

10/98

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département d'hydraulique

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire d'ingénieur

***Intrusion des eaux marines
dans les aquifères côtières***

Proposé par :

Mr. B. Remini

Réalisé par:

Mohamed Touil

Dirigé par:

Mr. B. Remini

M^{elle} S. Benmamar

1998

Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce travail à :

*Mon père, ma mère qui m'ont aider à en
arriver là où je suis.*

Mes frères et soeurs et à toute ma famille.

*Tous mes collègues et enseignants de
l'ENP.*

Mohamed



Remerciements

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

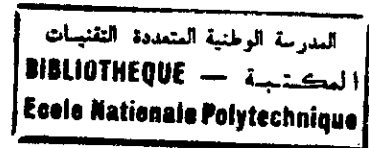
Nous remercions tous ceux qui nous ont aidé dans ce travail, et en particulier notre promoteur Mr. Remini et copromoteur M^{lle} Benamar.

Nous ne saurions oublier de remercier le personnel de la bibliothèque de l'ENP, et en particulier, ami Mahmoud, ami Sallab, Djamel, Krimo.

Que ce travail soit la meilleure reconnaissance et remerciement à nos parents et familles pour leurs sacrifices et encouragements.



Sommaire



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

Chapitre I : Exemples d'intrusion marine

I. INTRUSION MARINE DANS LE RÉSEAU FLUVIAL DE DUNKERQUE.....	3
I.2.POLLUTION SALINE DE LA NAPPE CÔTIÈRE À L'EST D'ALGER	5
I.2.1 D'APRÈS LES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES.....	6
I.2.2 D'APRÈS L'ÉTUDE CHIMIQUE DES EAUX.....	7
I.2.3 D'APRÈS L'ÉTUDE GÉOPHYSIQUE.....	8
I.3 ETUDE DE R.BENI AKHY, H.BENDHIA, A.GAMAOUN SUR LA MODÉLISATION DE L'IMPACT DES ACTIVITÉS ANTROPIQUES SUR LES NAPPES PHRÉATIQUES CÔTIÈRES CAS DE CHOTTE MARIA (SAHEL TUNISIEN)....	8
I.3.1 MODÉLISATION	9
I.3.2 SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT EN RÉGIME PERMANENT	10
I.3.3 SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT EN RÉGIME TRANSITOIRE	10
I.3.4 SIMULATION PRÉVISIONNELLE.....	12

Chapitre 2 : Etude du contact eau douce eau salée

II.1 CADRE THÉORIQUE DU PHÉNOMÈNE DE L'ENVASIONS MARINE	15
---------------------------------------------------------------	----

II.2 APPROCHE MONODIMENSIONNELLE DE BADON, GHYBEN ET HERZBERG ...	15
II.3 APPROCHE HYDRODYNAMIQUE DE HUBERT (1969).....	18
II.4 MESURE DE LA PROFONDEUR DE L'INTERFACE PAR LE DOUBLE PIEZOMÉTRIQUE	19
II.5 APPROCHE DE BOSSY: THÉORIE DE L'ÉQUILIBRE DE DEUX FLUIDES DIFFÉRENTS (EAU DOUCE - EAU SALÉE EN MILIEU POREUX)	21
II.6 LA NOTION DE DISPERSION DANS LE PHÉNOMÈNE D'INTRUSION DE L'EAU SALÉE.....	24
II.7 LES COURANT DE DENSITÉ	25
II.7.1 DÉFINITION	25
II.7.2 ANATOMIE D'UN COURANT DE DENSITÉ	26
II.7.3 FACTEUR DE PRESSION	29
II.7.4 EQUATION FONDAMENTALE DU COURANT DE DENSITÉ	29
<u>Chapitre 3 : Modèle expérimental</u>	
III.1 INSTALLATION.....	32
III.1.1RÉSERVOIR D'INFILTRATION	32
III.1.2MEMBRANE PERMÉABLE.....	33
III.1.3PAROI DE SÉPARATION.....	33
III.1.4RÉSERVOIR DE COLORANT	33
III.2 MATÉRIAUX UTILISÉS	33
III.2.1LE SABLE.....	34
III.2.2L'EAU SALÉE.....	34
III.3 MOYENS DE MESURE	34
III.3.1MESURE DE LA PRESSION.....	34
III.3.2MESURE DE LA VITESSE	34
III.4 MODE OPÉRATOIRE	34

III.5 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE	35
III.5.1 DÉFINITION D'UNE ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE.....	35
III.5.2 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE.....	35
III.5.3 RÉSULTAT	36
III.6 DÉTERMINATION DU VOLUME DE SABLE SATURÉ D'EAU DOUCE ET LE VOLUME DE L'EAU SALÉE	36
III.7 MESURE DE LA CONCENTRATION EN SEL (NaCl) ET DE LA DENSITÉ	37
III.8 OBSERVATION.....	37
 Chapitre 4 : Analyse des résultats expérimentaux	
IV.1 VARIATION DE LA VITESSE D'INFILTRATION EN FONCTION DE LA DISTANCE	39
IV.2 VARIATION DE LA VITESSE D'INFILTRATION EN FONCTION DE LA CONCENTRATION	39
IV.3 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION SUR LES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES.....	39
IV.4 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION SUR LES HAUTEURS DES LIGNES DE COURANT DE DENSITÉ, ET ENTRE DEUX PÉRIODES CELLE DE $T = T_1$ ET $T = T_2$	41
IV.5 VARIATION DE LA VITESSE D'INFILTRATION EN FONCTION DU PARAMÈTRE (G'H).....	42
CONCLUSION GENERALE.....	

INTRODUCTION GENERALE

S'ils ne modifient pas de manière radicale la gestion de leur ressources en eau, les pays d'Afrique du Nord connaîtront de graves pénuries dans ce domaine ainsi qu'un déclin économique au cours des trente prochaines années. La quantité d'eau disponible par habitant n'atteint plus en effet que le tiers des niveaux de 1960 et elle devrait encore diminuer de moitié durant les trois prochaines décennies. Tel est l'avertissement lancé par la banque mondiale (BM) dans un rapport intitulé "De la rareté à la sécurité : prévenir une grave pénurie d'eau en Afrique du Nord"[8].

Cette situation s'explique en partie par la surexploitation des eaux souterraines qui épuise les nappes phréatiques

L'augmentation des prélèvements dans les nappes littorales et les perturbations apportées aux écoulements souterrains par les pompages effectués en bordures de mer, ne manque pas de rompre l'équilibre hydrodynamique régnant entre l'eau douce et l'eau salée.

La rupture d'un tel équilibre peut être désastreuse pour les nappes et le sol.

Bien que l'Algérie compte 1200 km de côte, ce problème ne s'est pas posé dans le passé. Mais durant ces dernières années, ont décelé des intrusions des eaux marines dans les nappes côtières. Ces dernières sont de plus en plus influencées par les activités anthropiques divers.

La surexploitation de la nappe, l'extraction du sable sont en général une cause principale de l'intrusion de l'eau salée dans les aquifère.

D'autres facteurs peuvent accentués le phénomène notamment :

- ↳ Les variations du niveau de la mer.
- ↳ L'hydrodynamisme marin.
- ↳ La faible alimentation de la zone d'embouchure et de plage en apports sédimentaires

↳ Le problème de la sécheresse qui est l'une des causes du rabattement des nappes souterraines .

Ceci nous a amené à nous intéresser au contact eau salée- eau douce, et donc à étudier expérimentalement la détermination de la ligne de courant.

Pour cela, nous avons articulé notre étude sur quatre chapitre.

Dans le premier, nous donnons un aperçu sur le problème de l'intrusion marine dans le monde et sur les études effectuées sur ce thème.

Dans le second nous présentons l'étude théorique du contact eau douce - eau salée, et donnons des notions sur les courants de densité.

Dans le troisième, nous présentons le modèle expérimental utilisé ainsi que le canevas de mesures.

Dans le quatrième, nous donnons une analyse des résultats obtenus.

CHAPITRE I

EXEMPLES D'INTRUSION MARINE

De nombreux exemples d'intrusion par des eaux salées marines ont été déjà signalés

I.1 Intrusion marine dans le réseau fluvial de Dunkerque [7]

Afin d'éviter l'intrusion marine dans le réseau fluvial de Dunkerque, en 1965 **G.RIBES** et **C.BLANCHET** ont proposés l'utilisation de l'effet de différence de densité, qui permet de superposer l'eau douce à l'eau de mer avec une interface horizontale. Ceci a exigé la construction sur 10.500km de longueur, d'un canal avec écluse reliant le canal de Bourbourg en eau (niveau + 4) à l'extrémité Ouest du nouveau bassin à flot en eau de mer (niveau variable entre + 4 et + 6.5) (figure N°1, page N°4).

Cette liaison ne doit pas introduire d'eau salée dans le réseau fluvial au-delà d'une limite admissible par l'agriculture.

La liaison fluviale existante avait été conçue, à la fin du dernier siècle, avec un système de double écluse de type classique, l'une est l'écluse reliant le bief d'eau douce à (+4) au bief intermédiaire d'eau saumâtre à (+2.60) et l'autre reliant ce dernier bief au bassin à flot (entre (+ 4) et (+ 6.5)). Le bief intermédiaire est en eau saumâtre, car il reçoit les écluses d'eau douce à côté du canal et les écluses d'eau de mer.

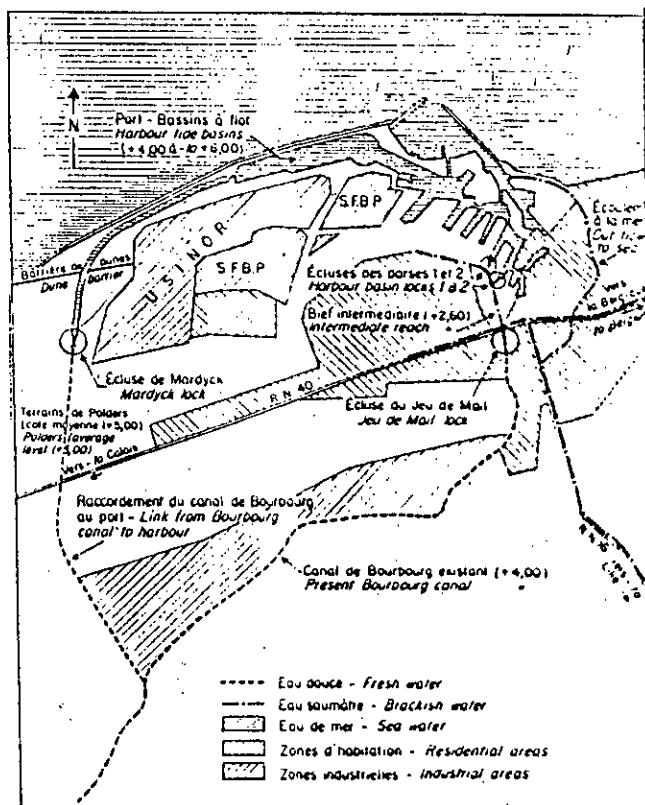


Figure N°1 : Plan de situation.

Description de la solution proposée par les auteurs

L'écluse a un sas de 144.6 m de longueur, et 12 m de largeur et 4 m de tirant d'eau.

Le sas peut être divisé par une porte. Il comporte un double circuit d'alimentation :

- ↪ Un circuit de remplissage et vidange en eau.
- ↪ Un double aqueduc d'eau douce. (figure N°2, page N°5)

Chaque opération de remplissage ou de vidange comporte deux phases avant ouverture des portes :

- ↪ Une phase d'échange d'eau à niveau pratiquement constant dans le sas (environ +4), au cours de laquelle l'eau salée étant refoulée ou aspirée par le fond, l'eau douce est chassée ou aspirée par les orifices d'eau douce ouverts.
- ↪ Une phase d'élévation ou d'abaissement de niveau pendant laquelle le sas étant en eau de mer et les aqueducs d'eau douce fermés, on fait monter ou descendre le niveau comme dans une écluse ordinaire par gravité ou pompage d'eau salée.

↙ Cette disposition a été complétée par un bassin antisalure côté terre, pour arrêter les écoulements de fond encore susceptible de se produire.

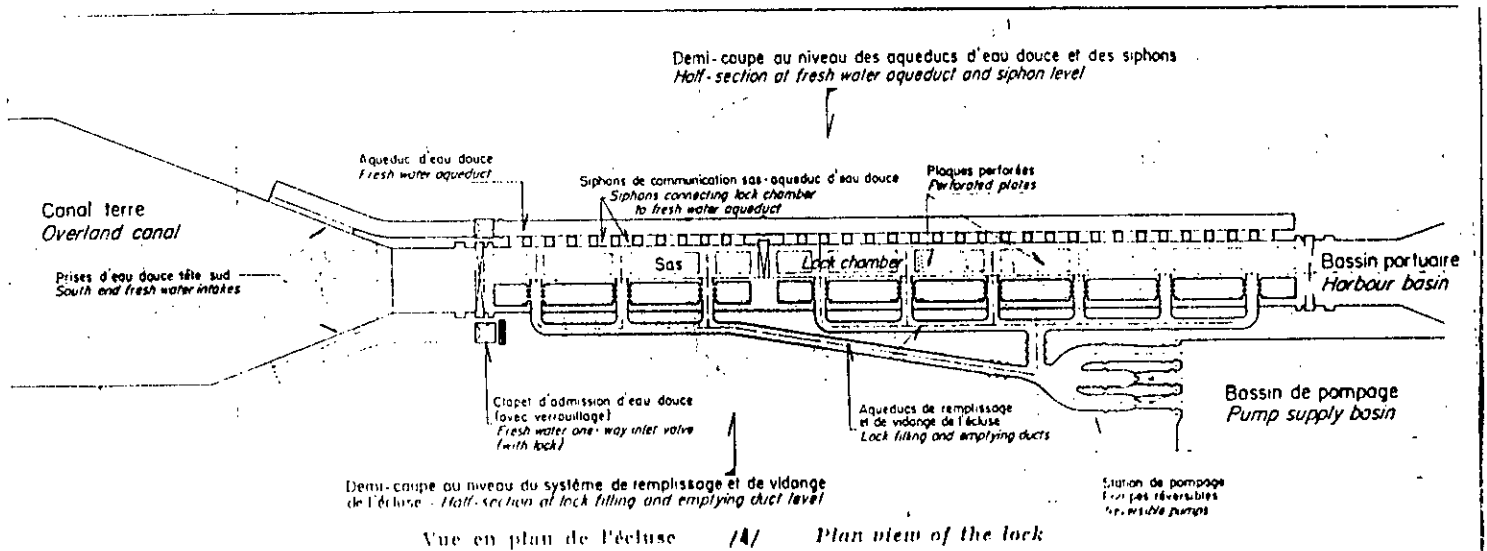


Figure N°2 : Vue en plan de l'écluse.

1.2 Pollution saline de la nappe côtière à l'Est d'Alger [5]

Dès l'année 1970, des chercheurs hydrogéologues ont mis l'accent sur la nécessité d'étudier le risque d'invasion d'eau salée dans la nappe de la Mitidja (K. ACHI et col, 1973).

En effet, dans la zone côtière entre l'embouchure de l'oued El Harrach et Bordj El Bahri, la nappe d'eau douce est en contact avec l'eau de la mer méditerranéenne. Il existe par conséquent un éventuel danger d'intrusion d'eau salée dans l'aquifère. L'embouchure de l'oued EL Harrach correspond à une zone où l'aquifère est le plus étendu; de plus le coefficient de transmissivité "Y" est assez élevée ($10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$).

Ailleurs, le substratum imperméable est situé à une côte assez élevée et rend donc

difficile et parfois impossible l'avance du front salé (figure N°3, page N° 6).

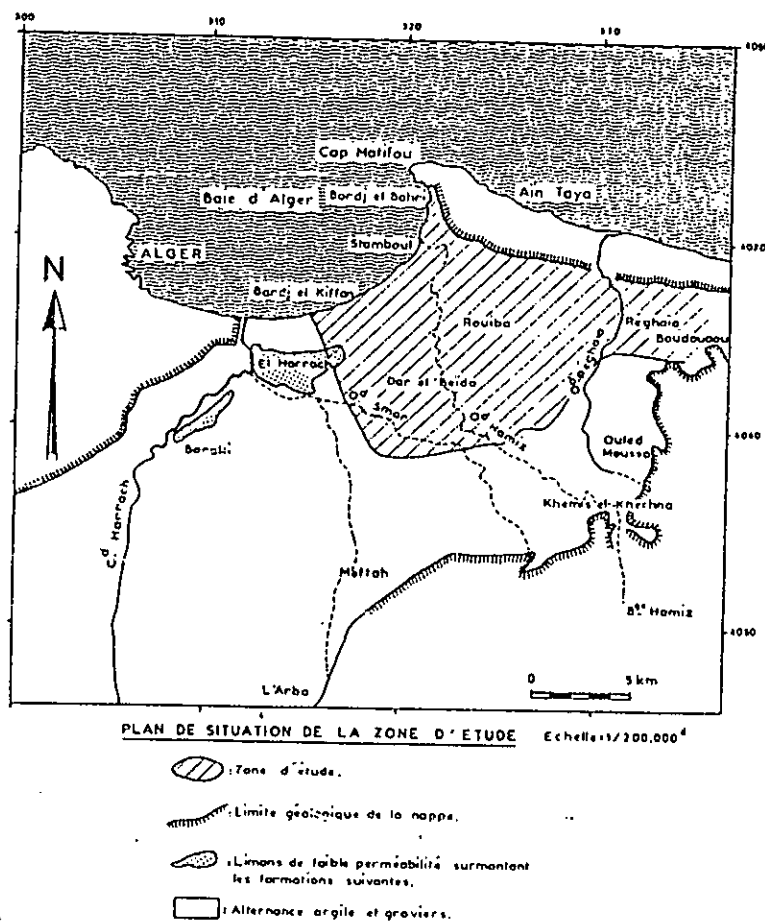


Figure N°3 : Carte de situation de l'Algerois et de l'étude.

En 1985 J. MANIA, S. IMERZOUKENE, et J. M. BRAILL ont mis en évidence l'intrusion dans la nappe de la Mitidja d'après plusieurs techniques.

1.2.1 D'après les cartes piézométriques

A la suite de l'abaissement de la surface piézométrique, toute dépression se traduit par une élévation de l'interface eau douce – eau salée qui peut atteindre rapidement le fond des puits. Le changement du sens d'écoulement par le pompage proche de la mer pourrait généraliser l'intrusion de l'eau salée marine dans l'eau douce par l'intermédiaire d'une zone de transition.

Citons Bordj El Kiffan, de côte piézométrique (-5) (figure N° 4, page N° 7), où

l'écoulement des eaux souterraines est dirigé de la mer vers le pompage. A Stamboul, la côte piézométrique est presque égale à celle de la mer et est même négative à certains endroits; La variation piézométrique quasi nulle (0.50m) et la faible puissance de la nappe au dessous de la côte (0) avec un écoulement orienté vers le Sud-Est entraînent une réduction des débits d'eau douce et une pénétration d'eau marine sous la masse des eaux douces de la nappe alluviale. Dans le secteur de Stamboul les puits sont déjà situés dans la zone de transition eau douce – eau salée.

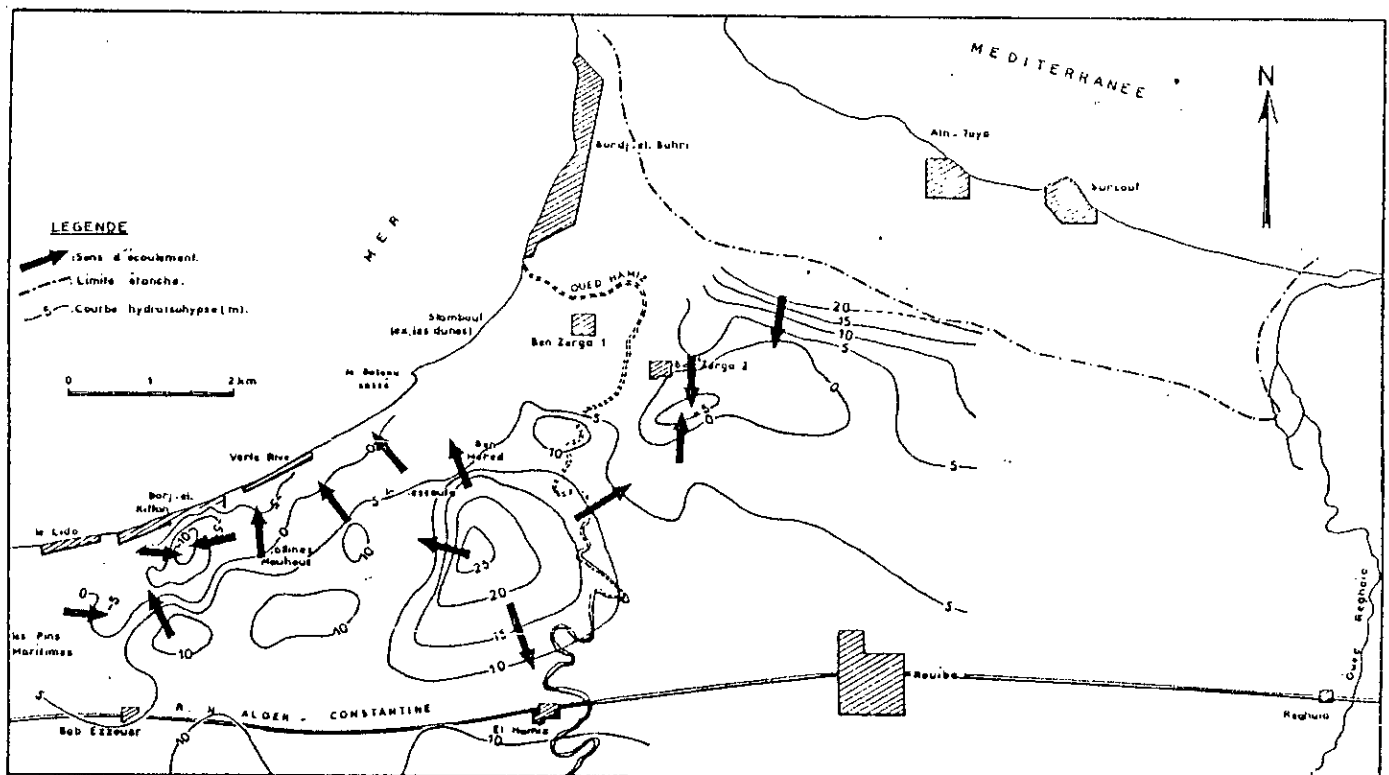


Figure N°4 : Carte piézométrique établie à partir des mesures de juin 1984
(période de hautes eaux)

1.2.2 D'après l'étude chimique des eaux

Les auteurs ont constatés par l'intermédiaire des cartes chimiques (Cl^- , Na^+ , CE et RS) que trois zones sensibles apparaissent le long de la côte; ce sont Stamboul et le partie E de verte rive.

I.2.3 D'après l'étude géophysique

Une campagne de prospection géophysique à l'aide de dispositif électrique Schlumberger a été réalisé en 1978 (Lasland, 1978) sur la zone côtière étudiée. Cinq cartes d'isorésistivités ont été établies avec des longueurs de lignes électrique différentes (40, 80, 160, 300 et 500m).

Les auteurs n'ont retenu que les cartes pouvant donner des indication sur la position du réseau d'eau salée

Conclusion

D'après cette étude les auteurs ont constatés :

- ↳ Une nette évolution de la pénétration de l'aquifère de complexe alluvial par les eaux salées marines sur la période 1978 – 1984.
- ↳ La position de l'interface est très variable et au hasard, en 1978 une hauteur de valeur élevée : 20 à 40m a été enregistrée dans les secteurs de Stamboul et Bordj El Kiffan.

Des remontées localisées apparaissent en 1984 en liaison avec les implantation de puits.
- ↳ La portée du biseau d'eau salée à l'intérieur des terres peut atteindre 1000m environ.
- ↳ La géométrie du réservoir aquifère indique des variations d'épaisseur. L'existence de cordons dunaires peut freiner temporairement, par le rôle hydraulique, l'avance du front salée.
- ↳ La prospection géophysique permet de localiser la jonction entre le substratum argileux imperméable et l'interface au niveau de la rupture de pente structurale des argiles.

Une même étude a été réalisée sur le bassin de Sebaou (1992) [2] et de Corso (1996) [3].

I.3 Modélisation de l'impact des activités anthropiques sur les nappes phréatiques côtières cas de chotte Maria (Sahel Tunisien) [1]

En 1997, R.BENI AKHY, H. BENDHIA et A. GAMAOUN, ont réalisé une

modélisation numérique sur l'impact des activités anthropiques sur les nappes phréatiques côtières du Sahel tunisien (figure N°5, page N°9).

Les auteurs ont effectué en avril 1996 une campagne de mesure sur une trentaine de puits parmi 200 inventoriés. Ils se sont intéressés en plus du niveau de la nappe et de sa salinité, au nivellement topographique précis des points d'eau. Ceci leur a servi à la correction des données relatives aux anciens inventaires, la précision des données étant seul atout pour la qualité du modèle mathématique.

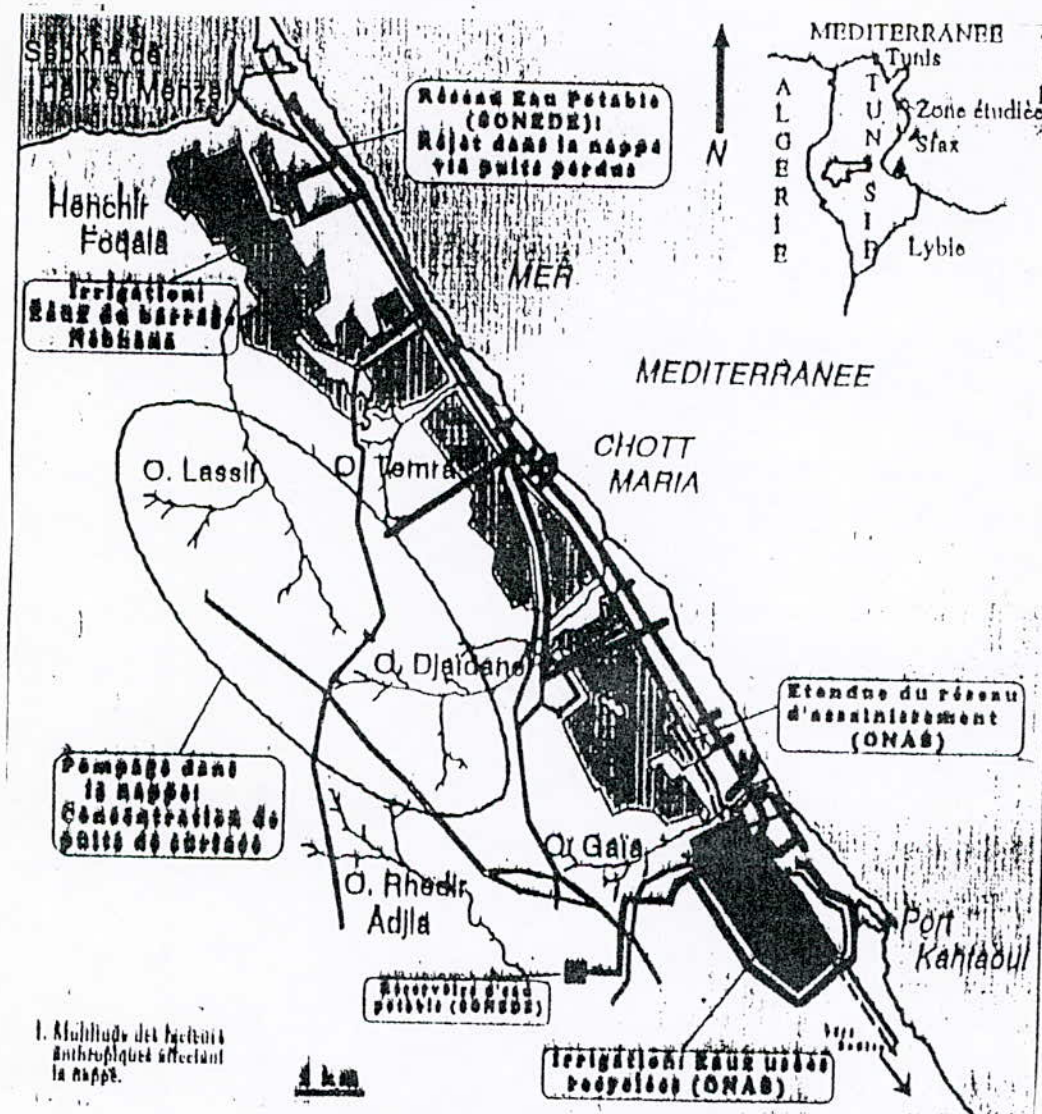


Figure N°5: Plan de situation

1.3.1 Modélisation

Il s'agit d'une simulation numérique monocouche sur le programme MULTIC. Le modèle englobe 179 mailles carrées régulière de 500m de cote (figure N°6, page N° 11).

Le programme intègre l'équation au dérivées partielles décrivant l'écoulement

bidimensionnel par la méthode des différences finies appliquées au réseau de mailles carrées régulières.

L'approximation de la dérivée partielle dans le temps est exécutée au moyen d'un schéma implicite pur. Les systèmes d'équations linéaires sont résolus par la méthode de Gauss Seidel avec surrelaxation par point. Un potentiel imposé nul a été affecté aux mailles qui côtoient le rivage méditerranéen.

I.3.2 Simulation de l'écoulement en régime permanent

L'état de la piézométrie en 1969, matérialisant la situation d'un écoulement pseudo-permanent de la nappe, a été fixé comme référence au modèle.

En demeurons, ils ont attribués à toutes les mailles une transmissivité égale à $2 \cdot 10^{-4}$ m²/s, valeur induite de deux essais de pompage qui ont eu lieu l'un au nord du secteur (à Henchir El Foqania) et l'autre à son extrémité sud.

Le calage du modèle en régime permanent a porté sur la répartition des transmissivités et le contrôle de la validité de ce calage s'est fait sur la totalité des mailles (figure N° 6 .a, page 11).

L'écart de calage maximal entre les charges hydrauliques calculées et celles mesurées atteint 1m et apparaît en amont de la nappe où la piézométrie est de 20m. Les transmissivités retenues après le calage du modèle en régime permanent vont de 2 à $40 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

I.3.3 Simulation de l'écoulement en régime transitoire

La simulation en régime transitoire consiste à reproduire le fonctionnement hydrodynamique de la nappe pendant les 27 dernières années (1969 / 1996). Compte tenu des cartes piézométriques dont ils disposent (1969, 1984, 1991, 1996), ils ont fixé trois phases de simulation en régime transitoire :

Une première phase de 1969 à 1984, une deuxième de 1991 à 1996.

Ils ont adopté une valeur moyenne des débits entrants en tenant compte de :

↳ L'infiltration des eaux de pluies successivement sur les cycles suivants :
1969 / 1984, 1984 / 1991 et 1991 / 1996.

↳ Les quantités moyennes d'eaux usées domestiques parvenants à recharger la

nappe de chott Maria.

- ↳ L'apport à la nappe par l'infiltration des eaux d'irrigation du barrage Nebhana au niveau des périmètres irrigués de chott Maria introduit depuis la deuxième phase qui contribue à l'alimentation de l'aquifère.
- ↳ L'apport à la nappe à partir des eaux usées recyclées issues de station d'épuration de Sousse-Nord et utilisées pour l'arrosage (extrémité sud de la région) qui est de $14900 \text{ m}^3/\text{an}$ en première phase, $31000 \text{ m}^3/\text{an}$ en deuxième phase, et $63200 \text{ m}^3/\text{an}$ en troisième phase.

Le calage en régime d'écoulement transitoire consiste à vérifier le fonctionnement hydraulique du modèle par phase en agissant sur les paramètres hydrauliques, notamment le coefficient d'emmagasinement.

Chaque simulation en régime transitoire restitue des cartes piézométriques calculées pour les années 1984, 1991 et 1996 qui sont confrontées aux cartes réelles. Les coefficients d'emmagasinement retenus après calage s'échelonnent entre 10^{-3} et $4 \cdot 10^{-2}$ (figure N°6.b, page N° 11).

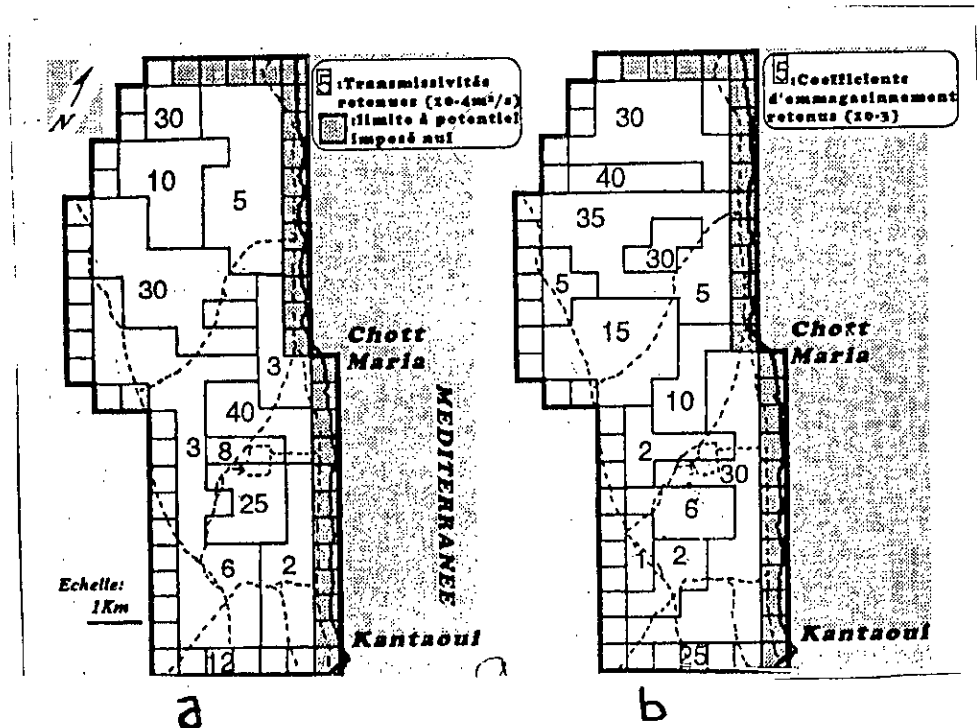


Figure N°6: Maillage et conditions aux limites du modèle et paramètres hydrauliques retenus après calage.

1.3.4 Simulation prévisionnelle

Le calcul du bilan hydrique ainsi que l'étude hydrodynamique de la nappe ont confirmés, outre l'influencé des différents apports de nature anthropique, la relation intime pluie – comportement quantitatif et qualitatif de la nappe.

Ils présentent la simulation du scénario le plus vraisemblable visant l'an 2001 et l'an 2006 lorsqu'ils tiennent compte des facteurs démographiques, socio-économiques et naturels dont dépend l'équilibre hydrodynamique de la nappe.

Dans l'horizon 2001, ils simulent la succession de cinq années sèches avec une moyenne annuelle de 180 mm/an.

Par ailleurs, cette simulation suppose que l'apport à la nappe par les rejets d'eaux usées domestiques suivait une croissance linéaire annuelle de l'ordre de 9%.

L'évolution annuelle de la consommation d'eau potable de chott Maria pendant la période 1969 – 1994).

Les eaux usées continueraient à atteindre la nappe puisque aucun projet d'assainissement de la région n'est envisagé avant l'an 2001 (hypothèse simulée).

L'état d'exploitation simulé dans l'horizon est renforcé par la création dans la région de l'oued Lassif de 45 nouveaux puits par an pompés à raison de 4000m³/an/puit. A l'horizon 2006, ils simulent :

- ↳ Une pluviométrie annuelle égale à la moyenne des 21 dernières années (1975 – 1995).
- ↳ La création d'une station d'épuration à l'extrémité nord de la région (avenir comportement du village de chott Maria et la ville de Hergla).
- ↳ L'élimination des rejets d'eaux usées domestiques dans la nappe suite à l'assainissement total de la commune.

Les cartes piézométriques calculées dans ces conditions de simulation (d'ailleurs les plus vraisemblables) prévoient à l'an 2001 (figure N°7.a, page N° 11), le retrait du front de hauteur piézométrique 2m plus à l'Est créant une zone de faiblesse hydrodynamique de la nappe envers la pression de l'eau marine immédiatement au nord de la ville.

Cette aire évoluerait finalement, d'ici l'an 2006 (figure N°7.b, page N° 11) vers une

dépression d'altitude plus basse que le niveau marin. Cela signifie l'intrusion nette des eaux marines salées sur un front de 3Km à l'Est du rivage.

Cette zone à risque apparaît directement en aval du périmètre d'oued lassif ou l'on pratique encore le pompage dans la nappe et où un équilibre relatif se maintient actuellement grâce aux apports de nature anthropique. Ainsi, l'apport compensateur des rejets domestiques dans les puits perdus devant disparaître d'ici l'an 2001, la nappe perdrait son équilibre hydrodynamique fragile si le rythme actuel de création de puits se maintenait.

Le modèle montre encore que la nappe peut être menacée par une baisse considérable s'ils atteignent un seuil d'exploitation de $60 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$ à travers 75 puits et même par l'intrusion franche et immédiate d'eau marine à partir d'un taux d'exploitation de $180.10^3 \text{ m}^3/\text{an}$ (création de 45 nouveaux puits par an).

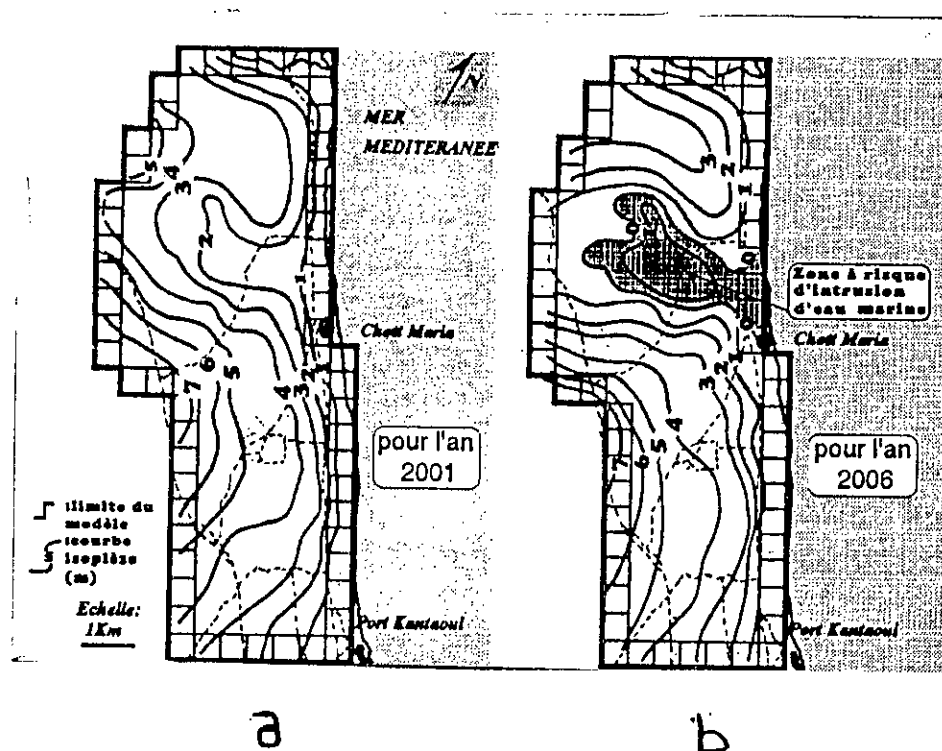


Figure N°7: Cartes piézométriques déterminées pour 2001 et 2006 dans les conditions de simulation et risque prévue de dégradation de la qualité des eaux.

Conclusion

La simulation numérique relève des zones vulnérables qui prennent place directement en aval des aires de pompage (le secteur amont central de la nappe).

En se basant sur leur simulation prévisionnelle, les auteurs recommandent, dans un contexte qui prévoit une pénurie (pluviométrie annuelle de 180mm) durant les cinq prochaines années est une évolution annuelle linéaire des rejets domestiques dans la nappe de 9%, une exploitation à additionner au taux actuel qui ne dépasse pas les $60.10^3 \text{ m}^3/\text{an}$ ($7000 \text{ m}^3/\text{an}$) puis à partir de 23 puits.

Au delà de ce taux l'exploitation, le risque d'une inversion du sens d'écoulement mer – continent à partir de l'an 2002 est très sérieux.

La menace d'une intrusion locale d'eau marine est possible mais un scénario de condamnation de la nappe en la transformant en "dépotoir" de déchets liquides suite à une pollution irréversible.

CHAPITRE II

ETUDE DU CONTACT EAU SALEE – EAU DOUCE

La proximité d'une nappe d'eau douce, de la mer donne naissance à un contact entre l'eau douce de la nappe et l'eau de la mer ; c'est le contact eau salée – eau douce qui demeure un problème majeur.

Le phénomène d'invasions des eaux continentales, par les eaux salées marines, est fréquent dans les zones côtières.

Les eaux salées peuvent pénétrer sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres et surtout en période de déficit en eau, et sous l'effet d'une exploitation intensive des eaux.

II.1 Cadre théorique du phénomène de l'invasions marine

Le contact eau douce – eau salée se présente sous forme d'une zone de transition plus ou moins étalée.

La détermination de la position et l'évolution de l'interface séparant les deux eaux, est une opération importante en vue d'exploiter cette nappe et d'éliminer l'avarie de l'eau salée sur l'eau douce.

Pour cela de nombreuses recherches ont été faites sur la position et l'allure de l'interface au niveau de la zone de transition, dans l'exploitation des eaux dans les zones littorales ou côtières est importante.

II.2 Approche monodimensionnelle de Badon, Ghyben et Herzberg

L'eau salée plus minéralisée, aura tendance à avancer par la diffusion en désignant une ligne courbée dont la concavité est dirigée vers le continent. Cette action se produit lorsqu'on a deux milieux de concentrations différentes.

L'effet des différences de densité de deux fluides (eau salée – eau douce) a fait l'objet de premiers travaux entrepris par Badon, Ghyben et Herzberg (1899 – 1901), pour la rationalisation du problème de l'invasions marine. Leurs études permettent d'établir des

fonctions en monodimensionnel entre les hauteurs, et les densités des eaux.

Le principe est que la profondeur de l'interface eau douce – eau salée sous le niveau de la mer soit égale à la charge de l'eau multipliée par l'inverse de la différence de densité des deux fluides.

On considère les deux fluides non miscibles, de masse spécifique ρ_1 et ρ_2 ; la profondeur Z_i de l'interface sous le niveau de la mer peut être déterminer à partir de la loi hydrostatique (figure N° 8 et 9). Il en ressort que si on prend pour plan de référence Z_{s_0} , on pourra écrire:

$$Z_s \rho_s g = g \rho_d Z_s + g \rho_d Z_w$$

$$\text{d'où : } Z_s = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} Z_w (1)$$

Où, g : l'accélération de la pesanteur, ρ_s : la densité de l'eau de mer, ρ_d : la densité de l'eau douce et Z_w : la hauteur de la surface de la nappe libre ou piézométrique de la nappe.

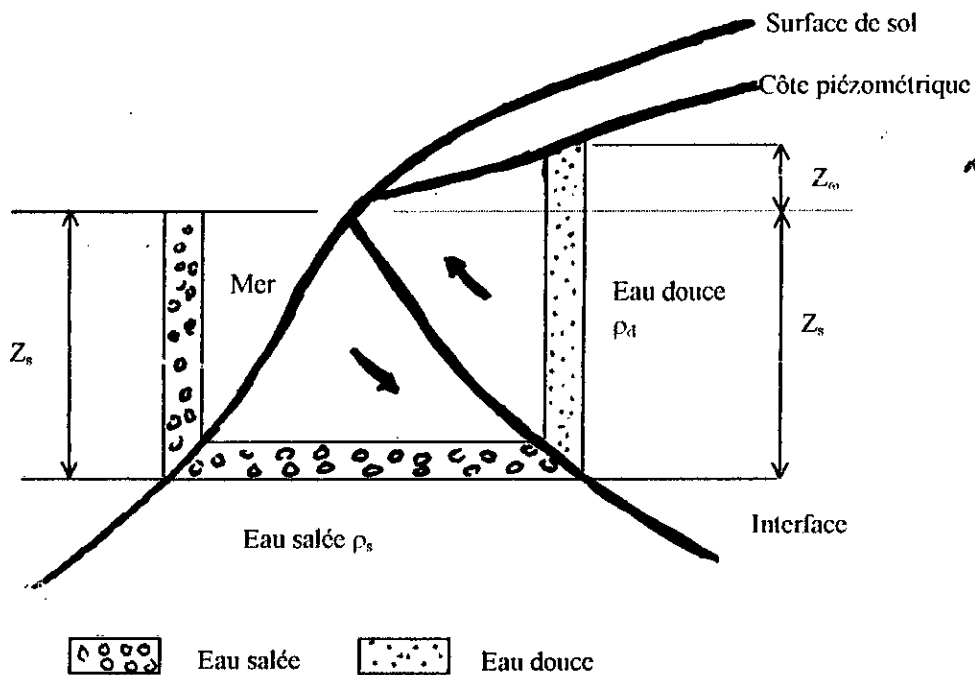
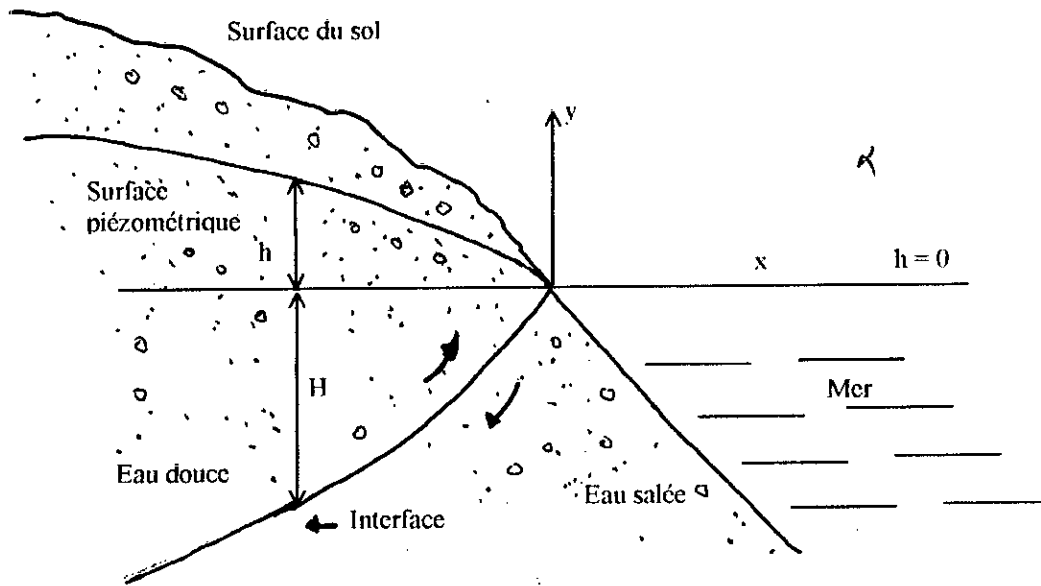


Figure N° 8 : Schéma de position de l'interface - Approche de GHYBEN-HERZBERG



h : hauteur de l'eau douce au dessus du niveau de la mer

H : hauteur de l'eau salée au dessous du niveau de la mer

Figure N° 9 Schéma de position de l'interface - Approche monodimensionnelle de BADON GHYBEN et HERZBERG

Les limites de cette théorie sont évidentes, si les deux fluides étaient vraiment en équilibre statique, la surface de la nappe aurait une pente nulle et l'interface deviendrait horizontale avec l'eau douce reposant sur l'eau salée par simple différence de densité.

Si le niveau moyen de la mer est pris comme plan de référence pour Z_s , l'équation (1) devient:

$$Z_s = -\frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} \times Z_w \quad (2) \quad \checkmark$$

avec, Z_s mesurée positivement au dessus du plan de référence.

L'application de la formule (1), nécessite la connaissance du niveau piézométrique Z_w et des masses spécifiques ρ_1 et ρ_2 , il suffit donc pour l'appliquer:

- Un piézomètre pour mesurer Z_w ;
- Une mesure de salinité ou de densité dans l'eau de mer, car cette loi admet

que le niveau inférieur contient de l'eau de mer.

Conclusion

La loi de Ghyben, Herzberg, bien que fondée sur un équilibre statique, est appliquée pour localiser l'interface dans le cas d'une nappe douce circulant sur une nappe d'eau salée immobile à condition que la pente de la nappe d'eau douce soit faible.

II.3 Approche hydrodynamique de HUBBERT (1969)

Hubert, considérant l'interface d'eau douce – eau salée du point de vue dynamique plutôt que du point de vue hydrostatique, a montré la différence qui existe entre la véritable profondeur de l'eau salée et la profondeur calculée par la formule de Ghyben – Herzberg. En ce qui concerne les conditions d'écoulement près du rivage (figure n°10), la pente de l'interface peut être calculée à partir de l'équation établie dans le cas du contact huile – eau des gisements de pétrole.

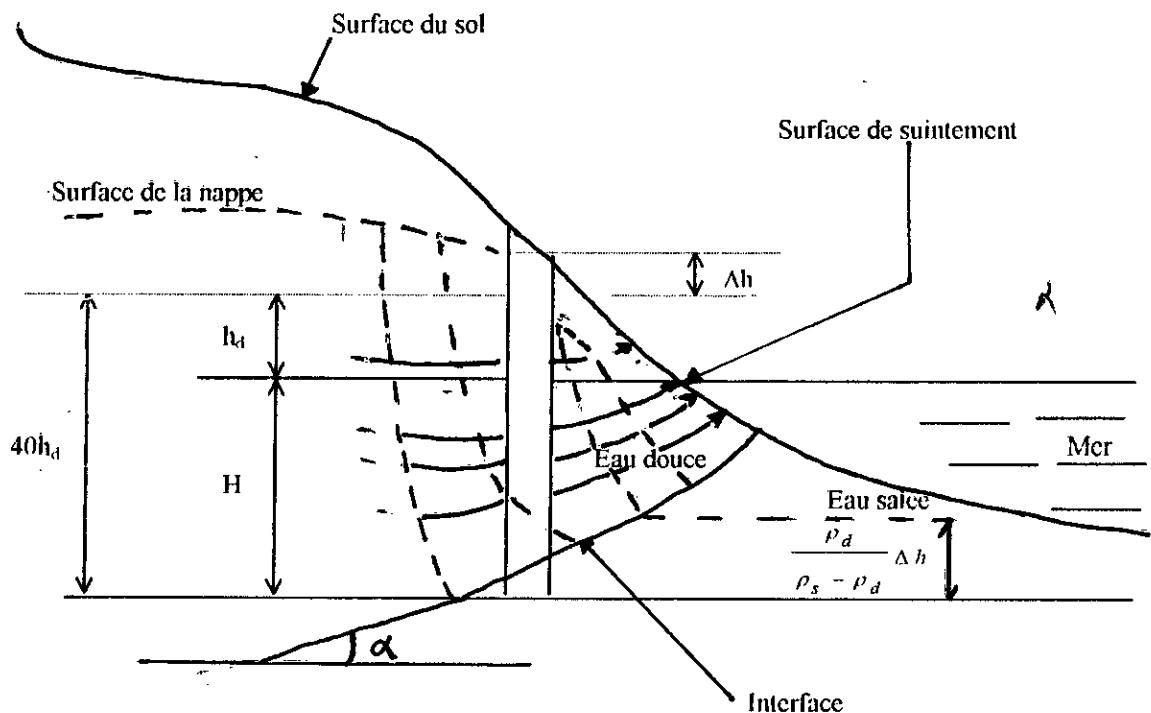


Figure N°10 : Différence entre la profondeur réelle de l'eau salée et la profondeur calculée par la relation de GHYBEN et HERZBERG

Si nous admettons que l'eau de mer est immobile et que l'eau douce s'écoule par dessus: $V_{ss} = 0$ et $V_{ds} = 0$, on peut alors écrire:

$$\sin \alpha = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_d} \frac{dH}{dx} = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} \frac{V}{K} \quad (3) \quad \leftarrow$$

Avec, S: l'interface dans un plan vertical, α : l'angle du tracé avec l'horizontale, K: la constante pour un milieu donné, homogène et isotrope, V_{ss} : vitesse de l'eau de mer et V_{ds} : vitesse de l'eau douce.

Il s'ensuit que $\sin \alpha$ est plus grand que zéro, car $\rho_d < \rho_s$ et α augmentera avec V_{ds} , cela explique que α ait une valeur de 90° :

$$K = \frac{V}{I} \Rightarrow I = \frac{V}{K} \quad \leftarrow$$

où :

I: gradient hydraulique

$$\sin \alpha = - \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} \times I \quad (4) \quad \leftarrow$$

Hubert, montre qu'une relation exactement comparable à l'équation (1), fait intervenir les points d'intersection de chaque ligne équipotentielle de l'eau douce en mouvement d'une part avec la surface de la nappe, d'autre part avec l'interface eau douce – eau salée. Ces points d'intersection sont représentés sur la figure N°10; ces derniers ne s'alignent pas sur une verticale, et en raison de la courbure de la ligne équipotentielle; la distance verticale entre la surface de la nappe et l'interface eau douce – eau salée sera plus grande que celle donnée par l'équation (1), où:

$$Z_s = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} \times Z_w \quad \leftarrow$$

II.4 Mesure de la profondeur de l'interface par le double piézométrique

PERLYMUTTER ET LUSEZYNKI ont essayé de déterminer le contact entre l'eau douce et l'eau salée, en utilisant la formule de **HUBBERT**. En vérité s'il était possible d'installer deux piézomètres liés l'un à l'autre de telle façon que les extrémités à leurs profondeurs soient au niveau de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée non miscibles, et que l'un d'eux ne soit rempli que d'eau douce jusqu'à une hauteur h_d , l'autre d'eau salée jusqu'à une hauteur h_s .

Les mesures sont faites à partir du niveau de la mer.

Alors par différence de hauteur, il détermine l'interface pour le piézomètre 1 rempli d'eau salée (figure N °11):

$$h_s = Z + \frac{P}{\rho_s g} \quad (5)$$

Et pour le piézomètre 2 rempli d'eau douce:

$$h_d = Z + \frac{P}{\rho_d g} \quad (6)$$

$$\rho_d h_d = \rho_s h_s - Z(\rho_s - \rho_d)$$

D'où:

$$Z = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_d} \times h_s - \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} \times h_d \quad (7)$$

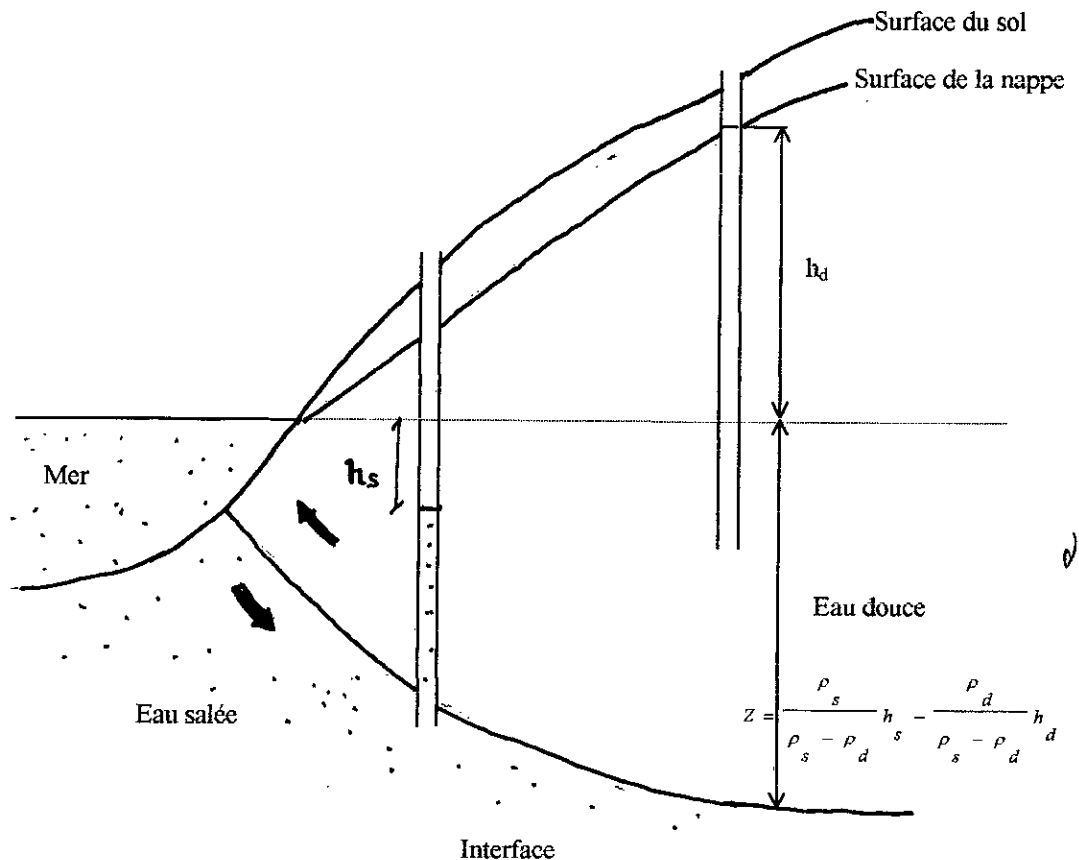


Figure N°11 : Mesure de la profondeur de l'interface par le double piézométrique

II.5 Approche de BOSSY : Théorie de l'équilibre de deux fluides différents eau douce - eau salée en milieu poreux

La théorie de BOSSY est fondée sur l'équilibre de deux fluides en milieu poreux; soit un terrain perméable, homogène, isotrope, reposant sur une couche imperméable située à une profondeur du niveau de la mer (figure N°12).

D'après la théorie des potentiels en mouvement permanent, et en négligeant l'énergie cinétique, en tout points du milieu contenant le fluide (eau douce); le potentiel est donné par:

$$\phi_1 = \gamma_1 Z + P \quad (8) \quad \wedge$$

avec, ϕ_1 le potentiel en un point du milieu contenant de l'eau douce, γ_1 le poids spécifique de l'eau douce, Z la cote d'un point du milieu par rapport au plan de référence horizontal et P la pression en un point du milieu.

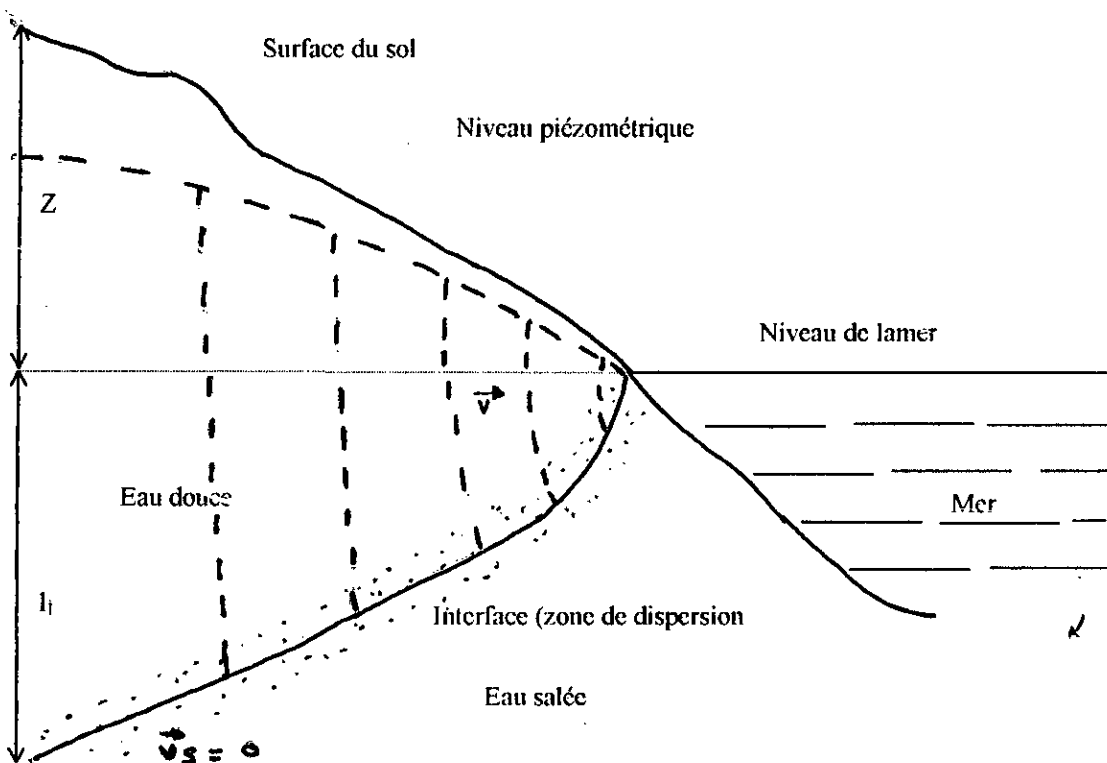


Figure N°12 : Approche de BOSSY - Existence d'une zone de dispersion entre l'eau douce et l'eau salée

De même dans la partie du milieu qui contient l'eau salée, il existe en tout point un potentiel ϕ_2 :

$$\phi_2 = \gamma_2 Z + P \quad (9) \quad \lambda$$

avec, ϕ_2 : potentiel en point du milieu contenant de l'eau salée, γ_2 : poids spécifique de l'eau salée (par hypothèse $\gamma_1 < \gamma_2$);

Si l'on considère un point situé sur l'interface, les pression "P" sont égales dans les deux milieux et on peut écrire:

$$Z = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\gamma_2 - \gamma_1} \quad (10) \quad \lambda$$

En appliquant la loi de **DARCY** qui s'exprime sous la formule suivante:

➤ Pour l'eau douce:

$$\frac{1}{\gamma_1} \times \frac{\partial \phi_1}{\partial L} = - \frac{V_1}{K_1} \quad (11) \quad \lambda$$

avec, V_1 : vitesse apparente de l'eau douce, K_1 : perméabilité du milieu de l'eau douce et L: abscisse curviligne mesurée sur l'interface.

➤ Pour l'eau salée:

$$\frac{1}{\gamma_2} \times \frac{\partial \phi_2}{\partial L} = - \frac{V_2}{K_2} \quad (12) \quad \lambda$$

avec, V_2 : vitesse apparente de l'eau salée et K_2 : perméabilité du milieu de l'eau salée.

Après différentiation de l'équation (10) et en remplaçant $\frac{\partial \phi_1}{\partial L}$ et $\frac{\partial \phi_2}{\partial L}$ par leurs valeurs, on obtient la nouvelle équation:

$$\frac{\partial Z}{\partial L} = \frac{1}{\gamma_2 - \gamma_1} \left(\frac{\gamma_1 \times V_1}{K_1} - \frac{\gamma_2 \times V_2}{K_2} \right) \quad (13) \quad \lambda$$

Ou encore, en remplaçant les poids spécifiques γ par les densités "d"

$$\frac{\partial Z}{\partial L} = \frac{1}{d_2 - d_1} \left(\frac{d_1 \times V_1}{K_1} - \frac{d_2 \times V_2}{K_2} \right) \quad (14) \quad \lambda$$

- Si la pente de l'interface est faible, il est possible d'adopter les simplifications de **DUPUIT** (équipotentielle verticale et écoulement horizontal) et d'assimiler la tangente au sinus, c'est à dire d'écrire:

$$\frac{\partial Z}{\partial L} = \frac{\partial Z}{\partial X}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial X} = \frac{1}{d_2 - d_1} \left(\frac{d_1 \times V_1}{K_1} - \frac{d_2 \times V_2}{K_2} \right) \quad (15)$$

En ce qui concerne l'hydrogéologie et en excluant les quelques cas particuliers des nappes salées ayant un exutoire, lorsqu'il y a superposition de deux nappes de densités différentes, il s'agit dans la majorité des cas d'une nappe d'eau douce s'écoulant au dessus d'une nappe d'eau salée pratiquement immobile ($V_2 = 0$).

L'équation (15) de l'interface se réduit à:

$$\frac{dZ}{dX} = \frac{d_1}{d_2 - d_1} \times \frac{V_1}{K_1} \quad (16)$$

Comme $\frac{V_1}{K_1} = -\frac{dH}{dX}$ (loi de **DARCY** dans le milieu d'eau douce), il vient:

$$dZ = -\frac{d_1}{d_2 - d_1} \times dh \quad (17)$$

et en intégrant:

$$Z = -\frac{d_1}{d_2 - d_1} \times h + \text{constante} \quad (18)$$

S'il s'agit du "coin salée" pénétrant sous une nappe littorale et si Z et h sont mesurés à partir du niveau de la mer, on a $Z = 0$ pour $h = 0$ et l'équation (18) s'écrit finalement:

$$Z = -\frac{d_1}{d_2 - d_1} \times h \quad (19)$$

Conclusion

L'équation (13) définissant la forme de l'interface de deux fluides non miscibles, après établissement de la permanence du régime de circulation, peut être considérée comme parfaitement rigoureuse; l'énergie cinétique étant tout a fait négligeable en milieu poreux. Pour passer de l'équation (13) à l'équation de **GHYBEN – HERZBERG** (équation 19), on est obligé d'admettre en hydrogéologie que:

- L'eau salée ne circule pas.
- Les équipotentielles dans l'eau douce sont verticales (hypothèse de **DUPUIT**).

Lorsque le régime est permanent (mer sans marée et débit constant de la nappe d'eau douce), la première condition est vérifiée et quant à la seconde, elle n'est admissible que lorsque la pente de la nappe d'eau douce est faible, ce qui est le cas général sauf à proximité immédiate de la mer.

II.6 La notion de dispersion dans le phénomène d'intrusion de l'eau salée

A l'origine, on a considéré la non miscibilité de l'eau douce et de l'eau salée, et l'état statique de l'eau salée.

COOPER (1959) a avancé l'hypothèse que si l'on admet que les deux fluides impliqués sont miscibles, l'eau salée n'est pas statique, mais recule et avance entre le fond de la mer et une zone de dispersion constituée d'un mélange d'eau salée et d'eau douce (figure N°13).

Les principes du phénomène de dispersion peuvent être responsables de fluctuation significative de la surface de la nappe.

La notion de dispersion hydrodynamique dans un milieu poreux fait intervenir le processus mécanique ou de convection par lequel un fluide en déplace un autre en se mélangeant à lui au niveau d'une zone de transition appelée zone de dispersion.

La dispersion résulte d'une variation de concentration du fluide se déplaçant dans la zone de dispersion principalement, parce que les particules des fluides prises isolément circulent à des vitesses variables dans les canaux poreux irréguliers du milieu.

Le hasard de la distribution et de l'orientation de ces canaux impose aux lignes de courants microscopiques un trajet tortueux, sans que ces lignes se recoupent les unes des

autres.

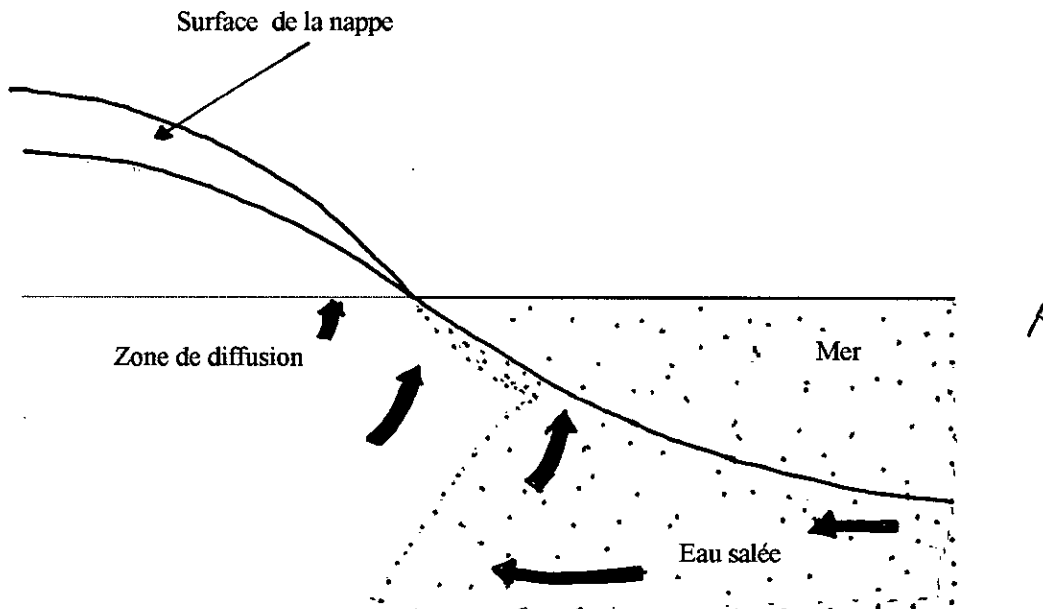


Figure N° 13 : Circulation de l'eau salée dans la mer vers la zone de dispersion et retour vers la mer.

II.7 Les courant de densité

II.7.1 Définition

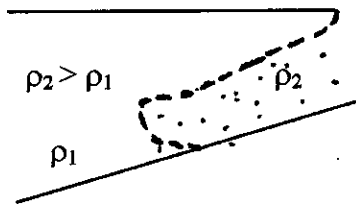
Les courants de densité appelés parfois "courant de gravité" sont des phénomènes qui se créent naturellement ou artificiellement. Ils correspondent aux intrusions des fluides dans d'autres sous des conditions bien précises.

Ces écoulements stratifiés; mouvement de deux ou plusieurs masses de fluides miscibles ou non, ont des densité différentes dues à la variation de la température ou à la présence des matières solides en suspension ou encore des matières dissoutes [6].

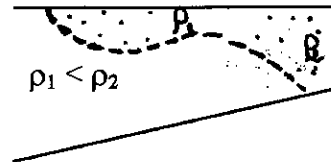
Ces écoulements privilégiés peuvent se faire (figure N°14):

- Au-dessous "under flow".
- Au-dessus "over flow".

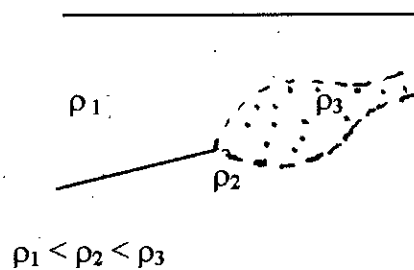
➤ A travers "enter flow".



1. Au dessous (underflow)



2. Au dessus (overflow)



3-A travers "enter flow".

Figure N° 14 : Types d'intrusion

II.7.2 Anatomie d'un courant de densité

a □ Point de plongée

On appelle point de plongée, le point où le fluide dense disparaît au-dessous du fluide surnageant (figure N°15).

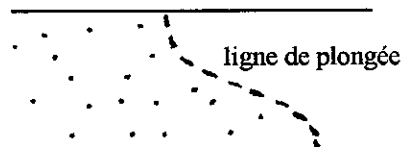
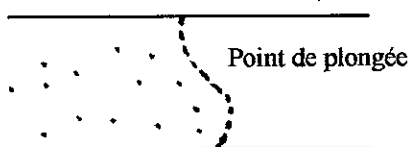


Figure N° 15 : La plongée

b □ La tête et le corps du courant de densité

Un courant de densité peut être décomposé en deux parties distinctes. (figure N°16).

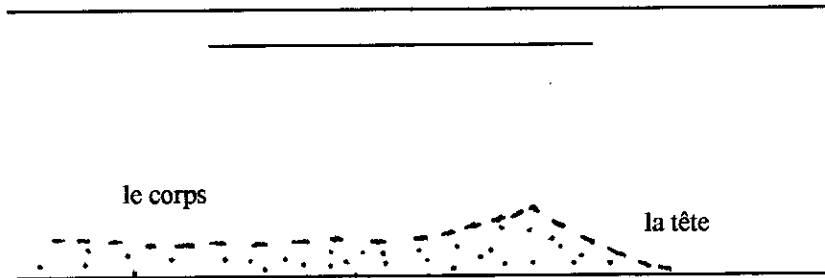


Figure N° 16 : Le corps et la tête du courant de densité

b.1) La tête

C'est la zone où le mélange entre les deux fluides de différentes densité est le plus considérable; elle est caractérisée par:

➤ **Son front (ou nez)**

Son élévation par rapport au fond a sollicité de nombreuses études expérimentales, elle dépend du nombre de Reynolds et de la hauteur du fluide.

➤ **Sa longueur et sa hauteur**

Ces deux paramètres sont indépendants. Quelques expériences ont montré l'influence du nombre de Reynolds, de la pente du front et des contraintes sur la longueur et la hauteur du courant de densité.

b-1.1 La forme

Il n'est pas possible d'attribuer une forme unique au contour de la tête, car elle dépend:

- Du sens de mouvement du fluide surnageant;
- De la turbulence du milieu ambiant;
- Des forces de viscosité.

b-1.2. Types d'instabilité

Il existe deux type d'instabilité au niveau de la tête pouvant apparaître et conduire à des mélange:

➤ **Les rouleaux**

Lorsque les forces de viscosités sont assez grandes, des petites vagues se forment et s'enroulent au niveau de la tête.

➤ **Les lobes et les crevasses**

Il y a formation d'une série de lobes et de petites crevasses. Ces derniers sont multipliés par la subdivision des grands lobes.

b-2. *Le corps*

Cette autre grande partie du courant est caractérisée par une hauteur inférieure à celle de la tête et une vitesse supérieure

c) L'interface

Elle correspond à la transition entre deux couches de fluides de densité différentes, cette surface est le siège de gradients maximaux de densité et de vitesse. Ces caractéristiques sont influencées par:

- La miscibilité des différents fluides.
- La différence de densité entre les fluides.
- Les échanges et les transferts interfaciaux.
- Le régime d'écoulement.

Elle présente différentes formes (figure N °17).

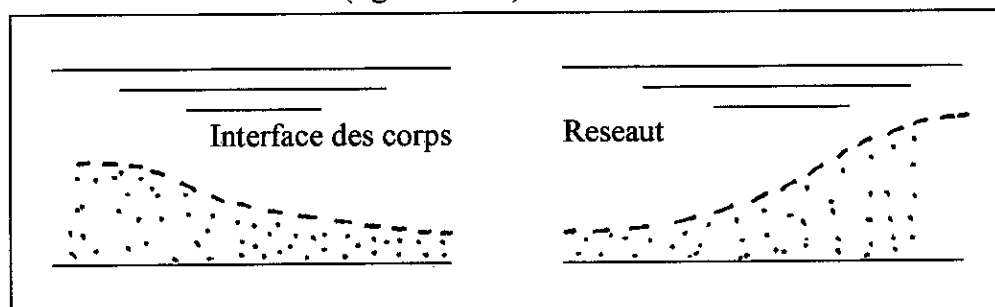


Figure n°17 : forme de l'interface.

II.7.3 Facteur de pression

Pour caractériser l'état de "suspension" d'un mélange d'eau et de particules solides, on fait appel à la notion élémentaire de pression effective exercée par un fluide à une profondeur déterminée, pression que l'on définit par: $P = \rho g h$, où "P" est la pression à une profondeur "h" d'un liquide de densité ρ (figure N°18).

Si l'on considère deux fluides de densités ρ_m et ρ ($\rho_m > \rho$), il existera à la même profondeur H une différence de pression qui dépendra uniquement du rapport des poids spécifiques tel que: $P / P_m = \rho / \rho_m$, ce qui provoque l'écoulement d'un fluide par rapport à l'autre.

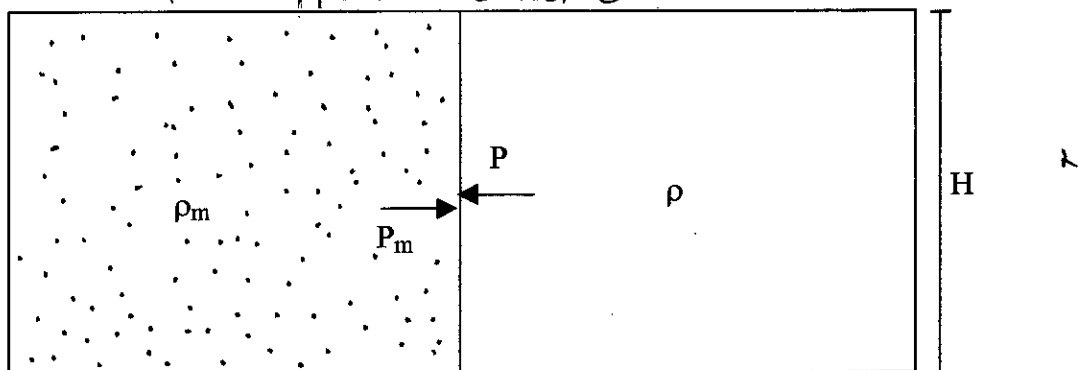


Figure n°18: représentation schématique des forces hydrostatiques.

II.7.4 Equation fondamentale du courant de densité

Soit un courant de fond en régime permanent de masse spécifique $\rho + \Delta\rho = \rho_m$ s'écoulant sous un liquide de masse spécifique " ρ ".

Considérons l'équilibre d'un parallélépipède de fluide A, B, C, D de largeur "b" au sein de cet écoulement (figure N°19). Il est soumis à des forces:

- De pression.
- De pesanteur.
- De frottement.

On suppose que l'écoulement est dans un canal de faible pente θ .

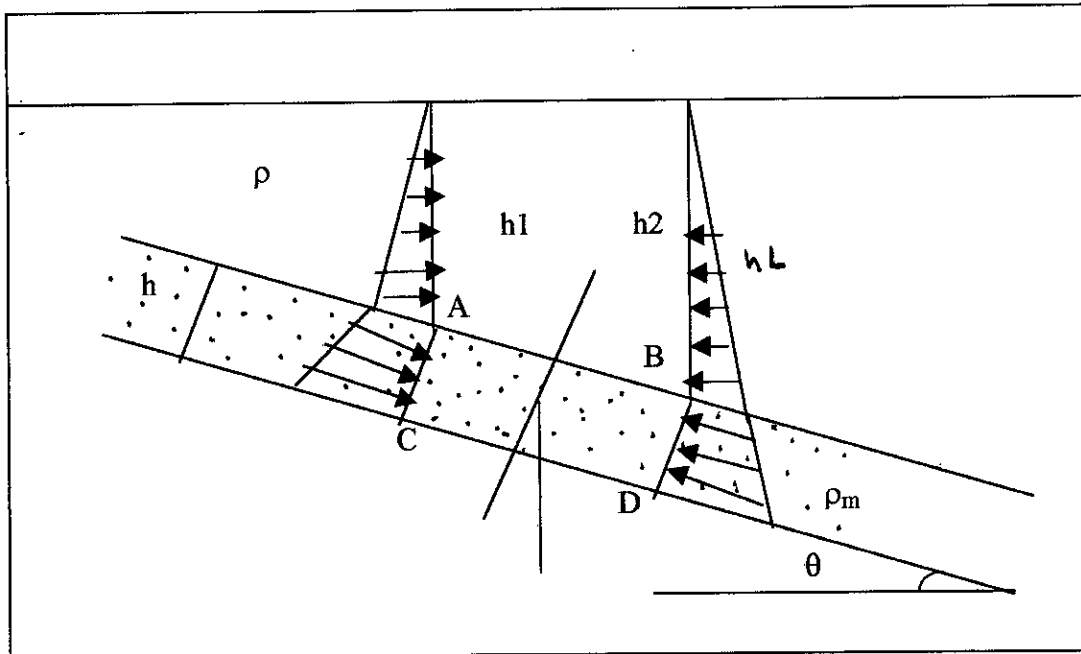


Figure n°19 : schéma des forces exerçant sur un parallélépipède d'une suspension.

↳ Force de pression sur le coté AC (par unité de surface);

$$P_1 = \rho g h_1 + (\rho + \Delta\rho) g h$$

↳ Force de pression sur le coté BD (par unité de surface).

$$P_2 = \rho g h_2 + (\rho + \Delta\rho) g h, \text{ avec: } h_2 = L \sin\theta + h_1.$$

D'où: $P_2 = \rho g (h + L \sin\theta) + (\rho + \Delta\rho) g h$.

La différence de pression sur ces deux faces:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g h_1 + \rho g L \sin\theta + (\rho + \Delta\rho) g h - \rho g h_1 - (\rho + \Delta\rho) g h.$$

$$\Delta P = \rho g L \sin\theta \text{ donc: } \Delta F = -\rho g L b h \sin\theta \text{ (variation de force hydrostatique).}$$

↳ Force de pesanteur

$$P_x = (\rho + \Delta\rho) g L h b.$$

↳ Force de frottement

Sur la face AB (à l'interface):

$$F_{\hat{f}} = \tau_i L b = -\frac{(\lambda_i/4)(\rho + \Delta\rho) V^2 L b}{2}$$

Sur la face CD (sur le fond):

$$F_{f0} = \tau_0 L b = - \frac{(\lambda_0/4)(\rho + \Delta \rho) V^2 L (b + 2h)}{2}$$

avec,

λ_i : coefficient de frottement à l'interface.

λ_0 : coefficient de frottement aux parois.

L'équilibre du parallélépipède:

$$L b h (\rho + \Delta \rho) \theta g - \rho g L b h \theta - (\lambda_i/4)(\rho + \Delta \rho)(V^2/2) L b - (\lambda_0/4)(\rho + \Delta \rho)(V^2/2)(b + 2h) L = 0$$

$$\Delta \rho g b h \theta - (\lambda_i/4)(\rho + \Delta \rho)(V^2/2) b - (\lambda_0/4)(\rho + \Delta \rho)(V^2/2)(b + 2h) = 0$$

Sachant que : $\Delta \rho h b g \theta = \frac{\lambda_0}{4} (\rho + \Delta \rho) \frac{V^2}{2} \left[\frac{\lambda_i}{\lambda_0} b + b + 2h \right]$

d'où:
$$V^2 = \frac{8 h b \theta g \Delta \rho}{(\lambda_0 (\rho + \Delta \rho)) \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} b + b + 2h \right)}$$

avec, $g' = g \frac{\Delta \rho}{\Delta \rho + \rho}$ et $R_H' = \frac{h b}{\left(\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right) b + b + 2h \right)}$

Notons que: $b(\lambda_i / \lambda_0)$: longueur à l'interface, d'où:

$$V^2 = \frac{8 g' R_H' \theta}{\lambda_0}$$

$$V = \left[\frac{8 g' R_H' \theta}{\lambda_0} \right]^{1/2}$$

Les courants de densité ont donc des vitesses relativement lentes, les forces auxquelles ils sont soumis sont faibles.

Ces courants de densité sont analogues aux écoulements à surface libre mais se produisant dans un monde spécial où la pesanteur est faible.

CHAPITRE III**MODELE EXPERIMENTAL****Introduction**

La classe des problèmes concernant les écoulements à travers un milieu perméable; a une large gamme, les écoulements sont d'une importance considérable.

L'étude des phénomènes de l'intrusion de l'eau salée dans les bassins de l'eau douce, nécessite une bonne étude hydrogéologique.

Les structures tectoniques des couches géologiques et donc le mouvement de l'eau dans la nature est généralement tridimensionnel, un tel mouvement n'est pas facile à traiter mathématiquement.

Pour cela, ce type de problème est traité plutôt expérimentalement. Du fait que dans le laboratoire, on a l'avantage d'utiliser des matériaux homogènes avec des propriétés connues.

Ceci simplifie considérablement le problème.

III.1 Installation

Les expériences ont été effectuées au laboratoire d'hydraulique de l'Ecole Nationale Polytechnique sur un modèle de DRAINAGE AND SEEPAGE TANK.

L'installation est composée de:

III.1.1 Réservoir d'infiltration

C'est un canal rectangulaire de faible largeur et de grande hauteur. Il est composé d'une paroi métallique et d'une paroi en Plexiglas transparente permettant une meilleure visualisation du phénomène.

Les caractéristiques du réservoir d'infiltration sont:

Sa longueur est : 151cm, sa hauteur est : 55 cm et sa largeur est : 10.5cm.

Le réservoir d'infiltration est supporté par un support à deux pieds ajustables pour le maintenir à niveau.

III.1.2 Membrane perméable

Au milieu du réservoir d'infiltration est placée une membrane perméable séparant le réservoir d'infiltration en deux parties.

- La première partie du réservoir est remplie de sable saturé par l'eau douce.
- La deuxième partie du réservoir est remplie d'eau salée colorée.

Cette membrane est supportée par deux plaques d'aluminium.

Cette membrane empêche le passage du sable d'une partie à l'autre.

III.1.3 Paroi de séparation

Ces deux parties sont séparées par une paroi jouant le rôle de vanne.

III.1.4 Réservoir de colorant

Un réservoir de colorant est placé en haut du réservoir d'infiltration permettant ainsi la coloration de l'eau salée.

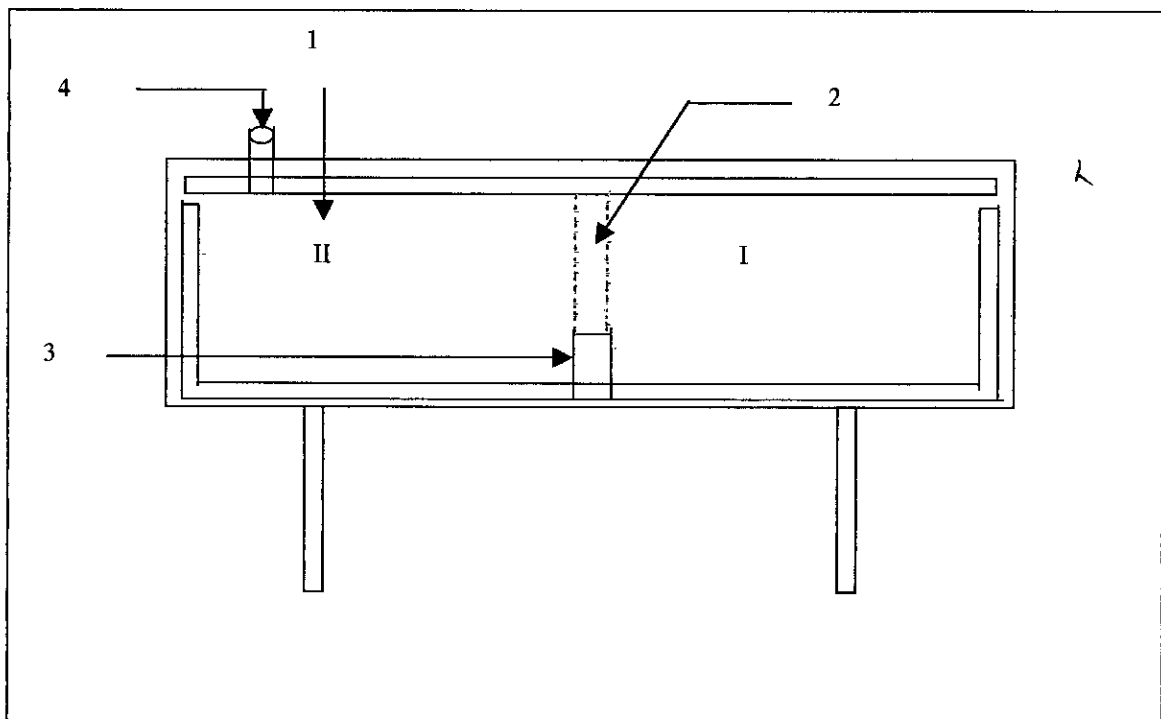


Figure 20 : Dispositif expérimental

III.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés au cours de nos expériences sont:

III.2.1 Le sable

Pour déterminer les dimensions du sable utilisé, une analyse granulométrie a été réalisée.

III.2.2 L'eau salée

L'eau salée utilisée est de masse volumique variable. Cette dernière est fonction de la concentration en sel.

III.3 Moyens de mesure

III.3.1 Mesure de la pression

Des tubes piézométriques sont placés à l'interface (l'eau salée – l'eau douce) qui permettent de mesurer la pression.

Les tubes piézométriques sont répartis uniformément sur l'interface. La distance séparant deux tubes est de 10cm;

III.3.2 Mesure de la vitesse

Afin de déterminer la vitesse d'infiltration, nous relevons le temps mis par l'eau salée pour traverser 10cm de sable saturé par l'eau douce.

Le temps est mesuré à l'aide d'un chronomètre digital.

III.4 Mode opératoire

Le mode opératoire est le suivant:

- 1 On effectue une analyse granulométrique du sable;
- 2 On verse le sable sec dans la première partie du réservoir d'infiltration;
- 3 On mouille le sable sec jusqu'à saturation;
- 4 On détermine le volume de sable saturé. Ce volume permet la détermination du volume de l'eau salée;
- 5 On mesure la concentration en sel de l'eau salée;
- 6 On verse cette eau salée dans la deuxième partie du réservoir d'infiltration;
- 7 On retire petit à petit la paroi de séparation.
- 8 On attend que l'eau salée commence à s'infiltrer dans le sable saturé d'eau douce;

9□ On prend le temps qu'il faut pour que l'eau salée traverse une épaisseur de 10cm de sable (origine de mesure l'emplacement de la paroi de séparation).

Le temps est relevé tout les 10cm de sable traversé jusqu'à ce que l'eau traverse une distance de 70cm;

10□ On place les tubes piézométriques à l'interface et on relève la pression.

III.5 Analyse granulométrique

Une analyse granulométrique est effectuée sur le sable utilisé.

III.5.1 Définition d'une analyse granulométrique

L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol par classement selon la taille. Elle est réalisée par tamisage mécanique, lorsque les particules ont une dimension supérieure a 100μ [10].

III.5.2 Analyse granulométrique par tamisage

L'opération de laboratoire qui permet de dresser la courbe granulométrique s'appelle l'analyse mécanique ou granulométrique. Lorsque les particules ont une dimension supérieure à 100μ , cette opération est un simple tamisage [10].

On utilise habituellement pour se faire des passoires dont les trous ont un diamètre variant de 100μ à 12.5mm, puis des tamis dont l'ouverture intérieure des mailles varie de 5mm à 100μ .

Par définition le diamètre d'une particule est égal à l'ouverture intérieure des mailles du plus petit tamis la laissant passer.

Quand on se sert de passoires, il s'agit alors de déterminer les dimensions du tamis équivalent. Les expériences de FERET ont montré que si D est le diamètre des trous du passoire, l'ouverture intérieure des mailles du tamis équivalent est égale à $\frac{D}{1.25}$. On utilise par exemple indifféremment un tamis de 1.6mm ou une passoire de 2mm.

On commence toujours par faire passer l'échantillon dans une étuve à 105°C jusqu'à ce que son poids devient constant. Cette opération a pour but de déterminer le poids exact de l'échantillon, on procède ensuite au tamisage proprement dit soit à sec.

Le tamisage à sec n'est précis que pour les matériaux dénués de cohésion comme

les sables ou les graviers.

III.5.3 Résultats

La courbe granulométrique

A partir des résultats de l'essai au tamisage on peut tracer la courbe granulométrique du sable étudié qui est la courbe des tamisât cumulés en pourcentage par rapport au poids total de sable-sec de l'échantillon étudié (Figure N° 21).

A partir de cette courbe, nous pouvons dire que le sable mis à notre disposition a des dimensions allant de 5mm à 0.125mm.

Détermination du coefficient d'uniformité

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par un coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen qui est égal au rapport $\frac{d_{60}}{d_{10}}$

D_{60} : l'ouverture du tamis à travers duquel passe 60% du poids des grains.

D_{10} : l'ouverture du tamis à travers duquel passe 10% du poids des grains.

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Dans notre cas $U = 2.34$ et étant supérieur à 2 on peut conclure que:

- La granulométrie est variée.
- La courbe est étalée.
- La porosité est très faible.

III.6 Détermination du volume de sable saturé d'eau douce et le volume de l'eau salée

Le réservoir d'infiltration est divisé en deux parties, dans la première partie, il y a du sable saturé par l'eau douce jusqu'à une hauteur $H_s = 15\text{cm}$.

Les dimensions de la première partie sont:

La longueur est $L_s=79.6\text{cm}$, la largeur est $l_s = 10.5\text{cm}$ donc le volume du sable saturé par l'eau douce est:

$$V_s = 79.6 \times 10.5 \times 15 = 12540 \text{ cm}^3$$

$$V_s = 12.54 \text{ litre}$$

Dans la deuxième partie, il y a de l'eau salée jusqu'à une hauteur $H_e=15 \text{ cm}$.

Les dimensions de la deuxième partie sont:

La longueur est $L_e = 71.2 \text{ cm}$, la largeur est $l_e = 10.5 \text{ cm}$, donc le volume de l'eau salée est:

$$V_e = 71.2 \times 10.5 \times 15 = 11200 \text{ cm}^3$$

$$V_e = 11.20 \text{ litre}$$

III.7 Mesure de la concentration en sel (NaCl) et de la densité

Au cours de nos essais nous avons considéré quatre concentration qui sont les suivantes:

$$C_1 = 100 \text{ g/l}, C_2 = 150 \text{ g/l}, C_3 = 200 \text{ g/l}, C_4 = 250 \text{ g/l}.$$

On obtient les concentrations ci-dessus en suivant la méthode ci-dessous.

Pour une charge $H = 15\text{cm}$ d'eau salée nécessite un volume d'eau de 11.2 litre.

Pour obtenir une concentration de 100g/l on prend un volume de 12 litres d'eau douce et on injecte une masse de sel (NaCl) égale à 1200g, ensuite on attend que le sel se solubilise totalement et on remplit la deuxième partie du réservoir d'infiltration jusqu'à une hauteur $H=15 \text{ cm}$ qui correspond à un volume $V_e=11.2\text{litres}$.

La masse de sel (NaCl) utilisée pour chaque concentration est:

$$C_2=150 \text{ g/l} \quad m_2=1800 \text{ g}$$

$$C_3=200 \text{ g/l} \quad m_3=2400 \text{ g}$$

$$C_4=250 \text{ g/l} \quad m_4=3000 \text{ g}$$

Mesure de la densité: La densité de l'eau salée a été faite à l'aide d'un densimètre.

III. 8 Observations

Au cours de nos expériences, nous avons observé que quand on retire la paroi de séparation, l'eau salée commence à passer au dessous de l'eau douce.

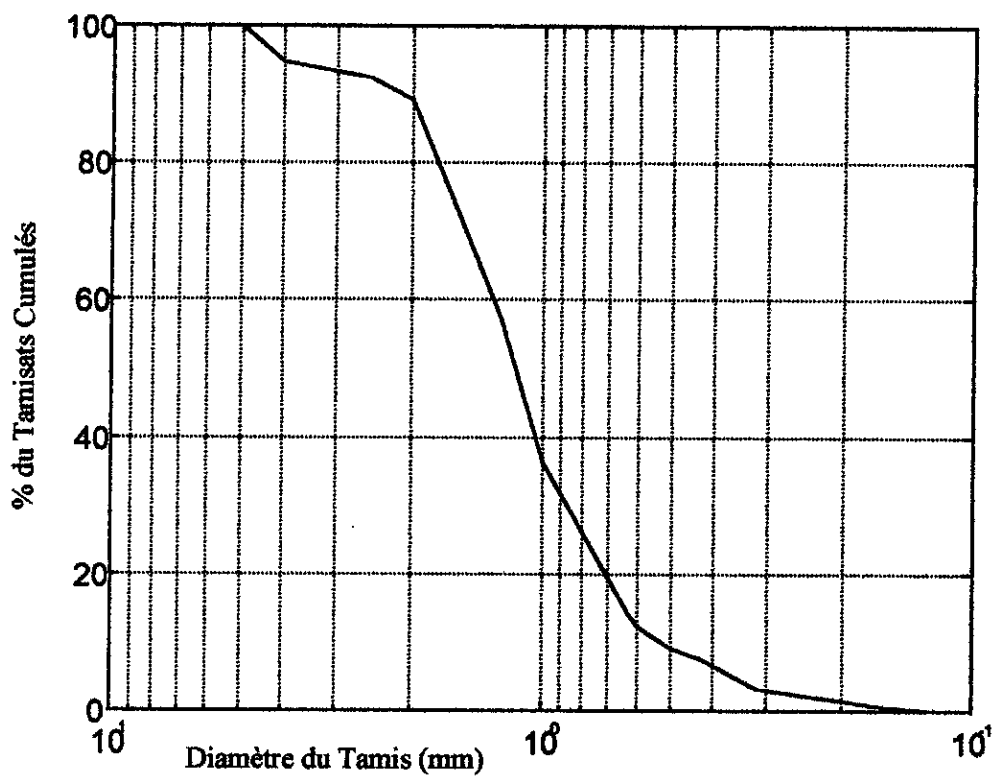


Figure N:21 La Courbe Granulométrique.

- Durant les premières minutes, la forme de la ligne de courant est une forme hyperbolique ce qu'on appelle la ligne de plongée du courant de densité.
- Par la suite la ligne de courant prend une forme qui peut être décomposée en deux parties: le corps et la tête.
- Après les lignes de courant deviennent des droites.

CHAPITRE IV**ANALYSES DES RESULTATS EXPERIMENTAUX****IV.1 Variation de la vitesse d'infiltration en fonction de la distance**

La figure N° 22 donne la variation de la vitesse d'infiltration en fonction de la distance pour différentes concentrations et pour une charge constante.

Les courbes $V_I = f(X)$ sont des paraboles. On constate que l'évolution de la vitesse pour chaque concentration se fait de deux manières différentes :

- Elle est très grande sur une première partie du réservoir d'infiltration, ce qui caractérise la vitesse initiale du courant de densité.
- Puis elle diminue graduellement sur le reste du réservoir.

IV.2 Variation de la vitesse d'infiltration en fonction de la concentration

La figure N° 23 donne la variation de la vitesse d'infiltration en fonction de la concentration pour différentes distances et pour une charge constante.

Les courbes $V_I = f(C)$ sont des droites passant par l'origine.

- Pour une distance constante, on remarque que la vitesse d'infiltration est très élevée pour une concentration importante et le contraire.
- La vitesse d'infiltration pour différentes valeurs de concentration est importante pour des distances qui sont très proches de la vanne.
- Quand la distance devient importante, la vitesse d'infiltration diminue et tend vers zéro.

IV.3 Influence de la concentration sur les niveaux piézométriques***Evolution piézométrique***

L'évolution piézométrique consiste à faire la comparaison des niveaux piézométriques entre les valeurs de concentration différentes et entre deux périodes $t = t_1$ et $t = t_2$.

Avec, t_1 le temps qu'il faut pour que l'eau salée traverse une épaisseur de 70cm de sable saturé d'eau douce (tableau N°1) . Et $t_2 = 4$ heures pour chaque concentration et à partir de l'origine de mesure.

Tableau N° 1

Concentration (g/l)	Temps t_1 (s)
100	3540
150	2874
200	2572
250	2478

Les niveaux piézométriques pour des valeurs de concentrations différentes et pour les deux périodes sont mentionnés dans le tableau N° 2 ci-dessous.

Tableau N° 2

Distance X(cm)	Niveaux piézométriques pour $t = t_1$ et pour chaque concentration (g/l)				Niveaux piézométriques pour $t = t_2$ et pour chaque concentration (g/l)			
	100	150	200	250	100	150	200	250
10	4,3	4,9	4,1	4,1	3,8	3,6	3,5	3,4
20	6,6	6,4	6	6	4,9	4,4	4,3	4,2
30	8,0	7,6	7,4	7,4	5	4,8	4,7	4,5
40	9,3	9,3	9,2	9	5,4	5,2	5	4,9
50	10,5	10,1	10	9,8	5,5	5,4	5,3	4,8
60	11,1	10,4	10,1	10	5,6	5,3	5,2	5
70	13,1	12,8	12,4	12,1	5,6	5,3	5,3	5,1

- On remarque que pour tout les points d'eau le niveau piézométriques diminue quant la concentration augmente

- On remarque également que pour tout les points d'eau et pour les différentes valeurs de concentration, les niveaux piézométriques qui correspondent à $t = t_1$ sont inférieurs à ceux de $t = t_2$.

IV.4- Influence de la concentration sur les hauteurs des lignes de courant et entre deux périodes ($t = t_1$ et $t = t_2$)

- On remarque que pour la plus part des points d'eau, la hauteur de la ligne de courant est proportionnelle à la concentration de l'eau salée.
- Quand la concentration de l'eau salée est importante, la hauteur de la ligne de courant est importante et le contraire (figures N°24 ÷27).
- Après un certain temps $t = t_2$, on constate que pour la plus part des points d'eau la hauteur de la ligne de courant devient très grande par rapport à celle de $t = t_1$ (figures N° 28 et 29).
Donc quand le temps augmente l'eau salée domine dans le bassin d'eau douce.

Tableau N° 3

Distance X(cm)	Concentration (g/l) $t = t_1$			
	C = 100g/l	C = 150g/l	C = 200g/l	C = 250g/l
0	12,4	12,6	12,8	12,9
10	10,8	10,9	11	11
20	8,5	8,7	9	9
30	6,9	7,4	7,5	7,7
40	5,7	5,7	5,8	6
50	4,5	5	5	5,2
60	3,8	4,6	4,9	5
70	2	2,3	2,5	3

Tableau N° 4

Distance X(cm)	Concentration (g/l)			
	t = t ₂			
	C = 100g/l	C = 150g/l	C = 200g/l	C = 250g/l
0	11,6	11,7	11,9	12
10	11,1	11,3	11,4	11,5
20	10,1	10,5	10,6	10,9
30	10	10,3	10,3	10,5
40	9,7	9,8	10	10,1
50	9,4	9,6	9,7	10,1
60	9,4	9,6	9,8	10
70	9,4	9,6	9,7	9,9

IV.5 Variation de la vitesse d'infiltration en fonction du paramètre (g'H)^{1/2}

La vitesse d'infiltration est donnée par :

$$V = K (g'H)^{1/2}$$

avec, $g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho_s}$,

H : la charge de l'eau salée qui est égale à 15cm,

K : coefficient adimensionnel,

$\Delta \rho = \rho_s - \rho_e$ où ρ_s masse volumique de l'eau salée et ρ_e masse volumique de l'eau douce.

- La masse volumique de l'eau douce à 28° est de 1,01g/cm³.
- La masse volumique de l'eau salée correspondant à chaque concentration à 28° est donnée dans le tableau N° 5.

Tableau N° 5

Concentration C (g/l)	Masse volumique ρ_s g/cm ³
100	1.1
150	1.12
200	1.16
250	1.19

La figure N° 30 donne la variation de la vitesse d'infiltration en fonction du paramètre $(g'H)^{1/2}$. Il est intéressant de constater qu'il y a une variation linéaire de la vitesse il en découle des coefficients de proportionnalité (k) données dans le tableau N° 6.

Tableau N° 6

Distance x (cm)	Coefficient (k)
10	0.0244
20	0.082
30	0.0047
40	0.0021
50	0.00081
60	0.00065
70	0.00053

➤ On remarque que ces coefficients (K) diminuent quand la distance augmente.

Figure N° 22: variation de la vitesse en fonction de la distance pour différente concentration en sel

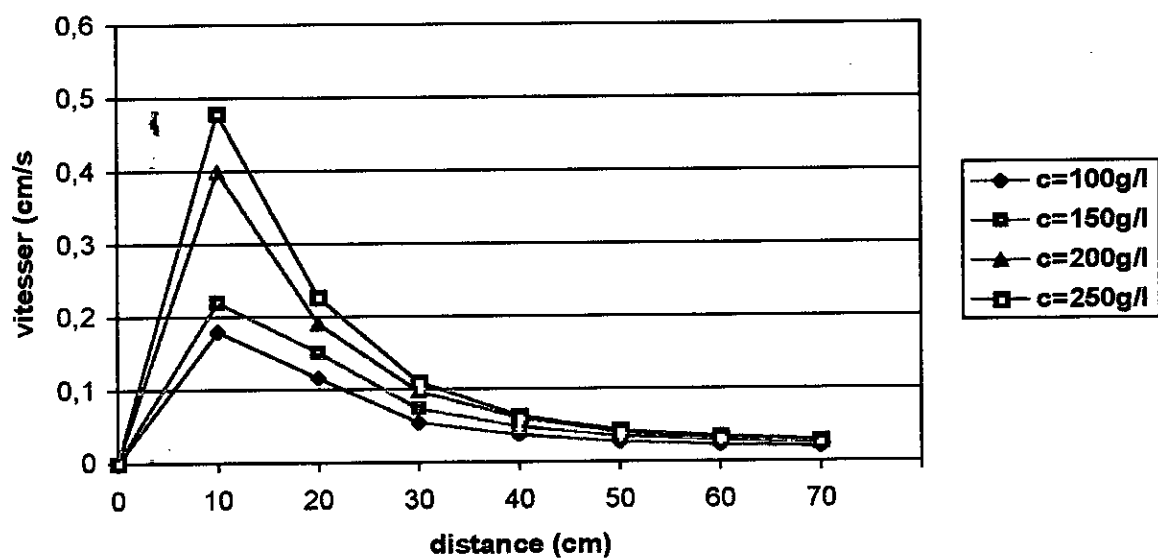


Figure N° 23: variation de la vitesse en fonction de la concentration en sel pour différentes valeurs de "x"

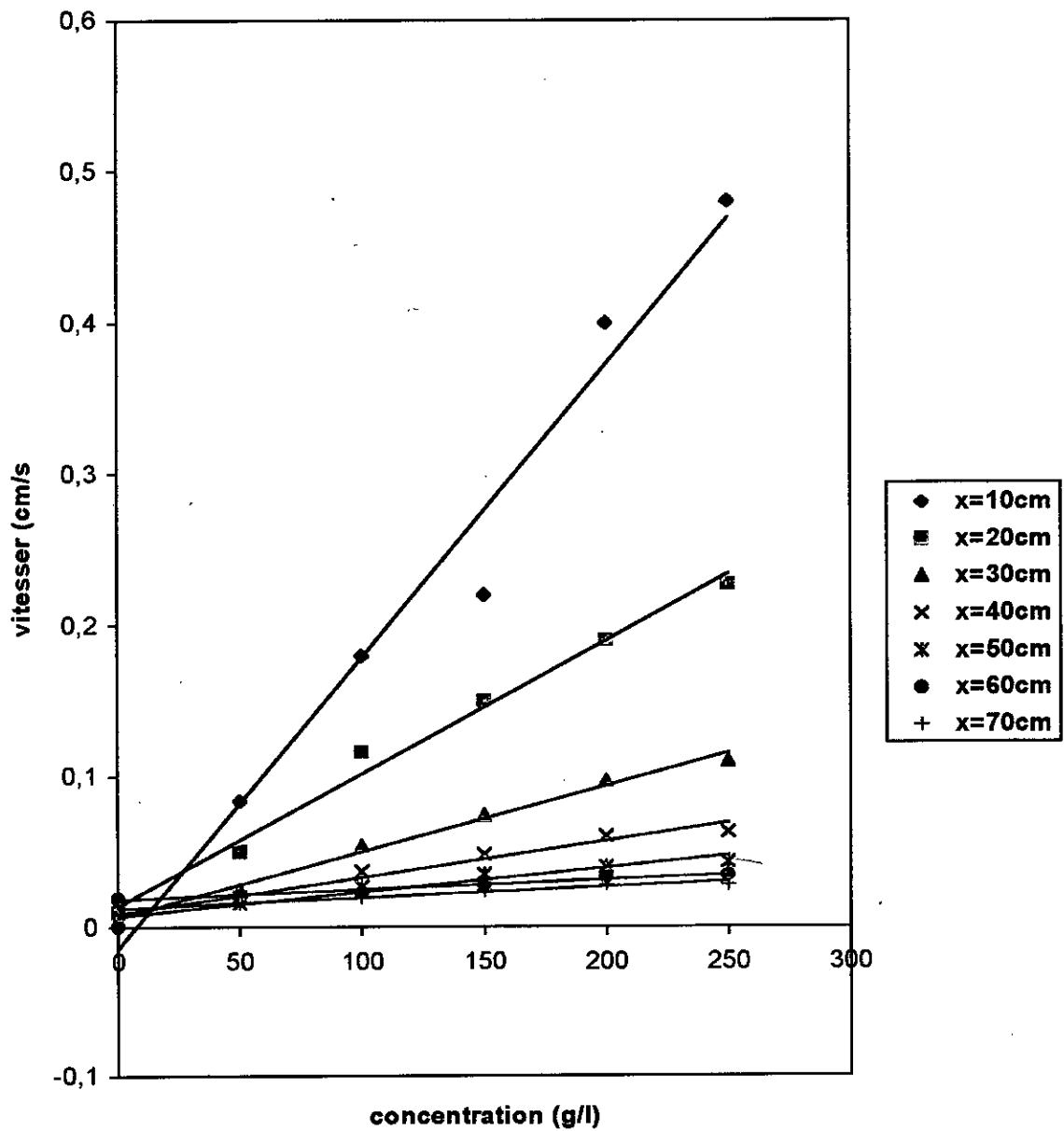


Figure N° 24: variation de la hauteur de l'interface en fonction de la distance pour une concentration $c=100\text{g/l}$

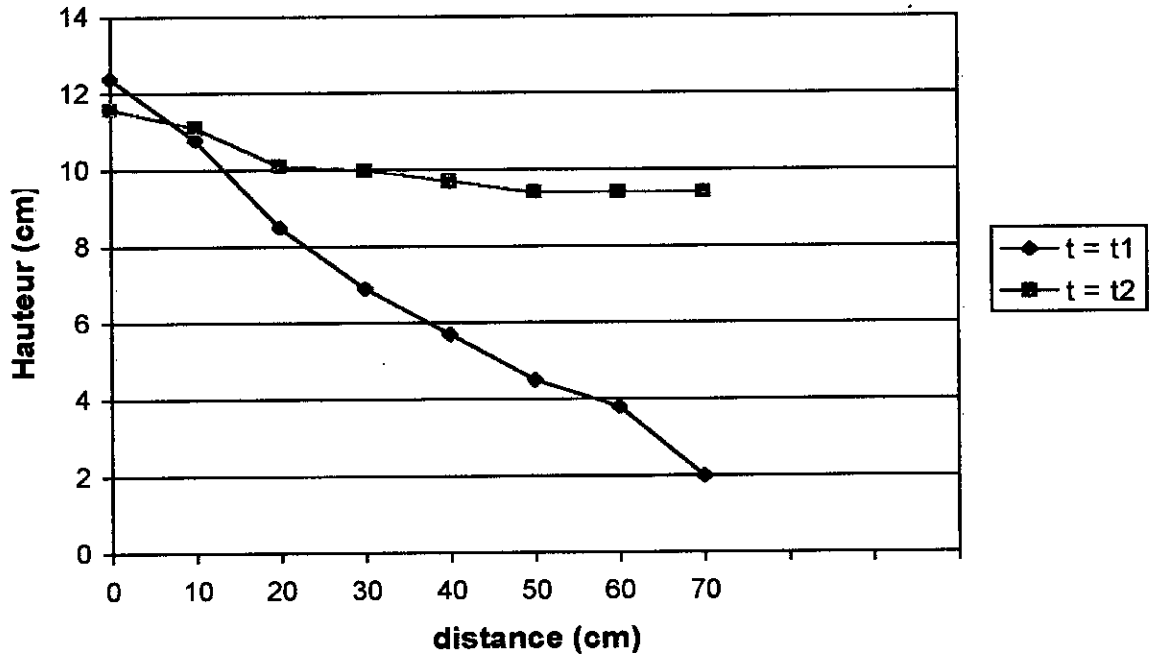


Figure N° 25: variation de la hauteur de l'interface en fonction de la distance pour une concentration $c=150\text{g/l}$

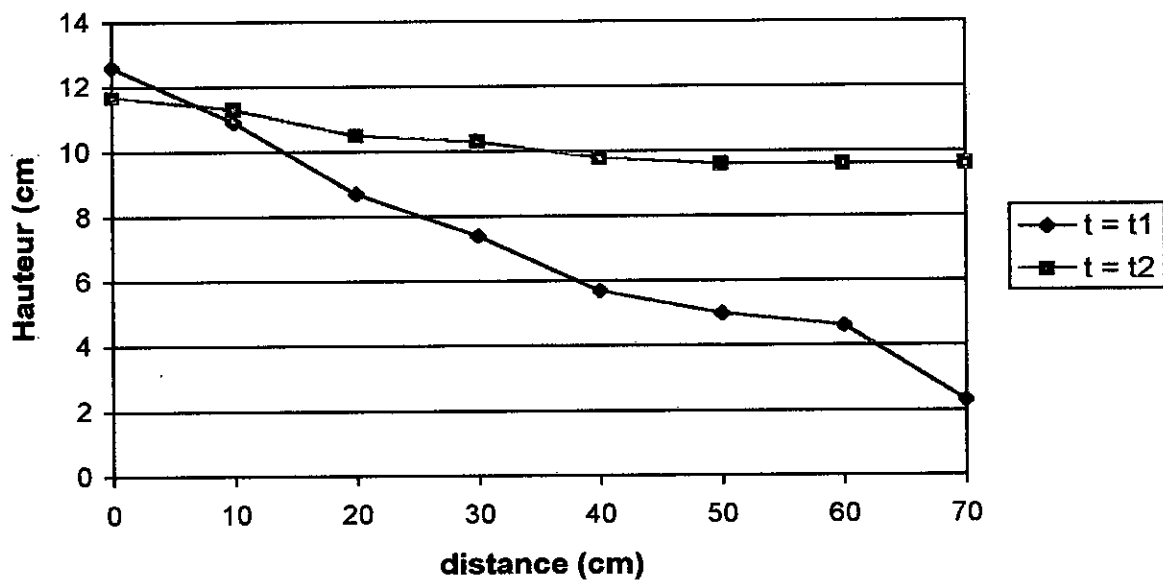


Figure N° 26: variation de la hauteur de l'interface en fonction de la distance pour une concentration $c=200\text{g/l}$

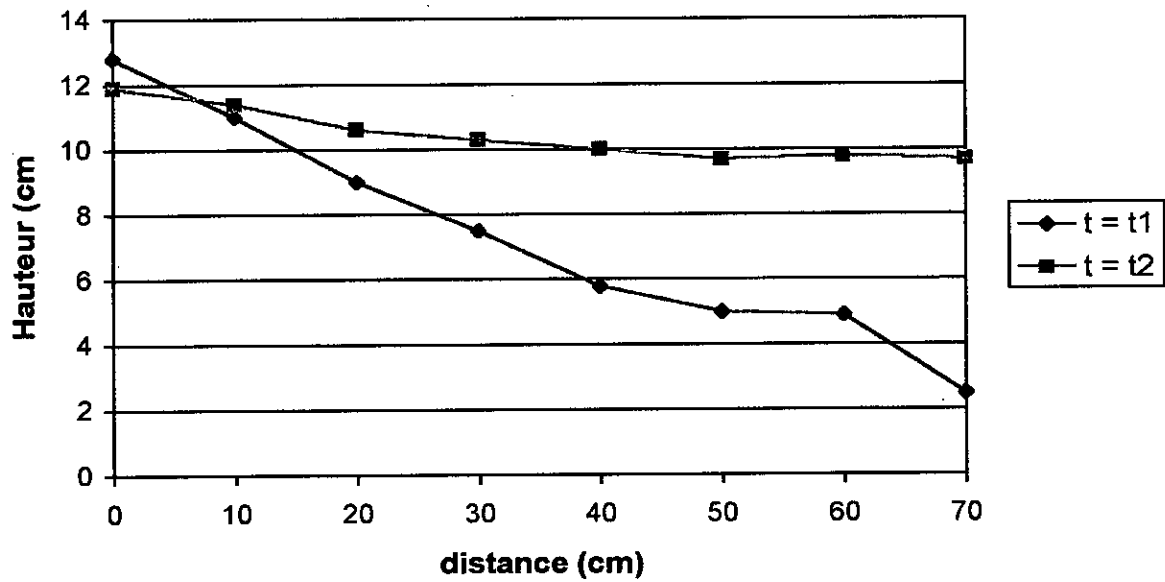


Figure N° 27: variation de la hauteur de l'interface en fonction de la distance pour une concentration $c=250\text{g/l}$

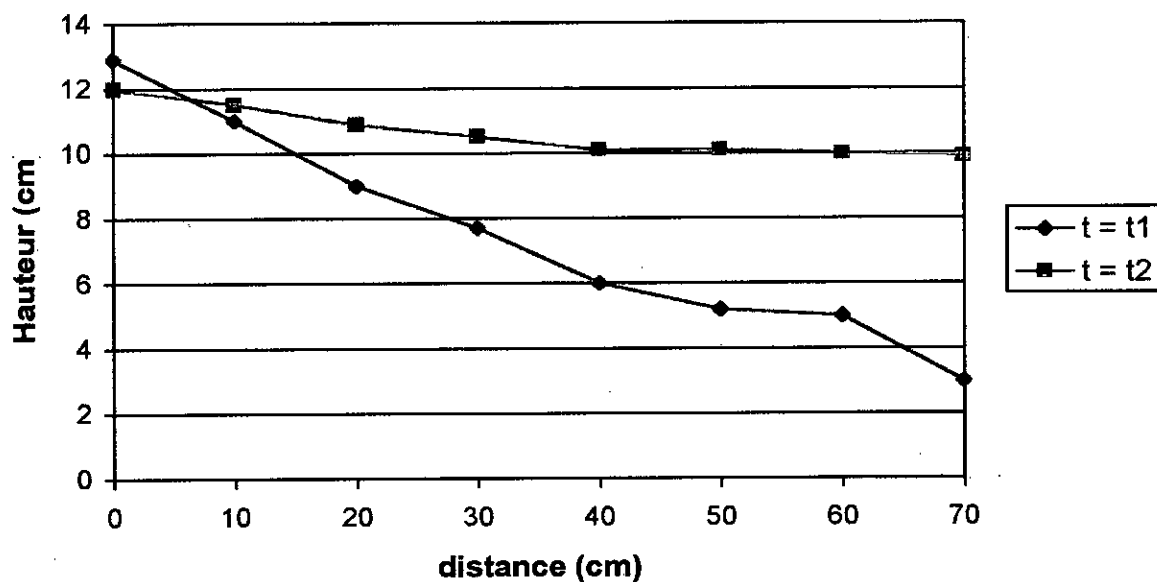


Figure N° 28: variation de la hauteur de l'interface en fonction de la distance pour différente concentration en sel et pour $t=t_1$

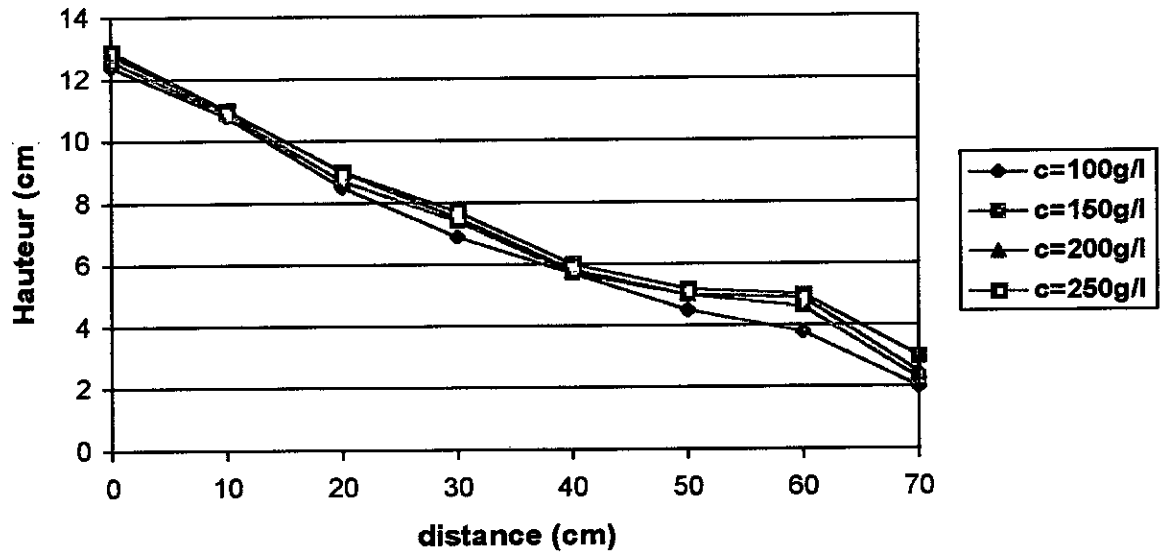


Figure N° 29: variation de la hauteur de l'interface en fonction de la distance pour différente concentration en sel et pour t=t2

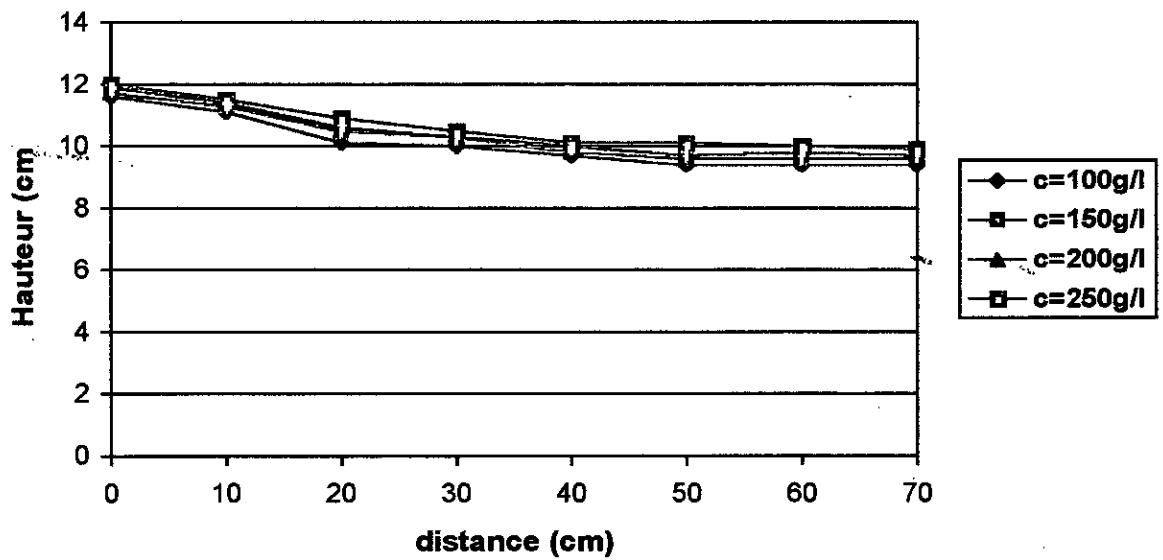
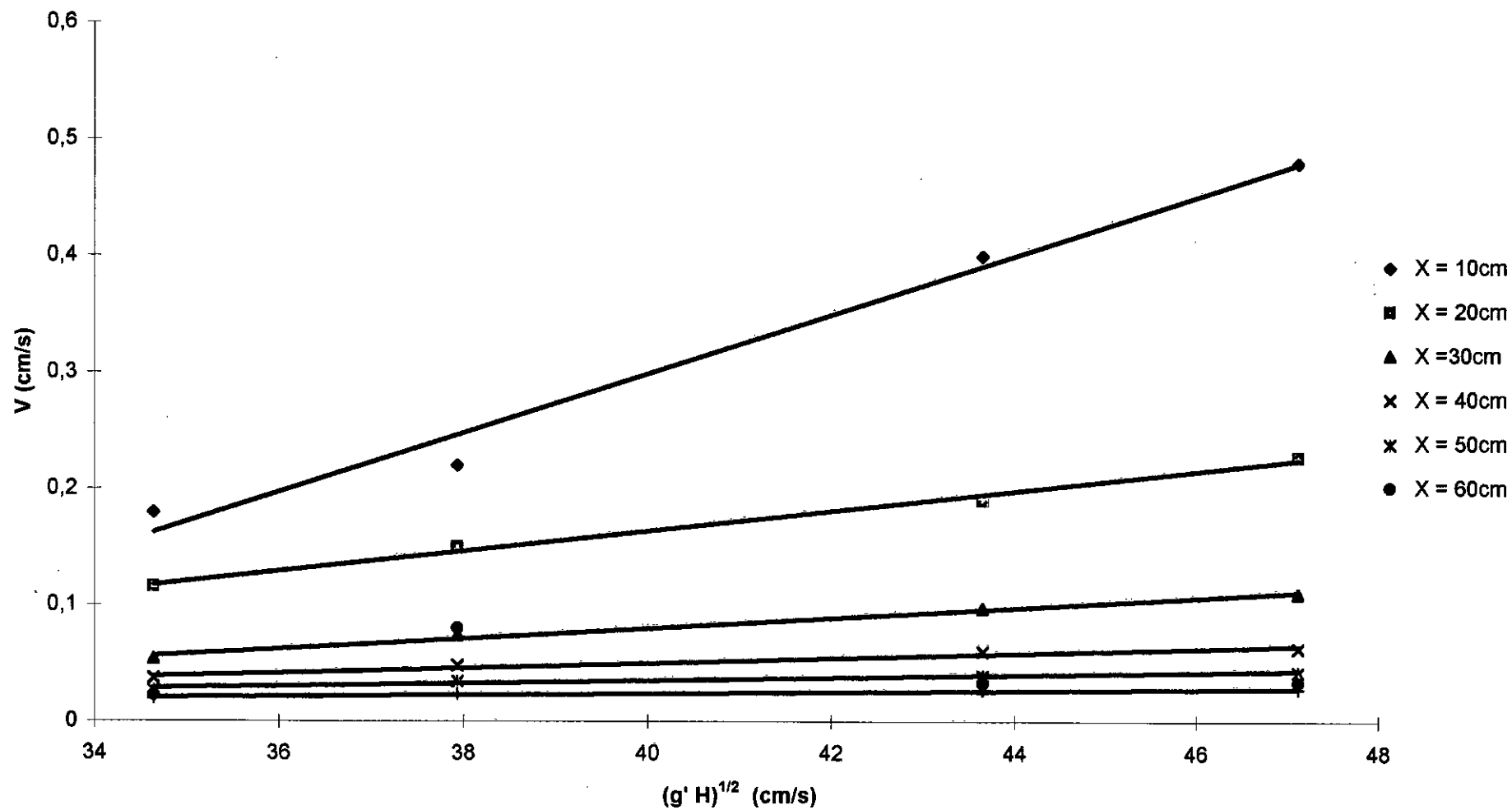


Figure N° 30 Variation de la vitesse d'infiltration en fonction du paramètre $(g'H)^{1/2}$ pour différentes distances



Conclusion

Dans le cadre de l'étude expérimentale du problème posé par l'intrusion marine dans les aquifères côtière, nous avons déduit les paramètres qui influencé sur ce phénomène qui sont les suivants :

- La géologie (perméabilité du sol).
- La concentration de l'eau salée en sel.

Les principaux résultats obtenus a l'issu de ce travail se résume comme suite :

- La forme de la ligne de courant et ses composantes.
- L'influence de la distance sur la vitesse d'infiltration de l'eau salée.
- L'influence de la concentration sur la vitesse d'infiltration de l'eau salée.
- L'influence de la concentration sur les niveaux piézométriques à l'interface eau salée – eau douce.
- L'influence de la concentration sur la hauteur de la ligne de courant.
- L'influence de la charge de l'eau salée et sa densité sur la vitesse d'infiltration.
- La variation de la vitesse d'infiltration en fonction du paramètre $(g'H)^{1/2}$.
- L'influence de la distance sur la valeur du coefficient addimensionnel (K).

D'après cette étude on conclus que ce phénomène se provoque par l'effet de différence de densité entre l'eau douce et l'eau salée.

Bibliographie

- [1] Beni Akhy R, Ben Dhia. H, Gamaoun. A (1997). "Modélisation de l'impact des activités anthropiques sur les nappes phréatiques côtières, cas de chott Maria (Sahel tunisien)". *La Houille Blanche* N°6, pages (58-63)
- [2] Baghloul. A (1992), "Etude piézométrique du biseau salé dans le bas Sebaou" Mémoire d'ingénieur d'état en hydrologie INA.
- [3] Deghmane. N, Oussalem. S (1996). "Etude de l'intrusion marine dans la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued Corso (Boumerdes)". Mémoire d'ingénieur (ISMAL).
- [4] Gostet. J, Sanglerat. G. "Cours pratique de mécanique des sols" "Tome 2" (Calcul des ouvrages), 3^{ème} édition, Dunod 1983.
- [5] Mania. J, Imerzoukène. S, Braillon. J (1985). "Pollution saline de la nappe côtière à l'Est d'Alger". Bulletin BRGM n°3, pages (214-225).
- [6] Remini. B, (1997). "Envasement des retenues des barrages en Algérie : Importance, mécanisme et moyen de lutte par la technique du soutirage". Thèse d'état en hydraulique, Alger, ENP, 342p.
- [7] Ribes. G et Blanchet. C (1965). "Les courants de densité et le projet de l'écluse Demardyck, à Dunkerque". *La Houille Blanche* N°1, Pages (48-52).
- [8] Spann. L (1996). "Vers une crise de l'eau en Afrique du Nord et au moyen orient".
La Houille Blanche N° 4, pages (57-61)
- [9] Sai. A (1994). "Intrusion marine – contamination de la nappe phréatique du bas Sebaou, causes et conséquences". Mémoire d'ingénieur (ISMAL) 83p.
- [10] Yamani. L (1994). "Cours de construction (1)". Edition OPU, 294p.