

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Localisation de l'interface eau douce - eau salée par un modèle a interface abrupte dans l'aquifère côtier de l'Oued Djendjen (w. Jijel).

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0007-17

APA Citation (توثيق APA):

Chemini, Katia (2017). Localisation de l'interface eau douce - eau salée par un modèle a interface abrupte dans l'aquifère côtier de l'Oued Djendjen (w. Jijel)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات الموريات، كتب....) و بنه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE URBAINE

MEMOIRE DE MASTER

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option : CONCEPTION DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT

THEME DU PROJET

**LOCALISATION DE L'INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALEE PAR UN
MODELE A INTERFACE ABRUPTTE DANS L'AQUIFERE COTIER DE
L'OUED DJENDJEN (W.JIJEL)**

PRESENTE PAR :

M^{lle} CHEMINI Katia

Devant les membres du jury

| Nom et Prénoms | Grade | Qualité |
|---|--------------|----------------|
| M^f : MEDDI Mohamed | Professeur | Président |
| M^{me} : AZIEZ Wahiba | M.A.A | Examinatrice |
| M^f : YAHIAOUI Samir | M.A.A | Examineur |
| M^f : BOUZIANE Omar | M.A.A | Examineur |
| M^f : HACHEMI Abdelkader | M.C.B | Promoteur |

Avril 2017

DEDICACE.

Je dédie ce modeste travail : A mes chers parents, pour leur soutien, leur patience et leur sacrifice. Vous méritez tous les éloges Possibles. Que dieu vous garde et vous bénisse.

Je dédie aussi ce travail à mon cher frère YUBA et mes chères sœurs Zahra et Lydia pour leur affection et leurs encouragements qui ont été toujours pour moi des plus précieux. Que ce mémoire soit pour vous le gage de mon profond amour.

Je le dédie aussi à tous mes amis Amina, Tino, Khadidja, Amel, Nour el Houda, Dikra, Brahim, Smail, Amine et à tous ceux qui m'ont aidé. Sans oublier ma très chère nièce MERJEM et mon cher neveu ADEM.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord DIEU tout puissant qui m'a procuré le courage et la volonté nécessaire pour mener à bien et élaboré ce modeste travail.

Je remercie mon promoteur

Monsieur HACHEMI Abdelkader pour son soutien, ses encouragements et conseils et ainsi que sa disponibilité.

Je remercie aussi tous mes enseignants qui m'ont formé pour arriver à ce niveau-là.

Mes sincères remerciements vont également à tous ceux qui ont apportés leur contribution à l'élaboration de mon mémoire:

Le personnel de l'ANRH de Jijel pour avoir mis à ma disposition la documentation nécessaire, en particulier M^r K. Babay et M^{me} H. Chikfi.

A ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

« DU FOND DU CŒUR MERCI A TOUS »

Résumé

Abstract

في هذا العمل، تم التركيز على مسألة شائكة وهو تسرب مياه البحر إلى المياه الجوفية الساحلية. وقد أجري البحث على الخزان الجوفي لنهر جنجن بولاية جيجل، حيث يتعرض هذا الأخير لمشكلة تسرب المياه المالحة بسبب الاستخدام المكثف للطبقة المياه الجوفية. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد موقع الحد الفاصل بين المياه المالحة و المياه العذبة بواسطة نموذج عددي يعتمد على مبدأ الحد الفاصل Sharpinterface التي وضعها السيد هاشمي.

Résumé

Dans ce travail de recherche, nous nous concentrerons sur un problème d'actualité qui est l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers. La recherche a été menée sur la plaine de l'oued Djendjen (W.Jijel), Cette dernière est exposée à ce problème du biseau salé à cause de l'utilisation extensive de l'aquifère. Il est recommandé de surveiller l'extraction et de contrôler le retrait.

Dans cette étude, notre but consiste à localiser l'interface eau douce- eau salé par un modèle à interface abrupte, ou nous appliquons le code de calcul Sharpinterface développé par M^f HACHEMI.

Abstract

This work focuses on the current problem sea water intrusion in coastal aquifers. The purpose of this study is to locate the interface between freshwater and salt water by a model with an abrupt interface, we apply the Sharpinteface computation code developed by Mr HACHEMI. The research is carried out on the plain of the Oued Djendjen (W.Jijel). The latter is exposed to this problem of the salt bevel due to the extensive use of the aquifer. It is recommended to monitor the extraction and control the removal.

Sommaire

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
|----------------------------|---|

CHAPITRE I: Présentation de la zone d'étude

| | |
|---|----|
| Introduction | 2 |
| I.1. Situation Géographique | 2 |
| I.2. Réseau hydrographique..... | 3 |
| I.3. Hydroclimatologie | 4 |
| I.4. Géologie de la plaine de l'oued Djendjen..... | 8 |
| I.5. Paléogéographie et tectonique de la région | 10 |
| I.6. Hydrogéologie de la zone d'étude (plaine de l'oued Djendjen) | 10 |
| I.6.1. Géométrie de la couche réservoir | 10 |
| I.6.2. La coupe hydrogéologique | 11 |
| I.6.3. Interprétation de la carte piézométrique | 12 |
| I.7. Hydrodynamique de la nappe | 13 |
| I.8. Géophysique (plaine de l'oued Djendjen)..... | 14 |
| I.9. Chimie des eaux | 16 |
| Conclusion..... | 19 |

CHAPITRE II: Recherche bibliographique

| | |
|---|----|
| Introduction | 20 |
| II.1. Origines de la salinité des eaux souterraines en zones côtières | 20 |
| II.2. Causes de la salinité..... | 21 |
| II.3. Moyens de prévention et de lutte..... | 21 |
| II.4. Modélisation mathématique du biseau salé | 22 |
| II.4.1. Modèle 2D avec interface abrupte | 22 |
| II.4.2. Les hypothèses de base | 22 |
| II.4.3. Approche de Badon –Ghyben-Herzberg (BGH)..... | 23 |
| II.4.4. Modèle mathématique..... | 23 |
| II.4.5. Conditions initiales et aux limites..... | 25 |
| II.4.6 Solutions analytiques | 25 |
| II.4.6.1 Interface dans une nappe captive..... | 25 |
| II.4.6.2 Interface dans une nappe libre..... | 27 |
| Conclusion..... | 31 |

CHAPITRE III: *Présentation du code de calcul « SHARPINT»*

| | |
|---|----|
| Introduction | 32 |
| III.1. Présentation de la méthode des éléments finis | 32 |
| III.1.1. Formulation intégrale | 32 |
| III.1.2. Formulation par éléments finis : Méthode de Galerkin | 33 |
| III.2. Application de la méthode des éléments finis au modèle d'interface abrupte | 34 |
| III.2.1. Approximation par éléments finis | 35 |
| III.2.2. Approximation sur un élément de référence..... | 35 |
| III.3. Discrétisation de la forme intégrale | 36 |
| III.4. Discrétisation temporelle..... | 37 |
| III.5. Algorithme de résolution..... | 38 |
| III.6. Mise en œuvre du code..... | 41 |
| III.6.1. Etape de prétraitement (programme maillage) | 41 |
| III.6.2. Etape de traitement | 41 |
| III.6.3. Etape de post-traitement | 41 |
| Conclusion..... | 42 |

CHAPITRE IV : Localisation de l'interface eau douce - eau salée

| | |
|---|----|
| Introduction | 43 |
| IV.1. Modèle conceptuel | 43 |
| IV.1.1. Conditions aux limites imposées | 43 |
| IV.1.2. maillage de la structure..... | 44 |
| IV.1.3. Jeu de données..... | 45 |
| IV.2. calage du modèle..... | 46 |
| IV.3. Prévision spatiotemporelle de l'interface eau douce eau salée | 49 |
| Conclusion | 51 |
| | |
| CONCLUSION GENERALE..... | 52 |

Liste des tableaux

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I.1. Variations mensuelles des précipitations aux niveaux des trois stations..... | 4 |
| Tableau I.2. Températures moyennes mensuelles à la station de l'Achouat | 5 |
| Tableau I.3. Valeurs moyennes mensuelles d'évaporation à la station de l'Achouat..... | 5 |
| Tableau I.4. ETP moyennes mensuelle et annuelle de la station de l'Achouat | 6 |
| Tableau I.5. Valeurs moyennes de l'humidité relative de l'atmosphère (en %) à la station d'Achouat | 7 |
| Tableau I.6. Vitesses moyennes mensuelles du vent (m/s) à la station d'Achouat | 7 |
| Tableau I.7. Les caractéristiques hydrodynamiques du champ de captage Oued Djendjen ... | 13 |
| Tableau IV.1. Jeu de données | 45 |

Liste des figures

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Plan de situation | 2 |
| Figure I.2. Carte du bassin versant de l'oued Djendjen | 3 |
| Figure I.3. Esquisse géologique de la plaine alluviale de l'oued Djendjen | 9 |
| Figure I.4. Coupe hydrogéologique N-S dans la plaine alluviale de l'oued Djendjen | 11 |
| Figure I.5. Carte piézométrique de la plaine alluviale de l'oued Djendjen | 12 |
| Figure I.6. Carte du toit du substratum | 15 |
| Figure I.7. Carte d'iso-minéralisation des eaux souterraines | 17 |
| Figure I.8. Carte d'iso-teneurs en sodium et potassium des eaux souterraines..... | 18 |
| Figure I.9. Carte d'iso-teneurs en chlorures des eaux souterraines..... | 19 |
| Figure II.1. Représentation schématique de l'interface « eau douce-eau salée »..... | 20 |
| Figure II.2. Biseau salée, principe de Badon - Ghyben – Herzberg (Bear, 1979) | 23 |
| Figure II.3. Modèle à interface abrupte du biseau salé extrait (Bear, 1979)..... | 24 |
| Figure II.4. Interface abrupte dans une nappe captive extrait (Bear et Cheng, 2010) | 26 |
| Figure II.5. Problème de Glover (Bear et al, 1999) | 27 |
| Figure II.6. Interface abrupte dans une nappe libre extrait de Bear et al. (1999) | 27 |
| Figure II.7. Problème de Strack | 28 |
| Figure II.8. Positions de l'interface du biseau salé selon le modèle de Strack | 29 |
| Figure II.9. Phénomène d'Upconning..... | 30 |
| Figure III.1. Organigramme de calcul du code SHARPINT | 39 |
| Figure III.2. Etapes d'exécution du code de calcul Sharpint..... | 42 |
| Figure IV.1. Limites de la nappe et conditions aux limites..... | 44 |
| Figure IV.2. Maillage de la structure | 45 |
| Figure IV.3. Piézométries simulées et mesurées (Mai 2012)..... | 46 |
| Figure IV.4. Position de l'interface eau douce eau salée (Mai 2012)..... | 48 |
| Figure IV.5. Position de l'interface eau douce eau salée En 2017..... | 49 |
| Figure IV.6. Position de l'interface eau douce eau salée En 2030..... | 50 |

Introduction générale

Introduction générale

Le phénomène d'invasion marine, qui peut s'étendre sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres est d'un grand risque pour les régions côtières tributaires des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe située à proximité de la mer. Par ailleurs, l'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux.

L'Algérie, comme tous les pays riverains de la Méditerranée, a connu des périodes de sécheresse au cours des deux dernières décennies. Le manque d'eau a entraîné une sollicitation accrue des nappes. Les aquifères menacés par ce danger sont ceux des régions côtières marquées par une très forte densité de puits et forages se traduisant par une surexploitation intense des nappes provoquant une augmentation de la minéralisation de leurs eaux. Ceci constitue un facteur limitant pour leur utilisation.

Notre zone d'étude est la plaine alluviale d'Oued Djendjen, le fait de sa proximité de la ville de Jijel et en raison de potentialités hydriques intéressantes qu'elle recèle, cette plaine constitue un aquifère vulnérable à l'intrusion marine dans sa partie Nord, à cause de plusieurs facteurs, à savoir :

- ▶ la multiplication des forages dans la nappe et leur surexploitation,
- ▶ l'exploitation anarchique des sablières,
- ▶ la pente topographique faible de l'aquifère,
- ▶ la sécheresse qui a sévi par alternance sur le pays, notamment durant la dernière décennie 1990.

Le but recherche par ce travail est de localiser l'interface eau douce – eau salée dans l'espace et dans le temps au niveau de l'aquifère alluvial de l'Oued de Djendjen, ou nous appliquons le code de calcul SHARPINT développé par M^r HACHEMI.

CHAPITRE I

Introduction

La plaine de l'oued Djendjen s'étend à la cote Jijelienne (Algérie) au Nord Est, l'écoulement souterrain de la nappe est unidirectionnel et converge globalement vers la mer Méditerranée. La surexploitation de la nappe à entraîné un rabattement général de son niveau piézométrique, lequel à causer une intrusion marine surtout dans les zones de la région de Taher et Emir Abdelkader. L'augmentation de la salinité est causée dans des zones par l'intrusion marine et dans d'autres par l'infiltration de polluants minéraux et organiques issus des rejets domestiques et industriels et de l'usage des engrais chimiques.

I.1. Situation Géographique

La plaine de l'oued Djendjen est située dans la région de Jijel, au Nord Est de l'Algérie. Elle est distante de 360 Km à l'Est d'Alger, et bordée au Nord par la mer Méditerranée (Fig.1).

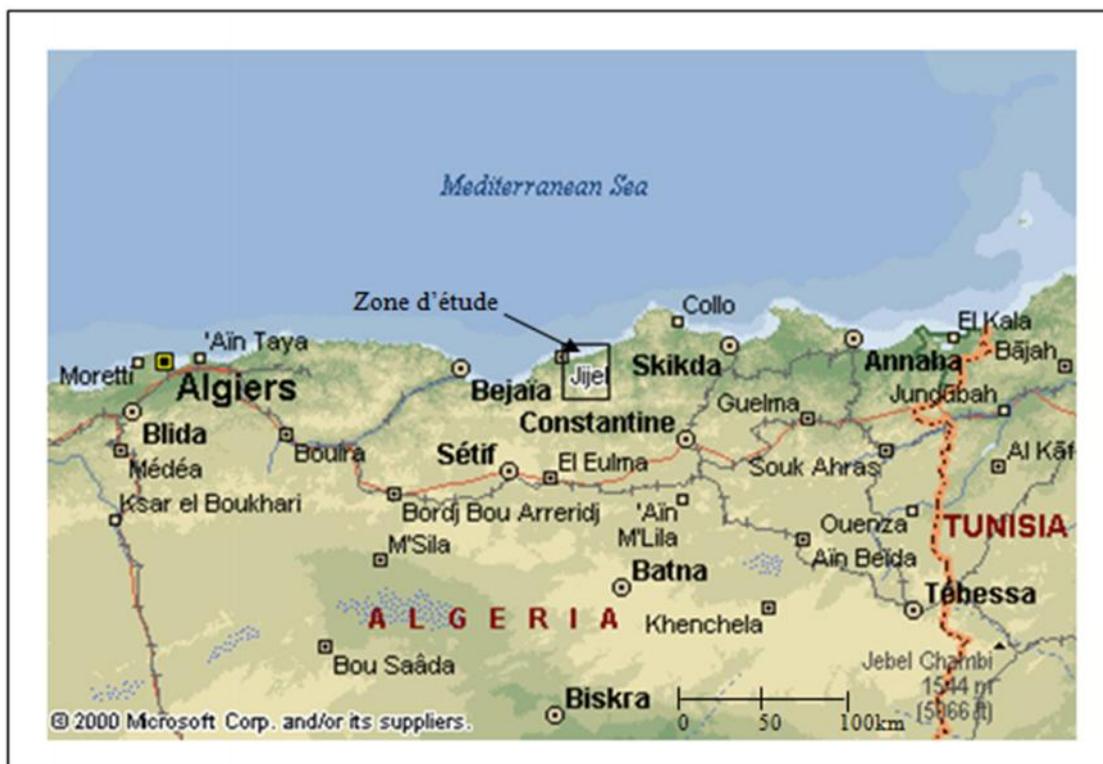


Figure I.1. Plan de situation

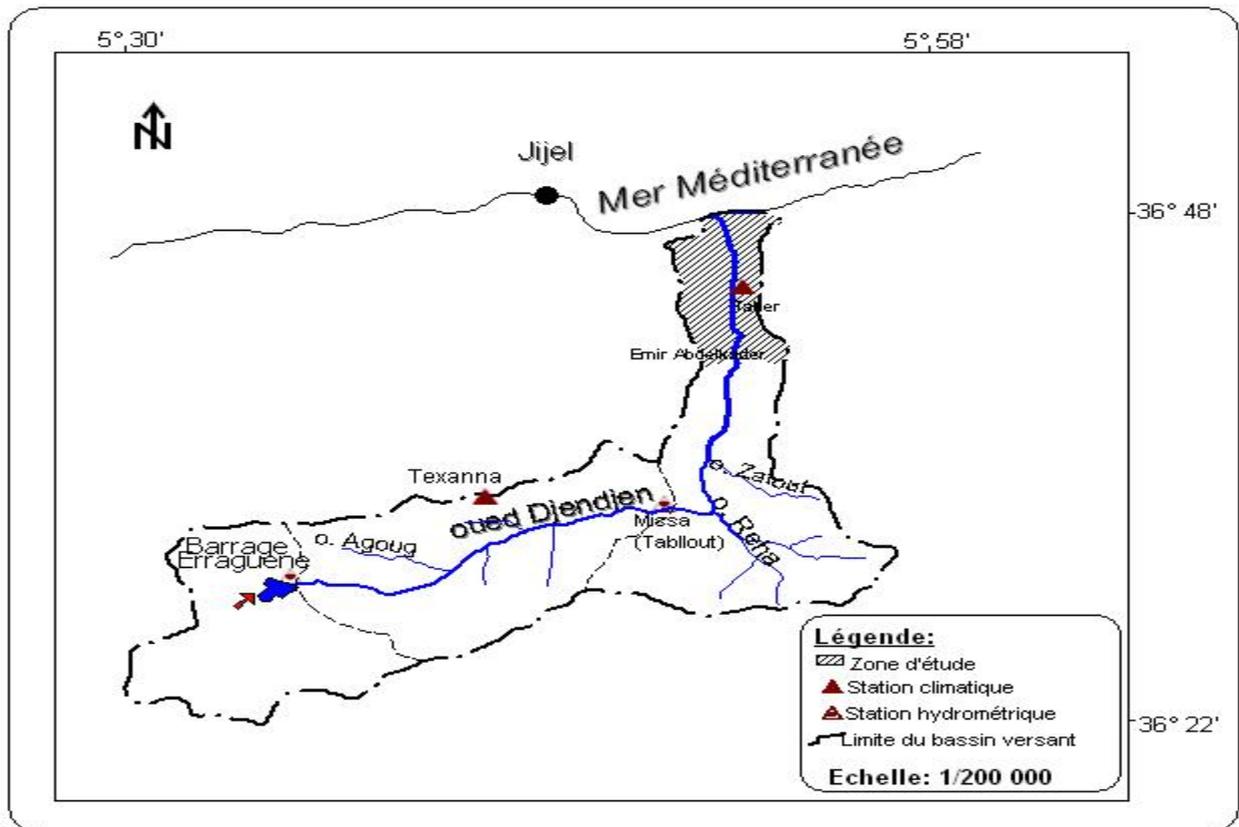
Source : google

► Présentation de la plaine étudiée

Selon le découpage hydrographique de l'ANRH, l'oued Djendjen appartient au bassin versant « côtiers constantinois » du Nord Est algérien.

La plaine étudiée occupe la zone avale de ce sous bassin et se situe à environ 9 km à l'est de la ville de Jijel. Elle s'étend sur une superficie de 33 Km².

Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée et au Sud par les reliefs de Texanna. Latéralement, elle est bordée à l'ouest par la plaine de l'oued Mencha et à l'Est par celle de l'oued Nil. Elle forme une cuvette d'altitude variant entre 5 et 100 m, allongée Sud Nord, ouverte vers la mer.



I.2. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est dense, traduisant un drainage élevé. Avant de s'ouvrir sur les plaines littorales, l'oued Djendjen est très encaissé à l'amont, empruntant des ravins qui entaillent les reliefs de Texanna et Thar Oussaf. Parmi ses affluents principaux, citons : les oueds Agoug, Reha et Zatout.

L'oued Djendjen prend naissance dans le djebel Babor. La présence à l'amont de seuils rocheux particulièrement résistants à l'érosion, accroît la force du ruissellement et induit des débits de crues instantanés, élevés.

La pente de l'oued Djendjen s'adoucit et s'estompe d'avantage en pénétrant dans le plain aval où, elle devient plus faible. Ceci va impliquer, à ce niveau, un ralentissement de la vitesse d'écoulement qui aura une incidence sur les relations des eaux superficielles avec la nappe.

La longueur de l'oued principal est de 29.2 km. Il a d'abord une direction Ouest- Est, jusqu'à la station hydrométrique de Missa (Tablout), puis s'oriente Sud-Nord, jusqu'à la mer.

I.3. Hydroclimatologie

En ce qui concerne la région de Jijel qui fait partie du littoral Est Algérien, le climat est de type méditerranéen.

a) – Précipitations

Notre région d'étude est l'une des plus arrosées de l'Algérie, l'étude pluviométrique sert à l'évaluation globale de la lame d'eau tombée qui a une influence sur la variation du niveau d'eau de surface et souterraine à travers le bassin versant étudié.

Nous avons choisi trois stations avoisinant le secteur d'étude dont les caractéristiques sont reportées dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Variations mensuelles des précipitations aux niveaux des trois stations

| Station Jijel Secteur {2005-2015} | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|-------|----------|
| Mois | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fev | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Annuelle |
| Moyenne | 72.78 | 88.69 | 172.21 | 196.8 | 134.99 | 168.11 | 126.73 | 69.1 | 47.85 | 12.85 | 0.76 | 24.09 | 1114.92 |
| Station Erraguène {1987-2006} | | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fev | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Annuelle |
| Moyenne | 54.03 | 86.57 | 173.55 | 253 | 213.12 | 118.68 | 88.7 | 132.32 | 53.31 | 17.65 | 4.96 | 5.26 | 1201.2 |
| Station L'Achouat {1987-2006} | | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fev | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Annuelle |
| Moyenne | 61.16 | 76.97 | 148.64 | 203.9 | 138.75 | 109.62 | 66.91 | 89.05 | 47.1 | 15.55 | 3.44 | 12.45 | 973.56 |

Source : ANRH de Jijel

Ces tableaux montrent que les précipitations maximales pour les trois stations varient entre 190 et 255 mm pendant le mois de décembre, et les précipitations minimales varient entre 0.7 et 5 observée pendant le mois de juillet.

b) – Température

La température de l'air est un facteur qui a une grande influence sur le bilan hydrologique du fait de son impact sur le déficit d'écoulement (évapotranspiration). Le tableau suivant résume, les données concernant ce paramètre, mesurées uniquement à la station de l'Achouat.

Tableau I.2. Températures moyennes mensuelles à la station de l'Achouat (1987-2006)

| Mois Station | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Moy |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L'Achouat | 24.06 | 20.59 | 15.06 | 12.69 | 11.56 | 11.40 | 13.49 | 15.06 | 18.43 | 21.58 | 24.74 | 25.45 | 18.74 |

Source : ANRH de Jijel

La période qui s'étale du mois de novembre au mois d'avril correspond à la période froide avec un minimum durant le mois de février (11.40 °C), alors que la période chaude commence à partir du mois de septembre avec un maximum marqué durant le mois de juillet égale à 24.74 °C ; La moyenne annuelle est de l'ordre de 18.74°C.

c) - Evaporation

L'estimation de l'évaporation dont il est question ci-dessous se base sur des mesures effectuées à la station de Jijel-Achouat durant la période de 1987-2006. Les résultats disponibles sont consignés dans le tableau I.3 :

Tableau I.3. Valeurs moyennes mensuelles d'évaporation à la station de l'Achouat (1997-2006)

| Mois Station | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|----------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Station de l'Achouat | 78 | 69.6 | 51.5 | 44.7 | 47.9 | 40.5 | 55.7 | 55.1 | 57.3 | 83.9 | 88.4 | 87.6 |

Source : ANRH de Jijel

Pour ces années d'observation (1987-2006) le maximum d'évaporation a été enregistré au mois de juillet (88.4 mm) et le minimum, au mois février (40.5 mm). Pour la saison estivale, allant de juin à septembre, l'évaporation représente 44.44 % du total annuel. Le total annuel étant de 760.2 mm.

➤ **Calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Thornthwaite**

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau pouvant être restituée à l'atmosphère par transpiration des êtres vivants et évaporation du sol et des surfaces d'eaux libres, si celui-ci contient en permanence la quantité d'eau suffisante.

▪ **L'évapotranspiration potentielle (ETP)**

On utilise la méthode de C.W Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), Selon cette méthode, l'estimation de l'ETP s'effectue à l'aide d'une formule empirique permettant de calculer le pouvoir évaporant (en mm) pour chaque mois.

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a .K$$

Avec :

- ETP : évapotranspiration potentielle annuelle en mm,
- T : température moyenne mensuelle en °C,
- I : somme des indices thermiques mensuels i : $I = 81.90, i = (T/5)^{1.514}$
- K : facteur de correction mensuel, fonction de la durée de la journée,
- a : exposant climatique : $a = 0.016 I + 0.5$; donc $a = 1.810$

Les résultats sont portés sur le tableau (I.4).

Tableau I.4. ETP moyennes mensuelle et annuelle de la station de l'Achouat (1987 – 2006)

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Total |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| T (°C) | 24.06 | 20.59 | 15.06 | 12.69 | 11.56 | 11.4 | 13.49 | 15.06 | 18.43 | 21.58 | 24.74 | 25.45 | / |
| I | 10.79 | 8.52 | 5.3 | 4.09 | 3.55 | 3.48 | 4.49 | 5.3 | 7.2 | 9.15 | 11.25 | 11.74 | 84.86 |
| K | 1.03 | 0.97 | 0.86 | 0.84 | 0.87 | 0.85 | 1.03 | 1.1 | 1.21 | 1.22 | 1.24 | 1.16 | / |
| ETP (mm) | 113.3 | 79.99 | 39.76 | 28.29 | 24.66 | 18.27 | 38.84 | 50.86 | 81.28 | 109.74 | 143.62 | 141.57 | 870.18 |

Source : ANRH de Jijel

d) – Humidité relative

Elle représente le rapport exprimé en pour-cent de la tension de vapeur d'eau observée à la tension de vapeur de saturation pour une température donnée.

Tableau I.5. Valeurs moyennes de l'humidité relative de l'atmosphère (en %) à la station d'Achouat (période : 1997-2006)

| Mois Station | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|----|
| Station de l'Achouat | 74.1 | 73.3 | 76.3 | 77.2 | 77.6 | 78.1 | 75.9 | 75.4 | 77.8 | 73 | 71.7 | 71 |

Source : ANRH de Jijel

Dans la zone côtière, les valeurs moyennes mensuelles d'humidité relative sont, en général, élevées toute l'année et leurs amplitudes saisonnières, relativement faibles. Le minimum (71%) s'observe aux mois d'août et le maximum (78%), au mois de février

e) – Les vents

C'est un agent climatique influant directement sur le climat d'une région, en raison des dégâts qu'il cause, notamment en agriculture. Ainsi, la région Jijillienne est généralement traversée par des vents de direction NNW - SSE. Nous ne disposons que des données de la station de Jijel-Achouat (Tab I.6).

Tableau I.6. Vitesses moyennes mensuelles du vent (m/s) à la station d'Achouat (1997-2006)

| Mois Station | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Station de l'Achouat | 2.3 | 2.1 | 2.1 | 5.3 | 2.2 | 2.3 | 2.5 | 2.1 | 1.9 | 2.1 | 2.1 | 2.2 |

Source : ANRH de Jijel

Le tableau I.6 montre que les vitesses moyennes les plus élevées s'observent en hiver (5.3 m/s en décembre)

f) – Brouillard

Il est presque absent sur la bande littorale. Sur la plaine de l'oued Djendjen, on observe en moyenne de 2 à 4 jours/an, de brouillard.

I.4. Géologie de la plaine de l'oued Djendjen

La zone qui se trouve en position littorale de l'Est Jijilien n'a, jusqu'à présent, fait l'objet d'aucune étude géologique détaillée. Nous ne disposons que de quelques données sur la partie amont du secteur d'étude, étudiée par Durand Delga. Cette étude a été reprise par Raoult J.F. en 1974, qui a apporté des compléments d'informations, pour la partie avale.

L'esquisse géologique établie par M. G. Durozoy en 1954 (Fig I.4), reprise par la C.G.G en 1961 lors de la prospection géophysique, permet de distinguer de bas en haut la lithostratigraphie suivante :

➤ **Au Miocène**

Le Burdigalien (m1) est représenté essentiellement par des marnes grises parfois sableuses, jaunâtres (oxydation) d'origine marine. D'épaisseur 200 à 300 mètres, le Burdigalien est caractérisé par un faciès très constant d'intercalations de niveaux détritiques et de gros nodules de calcaires jaunes, formant les masses principales des coteaux de bordure de la vallée.

Le Pontien (m3) se présente sous forme de dépôts continentaux, il est constitué par des galets, des cailloutis et des poudingues qui se trouvent mêlées à des argiles, l'ensemble de cette série plus au moins cimentée présente une perméabilité moyenne. Son épaisseur variée de (30 à 50 m).

➤ **Au Quaternaire**

Les terrasses anciennes (q) : sont constituées par des cailloutis, des graviers et des galets qui sont très perméables et généralement aquifères. Parfois, les matériaux des terrasses peuvent être partiellement cimentés et former des conglomérats qu'on peut confondre avec ceux du Pontien. Ils ont une épaisseur de 15 mètres.

Les dunes anciennes (D) : sont présentes autour de Bazoul et Tassoust. Ces dunes sont constituées de sables jaune rouille, limoneux, souvent consolidés, ayant une épaisseur de 20 mètres.

Les alluvions récentes limoneuses (a²) : sont des dépôts essentiellement limoneux des basses vallées. D'épaisseur généralement inférieure à 20 mètres, elles se développent surtout sur la rive droite de l'oued Djendjen.

Les dunes récentes (d) : forment un cordon tout le long de la mer. Constituées de sables grossiers parfois consolidés, leur épaisseur est de l'ordre de 15 mètres.

Les alluvions actuelles (a) sont constituées de sables, graviers, conglomérats et de galets perméables. Leur épaisseur peut dépasser les 20 mètres.

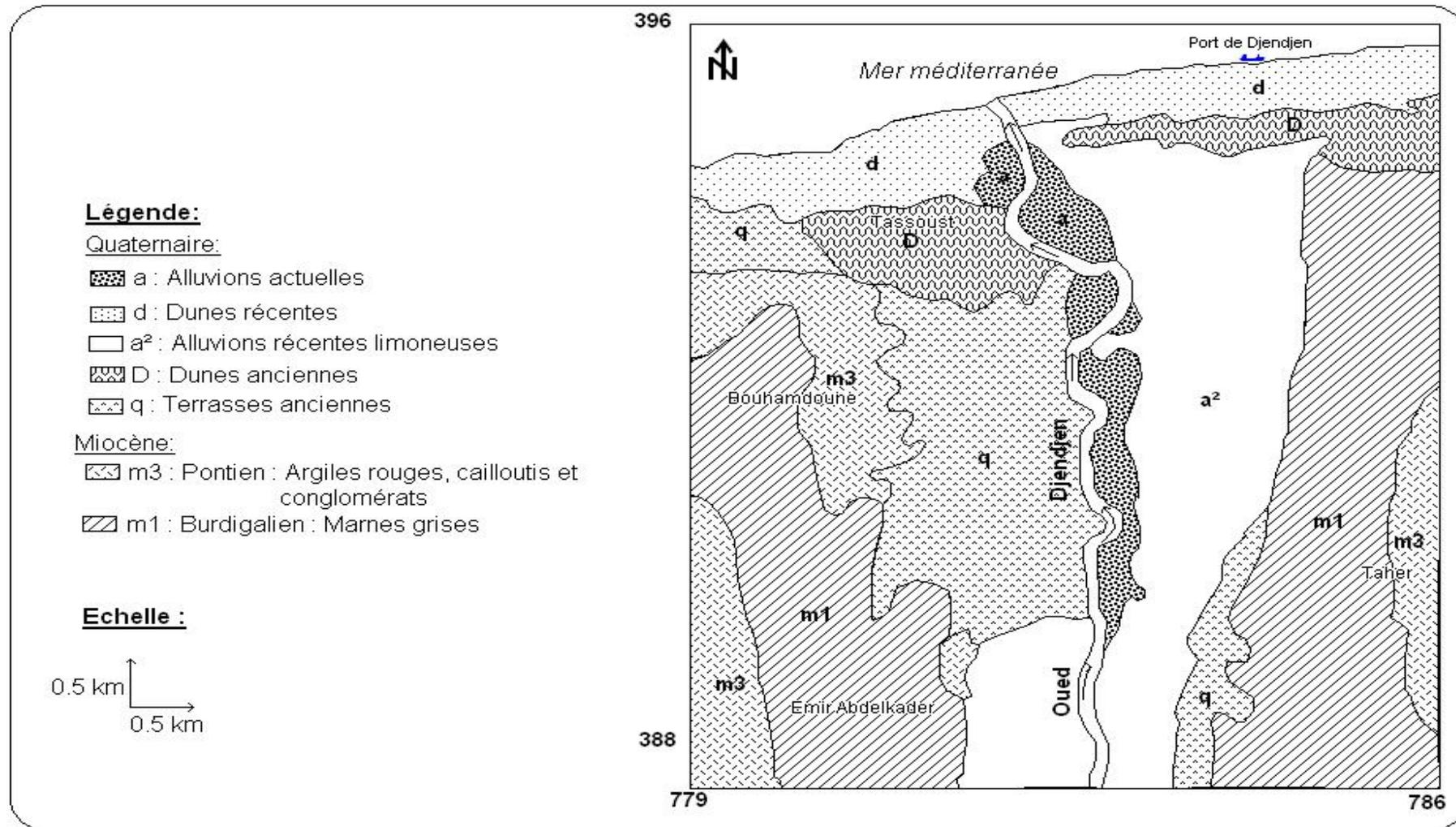


Figure I.3. Esquisse géologique de la plaine alluviale de l'oued Djendjen (Etablie par A. Boufekane, Mai 2003)

I.5. Paléogéographie et tectonique de la région

D'un point de vue tectonique, la région est caractérisée par d'importants contacts anormaux et autres accidents tectoniques, notamment dans la région de Texanna. Les remarques de Durand Delga (1949) sur "la structure géologique des environs de Texanna" permettent de déduire l'évolution paléogéographique de cette région :

Durant le Crétacé, au Sud de Texanna il y a eu recouvrement des flyschs du Crétacé, appartenant au domaine des Babors, par le socle cristallin de la petite Kabylie. L'importance de ce déplacement est attestée par l'existence de klippen à matériel Paléozoïque posé sur le Crétacé. Au Nord de Texanna une grande partie de la série mésozoïque manque entre le Paléozoïque et le Crétacé.

A quelques kilomètres au Sud, le Secondaire est complet et très épais. Le voisinage actuel des séries si différentes s'explique par le charriage du massif kabyle. Le charriage qui a rapproché la zone septentrionale à flysch transgressive sur le Primaire de la zone méridionale où le flysch est situé dans le Crétacé inférieur.

L'ensemble de ces mouvements s'est effectué avant le dépôt du Numidien qui s'est déposé dans un bassin situé au Sud du socle kabyle qui est discordant à partir de l'Oligocène jusqu'au Burdigalien sur n'importe quel autre terme plus ancien ou de même âge (Oligo-Miocène kabyle).

Le Burdigalien est transgressif et discordant sur n'importe quel terme précédent avec une sédimentation surtout marneuse qui s'est déposée lors d'une période calme. La mer s'est ensuite retirée pour ne revenir qu'au Pliocène sur la marge côtière de Jijel et plus à l'Est dans la vallée de l'oued kebir d'El-Milia.

I.6. Hydrogéologie de la zone d'étude (plaine de l'oued Djendjen)

Du fait de sa proximité de la ville de Jijel et en raison de potentialités hydriques intéressantes qu'elle recèle, cette plaine a fait l'objet de plusieurs études hydrogéologiques, aux cours des dernières décennies.

I.6.1. Géométrie de la couche réservoir

Le terrain réservoir se présente sous la forme d'une gouttière, jalonnée par l'oued. Il débute au niveau de la limite sud des affleurements marneux du Burdigalien et se termine à l'embouchure de l'oued. Bien qu'elle augmente d'amont en aval, son extension latérale est faible par rapport à sa longueur. La carte du toit du substratum (Fig I.9) donne une idée de la configuration de cette couche réservoir.

La couche aquifère est composée d'alluvions quaternaires : sables fins, moyens et grossiers et des galets, comportant quelques fois des intercalations argileuses.

I.6.2. La coupe hydrogéologique

L'étude d'une nappe nécessite l'établissement de coupes hydrogéologiques permettant de représenter la structure de l'aquifère et de préciser sa lithologie, sa géométrie et la configuration de sa surface piézométrique. L'espacement des forages qui le traversent ainsi que les conditions aux limites doivent être définis.

Dans le cas de la nappe alluviale de l'oued Djendjen, nous avons pu élaborer, à l'aide des données disponibles (carte piézométrique et logs stratigraphiques de forages), la coupe hydrogéologique représentée par la (fig I.4). Cette coupe, longitudinale, traversant l'aquifère selon la direction N-S, donne les informations suivantes :

- ✓ L'aquifère est constitué de formations alluviales du Quaternaire et du Miocène supérieur (Pontien), représentées essentiellement par des sables, graviers et galets, contenant parfois des intercalations argileuses,
- ✓ Son substratum est marneux, d'âge Miocène inférieur (Burdigalien),
- ✓ L'épaisseur de l'aquifère dépasse 25 m au niveau du forage D20 (zone centrale),
- ✓ Il existe un bombement du substratum au niveau du forage D26 (Nord), où l'épaisseur de la nappe ne dépasse pas 15 m,
- ✓ Le niveau piézométrique diminue du Sud au Nord, le long de l'oued Djendjen.

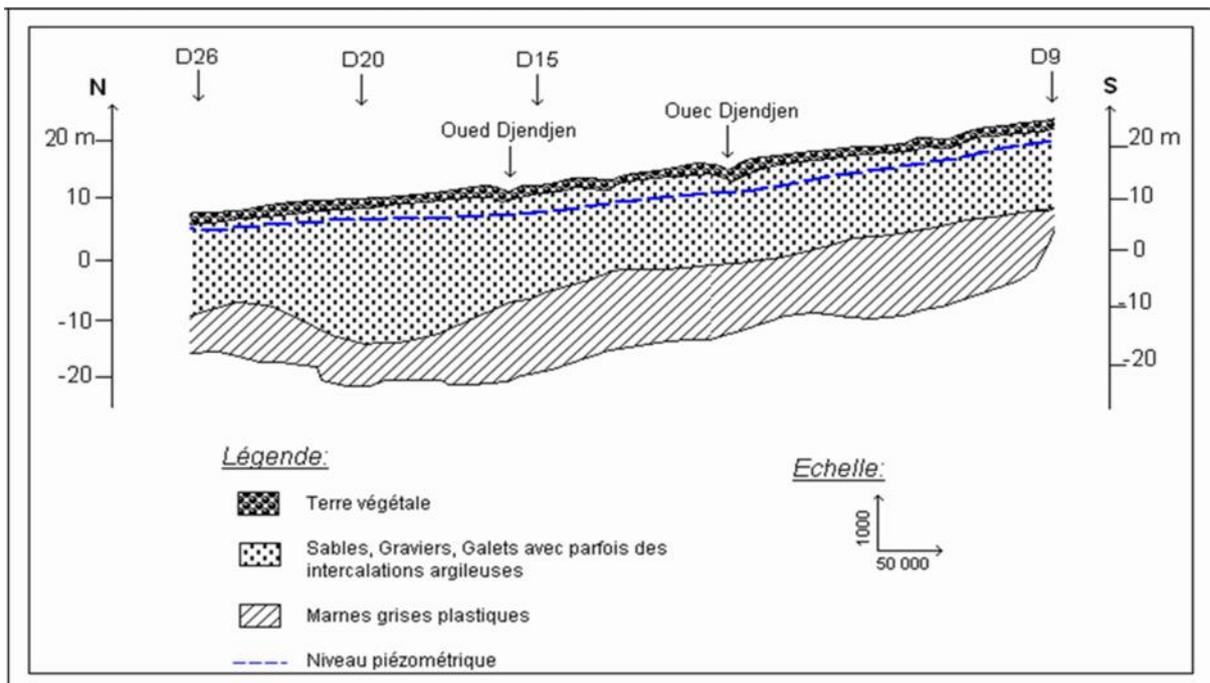


Figure I.4. Coupe hydrogéologique N-S dans la plaine alluviale de l'oued Djendjen

Source : ANRH de Jijel

I.6.3. Interprétation de la carte piézométrique

Cette carte (Fig.I.5) représente l'état piézométrique de la nappe au mois de mai 2003. Elle montre :

- un sens général de l'écoulement souterrain vers le Nord, c'est à dire vers la mer,
- un gradient hydraulique global compris entre 1.8 et 3%, mais qui est faible dans l'axe central,
- Sur la rive gauche, l'écoulement souterrain est dirigé vers oued Djendjen, qui collecte les eaux et assure leur drainage vers la mer,
- sur la rive droite, l'espacement des courbes isopièzes est plus grand ($I=0.45\%$ à 0.80%), traduisant un écoulement plus faible.

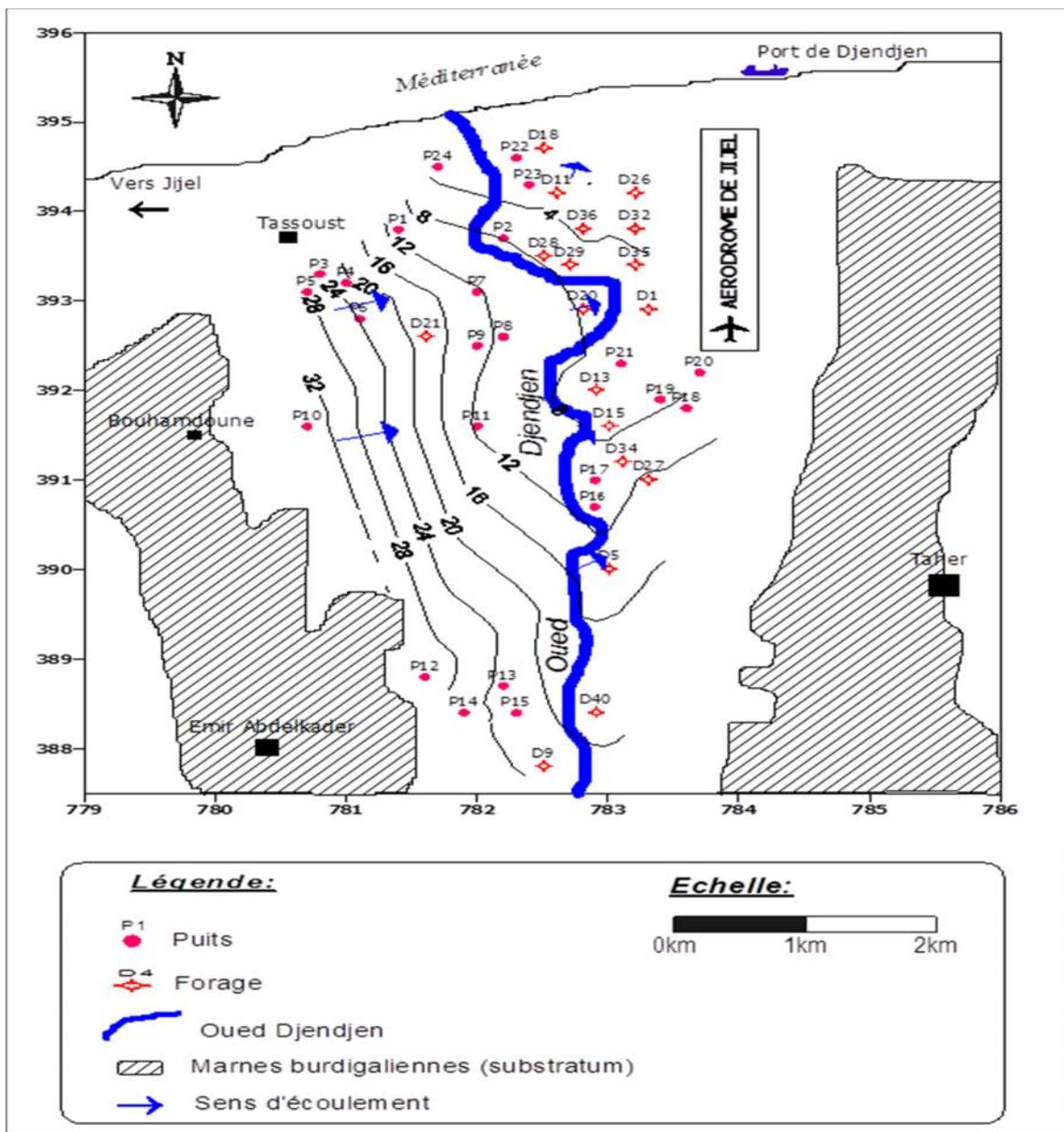


Figure I.5. Carte piézométrique de la plaine alluviale de l'oued Djendjen (Etablie par A. Boufekane, Mai 2003)

I.7. Hydrodynamique de la nappe

Les sources d'alimentation de la nappe sont au nombre de 3 :

-Alimentation directe par les précipitations

-Alimentation à partir des cours d'eau, notamment en période de basses eaux. L'oued Djendjen est le cours d'eau algérien qui présente le plus fort débit relatif (25 l/s/km²).

- Alimentation par les inféroflux, notamment à l'amont.

I.7.1. Inventaire des points d'eau

Les caractéristiques hydrodynamiques du champ de captage d'Oued Djendjen sont représentées dans le tableau.

Tableau I.7. Les caractéristiques hydrodynamiques du champ de captage Oued Djendjen

| Commune | Nom du champ captant | Nom des forages | date de mise en service | X(m) | Y(m) | Débit exploité En (l/s) | Volume prélevé (m ³ /mois) |
|------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|---------|---------|-------------------------|---------------------------------------|
| Taher | Oued Djendjen | D28b | 2003 | 782.600 | 393.300 | | à l'arrêt |
| | | D38 | 2002 | 782.900 | 392.900 | 15 | 30030 |
| | | D39b | 2009 | 782.537 | 392.274 | 15 | 13390 |
| | | BSNS | 1979 | 783.000 | 391.100 | 22 | 47560 |
| | | D15b | 2003 | 783.250 | 391.600 | 25 | 35390 |
| | | D37 | 2001 | 782.900 | 390.800 | 12 | 15320 |
| | | D42 | 2006 | 783.300 | 393.300 | 15 | 39430 |
| | | D43 | 2012 | 783.226 | 391.680 | 15 | 33930 |
| Emir-Abd Elkader | | D41 | 2003 | 782.600 | 392.600 | 30 | 9640 |
| | | D9 | 1984 | 782.500 | 387.800 | 15 | à l'arrêt |
| | | D6 | 2008 | 783.015 | 390.095 | 20 | 14400 |
| | | D26 | 1988 | 783.250 | 394.250 | 10 | à l'arrêt |
| | | D13 | 1986 | 782.910 | 392.000 | 2 | 1500 |

Source : ADE de Jijel

I.8. Géophysique (plaine de l'oued Djendjen)

Les prospections géophysiques effectuées dans la région ont été l'oeuvre de la C.G.G (Compagnie Générale de Géophysique) du 28/08 au 07/09/1961 et du 18/05 au 21/05/1971, sur la partie avale de la plaine de l'oued Djendjen, et de la C.P.G.F (Compagnie de Prospection en Géophysique de France) en juin 1975.

L'objectif de ces prospections était de :

- ✓ Préciser la géométrie de l'aquifère,
- ✓ Mettre en évidence les variations latérales de faciès et d'épaisseur du terrain réservoir,
- ✓ Déterminer les zones les plus favorables à l'emmagasinement d'eaux souterraines et l'implantation d'ouvrages de captages,
- ✓ Préciser, sur le front de mer, la position de l'interface entre les eaux douces et les eaux salées.

I.8.1. Carte du toit du substratum

La carte du toit du substratum n'a pas été tracée par la C.G.G. Elle a été élaborée grâce aux données de forages et à la carte des résistances transversales, et cela par différentes études élaborées avant.

Le substratum de la plaine alluviale de l'oued Djendjen est constitué par les marnes grises du Burdigalien, d'épaisseur variable. La comparaison des cotes topographiques avec les profondeurs du toit de ces marnes, permet de dessiner l'allure du substratum de la nappe (Fig.I.6).

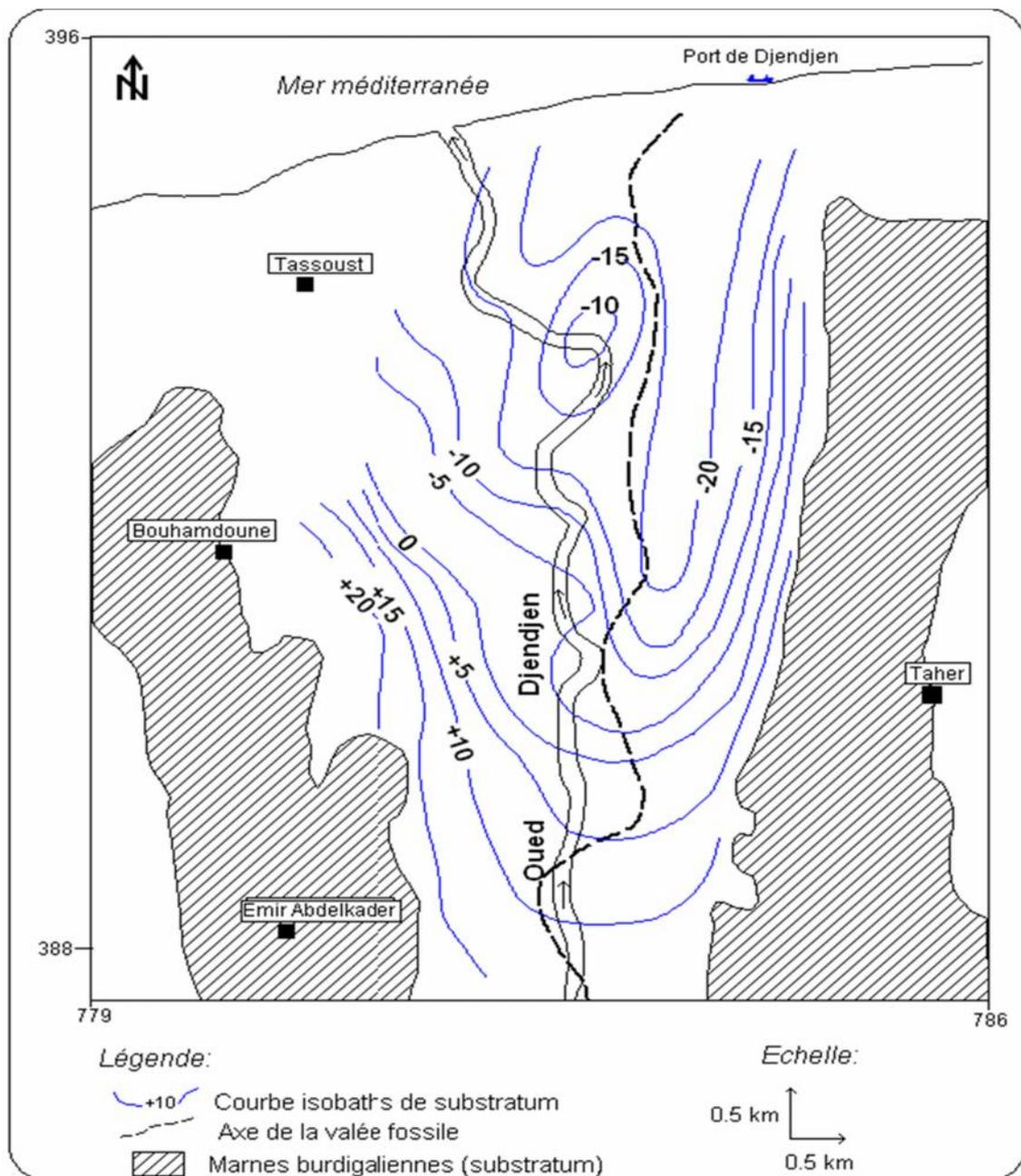


Figure I.6. Carte du toit du substratum (Etablie par A. Boufekane, Mai 2003)

Cette carte permet de tirer les conclusions suivantes :

- * les profondeurs maximales observées sont généralement d'environ 20 m,
- * cependant, il existe au centre de la plaine quelques fosses qui atteignent 35m,
- * les profondeurs diminuent latéralement vers les bordures, depuis l'axe central de la plaine.

I.9. Chimie des eaux

Les résultats de l'analyse chimique effectuée sur les eaux souterraines de la nappe de l'Oued Djendjen montrent que :

✓ La minéralisation varie entre 300 et 1100 mg/l, localement dépassée, sous l'effet de l'intrusion marine ou la pollution d'origine anthropique, La carte des minéralisations (Fig.I.7) montre, un accroissement des teneurs du Sud vers le Nord de la plaine, conformément au sens d'écoulement souterrain. Dans la partie littorale, on note l'existence de secteurs où l'eau est très chargée en sels dissous (> 1000 mg/l).

✓ Les éléments dominants sont le sodium, le chlore et les sulfates. Ils sont présents en quantités importantes, Les teneurs en sodium admises par l'O.M.S sont de l'ordre de 100 mg/l, l'interprétation de la carte de répartition du sodium et potassium (Fig.I.8) révèle que les fortes concentrations (>100 mg/l) s'observer au niveau des puits qui jouxtent l'oued ou qui sont implantés à proximité des centres urbains et industriels (Taher et Emir Abdelkader).

✓ L'analyse de la carte de répartition du chlorures (Fig.I.9), permet de voir les faibles valeurs (< 200 mg/l) sur la rive gauche, et notamment au sud de Tassoust. En revanche, les concentrations sont élevées vers la mer (> 500 mg/l) sont supérieures aux normes admises par l'OMS (250 mg/l), du fait de l'intrusion marine ainsi que les puits et forages implantés près de l'oued.

✓ le calcium, le magnésium et les bicarbonates sont présents en quantités normales.

La nappe constitue un aquifère très vulnérable à l'intrusion marine dans sa partie Nord. Le biseau salé atteint aujourd'hui une distance de plus de 1.5 Km vers l'intérieur du continent.

Les teneurs élevées des eaux de cette nappe peuvent être attribuées à deux facteurs importants :

a- La recharge de la nappe par l'oued dont la forte salinité de l'eau est due à la présence de formations triasiques dans le bassin versant (sur le versant droit).

b- La proximité par rapport à la mer des puits et les forages, en relation avec l'intrusion du biseau salé.

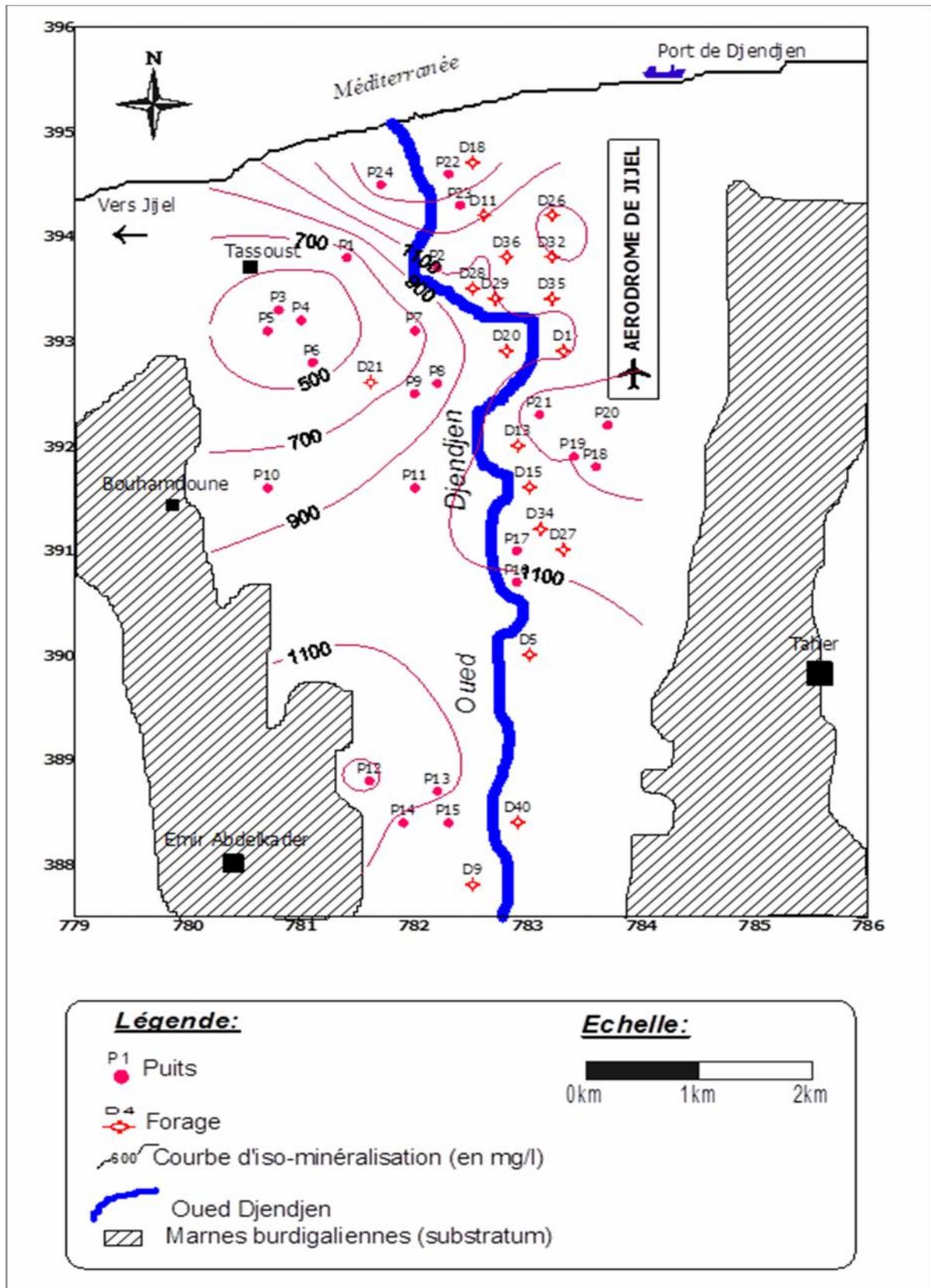


Figure I.7. Carte d'iso-minéralisation des eaux souterraines (Etablie par A. Boufekane, mai 2003)

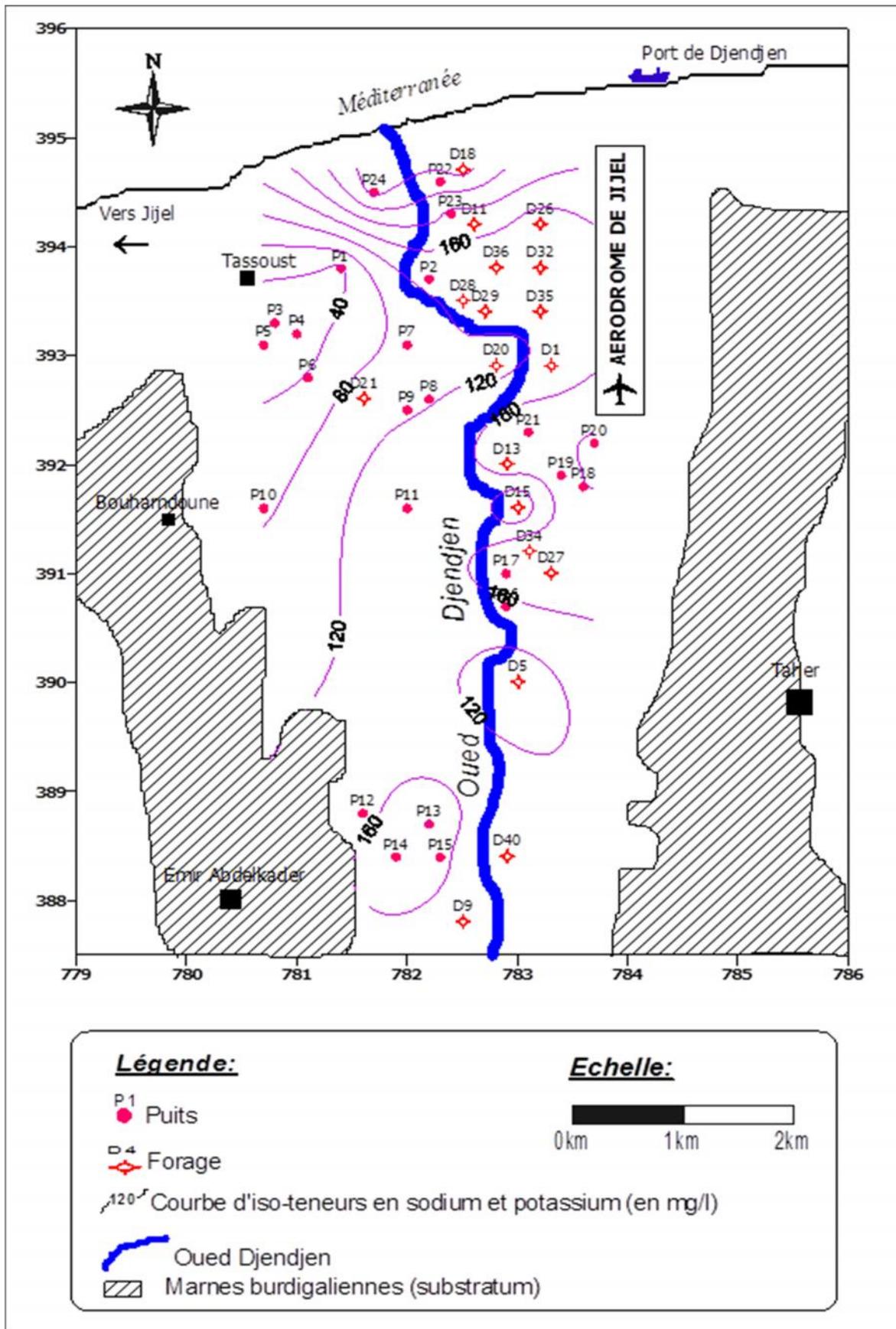


Figure I.8. Carte d'iso-teneurs en sodium et potassium des eaux souterraines (Etablie par A. Boufekane, Mai 2003)

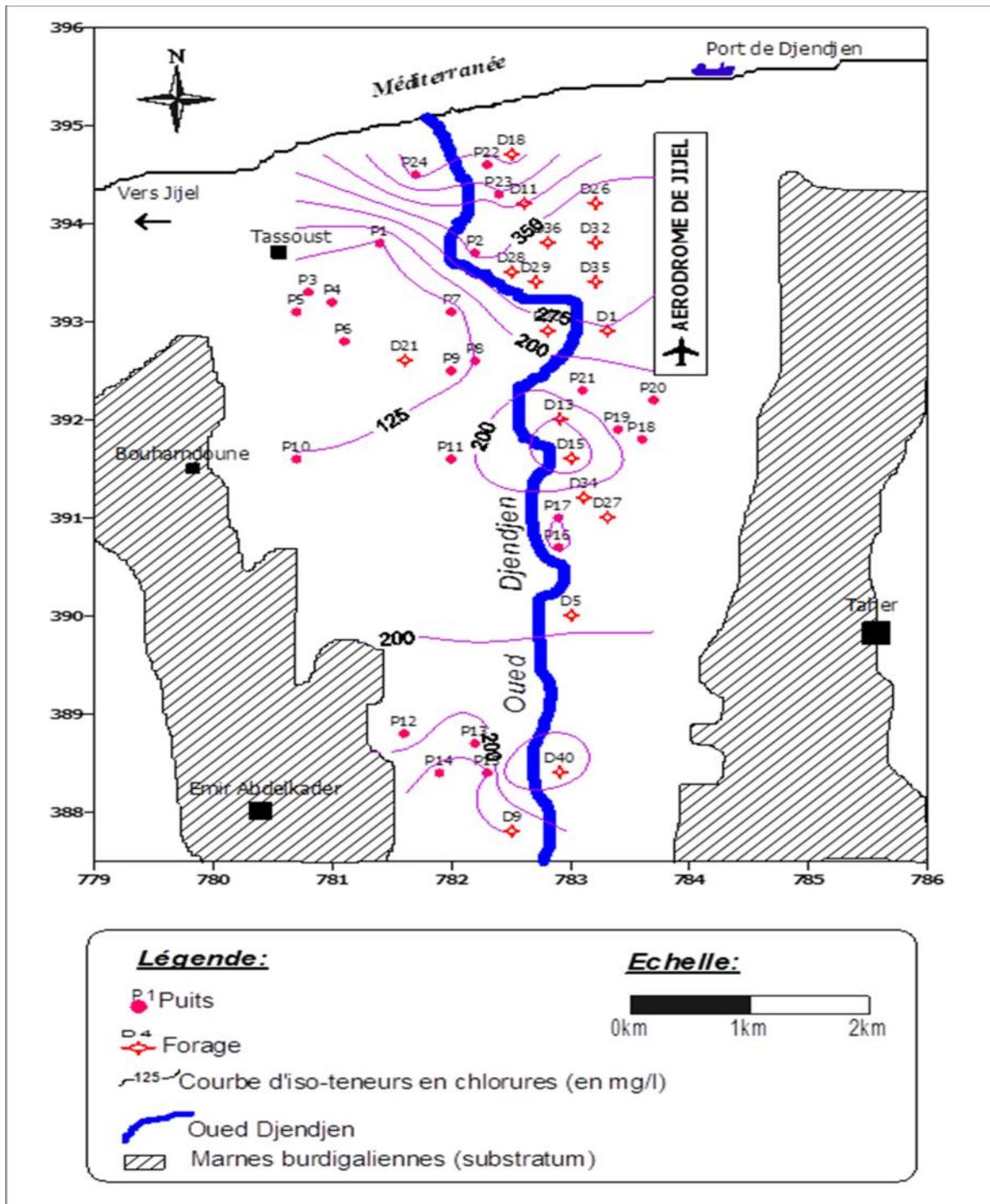


Figure I.9. Carte d'iso-teneurs en chlorures des eaux souterraines (Etablie par A. Boufekane, Mai 2003)

Conclusion

Dans cette partie nous avons défini les données nécessaires concernant notre région du point de vue climatique, géologique, hydrographique, hydrogéologique, hydrodynamique ainsi que l'étude géophysique. Ces données nous serviront pour entamer notre travail.

CHAPITRE II

Introduction

Le phénomène d'invasion marine pourrait présenter une origine majeure des fortes salinités des eaux souterraines dans les régions côtières où ces dernières constituent la source principale d'approvisionnement en eau. Sous certaines conditions, l'eau salée se propage à l'intérieur des terres et contamine les eaux de la nappe côtière.

La transition entre l'eau douce et l'eau salée de la mer s'effectue brusquement sur une certaine épaisseur ne dépassant pas quelques mètres. Les deux liquides miscibles se trouvent ainsi séparés par une zone qui est souvent assimilée à une interface abrupte limitant un biseau d'eau salée, dont la pente est inclinée vers le continent (figure II.1).

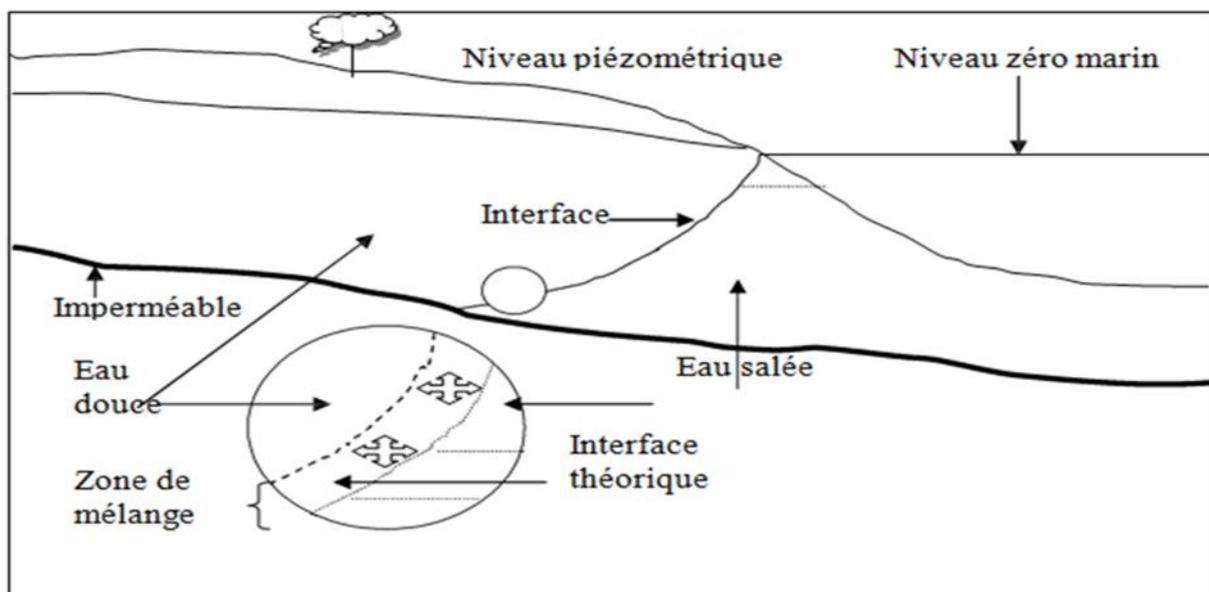


Figure II.1. Représentation schématique de l'interface « eau douce-eau salée »

II.1. Origines de la salinité des eaux souterraines en zones côtières

Dans la région étudiée et de manière générale dans les zones côtières irriguées et à climat aride et semi-aride où l'on observe une intensification des activités socio-économiques et essor démographique important, les sources potentielles des fortes salinités des eaux souterraines peuvent être soit naturelles (intrusion marine, embruns marins, lixiviation des roches réservoirs, évaporation), soit anthropiques (surfertilisation, pesticides, eaux usées, lixiviats des déchets solides, salage des routes, émissions gazeuses), soit encore une combinaison des sources naturelles et anthropiques (**Andreasen et Fleck, 1997**).

II.2. Causes de la salinité

Afin de trouver des solutions adéquates et de proposer des méthodes de prévention, certains chercheurs ont essayé de mettre en évidence les facteurs favorisant l'intrusion marine dans les nappes côtières. Parmi lesquels nous citons :

- La présence d'un courant marin qui est à l'origine de l'absorption d'eau de mer. Cette dernière permet le contact direct de l'eau douce et de l'eau de mer, caractérisé par un contraste de viscosité et surtout de densité différente ;
- La longueur de la pénétration du biseau salé vers les terres dépend de l'intensité des pluies efficaces et des pompages, de la perméabilité de l'aquifère, de l'épaisseur saturée et de la côte du substratum ;
- L'intensification des activités agricoles, et l'essor démographique important ont conduit à une exploitation anarchique des aquifères côtiers ;
- Le régime des vents joue un rôle important dans la salinisation des aquifères côtiers ;
- D'autres paramètres qui favorisent l'intrusion marine :
 - ✓ Perméabilité en générale importante ;
 - ✓ Gradient hydraulique faible et le rabattement fort ;
 - ✓ Existence des isopièzes 0 mètre à l'intérieur des terres ;
 - ✓ Les caractéristiques de la structure ;
 - ✓ Les caractéristiques physico-chimiques et hydrodynamiques de l'aquifère.

II.3. Moyens de prévention et de lutte

La meilleure prévention des nappes côtières qui présentent un risque d'intrusion marine c'est l'adoption d'un système d'exploitation adéquat :

- Le volume annuel prélevé de la nappe doit être inférieur à la recharge totale. Les dépressions des niveaux piézométriques peuvent entraîner un avancement du biseau salé.
- La position des pompes ou des crépines et le débit de pompage doit être bien étudié.
- Etant donnée les conditions climatiques et les exploitations intensives, la mise en place d'un réseau de surveillance du niveau de la nappe et de la salinité est nécessaire.

Dans le cas où nous sommes devant ce problème, des méthodes de lutte sont recommandées :

- Réduire le pompage d'eau souterraine dans les zones sensibles.
- Arrêter le fonctionnement des forages qui captent l'interface eau douce - eau salée.
- La réalimentation artificielle de la nappe dans. Cette méthode est parfois coûteuse et demande des connaissances précises sur les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques.
- La mise en place des barrières hydrauliques (la recharge de la nappe avec de l'eau douce le long de la côte sur les zones proches de la mer, soit par pompage des eaux salées de l'aquifère, soit en combinaison les deux méthodes.

II.4. Modélisation mathématique du biseau salé

Afin de bien gérer les nappes côtières et limiter l'intrusion marine, on recourt à l'outil de simulation numérique basée sur des modèles mathématiques bien définis. Alors, il est indispensable de savoir les différents modèles mathématiques utilisés pour décrire le phénomène de l'intrusion marine. Dans notre cas on s'intéresse au modèle 2D avec interface abrupte.

II.4.1. Modèle 2D avec interface abrupte

Le modèle 2D avec interface abrupte est une approximation simple qui facilite l'étude du biseau salé et de trouver des solutions analytiques ou numériques à ce problème.

Il s'agit des deux liquides : eau douce et eau salée qui se sont séparées par une interface abrupte.

On obtient le Modèle plan 2D en intégrant les équations en 3D du problème le long de la verticale entre les limites de la nappe (substratum et le niveau piézométrique).

II.4.2. Les hypothèses de base

Bear et al. (1999) ont mis les hypothèses de base pour établir le modèle mathématique avec interface abrupte qui gouverne le biseau salé :

- Les deux fluides eaux douces et eau salée sont supposées immiscibles et se sont séparées par une interface abrupte ;
- Validité de la loi de Darcy ;
- L'écoulement est supposé horizontal (ou dominant) selon l'hypothèse de Dupuit ;
- Le Milieu poreux est saturé homogène et anisotrope ;
- La densité de chaque liquide est supposée constante.

II.4.3. Approche de Badon –Ghyben-Herzberg (BGH)

Dans son ouvrage « hydraulics of groundwater » **Bear (1979)** a cité les travaux de Badon-Ghyben (1888) et Herzberg (1901) pour la recherche de la forme et de la position de l'interface dans un aquifère libre.

Ils avaient trouvé sous certaines conditions (distribution hydrostatique de la pression dans la zone d'eau douce, hypothèse de Dupuit vérifiée) la relation suivante :

$$h_s = h_d \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} = \delta \cdot h_d \quad \text{Avec} \quad \delta = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} \quad (\text{II-1})$$

ρ_d , ρ_s : masse volumique de l'eau douce et de l'eau salée respectivement ($M.L^{-3}$).

Par exemple, pour $\rho_s = 1025 \text{kg/m}^3$, $\rho_d = 1000 \text{kg/m}^3$, $\delta = 40$ et $h_s = 40h_d$

Cela veut dire que à quel que soit la distance à la mer, la profondeur de l'interface stationnaire au-dessous du niveau de la mer égale 40 fois la hauteur de la surface libre au-dessus de ceci, voir figure (II.2)

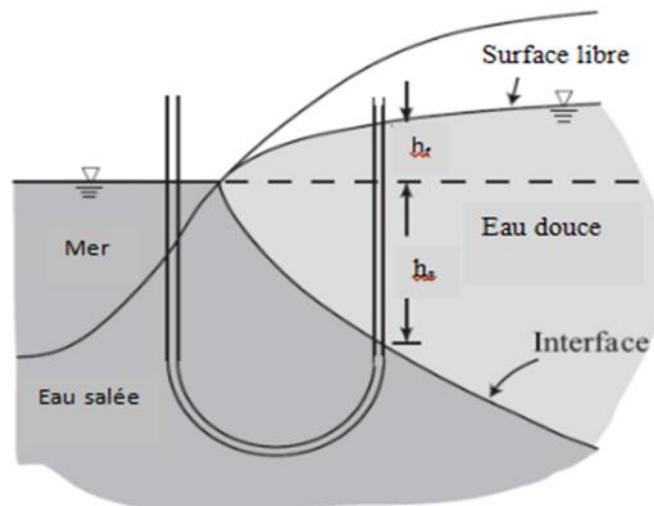


Figure II.2. Biseau salée, principe de Badon - Ghyben – Herzberg (Bear, 1979)

II.4.4. Modèle mathématique

D'après les hypothèses citées ci-dessus, il existe deux zones d'eau dans l'aquifère, une d'eau douce surmontant une zone d'eau salée figure (II.2).

Les équations en 3D qui régissent les écoulements dans les deux zones en terme de charge hydraulique H sont données par **Bear (1979)** comme suit :

- Eau douce

$$S_{0d} \frac{\partial H_d}{\partial t} = -\nabla(q_d) + p_d \tag{II.2}$$

- Eau salée

$$S_{0s} \frac{\partial H_s}{\partial t} = -\nabla(q_s) + p_s \tag{II.3}$$

Avec :

$$q_d = -\overline{\overline{K_d}} \nabla H_d \quad , \quad q_s = -\overline{\overline{K_s}} \nabla H_s \tag{II.4}$$

S_0 : coefficient d’emménagement spécifique (L^{-1}), p : débit extrait ou injectée /unité de volume (T^{-1}), H : charge hydraulique (L), q : vitesse de Darcy ($L.T^{-1}$)

➤ Le modèle avec interface abrupte décrivant le biseau salé dans un aquifère libre est représenté par les deux équations (II.5) et (II.6)

$$\nabla'(B_s K'_s \nabla' \tilde{H}_s) - [S_{0s} B_s + n_e(1 + \delta)] \frac{\partial \tilde{H}_s}{\partial t} + n_e \delta \frac{\partial \tilde{H}_d}{\partial t} + P_s B_s = 0 \tag{II.5}$$

C’est l’équation générale décrivant l’écoulement dans la zone d’eau salée.

$$\nabla'(B_d K'_d \nabla' \tilde{H}_d) - [S_{0d} B_d + n_e(1 + \delta)] \frac{\partial \tilde{H}_d}{\partial t} + n_e(\delta + 1) \frac{\partial \tilde{H}_s}{\partial t} + N + P_d B_d = 0 \tag{II.6}$$

C’est l’équation générale décrivant l’écoulement dans la zone d’eau douce.

➤ Pour le cas d’une nappe captive, l’équation est donnée par **Bear (1979)** :

$$\nabla'(B_d K'_d \nabla' \tilde{H}_d) - [S_{0d} B_d + n_e \delta] \frac{\partial \tilde{H}_d}{\partial t} + n_e(\delta + 1) \frac{\partial \tilde{H}_s}{\partial t} + P_d B_d = 0 \tag{II.7}$$

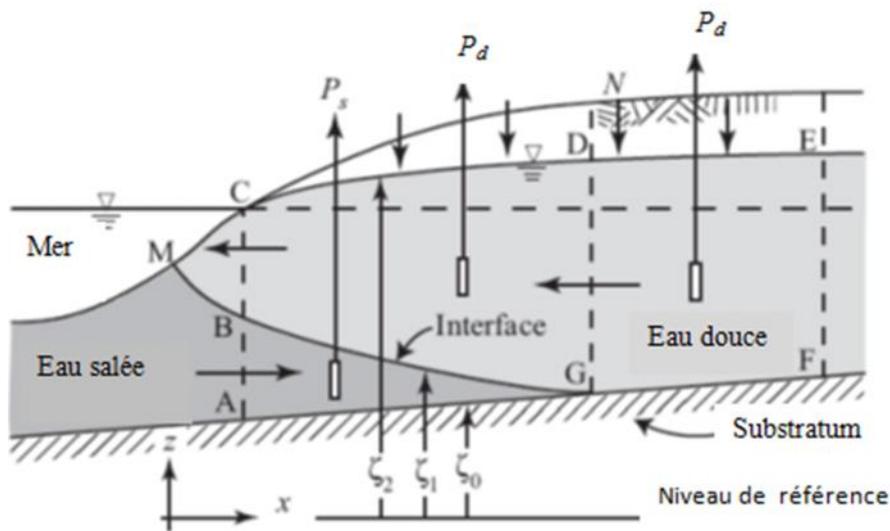


Figure II.3. Modèle à interface abrupte du biseau salé extrait (Bear, 1979)

II.4.5. Conditions initiales et aux limites

Pour la résolution numérique ou analytique des équations précédentes, il nous faut les conditions initiales et aux limites du problème sachant que la charge hydraulique s'écrit dans l'espace et dans le temps $H(x,y,t)$.

➤ **Conditions initiales**

Les conditions initiales concernent la charge hydraulique dans les deux zones douce et salée à l'instant $t=0$.

Nous devons fixer pour la charge hydraulique d'eau douce $\tilde{H}_d = \tilde{H}_d(x, y, 0) \equiv \zeta_2(x, y, 0)$ et pour la charge hydraulique d'eau salée $\tilde{H}_s = \tilde{H}_s(x, y, 0)$.

➤ **Conditions aux limites**

Elles concernent la charge hydraulique ou le flux au niveau des frontières de la nappe.

- Condition de flux imposé (débits d'eau douce ou d'eau salée entrant à la nappe)

$$K_d (H_d - g_1) \frac{\partial H_d}{\partial x} = q_d \quad \text{Débit imposé d'eau douce sur limite EF}$$

- Condition de Neumann (flux nul) sur les limites imperméables

$$K_d (H_d - g_1) \frac{\partial H_d}{\partial x} = 0 \quad \text{Sur la limite imperméable AGF}$$

- Condition de Dirichlet (charge imposé) sur les frontières

$H_d(0,y,t) = H_{AC}$ sur la limite AC elle est égale à zéro par rapport au niveau de la mer

$\zeta_1(0,y,t) = D$ sur la limite AC D est la profondeur de la mer au point C

II.4.6 Solutions analytiques

La solution analytique du problème du biseau salé avec interface abrupte existe pour le cas le plus simple. Les mêmes hypothèses se posent, écoulement horizontal, interface stationnaire (cas permanent).

II.4.6.1 Interface dans une nappe captive

La figure (II.4) montre une coupe d'un aquifère captif d'une épaisseur constante $B \ll L$. Soit le point G limite du biseau salé dans la nappe situé à $x=0$. Le flux d'eau douce dans ce point est Q_{d0} , c'est la différence entre la recharge et le pompage (**Bear et Cheng, 2010**).

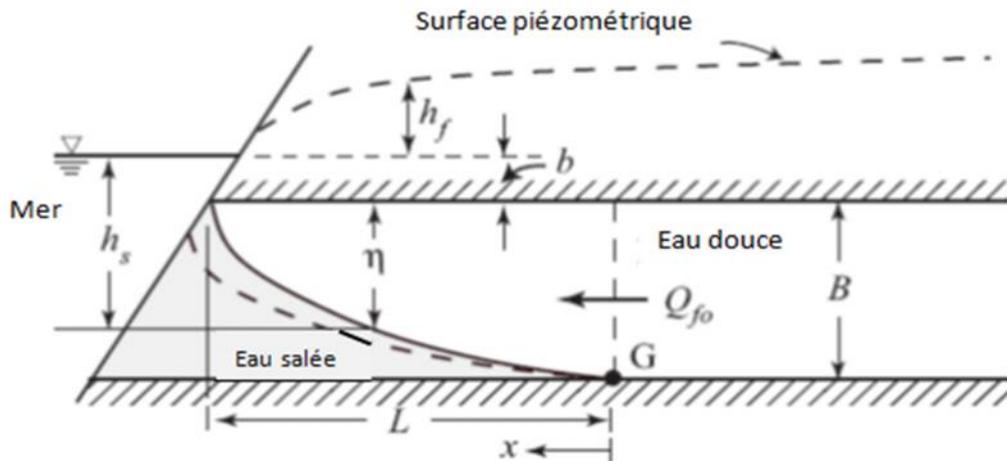


Figure II.4. Interface abrupte dans une nappe captive extrait (Bear et Cheng, 2010)

Pour le cas unidimensionnel, l'équation de l'eau douce s'écrit :

$$\frac{dQ_d}{dx} \equiv \frac{d}{dx} \left(-K_d \eta(x) \frac{dh_d}{dx} \right) = 0 \tag{II.8}$$

Ou

$$-K_d \eta(x) \frac{dh_d}{dx} = \text{const} = Q|_{x=0} = Q_{d0} \tag{II.9}$$

Avec :

η : de la zone d'eau douce surmontant l'eau salée (L)

En tenant compte de l'approximation de BGH, nous pouvons écrire :

$$h_d = \frac{\eta + b}{\delta} \tag{II.10}$$

L'équation (II.9) devient :

$$\eta^2 = \frac{2\delta Q_{d0}}{K_d} (L - x) \tag{II.11}$$

C'est une équation d'une parabole.

Nous avons comme conditions aux limites $\eta=0$ à $x=L$ et $\eta=B$ à $x=0$

Donc :

$$B^2 = \frac{2\delta Q_{d0}}{K_d} L \tag{II.12}$$

L'équation (II.12) montre la relation entre L et Q_{d0} , en effet L est inversement proportionnel à Q_{d0} . Pour contrôler le biseau salé il suffit de gérer soit la recharge soit le pompage.

Solution de Glover :

La géométrie du problème de Glover [1964] (cité par Cheng et al, 1999) est montrée par la figure (II.5). L'aquifère est captif par le haut, homogène et non limité par le bas.

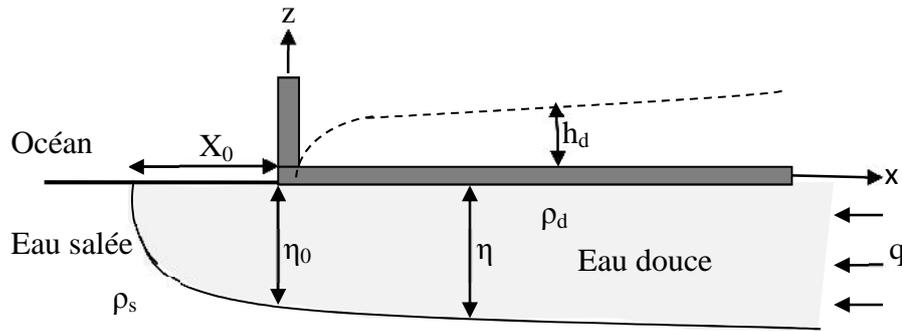


Figure II.5. Problème de Glover (Bear et al, 1999)

L'eau salée est stagnante, la charge hydraulique de l'eau douce au régime permanent vérifie l'équation de Laplace en deux dimensions :

$$\Delta h_d = 0 \tag{II.13}$$

La charge hydraulique d'eau douce h_d à $z=0$ est :

$$h_d = \sqrt{\frac{2qx}{\delta K}} \tag{II.14}$$

La solution de Glover peut être modifiée et simplifiée en utilisant l'hypothèse de Dupuit. Dans ce cas, l'équation de l'écoulement devient unidimensionnelle. La solution de tel problème est donnée par **Todd(1953)** (cité par Bear et al. 1999) avec la profondeur de l'interface comme suit :

$$\eta(x) = \sqrt{\frac{2q\delta x}{K}} \tag{II.15}$$

Et c'est la même équation que (II.11).

II.4.6.2 Interface dans une nappe libre

Supposant un aquifère libre côtier soumis uniformément à la recharge naturelle ou artificielle (N) figure (II.6).

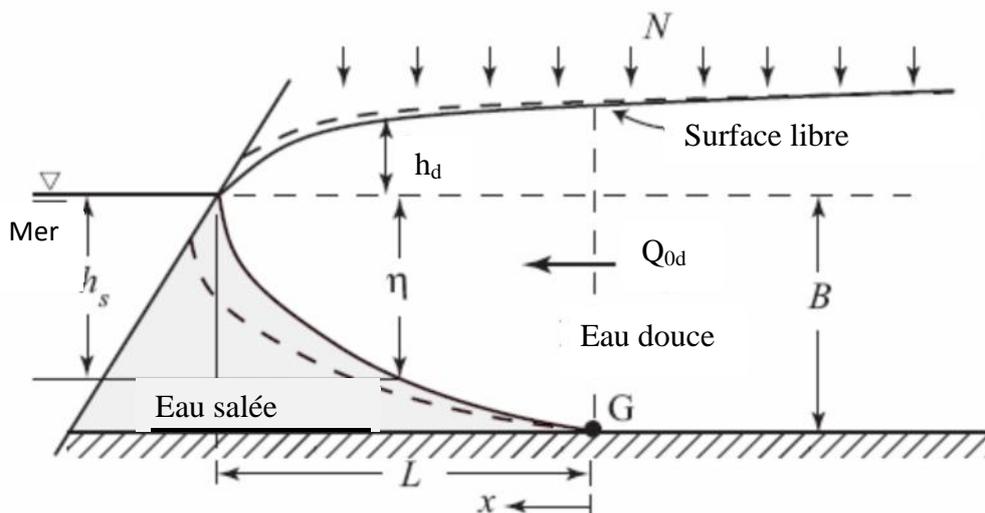


Figure II.6. Interface abrupte dans une nappe libre extrait de Bear et al. (1999)

Admettant les mêmes hypothèses précédentes, nous pouvons écrire :

$$-\frac{dQ_d}{dx} + N \equiv -\frac{d}{dx} \left[-K_d (h_d(x) + \eta(x)) \frac{dh_d}{dx} \right] + N = 0 \quad (II.16)$$

Or nous avons :

$h_d = \eta/\delta$ remplaçons cette expression de h_d dans l'équation (II.16) et après intégration en tenant compte qu'à $x=0$, $Q_d=Q_{d0}$ nous obtenons :

$$\eta^2 - B^2 = \frac{\delta^2}{K_d(1+\delta)} (2Q_{d0} + N.x).x \quad (II.17)$$

Si la recharge N est nulle, la forme de l'interface est une parabole.

En utilisant les conditions aux limites à $x=L$ donne $\eta=0$

Donc on trouve :

$$B^2 = \frac{\delta^2}{K_d(1+\delta)} (2Q_{d0} + N.L).L \quad (II.18)$$

De l'équation (II.18), la longueur du biseau salé L peut être contrôlée par Q_{d0} (flux sortant d'eau douce) ou par la recharge artificielle N . de cette formule nous pouvons calculer la longueur L du biseau salé.

Solution de Strack :

Quel que soit le type d'aquifère côtier (libre ou captif) il en existe deux zones, zone 1 contenant seulement de l'eau douce et zone 2 contenant les deux liquides l'eau douce surmontant l'eau salée. Figure (II.7).

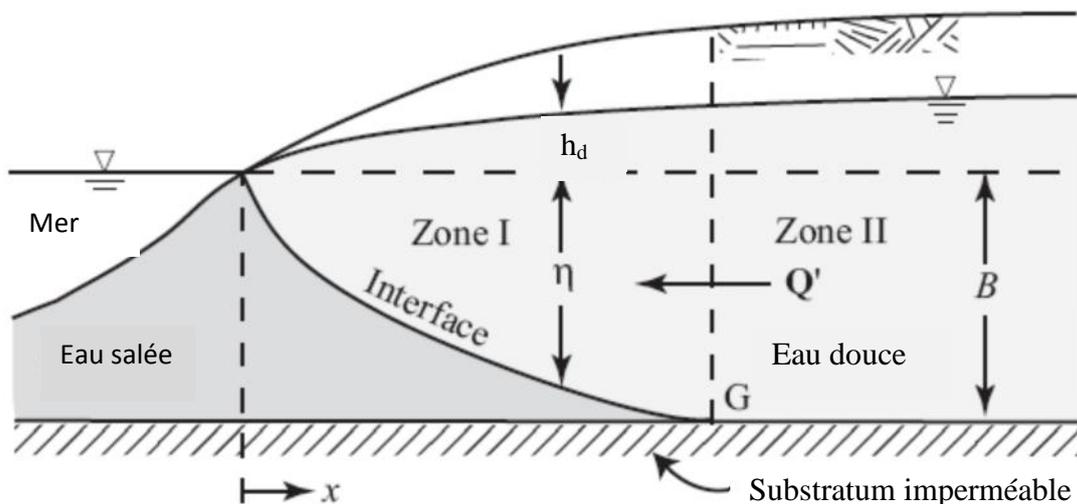


Figure II.7. Problème de Strack

Admettant que l'écoulement est horizontal (dominant) et l'hypothèse de Dupuit est valide, **Strack (1976)** (cité par Bear et Cheng, 2010) a développé un modèle décrivant

l'écoulement d'eau douce dans les deux zones en utilisant un potentiel qui vérifie l'équation de Laplace (potentiel harmonique). Strack a appliqué son modèle sur le cas d'un aquifère libre en présence d'un puits de pompage situé à x_w de la cote considérée rectiligne. Le débit du puits est constant $Q_w = \text{const}$, soit un flux d'eau douce Q'_0 (débit /unité de largeur à travers l'épaisseur de l'aquifère) qui alimente l'aquifère. La solution du problème est donnée sous forme d'un potentiel :

$$\phi = \frac{Q'_0}{K} x + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \frac{(x - x_w)^2 + y^2}{(x + x_w)^2 + y^2} \tag{II.19}$$

L'équation décrivant l'interface du biseau salé dans le plan xy est :

$$\frac{(1 + \delta)B^2}{2\delta^2} = \frac{Q'_0}{K} x + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \frac{(x - x_w)^2 + y^2}{(x + x_w)^2 + y^2} \tag{II.20}$$

Cette équation donne la trajectoire de l'interface en fonction de Q_w , on remarque que si $Q_w = 0$, l'interface est sous forme d'une droite distant de x_0 de la cote voir figure (II.8).

x_0 est calculé en utilisant la formule suivante (Bear et Cheng, 2010).

$$x_0 = \frac{(1 + \delta)B^2 K}{2\delta^2 Q'_0} \tag{II.21}$$

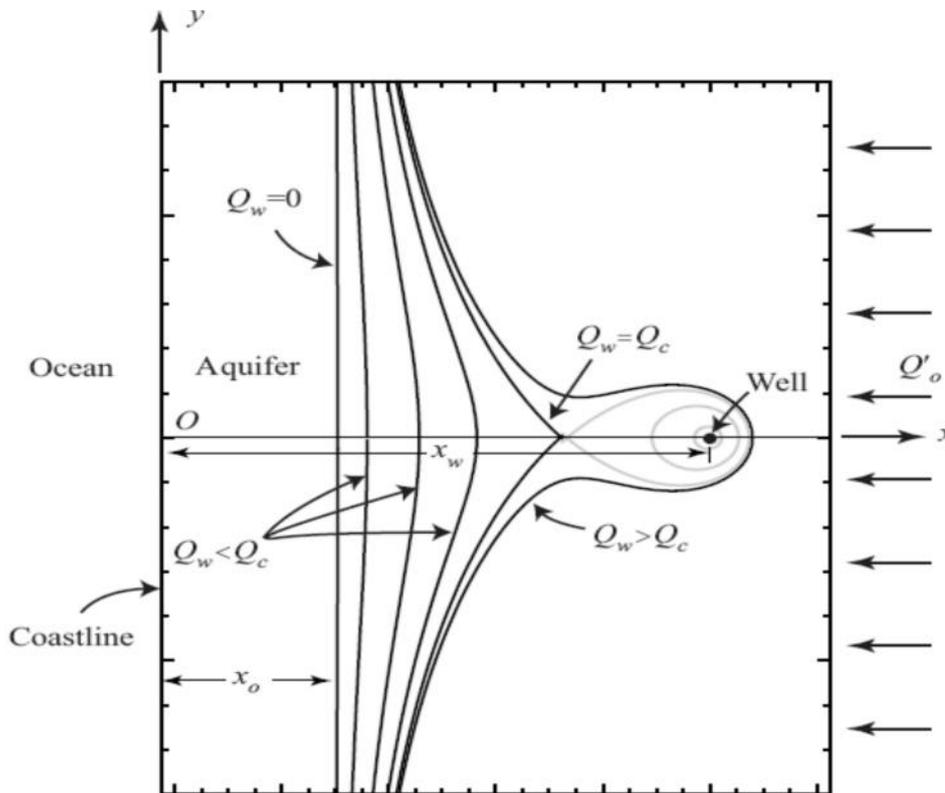


Figure II.8. Positions de l'interface du biseau salé selon le modèle de Strack

(Source Bear et Cheng, 2010)

Si Q_w augmente, l'interface avance à l'intérieur de l'aquifère face au puits de pompage figure (II.7). Il est montré qu'il existe une valeur du débit Q_c de Q_w au-delà duquel, le potentiel devient négatif (c à d au-dessous du niveau de la mer). Pour $Q_w < Q_c$ il apparaît une zone de dépression (Upconing) face au puits. Une valeur basse du potentiel de Strack, indique qu'il existe de l'eau salée au-dessous de l'eau douce.

Solution de Bear et Dagan (Upconing) :

Le pompage excessif engendre un cône de dépression qui favorise l'invasion du puits avec d'eau salée. Ce cône de dépression ne peut pas être estimé par la relation de BGH, à cause de non validité de l'hypothèse de Dupuit (**Bear et al. ,1999**). Pour estimer l'Upconing dû au pompage, **Bear et Dagan (1964)** propose deux simples formules utilisant la technique de perturbation.

Le problème de Bear et Dagan est bidimensionnel dans le plan (x-z) et axisymétrique (r-z) figure (II.9).

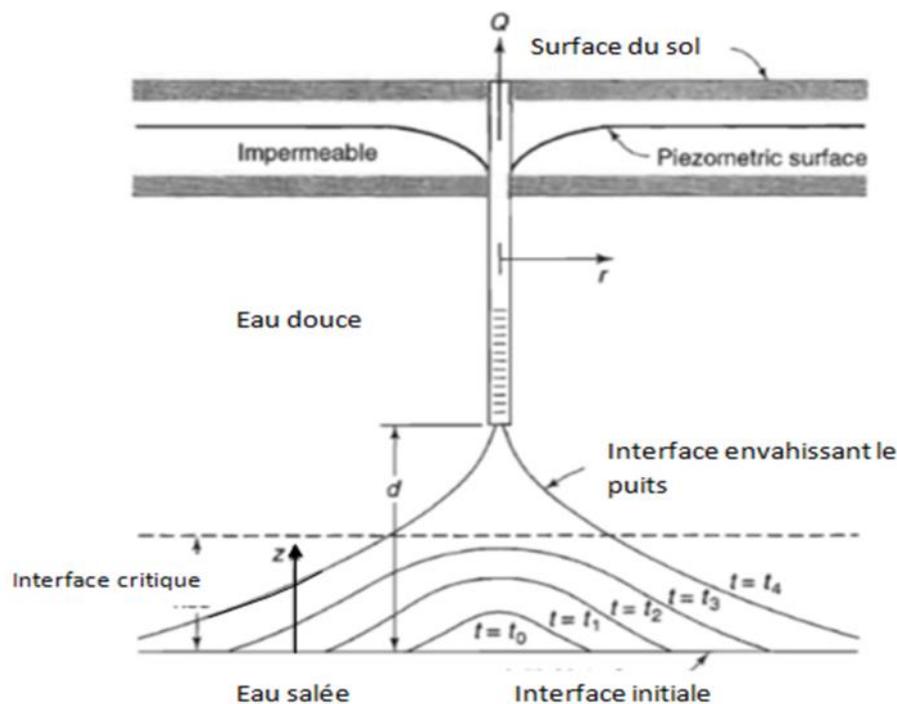


Figure II.9. Phénomène d'Upconing selon Bear et Dagan extrait de TODD & Mays (2005)

Le puits ou le drain sont placés à distance (d) au-dessus de l'interface initiale.

Pour le cas d'un puits qui fournit un débit Q_w , la position transitoire ζ est donnée sous forme adimensionnelle (**Bear et al, 1999**) :

$$z = \frac{1}{\sqrt{R^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + (1+T)^2}} \quad (\text{II.22})$$

Ou:

$$z = \frac{2.\pi.K.d.\zeta}{\delta.Q_w} , \quad R = \frac{r}{d} \quad \text{et} \quad T = \frac{K.t}{.n.d(2.\delta + 1)} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

n: est porosité de l'aquifère, t : temps, r : rayon, z : élévation

Dans le cas du régime permanent c à d $t \rightarrow \infty$, $z=1$ pour $r=0$ (au niveau du puits), dans ce cas l'upconing ζ est comme suit :

$$\zeta = \frac{\delta.Q_w}{2.\pi.K.d} \quad (\text{II.24})$$

Alors il résulte pour que le puits ne sera pas envahie d'eau salée, il faut que $\zeta < d$ ce qui donne le débit maximum $Q_w \text{max}$ à ne pas dépasser :

$$Q_w \text{ max} < \frac{2.\pi.K.d^2}{\delta} \quad (\text{II.25})$$

Pour considérations de sécurité Bear et Dagan recommandent un $\zeta_{\text{max}} = 0.3d$ ainsi l'équation (II.25) devient :

$$Q_w \text{ max} < \frac{0.6.\pi.K.d^2}{\delta} \quad (\text{II.26})$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cité les solutions analytiques de la localisation de l'interface eau douce eau salée. La solution de Glover est plus connue pour déterminer la longueur du biseau salée alors que la solution de strack et de Dagan et Bear permettent d'étudier l'évolution de l'interface en présence d'un puits d'exploitation. Ces solutions s'appliquent dans des cas plus simples, pour les cas les plus compliqués on recourt à l'utilisation des méthodes numériques de modélisation.

CHAPITRE III

Introduction

La résolution numérique des modèles mathématiques cités au chapitre précédent, nécessite l'utilisation de méthodes numériques robustes telles que la méthode des différences finies, méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. L'application de ces méthodes sur les EDP du problème physique permet de trouver la solution dans le temps et dans l'espace en tenant compte des conditions initiales et aux limites.

Dans ce chapitre on va présenter le code de calcul SHARPINT développé par Monsieur HACHEMI, c'est un modèle numérique par éléments finis quasi-tridimensionnel pour résoudre les équations du modèle à interface abrupte dans le but de calculer la position de l'interface eau douce – eau salée et la distribution spatio-temporaire de la charge hydraulique et de la concentration de solutés (Chlorures).

III.1. Présentation de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une technique permettant de discrétiser l'espace et d'approximer par sous domaine la solution recherchée. Elle est basée sur une formulation intégrale du modèle mathématique à résoudre numériquement. La consistance et la généralité qui sous-tendent la méthode des éléments finis fournissent de nombreux avantages convenant particulièrement à cette recherche. Par exemple, sa flexibilité géométrique mène à une définition efficace des caractéristiques irrégulières communes aux canaux naturels.

En outre, les discrétisations non uniformes se mettent en pratique facilement pour que les éléments se concentrent là où les gradients sont forts, alors que l'on peut utiliser moins d'éléments là où l'écoulement est plus uniformes.

III.1.1. Formulation intégrale

Soit un domaine D quelconque auquel s'applique le système d'équations différentielles suivant :

$$\left\{ \dot{\mathbf{U}} \right\} + [\mathbf{L}(\mathbf{U})]\{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (\text{III.1})$$

Et S est le contour du domaine, sur lequel on retrouve les conditions aux limites suivantes.

$$\{\mathbf{C}(\mathbf{U})\} = \{\mathbf{F}_s\} \quad (\text{III.2})$$

Ce système d'équations différentielles s'écrit aussi sous la forme

$$\{R(X)\} = \left\{ \dot{U} \right\} + [L(U)]\{U\} - \{F\} = 0 \quad (III.3)$$

La relation (III.3) s'écrit sous la forme variationnelle suivante :

$$W(U) = \int_D \langle E \rangle \left[\left\{ \dot{U} \right\} + [L(U)]\{U\} - \{F\} \right] dD = 0 \quad (III.4)$$

Où

- $\{U\}$: Vecteur des fonctions solutions,
- $\left\{ \dot{U} \right\}$: Vecteur des dérivées temporelles de $\{U\}$
- $[L(U)]$: Opérateur des dérivées spatiales sur $\{U\}$
- $\{F\}$: Les forces volumiques,
- $\{R(U)\}$: Vecteur des résidus du système,
- $W(U)$: Expression variationnelle.

La méthode des résidus pondérés consiste à chercher des fonctions U qui annulent la forme intégrale de l'équation (III.4) dans laquelle ψ est une fonction de pondération. ψ et U doivent satisfaire les conditions aux limites et être dérivables jusqu'à l'ordre n , où n est l'ordre de dérivée maximale du système d'équations différentielles. La méthode la plus utilisée qui nous propose un choix pour les fonctions de pondération ψ est celle de Galerkin.

III.1.2. Formulation par éléments finis : Méthode de Galerkin

La méthode de Galerkin est la méthode de résidus pondérés la plus utilisée en éléments finis et c'est elle dont nous nous servons dans ce travail. La méthode de Galerkin consiste à choisir comme pondération les fonctions de base qui ont servi à construire la fonction d'interpolation.

À partir de la forme générale (III.4)

$$\int_D \langle \psi \rangle R(X) dD = 0 \quad \text{On choisit :} \quad \Psi = \{N\}$$

Ceci permet d'écrire la méthode de Galerkin sous forme :

$$W = \int_D \langle N \rangle R(X) dD = 0 \quad (III.5)$$

Le vecteur $\{N\}$ représente ici les fonctions de base de l'approximation nodale de façon globale, c'est-à-dire valide sur l'ensemble du domaine D . Cependant sachant que les fonctions N sont définies seulement sur des sous-domaines élémentaires donc il est propriété de l'intégrale qui consiste à formuler l'intégrale d'un tout comme la somme des intégrales des parties connexes ; ainsi l'expression précédente devient :

$$W = \sum \left[\int_e \{N\} R(\langle N \rangle, \{U\}) dD \right] = 0 \quad (III.6)$$

III.2. Application de la méthode des éléments finis au modèle d'interface abrupte

La forme intégrale du modèle avec interface abrupte s'écrit en appliquant la méthode de Galerkin aux équations gouvernant le phénomène du biseau salé comme suit :

Pour l'équation d'écoulement dans la zone d'eau douce :

$$W = \int_D \{N\} [\nabla' (B_d K'_d \nabla' \tilde{H}_d) - [n_e(1+\delta)] \frac{\partial \tilde{H}_d}{\partial t} + n_e(\delta+1) \frac{\partial \tilde{H}_s}{\partial t} + R + P_d B_d] dD = 0 \quad (III.7)$$

Et pour l'écoulement dans la zone d'eau salée :

$$W = \int_D \{N\} \left[\nabla' (B_s K'_s \nabla' \tilde{H}_s) - [n_e(1+\delta)] \frac{\partial \tilde{H}_s}{\partial t} + n_e \delta \frac{\partial \tilde{H}_d}{\partial t} + P_s B_s \right] dD = 0 \quad (III.8)$$

En intégrant par parties et en utilisant la formule de Gauss l'équation (III.7) et (III.8) devient :

$$\begin{aligned} W = & - \int_D \{ \nabla' N \} B_d K'_d \cdot \nabla' \tilde{H}_d dD - n_e(1+u) \int_D \{N\} \frac{\partial \tilde{H}_d}{\partial t} dD + n_e(1+u) \int_D \{N\} \frac{\partial \tilde{H}_s}{\partial t} dD + \\ & \int_D \{N\} R dD + \int_D \{N\} P_d B_d dD + \oint_{\Gamma} \{N\} \vec{n} \cdot B_d K'_d \nabla' \tilde{H}_d d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (III.9)$$

ET

$$\begin{aligned} W = & - \int_D \{ \nabla' N \} B_d K'_d \cdot \nabla' \tilde{H}_d dD - n_e(1+u) \int_D \{N\} \frac{\partial \tilde{H}_s}{\partial t} dD - n_e(1+u) \int_D \{N\} \frac{\partial \tilde{H}_d}{\partial t} dD + \\ & \int_D \{N\} P_s B_s dD + \oint_{\Gamma} \{N\} \vec{n} \cdot B_s K'_s \nabla' \tilde{H}_s d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (III.10)$$

III.2.1. Approximation par éléments finis

Dans cette section nous décrivons la technique d'approximation par éléments finis (sous domaines) qui permet de transformer un système différentiel continu à un système différentiel discrétisé où la variable recherchée sera évaluée au niveau des nœuds.

L'approximation par sous domaine consiste à diviser le domaine d'étude D en sous domaines appelés éléments finis D^e . On exprime la variable $U(X)$ par interpolation linéaire en fonction des valeurs nodales $\{U^n\}$. Alors nous pouvons écrire :

$$U(x) = \langle N(x) \rangle \cdot \{U_n^e\} \quad (III.11)$$

Avec : $N(x)$ sont les fonctions d'interpolation de la variable dans l'élément fini.

$\{U_n^e\}$: Vecteur des valeurs nodales de la variable U

n : le nombre des nœuds de l'élément fini

$$D = \sum_e D^e \text{ et } W = \sum_e W^e \quad (III.12)$$

W^e : est l'intégrale élémentaire sur le domaine D^e

$$\begin{aligned} W^e = & - \int_{D^e} \{\nabla' N\} B_d K'_d \cdot \nabla' \tilde{H}_d dD^e - n_e (1 + \delta) \int_{D^e} \{N\} \frac{\partial \tilde{H}_d}{\partial t} dD^e + n_e (1 + \delta) \int_{D^e} \{N\} \frac{\partial \tilde{H}_s}{\partial t} dD^e + \\ & \int_{D^e} \{N\} R dD^e + \int_{D^e} \{N\} P_d B_d dD^e + \oint_{\Gamma^e} \{N\} \bar{n} \cdot B_d K'_d \nabla' \tilde{H}_d d\Gamma^e = 0 \end{aligned} \quad (III.13)$$

III.2.2. Approximation sur un élément de référence

De manière à simplifier la définition analytique des éléments de forme complexe nous utilisons l'élément de référence de forme très simple repéré dans un espace de référence qui peut être transformé en chaque élément réel par une transformation géométrique τ .

Dans le cas de cette étude :

La transformation τ définit les coordonnées x de chaque point de l'élément réel à partir des coordonnées ξ du point correspondant de l'élément de référence.

$$\tau : \xi \rightarrow x = x(\xi) = [\bar{N}(\xi)] \{X_n\} \quad (III.14)$$

Avec : Les fonctions \bar{N} sont des polynômes en ξ appelées fonctions de transformation géométrique (interpolation géométrique) ;

- $\{x_n\}$ vecteur des coordonnées des nœuds de l'élément réel e ;
- n : nombre des nœuds de l'élément fini.

III.3. Discrétisation de la forme intégrale

Après discrétisation du domaine D en éléments finis et en remplaçant l'équation (III.11) dans l'équation (III.13) le système d'équation élémentaire d'eau douce devient :

$$C_d^e \{ \dot{H}_d^e \} + K_d^e \{ H_d^e \} = [F_d^e] \quad (III.15)$$

Avec :

$$C_d^e : \text{matrice masse élémentaire de l'eau douce} \quad C_d^e = -n_e(1+u) \int_{D^e} N^t \cdot N \cdot dD^e$$

$$K_d^e : \text{matrice de rigidité élémentaire} \quad K_d^e = - \int_{D^e} \nabla' N^t \cdot B_d \cdot k^e \cdot \nabla' N \cdot dD^e$$

F_d^e = terme de source + terme de H_s + terme conditions aux limites (flux)

$$F_d^e = \int_{D^e} N \cdot R^e \cdot dD^e + \int_{D^e} -N \cdot B_d \cdot p_d^e \cdot dD^e + n_e(1+u) \cdot \{ \dot{H}_s^e \} \int_{D^e} N^t \cdot N \cdot dD^e - \int_{\Gamma^e} B_d \cdot N \cdot q_{nd}^e \cdot d\Gamma^e$$

Après assemblage des matrices élémentaires nous obtenons le système global :

$$C_d \{ \dot{H}_d \} + K_d \{ H_d \} = [F_d] \quad (III.16)$$

Avec :

$$C_d = \sum_e C_d^e, \quad K_d = \sum_e K_d^e \quad \text{et} \quad F_d = \sum_e F_d^e$$

On suit la même méthode pour discrétiser la formulation intégrale de l'équation d'écoulement dans la zone salée. Nous obtenons le système suivant :

$$C_s \{ \dot{H}_s \} + K_s \{ H_s \} = [F_s] \quad (III.17)$$

$$\text{Avec : } C_s = \sum_e \int_{D^e} -n_e(1+\delta) \cdot N^t \cdot N \cdot dD^e$$

$$K_s = \sum_e \int_{D^e} -\nabla' N^t \cdot B_s \cdot k^e \cdot \nabla' N \cdot dD^e$$

$$F_s = \sum_e \left(- \int_{D^e} N \cdot B_d \cdot p_s^e \cdot dD^e - n_e(1+\delta) \cdot \{ \dot{H}_d^e \} \int_{D^e} N^t \cdot N \cdot dD^e - \int_{\Gamma^e} B_s \cdot N \cdot q_{ns}^e \cdot d\Gamma^e \right)$$

C, K et F sont les matrices globales de masse, de rigidité et vecteur sollicitations du système.

q_n^e : vecteur élémentaire de flux normal à la frontière Γ^e .

p : débit extrait ou injecté (puits ou source).

Indices d et s représentent eau douce et eau salée respectivement.

III.4. Discrétisation temporelle

La discrétisation temporelle consiste à approximer le vecteur de la variable $\{H\}$ et sa dérivée $\{\dot{H}\}$ dans le temps comme suit :

$$\{H(\theta)\} = (1-\theta)\{H(t)\} + \theta\{H(t + \Delta t)\} \quad (III.18)$$

Et

$$\{\dot{H}\} = \frac{\{H(t + \Delta t)\} - \{H(t)\}}{\Delta t} \quad (III.19)$$

Le vecteur des conditions aux limites F est approximé de la même manière

$$\{F\} = (1-\theta)\{F\}_t + \theta\{F\}_{t+\Delta t} \quad (III.20)$$

En remplaçant les équations (III.18), (III.19) et (III.20) dans l'équation (III.16) on obtient :

$$([C] + \theta\Delta t[K])\{H\}_{t+\Delta t} = ([C] - (1-\theta)\Delta t[K])\{H\}_t + \Delta t((1-\theta)\{F\}_t + \theta\{F\}_{t+\Delta t}) \quad (III.21)$$

Si $\theta=0$ on trouve le schéma de différences finies explicite,

Si $\theta=1/2$ on trouve le schéma de différences finies centrée ou schéma de Granc Nicholson,

Si $\theta=1$ on trouve le schéma de différences finies implicite.

Le système matriciel (III.21) peut être appliqué soit sur l'écoulement dans la zone d'eau douce ou dans zone d'eau salée.

[C] est la matrice de masse, elle peut prendre $[C_d]$ ou $[C_s]$.

[K] est la matrice de rigidité, elle peut prendre $[K_d]$ ou $[K_s]$.

Si on pose $[A]=[C]+\theta\Delta t[K]$, $[B]=[C]-(1-\theta)\Delta t[K]$, et $\{F_G\} = (1-\theta)\{F\}_t + \theta\{F\}_{t+\Delta t}$
L'équation (III.32) devient :

$$[A]\{H\}_{t+\Delta t} = [B]\{H\}_t + \Delta t\{F_G\} \quad (III.22)$$

Dans ce travail on choisit le schéma totalement implicite ($\theta=1$) ainsi il vient :

$$[A]=[C]+\Delta t[K] \text{ et } [B]=[C]$$

Ainsi le système matriciel (III.22) devient :

$$[A]\{H\}_{t+\Delta t} = [B]\{H\}_t + \Delta t.\{F_G\}_{t+\Delta t} \quad (III.23)$$

Les matrices A et B sont des matrices bandes symétriques.

Le système matriciel (III.23) est non linéaire du fait que la position de la surface libre est une inconnue du problème. La linéarisation de ce système nécessite l'utilisation des méthodes itératives telles que la méthode de point fixe ou de Newton – Raphson.

Dans ce travail nous avons choisi la méthode de point fixe car c'est la plus simple et plus facile à mettre en œuvre dans le code de calcul par rapport à la méthode de Newton – Raphson.

III.5. Algorithme de résolution

L'algorithme du code de calcul SHARPINT tient compte du couplage des écoulements d'eau douce et d'eau salée. Les deux variables sont dépendantes par la position de l'interface abrupte. En effet, à chaque pas de temps, à chaque itération sur la variable charge hydraulique d'eau salée on résout le système matriciel (III.22) itérativement pour la variable charge hydraulique d'eau douce jusqu'à la convergence, puis on résout le même système en terme de charge hydraulique d'eau salée et la procédure est répétée à chaque itération sur la charge hydraulique d'eau salée jusqu'à la convergence. On procède de la même manière au prochain pas de temps.

Puisque le système matriciel (III.23) est non linéaire, nous sommes ramenés à calculer à chaque itération et à chaque pas de temps les matrices de ce système. De ce fait, on fait l'assemblage des matrices chaque fois.

La convergence est assurée si la condition suivante sur les deux variables : charge hydraulique d'eau douce et d'eau salée est vérifiée :

$$\left| \frac{H_i^{j+1} - H_i^j}{H_i^j} \right| < \text{tol} \quad (III.24)$$

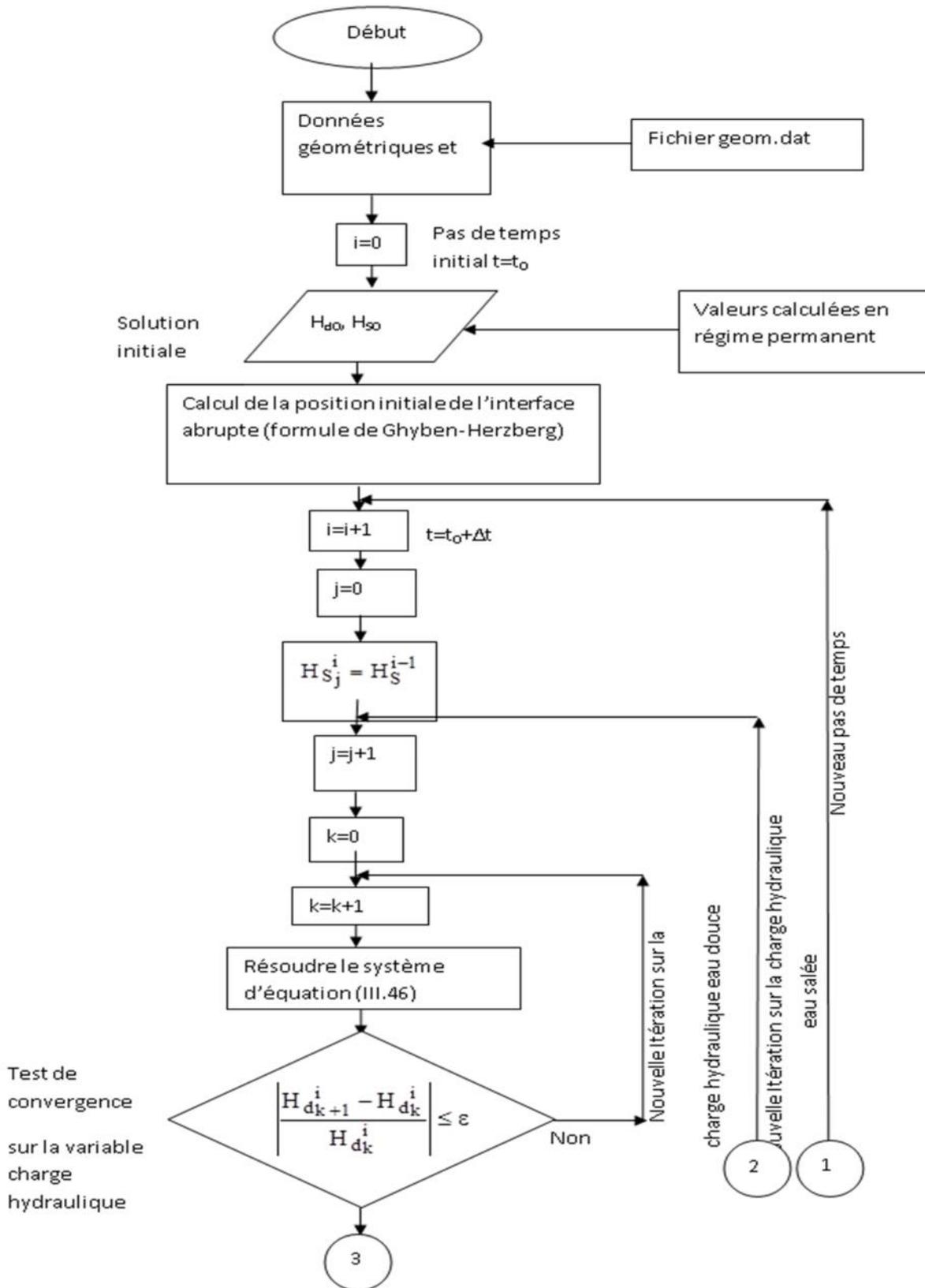
H_i^{j+1} : Charge hydraulique (eau douce ou eau salée) à l'itération j+1 et au pas de temps i

H_i^j : Charge hydraulique (eau douce ou eau salée) à l'itération j et au pas de temps i

tol: tolérance, généralement égale à 10^{-3} .

Les matrices bandes A et B sont symétriques, le stockage de ces deux matrices consiste à minimiser au maximum l'espace mémoire réservé. Les méthodes de stockage et de la résolution du système linéaire sont les mêmes décrites par Griffiths et Smith (1986). Dans ce chapitre nous expliquerons le principe de ces deux méthodes juste après. (Hachemi A., 2016).

L'organigramme du code de calcul SHARPINT est illustré par la figure (III.1).



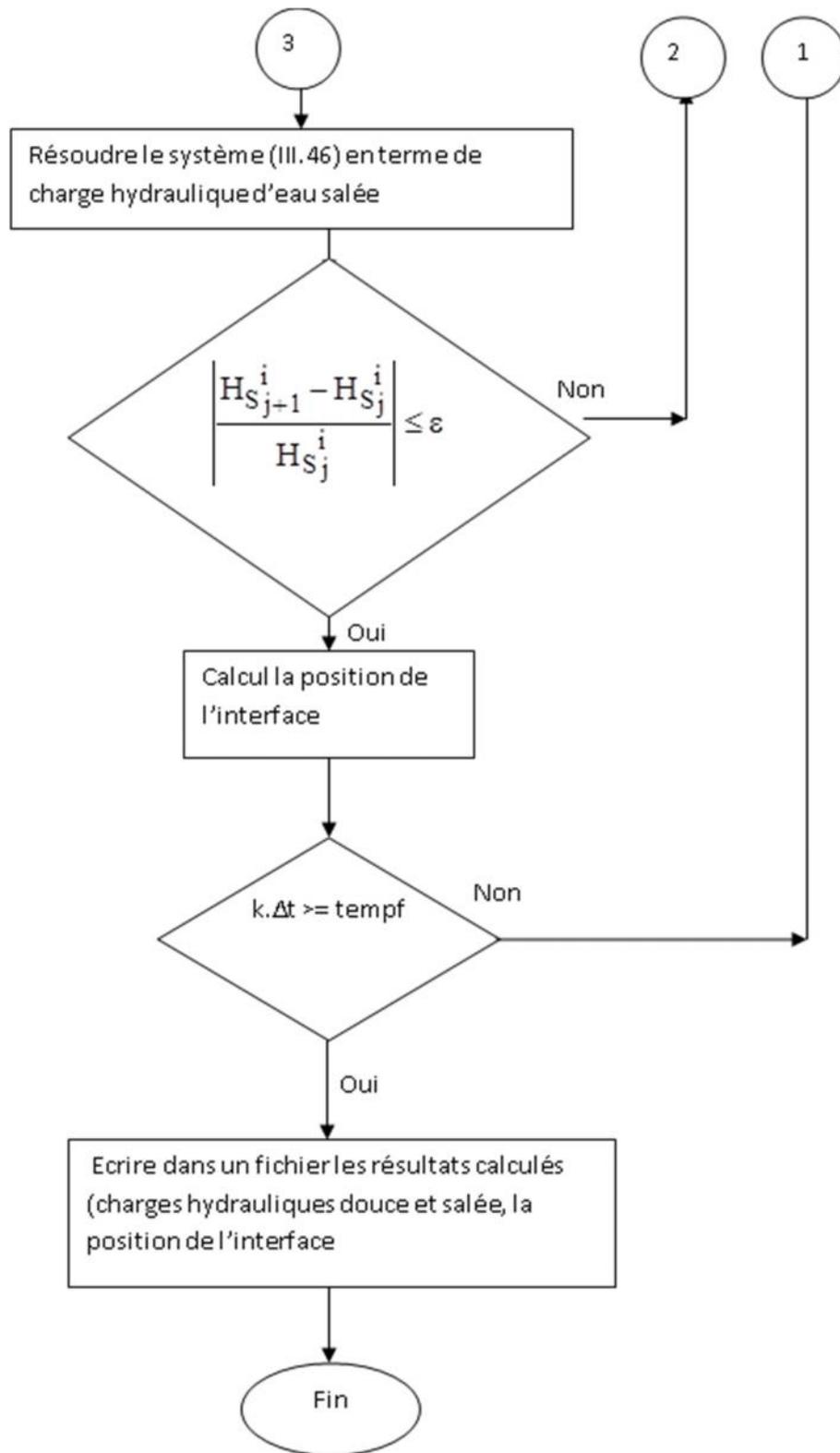


Figure III.1. Organigramme de calcul du code SHARPINT

III.6. Mise en œuvre du code

Le code de calcul « SHARPINT » ainsi développé est écrit en langage Fortran 90. Il est composé comme tout autre code de calcul par éléments finis de trois étapes principales : (Hachemi A., 2016).

III.6.1. Etape de prétraitement (programme maillage)

Cette étape consiste à préparer les données nécessaires à l'étape de traitement afin de résoudre le problème physique. Le maillage automatique de la structure constitue le fond de cette étape.

Le programme « maillage » permet générer le maillage automatique de l'aquifère dans le plan (xy) et fournir les différents conditions aux limites existantes. Les éléments finis utilisés par ce module est quadrilatéraux (4 nœuds).

III.6.2. Etape de traitement

Cette étape constitue le cœur du code de calcul car c'est dans cette étape qu'on va résoudre le problème physique et déterminer ainsi les valeurs des inconnues du problème (charge hydraulique).

III.6.3. Etape de post-traitement

Dans cette étape on essaiera de représenter les résultats de calcul sous forme graphique à partir du fichier de résultat dans les deux plans (xy) et (xz).

Les graphiques illustrés dans cette étape concernent les contours de charge hydraulique d'eau douce (isopiezes), contours du potentiel de Strack et la position de l'interface dans les plans (xz) et (xy).

Pour tracer les contours on utilise le logiciel Surfer et pour les graphiques de la profondeur de l'interface en fonction de la distance à la mer on utilise le logiciel Excel.

Enfin les trois étapes seront regroupées dans notre code de calcul sous forme de fichier d'extension.bat. Il consiste à exécuter les trois programmes dans l'ordre et transférer les données. Premièrement, on exécute le programme maillage, puis le programme Sharpint qui utilise les résultats trouvés par le programme maillage comme données, puis surfer ou Excel pour la représentation graphique des résultats.

La figure (III.2) représente l'organigramme d'exécution des trois programmes qui constituent la structure de notre code de calcul.

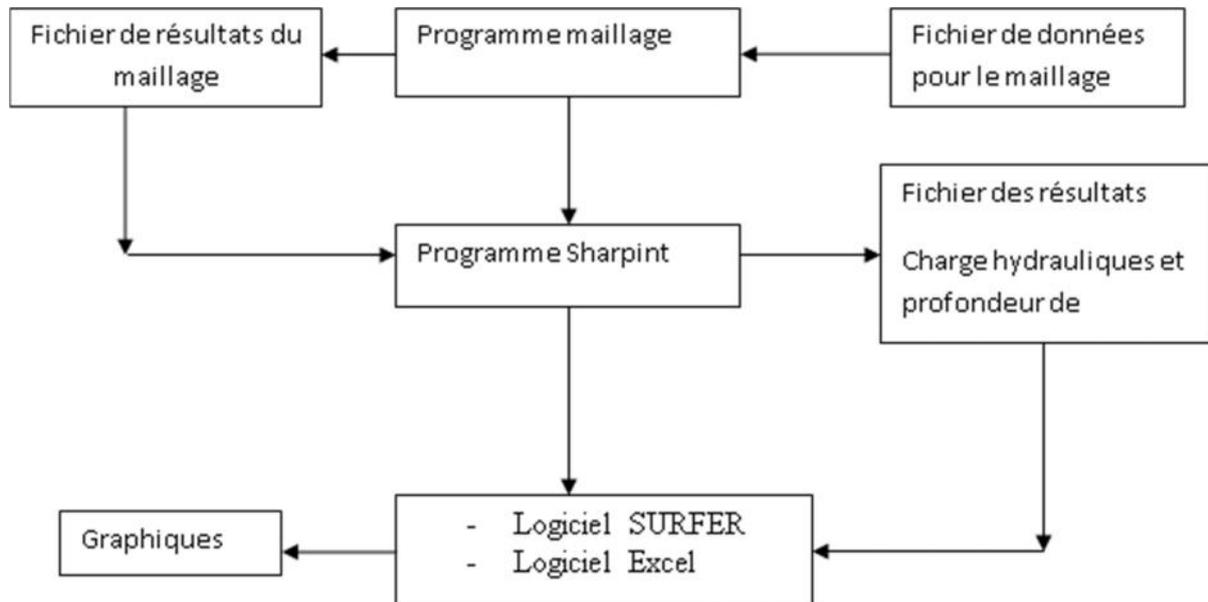


Figure III.2. Etapes d'exécution du code de calcul Sharpint

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué le principe de la méthode des éléments finis et les étapes d'élaboration d'un code par éléments finis. L'application du principe de Galerkin sur les EDP du modèle interface abrupte de l'intrusion marine, a conduit après discrétisation du domaine d'étude en éléments finis à résoudre deux systèmes matriciels non linéaires couplés, et nous avons donné un aperçu sur la structure du code de calcul Sharpint et l'organigramme de son exécution.

CHAPITRE IV

Introduction

Après présentation du code de calcul « sharpint » basé sur le modèle à interface abrupte, nous allons appliquer ce code de calcul sur l'aquifère alluvionnaire de Oued Djendjen (W.Jijel) pour localiser l'interface eau douce - eau salée.

Les étapes de simulation consistent à déterminer le modèle conceptuel présentant les limites de la nappe ainsi les conditions aux limites y appliquées, le modèle calibré en comparant nos résultats de simulation à ceux mesurés et enfin la simulation à des horizons futurs en proposant des scénarios d'exploitation de la nappe.

IV.1. Modèle conceptuel

La délimitation de la nappe alluvionnaire d'Oued Djendjen est faite en tenant compte la topographie et la géologie de la région. Notre code de calcul est quasi-tridimensionnel qui suppose la validité de l'hypothèse de Dupuits qui considère que l'écoulement souterrain est horizontal et par conséquent une forme plane de l'aquifère.

La figure (IV.1) présente la délimitation de l'aquifère alluvionnaire sur fond géologique et les conditions aux limites appliquées.

IV.1.1. Conditions aux limites imposées

Les conditions aux limites présentes sont :

- Conditions de flux nul (condition de Neuman) : elles correspondent aux limites étanches, dans notre cas il s'agit de la présence de la formation de marne qui est étanche.
- Conditions de potentiel imposé (conditions de Dirichlet) : sur cette limite on fixe les charges hydrauliques d'eau douce et d'eau salée (h et H_s).

Sur la limite de la cote on admet que le niveau piézométrique par rapport au niveau de la mer (niveau de référence) est nul et la charge hydraulique d'eau salée est prise nulle.

Sur la frontière au sud loin de la cote on fixe la charge hydraulique d'eau douce égale à 35m d'après les levés piézométriques fournis. Par contre on suppose que l'élévation de l'interface eau douce eau salée est nulle.

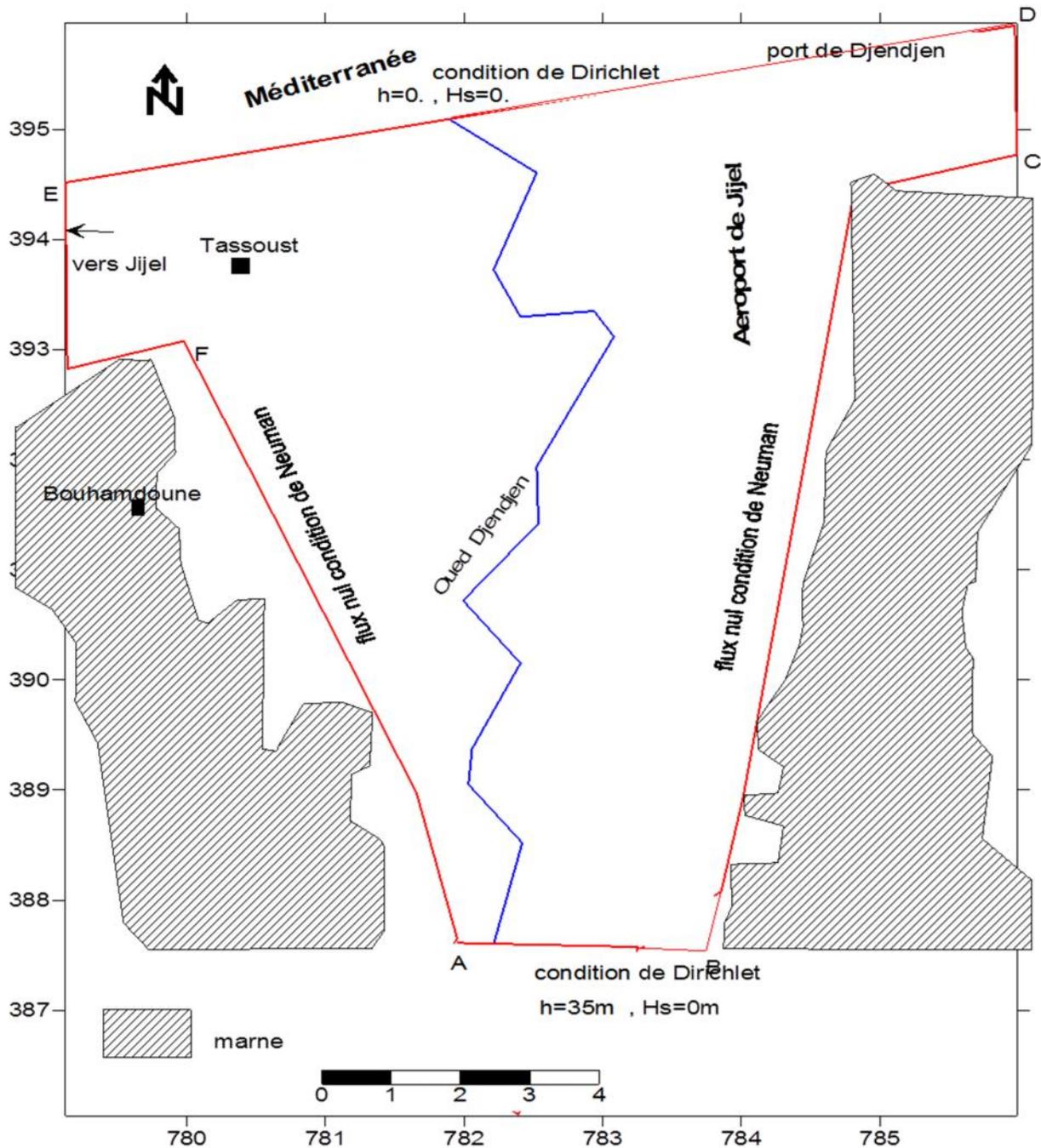


Figure IV.1. Limites de la nappe et conditions aux limites

IV.1.2. maillage de la structure

Le maillage de la structure est assuré par un code de calcul « mailleur » développé par (Hachemi, 2016).

L'élément fini choisi est quadrilatéral iso-paramétrique (à 4 nœuds).

Le maillage de la structure est présenté par la figure (IV.2).

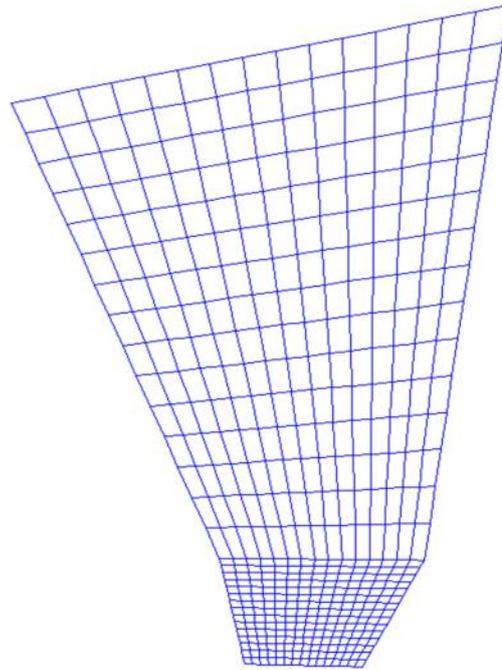


Figure IV.2. Maillage de la structure

IV.1.3. Jeu de données

Pour pouvoir appliquer notre code de calcul sur l'aquifère de Djendjen nous devons disposer des données nécessaires concernant la recharge, les paramètres de l'aquifères, les forages et puits. La plupart des données ont été extraites à partir de l'étude faite par **(Boufekane, 2003)** dans ses travaux de mémoire de Magistère.

Le tableau (IV.1) présente le jeu de données nécessaires.

Tableau IV.1. Jeu de données

| Paramètre | Unité | valeur |
|------------------------------|-------|--------|
| Conductivités hydrauliques : | | |
| $K_x = K_y$ | m/j | 30 |
| coefficient d'emmagasinement | - | 0.25 |
| recharge | mm/j | 0.30 |
| nombres d'éléments finis | - | 450 |
| nombre des nœuds | - | 496 |

La projection des forages et des puits sur la carte précédente est assurée par le Logiciel Surfer, En connaissant les coordonnées Lambert de ces points d'eau.

IV.2. calage du modèle

Dans cette étape on essaye sur la base des données fournies précédemment de simuler l'écoulement souterrain et comparer nos résultats avec ceux mesurés. Cette étape consiste à vérifier si nos données citées précédemment sont fiables.

On va prendre comme données initiales la piézométrie mesurée en 2003 et calculer la piézométrie en 2012 et la comparer avec celle mesurée.

La figure (IV.3) illustre les résultats simulés et mesurés.

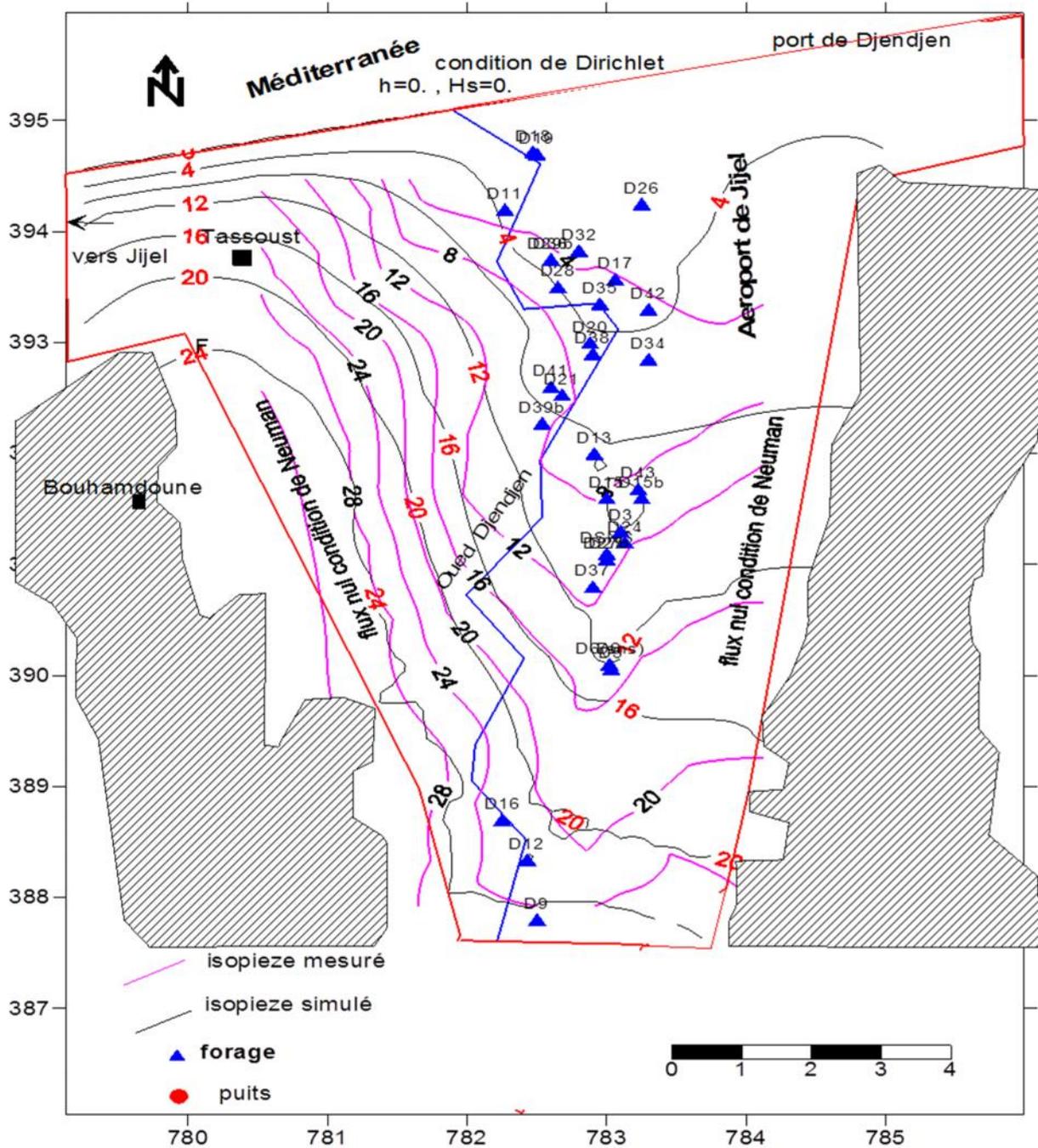


Figure IV.3. Piézométries simulées et mesurées (Mai 2012)

L'étape de calage est très difficile et plus compliquée du fait qu'elle est liée directement aux données mesurées et aux paramètres de l'aquifère. Dans notre cas on remarque une concordance acceptable vu que nous avons supposé notre aquifère homogène et isotrope pour simplifier le calcul et en absence d'un code de calcul qui traite le problème inverse.

La détermination de la position de l'interface eau douce eau salée dans l'aquifère pour l'année 2012, nous avons fait la simulation en prenant les conditions initiales qui correspondent à l'année 2003. Cette solution initiale a été obtenue en appliquant la formule de Badon – Ghyben-Herzberg (BGH).

La figure (IV.4) présente les résultats de simulation de l'épaisseur d'eau salée et notamment la position de l'interface.

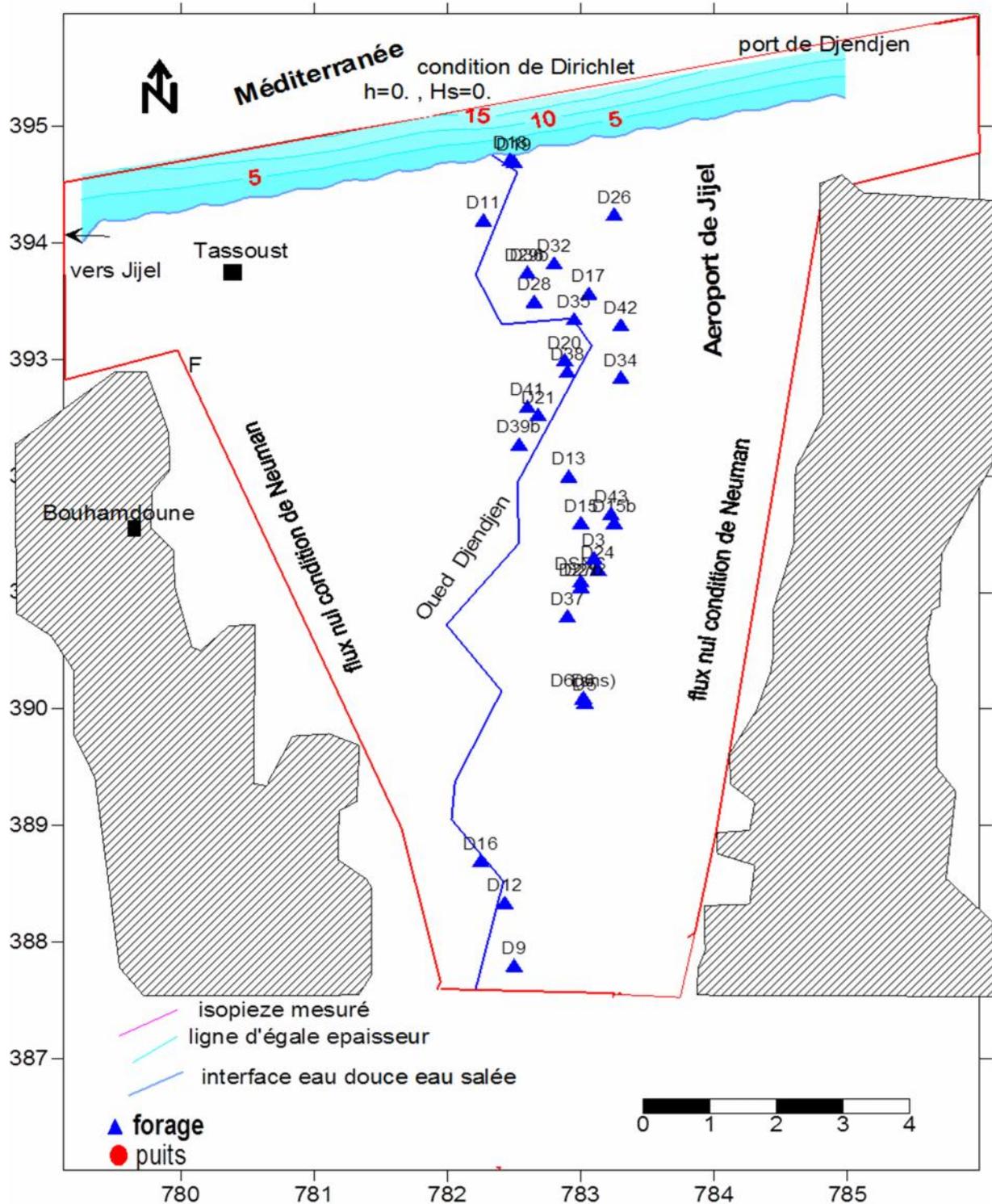


Figure IV.4. Position de l'interface eau douce eau salée (Mai 2012)

On remarque que l'épaisseur maximale de l'eau salée est autour de 20m proche de la mer. L'interface eau douce eau salée correspond à la ligne d'égalité épaisseur zéro. L'interface se trouve à une distance maximale de la cote égale à 500m vers les forages les plus proches de la cote D18 et D19.

IV.3. Prévision spatiotemporelle de l'interface eau douce eau salée

Dans le but de déterminer l'évolution spatiotemporelle de la position de l'interface eau douce eau salée dans notre aquifère, nous allons calculer la position de l'interface eau douce eau salée en 2017.

La figure (IV.5) illustre les résultats de simulation en 2017.

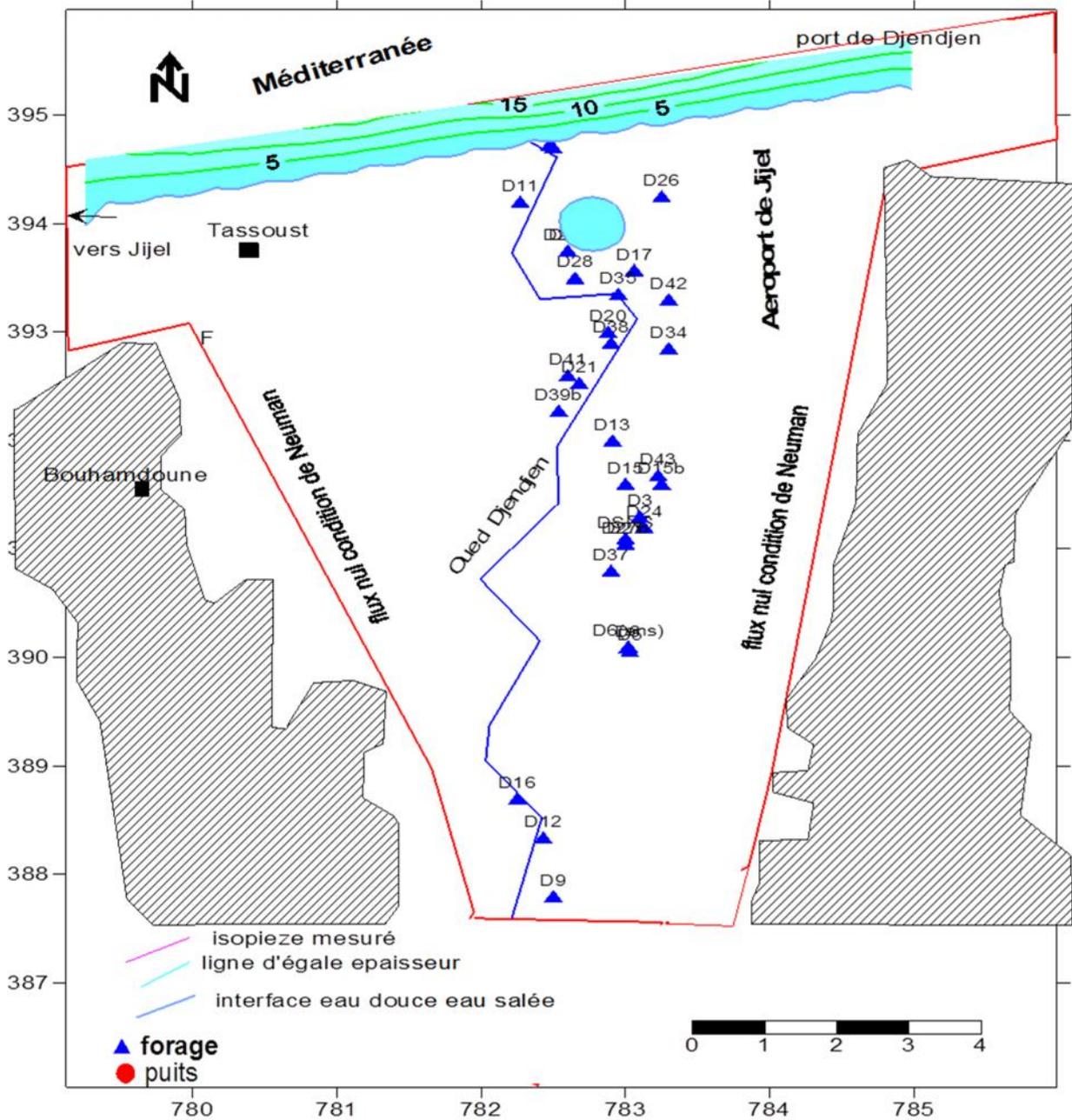


Figure IV.5. Position de l'interface eau douce eau salée En 2017

On remarque que l'interface eau douce eau salée a légèrement avancé par rapport à celle de l'année 2012. La distance maximale de l'interface par rapport à la cote est environ 600m.

La figure (IV.6) illustre les résultats de simulation en 2025.

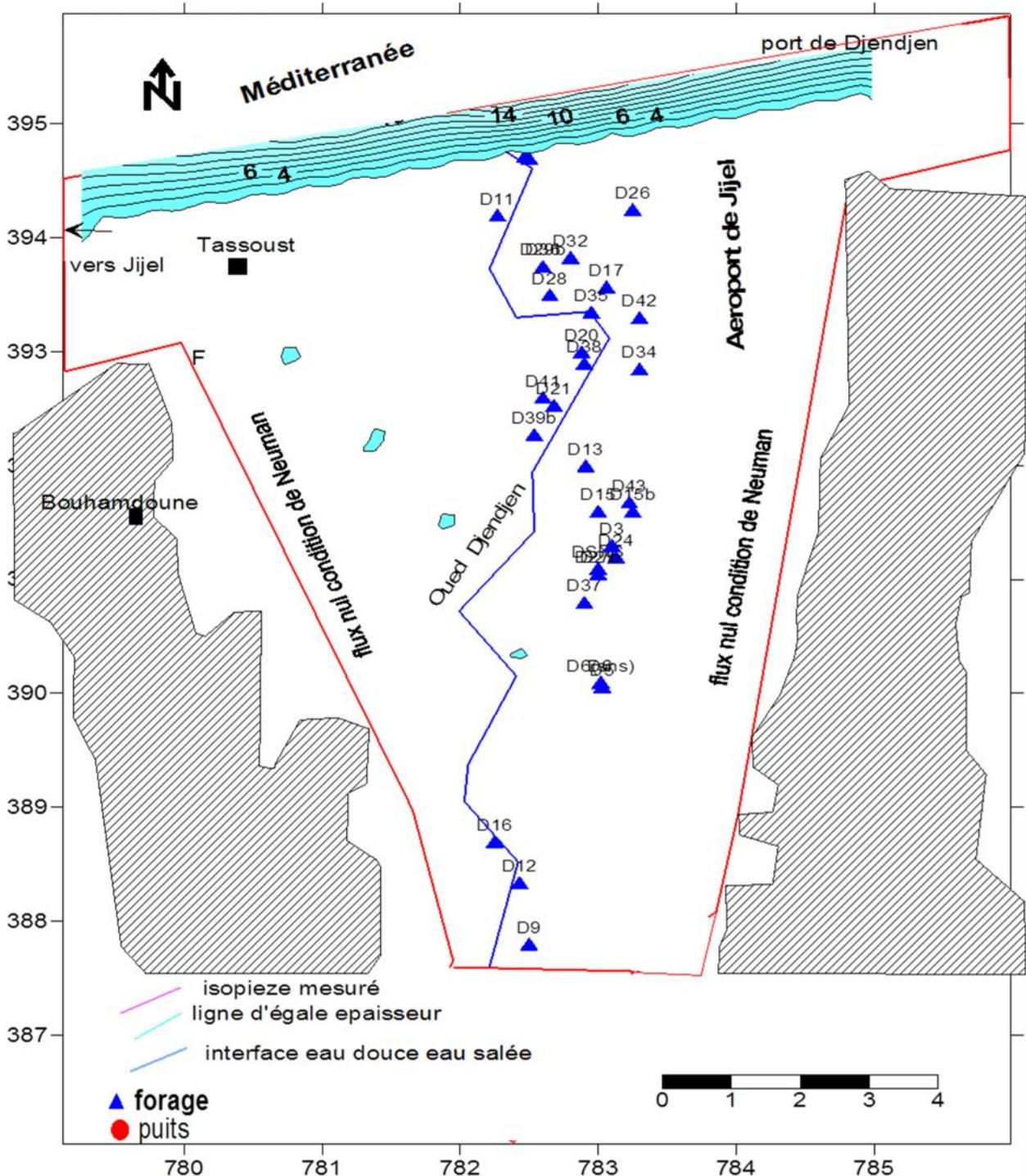


Figure IV.6. Position de l'interface eau douce eau salée En 2025.

On peut dire que la recharge dans l'aquifère de Djendjen est suffisante pour limiter le risque de l'intrusion marine. En effet la position de l'interface eau douce eau salée est stationnaire.

Conclusion :

L'application du code de calcul « Sharpint » a permis de visualiser l'évolution spatiotemporelle de l'interface eau douce eau salée dans l'aquifère de Djendjen (W. Jijel).

Le calage du modèle a donné des résultats satisfaisants malgré qu'on a supposé que l'aquifère est homogène et isotrope.

La position de l'interface en 2012 est à 500m de la cote alors qu'en 2017 est à 600m.

En 2025 la position de l'interface reste presque la même ce qui nous a permis de constater que l'interface est stationnaire sous la recharge naturelle actuelle.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le présent travail, on s'est intéressé à un problème d'actualité qui est l'intrusion marine, ce phénomène a fait l'objet de plusieurs études de recherches.

Dans notre cas la zone d'étude qui est la plaine alluviale de l'Oued de Djendjen (W. Jijel). Elle constitue un aquifère vulnérable à l'intrusion marine dans sa partie Nord.

La démarche adoptée pour la réalisation de notre étude, a consisté d'abord à réunir les informations nécessaires sur cette application.

Cette plaine est caractérisée par un climat méditerranéen, est une hauteur de précipitation d'environ 980 mm/an dont 46 % des précipitations s'évaporent, ce qui correspond à une lame d'eau de 454 mm, et 10.7 % environ s'infiltrent, ce qui correspond à une lame d'eau de 105.6 mm.

L'aquifère est constitué de formations alluviales du Quaternaire et du Miocène supérieur (Pontien), représentées essentiellement par des sables, graviers et galets, contenant parfois des intercalations argileuses.

L'état piézométrique de la nappe en 2003 montre un flux d'eau vers la mer ce qui réduit le risque de l'intrusion marine.

Les résultats de l'analyse chimique effectuée sur les eaux souterraines de la nappe a permis de tracer les cartes d'iso-minéralisation et celle de chlorure et de sodium, à partir de ces cartes on a pu déterminer les zones les plus affectées au biseau salée.

La solution analytique bien qu'elle soit simple à appliquer, mais elle ne peut pas traiter les cas les plus compliqués des aquifères, c'est pourquoi nous avons appliqué le code de calcul SHARPINT qui est basé sur l'approche de l'interface abrupte sur notre aquifère, ce qui nous a permis de localiser l'interface eau douce- eau salée dans l'espace et dans le temps.

Le calage du modèle a été fait sur la base des données 2003 et 2012, ce dernier a donné des résultats satisfaisants. Nous avons trouvé la position de l'interface en 2012 à 500m de la cote alors qu'en 2017 est à 600m.

Conclusion générale

En 2025 la position de l'interface restera presque la même ce qui nous a permis de constater que l'avancement est lent au cours du temps.

A la raison de manque de données et à la limitation de notre code de calcul les résultats trouvés peuvent ne pas être très précis.

Pour cela on recommande de faire un suivi de la nappe en terme de la piézométrie et de la qualité, de faire une étude d'échange rivière- nappe pour bien mener une étude complète sur l'intrusion marine.

Et l'utilisation d'un logiciel tridimensionnel tel que : MODFLOW pour calculer les concentrations en sels dans l'espace et dans le temps, c'est le modèle hydro-dispersif qui représente la réalité.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AL Bitar.A , 2007, Modélisation des écoulements en milieu poreux hétérogènes 2D / 3D, avec couplages surface / souterrain et densitaires. Thèse de Doctorat , Ecole doctorale : science de l'Univers, Espace, Environnement. INP , Toulouse.

Andreasen D.C et **Flek W .B.**, (1992)- Use of bromide : chloride ratio to differentiate potential sources of chlorides in a shallow, unconfined aquifer affected by brackish – water intrusion. Hydrogeology journal, V .5n°, 1997.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Jijel.

Babay K., Techniques de la recharge artificielle des nappes phréatiques Proposition d'une recharge artificielle des nappes Alluvionnaires de la Wilaya de Jijel (Algérie) Cas de l'aquifère alluvionnaire de la plaine de l'oued Djendjen, mémoire Master 2, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2011.

Bear, J. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York, 569 p., 1979.

Bear.J & Cheng.A.D., Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Springer, New York, 834 pp., 2010.

Bear, J. and Dagan, G., (1964), some exact solutions of interface problems by means of the hydrograph method, J. Geophys. Res., 69(8), 1563-1572.

Bonnet M. et Sauty. J.P., Un modèle simplifié pour la simulation des nappes avec intrusion saline IAHS—AISH Publication No. 115, Colloque de Bratislava, septembre 1975.

Boufekane A., Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine de l'oued djendjen (w.Jijel) et modélisation de la nappe, thèse de Magister, Usthb/alger, 2005.

C.G.G, (1971) : Prospection électrique de la plaine alluviale de l'oued Djendjen.

Cheng.A.H.D et Ouazar.D., Analytical solution (Bear.J , Cheng.A.H.D , Sorek.S, Ouazar.D and Herrera.I) Seawater intrusion in coastal aquifers concepts, Methods and Practices.Kluwer Academic Publishers, vol 14, p 163-187, 625p, 1999.

C.P.G.F, (1975) : Etude géoélectrique de la plaine de l'oued Djendjen.

Delga D., (1955) : Etude géologique de l'ouest de la chaîne numidique (Thèse). Bull. Serv. Carte géologique. Algérie (2), 193 Fig, 10pl. h. t, Alger.

Durozoy G., (1954) : Esquisse géologique au 1/50 000 de la région de Jijel.

Essaid, H. I., 1990a., a multilayered sharp interface model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: model development and application, *Water Resour. Res.*, 26(7), 1431-1454.

Essaid, H. I., 1990b., the computer model SHARP, a quasi-three-dimensional finite difference model to simulate fresh water and saltwater flow in layered coastal aquifer systems, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 90-4130, 130p.

Guo W. & Langevin C., D User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow. U.S. Geological Survey, 77pp. 2002.

Hachemi A., Etude de l'intrusion marine dans les aquifères côtiers cas de l'Oued Nador (W.Tipaza), thèse de Doctorat et Sciences. ENSA /Alger, 2016.

Hachemi A., Modélisation numérique des écoulements dans les barrages en terre, thèse de Magister, Université Hassiba Ben Bouali, 2000.

Huyakorn,P.S, Y.S. Wu, et N.S. Park.1996. Multiphase approach to the numerical solution of a sharp interface saltwater intrusion problem. *Water Resources Research*.v.32, no,1, pp.93-102.

Price H. S., J. C. Cavendish, and R. A. Varga. 1968. Numerical methods of higher order accuracy for diffusion convection equations. *Society of Petroleum Engineers Journal*, pp.293-303.

Todd.D.K et Mays. L.W. Ground water hydrology. 3ème edition, Jhon Wiley & Son. Inc., 636p, 2005.