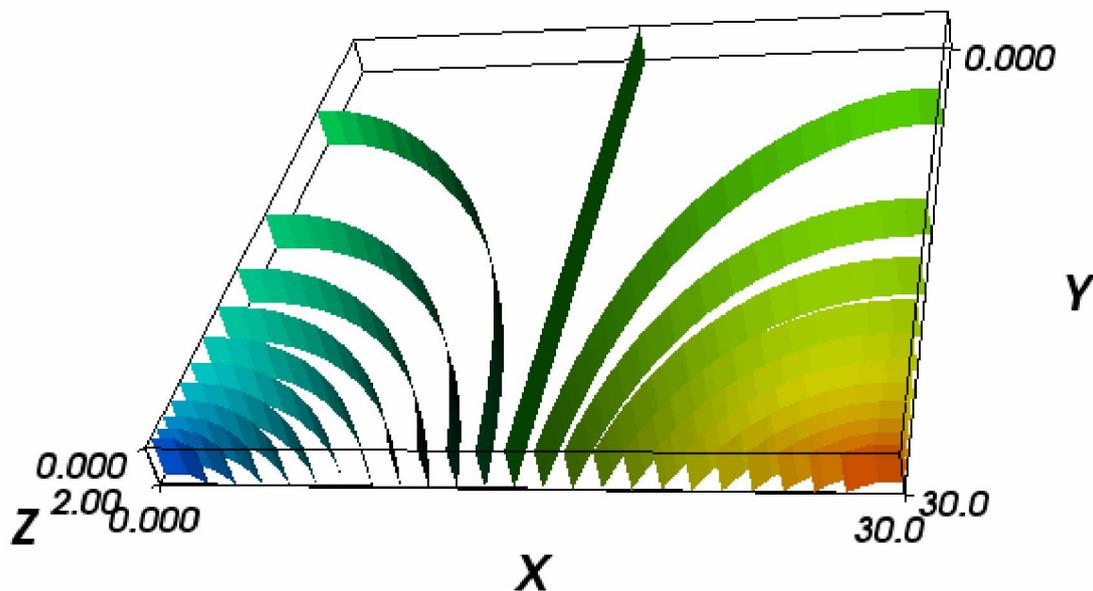


SIMULATION D'ÉCOULEMENTS
AVEC LE LOGICIEL
BIGFLOW

*Découverte et Validation
de cas tests*



Synthèse du travail

Par

Alois RICHARD
Renaud CHAMPREDONDE

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
TABLE DES ILLUSTRATIONS	3
1. INTRODUCTION	4
2. PRISE EN MAIN ET REALISATION DE CAS TESTS	5
2.1. Position du problème	5
2.2. Rubriques de Pre-processing	6
2.2.1. General Information	6
2.2.2. Domain Geometry	6
2.2.3. Physical Properties	7
2.2.4. Boundaries	7
2.2.5. Initial Conditions	7
2.2.6. Salt Water Intrusion Parameter	8
2.2.7. Solver Parameters	8
2.2.8. Time Steps	8
2.2.9. Sources	8
2.2.10. Output Options	8
2.2.11. Data files et Input1	8
2.3. Vérification de l'exactitude des résultats	8
2.4. Exemples illustratifs	9
2.4.1. Illustration des conditions aux limites	9
2.4.2. Superposition de la charge et du flux	10
2.5. Ecoulement potentiel avec source	10
3. PROJET COMMUN DE VALIDATION ANALYTIQUE	14
3.1. Représentation simultanée du flux et de la charge	18
4. PROJET DE VALIDATION ANALYTIQUE : LE DOUBLET	19
4.1. Interprétation de l'intensité des flux	23
4.2. Bilan de masse	23
4.3. Validation des résultats par simulation sous le logiciel Matlab	24
5. CONCLUSION	29
REFERENCES	30

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Surfaces d'iso charges hydrauliques	9
Figure 2 : Superposition de la charge et du flux	10
Figure 3 : Écoulement avec source dans le plan (x1,x3) au nœud 2.....	12
Figure 4 : Écoulement avec source dans le plan (x1,x3) au nœud 16.....	13
Figure 5 : Écoulement avec source dans le plan (x2,x3) au nœud.....	13
Figure 6 : Écoulement avec source en 3 Dimensions.....	14
Figure 7 : Schéma d'une face avec les conditions initiales.....	15
Figure 8 : Charges hydrauliques visualisées sous BigFlow (gauche) et Matlab (droite)	16
Figure 9 : Visualisation du flux en 3 Dimensions	16
Figure 10 : Résultats des calculs de la simulation	17
Figure 11 : Flux modélisés par BigFlow.....	17
Figure 12 : Résultats de BigFlow et de la solution analytique.....	18
Figure 13 : Tracé de la surface (x1,x3) au nœud 16 pour le doublet.....	20
Figure 14 : Plan (x2,x3) au noeud 16 pour le doublet.....	20
Figure 15 : Plan (x1,x2) au noeud 16 pour le doublet.....	21
Figure 16 : Plan (x1,x3) au noeud 2 pour le doublet.....	21
Figure 17 : Flux sur le plan (x1,x3)	22
Figure 18 : Représentation du flux en 3 Dimensions	22
Figure 19 : Solution analytique du potentiel d'un doublet	25
Figure 20 : Solution analytique du potentiel et des lignes de courants d'un doublet.	27
Figure 21 : Potentiel et lignes de courant en 3 Dimensions.....	28

1. INTRODUCTION

Ce travail a pour vocation d'illustrer le travail réalisé lors de la mineure numérique dispensée pour le compte de la deuxième année de formation du département hydraulique et mécanique des fluides. Nous avons tout d'abord travaillé les équations générales dédiées aux milieux poreux afin de les adapter à un traitement numérique. Nous avons simultanément exploré le code de calcul BigFlow particulièrement adapté à la modélisation d'écoulement en milieux poreux. Nous avons pour finir traité quelques cas particuliers d'écoulements afin de valider le code BigFlow.

Dans une première partie nous rappellerons les grandes lignes de la théorie des milieux poreux. Nous présenterons le problème physique par la revue du pre-processing de BigFlow. Nous détaillerons quelques cas d'écoulements pour se familiariser avec le code de calcul et explorer les capacités de celui-ci.

Dans la deuxième partie nous tenterons de valider le code de calcul BigFlow par l'analyse plus détaillée d'un écoulement. Nous essayerons d'apporter différents types d'arguments qui permettent de valider ce code.

Dans une troisième partie plus libre, nous illustrerons la validité du code par un autre écoulement source-puits qui possède une solution analytique connue. Ce second écoulement - peut être plus singulier - demande quelques réflexions sur la modélisation à réaliser et les hypothèses à avancer.

2. PRISE EN MAIN ET REALISATION DE CAS TESTS

Dans cette partie, nous allons présenter le type de problème que résout le code de calcul BigFlow. Nous analyserons les différentes hypothèses faites et sur quelles équations est construit le code. Nous discuterons des entrées qu'il faut spécifier et quelles sorties le code fourni. Pour analyser méthodiquement le code de calcul, nous allons passer en revue l'ensemble des rubriques de pre-processing du code, les sorties seront analyser avec les études. Nous discuterons brièvement les moyens que fournis BigFlow pour vérifier la réalité physique des résultats.

Finalement nous traiterons quelques cas simples qui permettent d'illustrer les capacités de calcul du code et qui nous permettent de nous familiariser avec les représentations des sorties du code.

2.1. Position du problème

Le code de calcul BigFlow résout de manière numérique les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement. La conservation de la quantité de mouvement mène à la loi de Darcy. Cette résolution est en volumes finis et elle permet d'étudier des écoulements importants de part leurs tailles (plusieurs milliers de nœuds).

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \cdot \vec{q})$$

Avec θ : porosité [m^3 d'eau / m^3 de milieu] : sans unité

$q = \vec{q} \cdot \vec{V}$: flux élémentaire [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ / m^2 transversal] = [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Loi de Darcy :

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} \cdot (\vec{\nabla}(p) + \rho g \vec{\nabla}(z))$$

Avec p : pression [Pa]

ρ : masse volumique du fluide [kg/m^3]

z : cote [m]

k : perméabilité intrinsèque [m^2]

μ : viscosité dynamique [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

En définissant la charge hydraulique H [m] comme :

$$H = \frac{P - P_{atm}}{\rho_0 g} + z$$

La loi de Darcy s'écrit aussi :

$$\vec{q} = -K \vec{\nabla}(H)$$

En couplant les deux équations, on obtient :

$$C \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (K \vec{\nabla}(H))$$

Avec C : Coefficient d'emmagasinement spécifique $[(m^3 \text{ d'eau}/m^3)/m] = [m^{-1}]$

$K = \frac{k}{\mu}$: conductivité hydraulique $[m \cdot s^{-1}]$

Nous remarquons que de part sa résolution en volume finis et le type d'équations que résout BigFlow, le code possède un bilan de masse intégré.

2.2. Rubriques de Pre-processing

2.2.1. General Information

Outre des informations générales concernant la simulation (identification, ...) cette rubrique permet de préciser le type de problème que l'on cherche à résoudre : « Saturated Flow » ou « UN-saturated Flow ». L'option « Saturated Flow » permet de réaliser des calculs en milieu poreux en écoulement monophasique. « UN-saturated Flow » permet d'introduire des problèmes à écoulements diphasiques, ce qui fait intervenir de nouveaux paramètres tels que la porosité, la teneur en eau ... Nous discuterons de cet aspect dans la rubrique « Physical Properties ».

Il faut préciser dans cette rubrique le régime du calcul : stationnaire ou transitoire.

2.2.2. Domain Geometry

Cette rubrique enseigne le nombre de nœuds et la taille des mailles dans chacune des trois dimensions. De part sa conception, le code BigFlow est adapté aux problèmes à géométries cartésiennes, bien que la résolution de problème à géométrie cylindrique et sphérique soit très satisfaisante.

Comme nous le verrons dans la rubrique « Boundaries », les conditions aux limites du domaine sont spécifiées sur les nœuds frontières du domaine. Cet ensemble de nœuds est donc à éviter dans l'analyse. Ainsi pour traiter un problème bidimensionnel, il faut fixer à 3 nœuds une des dimensions et n'analyser que la maille intérieure, les deux autres dimensions étant libres.

La gravité est facultative et peut être orientée dans toutes les directions de l'espace. Ceci permet par changement de référentiel d'orienter librement le domaine d'étude.

2.2.3. Physical Properties

Cette rubrique du pre-processing spécifie les propriétés du domaine d'étude. Il est question de la conductivité hydraulique et du coefficient d'emmagasinement spécifique du domaine.

La conductivité hydraulique peut être homogène/hétérogène et isotrope/anisotrope. L'anisotropie est modélisée par une matrice diagonale de conductivité hydraulique. L'anisotropie n'est donc pas totalement libre mais ce modèle permet de traiter de nombreux cas d'écoulements à conductivité hydraulique anisotrope. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes placé dans le cas d'une conductivité hydraulique homogène isotrope. Dans le cas d'un milieu non saturé, le code demande une conductivité hydraulique pour le sol sec, une pour le sol saturé et propose différentes lois reliant la conductivité hydraulique à la teneur en eau. Il est demandé de spécifier le coefficient d'emmagasinement spécifique.

2.2.4. Boundaries

Cette rubrique permet de déterminer les conditions aux limites du domaine. Il s'agit de conditions en charge hydraulique (head), condition dite de Dirichlet, de conditions en flux, condition dite de Neumann ou des conditions mixtes. La condition de Dirichlet est réalisée au niveau du nœud. La condition de Neumann est réalisée sur la face intérieure de la maille frontière. C'est pourquoi la maille frontière ne doit pas être prise en compte dans l'analyse des résultats. Dans chaque type de condition, la charge ou le flux peut être uniforme ou distribué linéairement sur la face.

2.2.5. Initial Conditions

Cette rubrique permet de rentrer l'état du domaine d'étude à l'instant initial. Pour les calculs transitoires, cette rubrique est justifiée par contre pour les calculs permanents, cette rubrique semble inutile. Le code de calcul BigFlow résout les régimes permanents en faisant tendre vers l'infini le pas de temps de résolution. Cette condition permet en fait de préciser « l'état initial » à partir duquel le code va calculer l'état stationnaire, qui n'est autre que l'état après extinction du régime transitoire.

En régime permanent, il faut s'assurer de la cohérence entre les conditions fixées aux frontières et la condition initiale.

2.2.6. Salt Water Intrusion Parameter

Les études réalisées ne nous ont pas menées à traiter ces paramètres. Nous n'avons pas exploité cette rubrique.

2.2.7. Solver Parameters

Cette rubrique permet de fixer les critères de convergence du solveur utilisé. Cela permet d'affiner les équations de conservation.

2.2.8. Time Steps

N'ayant pas réalisé de calcul transitoire, nous ne commentons pas cette rubrique.

2.2.9. Sources

Cette rubrique permet d'ajouter des sources dans le domaine. Celle-ci peut être ponctuelle, ou distribuée. Dans le cas d'une source ponctuelle. Le concept de source ponctuel dans l'espace continu est ramené à une maille dans l'espace numérique. Il faut préciser le lieu de la maille ainsi que l'intensité de la source. Dans le cas d'une source distribuée, BigFlow lit un fichier qui contient la distribution de la source.

2.2.10. Output Options

Cette rubrique permet de préciser les sorties optionnelles que l'utilisateur souhaite obtenir. Deux sont particulièrement intéressantes : « Total boundary flux » et « Flux output file ». Le premier sert à la vérification de la conservation de la masse dans le cas de calcul stationnaire, le second sert à superposer les charges hydrauliques et les flux dans les visualisations de post-processing.

2.2.11. Data files et Input1

Ces rubriques permettent la vérification des données d'entrées.

2.3. Vérification de l'exactitude des résultats

La rubrique de post-processing intitulée « Numerical Plots » permet d'obtenir les flux totaux aux différentes frontières ainsi que le flux total. . Ces informations permettent de donner une crédibilité au calcul effectué par le code. En comparant le flux total

aux flux traversés aux différentes frontières, nous pouvons qualifier le bilan de masse. Par exemple, si le flux entrant en face A1 est de l'ordre de l'unité et que le flux total sortant est de l'ordre du millième du flux de A1, la conservation de la masse est satisfaisant. Cette méthode est un premier moyen de vérification de cohérence du calcul, ce n'est une condition suffisante pour affirmer l'exactitude du calcul.

Dans le cas d'un écoulement incluant une source, le bilan de masse est conservé si le débit de la source est égal au débit sortant.

2.4. Exemples illustratifs

2.4.1. Illustration des conditions aux limites

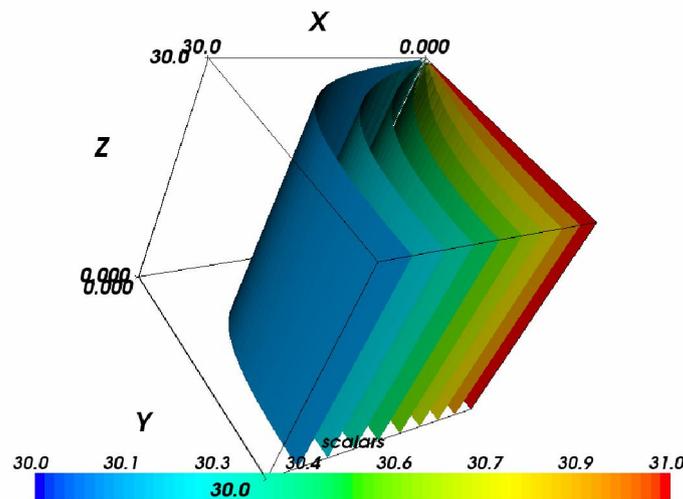


Figure 1 : Surfaces d'iso charges hydrauliques

Cette illustration représente les surfaces d'iso charges hydrauliques. On remarque qu'une face (face rouge) est à charge constante égale à 31m, alors que la face opposée est à charge constante égale à 30m. La face du fond est aussi à charge fixée. Les trois autres faces sont à flux constants car les iso charges sont perpendiculaires. Cet écoulement a été réalisé en fixant une condition de charge sur trois des faces (avec un gradient de charges non nul), et en fixant un flux uniforme nul sur les trois autres faces du domaine. Un écoulement prend forme dans le domaine de l'iso charge rouge à l'iso charge bleu.

2.4.2. Superposition de la charge et du flux

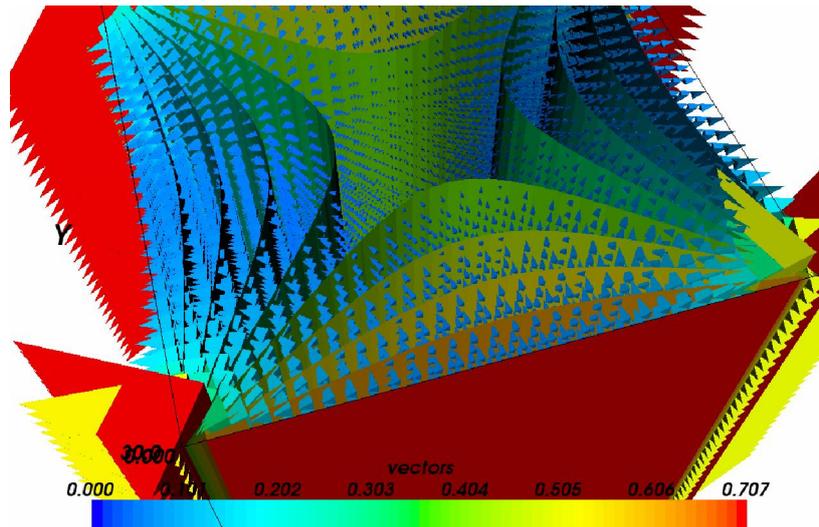


Figure 2 : Superposition de la charge et du flux

Cette illustration montre à la fois les surfaces pour lesquelles la charge hydrauliques est fixée et les directions et intensités des flux. Comme précédemment, le code de couleurs de surface permet de visualiser les charges dans l'espace. Pour les cônes, la taille et le code couleur représentent l'intensité du flux.

2.5. Ecoulement potentiel avec source

Le cas test sur lequel nous nous sommes penchés, contient une source dans un domaine que nous avons défini avec le nombre de nœud suivant :

$$\begin{cases} NX1 = 31 \\ NX2 = 31 \\ NX3 = 31 \end{cases}$$

Le maillage de la simulation possède donc un nombre de nœud de :

$$\text{Nombre nœud} = (31)^3 = 29791 \text{ nœuds}$$

Cette simulation va donc se baser sur une grille de type cubique.

Le milieu de cette étude est défini comme saturé, ce qui correspond à l'absence de trois phases simultanément.

La valeur du plus petit incrément sur chaque axe est fixée à :

$$\begin{cases} DX1 = 1 \\ DX2 = 1 \\ DX3 = 1 \end{cases}$$

A l'intérieur de ce milieu nous positionnons une source d'intensité 10. Celle-ci sera intégrée au milieu du domaine. Les caractéristiques de la source seront :

$$\begin{cases} M = 16 \\ N2 = 16 \quad \text{et} \quad S = 10 \\ N3 = 16 \end{cases}$$

Un des nombreux paramètres important dans une simulation en milieu souterrain est constitué par la conductivité hydraulique. Nous la choisirons de type homogène, c'est-à-dire identique dans l'ensemble du milieu. Ensuite la conductivité modélisée sera de nature isotrope, ce qui signifie sans direction privilégiée.

De cette façon nous aurons donc :

$$K_{sat} = \begin{cases} K_{sat1} = 1.0 \\ K_{dry} = 1.0E-4 \end{cases}$$

Nous allons maintenant fixer la condition initiale pour l'écoulement que l'on souhaite modéliser. En régime saturé, la variable BIGFLOW « Head » représente la pression totale. Nous initialisons la charge à 0 et nous la considérerons comme uniforme.

Les conditions aux limites peuvent ensuite être insérées dans le logiciel.

Nous choisissons une charge uniforme sur les faces A1 et B1 avec une valeur unité pour la charge sur A1 et une valeur nulle sur B1. Sur les quatre autres faces, nous choisissons des conditions sur les flux. Nous précisons les valeurs de ces flux tels que nous ayons les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \text{Face A2} \quad \text{Flux} = -0.015 \\ \text{Face B2} \quad \text{Flux} = 0.0 \\ \text{Face A3} \quad \text{Flux} = 0.0 \\ \text{Face B3} \quad \text{Flux} = -0.030 \end{cases}$$

Nous avons donc choisi une charge deux fois plus importantes sur la face A2 par rapport à la face B3.

Avec l'ensemble de ces paramètres définis par l'utilisateur, le logiciel BIGFLOW simule l'expérience. Nous avons maintenant accès aux résultats de la simulation ainsi qu'aux paramètres de celle-ci. Le bouton « Numerical Plots », nous indique le nombre d'itération nécessaire pour atteindre la convergence du calcul. Celle-ci avait préalablement été définie dans le menu de gauche par l'utilisateur. Les critères de convergences étaient de 1.0^{E-6} et le nombre maximum d'itération était fixé à 400. Les résultats de la simulation montrent que le système a respecté ces conditions et que le calcul a bien convergé. En effet les résultats indiquent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Nombre d'itération} = 116 \\ \text{Précision du calcul} \approx 10^{-7} \end{array} \right.$$

Cette boîte de dialogue permet d'avoir également accès au bilan de masse du système. C'est ainsi que les flux affichés indiquent :

$$\left\{ \begin{array}{l} QA1 = 26.726 \\ QB1 = 29.341 \\ QA2 = -12.615 \\ QB2 = 0.0 \\ QAB = 0.0 \\ QB3 = -25.23 \end{array} \right.$$

Ces valeurs des flux permettent de prédire les différentes visualisations possibles. En effet, ces flux indiquent un écoulement vers la face B1 puisque que celle-ci possède une condition de charge constante et nulle. De plus l'écoulement aura tendance à se diriger vers la face B2 par rapport à la face A2. Enfin l'écoulement s'écoulera de préférence en direction de la face B3 plutôt que vers la face A3, ce qui s'explique par les conditions initiales introduites dans le système à savoir des flux uniformes sur ces deux faces avec une valeur nulle pour A3 et une valeur négative pour B3. Cette précision est vérifiée par les flux QA3 et QB3 qui permettent de prédire une direction privilégiée entre ces deux faces.

Nous allons maintenant utiliser les fonctions du logiciel pour vérifier la cohérence entre les attentes physiques que l'on suppose et les résultats des flux issus du calcul de la simulation.

La première requête demandée au logiciel correspond à des graphiques en deux dimensions. Nous pouvons extraire deux types de graphiques par section transverse. Le graphique ci-dessous représente le résultat de la simulation sur la surface (x1,x3) au nœud 2.

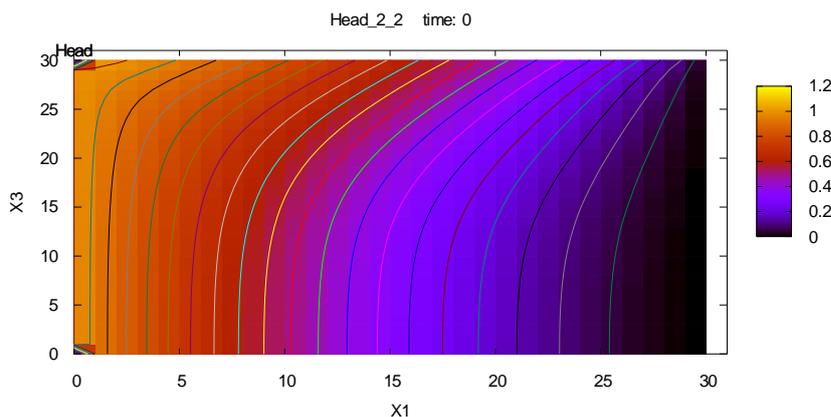


Figure 3 : Ecoulement avec source dans le plan (x1,x3) au nœud 2

Sur ce graphique, nous observons bien la condition de flux nul à droite et la condition de charge constante à gauche. De plus la règle des correspondances avec les couleurs permet de confirmer la valeur unité de la charge constante.

Le graphique suivant correspond aux mêmes paramètres énoncés ci-dessus mais tracé au nœud 16, c'est-à-dire exactement au nœud qui correspond à l'emplacement de la source.

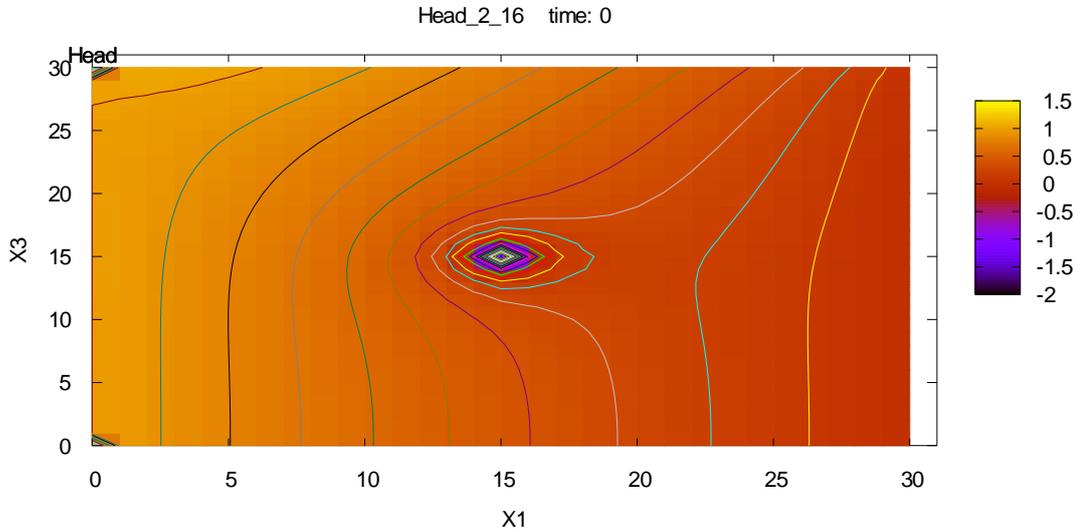


Figure 4 : Ecoulement avec source dans le plan (x1,x3) au nœud 16

Sur ce graphique qui correspond à un nœud au milieu du domaine, nous observons l'effet de la source sur l'écoulement avec un décalage des lignes de flux vers la gauche pour les lignes qui se situent au dessus de la source.

Le graphique ci-dessous représente la section (x2,x3) :

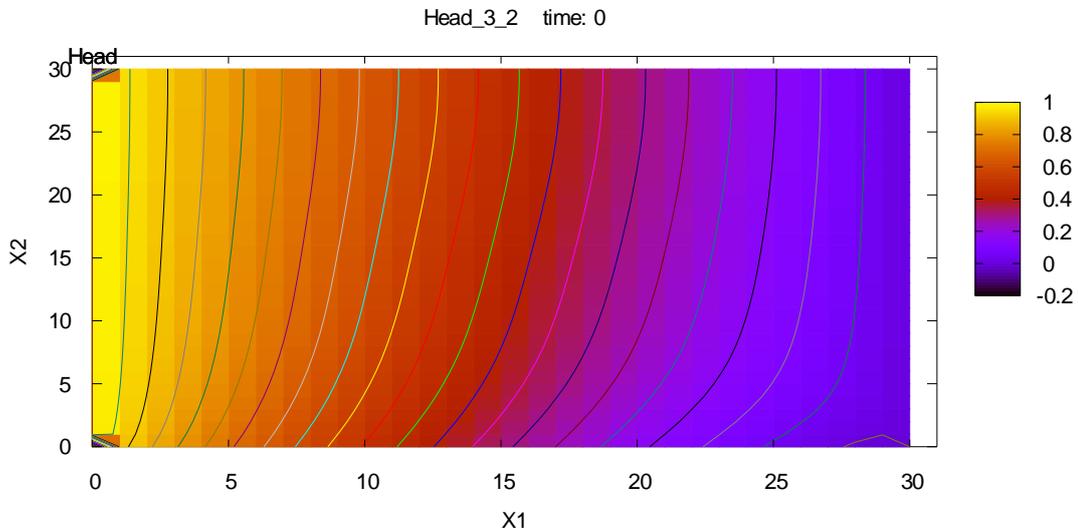


Figure 5 : Ecoulement avec source dans le plan (x2,x3) au nœud

Sur ce graphique, nous observons de nouveau le respect des conditions initiales et la cohérence avec les valeurs de flux annoncées dans les résultats. En effet sur la droite de ce graphique, nous observons la condition de flux nul avec des valeurs qui se rapprochent de zéro au plus près de la bordure du domaine. La condition de gauche est régie par un flux uniforme de valeur négative mais plus petit que celui injecté sur la face A2. Nous observons donc un flux négatif pour A2 qui est vérifié par le résultat du bilan de masse qui indique :

$$\begin{cases} QA2 = -12.615 \\ QB2 = 0.0 \end{cases}$$

Enfin le logiciel BIGFLOW permet de visualiser l'écoulement de façon plus interactive grâce à la manipulation agréable en 3 dimensions. La composante « MayaVI » ajouté au logiciel permet donc cette visualisation et nous obtenons pour l'écoulement modélisé le graphique suivant :

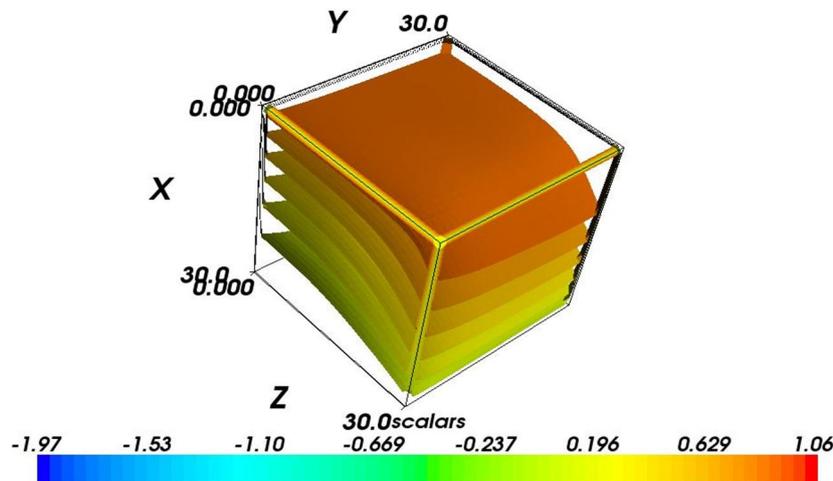


Figure 6 : Ecoulement avec source en 3 Dimensions

3. PROJET COMMUN DE VALIDATION ANALYTIQUE

Cette partie a pour but de confronter les résultats du code de calcul BigFlow aux résultats analytiques. Nous allons étudier un écoulement relativement simple dans un milieu poreux. D'une part, nous essayerons d'obtenir des résultats pertinents et exploitables par la maîtrise du post-processing de BigFlow. Nous réaliserons une étude qualitative de certaines caractéristiques de cet écoulement. D'autre part, nous illustrerons les résultats analytiques de l'écoulement par un traitement numérique sous le code de calcul Matlab. Après avoir tiré les éléments représentatifs de cet écoulement, nous comparerons les résultats afin de valider le code de calcul BigFlow.

L'écoulement que l'on se propose d'étudier est un écoulement bidimensionnel pour lequel trois faces possèdent une condition de flux nulle. Sur la dernière face, on impose une charge distribuée linéairement.

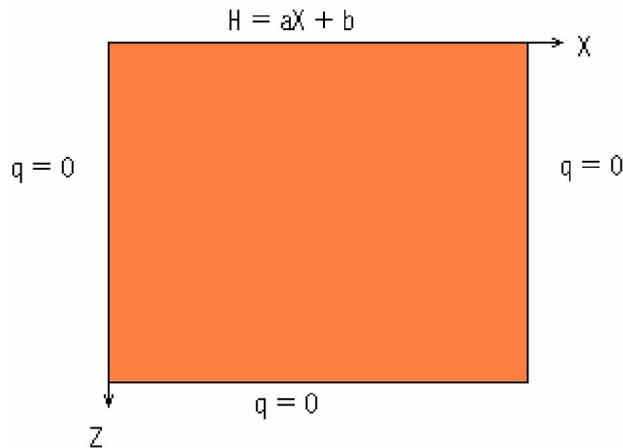
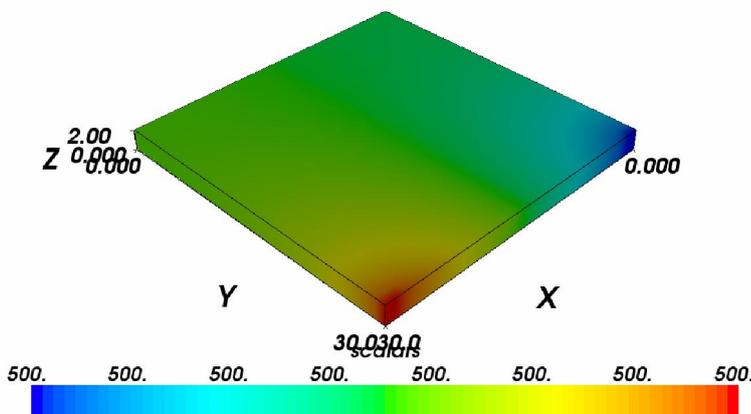


Figure 7 : Schéma d'une face avec les conditions initiales

Cette situation peut se retrouver dans la nature lorsque l'on modélise les écoulements souterrains d'une « demi-vallée ». La crête définit la face droite du domaine, le fond du thalweg définit la face gauche du domaine. Un substratum imperméable délimite le bas du domaine. On modélise la « demi-vallée » par une pente constante. Si l'on considère que le sol est saturé en eau, la charge imposée à une altitude constante (comme le fond du thalweg) est directement liée à l'épaisseur de sol qui se trouve au-dessus. Ainsi une charge hydraulique linéaire est imposée sur la face supérieure du domaine.



On impose arbitrairement un domaine carré de 90 unités de surface. La charge imposée est $H = 500 + 0,0166 X$. Cette loi linéaire permet d'atteindre une charge de 500 d'un côté et 500,5 de l'autre côté de la face chargée linéairement. Le code BigFlow ne possède pas d'unité.

Cela permet d'être libre dans la modélisation et ne restreint pas l'utilisateur. Cependant c'est à ce dernier de veiller à la cohérence de l'interprétation physique des sorties du code.

La visualisation de gauche est la charge hydraulique calculé par BigFlow et représenté par MayaVi, un des logiciels de post-processing de visualisation de BigFlow.

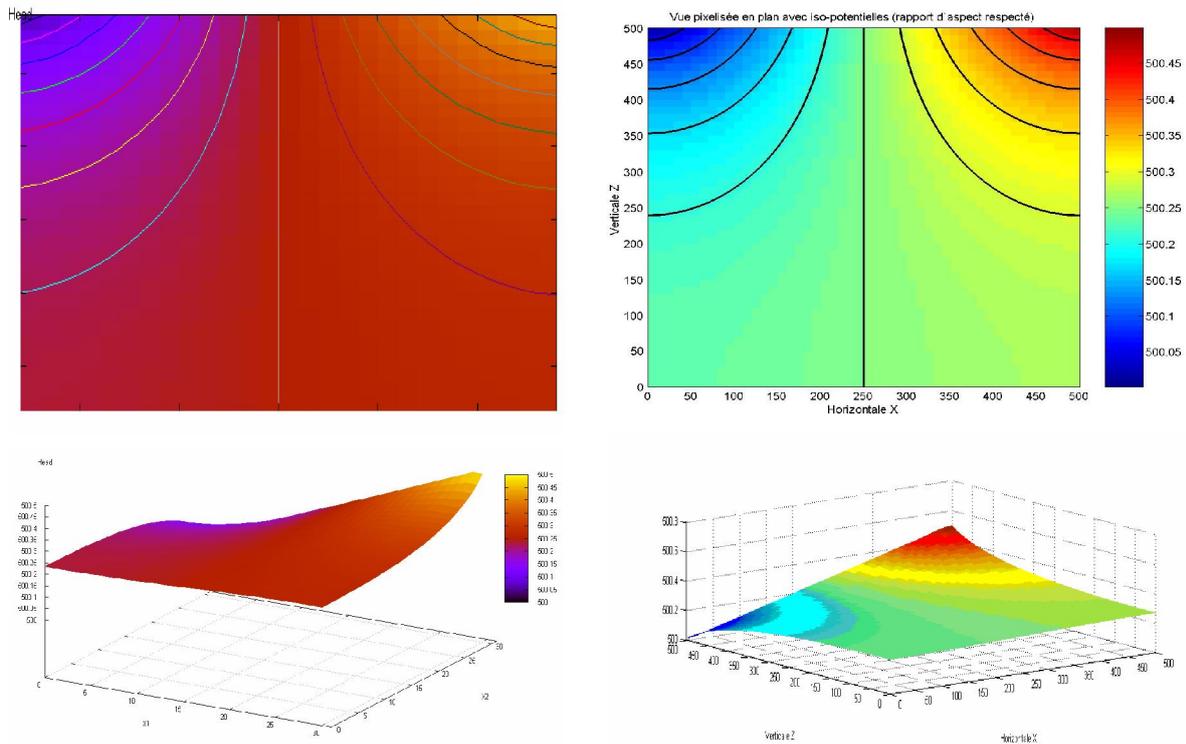


Figure 8 : Charges hydrauliques visualisées sous BigFlow (gauche) et Matlab (droite)

La figure de droite représente la charge hydraulique de la solution analytique de l'écoulement. La solution est programmée et visualisée avec Matlab.

Les deux visualisations montrent une certaine cohérence. Les deux surfaces sont semblables, les quelques iso charges correspondantes sont identiques.

Si l'on s'intéresse aux flux, on observe des flux parallèles aux parois pour les faces où la condition de Neumann à flux nul est indiquée.

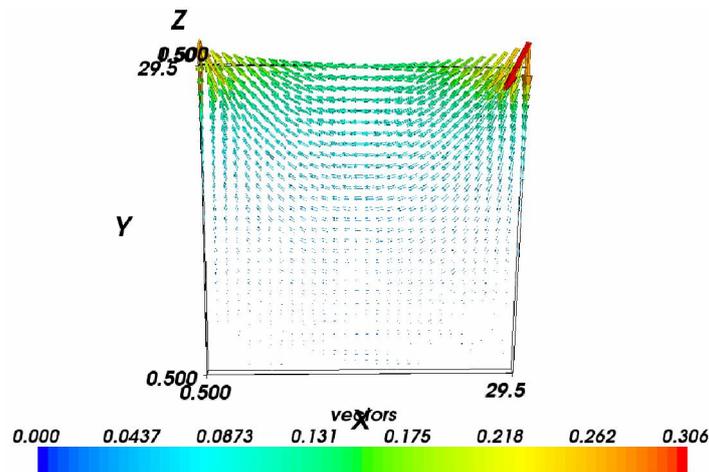


Figure 9 : Visualisation du flux en 3 Dimensions

C'est le cas des faces A1, A2, A3, B1, B3. Pour la face où est indiquée une condition de Dirichlet, on ne connaît a priori pas les flux. Par bilan de masse sur l'ensemble du domaine, nous pouvons vérifier que le flux sur la face chargée linéairement est nul. Puisque, le régime est stationnaire, qu'il n'existe pas de source ni de puits dans le domaine d'étude et que les cinq autres faces vérifient la condition de flux nul, nous pouvons affirmer par bilan de masse que le flux global de la face linéairement chargée (face B2) est nul. Le flux de l'ordre de 10^{-8} sur la face B2 est satisfaisant.

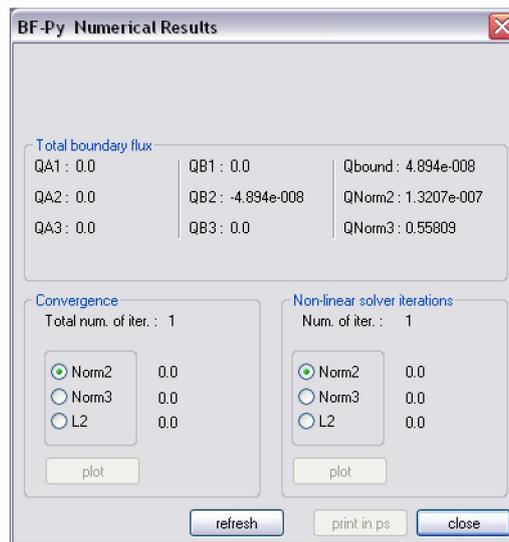


Figure 10 : Résultats des calculs de la simulation

Les flux ne présentent donc pas d'incohérence et semblent être correctement modélisé par BigFlow.

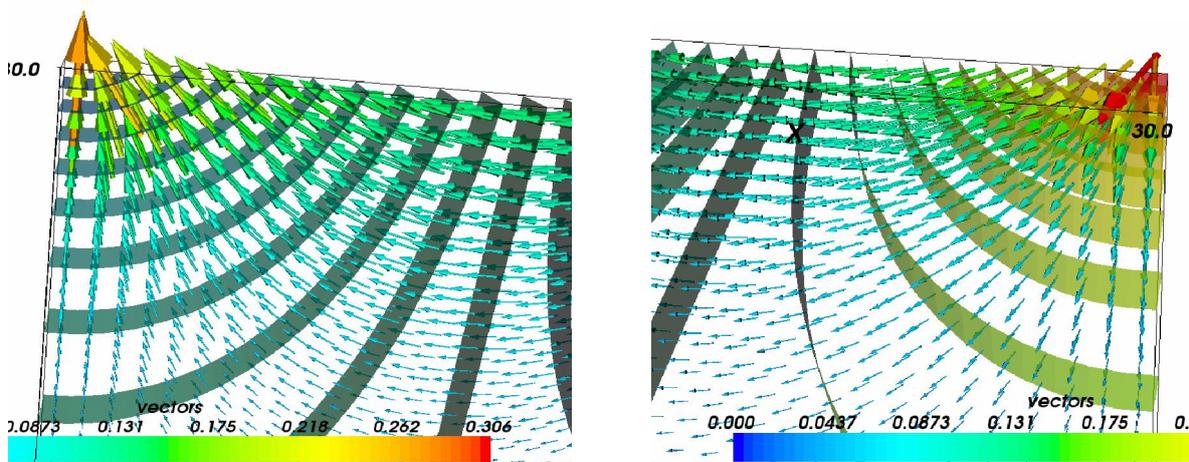


Figure 11 : Flux modélisés par BigFlow

Si l'on superpose sur la même figure les iso charges et les flux on peut vérifier l'orthogonalité des flux par rapport aux iso charges.

3.1. Représentation simultanée du flux et de la charge

Pour pouvoir représenter simultanément ces deux objets, il faut sélectionner le « 3D vector plots » du post-processing de BigFlow. Puis cocher la case de « Head » qui permet de lui associer la charge. Lors de la visualisation, apparaît un message d'erreur qui rend impossible cette superposition.

Pour y remédier il faut :

- Se placer dans le dossier courant de travailler de BigFlow
- Trouver et copier le fichier « FLUX_T0 »
- Se placer dans le dossier vtk du dossier courant
- Créer un dossier « FLX », l'ouvrir
- Déposer le fichier « FLUX_T0 »
- Actualiser l'arborescence des dossiers
- Retourner dans BigFlow pour associer le fichier « HEAD »

Il peut être intéressant de comparer un profil de charge selon une direction particulière du domaine.

Nous avons extrait de la solution analytique le profil de charge pour une profondeur égale à la moitié du domaine.

Commande Matlab : 'plot(Y,Z(25,:))' après avoir exécuter le script EX_RA_PLOT2D_Hxz_Analyt.m

Pour pouvoir observer cette coupe avec les résultats de BigFlow, il faut, récupérer le fichier HEAD_T0, l'ouvrir avec un éditeur de texte (WordPad fonctionne bien), supprimer l'entête, il est conseillé de le sauver en le renommant. Lors de l'exécution du script Matlab : BF_VIEW123D_HEADv6newnew.m ce fichier sans entête sera à sélectionner. L'une des figures résultats est le profil de charge au milieu du domaine.

A gauche, le résultat de BigFlow, à droite, celui de l'étude analytique.

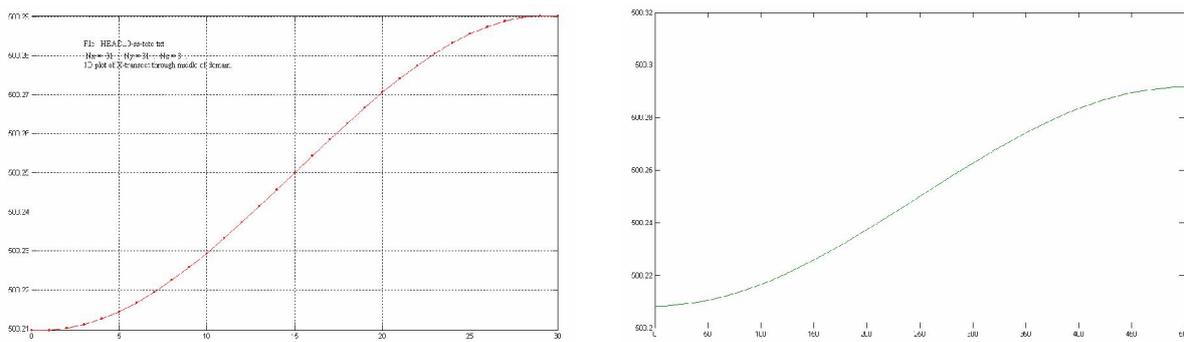


Figure 12 : Résultats de BigFlow et de la solution analytique

Les profils de charges sont identiques. La charge dans le domaine semble être correctement modélisée par BigFlow.

De part l'étude de cet écoulement relativement simple, nous avons pu illustrer les différentes sorties du post-processing que proposent le code BigFlow. Nous avons pu visualiser les surfaces, des iso charges, des champs de vecteurs, des profils de charges, vérifier le bilan de masse.

Grâce une comparaison permanente et des similarités observées avec les solutions analytiques, nous pouvons considérer que le code de calcul BigFlow représente des écoulements qui possèdent un sens physique.

4. PROJET DE VALIDATION ANALYTIQUE : LE DOUBLET

Le Maillage que nous allons utiliser dans cette expérience est un maillage de type cubique avec un nombre de nœud de :

$$\text{Nombre nœud} = (31)^3 = 29791 \text{ nœuds}$$

Nous allons travailler ici sur un domaine que l'on qualifiera d'insaturé. La conductivité hydraulique est supposé homogène et isotrope et nous choisissons les composantes suivantes pour K_{sat} :

$$K_{sat} = \begin{cases} K_{sat1} = 1.0 \\ K_{dry} = 1.0E-4 \end{cases}$$

La teneur en eau à saturation est prise égale à 0.3 et la valeur de la teneur en eau sèche égale à zéro.

Nous initialisons les faces A2, B2, A3, B3 avec des conditions de flux nuls. Les faces A1 et B1 se voient attribuer des charges constantes et égales à 30.0.

Pour réaliser les conditions théoriques de cas test, nous avons insérés dans la simulation deux sources. La première est créée comme dans les cas tests précédent et la seconde en utilisant la fonction du logiciel « Insert block to field » que l'on atteint dans la rubrique « Advanced ».

Une fois ces paramètres notifiés au logiciel, nous pouvons démarrer la simulation de cas test. La premier graphique que nous obtenons représente la surface (x1,x3) au nœud 16 :

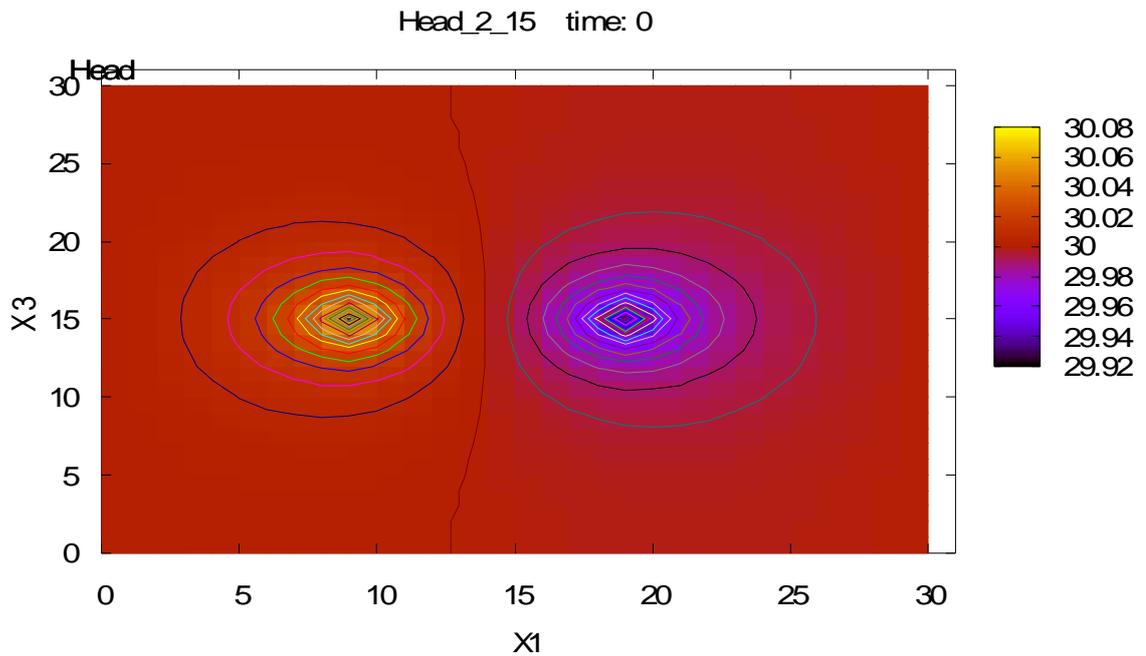


Figure 13 : Tracé de la surface (x1,x3) au nœud 16 pour le doublet

Nous observons bien le type de ligne des flux ainsi que la zone entre les deux sources soumises à un décalage de grille.

Ensuite, nous pouvons également tracer la surface (x2,x3) au noeud 16 :

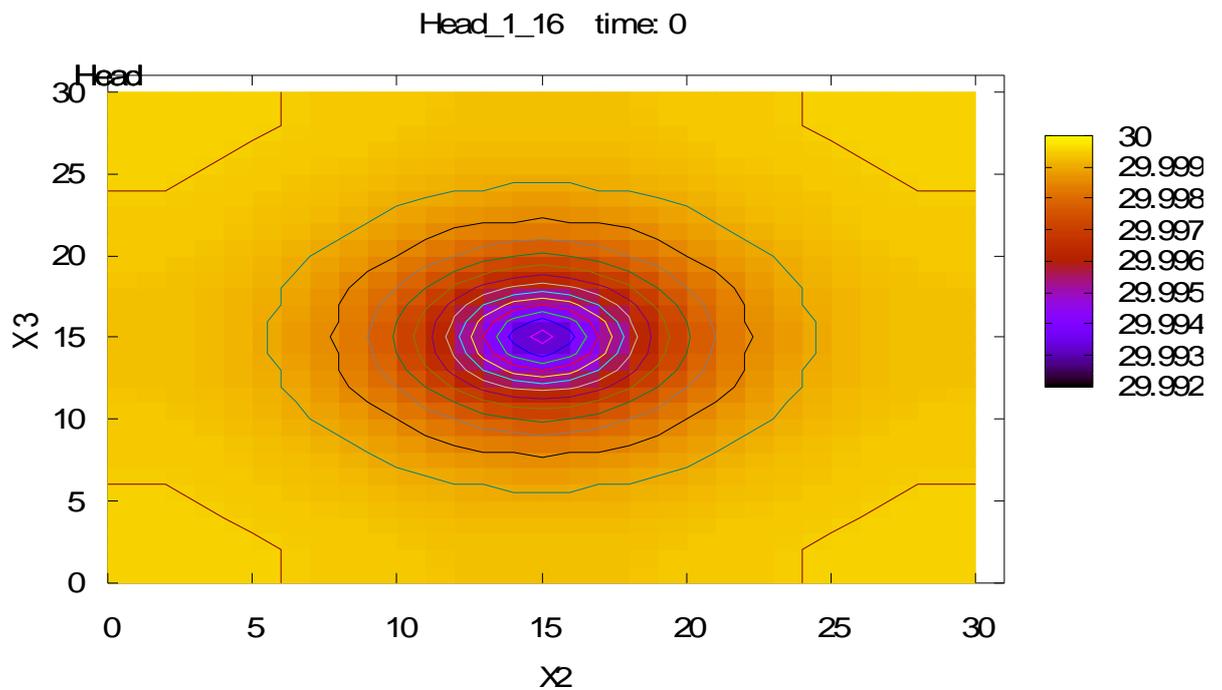


Figure 14 : Plan (x2,x3) au noeud 16 pour le doublet

Sur ce graphique, nous observons la source insérée. La grille de couleur confirme la condition pour la source qui était fixée à une intensité de 30.

Pour la surface (x_1, x_2) au nœud 16, nous obtenons le graphique suivant qui confirme les commentaires des deux graphiques précédents :

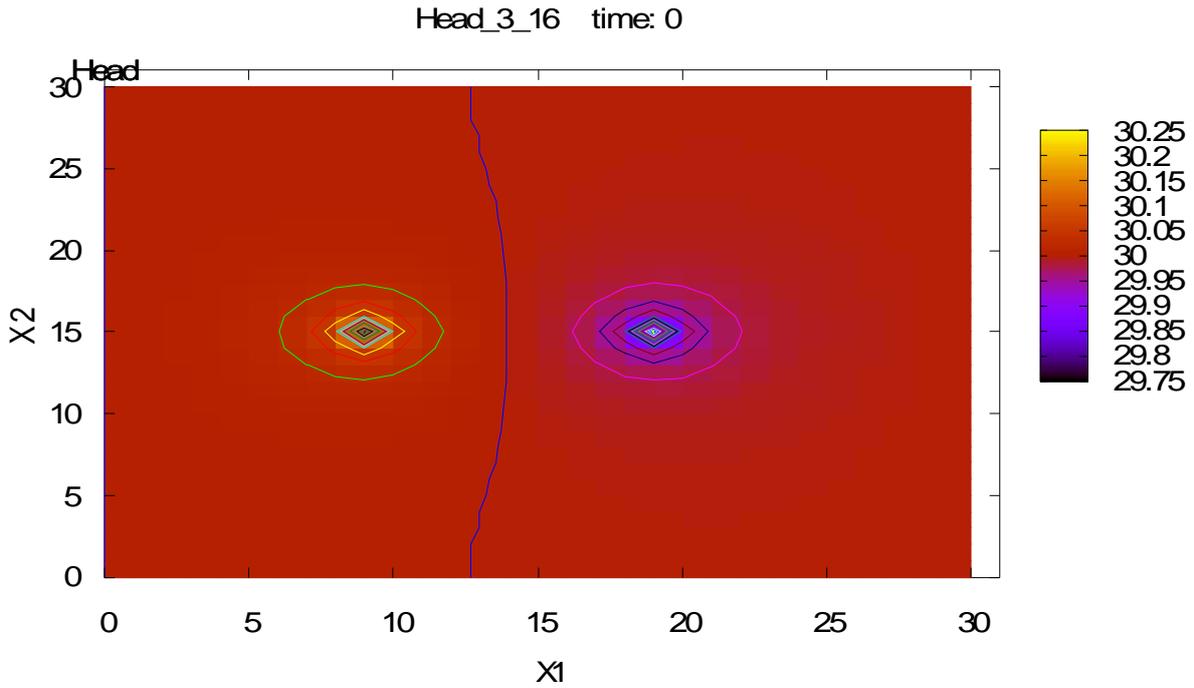


Figure 15 : Plan (x_1, x_2) au nœud 16 pour le doublet

Pour la surface (x_1, x_3) au nœud 2, nous obtenons la visualisation suivante :

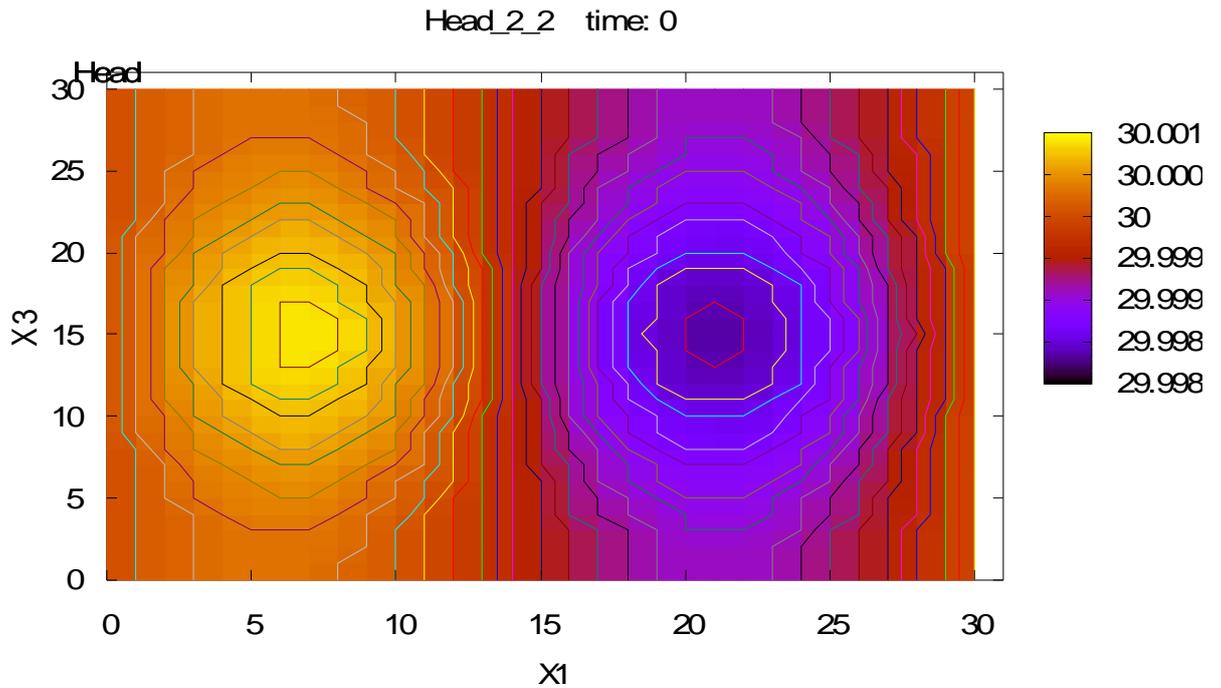


Figure 16 : Plan (x_1, x_3) au nœud 2 pour le doublet

Sur ce graphique, nous observons bien le flux généré par ce doublet que l'on pourra comparer avec les solutions analytiques énoncées plus bas.

Le tracé des vecteurs permet de visualiser le graphique suivant qui confirme un écoulement de la droite vers la gauche :

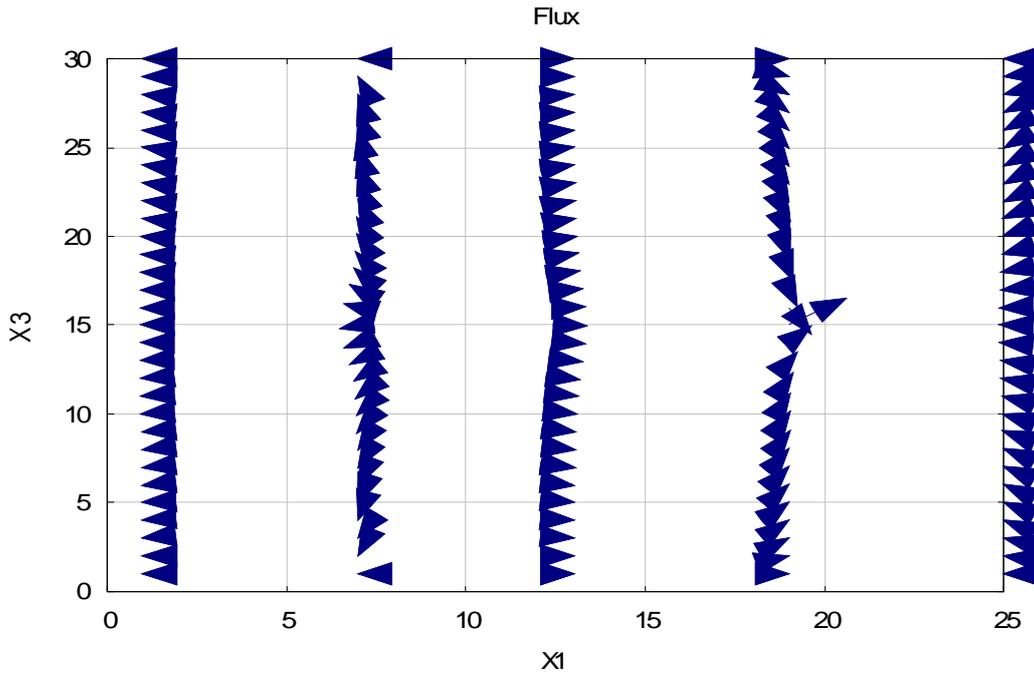


Figure 17 : Flux sur le plan (x_1, x_3)

Pour résumer l'ensemble des observations et analyses effectuées ci-dessus, nous présentons ci-dessous le graphique en trois dimensions qui permet une visualisation plus interactive :

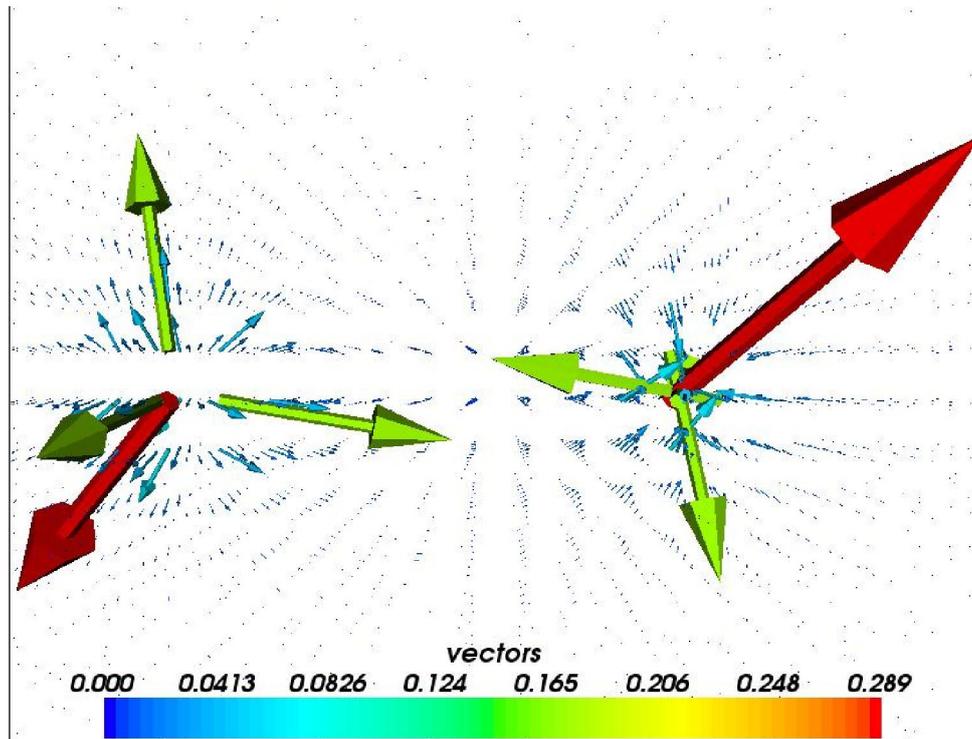


Figure 18 : Représentation du flux en 3 Dimensions

4.1. Interprétation de l'intensité des flux

Sur le graphique, nous observons trois flèches de flux dont l'intensité est nettement supérieure aux autres intensités des flux. Ces flux proviennent de chacune des deux sources. Les flèches présentes sur la gauche du graphique sont issues de la source positive qui émet un flux. Ces intensités sont donc physiquement acceptables. Cependant, les flux importants issus de la source de droite ne représentent aucune réalité physique. L'explication la plus vraisemblable à la vue de ce graphique s'exprime par la différence minimale entre la source et le calcul de ces flux. La conséquence d'un calcul du flux aussi rapproché de la source, implique une très forte différence et produit donc une représentation du flux qui ne correspond pas à l'ordre de grandeur des flux observés sur le domaine.

4.2. Bilan de masse

Le logiciel BIGFLOW possède un outil d'appréciation de la qualité de la simulation effectuée. En effet le bilan de masse permet de constater la cohérence du calcul. On peut apprécier l'erreur sur le bilan de masse en régime permanent. On a donc, pour l'erreur commise pendant la simulation :

$$\begin{aligned} \varepsilon_Q^{ABSOLUE} &= \sum_{6\text{ faces}} Q_{[m^3/s]}^{IN/OUT} - \sum S_0 [m^3/s] \\ \varepsilon_Q^{ABSOLUE} &= Q_{BOUND} - 0 \end{aligned}$$

En effet, $\sum S_0 [m^3/s] = 0$, car le système étudié constitue un doublet.

On peut également exprimer l'erreur relative plus représentative du système étudié par la relation suivante :

$$\varepsilon_Q^{RELATIVE} = \frac{\varepsilon_Q^{ABSOLUE}}{\frac{\sum_{2\text{ faces}} |Q_{A_i}|}{2}}$$

Le bilan de masse global fourni par BIGFLOW nous indique deux valeurs quasi-identiques pour QA1 et QB1. On a ainsi :

$$\begin{cases} Q_{A1} = -0.33315 \\ Q_{B1} = -0.33345 \end{cases}$$

Le calcul de Q_{BOUND} s'effectue à l'aide du volume composé des éléments dx, dy et dz. On a ainsi :

$$Q_{BOUND} = (\text{Intensité source}) \times (dx \times dy \times dz)$$

La valeur de l'erreur relative nous est indiquée par le logiciel, ce qui donne :

$$\varepsilon_Q^{ABSOLUE} = Q_{BOUND} = 0.00029674$$

Finalement le bilan de masse global possède une erreur relative de :

$$\varepsilon_Q^{RELATIVE} = 0.0013$$

Ce qui correspond à une erreur de $\varepsilon_Q^{RELATIVE} = 1 \text{‰}$.

Ce résultat permet de mettre en évidence le fait que le logiciel est bien conservatif.

4.3. Validation des résultats par simulation sous le logiciel Matlab

L'objectif de ce paragraphe consiste à représenter la solution analytique sous le logiciel Matlab et de permettre ainsi de comparer les deux simulations. Pour effectuer cette modélisation, nous nous sommes appuyés sur la solution analytique du doublet de l'expérience de Milne. Celui-ci énonce la formulation pour le potentiel qui se met sous la forme :

$$\Phi = m \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

Où r_1 et r_2 sont les distances de la source à un point P de l'espace et m charge de chaque source qui a pour expression :

$$4\pi m = 4\pi r^2 q_r$$

Et nous obtenons enfin pour le potentiel :

$$\Psi = m(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)$$

Avec ces indications, nous pouvons établir le script suivant qui permet de visualiser le potentiel qui correspond à la solution analytique.

```

clear all;close all;
% Paramètres du problème :
m=10;
a=20;
% Expression du maillage :
[x,y] = meshgrid(0:1:30,-30:1:30);
[x2,y2] = meshgrid(-30:1:0,-30:1:30);
% Expression du potentiel :
fi=m*(1./(sqrt(y.^2+(x-a).^2))-1./(sqrt(y.^2+(a+x).^2)));
fi2=-m*(1./(sqrt(y2.^2+(-x2-a).^2))-1./(sqrt(y2.^2+(a-x2).^2)));
% Tracé du potentiel :
hold on
surf(x,y,fi)
surf(x2,y2,fi2)
hold off
TITLE('Solution analytique du potentiel d`un doublet')
COLORBAR
XLABEL('X ( en mètre )')
YLABEL('Y ( en m )')
ZLABEL('Z ( en m )')

```

Ce programme Matlab conduit à la représentation suivante :

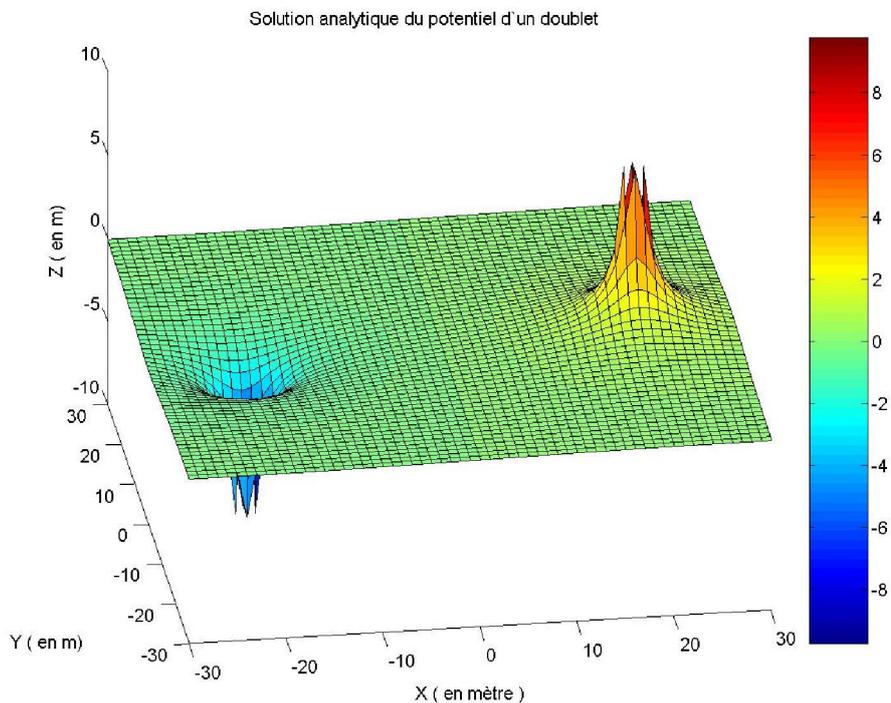


Figure 19 : Solution analytique du potentiel d'un doublet

Pour pouvoir comparer la solution analytique et celle proposée par le logiciel BIGFLOW, nous devons effectuer un programme Matlab pour visualiser les flux issus de ce doublet. Le script suivant permet une visualisation des lignes de courant en deux dimensions :

```

function h=lforce2d(n,clr) % Fonction principale
% Paramètres du problème :
n=5;
d2r = pi/180;
tht = (0:5:360)'*d2r;
A = 2:n;
r = sin(tht).^2*A;
nC = size(r,2);
u = ones(1,nC);
ct = cos(tht)*u;
st = sin(tht)*u;
% Vecteurs position :
x = r.*st;
y = r.*ct;
% On déclenche la procédure de dessin :
figure;
R = max(x(:))/8;
axis equal;
% Trace des lignes de courant :
h = plot(x,y,'r');
[nR,nC] = size(x);
clr=1;
% Trace les vecteurs et leur orientation :
for iR=2:6:floor(nR/2)
    for jC=1:2:nC;
        p1 = [x(iR-1,jC) -y(iR-1,jC)];
        p2 = [x(iR,jC) -y(iR,jC)];
        hv=plotvec(p1,p2,clr);
    end
end
for iR=floor(nR/2)+2:6:nR;
    for jC=1:2:nC;
        p1 = [x(iR-1,jC) y(iR-1,jC)];
        p2 = [x(iR,jC) y(iR,jC)];
        hv=plotvec(p1,p2,clr);
    end
end
hold on;
hc = fcircle(R,[0,0],clr);
hv = plotvec([0 R/2], [0 -R/2],'r');
h=plot([0 0],[R/2, -R/3],'r','LineWidth',3);

TITLE('Solution analytique du potentiel d`un doublet')
YLABEL('X ( en mètre )')
XLABEL('Z ( en mètre)')
hold off;
grid on;
h=[h;hc];

```

Le programme principal est associé à trois programmes auxiliaires qui permettent de tracer les lignes de courant, les vecteurs de la ligne de courant et leur orientation en deux dimensions.

```

% Trace les lignes de courant :
function hh=fcircle(r,o,s)

phi=linspace(0,2*pi);
axis equal;
if nargin==2
    h=patch(r*cos(phi)+o(1),r*sin(phi)+o(2),'');
else
    h=patch(r*cos(phi)+o(1),r*sin(phi)+o(2),s);
end
set(h,'edgec',get(h,'facec'));
set(h,'user',{'fcircle',r,o});
if nargin>2,hh=h;end

% Trace les vecteurs :
function h=plotvec(p1,p2,linespec)

if nargin==2,linespec='';end
held=ishold;hold on
x=[p1(1) p2(1)];
y=[p1(2) p2(2)];
dx=diff(x);
dy=diff(y);
hh(1)=plot(x,y);
ax=axis;
lx=diff(ax(1:2))*15e-3;
ly=diff(ax(3:4))*10e-3;
phi=atan2(dy,dx);
head=rotate2([-lx 0 -lx;ly 0 -ly],[0;0],phi);
col=get(hh(1),'color');
hh(2)=patch(head(1,:)+p2(1),head(2,:)+p2(2),col);
set(hh(2),'edgec',col)
set(hh(1),'user',{'vector',p1,p2,hh(2)})
set(hh(2),'user',{'vector',p1,p2,hh(1)})
if ~held,hold off,end
if nargin>2,h=hh;end

% Trace l'orientation :
function newpoints=rotate2(points,origo,phi)

A=[cos(phi) -sin(phi);sin(phi) cos(phi)];
newpoints=A*points+origo*ones(1,size(points),2);

```

Ce script conduit à la visualisation suivante :

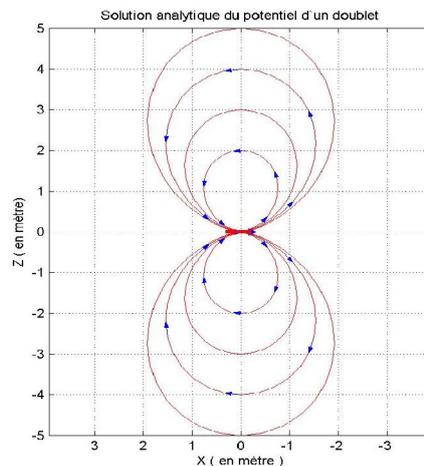


Figure 20 : Solution analytique du potentiel et des lignes de courant d'un doublet

Sur ce graphique nous observons bien le trajet d'une ligne de courant allant de la source positive ici à droite à la source négative à gauche. Nous remarquons l'analogie entre cette représentation et celle fournie par le logiciel BIGFLOW. La représentation en trois dimensions effectuée sous Matlab conduit également à la validation de la simulation sous BIGFLOW.

Solution analytique du potentiel d'un doublet en 3D

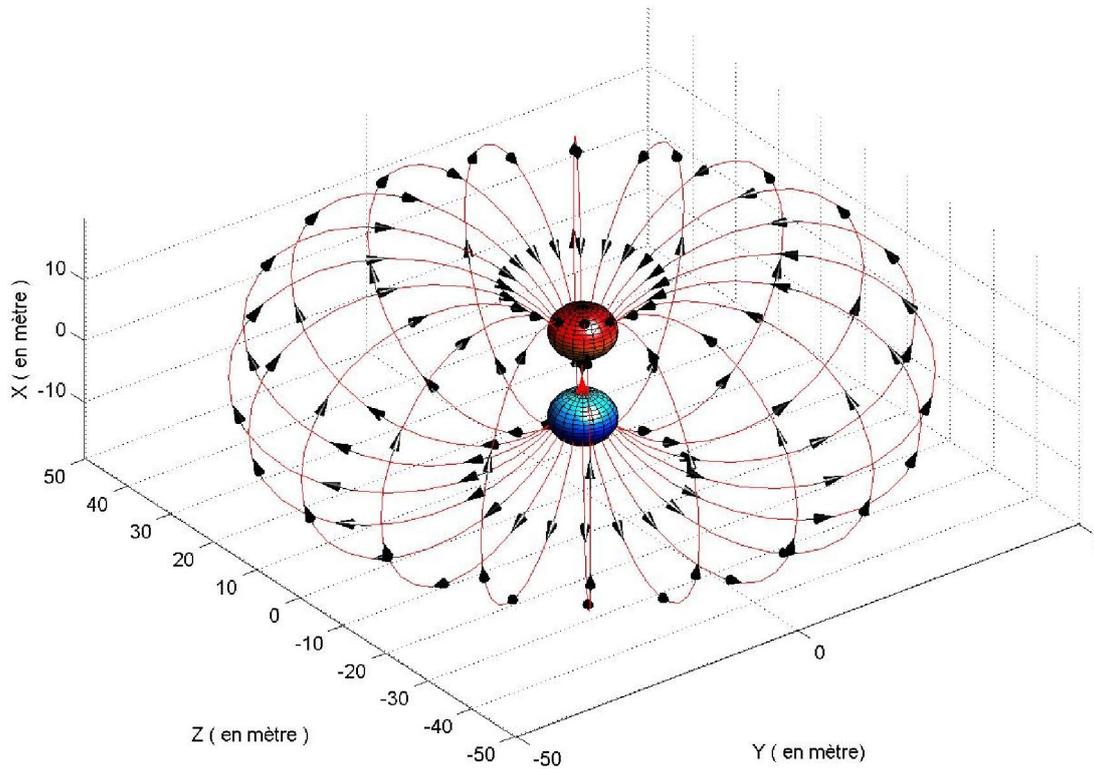


Figure 21 : Potentiel et lignes de courant en 3 Dimensions

La sphère bleue représente la source positive et la sphère rouge la source dite négative. Les vecteurs représentent le sens de parcours de la ligne de courant ; c'est ainsi que nous observons bien un déplacement de la source positive vers le puits. La ligne de courant entre les centres des deux sources est une droite horizontale, ce même résultat étant également visible sous BIGFLOW. L'ensemble de ces résultats nous permet de valider la simulation effectuée par BIGFLOW pour le cas du doublet constitué d'une source positive et d'une source « puits ».

5. CONCLUSION

Après un récapitulatif sur les équations générales qui gouvernent les écoulements en milieux souterrains, nous avons présenté les manipulations ainsi que les premiers écoulements modélisés. Nous avons donc montré un éventail des possibilités que le logiciel BigFlow autorise. Outre le réglage des différentes composantes nécessaires à la simulation, le logiciel permet de définir des conditions initiales et aux limites de façon exhaustive le tout simplifié par une interface graphique agréable. De plus, les principales qualités de ce logiciel ont ensuite été mises en avant par la large palette de traitement des résultats accessible à l'utilisateur. Dans une seconde partie de cette étude, l'accent a été mis sur la validation de cas tests dont la solution fournie par BigFlow a pu être comparé à la programmation de la solution numérique effectuée sous Matlab. L'ensemble des résultats montre la cohérence entre les solutions proposées par le logiciel et celles issues de la théorie représenté numériquement en langage Matlab.

En conclusion, nous avons donc comparé l'ensemble des cas tests effectués ce qui nous permet de valider le code de calcul de la programmation du logiciel BigFlow. La prochaine perspective du développement de ce logiciel sera peut-être l'intégration d'un Système d'Informations Géographiques (SIG) au code de calcul pour mettre en évidence de façon interactive les actions sur le milieu et ces conséquences. On comprend alors l'intérêt d'un tel logiciel dans, par exemple, l'action d'une gestion pérenne de la ressource « eau ».

REFERENCES

ABABOU, R. (2007), *Cours de Mineur anticipée*, Institut National Polytechnique de Toulouse, ENSEEIHT de Toulouse, France

ABABOU, R. (2007), *Documentation du cours de Mineur anticipée*, Répertoire Commun (M :be/Hy/Sysdiff/bigflow) Institut National Polytechnique de Toulouse, ENSEEIHT de Toulouse, France

ABOKHODAIR, A. (2007), Docteur de l'Université King Fahd University of Petroleum & Minerals Département des Sciences du Globe, www.kfupm.edu.sa/es/

MILNE-THOMSON, L.M. (1996), *Theoretical Hydrodynamics*, Dover, New-York

UTAH (2007), Université de l'UTAH, www.utah.edu