représente le diamètre de grain tel que 10% des éléments du sol, en poids, lui soit inférieur. Le coefficient  $K$  varie énormément d'un sol à l'autre. A titre d'exemple,  $K$  peut être compris entre  $10^{-2}$  et  $10^{-6}$  m/s pour les sables, entre  $10^{-7}$  et  $10^{-9}$  m/s pour les limons, entre  $10^{-9}$  et  $10^{-12}$  m/s pour les argiles,  $10^{-9}$  et  $10^{-16}$  pour les roches.

### ☞ La perméabilité intrinsèque ou géométrique

Est la propriété d'un corps poreux de se laisser traverser par fluides. Cette constante caractéristique d'un milieu poreux est liée à la forme des grains et à la porosité cinématique (Communication entre les pores). Donc, indépendante des caractéristiques des fluides elle ne dépend que de la structure et de la connectivité des pores. La perméabilité intrinsèque est généralement anisotrope et s'exprime donc sous la forme tensorielle [22].

#### 1.6. 11. La transmissivité

La transmissivité ( $T$ ) régit le débit d'eau qui s'écoule, par unité de largeur, d'un aquifère, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Il évalue la fonction conduite de l'aquifère. La transmissivité est égale au produit du coefficient de perméabilité ( $K$ ) par l'épaisseur de l'aquifère ( $b$ ). Elle permet de représenter sur des cartes les zones de productivité [1].

$$T = K \cdot b \quad (1.15)$$

- $T$ : La transmissivité [ $m^2/s$ ],
- $K$ : Coefficient de perméabilité [m/s],
- $b$ : Epaisseur de l'aquifère [m].

## 1.7. Étude d'Homogénéité et Isotropie

### 1.7.1. Homogénéité et Isotropie

L'homogénéité et l'isotropie d'un milieu poreux se réfèrent à sa perméabilité de propriété ( $K$ ). En générale, bien entendu, ces termes peuvent être appliqués à d'autres propriétés du milieu poreux [10].

### 1.7.2. Homogénéité et hétérogénéité

Un domaine de milieu poreux est dit homogène si sa résistance à l'écoulement (sa perméabilité) est la même à tout ses points. Autrement, le domaine est dit hétérogène.

**1.7.3. Isotropie et anisotropie**

Un domaine de milieu poreux est dit isotrope si sa résistance à l'écoulement à un point considéré est indépendante de la direction. Dans le cas contraire est dit anisotrope [10].

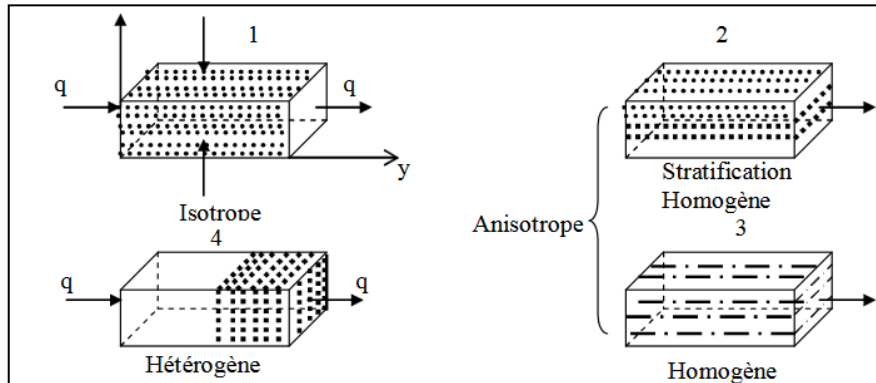


Figure 1.10. Caractéristique physiques d'un milieu poreux [1].

**1.8. Types d'aquifères homogènes et isotropes**

Si on considère deux points dans un aquifère dont les coordonnées sont respectivement  $(x_1, y_1, z_1)$  et  $(x_2, y_2, z_2)$  quatre cas sont possible pour définir l'anisotropie et l'hétérogénéité [4]:

**1.8.1. Aquifère homogène et isotrope**

C'est le cas simple. Si la conductivité hydraulique est constante en ces deux points (1 et 2) dans toutes les directions, le milieu est dit homogène et isotrope avec l'expression suivante :

$$K_x(x_1, y_1, z_1) = K_y(x_1, y_1, z_1) = K_z(x_1, y_1, z_1) = K_x(x_2, y_2, z_2) = K_y(x_2, y_2, z_2) = K_z(x_2, y_2, z_2) = K \quad (1.16)$$

**1.8.2. Aquifère homogène et anisotrope**

Dans ce cas, la conductivité hydraulique est la même d'un point à un autre dans une direction quelconque. Le milieu est dit homogène et anisotrope pour :

$$\left. \begin{aligned} K_x(X_1, Y_1, Z_1) &= K_x(X_2, Y_2, Z_2) = K_x \\ K_y(X_1, Y_1, Z_1) &= K_y(X_2, Y_2, Z_2) = K_y \\ K_z(X_1, Y_1, Z_1) &= K_z(X_2, Y_2, Z_2) = K_z \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

**1.8.3. Aquifère hétérogène et isotrope**

Si on considère deux points dont les conductivités sont respectivement  $(k_1)$  et  $(k_2)$  dans toutes les directions, l'aquifère est dit hétérogène et isotrope en satisfaisant les conditions :

$$\left. \begin{aligned} K_x(X_1, Y_1, Z_1) &= K_y(X_1, Y_1, Z_1) = K_z(X_1, Y_1, Z_1) = K_1 \\ K_x(X_2, Y_2, Z_2) &= K_y(X_2, Y_2, Z_2) = K_z(X_2, Y_2, Z_2) = K_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

Et en considérant une conductivité horizontale et verticale, on aura :

$$\left. \begin{aligned} K_x(X_1, Y_1, Z_1) &= K_y(X_1, Y_1, Z_1) = K_z(X_1, Y_1, Z_1) = K_y(X_2, Y_2, Z_2) = K_h \\ K_z(X_1, Y_1, Z_1) &= K_z(X_2, Y_2, Z_2) = K_v = K_z \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

### 1.8.4. Aquifère hétérogène et anisotrope

C'est le cas le plus générale dont la conductivité hydraulique varie d'un point à un autre dans toutes les directions, tel que :

$$\left. \begin{array}{l} K_x(X_1, Y_1, Z_1) \neq K_y(X_1, Y_1, Z_1) \neq K_z(X_1, Y_1, Z_1) \\ K_x(X_2, Y_2, Z_2) \neq K_y(X_2, Y_2, Z_2) \neq K_z(X_2, Y_2, Z_2) \end{array} \right\} \quad (1.20)$$

## 1.9. Loi fondamentale de l'écoulement (loi de Darcy)

C'est une loi physique mécaniste et déterministe à été établie pour la première fois par Henry Darcy en 1856, il a étudié le flux d'eau dans des filtres verticaux homogènes de sable en relation avec les fontaines de la ville de Dijon (France). Elle permet d'exprimer le débit d'un fluide incompressible qui s'écoule au travers d'un milieu poreux supposé isotrope. Darcy a déduit que les gradients de pression sont proportionnels à la vitesse d'écoulement entre en déterminant la conductivité hydraulique [10, 23].

### 1.9.1. L'expérience de Darcy

Le dispositif expérimental comportait un échantillon de sable est mis dans une colonne dont les extrémités sont reliés à deux réservoirs. Le liquide filtrant s'écoule du réservoir supérieur vers le réservoir inférieur à travers la colonne poreuse. Il remonte dans des piézomètres gradués à des niveaux décroissants dans le sens de l'écoulement. Ces niveaux s'alignent sur une droite [9] voir la figure 1.11.

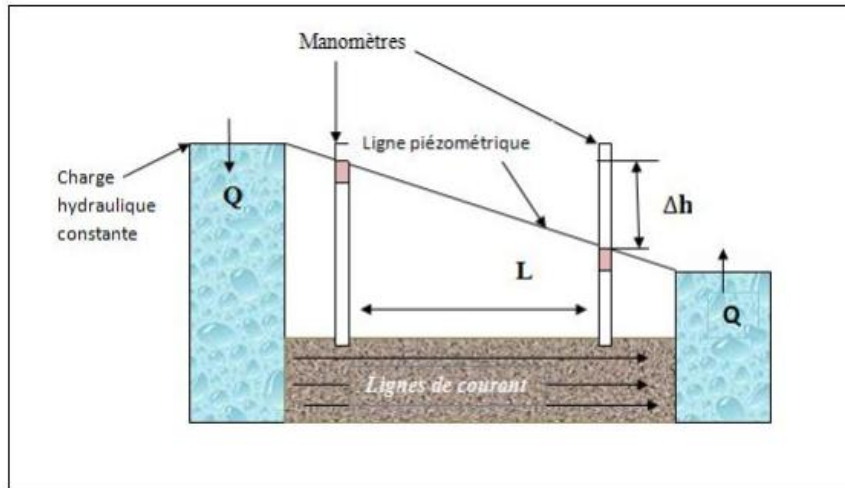


Figure 1.11. Expérience de Darcy [10].

De cette expérience a déduit la relation suivante :

$$\left. \begin{array}{l} Q = K \cdot A \cdot i \\ Q = K \cdot A \frac{dh}{l} \end{array} \right\} \quad (1.21)$$

- $Q$  : Le débit d'écoulement mesuré a la sortie [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],
- $K$  : Coefficient de perméabilité de Darcy [ $\text{m/s}$ ],
- $A$  : La section d'écoulement [ $\text{m}^2$ ],

- $i$  : Le gradient hydraulique,
- $dh$  : la différence de charge totale entre les deux extrémités de l'écoulement [m],
- $l$  : la longueur de l'échantillon [m].

### Remarque

Dans l'écoulement souterrain, la charge hydraulique  $\varphi = \frac{v^2}{2g} + \frac{U}{\gamma_w} + z$  peut être assimilée à la hauteur piézométrique  $H = \frac{U}{\gamma_w} + z$ , le terme d'énergie  $\frac{v^2}{2g}$  étant toujours négligeable.

### 1.9.2. Condition de validité de la loi de darcy

La loi de Darcy est établie par des expériences de laboratoire répondant à des conditions très strictes. Quatre conditions doivent être respectées [1]: Continuité, isotropie et homogénéité du réservoir et écoulement laminaire.

En générale, la loi de Darcy considère que le régime d'écoulement est laminaire On remarque une déviation par rapport à la loi linéaire (loi de Darcy) qui montre que la relation entre le gradient de pression et la vitesse de filtration dépend du nombre de Reynolds [11].

$$R_e = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (1.22)$$

- $R_e$  : Nombre de Reynolds,
- $V$  : vitesse de filtration [m/s],
- $D$  : Diamètre des grains [mm],
- $\mu$  : la viscosité dynamique de fluide [Kg/m.s],
- $\rho$  : la masse volumique de l'eau [Kg/m<sup>3</sup>],

Lorsqu'on s'écarte plus ou moins de ces conditions, la loi de Darcy cesse d'être valable.

### 1.10. La relation entre Le coefficient de perméabilité $K$ et La perméabilité intrinsèque $k$ :

Ces propriétés sont des mesures de la capacité d'un aquifère à conduire l'eau. Le coefficient de perméabilité est une caractéristique du matériau. Cependant, ce n'est pas une propriété propre ou intrinsèque de celui-ci, puisque elle est aussi dépendante du fluide .elle est en effet proportionnelle à la masse volumique (abusivement appelée densité),  $\rho$ , de ce fluide et inversement proportionnelle à sa viscosité  $\mu$  [24].

La perméabilité intrinsèque  $k$  est une propriété secondaire du milieu. Elle ne dépend pas de la viscosité ni de la densité du fluide.

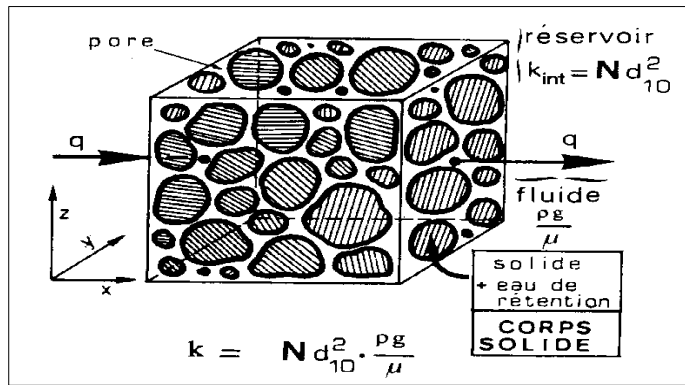


Figure 1.12. Signification du coefficient de perméabilité,  $K$  et de la perméabilité intrinsèque  $k$ , dans un volume représentatif élémentaire (VRE) [1].

$$K = N \cdot d_{10}^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (1.23)$$

$$k = N \cdot d_{10}^2 \quad (1.24)$$

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1.25)$$

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (1.26)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.27)$$

- $\mu$  : La viscosité dynamique du fluide [Kg/m.s],
- $\rho$  : La masse volumique du fluide [Kg/m<sup>3</sup>],
- $g$  : L' accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>],
- $d_{10}$  : diamètre efficace des grains [mm],
- $N$  : facteur de forme, sans dimension,
- $\gamma$  : poids volumique [KN/m<sup>3</sup>],
- $K$  : coefficient de perméabilité [m/s],
- $k$  : Perméabilité intrinsèque [m<sup>2</sup>],

☞ Propriétés physiques de l'eau:

- Densité volumique:  $\rho_{eau} = 103$ [Kg/m<sup>3</sup>],
- Viscosité dynamique:  $\mu_{eau} = 10^{-3}$ [kg/m.s],
- Viscosité cinématique:  $\nu_{eau} = \mu_{eau} / \rho_{eau} = 10^{-6}$ [m<sup>2</sup>/s],

## **1.11. Conclusion**

Durant ces dernières décennies, de notables améliorations ont été apportées à l'étude de l'hydrodynamique des milieux poreux.

La granulométrie, technique de l'étude des roches, accède à la morphologie des vides par deux paramètres des grains, le diamètre efficace et le coefficient d'uniformité, la connaissance de ces caractéristiques est nécessaire pour accéder à l'étude des écoulements traversant des milieux poreux.

Nous avons défini les variables et les principaux paramètres qui caractérisent l'état hydrique d'un sol et leur importance dans la description de l'écoulement dans un milieu poreux saturé.

L'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux est déterminé par trois groupes de paramètres hydrodynamiques : coefficient de perméabilité, gradient hydraulique, débit et vitesse de l'écoulement.

*Chapitre 2 :*

*Modélisation de l'écoulement souterrain  
en vue d'application à la CFD*

## 2.1. Introduction

L'utilisation des modèles mathématiques dans la compréhension des écoulements souterrains est maintenant très courante. La simulation numérique de ces écoulements est un problème complexe qui présente notamment :

- ☞ La résolution par la loi de Darcy est souvent impossible analytiquement.
- ☞ Les configurations réelles sont telles que le problème ne peut être considéré Comme plan, ce qui nécessite le recours aux calculs tridimensionnels.

Ces conditions complexes nécessitent un outil numérique bien adapté. Dans ce chapitre, nous présentons la formulation mathématique. Avec les différentes conditions aux limites. Les équations de conservation sont :

- Equation de continuité (conservation de la masse).
- Equation de Navier-Stokes (conservation de quantité de mouvement).

Dans ce chapitre, nous décrirons mathématiquement les modèles d'écoulement de l'eau dans un milieu poreux.

## 2.2. Objectif de la modélisation

On peut définir un modèle comme une représentation simplifiée de la réalité, en vue de simuler la réponse d'un système à une série de sollicitations. Cette représentation, doit cependant être la plus conforme possible, du point de vue des mécanismes et processus simulés. Les objectifs habituels d'une modélisation peuvent être [25].

- ☞ De réaliser des prédictions sur le comportement du système considéré, en réponse à des sollicitations ;
- ☞ D'obtenir les informations nécessaires, afin de respecter certaines recommandations ou législations ;
- ☞ D'obtenir une meilleure compréhension du système, d'un point de vue hydrogéologique, chimique ou même géologique ;
- ☞ De fournir l'information nécessaire, afin de définir le réseau de mesures à installer ; de fournir des informations, pouvant aider à organiser de nouveaux tests in situ (pompages, traçages...).

### 2.3. Les modèles d'écoulement souterrain

Pour la résolution de ces équations et la simulation numérique de l'écoulement souterrain plusieurs modèles sont employés par nombreux auteurs, on peut citer quelques modèles:

Les modèles numériques 3D sont largement utilisés en hydrogéologie [26, 27, 28] Ils permettent de comprendre et de caractériser les écoulements souterrains, les transports de solutés, ou encore les bilans hydrologiques des systèmes souterrains [29, 30, 31, 32, 33].

La difficulté de la modélisation des nappes souterraines est liée au fait que le matériau n'est pas homogène [30]. Les dépôts organiques et les dépôts alluviaux sont mélangés et leur organisation évolue au cours du temps. De plus, la tourbe a la particularité d'avoir des caractéristiques hydrauliques variables dans le temps et dans l'espace [27]. En effet, la conductivité hydraulique du milieu poreux varie avec la profondeur et la hauteur de la surface libre.

Plusieurs modèles hydrologiques ont déjà été développés et utilisés dans des contextes de zones humides. Hydrus 2D est un modèle 2D d'écoulements saturés – non saturés [34]. Appliqué à un transect de zone humide riveraine de la Dijle (Belgique), il a montré son efficacité à reproduire la dynamique des eaux souterraines. Marthe, développé par le BRGM, modélise les écoulements saturés – non saturés à 3D [32]. Il a permis de quantifier les interactions hydrologiques entre la zone humide des marais de Rochefort (France) et l'aquifère sous-jacent, et de caractériser les flux échangés entre les deux. Wetlands décrit les écoulements souterrains dans des conditions de saturation du sol et d'évapotranspiration variable et simule efficacement la variabilité de la surface libre et l'évolution du niveau d'eau dans le marais [35].

Modflow 3D est un modèle 3D d'écoulement souterrain saturé-non saturé [36] appliqué à un système d'aquifères profonds des antiformes du sud de Bordeaux. Il a représenté les échanges entre les 6 aquifères composants ce système. Et il a montré aussi l'impact à grand échelle de l'implantation de champ captant exploitant la nappe de la base du Crétacé sud sur ses entourages.

Le modèle SEEP/W résout les équations qui gouvernent le comportement hydraulique des eaux souterraines en utilisant les méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis (MEF). Elle est très utile pour résoudre les problèmes d'ingénierie environnementale. Ce logiciel permet de simuler l'écoulement naturel dans les sols composés par un ou plusieurs aquifères à nappe libre ou confinée, l'évaluation de la migration de contaminants lors d'une fuite. Les simulations faites par SEEP/W peuvent être en régime transitoire ou permanent.

Plusieurs validations ont été effectuées pour tester le pouvoir de résolution de SEEP/W [37, 38]. Ces auteurs arrivent à la conclusion que le logiciel présente l'avantage d'avoir une bonne résolution à déterminer de nombreux problèmes en hydrogéologie.

Des modèles physiques ont aussi été utilisés, ils consistent en des modèles réduits d'aquifères, toutefois, dans le cadre de l'étude des interactions entre les écoulements souterrain et en cours d'eau.

L'ordre de grandeur des facteurs d'échelles à considérer pose des difficultés techniques majeures [25] Les modèles physiques sont surtout utilisés pour le développement et la validation de modèles théoriques à partir d'analyses en laboratoire sur une colonne de sol.

Certains de ces modèles divisent le domaine en éléments homogènes du point de vue hydrologique [39] ce qui permet de tenir compte de la distribution spatiale des caractéristiques du sol et d'avoir une meilleure approximation de la hauteur de la nappe et des vitesses d'écoulement sur le bassin. De plus, la distribution spatiale des caractéristiques permet de simuler différents scénarios de modifications sur le bassin. De façon à prévoir leur impact sur l'écoulement souterrain.

Ces différents modèles aux approches variées représentent efficacement la dynamique des eaux souterraines dans des contextes des aquifères.

## 2.4. Processus d'analyse

De façon générale, les différentes étapes d'analyse d'un problème physique s'organisent suivant le processus schématisé par la figure 2.1 Nous partons d'un problème physique. Le cadre précis de l'étude est défini par les hypothèses simplificatrices qui permettent de déterminer le modèle mathématique approprié. La difficulté pour l'ingénieur est de savoir choisir parmi les lois de la physique, celles dont les équations traduiront avec la précision voulue la réalité du problème physique. Un bon choix doit donner une réponse acceptable.

### 2.4.1. Méthodes de résolution de ces équations

La détermination des réseaux d'infiltration, par la recherche des potentiels complexes, n'est possible que dans quelques cas simples. Dès que les conditions aux limites se compliquent, les calculs deviennent extrêmement laborieux [40].

Devant la complexité à trouver des solutions analytiques pour construire les réseaux d'écoulement, on fait souvent recours aux autres méthodes basées sur des approximations et des propriétés graphiques du réseau d'écoulement, d'analogie électrique ou par calcul numérique sur ordinateur. Nous présenterons ici un aperçu général sur les méthodes les plus utilisées et nous développerons la méthode numérique implantée dans le code utilisé au chapitre 3.

On peut citer l'exemple d'un écoulement complexe qui est le cas rencontré pendant l'infiltration au dessous des constructions des ouvrages géotechniques étanches. La résolution de l'équation de Laplace a des difficultés à cause des contours souterrains d'ouvrages hydrotechniques qui sont très complexe.

Dans ce cas, on fait recours aux méthodes de calcul suivantes :

- Méthodes analytiques.
- Méthodes analogiques.
- Méthodes graphiques.
- Méthodes numériques.

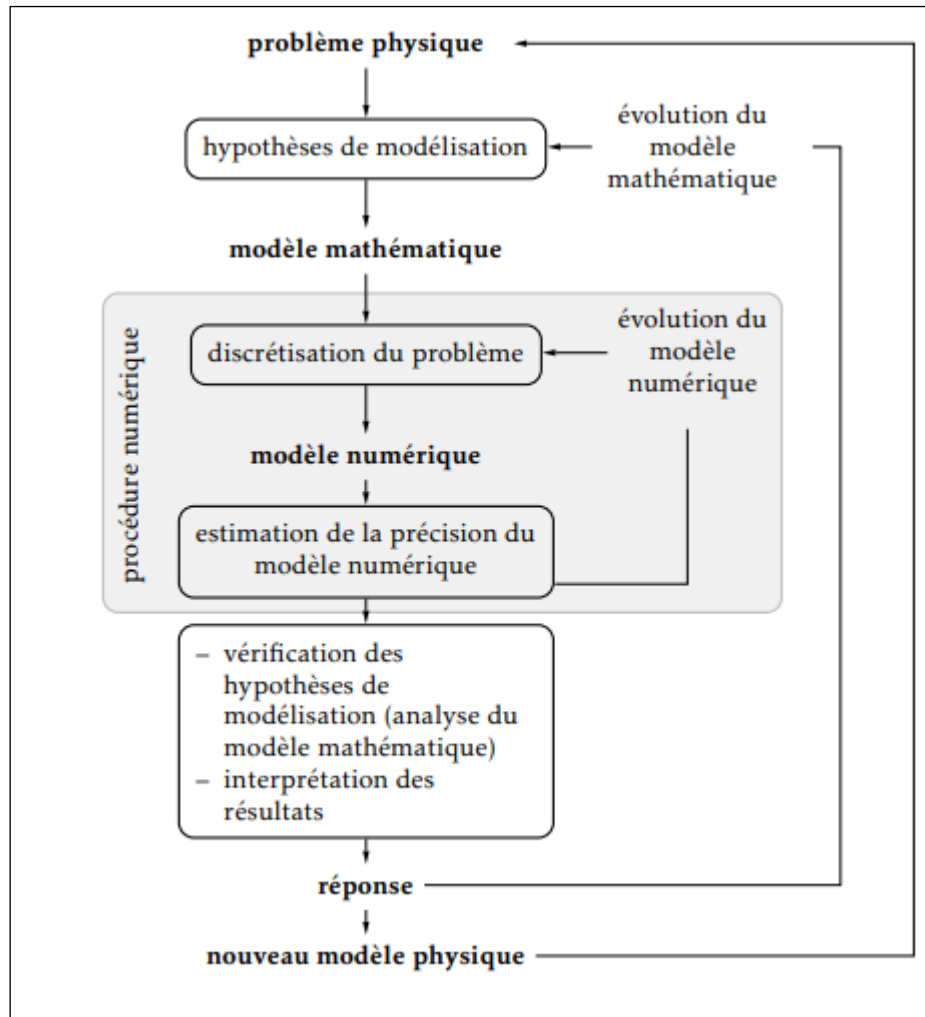


Figure 2.1. Processus d'analyse utilisant un modèle numérique[43].

### 2. 4.1.1. Méthodes analytique

Les méthodes analytiques sont généralement limitées à des cas avec un débit constant et uniforme et à des problèmes qui ont des conditions initiales et aux limites relativement simples. En dépit de ces limitations, les modèles analytiques peuvent être utilisés pour déterminer le sort et le transport des différents constituants dans le sol et l'aquifère. Par rapport aux modèles numériques, les modèles analytiques peuvent fournir plus de perspicacité dans le cadre conceptuel [41].

### 2. 4.1.2. Méthodes graphiques

Cette méthode simplifiée, fait appel aux propriétés géométriques des réseaux quadratiques, ainsi qu'aux conditions auxquelles doivent satisfaire les lignes équipotentiels et celles de courant. En s'inspirant des cas théoriques analogiques, on peut tracer un réseau vraisemblable de ligne de courant et de lignes équipotentiels qui en chaque point se rencontrent orthogonalement.

### 2.4.1.3. Méthodes analogique

Représentation d'un système physique réel par un autre système physique analogue, telle que le comportement de l'analogie soit à peu près (ou exactement) le même que celui du système physique réel. En hydrologie, les modèles analogiques simulent fréquemment l'écoulement de l'eau dans à travers un milieu poreux (ou des canaux) par le passage d'un courant électrique dans un circuit composé de résistances et de capacités [42].

### 2.4.1.4. Méthodes numériques

Les méthodes numériques représentent l'un des moyens les plus importants de résolution des grands problèmes rencontrés dans les cas pratiques. Les modèles mathématiques représentent une solution offrant une très grande souplesse d'emploi. [43,44]. Les méthodes de résolution numérique, sont mieux adaptées au traitement de problèmes complexes.

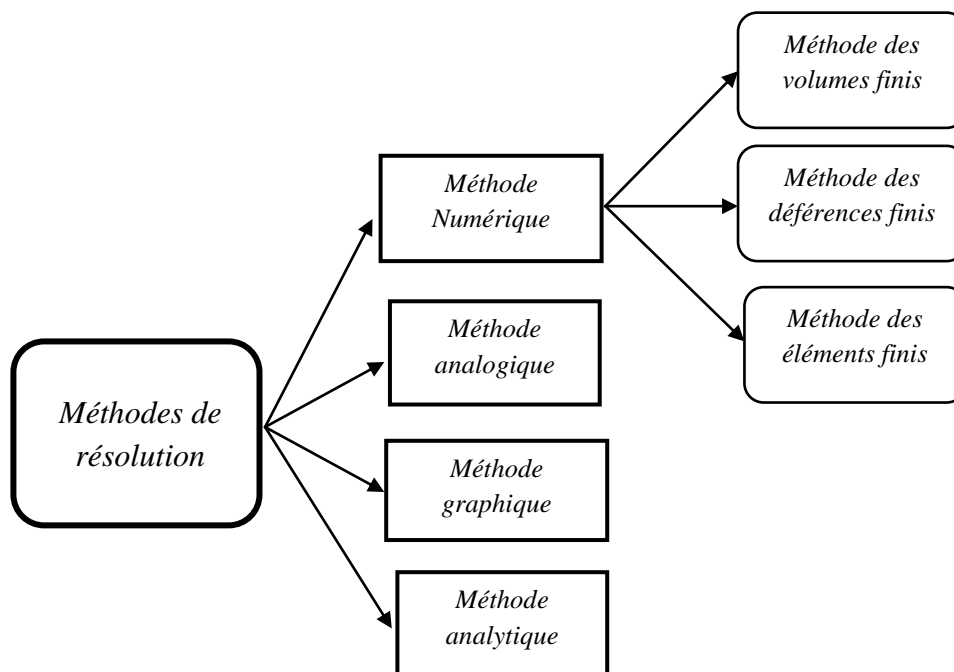


Figure 2.2. Organigramme des méthodes de résolution.

## 2.4.2. Méthodes de discrétisation

Pour résoudre les problèmes aux dérivées partielles issus de la mécanique des fluides, la discrétisation se fait en suivant l'une des trois méthodes.

### 2.4.2.1. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à remplacer un problème continu par un problème discret équivalent. La discrétisation se fait sur deux fronts, d'une part, le domaine géométrique est subdivisé en sous domaines de géométrie simple, appelés éléments, sur lesquels l'étude du problème peut se faire en une seule opération, et d'autre part les équations aux dérivées partielles sont remplacées par des équations algébriques à l'aide du calcul variationnel ou des méthodes de minimisation de l'erreur comme celle des résidus pondérés. La solution globale s'obtient en résolvant un système global formé par l'assemblage des équations algébriques obtenues sur tous les éléments constituant le domaine géométrique [43].

### 2.4.2.2. Méthode des différences finis

La méthode des différences finis est l'une des méthodes adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles, elle s'applique aux problèmes stationnaires ou dépendants du temps. Cette méthode consiste à discrétiser des équations des grandeurs différentielles infiniment petites par des grandeurs finies petites en regard des dimensions générales du milieu poreux étudié [43].

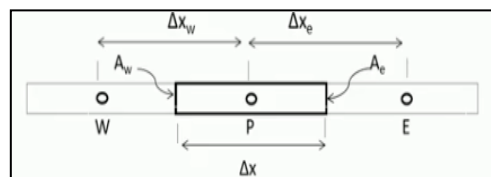
### 2.4.2.3. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une méthode numérique qui permet d'approcher la solution d'une équation différentielle régissant un phénomène donné [44].

Les étapes de résolution de cette méthode sont :

- Définir l'équation du phénomène.
- Discrétisation de du domaine (subdivision du domaine en volumes élémentaires).
- Intégration de l'équation sur chaque volume de contrôle (théorème de Gausse ou de divergence ou théorème d'Ostrogradski).
- Traitement des conditions aux limites.
- Formation du système d'équation algébrique résultant et sa résolution.
- Présentation et discussions des résultats

✓ Volume de contrôle 1D



**Figure 2.3 :** Schéma unidimensionnel illustrant un volume élémentaire entourant un nœud [45].

- ✓ Volume de contrôle 2D

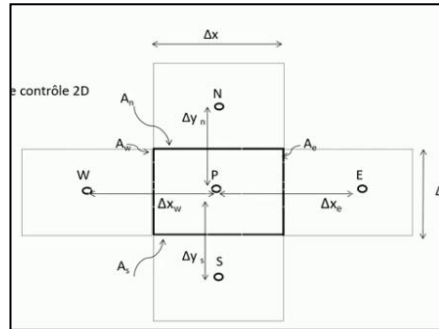


Figure 2.4. Schéma (2D) illustrant un volume de control [45].

- ✓ Volume de contrôle 3D

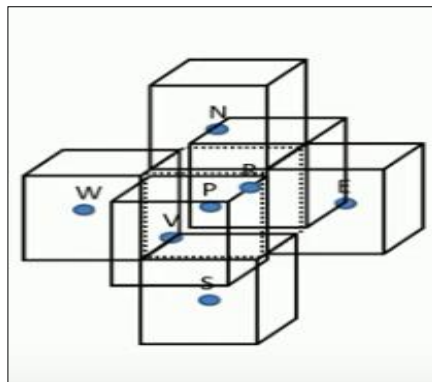


Figure 2.5. Schéma (3D) illustrant un volume de control[45].

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S_{\Phi} = 0 \tag{2.1}$$

$\Gamma$  : est le coefficient de la diffusivité qui dépend du matériau utilisé.

$S_{\Phi}$  : Terme de source.

Cette équation peut s'écrire d'une manière générale

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + S_{\Phi} = 0 \tag{2.2}$$

## 2.5. Équations d'écoulement des eaux souterraines

Dans presque tous les domaines de la science et de l'ingénierie, les techniques d'analyse sont basées sur la connaissance des processus physiques et, dans la plupart des cas,

il est possible de décrire mathématiquement ces processus. L'écoulement des eaux souterraines ne fait pas exception.

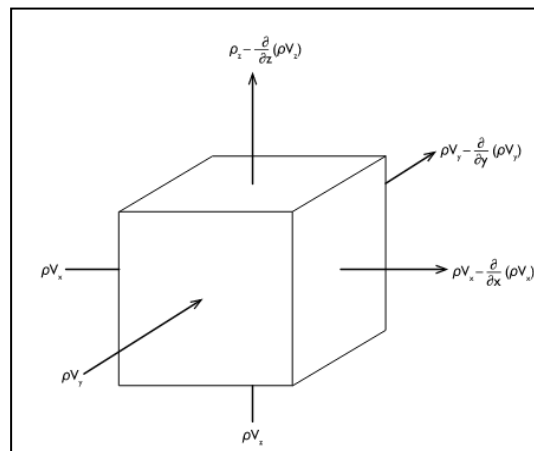
La loi fondamentale de l'écoulement est la loi de Darcy, et lorsqu'elle est associée à une équation de continuité qui décrit la conservation de la masse de fluide pendant l'écoulement à travers un milieu poreux, il en résulte une équation différentielle partielle. Dans cette section, nous présenterons de brefs développements des équations de l'écoulement pour :

- L'écoulement saturé en régime permanent.
- L'écoulement saturé en régime transitoire.
- L'écoulement non saturé en régime transitoire.

Les trois équations de l'écoulement sont bien connues des mathématiciens, et les techniques mathématiques pour leur manipulation sont largement disponibles et couramment utilisées en science et en ingénierie. En général, l'équation de l'écoulement apparaît comme une composante d'un problème aux limites.

### ☞ Débit saturé en régime permanent

Considérons un volume unitaire de milieu poreux tel que celui représenté à la figure 2.6. Un tel élément est généralement appelé un volume élémentaire représentatif.



**Figure 2.6.** Volume élémentaire représentatif pour l'écoulement à travers un milieu poreux [45].

La loi de conservation de la masse pour l'écoulement en régime permanent à travers un milieu poreux saturé impose que la vitesse de circulation du fluide entrant dans n'importe quel volume élémentaire représentatif soit égale à la vitesse d'écoulement du fluide sortant de n'importe quel volume élémentaire représentatif. L'équation de continuité qui traduit cette loi sous forme mathématique peut être écrite, en référence à la figure 2.6, ainsi [45] :

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

Une analyse dimensionnelle sur les termes  $\rho v$  montre qu'ils ont les dimensions d'un débit massique à travers une section transversale de l'unité du volume élémentaire représentatif. Si le fluide est incompressible,  $\rho(x, y, z) = \text{constante}$  et les  $\rho$  peuvent être supprimés de l'équation (2.3). Même si le fluide était compressible et  $\rho(x, y, z) \neq \text{constante}$ , on peut montrer que les termes de forme  $\rho \partial v_x / \partial x$  sont beaucoup plus grands que les termes de forme  $v_x \partial \rho / \partial x$ , qui se produisent lorsque la règle de la chaîne est utilisée pour établir l'équation (2.3). Dans les deux cas, l'équation (2.3) se simplifie ainsi :

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

La substitution de la loi de Darcy pour  $v_x$ ,  $v_y$  et  $v_z$  dans l'équation (2.4) donne l'équation de l'écoulement pour un écoulement permanent à travers un milieu poreux saturé anisotrope :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.5)$$

Pour un milieu isotrope,  $K_x = K_y = K_z$ , et si le milieu est également homogène, alors  $K(x, y, z) = \text{constante}$ . L'équation (2.5) se réduit alors à l'équation de l'écoulement pour un écoulement stationnaire à travers un milieu isotrope homogène :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

L'équation (2.6) est l'une des équations aux dérivées partielles les plus basiques connues des mathématiciens. On l'appelle *l'équation de Laplace*. La solution de l'équation est une fonction  $h(x, y, z)$  qui décrit la valeur de la charge hydraulique  $h$  en un point quelconque d'un champ d'écoulement tridimensionnel. Une solution à l'équation (2.6) nous permet de produire une carte des contours équipotentiels de  $h$ , et en ajoutant les lignes d'écoulement, un réseau d'écoulement [45].

Dans le cas d'un régime permanent, saturé dans un champ d'écoulement bidimensionnel, disons dans le plan  $xz$ , le terme central de l'équation (2.6) serait abandonné et la solution serait une fonction  $h(x, z)$ .

## 2.6. Mécanique des Fluides Numérique CFD

**CFD** : est l'acronyme anglais de « **Computational Fluid Dynamics** », qui peut se traduire en français par la locution « **Mécanique des Fluides Numérique** » (MFN). La MFN consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant l'écoulement de fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, des équations de Navier-Stokes, etc...

La **CFD** a grandi d'une curiosité mathématique pour devenir un outil essentiel dans pratiquement toutes les branches de la dynamique des fluides, de la propulsion aérospatiale aux prédictions météorologiques en passant par le dessin des coques de bateaux.

Dans le domaine de la recherche, cette approche est l'objet d'un effort important, car elle permet l'accès à toutes les informations instantanées (vitesse, pression, concentration) pour chaque point du domaine de calcul, pour un coût global généralement modique par rapport aux expériences correspondantes [46].

De manière générale, la résolution d'un problème de **CFD** passe par trois grandes phases:

1. la préparation du problème : ceci passe par la définition d'une géométrie, d'un maillage discrétisant le domaine de calcul, du choix des modèles et méthodes numériques employés.
2. la résolution numérique du problème qui passe par l'exécution d'un programme informatique. Bien des problèmes suscitant un minimum d'intérêt nécessitent des ordinateurs aux très grandes capacités ;
3. l'exploitation des résultats : ces derniers sont vérifiés afin de vérifier leur cohérence, puis examinés afin d'apporter des réponses aux questions posées par le problème de **CFD** de départ. Cette exploitation passe le plus souvent par des logiciels de post-traitement scientifique utilisés dans de nombreuses branches de la physique, ou bien par les modules de post-traitement disponibles dans certains logiciels de **CFD** commerciaux [46].

## 2.7. Dynamique des fluides et équations de conservation en jeu

### 2.7.1. Dynamique des fluides

La dynamique des fluides est l'étude des mouvements des fluides, qu'ils soient liquide ou gaz. La résolution d'un problème de dynamique des fluides demande normalement de calculer diverses propriétés des fluides comme par exemple la vitesse, la pression, la densité et la température en tant que fonctions de l'espace et du temps [47].

### 2.7.2. Perspectives actuelles

En mécanique des fluides, les équations de **Navier-Stokes** sont des équations aux dérivées partielles **non-linéaires** qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Elles sont nommées d'après deux physiciens du **XIX<sup>e</sup> siècle, Claude Navier et George Stokes** [47].

Il est également intéressant d'étudier la transition entre un comportement simple des fluides (**écoulement laminaire**) et un comportement chaotique (**écoulement turbulent**).

### 2.7.3. Étude des phénomènes

L'étude de ces phénomènes est aujourd'hui bien souvent numérique : on simule des solutions des équations, qui ressemblent effectivement à des écoulements réels - sauf que c'est comme si on disposait d'un système de mesure parfait, qui pourrait tout mesurer sans rien perturber.

Une autre voie de recherche très utilisée est l'étude en soufflerie. En mettant un modèle à étudier dans un fort flux d'air, et en étudiant l'écoulement par divers moyens (mesure de la vitesse d'écoulement par anémomètre ou tube de Pitot, mesure des efforts par des dynamomètres, visualisation des lignes de courant), on peut faire de nombreux calculs et améliorer les paramètres aérodynamiques de l'objet) [47].

Parallèlement, les études d'hydrodynamique sur les navires, les installations pétrolières en mer ou les ouvrages portuaires utilisent souvent des bassins dans lesquels on peut représenter des vagues réalistes. Comme en soufflerie, les essais s'effectuent généralement sur un modèle réduit. Cela pose donc, dans les deux cas, des problèmes de similitude qui nécessitent d'abord une analyse critique des phénomènes pour mettre en évidence les paramètres pertinents et ceux que l'on peut négliger, ensuite leur prise en compte à l'aide de nombres sans dimension [47].

Il existe également d'autres méthodes expérimentales pour étudier des écoulements: strioscopie, Laser-Doppler, ... .

### 2.7.4. Applications de la dynamique des fluides

La dynamique des fluides et ses sous-disciplines comme l'aérodynamique, l'hydrodynamique, et l'hydraulique ont des applications très diverses. Par exemple, elles sont utilisées dans le calcul des forces et des moments dans l'aéronautique ou pour les prévisions météorologiques.

### 2.7.5. L'hypothèse de la continuité

Les gaz sont composés de molécules qui se heurtent entre elles comme des objets pleins. L'hypothèse de continuité, cependant, considère les fluides comme étant continus. C'est-à-dire que l'on admet que des propriétés telles que la densité, la pression, la température, et la vitesse sont prises pour étant bien définies a des points infiniment petits, et ne changent pas d'un point à l'autre. La nature discrète et moléculaire d'un fluide est donc ignorée [47].

Ces problèmes pour lesquels l'hypothèse de continuité ne donne pas des réponses avec l'exactitude désirée sont résolus grâce à la mécanique statistique. Afin de déterminer s'il faut employer la dynamique liquide conventionnelle (une sous-discipline de la mécanique des milieux continus) ou de la mécanique statistique [47].

### 2.7.6. Équations de la dynamique des fluides

Les axiomes fondamentaux de la dynamique des fluides sont les lois de conservation comme la conservation des masses, la conservation de la quantité de mouvement (plus connu sous le nom de seconde loi de Newton), et la conservation de l'énergie. Cela constitue la base de la mécanique newtonienne et sont aussi importantes en mécanique relativiste [47].

Les équations les plus importantes sont les équations de **Navier-Stokes**, qui sont des équations différentielles non-linéaires décrivant le mouvement des fluides. Ces équations, lorsqu'elles ne sont pas simplifiées n'ont pas de solutions analytiques et ne sont donc utiles que pour des simulations numériques. Ces équations peuvent être simplifiées de diverses manières ce qui rend les équations plus facile à résoudre. Certaines simplifications permettent de trouver des solutions analytiques à des problèmes de dynamique des fluides [47].

### 2.7.7. Choix d'une description du fluide

Pour décrire mathématiquement les propriétés d'un fluide en mouvement, deux systèmes cohabitent, l'un et l'autre présentant des avantages dans des situations particulières. Il s'agit de la description lagrangienne et de la description eulérienne. Tandis que la première consiste à observer les modifications des propriétés d'une particule fluide que l'on suit dans son mouvement, la seconde se place en un point fixe du milieu à l'étude et observe les modifications des propriétés du fluide qui défile en ce point. Les deux descriptions sont liées mathématiquement par la relation [26] :

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \left( \vec{u} \cdot \text{grad} \right) \quad (2.7)$$

Où :

Le terme  $\left( \frac{D}{Dt} \right)$ , appelée dérivée totale, représente la dérivée dans la description Lagrangienne ("Ressentie" par une particule en mouvement), et le terme  $\left( \frac{\partial}{\partial t} \right)$  représente la dérivée dans la description Eulérienne ("Vue" par un observateur en un point fixe).

### 2.7.8. Fluide compressible et incompressible

Un fluide est appelé compressible si les changements de la densité du fluide ont des effets significatifs sur l'ensemble de la solution. Dans le cas contraire, il s'agit d'un fluide incompressible et les changements de densité sont ignorés [47].

Les équations de **Navier-Stokes** incompressible sont des simplifications des équations de **Navier-Stokes** dans lesquelles la densité est considérée comme constante. Elles peuvent être utilisées pour résoudre les problèmes impliquant des fluides incompressibles.

### 2.7.9. La viscosité

Les problèmes dus à la viscosité sont ceux dans lesquels les frottements du fluide ont des effets significatifs sur la solution. Dans le cas où les frottements peuvent être négligés, le fluide est appelé **non-visqueux**.

Le nombre de Reynolds peut être employé pour estimer quel type d'équation est approprié pour résoudre un problème physique donné. Un nombre de Reynolds élevé indique que les forces d'inertie sont plus importantes que les forces de frottement. Cependant, même lorsque le nombre de Reynolds est élevé, certains problèmes nécessitent de prendre en compte les effets de la viscosité. En particulier, dans les problèmes où l'on calcule les forces exercées sur un corps (comme les ailes d'un avion), il faut prendre en compte la viscosité. Comme illustré par le paradoxe d'Alembert, un corps immergé dans un fluide non visqueux n'est soumis à aucune force [47].

Les équations normalement utilisées pour l'écoulement d'un fluide non visqueux sont les équations d'Euler. Dans la dynamique des fluides numérique, on emploie les équations d'Euler lorsqu'on est loin du corps et des équations tenant compte de la couche limite lorsqu'on est à proximité du corps.

Les équations d'Euler peuvent être intégrées le long d'une ligne de flux pour aboutir à l'équation de Bernoulli. Quand l'écoulement est partout irrotationnel et non visqueux, l'équation de Bernoulli peut être employée pour résoudre le problème [47].

### 2.7.10. Écoulement constant et non constant

Une autre simplification des équations de la dynamique des fluides est de considérer toutes les propriétés du fluide comme étant constantes dans le temps. Ceci s'appelle alors un flux stationnaire et est applicable à de nombreux problèmes, tels que la poussée ou la traînée d'une aile ou un flux traversant un tuyau. Dans le cas particulier d'un flux stationnaire, les équations de Navier-Stokes et d'Euler se simplifient donc.

Si un fluide est à la fois incompressible, non visqueux et stationnaire, il peut être résolu avec l'écoulement potentiel découlant de l'équation de Laplace. Les problèmes de cette classe ont des solutions qui sont des combinaisons d'écoulements linéaires élémentaires [47].

### 2.7.11. Écoulement laminaire et turbulence

La turbulence est un écoulement dominé par des remous, et un aspect aléatoire apparent. Lorsqu'il n'y a pas de turbulences on dit que l'écoulement est laminaire.

La turbulence des fluides obéit à l'équation de **Navier-Stokes**. Cependant, les problèmes d'écoulement sont si complexes qu'il n'est pas possible actuellement de les résoudre numériquement en partant des principes de base. La turbulence est plutôt modélisée à l'aide d'un des nombreux modèles de turbulence et couplée avec un solveur de flux qui suppose que le flux est laminaire en dehors de la région de turbulence. L'étude du Nombre de Reynolds permet de déterminer le caractère turbulent ou laminaire d'un écoulement [47].

### 2.7.12. Autres approximations

Il y a un grand nombre d'autres approximations possibles faces aux problèmes de la dynamique des fluides. Un écoulement de Stokes est l'écoulement d'un fluide dont le nombre de Reynolds est très bas, de sorte que les forces d'inertie peuvent être négligées face aux forces de frottement. L'approximation de « **Boussinesq** » néglige les forces de compression exceptée pour calculer les forces de flottabilité [47].

La résolution de l'équation de **Navier-Stokes** est extrêmement difficile. À la complexité inhérente aux équations aux dérivées partielles s'ajoute celle de la non-linéarité introduite par le terme d'advection de l'accélération. La plupart du temps, on essaie de résoudre une version simplifiée de l'équation en éliminant l'un de ces termes. Par exemple, à faible nombre de Reynolds, on peut négliger le terme advectif (écoulement de Stokes) et à fort nombre de Reynolds, on s'affranchit de la viscosité (équation d'Euler) [47].

## 2.8. Implémentation sous *Fluent*

### 2.8.1. Présentation de *Fluent*

*Fluent* est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une facilité relative. Les types de mailles supportées sont des mailles, en (2D), triangulaires ou quadrilatérales, ou en (3D) tétraédriques, hexaédriques, pyramidales, et

les mailles (hybrides) mélangées. *Fluent* est écrit en langage de **programmation C** et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés, pour une exécution plus efficace [46].

*Fluent* utilise à travers une interface graphique. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures.

Ainsi, à titre non exhaustif, il a les capacités de modélisation suivantes:

- ✓ Ecoulements 2D ou 3D.
- ✓ Etats permanents ou transitoires.
- ✓ Ecoulements incompressibles ou compressibles incluant toute vitesse de régimes (subsoniques, transsoniques, supersoniques et hypersoniques).
- ✓ Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents.
- ✓ Ecoulements Newtonien ou non.
- ✓ Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou radiatif.
- ✓ Les écoulements avec changements de phases.
- ✓ Ecoulements en milieu poreux.

### 2.8.2. Procédure sous *Fluent*

Au chargement du maillage sous *Fluent*, Le logiciel permet de réordonner les nœuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire, pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité de l'accès à la mémoire [46].

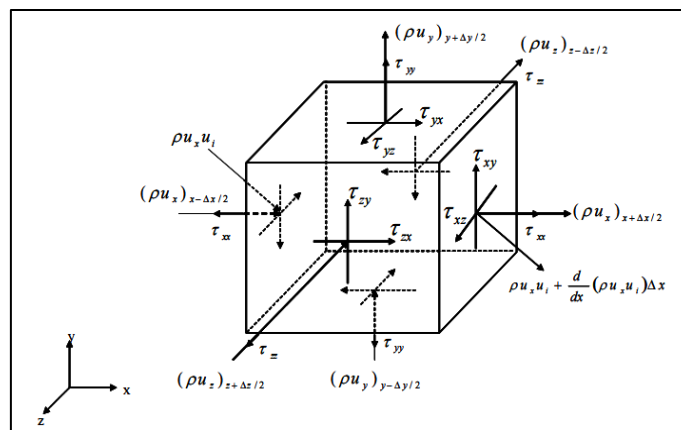


Figure 2.7. Elément d'un fluide [46].

D'après le guide d'utilisation *Fluent* [46], les équations de conservations régissant l'écoulement et les transferts de chaleur sont :

☞ **Équation de continuité**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S \quad (2.8)$$

☞ **Équation de quantité de mouvement**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ji} \right] + B_i + F_i \quad (2.9)$$

Où :

$$\frac{\partial u_l}{\partial x_l} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (2.10)$$

☞ **Équation de l'énergie :**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + P)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j W_j + u_j (\tau_{ji})_{eff} \right) + S_h \quad (2.11)$$

Où :

$$\tau_{ji} = \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ji} \right) \quad (2.12)$$

Et :

$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (2.13)$$

L'enthalpie h est rapprochée par :

$$h = C_p \cdot T \quad (2.14)$$

Ou :

$F_i$  : force de volume,  $B_i$  : force de flottabilité,  $\delta_{ij}$  : fonction de Darcy,  $\tau_{ji}$  : la loi de comportement,  $S_h$  : terme source,  $\sum_j h_j W_j$  : les pertes thermique.

## 2.9. Forme générale des équations de conservation

Les équations de conservations présentées au dessus constituent le système d'équations aux dérivés partielles à résoudre. En principe, chacune de ces équations doit être discrétisée et résolue individuellement pour donner la solution. Cependant, ces équations peuvent toutes s'écrire sous la forme d'une équation de conservation diffusion. Ainsi, si l'on note ( $\phi$ ) la variable étudiée, chacune des équations peut s'écrire sous la forme générale suivante [46] :

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \cdot u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right] + S_\phi \quad (2.15)$$

Ou :

$\Gamma_\phi$  : Coefficient effectif de diffusion.

$\phi$  : la variable.

$S_\phi$  : Terme source net.

Cette formulation permet de ne pas réitérer le travail de discrétisation pour chaque équation. Seule cette équation est discrétisée et le système d'équations aux dérivées partielles est résolu pour chaque valeur successive de ( $\phi$ ) [46].

### Remarque

Étant donné que les principes des méthodes ci-dessus présentées sont détaillés dans tous les livres d'analyse numérique, il n'est pas utile de les rappeler ici. Ce chapitre (2) se limite à la présentation des critères ayant guidé le choix des méthodes numériques et ou des algorithmes employés dans la simulation numérique de cette étude.

## 2.10. La résolution numérique

### 2.10.1. Le schéma de discrétisation

Le code numérique *Fluent* emploie la méthode des volumes finis pour la résolution des systèmes d'équations utilisés pour modéliser les mouvements des fluides. En fait, avec la méthode des volumes finis, un problème physique donné est résolu suivant trois principales étapes [46] :

- ✓ Division du domaine de calcul en volumes de contrôle via un maillage,
- ✓ Intégration des équations sur chaque volume de contrôle afin de les transformer en équations algébriques,
- ✓ Résolution des équations ainsi discrétisées.

### 2.10.1.1. Avantages de la méthode de volume fini

- ❖ Approche très "physique" : bilan des flux
- ❖ S'adapte à une géométrie quelconque
- ❖ Plusieurs schémas pour la résolution des termes non-linéaires hyperboliques
- ❖ Conservative (par sa formulation)
- ❖ La base de tous les codes généraliste en Mécanique des Fluides : *Fluent, CFX...*

### 2.10.1.2. Points clés de la méthode

- ❖ Choix des volumes de contrôle (maillage),
- ❖ Type d'approximation dans les volumes,
- ❖ Schémas numériques pour évaluation des flux.

## 2.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi les équations de l'écoulement dans un milieu poreux, même temps présentés et mis en évidence la manière dont le code de calcul *Fluent* et mis a modélisé un écoulement sous terrain.

Nous avons abordé la méthode de résolution de l'ensemble des équations (conservation de la masse, conservation de quantité de mouvement et Darcy) en qui assurée avec la méthode des volumes finis.

Afin de prédire la distribution du le champ vitesse et la trajectoire des linges de courant (exploitation des résultats avec le post-processeur), nous avons montré qui Fluent utilise la méthode itérative d'Euler implicite.

## ***Chapitre 3 :***

### ***Etude de cas par le CFD***

### 3.1. Introduction

Fluent est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides ou de (*Computational Fluid Dynamics*). Une explication de ses aptitudes, et des instructions pour paramétrer le solveur. Ce logiciel ne fait pas le maillage mais faire apparaître le mouvement de fluide sous différentes formes. Le maillage du modèle considéré se fait à travers le logiciel *Gambit*, sous extension *.FIDAP* pour objectif de faciliter la tâche au logiciel Fluent. Ce dernier est basé sur la méthode des volumes finis, qui permet la résolution des équations qui régissent les écoulements (équation de conservation de la masse, équation de quantité de mouvement). Fluent est associé à Gambit, à l'aide duquel on va définir la géométrie, le maillage, et les conditions aux limites.

Les Travaux Pratiques proposés ont pour objet de présenter les logiciels *Gambit* (mailleur) et *Fluent* (un solveur des équations de Navier-Stokes), de faire des “expériences numérique” sur la simulation des écoulements “élémentaires” et d’analyser les résultats obtenues.

### 3.2. Création de la géométrie du modèle étudié sous *GAMBIT*

Le logiciel *Gambit version 2.3.16* est un mailleur 2D/3D; pré processeur qui permet de mailler les domaines de la géométrie d’un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers mesh pour Fluent.

Le Gambit présente trois fonctions principales qui sont exprimé a :

- définition de la géométrie du modèle,
- le maillage et sa vérification,
- la définition des frontières (des conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

#### 3.2.1. Création des coordonnées des points de la géométrie

Pour définir le modèle on doit mettre des points sur les extrémités du modèle comme il est indiqué sur la figure 3.1.

**Tableau 3.1.** Les coordonnées des points nécessaires pour créer la surface de la géométrie étudiée.

|                       |        |         |           |         |        |        |
|-----------------------|--------|---------|-----------|---------|--------|--------|
| Nombre des points     | 1      | 2       | 3         | 4       | 5      | 6      |
| Les coordonnées(x, y) | (0 ,0) | (100,0) | (100 ,45) | (0 ,45) | (0,25) | (0,20) |

### 3.2.2. Création de la surface de la géométrie étudiée

Sur le logiciel de maillage Gambit, on définit des points de la surface étudiée, on passe à la liaison entre ces points par des lignes pour balayer la surface totale. Dans cette partie on considère un modèle d'étude implémenté sur le Logiciel de maillage *Gambit* avec les caractéristiques suivantes : Longueur  $L=100$  m et largeur de  $l=45$  m, ce modèle est représenté sur la figure 3.1.

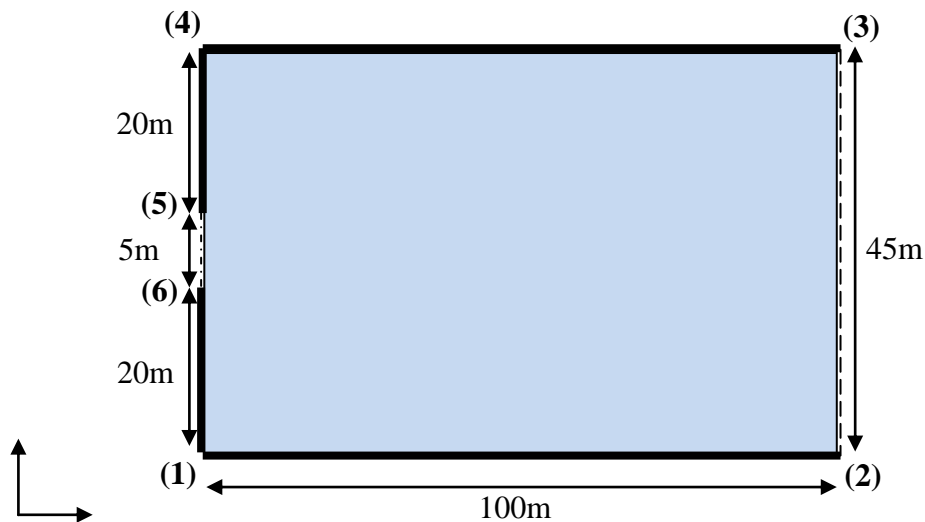


Figure 3.1. La géométrie du modèle choisi.

### 3.2.3. Définition des conditions aux limites

Le modèle considéré est modélisé sous forme des équations différentielle, donc pour comprendre le comportement de notre système on a obligé de donner une solution à ces équations différentielle, alors on doit mettre les conditions aux limites pour concevoir notre modèle. Ces conditions sont regroupées dans le tableau 3.2.

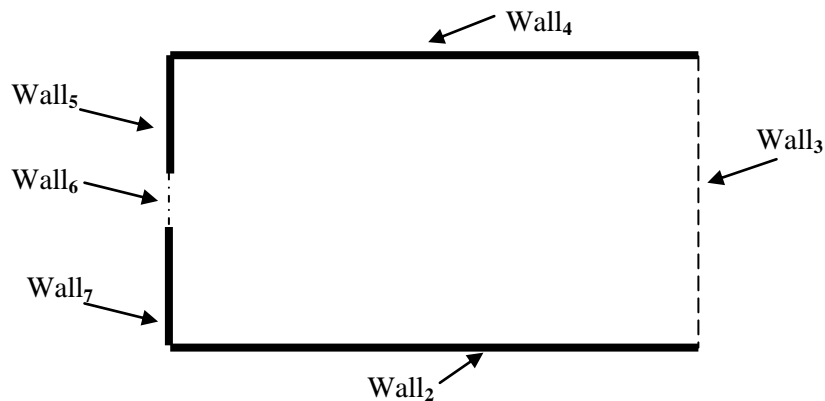


Figure 3.2. Présentation des conditions aux limites.

Tableau 3.2. Définition des conditions aux limites.

| Les parois           | Conditions aux limites                    |
|----------------------|---|
| Paroi 1 ( $Wall_2$ ) | Imperméable (paroi non glissement $V=0$ ) |
| Paroi 2 ( $Wall_3$ ) | Le flux sortant (Out flow)                |
| Paroi 3 ( $Wall_4$ ) | Imperméable (paroi non glissement $V=0$ ) |
| Paroi 4 ( $Wall_5$ ) | Imperméable (paroi non glissement $V=0$ ) |
| Paroi 5 ( $Wall_6$ ) | Le flux entrant (Velocity inlet)          |
| Paroi 6 ( $Wall_7$ ) | Imperméable (paroi non glissement $V=0$ ) |

### 3.3. Implantation du modèle étudié sous Fluent

Sur le logiciel de calcul *Fluent version 6.3.26*, il faut qu'on définie les caractéristiques du fluide, dans notre cas est l'eau d'une part, et du milieu poreux de l'autre part.

Après la détermination des caractéristiques du fluide et du milieu poreux on fait appelle au fichier *.FIDAP*, qui contient les paramètres du modèle et les caractéristiques de notre problème, après cette étape, on passe a la résolution de ce problème par le logiciel Fluent qui nous donne des résultats à être interpréter et discuter.

#### 3.3.1. Influence de taille de maillage sur le nombre des éléments

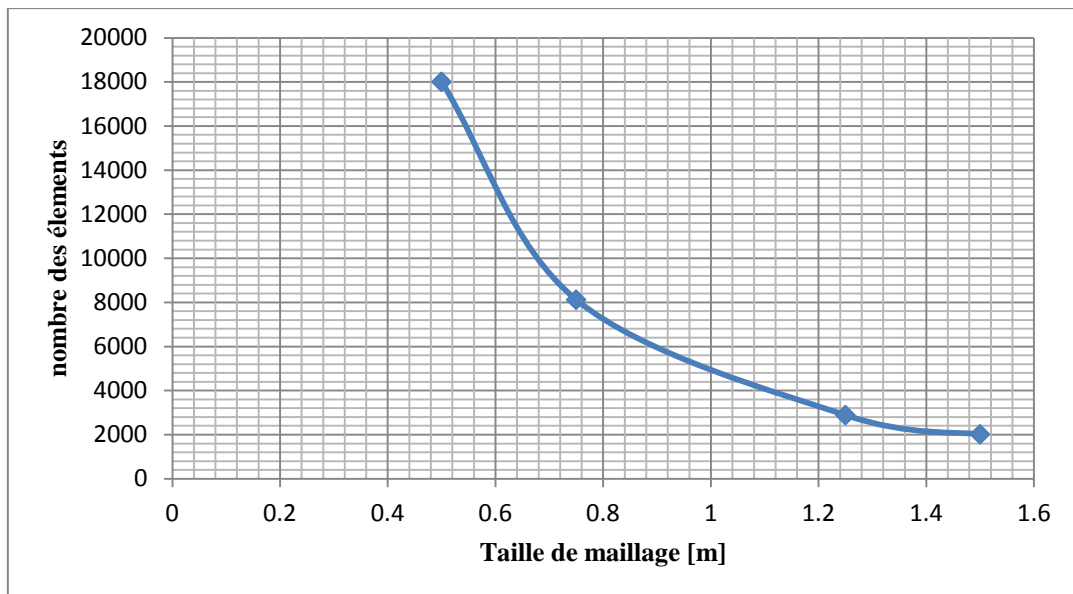
La géométrie de maillage est basée essentiellement sur deux types, le premier est appelé maillage structuré, le deuxième est le maillage non structuré. Dans notre étude on considère que le maillage structuré a cause de sa facilité et parce que notre domaine d'étude a une forme rectangulaire donc il est facile de le partagé a des petite carreaux (quadra) d'étude.

Afin de choisir le type de maillage, on a choisi quatre (04) dimensions de maillage qui sont illustrés sur le tableau 3, le premier cas prend une taille de  $\Delta x = \Delta y = 0.5$  [m], dans ce cas la on obtient un nombre des éléments de 18000 éléments, le deuxième prend une taille de  $\Delta x = \Delta y = 0.75$  [m] et un nombre des éléments de 8113 éléments, le troisième et le quatrième sont présentés respectivement avec des tailles de  $\Delta x = \Delta y = 1.25$  [m] et  $\Delta x = \Delta y = 1.5$  [m], et le nombres des éléments correspondants a ces tailles est de 2880 et 2010 éléments respectivement.

**Tableau 3.3.** La relation entre la dimension de maillage et le nombre des éléments.

|                           | $M_1$  | $M_2$ | $M_3$ | $M_4$ |
|---------------------------|--------|-------|-------|-------|
| $\Delta x = \Delta y$ [m] | 0.5    | 0.75  | 1.25  | 1.5   |
| nombre des éléments       | 18 000 | 8 113 | 2 880 | 2 010 |

Pour mieux comprendre la variation des nombre des éléments en fonction de la taille choisie, les valeurs récapitulées sur le tableau 3.3, sont présentés par la figure 3.3.

**Figure 3.3.** Variation des nombres des éléments en fonction de la taille de maillage.

### 3.3.2. Etude de convergence de la solution

On a fixé un point de référence pour objectif de connaître le nombre d'itérations réalisées pour avoir la convergence des solutions. Ce point est situé à 5 m de la source et a distance de 22.5 m de la paroi du modèle étudié, voir la figure 3.4. Afin de fixer ce point de référence, la précision du calcul a été choisie de 5 chiffres après la virgule ( $1E-05$ ), suit à la figure 3.5, il est clair que après la 32<sup>ème</sup> itération la valeur de la vitesse se fixe autour de la valeur  $8.5E-05$  et se dure jusqu'à la 36<sup>ème</sup> itération, a ce point la on obtient la convergence des solutions.

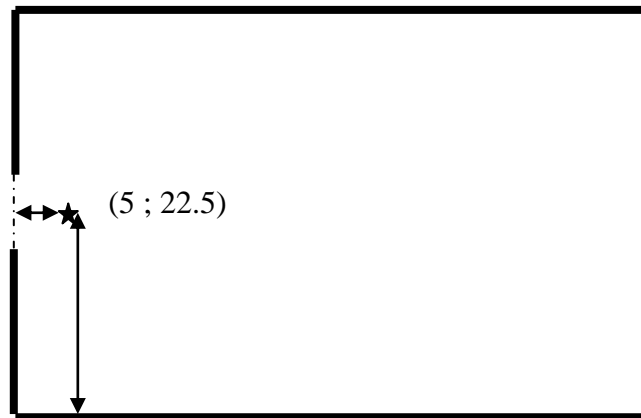


Figure 3.4. Positionnement du point de référence

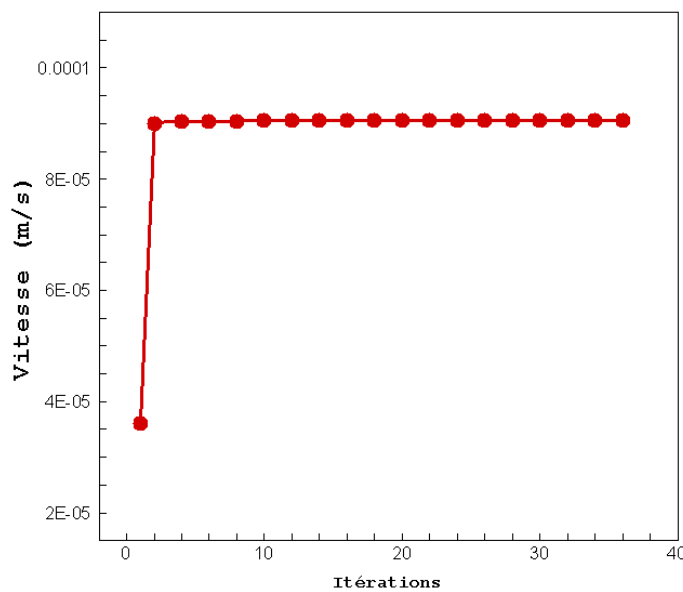


Figure 3.5. Évolution de la vitesse en fonction de nombre des itérations

### 3.3.3. Sensibilité de maillage

Selon les tailles de maillage considéré précédemment on peut tracer l'évolution de la vitesse d'eau en fonction de la largeur de la nappe par rapport aux lignes de référence a distance de 5 m a la source qui a une taille de 5 m, on constate que par la variation de la taille de maillage, la forme des quatre courbes est quasiment identique où ils ont une forme parabolique, de telle sorte que ses deux extrémités ont une valeur de vitesse nulle parce que les deux parois sont imperméable, de l'autre part la valeur maximale de la vitesse est au milieu de largeur du modèle choisi, figure 3.6.

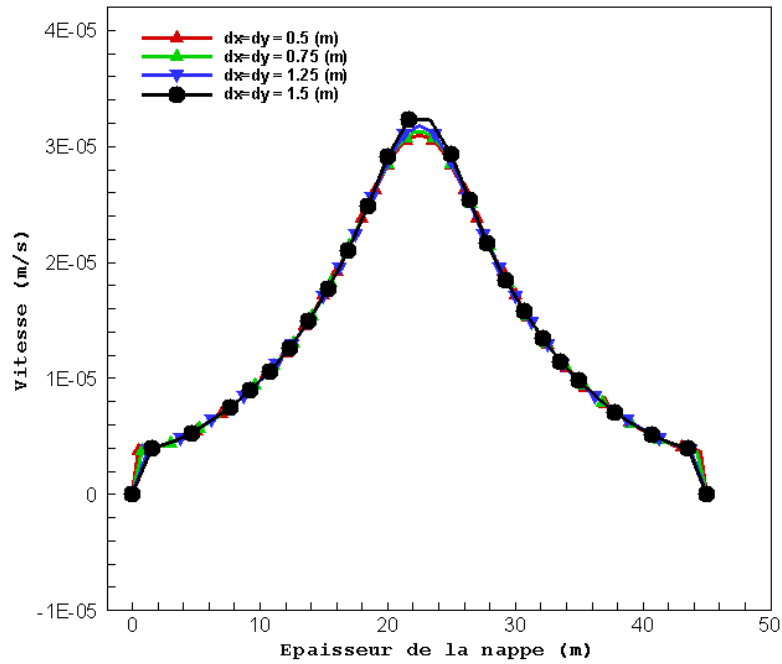


Figure 3.6. L'évolution de la vitesse en fonction de la largeur de la nappe pour différentes taille de maillage.

La figure 3.7 est un zoom d'une partie de la figure 3.6, on remarque qu'il y a une petite erreur (0.07% jusqu'à 0.31%). En effet, on peut choisir n'importe quel maillage parce qu'il n'est pas une grande différence entre ces configurations de maillage.

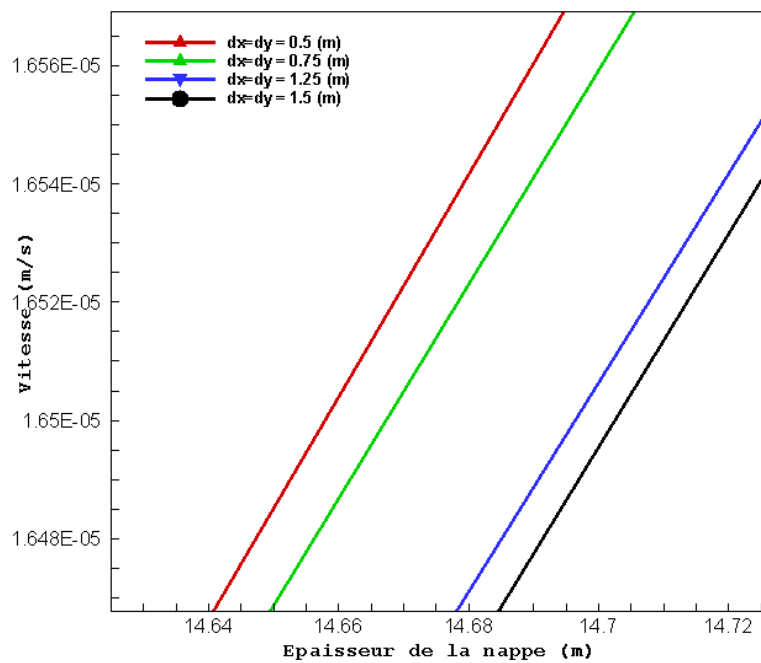


Figure 3.7. Erreur relatif de la vitesse pour des différents maillages.

Le calculer l'erreur absolu a été calculer par l'équation suivante (3.4) :

$$Erreur = \frac{|v_f - v_i|}{v_f} (\%) \quad (3.1)$$

**Tableau 3.4.** Teste de maillage.

| Maillage      | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$  | $M_4$  |
|---------------|-------|-------|--------|--------|
| $d_x=d_y$ (m) | 0.5   | 0.75  | 1.25   | 1.5    |
| $V_i$ (m/s)   | 14.64 | 14.65 | 14.678 | 14.685 |
| Erreur (%)    | -     | 0.07% | 0.26%  | 0.31%  |

Si nous augmentons le nombre de nœuds, alors nous diminuons les erreurs dues aux interpolations entre les nœuds, et la solution numérique est plus proche de la réalité. Nous avons aussi noté que le temps de calcul augmente avec la finesse du maillage, mais cette augmentation n'est pas significative pour les maillages choisis dans nos simulations (Erreur < 1%), tableau 3.4.

### 3.3.4. Test de validation de l'écoulement de Darcy

En utilisant l'équation (1.22) mentionnée dans le premier chapitre pour calculer le nombre de Reynolds :

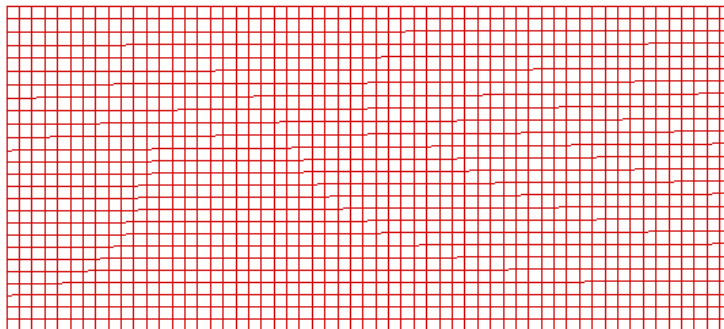
$$R_e = \frac{10^{-4} \times 2 \times 10^{-3} \times 103}{10^{-3}}$$

$$R_e = 2.06 \times 10^{-2} \quad \Rightarrow \quad R_e \ll 1$$

Le résultat présenté par ce calcul, montre que les valeurs prises par la chute de pression sont indépendantes par rapport au taux de filtration, le nombre de  $R_e$  reste toujours inférieur à 1. Ainsi, le critère de Darcy est systématiquement validé dans cette problématique

### 3.3.5. Choix du maillage du cas étudié

Basant sur la comparaison de l'évolution de la vitesse en fonction de la largeur de la nappe pour différentes taille de maillage, on voit que l'allure de la vitesse est presque identique pour les différentes tailles de maillage et pour cette raison on a choisi le maillage le plus fin pour obtenir une bonne précision.



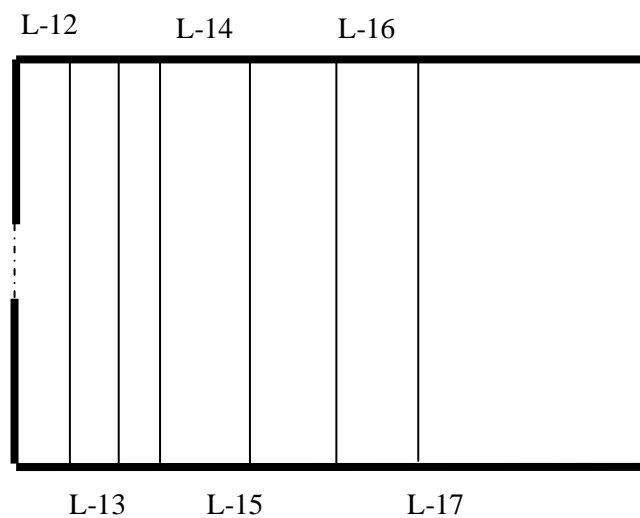
**Figure 3.8.** Illustration du maillage choisi.

### 3.3.6. Étude de la vitesse résultante

Pour voir le comportement de la vitesse à travers le modèle considéré, on a adopté plusieurs lignes de référence à distance de **5, 10, 15, 25, 45** et **60 m** à la source. Ces valeurs sont récapitulées au tableau 3.5. Et sont illustrés sur la figure 3.9.

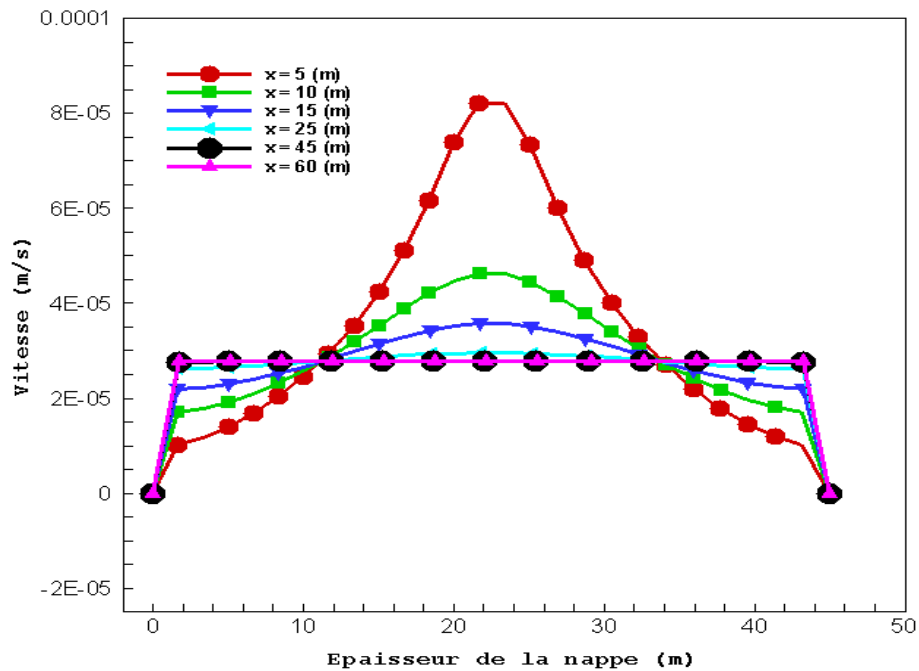
**Tableau 3.5.** Choix des lignes de référence.

|       | Ligne 12 | Ligne 13 | Ligne 14 | Ligne 15 | Ligne 16 | Ligne 17 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $M_1$ | 5m       | 10m      | 15m      | 25m      | 45m      | 60m      |



**Figure 3.9.** Position des lignes de référence.

La figure 3.10 présente la variation de la vitesse résultante en fonction de la largeur de la nappe pour différentes distances des lignes de référence. On constate que pour la ligne de référence de 5 m la vitesse a une forme parabolique où la valeur maximale de  **$8.2E-05$**  est atteinte au milieu de la largeur, et par l'augmentation de la distance entre les lignes de référence par rapport à la source on remarque la crête de la forme parabolique de la vitesse commence à se diminuer jusqu'à ce qu'il se stabilise sous une forme rectangulaire. Les extrémités de tous ces vitesses ont une valeur nulle à cause de l'imperméabilité des parois.



**Figure 3.10.** Variation de la vitesse résultante en fonction de la largeur de la nappe pour différentes lignes de référence.

### 3.3.7. Etude de la vitesse verticale ( $V_y$ )

Sur la figure 3.11 on trace la vitesse verticale  $V_y$  en fonction de la porosité à la ligne de référence 5m, on remarque différentes valeur de porosité qui sont **20%**, **40%**, **60%** et **80%** respectivement. La vitesse est bidirectionnelle, alors elle se varie sur le plan positif et sur le plan négatif donc la vitesse a la même allure sur les deux plans sauf qu'une convention de signe.

D'après cette figure on constate que dans le cas de porosité de **20%** la vitesse maximale est de **-7E-05** sur le plan négatif et **7E-05** sur le plan positif, la valeur élevée de la vitesse est due à la petite surface de la matrice solide, de cet effet, on obtient un faible frottement entre les particules solides et liquides.

On constate que du moment qu'on augmente la porosité du milieu la valeur crête de la vitesse se diminue à cause de l'élévation du frottement entre les particules liquides et solides.

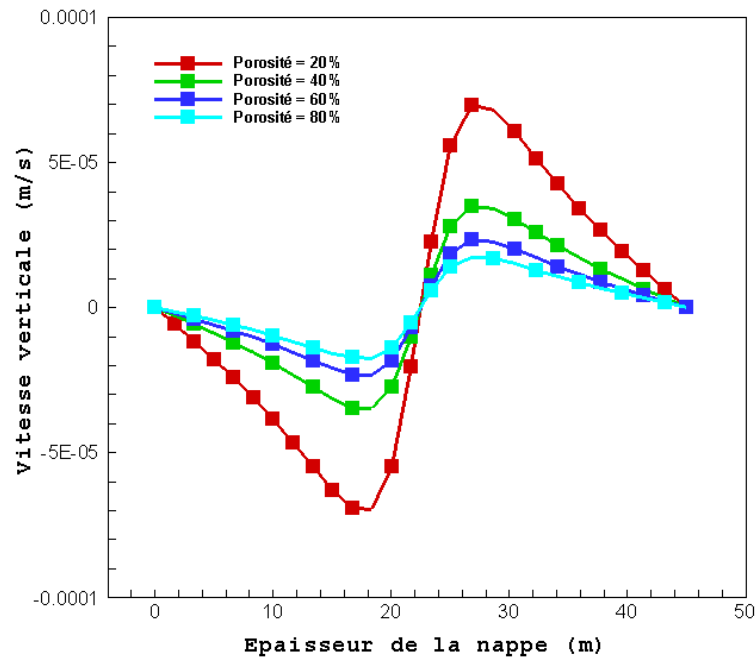


Figure 3.11. Variation de la vitesse verticale  $V_y$  en fonction de la largeur de la nappe pour différentes porosité.

### 3.3.8. Etude de la vitesse horizontale ( $V_x$ )

Dans cette partie on considère une ligne de référence horizontale au milieu de la source et sur toute la longueur du modèle étudié, cette configuration est représentée sur la figure 3.12.

Le comportement de la vitesse horizontale  $V_x$  en fonction de la longueur de la nappe par rapport à la ligne de référence ( $y=22.5$ ). On voit que la vitesse départ d'un point très élevée de  $2.8 E-04$  et commence à se diminuer jusqu'à se stabilise à une valeur constante, voir la figure 3.13.

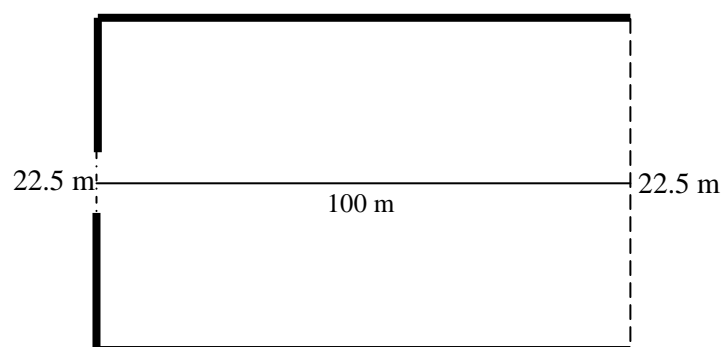


Figure 3.12. Choix de la ligne de référence horizontale.

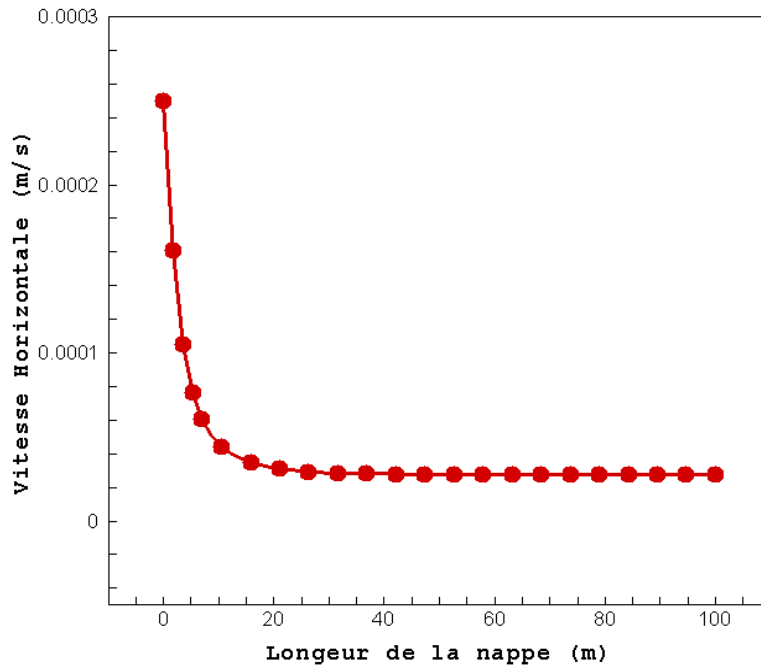


Figure 3.13. Comportement de la vitesse horizontale  $V_x$  en fonction de la longueur de la nappe.

### 3.3.9. Champ des lignes de courant

Les lignes de courant sont représentées sur la figure 3.14, on remarque que ces lignes sont parallèles parce que l'écoulement d'eau est laminaire, cet effet est assuré par le nombre de Reynolds ( $Re \ll 1$ ), les lignes du courant au côté supérieurs sont identiques à ceux du côté inférieur.

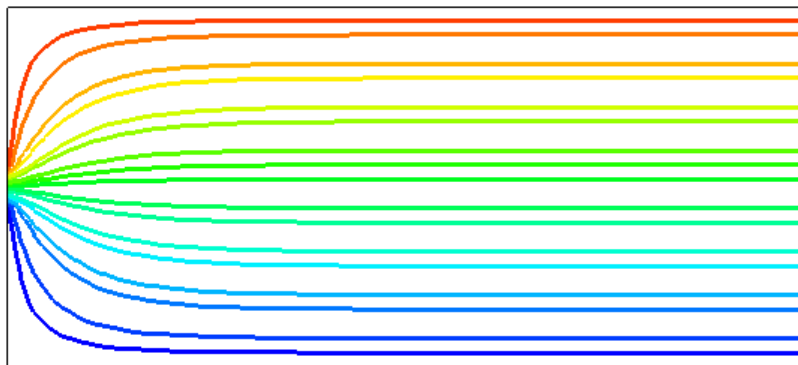


Figure 3.14. Représentation des les lignes de courant

### 3.3.10. Champ de la vitesse résultante

La figure 3.15 montre le comportement de la vitesse au long du modèle choisi sous forme contour, on voit que la vitesse a une forme parabolique a coté de la source et sa valeur maximale va a diminué si on s'éloigne de la source jusqu'à quand la vitesse atteinte une valeur

constante, de l'autre côté la vitesse au bord des deux parois est nulle parce que les parois sont imperméable.

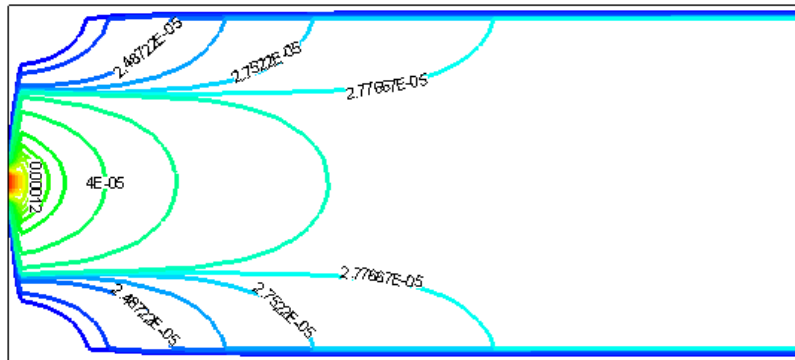


Figure 3.15. Représentation le champ de la vitesse résultante.

### 3.4. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la discussion des résultats obtenus par le logiciel de simulation *Fluent*, correspondant au modèle considéré. On a proposé plusieurs configurations de maillage sous le logiciel *Gambit* qui ont le même comportement de vitesse et pour cela on a choisi le maillage le plus fin pour avoir une meilleure précision.

L'écoulement de Darcy est vérifié. Il est assuré par le nombre de Reynolds, D'après l'interprétation des résultats obtenus, on conclut que la vitesse de l'eau a une forme parabolique quand elle est près de la source et a une forme carré lorsqu'on s'éloigne de la source. La variation de la porosité a une influence directe sur la vitesse verticale.

---

*Conclusion  
générale*

---

## **Conclusion générale**

Une étude paramétrique est proposée pour déterminer le comportement dynamique d'un écoulement souterrain complètement développé dans une nappe captive alimentée par un débit et dans des divers sens. Pour traiter la problématique proposée, on a utilisé un code du champ dynamique CFD (Fluent), qui est basé sur la résolution des équations de bases (conservation de la masse et conservation de quantité de mouvement) couplées par l'équation de Darcy.

Une généralité sur les écoulements souterraine a été présentée, l'objective ce celle-ci est de comprendre les phénomènes mis en jeu pour les types d'écoulements des eaux dans les aquifères et le comportement dynamique (vitesse et pression) à travers une interaction entre la géologie et l'Hydrogéologie.

La simulation permise d'effectuer l'analyse du problème dans des conditions réalistes. Ainsi, elle accroît le champ des tests pour un système.

A travers la simulation, le système étudié devient plus flexible. On peut plus facilement faire des études paramétriques. L'utilisation peut aussi faire varier l'échelle de temps pour une étude, ce qui est impossible par ailleurs.

La simulation se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatiques. Ces derniers sont couramment appelés des environnements de simulation, on cite par exemple le code de simulation Fluent qui a été choisi pour la présente étude.

Cette simulation sur le comportement d'un écoulement dans une nappe homogène et isotrope par la résolution numérique des équations de base des quantités de mouvements de Navier-Stokes couplés par la loi de Darcy, nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- L'écoulement de Darcy est systématiquement validé par un calcul du nombre de  $R_e$  qui reste toujours inférieur à 1 (pour notre cas :  $R_e = 2.06 \times 10^{-2}$ ) ;
- Le comportement de l'écoulement est influencé par plusieurs facteurs physiques et géologiques ;
- La matrice solide du milieu empêche le déplacement de l'eau dans la nappe.

---

*Références  
bibliographiques*

---

## Références bibliographiques

- [1] Castany, G. (1982). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie* (No. BOOK). Bordas.
- [2] [Http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/cycle Eeau.html](http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/cycle%20Eeau.html).
- [3] Detay, M. (1997). *La gestion active des aquifères* (Vol. 416). Paris: Masson.
- [4] Bear, J. (1979). Groundwater hydraulics.
- [5] Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology journal*, 13(1), 148-160.
- [6] <https://www.oieau.fr/actualites/oieau/developper-les-competences-pour-mieux-gerer-leau>,  
Mis à jour : 23/02/2013
- [7] CARLIER, M. (1982). *Hydraulique générale et appliquée*. Eyrolles (Paris)
- [8] Besnard, K. (2003). *Modélisation du transport réactif dans les milieux poreux hétérogènes. Application aux processus d'adsorption cinétique non linéaire* (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).
- [9] Schneebeli, G. (1987). *Hydraulique souterraine*.
- [10] Bouali, H., Boutouta, Y., & Bendahmane, I. (2017). *Etudes expérimentale et simulation numérique de l'écoulement dans les milieux poreux (Application Nappe libre-Nappe captive)* (Doctoral dissertation, Université abderrahmane mira béjaia).
- [11] Costet, J., Sanglerat, G., Biarez, J., & Lebelle, P. (1969). *Cours pratique de mécanique des sols*. Dunod.
- [12] Brouyère, S. (2007). *Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé*.
- [13] Cosandey, C., & Robinson, M. (2012). *Hydrologie continentale*. Armand Colin.
- [14] Castany, G. (1967). *Traité pratique des eaux souterraines*.
- [15] Ibrahim, BENDAHMANE. (2010), *Modélisation et simulation numérique de l'écoulement dans un milieu poreux: Application pour la nappe alluviale du Sébaou Tizi Ouzou en vue de la prévision du niveau d'eau dans chaque période de l'année*. Université de Bejaia
- [16] Ambroise, B. (1999). *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modeles*, Editions\* H\* G\* A, Bucarest.
- [17] <https://www.oieau.fr/actualites/oieau/developper-les-competences-pour-mieux-gerer-leau>
- [18] Yra, A. (2006). *Dispersion active en milieux poreux hétérogènes contaminés par des produits hydrocarbonés* (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).
- [19] Ait Abbas, R. et Boudha, K. (2001), *Etude des infiltrations à travers un milieu poreux : application au cas d'un barrage en terre*. Mémoire de fin d'études, Université Abderrahmane Mira de Bejaia

- [20] Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier.
- [21] Cassan, M. (1993). *AIDE-MEMOIRE D'HYDRAULIQUE SOUTERRAINE (2E EDITION)*.
- [22] Besnard, K. (2003). *Modélisation du transport réactif dans les milieux poreux hétérogènes. Application aux processus d'adsorption cinétique non linéaire* (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).
- [23] Hillel, D., & De Backer, L. W. (1988). *L'eau et le sol: principes et processus physiques*. Academia.
- [24] Banton, O., & Bangoy, L. M. (2010). *Hydrogéologie: multiscience environnementale des eaux souterraines*. Montréal.
- [25] Chavent, G., & Jaffré, J. (1986). Dynamics of fluids in porous media.
- [26] Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263(5147), 641-646.
- [27] Bradley, C. (1996). Transient modelling of water-table variation in a floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire. *Journal of Hydrology*, 185(1-4), 87-114.
- [28] Barone, V. A. (2000). *Modeling the impacts of land use activities on the subsurface flow regime of the Upper Roanoke River Watershed* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [29] Su, M., Stolte, W. J., & Van der Kamp, G. (2000). Modelling Canadian prairie wetland hydrology using a semi-distributed streamflow model. *Hydrological Processes*, 14(14), 2405-2422.
- [30] Bradley, C. (2002). Simulation of the annual water table dynamics of a floodplain wetland, Narborough Bog, UK. *Journal of Hydrology*, 261(1-4), 150-172.
- [31] Meriano, M., & Eyles, N. (2003). Groundwater flow through Pleistocene glacial deposits in the rapidly urbanizing Rouge River–Highland Creek watershed, City of Scarborough, southern Ontario, Canada. *Hydrogeology Journal*, 11(2), 288-303.
- [32] Weng, P., Giraud, F., Fleury, P., & Chevallier, C. (2002). Characterising and modelling groundwater discharge in an agricultural wetland on the French Atlantic coast. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7(1), 33-42.
- [33] Zhang, L., & Mitsch, W. J. (2005). Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach. *Environmental Modelling & Software*, 20(7), 935-946.
- [34] Joris, I., & Feyen, J. (2003). Modelling water flow and seasonal soil moisture dynamics in an alluvial groundwater-fed wetland. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7(1), 57-66.
- [35] Mansell, R. S., Bloom, S. A., & Sun, G. (2000). A model for wetland hydrology: description and validation. *Soil Science*, 165(5), 384-397.

- [36] Saltel, M. (2008). *Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds-Fonctionnement hydrogéologique des antiformes du sud de Bordeaux* (Doctoral dissertation, Université Michel de Montaigne-Bordeaux III).
- [37] Chapuis, R. P., Crespo, R., Chenaf, D., & Aubertin, M. (1993, September). Evaluation of a groundwater FEM software for steady and unsteady state conditions. In *Proceedings of the 46th Canadian Geotechnical Conference, Saskatoon, Sask* (pp. 27-29).
- [38] Crespo, R. (1993). *Modelisation par elements finis des écoulements a travers les ouvrages de retenue et de confinement des residus miniers. M. Sc. A* (Doctoral dissertation, thesis, Ecole Polytechnique de Montreal, Montreal).
- [39] Anaya, R., & Wanakule, N. (1993). *A lumped parameter model for the Edwards Aquifer*. Texas Water Resources Institute.
- [40] Varlet, H. (1966). *Barrages-réservoirs* (No. 627.8 V3).
- [41] Batu, V. (1998). *Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis*. John Wiley & Sons.
- [42] Taillet, M. R., Febvre, M. P., & Villain, M. L. (2009). *Dictionnaire de physique*. De Boeck Supérieur.
- [43] Bouchelghoum, et Aid, M., (2002). *Etude numérique des écoulements souterrains par la méthode des éléments finis : application au cas d'un barrage en terre*. Mémoire de fin d'Etudes, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [44] Hamail, K., *calcul numérique des infiltrations à travers les digues en terres par la méthode des éléments finis*. Mémoire de fin d'études, Université de Blida, 2001.
- [45] Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*: Englewood Cliffs. *New Jersey*.
- [46] Marshall, E. M., & Bakker, A. (2004). Computational fluid mixing. *Handbook of industrial mixing: science and practice*, 257-343.
- [47] Guyon, E., Hulin, J. P., & Petit, L. (1994). *Hydrodynamique physique* (No. BOOK). interéditions.

---

# *Annexes*

---

## A.1. Etapes de résolution de la problématique sous Fluent

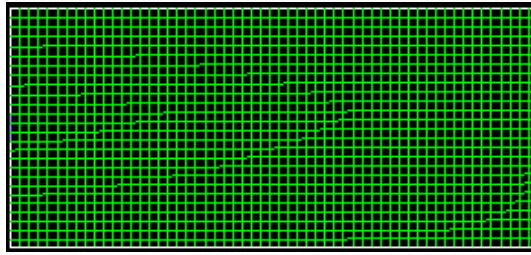


Figure A. 1. Maillage choisi pour la simulation.

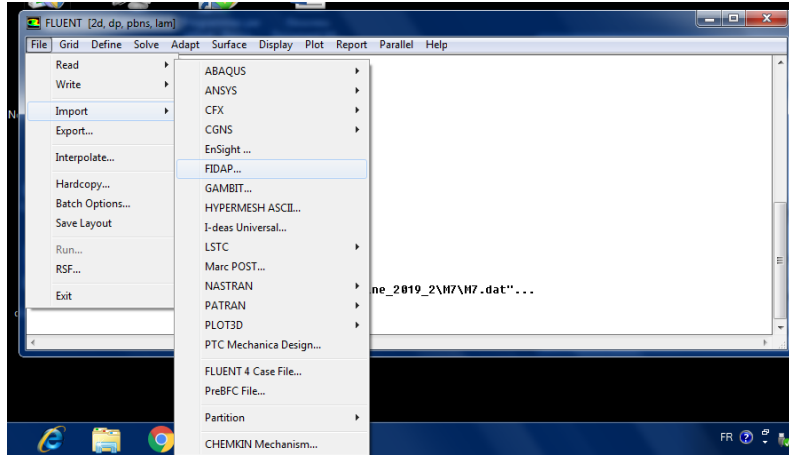


Figure A. 2. Implantation du maillage sous Fluent (File – Import - Fidap...).

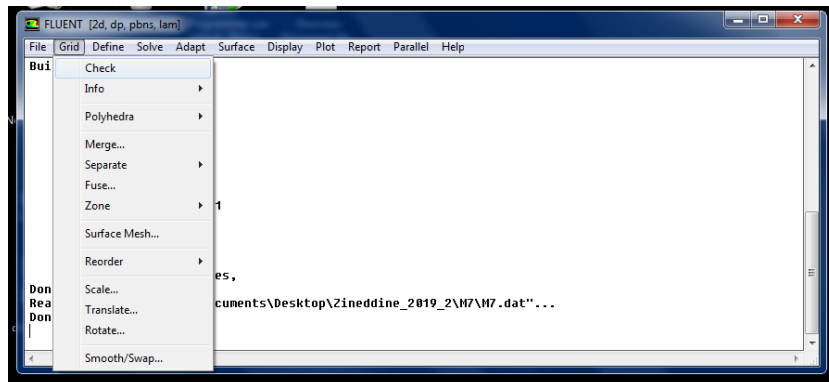


Figure A. 3. Vitrification de la qualité du maillage (Grid - Chek).

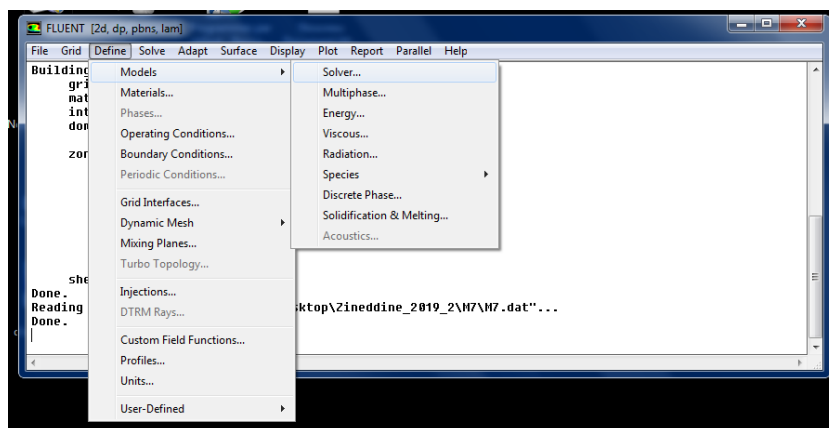


Figure A. 4. Choix du solveur du calcul (Defien – Models – Solver...).

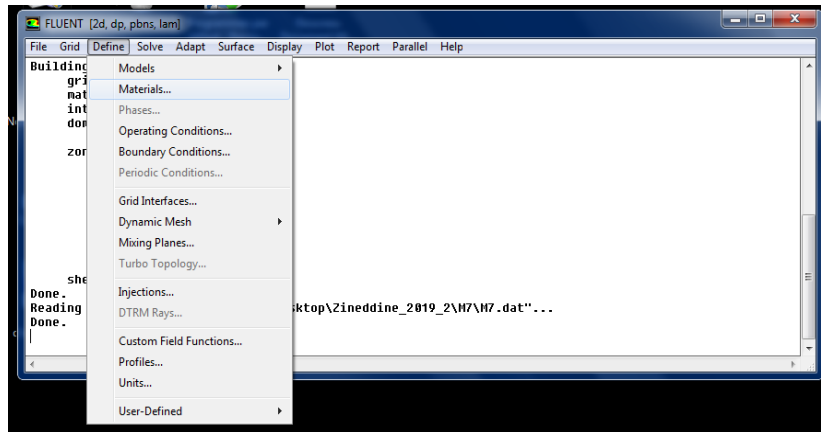


Figure A. 5. Choix des propriétés physique du matériau (Define – Materials).

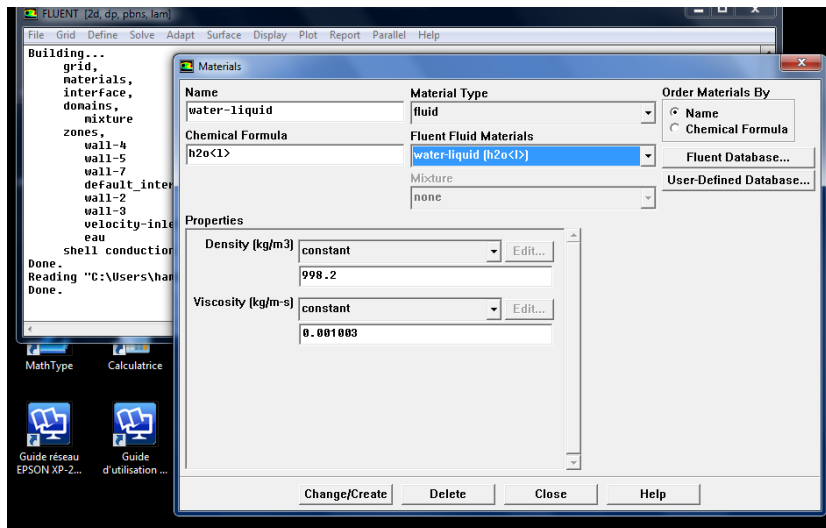


Figure A. 6. Matériau choisi pour la simulation (Water liquid).

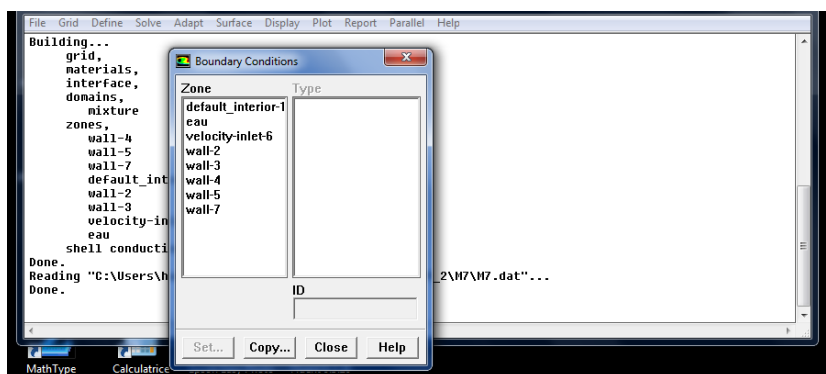


Figure A. 7. Conductions au limites de la problématique étudiée.

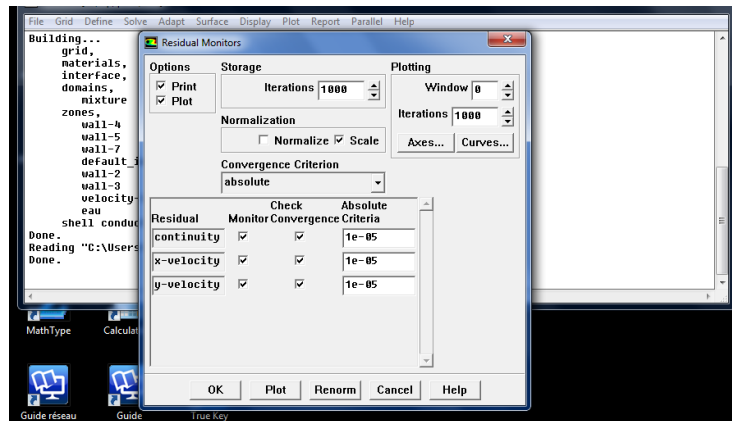


Figure A. 8. Résidus d'arrêt du calcul itératif.

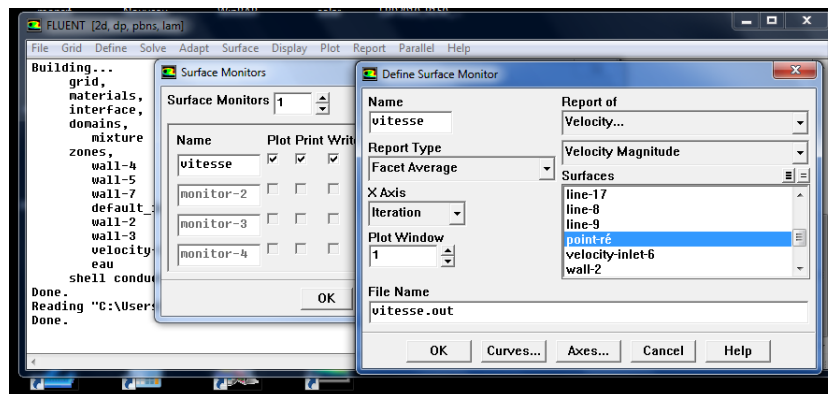


Figure A. 9. Point de référence pour suivre la stationnarité de la solution (convergence).

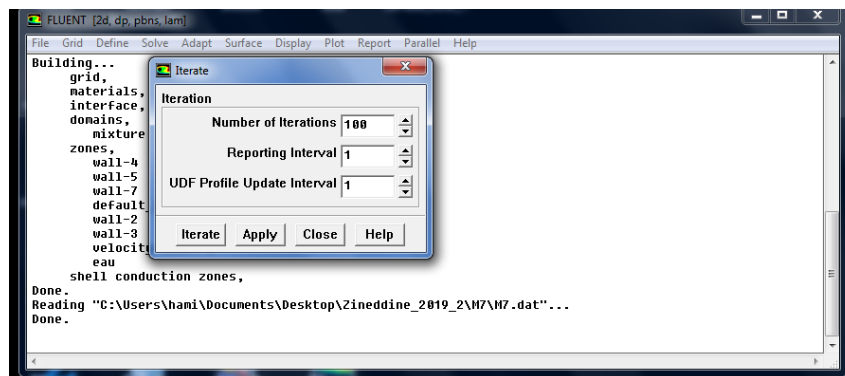


Figure A. 10. Lancement du calcul itératif.

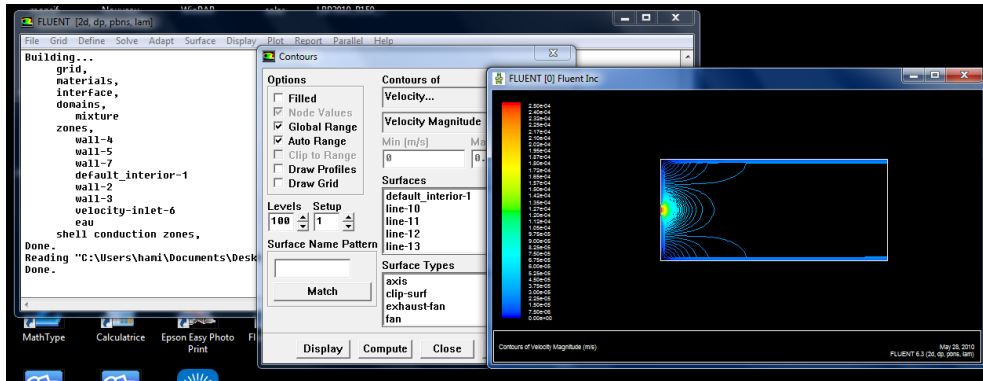


Figure A. 11. Visualisation des résultats sous forme des contours (champ de vitesse).

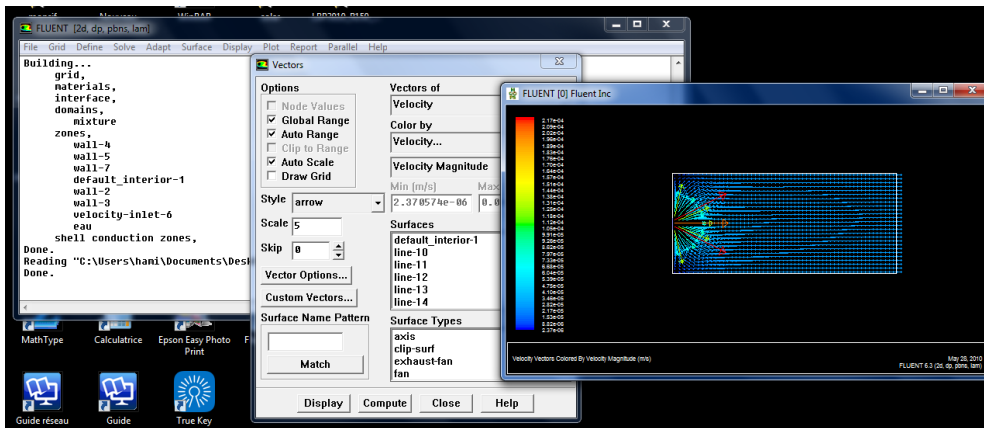


Figure A. 12. Visualisation des résultats sous forme des vecteurs (vecteur vitesse).

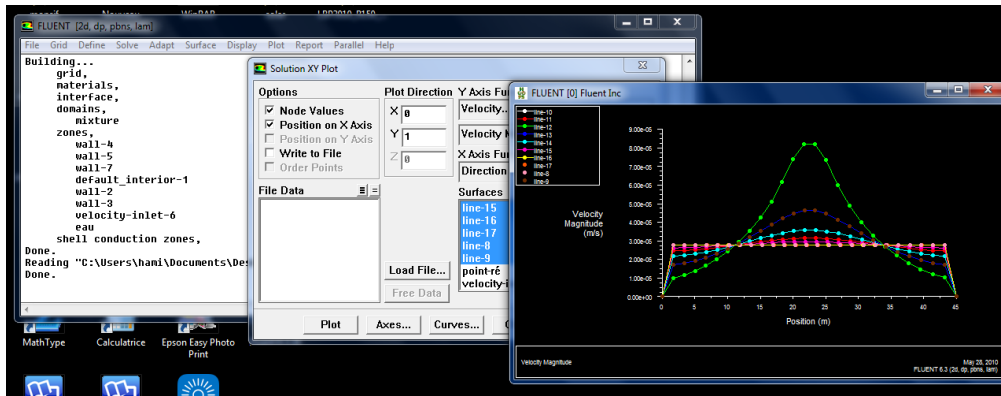


Figure A. 13. Visualisation des résultats sous forme des courbes (x/y).

## A.2. Rapport du bilan test de la simulation

FLUENT

Version: 2d, dp, pbns, lam (2d, double precision, pressure-based, laminar)

Release: 6.3.26

Title:

Models

-----

| Model                      | Settings |
|----------------------------|----------|
| Space                      | 2D       |
| Time                       | Steady   |
| Viscous                    | Laminar  |
| Heat Transfer              | Disabled |
| Solidification and Melting | Disabled |
| Species Transport          | Disabled |
| Coupled Dispersed Phase    | Disabled |
| Pollutants                 | Disabled |
| Pollutants                 | Disabled |
| Soot                       | Disabled |

Boundary Conditions

-----

Zones

| name               | id | type           |
|--------------------|----|----------------|
| eau                | 1  | fluid          |
| velocity-inlet-6   | 6  | velocity-inlet |
| wall-3             | 5  | outflow        |
| wall-2             | 2  | wall           |
| default_interior-1 | 3  | interior       |
| wall-7             | 4  | wall           |
| wall-5             | 7  | wall           |
| wall-4             | 8  | wall           |

Boundary Conditions

eau

Condition

Value

-----  
-----

Material Name

water-liquid

Specify source terms?

no

Source Terms

((mass) (x-momentum) (y-momentum))

Specify fixed values?

no

Fixed Values

((x-

velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity  
(inactive . #f) (constant . 0) (profile )))

```

Motion Type 0
X-Velocity Of Zone (m/s) 0
Y-Velocity Of Zone (m/s) 0
Rotation speed (rad/s) 0
X-Origin of Rotation-Axis (m) 0
Y-Origin of Rotation-Axis (m) 0
Deactivated Thread no
Porous zone? yes
X-Component of Direction-1 Vector 1
Y-Component of Direction-1 Vector 1
Relative Velocity Resistance Formulation? yes
Direction-1 Viscous Resistance (1/m2)
1e+08
Direction-2 Viscous Resistance (1/m2)
1e+08
Choose alternative formulation for inertial resistance? no
Direction-1 Inertial Resistance (1/m) 0
Direction-2 Inertial Resistance (1/m) 0
C0 Coefficient for Power-Law 0
C1 Coefficient for Power-Law 0
Porosity
0.40000001

```

velocity-inlet-6

| Condition                           | Value         |
|-------------------------------------|---------------|
| Velocity Specification Method       | 0             |
| Reference Frame                     | 0             |
| Velocity Magnitude (m/s)            | 9.9999997e-05 |
| X-Velocity (m/s)                    | 0             |
| Y-Velocity (m/s)                    | 0             |
| X-Component of Flow Direction       | 1             |
| Y-Component of Flow Direction       | 0             |
| X-Component of Axis Direction       | 0             |
| Y-Component of Axis Direction       | 0             |
| Z-Component of Axis Direction       | 1             |
| X-Coordinate of Axis Origin (m)     | 0             |
| Y-Coordinate of Axis Origin (m)     | 0             |
| Z-Coordinate of Axis Origin (m)     | 0             |
| Angular velocity (rad/s)            | 0             |
| is zone used in mixing-plane model? | no            |

wall-3

| Condition           | Value |
|---------------------|-------|
| Flow rate weighting | 1     |

wall-2

| Condition  | Value |
|--|-------|
| Wall Motion  | 0     |
| Shear Boundary Condition                           | 0     |
| Define wall motion relative to adjacent cell zone? | yes   |
| Apply a rotational velocity to this wall?          | no    |
| Velocity Magnitude (m/s)                           | 0     |

|  |    |
|--|----|
| X-Component of Wall Translation        | 1  |
| Y-Component of Wall Translation        | 0  |
| Define wall velocity components?       | no |
| X-Component of Wall Translation (m/s)  | 0  |
| Y-Component of Wall Translation (m/s)  | 0  |
| Rotation Speed (rad/s)                 | 0  |
| X-Position of Rotation-Axis Origin (m) | 0  |
| Y-Position of Rotation-Axis Origin (m) | 0  |
| X-component of shear stress (pascal)   | 0  |
| Y-component of shear stress (pascal)   | 0  |
| Specularity Coefficient                | 0  |

default\_interior-1

| Condition | Value |
|-----------|-------|
| -----     | ----- |

wall-7

| Condition  | Value |
|--|-------|
| -----  | ----- |
| Wall Motion  | 0     |
| Shear Boundary Condition                           | 0     |
| Define wall motion relative to adjacent cell zone? | yes   |
| Apply a rotational velocity to this wall?          | no    |
| Velocity Magnitude (m/s)                           | 0     |
| X-Component of Wall Translation                    | 1     |
| Y-Component of Wall Translation                    | 0     |
| Define wall velocity components?                   | no    |
| X-Component of Wall Translation (m/s)              | 0     |
| Y-Component of Wall Translation (m/s)              | 0     |
| Rotation Speed (rad/s)                             | 0     |
| X-Position of Rotation-Axis Origin (m)             | 0     |
| Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)             | 0     |
| X-component of shear stress (pascal)               | 0     |
| Y-component of shear stress (pascal)               | 0     |
| Specularity Coefficient                            | 0     |

wall-5

| Condition  | Value |
|--|-------|
| -----  | ----- |
| Wall Motion  | 0     |
| Shear Boundary Condition                           | 0     |
| Define wall motion relative to adjacent cell zone? | yes   |
| Apply a rotational velocity to this wall?          | no    |
| Velocity Magnitude (m/s)                           | 0     |
| X-Component of Wall Translation                    | 1     |
| Y-Component of Wall Translation                    | 0     |
| Define wall velocity components?                   | no    |
| X-Component of Wall Translation (m/s)              | 0     |
| Y-Component of Wall Translation (m/s)              | 0     |
| Rotation Speed (rad/s)                             | 0     |
| X-Position of Rotation-Axis Origin (m)             | 0     |
| Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)             | 0     |
| X-component of shear stress (pascal)               | 0     |
| Y-component of shear stress (pascal)               | 0     |
| Specularity Coefficient                            | 0     |

wall-4

| Condition  | Value |
|--|-------|
| Wall Motion  | 0     |
| Shear Boundary Condition                           | 0     |
| Define wall motion relative to adjacent cell zone? | yes   |
| Apply a rotational velocity to this wall?          | no    |
| Velocity Magnitude (m/s)                           | 0     |
| X-Component of Wall Translation                    | 1     |
| Y-Component of Wall Translation                    | 0     |
| Define wall velocity components?                   | no    |
| X-Component of Wall Translation (m/s)              | 0     |
| Y-Component of Wall Translation (m/s)              | 0     |
| Rotation Speed (rad/s)                             | 0     |
| X-Position of Rotation-Axis Origin (m)             | 0     |
| Y-Position of Rotation-Axis Origin (m)             | 0     |
| X-component of shear stress (pascal)               | 0     |
| Y-component of shear stress (pascal)               | 0     |
| Specularity Coefficient                            | 0     |

Solver Controls

Equations

| Equation | Solved |
|----------|--------|
| Flow     | yes    |

Numerics

| Numeric                       | Enabled |
|-------------------------------|---------|
| Absolute Velocity Formulation | yes     |

Relaxation

| Variable    | Relaxation Factor |
|-------------|-------------------|
| Pressure    | 0.30000001        |
| Density     | 1                 |
| Body Forces | 1                 |
| Momentum    | 0.69999999        |

Linear Solver

| Variable   | Solver Type | Termination Criterion | Residual Reduction Tolerance |
|------------|-------------|-----------------------|------------------------------|
| Pressure   | V-Cycle     | 0.1                   |                              |
| X-Momentum | Flexible    | 0.1                   | 0.7                          |
| Y-Momentum | Flexible    | 0.1                   | 0.7                          |

## Pressure-Velocity Coupling

| Parameter | Value  |
|-----------|--------|
| Type      | SIMPLE |

## Discretization Scheme

| Variable | Scheme             |
|----------|--------------------|
| Pressure | Standard           |
| Momentum | First Order Upwind |

## Solution Limits

| Quantity                  | Limit |
|---------------------------|-------|
| Minimum Absolute Pressure | 1     |
| Maximum Absolute Pressure | 5e+10 |
| Minimum Temperature       | 1     |
| Maximum Temperature       | 5000  |

## Material Properties

## Material: water-liquid (fluid)

| Property                      | Units             | Method   | Value (s) |
|-------------------------------|-------------------|----------|-----------|
| Density                       | kg/m <sup>3</sup> | constant | 998.20001 |
| Cp (Specific Heat)            | j/kg-k            | constant | 4182      |
| Thermal Conductivity          | w/m-k             | constant | 0.6       |
| Viscosity                     | kg/m-s            | constant | 0.001003  |
| Molecular Weight              | kg/kgmol          | constant | 18.0152   |
| L-J Characteristic Length     | angstrom          | constant | 0         |
| L-J Energy Parameter          | k                 | constant | 0         |
| Thermal Expansion Coefficient | 1/k               | constant | 0         |
| Degrees of Freedom            |                   | constant | 0         |
| Speed of Sound                | m/s               | none     | #f        |

## Material: air (fluid)

| Property                      | Units             | Method   | Value (s)  |
|-------------------------------|-------------------|----------|------------|
| Density                       | kg/m <sup>3</sup> | constant | 1.225      |
| Cp (Specific Heat)            | j/kg-k            | constant | 1006.43    |
| Thermal Conductivity          | w/m-k             | constant | 0.0242     |
| Viscosity                     | kg/m-s            | constant | 1.7894e-05 |
| Molecular Weight              | kg/kgmol          | constant | 28.966     |
| L-J Characteristic Length     | angstrom          | constant | 3.711      |
| L-J Energy Parameter          | k                 | constant | 78.6       |
| Thermal Expansion Coefficient | 1/k               | constant | 0          |
| Degrees of Freedom            |                   | constant | 0          |
| Speed of Sound                | m/s               | none     | #f         |

Material: aluminum (solid)

| Property             | Units             | Method   | Value(s) |
|----------------------|-------------------|----------|----------|
| Density              | kg/m <sup>3</sup> | constant | 2719     |
| Cp (Specific Heat)   | j/kg-k            | constant | 871      |
| Thermal Conductivity | w/m-k             | constant | 202.4    |