



Faculté des Sciences de la Terre

Département de Géologie

Année 2009

Mémoire

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Magister

Contribution à la mise en évidence de l'intrusion marine dans la plaine d'Annaba

Spécialité : Hydrogéologie

Option : Gestion des ressources en eaux, vulnérabilité et développement durable.

Présentée par

Imen AICHOURI

(Ingénieur d'état en Hydrogéologie)

Devant le jury composé de :

A. HANI	<i>Directeur de thèse</i>	<i>Professeur (U.A)</i>
A. CHOUABI	<i>Président</i>	<i>Maître de conférences (U.A)</i>
S. CHAAB	<i>Examineur</i>	<i>Maître de conférences (U.A)</i>
H. CHAFFAI	<i>Examineur</i>	<i>Maître de conférences (U.A)</i>

Introduction générale

Dans la zone côtière d'Annaba, la nappe des graviers constitue la principale ressource à laquelle on fait appel tant pour l'irrigation que pour les besoins industriels et d'adduction publique. Par suite des exploitations excessives, la nappe de cette zone côtière pourrait être ainsi atteinte par le phénomène d'intrusion marine. Une première prospection a déjà révélé l'existence de zones polluées très localisées. Cependant, pour mettre en évidence l'intrusion marine et analyser son effet sur la salinisation de l'eau, une étude était nécessaire. C'est dans cette optique que se situe notre travail.

Le premier chapitre est consacré à l'étude du contexte géologique de la région d'étude et à l'identification de la géométrie des différents horizons aquifères. L'objectif de ce chapitre est d'identifier les caractéristiques géométriques des différents aquifères étudiés indispensables à l'élaboration des modèles mathématiques. Ainsi, la maîtrise des informations géologiques dans le remplissage mio-plio-quaternaire de la région de Annaba-Bouteldja étudié fera appel aux techniques de grande et moyenne échelle (étude des cartes, mesures géophysiques ; sondages électriques et sismique réflexion, etc....) jusqu'à des techniques à petite échelle (forages, diagraphies, prélèvements et analyses, pompages d'essai, etc....).

Le deuxième chapitre est consacré à l'évaluation des différentes caractéristiques hydroclimatologiques et d'évaluer le bilan hydrique pour pouvoir donner une estimation des réserves en eau de la nappe. Les débits mesurés sont jaugés à la station de jaugeage de Mirbek. L'objectif de cette étude est de fournir les éléments dynamiques nécessaires à l'évaluation des transferts des débits qu'ils soient entrants ou sortants (alimentation par les précipitations, etc....).

Le troisième chapitre est consacré à la détermination des paramètres hydrodynamiques des principaux horizons aquifères, et à l'interprétation des données de pompages d'essai par le dépouillement et l'analyse des données de pompages d'essai effectués dans les forages captant les nappes des graviers et des sables dunaires de Bouteldja qui permettra, également de définir les principales modalités de transfert de débit dans le système aquifère, et à la cartographie de la transmissivité par le krigeage ordinaire (Hani, 2003).

Le Quatrième chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe des graviers, l'état hydrochimique devrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes d'échange et d'alimentation et de caractériser l'évolution et

les origines du chimisme des eaux de l'aquifère étudié pendant différentes périodes de mesure. Les données analytiques acquises dans les réseaux de mesure du système aquifère de la nappe des graviers de Annaba pendant la période du suivi de 1983 à 2008 selon un pas d'échantillonnage semestriel ; mai et octobre, ont été traitées dans ce chapitre premièrement, par la méthode des composantes principales (ACP) et deuxièmement par la méthode des rapports caractéristiques.

Le Cinquième chapitre est consacré à la modélisation des écoulements souterrains, en régime permanent et transitoire, permettra de suivre l'évolution de la piézométrie de l'aquifère étudié et d'évaluer les bilans hydrogéologiques en tenant compte de l'augmentation croissante des prélèvements. Les impacts des processus anthropiques sur l'équilibre hydrodynamique des aquifères et sur la dégradation de la qualité des eaux seront également abordés grâce à l'utilisation des modèles hydrodispersifs.

Chapitre I : APPORT DU CONTEXTE GEOLOGIQUE, STRUCTURAL & GEOMETRIQUE

L'examen du cadre géologique permet de situer l'objet des recherches centrées sur les eaux souterraines. En effet pour élaborer le schéma conceptuel de la zone étudiée il est indispensable de bien identifier la lithologie du complexe aquifère étudié et de cartographier les caractéristiques géométriques des différents horizons aquifères.

I.1- Introduction

Les aquifères de Annaba et de Bouteldja occupent une superficie de près de 800 km² et occupent le nord-est de l'Algérie (fig.1). La région est bordée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par les massifs numidiques de Bouteldja, à l'Ouest par le massif de l'Edough, dominant Annaba, et par le lac Fetzara situé plus au Sud. Elle est limitée au Sud par le prolongement oriental de la chaîne numidique (Monts de la Cheffia et d'El-Kala). Elle constitue la basse plaine des oueds Ressoul, Seybouse, Bounamoussa et Kébir.

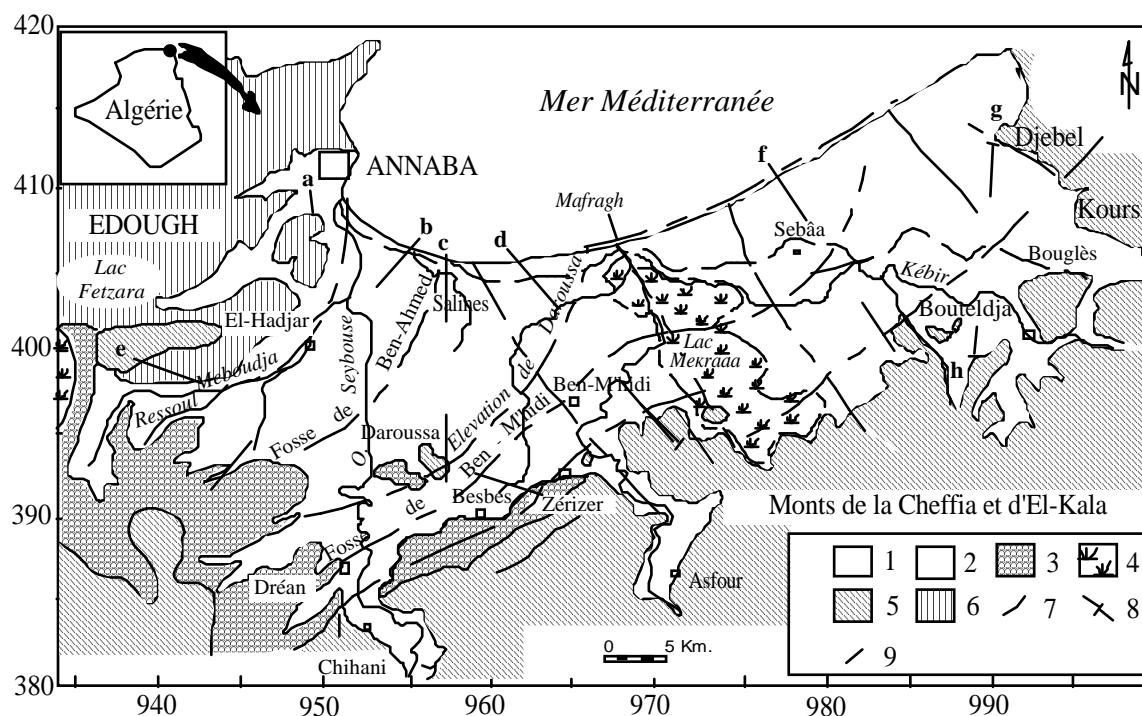


Fig. 1- Situation géographique et géologique des plaines de la région de Annaba-Bouteldja (d'après Strojexport, 1975, modifié).

Légende : 1 : Alluvions récentes et actuelles ; 2 : Dunes ; 3 : Alluvions anciennes ; 4 : Marécage ou lac ; 5 : Grés et argile numidiens ; 6 : Formations métamorphiques ; 7 : Faille ; 8 : Axe des fosses ; 9 : Tracé de coupe.

I.2- Cadre lithostratigraphique

Les études réalisées dans la région (Joleaud, 1936 ; Hilly, 1962 ; Vila, 1980 ; Lahondère, 1987 ; Gleizes, 1988 ; Hammor, 1992) montrent l'existence de deux types de terrains ; métamorphique et sédimentaire (fig.1). L'échelle stratigraphique de ces terrains se répartit du Paléozoïque au Quaternaire :

I.2.1- Le Paléozoïque :

Il affleure à l'ouest dans les massifs de l'Edough, de Belilieta et de Boukhadra. Il est constitué essentiellement par des gneiss ceinturés par des micaschistes (Hilly, 1962 ; Caby, 1992 ; Ahmed-Said, 1993). On peut distinguer les trois séries superposées suivantes :

- La série inférieure, représentée par des gneiss riches en biotite et sillimanite d'une épaisseur moyenne de 70 m, cette formation constitue le cœur de l'anticlinal du massif de l'Edough ;

- La série intermédiaire, caractérisée par des schistes et des micaschistes riches en biotite, muscovite et du grenat et parfois avec des feldspaths souvent visibles à l'œil nu. Cette série contient des marbres qui s'intercalent dans les formations des micaschistes sous forme de skarns ;
- Série supérieure, constituée par un ensemble de gneiss ocellés, schistes satinés, micaschistes, grenats et amphibolites.

Les accidents tectoniques connus jusqu'à ce jour dans le massif de l'Edough permettent de déceler deux familles d'accidents :

- une première famille, dont l'orientation est NW-SE. La direction la plus fréquente de ces accidents varie de N 120° E à N 150°E.
- la seconde famille, qui semble être conjuguée à la première, est dirigée NE-SW.

I.2.2- Le Mésozoïque :

Le Mésozoïque affleure également en dehors de la région d'étude, dans la partie sud, au niveau de la région de Guelma et de Bouchegouf, située à une quarantaine de km au sud du secteur étudié. Il est constitué par :

- le Trias, formé par une association de dolomies, calcaires dolomitiques et de gypse ;
- le Jurassique, représenté par des dolomies noires et des schistes calcaireux ;
- le Crétacé qui comporte des calcaires dolomitiques riches en foraminifères et des débris de rudistes.

Seul le Crétacé supérieur (Sénonien) est représenté dans la région, il occupe presque la totalité des monts de la Cheffia. Il est caractérisé par un faciès schisteux plus au moins argileux. Parfois il s'agit aussi d'un passage de calcaire avec alternance de marnes ou de microbrèches épais de 5 à 10 cm. Quelques forages de reconnaissance répartis dans la cuvette de la Cheffia et réalisés dans le cadre d'une étude géologique au droit de l'emplacement du barrage et de la galerie d'amenée ont recoupé ces faciès.

I.2.3- Le Cénozoïque :

Il est représenté par :

- l'*Eocène inférieur* représenté par une série transgressive formée par des calcaires massifs à faciès épinéritique ;
- l'*Oligocène* qui comporte des niveaux d'argiles numidiennes rencontrées dans toute la partie Sud de la région d'étude (monts de la Cheffia), au Sud-Est de Bouteldja et dans les djebels Koursi, Bourdim et Oum El-Agareb. Ce faciès argileux, de couleur verdâtre, brunâtre ou bleu sombre, comprend parfois des intercalations de lentilles gréseuses pouvant aller d'un

cm à 30 cm d'épaisseur. Localement, quartziteux et renfermant parfois de petits nodules de pyrite, l'ensemble des formations peut atteindre plus de 100m d'épaisseur. Ces argiles, formant la base de la série numidienne, ont été datées de l'Oligocène moyen à supérieur (Lahondère, 1987). Au-dessus de ces formations argileuses viennent se superposer les grès numidiens en position allochtone d'âge aquitain (Rouvier in Ramdani, 1996), à grains hétérométriques allant du grain grossier au grain fin. Ces grès, épais de près de 150m, sont bien représentés au sud de la région d'étude, à l'Est dans le djebel Bourdim et au nord-est dans le djebel Koursi. Ils ceinturent les formations alluvionnaires et surtout dunaires.

- le **Mio-Pliocène** représenté par les faciès suivants :

✓ *faciès fluviatil* ; bien développé dans la plaine d'Annaba, il est formé essentiellement de galet, de sable et d'argile le long des Oueds ;

✓ *faciès marin (Plaisancien)* ; caractérisé par des marnes bleues avec des intercalations calcaires ;

✓ *faciès continental* : est lié aux dépôts des fosses d'effondrement. En effet, la prospection par sismique réflexion a mis en évidence l'existence de deux fosses (SONATRACH, 1969 ; Strojexport, 1975) :

- la fosse de Ben-Ahmed, orientée S-N,

- la fosse de Ben-M'hidi, orientée SW-NE.

Ces deux fosses sont séparées par le haut fond de Daroussa (ou élévation de Daroussa), cet effondrement s'est produit au cours du Mio-Pliocène. Ces dépôts forment une série continentale argilo-sableuse avec des lits de conglomérats constituant le réservoir de la nappe captive des plaines de Annaba -Boutedja.

- le **Quaternaire** :

Les formations dunaires et alluvionnaires d'âge quaternaire constituent la roche réservoir du système aquifère de Annaba-Bouteldja. On y distingue :

- *Quaternaire ancien (hautes terrasses)* : correspond à la nappe superficielle dont le matériau est composé de sables, d'argiles, de graviers et de conglomérats de petite taille dominant cette formation.

- *Quaternaire récent* : correspond à la basse et à la moyenne terrasse.

✓ La moyenne terrasse est représentée par des terrasses alluvionnaires des oueds de 20m, correspond aussi à la terre cultivable (terre, argile, sable).

✓ Basse terrasse est formée par des alluvions du niveau des eaux actuelles des oueds. Ces terrasses sont plus limoneuses que sableuses et sont parsemées de marécages.

- *Quaternaire actuel* :

✓ Les alluvions sont représentées par des dépôts du lit actuel de l'Oued, généralement de matériaux variés, argiles, sables et des cailloux, résultant de l'érosion des formations traversées par l'Oued.

✓ Le cordon dunaire représenté par un massif constitué essentiellement de sable d'origine marine. Il affleure largement entre le village de Chatt et la ville d'El-Kala .

- ***Géologie et caractéristiques physico-chimiques des dunes*** :

A l'origine les massifs argilo-gréseux numidiens et gneissiques furent intensément érodés. Une grande quantité du matériel détritique fut charriée vers la mer puis dégradée en sable. Les éléments furent ensuite déplacés essentiellement par les vents vers l'intérieur et se répartissent uniformément dans les dépressions formant ainsi un matelas dunaire. Les niveaux d'argile en feuillets provenant directement du massif numidien, s'intercalent dans les niveaux sableux.

L'état pur, le sable renferme 80 à 90% de silice provenant de la lapidation des grès numidiens et des formations métamorphiques. C'est ce qui se dégage de la carte géologique et structurale établie par Vila (1980) qui montre un lambeau du socle de l'Edough au Nord de Bouteldja. Le sable est donc siliceux, fin et le plus souvent mélangé avec des minéraux tels que le quartz irrégulièrement consolidé par du CaCO_3 jaune ou rougeâtre, de tourmaline et de magnétite. Le sable renferme une proportion plus au moins forte d'argile. Il devient très argileux au pied de la chaîne numidienne. La présence de fer oxyde donne au sable sa coloration rouge, brune ou jaune (source de Bouglès).

Les travaux réalisés dans la région (Khérici, 1985 ; Ramdani, 1996) permettent de distinguer :

- Des sables blancs ou jaune clair généralement perméables, situés au centre du massif dunaire.
- Des sables plus perméables que les précédents.
- Des sables dont les grains sont enrobés d'une fine pellicule d'argile et de ce fait moins perméables que les bancs localisés surtout en bordure des reliefs gréseux.
- Des sables rouges, localisés à l'ouest et au sud-ouest, plus perméables que les précédents.
- Des vases sablo-limoneuses déposées au fond des marigots "nechaas" de couleur noire en relation avec la décomposition des végétaux.

Les analyses granulométriques effectuées dans le massif dunaire montrent une granulométrie fine à moyenne dont 75 à 85% de grains ont un diamètre de 0.15 à 0.5 mm. Les essais de perméabilité effectués par Soletanche (in Ramdani, 1996) dans la région de Bouglès sur le sondage BG1 et BG25 montrent que les sables rouges à fraction argileuse sont caractérisés par une perméabilité de 10^{-6} m/s. Par contre les sables jaunes foncé ont une perméabilité de l'ordre de 10^{-4} m/s et constituent donc un très bon réservoir aquifère.

I.3- Cadre structural

La Plaine de Annaba-Bouteldja, aux reliefs très peu marqués comporte des limites naturelles (fig.1) .i) avec la Mer Méditerranée, au Nord, ii) les reliefs du Massif de l'Edough, à l'Ouest,

aux formations cristallophylliennes paléozoïques, iii) des Monts de la Cheffia et d'El-Kala, au Sud, plus orientaux dont les unités numidiennes, allochtones, d'argile et de grès recouvrent le socle. Dans la Plaine, ces ensembles sont masqués par des dépôts récents, comblement de deux bassins sédimentaires principaux, identifiées par la géophysique (Sonatrach, 1969; Strojexport, 1975) avec un graben NS, la fosse Ben-Ahmed, sous la plaine de la Seybouse, et un graben SSW-NNE à WSW-ENE, la fosse Ben-M'hidi, sous celle de l'oued Kébir et le massif dunaire oriental (fig. 2). Ces deux fosses sont limitées par des failles à très forts pendages (60 à 80°) et séparées par un horst, subméridien, représenté par l'élévation de Daroussa à laquelle appartient, dans la partie méridionale, la Butte de Daroussa, Le remplissage très hétérogène des deux fosses (Joleaud, 1936 ; Gaud, 1976 ; Vila, 1980), avec des alternances d'argile, de sable et de graviers, est marqué par de brutales variations de faci

ès
dan
s
l'es
pac
e et
dan
s le
tem
ps.

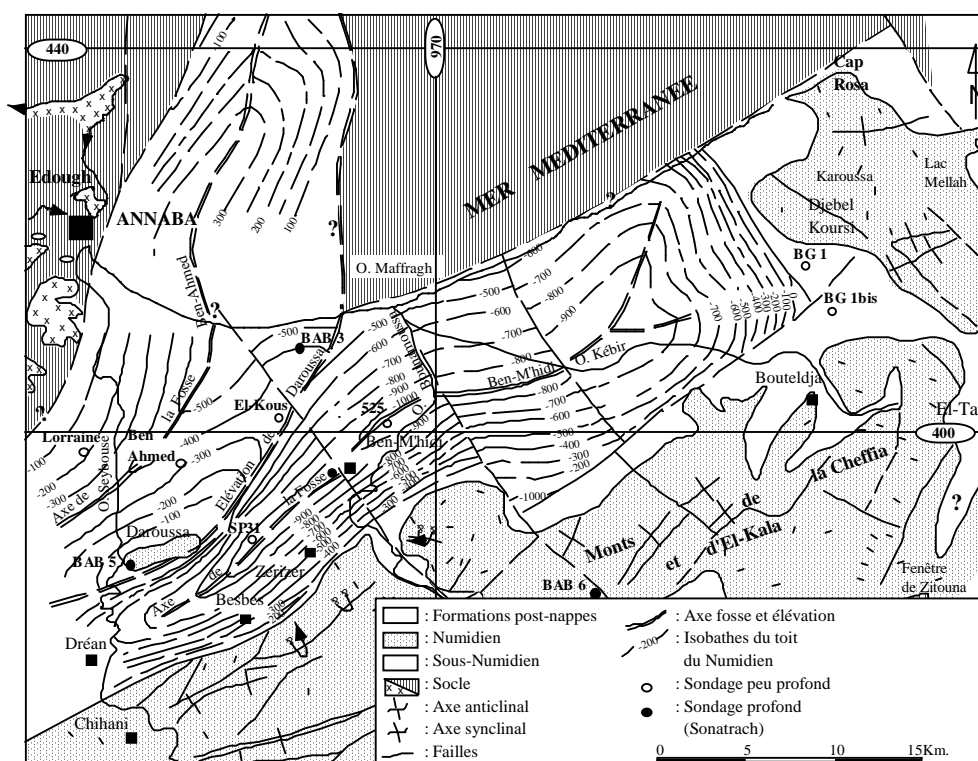


Fig. 2- Esquisse structurale des plaines de Annaba-Bouteldja
(d'après Sonatrach, 1969, modifiée).

Schématiquement (fig. 3), nous pouvons distinguer quatre faciès principaux avec, à la base, une couche de marnes miocènes de plus de 150 m d'épaisseur surmontée par 60 à plus de 100 m d'argiles détritiques plio-quadernaires, puis par des lentilles de graviers et de galets séparées par de fines couches d'argiles. Ces dernières sont elles-mêmes recouvertes par des argiles sableuses (0 à 70 m). Dans le secteur NE de la région, une épaisse couche de sable dunaire se superpose aux formations antérieures.

L'ensemble de ce dispositif est affecté par deux familles de failles à forts pendages, de directions respectives NE-SW et NW-SE qui apparaissent tardives vis-à-vis des sous bassins constitués et de leurs remplissages.

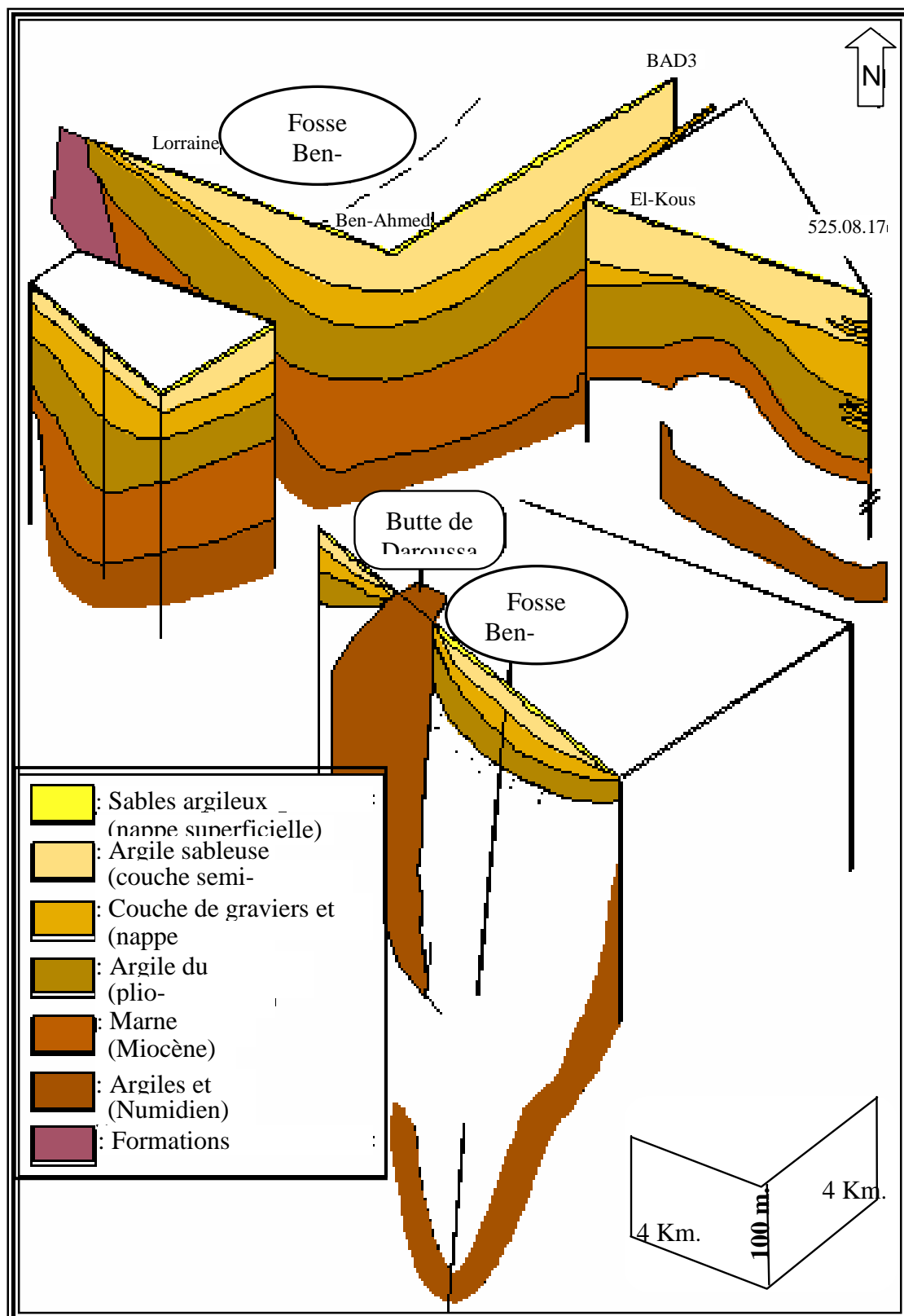


Fig. 3- Bloc diagramme au travers de la plaine de Annaba (Hani, 2003).

I.4- Géométrie du système aquifère

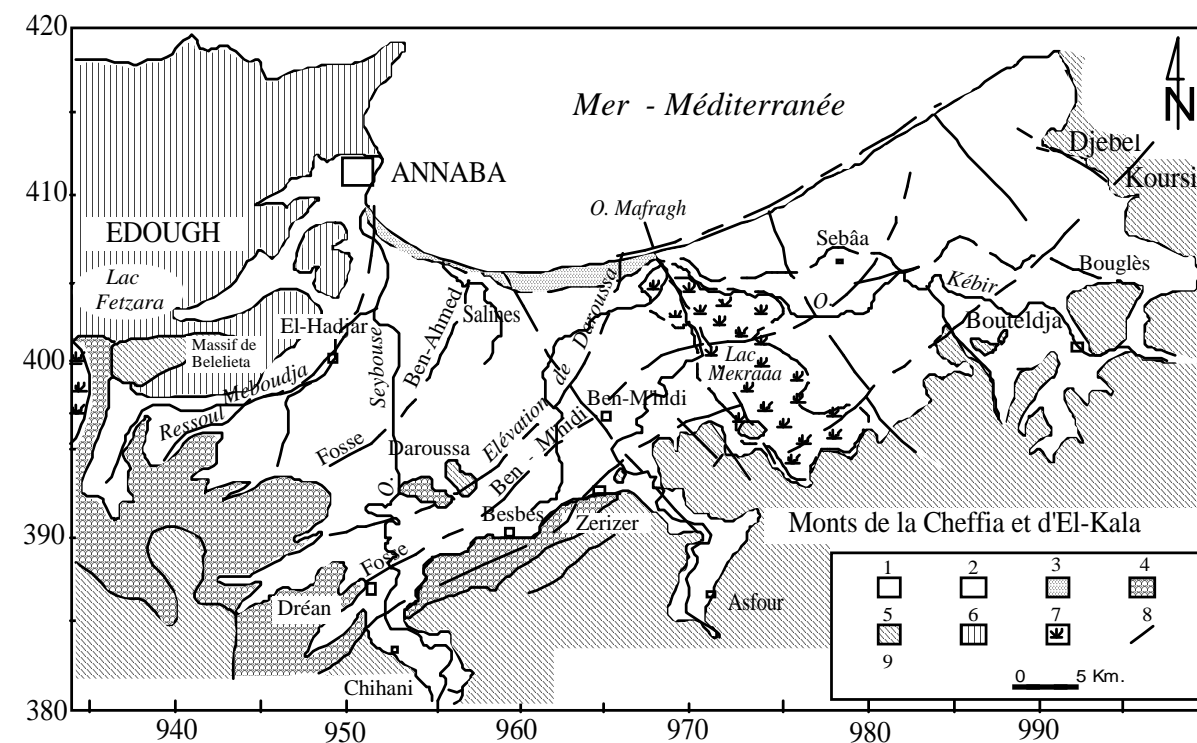
Ainsi, la structure établie, nous pouvons identifier plusieurs horizons aquifères. Nous décrivons ci-dessous les différentes formations aquifères et nous tenterons d'appréhender la géométrie des principales nappes exploitées par de nombreux ouvrages de captage.

I.4.1- Les matériaux aquifères et leur comportement hydrogéologique

Les formations du système aquifère sont constituées de sédiments mio-pliocènes et quaternaires des deux fosses décrites précédemment. Le remplissage de ces fosses s'est effectué de manière hétérogène, formant une alternance d'argile sableuse, de sable, de graviers et de travertins, où l'on distingue 7 réservoirs d'importance inégale (Gaud, 1976) (fig. 4):

- *la nappe des formations superficielles.* Cette nappe est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables. Des argiles grises compactes en constituent le substratum. Ces lentilles sont plus fréquentes à proximité de l'oued Seybouse, et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. La nappe phréatique est globalement libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de cette nappe varie de 0 à 18 m.
- *La nappe des graviers.* Elle couvre l'ensemble de la zone d'étude et présente de bonnes qualités hydrauliques.
- *La nappe des sables du massif dunaire de Bouteldja.* Au nord-est, la nappe libre du massif dunaire est contenue dans les sables éoliens reposant sur le remplissage mio-pliocène de la fosse de Ben-M'hidi.
- *La nappe des alluvions de la haute terrasse.* Elle s'étend le long des massifs numidiens à l'Ouest et au Sud de la plaine de Annaba. Ces alluvions graveleuses et caillouteuses à matrice argileuse ont des possibilités aquifères très limitées.
- *La nappe des cipolins.* Elle se situe dans les massifs de bordure du Belilieta et de Boukhadra (proche du massif de l'Edough). Elle est contenue dans des lentilles de cipolins, fissurés, existant au sein des gneiss et micaschistes du monoclinale métamorphique du Boukhadra. Ces calcaires sont en contact avec les alluvions de la plaine. Leur superficie est inférieure à 100ha.
- *La nappe des travertins.* Elle est mal délimitée. Elle a été localisée dans le secteur compris entre Fardaous, la butte de Daroussa, Chbaïta et la ferme Hallalal Aïssa,

■ La nappe libre du cordon dunaire. Elle est contenue dans les dunes le long de la Méditerranée, à l'Ouest de la Mafragh. Elle présente l'intérêt de protéger la nappe phréatique



des venues d'eau salées.

Fig. 4- Extension des différents aquifères dans les plaines de Annaba-Bouteldja

(D'après Gaud, 1976).

1 : Nappe des formations superficielles ; 2 : Nappe des sables du massif dunaire de Bouteldja ; 3 : Nappe des sables du cordon dunaire ; 4 : Nappe des alluvions de haut niveau ; 5 : Grès et argiles du Numidien ; 6 : Formations métamorphiques (nappe des cipolins) ; 7 : Marécages ; 8 : Failles ; 9 : Fosses.

I.4.2- Caractéristiques géométriques du système aquifère

L'hétérogénéité des dépôts a permis de définir un système aquifère constitué par une nappe superficielle qui s'étend sur l'ensemble de la zone d'étude, excepté sur sa bordure nord constituée par les sables du cordon dunaire, à l'Ouest de l'oued Mafragh, et du massif dunaire de Bouteldja à l'Est. Ce dernier constitue un réservoir aquifère dont les ressources en eau souterraine à l'alimentation des populations des wilayas de Annaba et El-Tarf. Sous cet ensemble les forages ont rencontré sous une couche argilo-sableuse semi-perméable des niveaux de graviers s'étendant sur toute la superficie du système. L'analyse de près de 500 coupes lithologiques de forage a permis d'identifier la structure profonde des principaux aquifères et de déterminer leur extension latérale et verticale. Nous décrivons à partir des

coupes reportées sur la figure 1 l'ensemble de ces horizons aquifères successivement de l'Ouest vers l'Est.

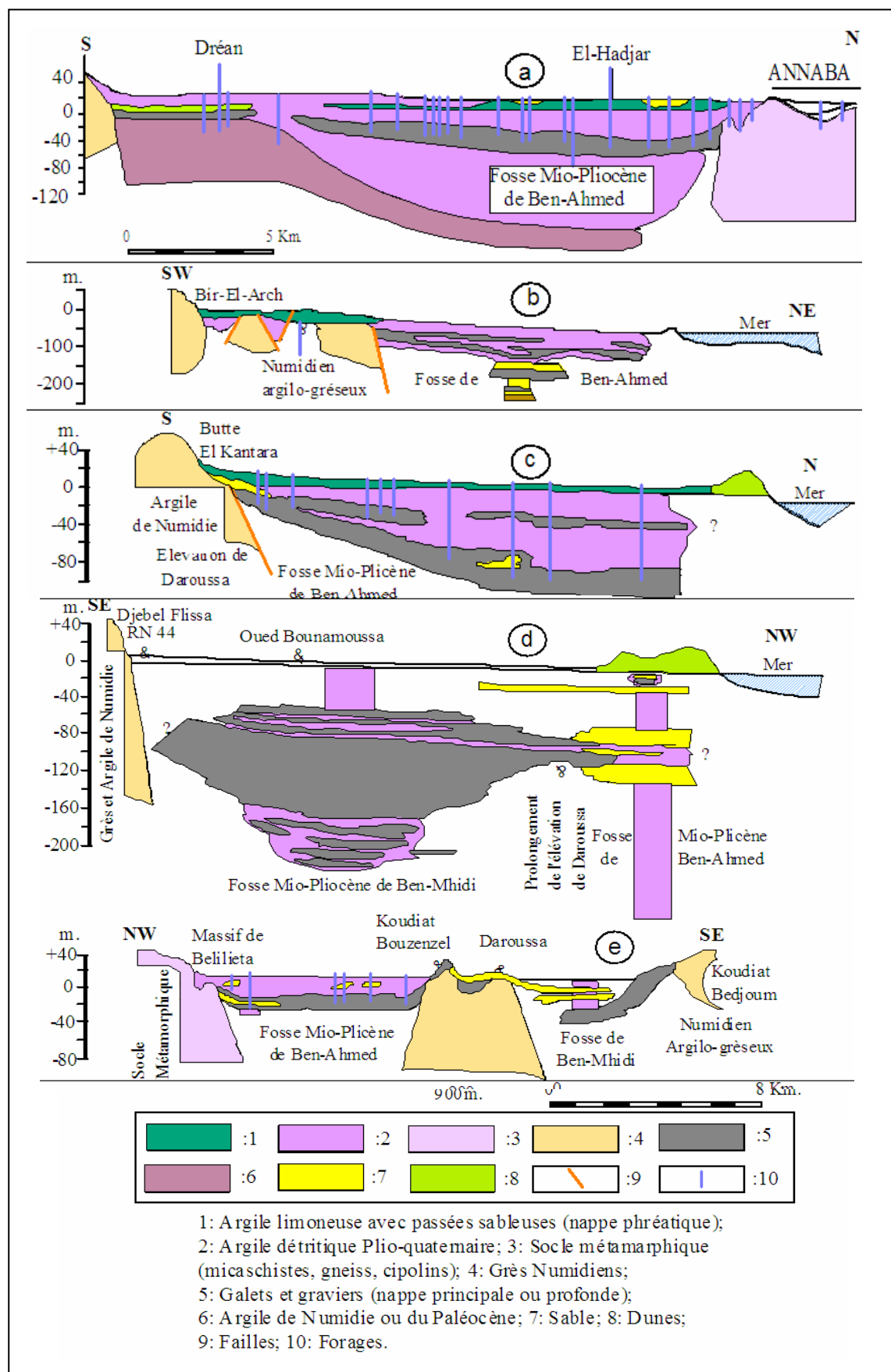


Fig. 5- Coupes au travers de la plaine de Annaba (ANRH, 1976, modifiées).

I.4.2.1- La nappe des sables fins superficiels (ou nappe superficielle) :

Cette nappe est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables. Des argiles grises compactes en constituent le substratum. La répartition des lentilles sableuses est très irrégulière et discontinue (fig. 5a à c). Ces lentilles sont néanmoins plus fréquentes à proximité de l'oued Seybouse, et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. La nappe phréatique est globalement libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de cette nappe peut atteindre 18 m (Fig. 6).

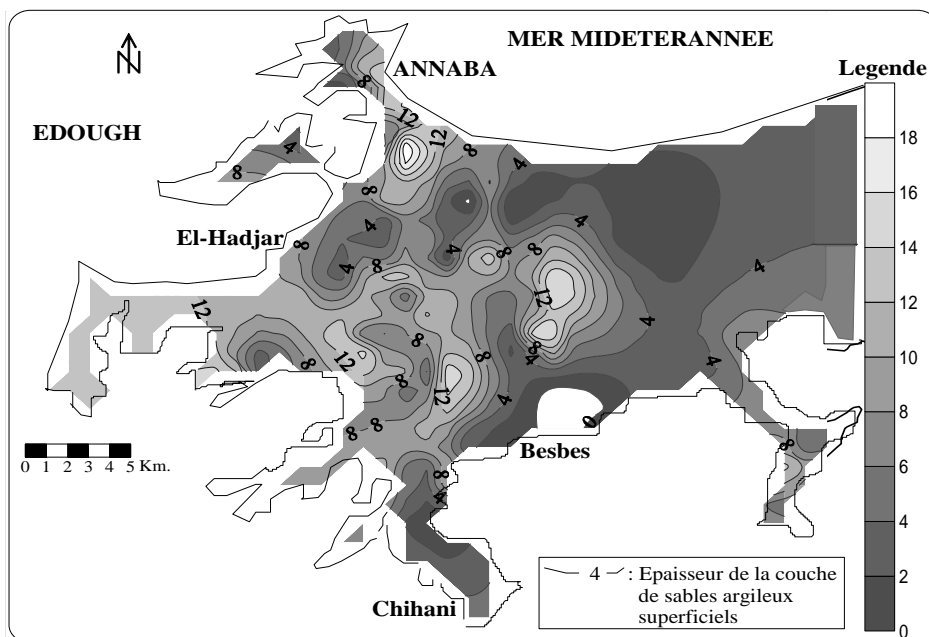


Fig. 6- Carte des isopaches de la nappe phréatique.

I.4.2.2- La nappe des graviers (ou nappe profonde) :

Les coupes de forage et les diagraphies montrent l'existence de plusieurs phases sédimentaires marquées par une alternance de couches grossières de graviers et galets et de couches argilo-sableuses. Cet empilement plus au moins régulier est lié au remplissage hétérogène des fosses de Ben Ahmed et de Ben M'hidi (fig. 5a à e). Les isolignes des cotes du toit (fig. 7) et du mur (fig. 8) révèlent un affleurement des niveaux graveleux au Sud de Dréan

et de Asfour. Ces niveaux se trouvent en effet à une profondeur de 8 à 14 m et plongent vers le Nord pour atteindre la cote de 100 m environ en bordure de mer (la minéralisation des eaux de cette partie de l'aquifère fait penser que cette subsidence se poursuit vers la mer). L'épaisseur des graviers et galets est très variable, elle passe en effet de quelques mètres en bordure ouest du système, à près de 25 m selon l'axe de la fosse de Ben-Ahmed, orientée Sud-Nord, puis elle diminue à moins de 10 m sur l'élévation de Daroussa (fig. 9).

Elle croît de nouveau à 80 voir 90 m selon l'axe de la fosse de Ben-M'Hidi d'orientation sud-ouest – nord-est. Entre la butte de Boukhadra et El-Khous, un autre niveau à éléments grossiers, de près de 8 m d'épaisseur, a été localisé à une profondeur de 35 à 40 m. En bordure des massifs numidiens de Bouteldja, l'épaisseur des graviers atteint près de 20 m (Djabri et al., 2000).

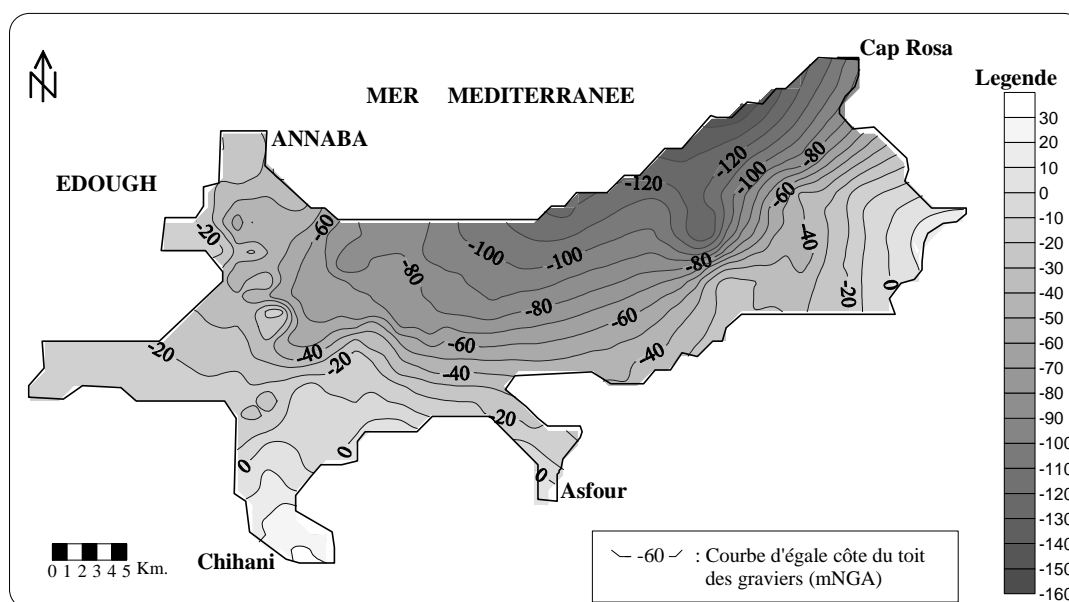


Fig. 7- Carte des isobathes du toit de la nappe des graviers.

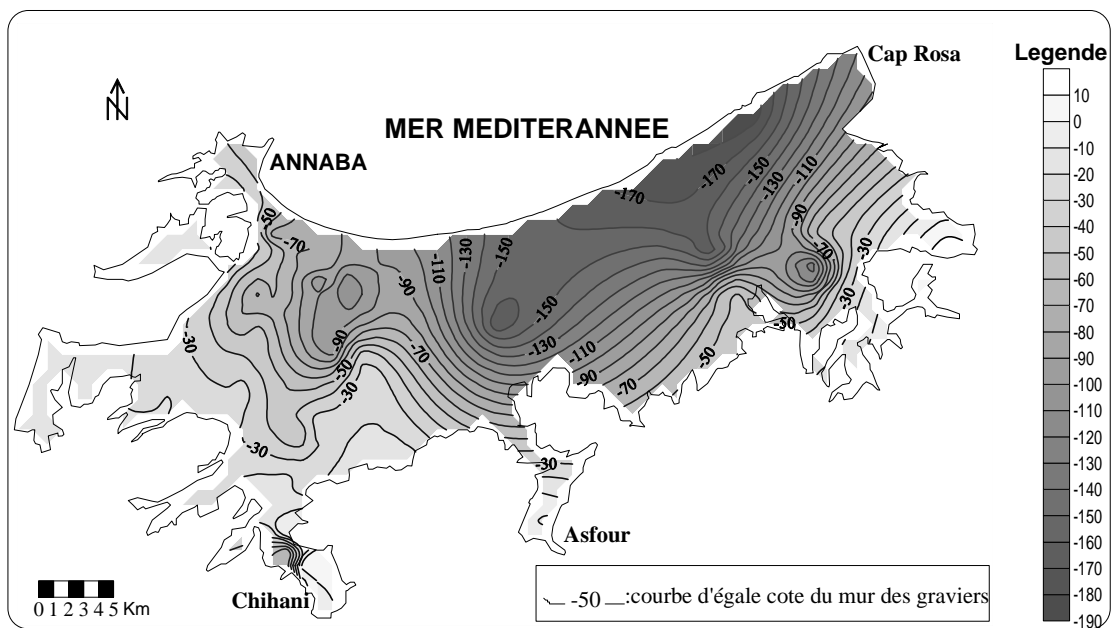


Fig. 8- Carte des isobathes du substratum de la couche de graviers.

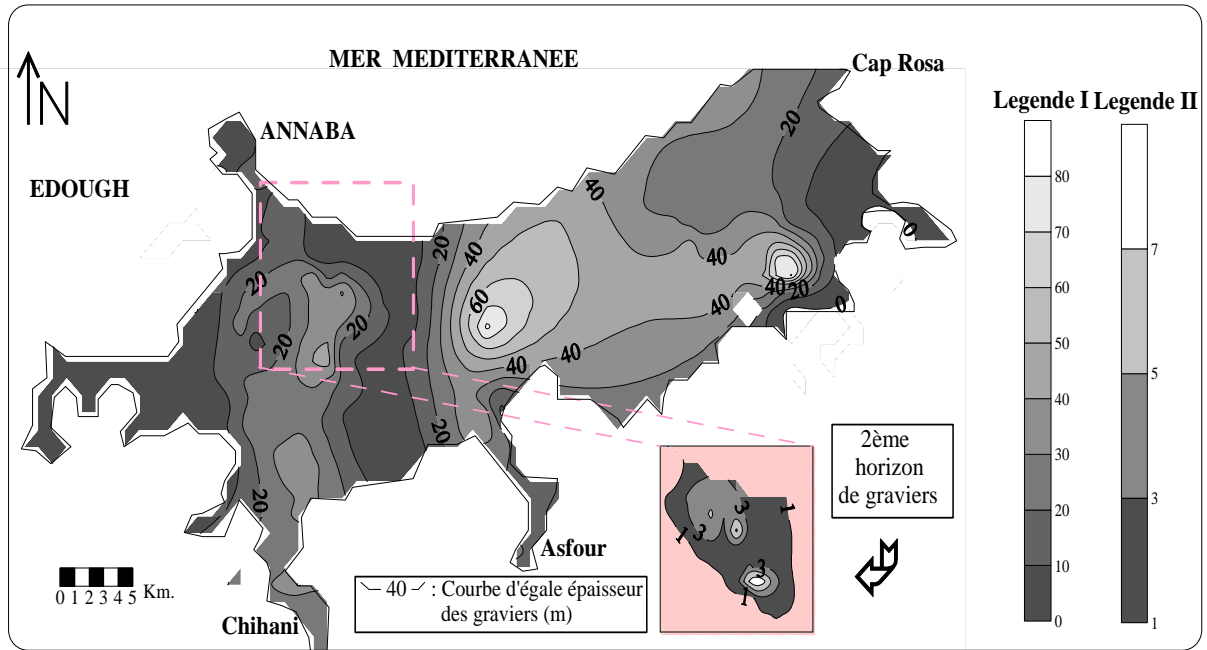


Fig. 9- Carte des isopaches des couches de graviers et galets.

Ces deux nappes sont généralement séparées par un horizon semi-perméable constitué d'argile sableuse, de silt, d'argile et de lit sableux. L'épaisseur de cette couche est variable ; elle passe de 0 m sur les bordures Sud et ouest à plus de 75 m dans la partie côtière de l'aquifère (fig. 10).

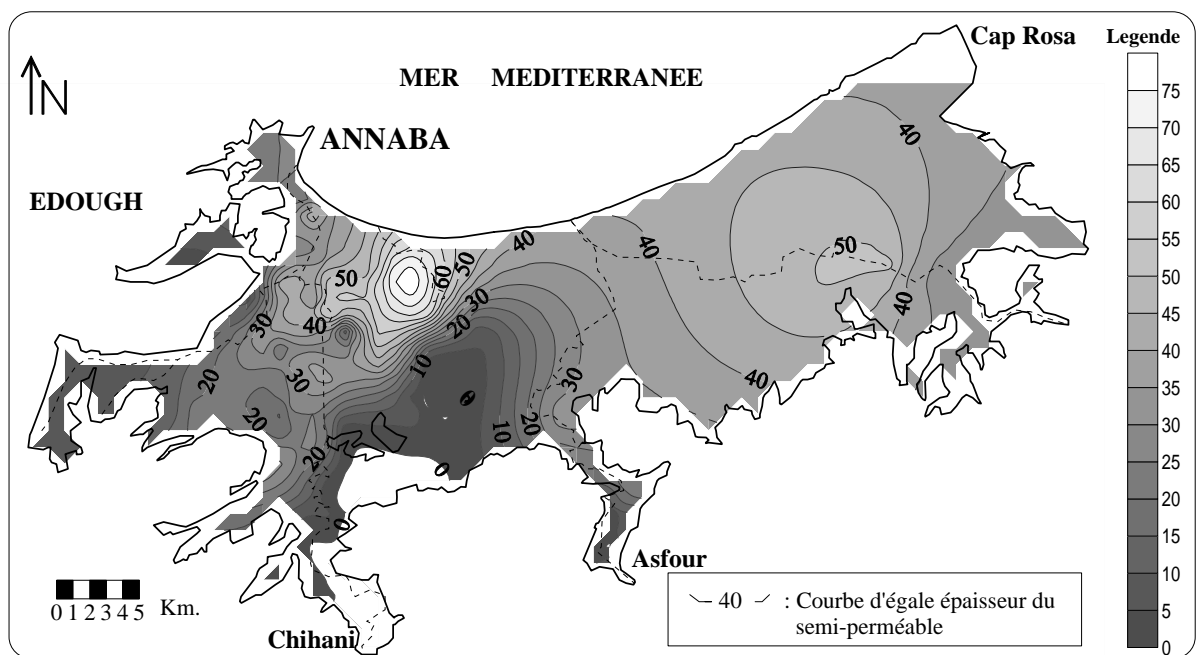


Fig. 10- Carte des isopaches du niveau semi-perméable.

Cette couche joue un rôle important dans le transfert hydraulique entre la nappe superficielle et les couches profondes. Elle joue également un rôle essentiel dans le transfert de la pollution de surface vers les nappes (Nafâa, 1985 ; Khérici, 1985 ; Khérici, 1993 ; Debièche, 2002 ; Hani, 2003).

I.5- Conclusion

La plaine de Annaba est constituée par des sédiments mio-plio-quaternaires comblant une zone d'effondrement. Les travaux réalisés dans la région ont montré qu'il existait deux fosses séparées par un haut-fond qui porte la butte de Daroussa :

- la fosse Ben-Ahmed, orientée S-N,
- la fosse Ben-M'hidi , orientée SW-NE.

Le remplissage de ces fosses comporte plusieurs horizons aquifères lenticulaires à continus sur toute l'étendue de la plaine de Annaba. Ces formations sont très variées tant par la dimension des grains que par la géométrie des couches conférant aux matériaux des propriétés hydrauliques différentes dans l'espace. Dans ce remplissage hétérogène on distingue 2 principales nappes; la nappe superficielle contenue dans les argiles sableuses et la nappe des graviers. Ces deux nappes sont largement exploitées par de nombreux ouvrages de captage destinés à l'alimentation des populations et pour répondre aux besoins de l'industrie et de l'agriculture. Cependant, l'évaluation des transferts hydrauliques à l'intérieur de ces bassins, à partir de la mesure ou de l'estimation des débits qu'ils soient entrants ou sortants, reste difficile à cerner. Pour ce faire, nous tenterons dans le chapitre II d'évaluer les principaux termes du bilan et d'appréhender l'hétérogénéité de la répartition spatiale et temporelle de la recharge des nappes.

Chapitre II : Caractéristiques Hydroclimatologiques

II.1- Introduction

La bonne connaissance des conditions climatiques de la zone d'étude joue un rôle majeur dans la compréhension de l'évolution des éléments chimiques, la protection et la résolution des problèmes de pollution au niveau de la nappe. Dans ce chapitre nous allons s'intéresser à l'étude de la climatologie de la zone d'étude et à l'hydrologie des eaux de surface (oued Seybouse et oued Meboudja) ;

Parmi les stations pluviométriques implantées dans la plaine de Annaba, on s'est contenté des données pluviométriques et des précipitations de la station des salines du fait de sa situation par rapport à la zone d'étude. Les données s'étalent sur la période de 1972 jusqu'à 2004.

II.2- Traitement des données climatologiques

II.2.1- Etude des précipitations et des températures :

La zone d'étude est caractérisée par un climat de type méditerranéen, son régime climatique dépend de deux paramètres principaux : la précipitation météorique et la température.

Les précipitations les températures mensuelles dans la station des salines sont représentées sur l'histogrammes (fig.11) suivant:

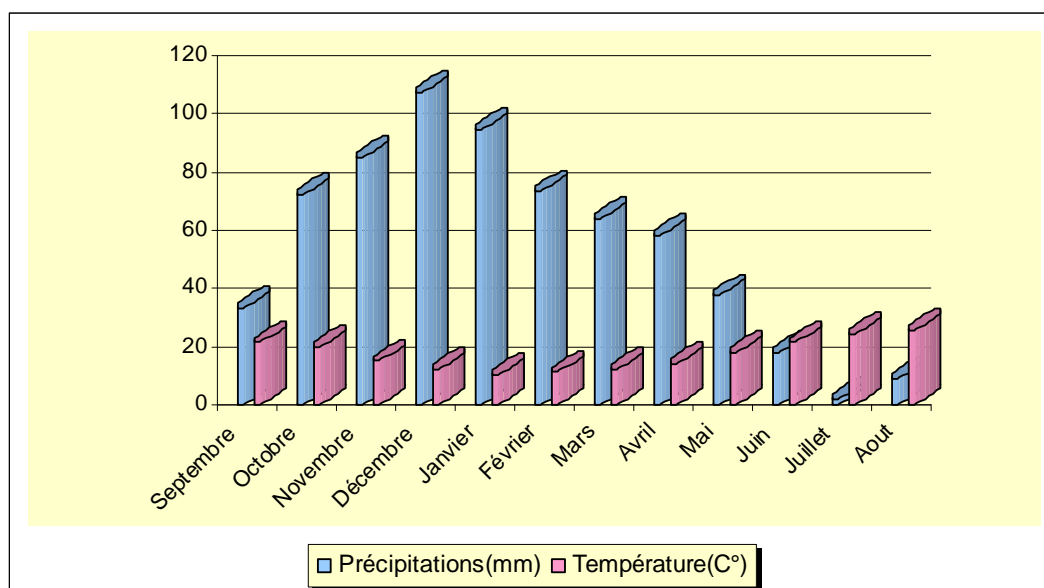


Fig. 11- Histogrammes précipitations - températures à la station des salines (1972-2004).

L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles (fig.11) donne un aperçu sur les variations mensuelles des précipitations dans la région d'étude. Décembre est le mois le plus pluvieux au niveau de cette station ou on a enregistré un maximum de l'ordre de 107.4mm, tandis que le mois de juillet est le mois le moins pluvieux auquel on marque un minimum de l'ordre de 4mm pour la station des salines.

L'histogramme des températures montre que la zone d'étude est caractérisée par un climat doux et humide en hiver et chaud et sec en été, ces caractéristiques indiquant un climat méditerranéen. Les moyennes mensuelles les plus élevées sont observées essentiellement pendant la période d'été (Juin – Septembre) avec des températures variant de 20 à 25,5°C. Par contre les températures les plus basses, de 10 à 12,5°C, sont observées pendant la période d'hiver (décembre à mars) avec un minimum pendant le mois de janvier (10,5°C). Les autres mois présentent des températures intermédiaires (14 à 20°C). Ces caractéristiques de la température d'un point de vue hydrochimique, nous indiquent que pendant la période d'été, vu les valeurs élevées de la température, ces dernières vont produire une évaporation de l'eau et en même temps une augmentation de la concentration des éléments chimiques dans la nappe.

II.2.2- L'humidité :

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de valeur saturante à la même température. Ce paramètre intervient comme coefficient de correction de l'évapotranspiration lorsqu'il est inférieur à 50 %. A la station des Salines (1974/2005), les moyennes mensuelles de l'humidité relative varient de 68.8 % en été (juillet) à 78 % en hiver (février). La moyenne annuelle étant de 75 % (tableau 1).

Tableau 1: Moyennes mensuelles de l'humidité relative à la station des Salines en % (1974-2004).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Moy.	72.6	74.2	77.6	76	76.5	78	76.8	75.7	75.1	72.1	68.8	72.5

(Moy. : moyenne des valeurs enregistrées à 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h).

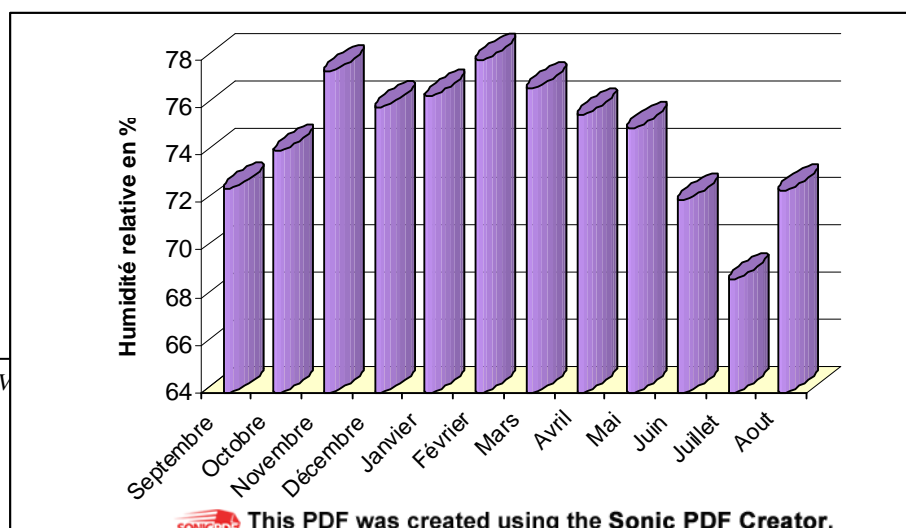


Fig. 12- Histogramme des moyennes mensuelles de l'humidité à la station des Salines en% (1974/2004).

II.2.3- Le vent :

Les vents ont un effet important sur les phénomènes d'évaporation, de précipitation et à un degré moindre sur les températures. À la région d'étude, les vents prédominants ont une direction NW-SE et leur vitesse moyenne est de 3.75 m/s (tableau 2).

Tableau 2 : Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station des Salines (1984/2004).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Moy.	3.65	3.75	4	3.78	3.64	3.28	3.63	3.94	3.65	3.75	4	3.78

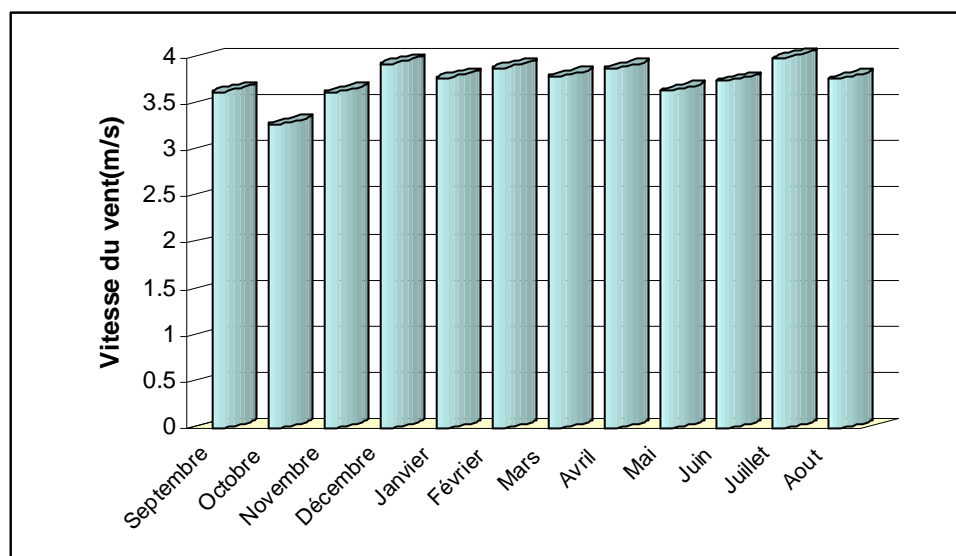


Fig. 13- Histogramme des moyennes mensuelles de la vitesse du vent (m/s) (1984/2004).

II.3. Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite

Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride, et vu les caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule a été appliquée. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum (Gaude 1976).

La méthode de Thornthwaite nous permet à partir des données de base (précipitation, température (T°C), le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i) de calculer l'évapotranspiration potentielle selon la relation suivante :

$$ETP \text{ (mm)} = 16 (10T/I)^a \cdot k \quad \text{Ou} \quad I = \sum i = \sum (T/5)^{1.514} \quad \text{et} \quad a = 0.016 I + 0.5$$

Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

- si pour un mois $P \geq ETP$ on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste (P-ETR) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 m) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (WS) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

- si $P < ETP$, la valeur de ETR = P + RFU, jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

Le calcul de ces paramètres est présenté dans le tableau 3.

Tableau 3 : Bilan de l'eau selon C.W Thornthwaite, station des salines (1972-2004)

Mois paramètres	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P (mm)	34.35	66.58	93.6	108.06	100.96	77.83	65.3	59.65	37.29	13.88	2.83	10.05	670.38
T (°c)	23.49	19.7	15.36	12.53	11.54	11.59	13.11	14.91	18.27	21.89	25.01	25.46	17.73
i	10.18	7.82	5.38	3.96	3.5	3.52	4.24	5.14	6.98	9.16	11.18	11.49	82.55
K	1.05	0.91	0.75	0.7	0.73	0.75	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	
ETP (mm)	112.69	70.9	37.15	23.93	21.48	22.25	37.87	53.96	89.66	125.54	159.99	154.09	
ETR (mm)	34.35	66.58	37.15	23.93	21.48	22.25	37.87	53.96	89.66	61.51	2.83	10.05	461.62
RFU (mm)	0	0	56.45	100	100	100	100	100	47.63	0	0	0	
Excedent (mm)	0	0	0	40.58	79.48	55.58	27.43	5.69	0	0	0	0	208.76
Déficit (mm)	78.34	4.32	0	0	0	0	0	0	0	64.03	157.16	144.04	447.89

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Afin d'illustrer les résultats obtenus, une représentation graphique est donnée sur la figure 14.

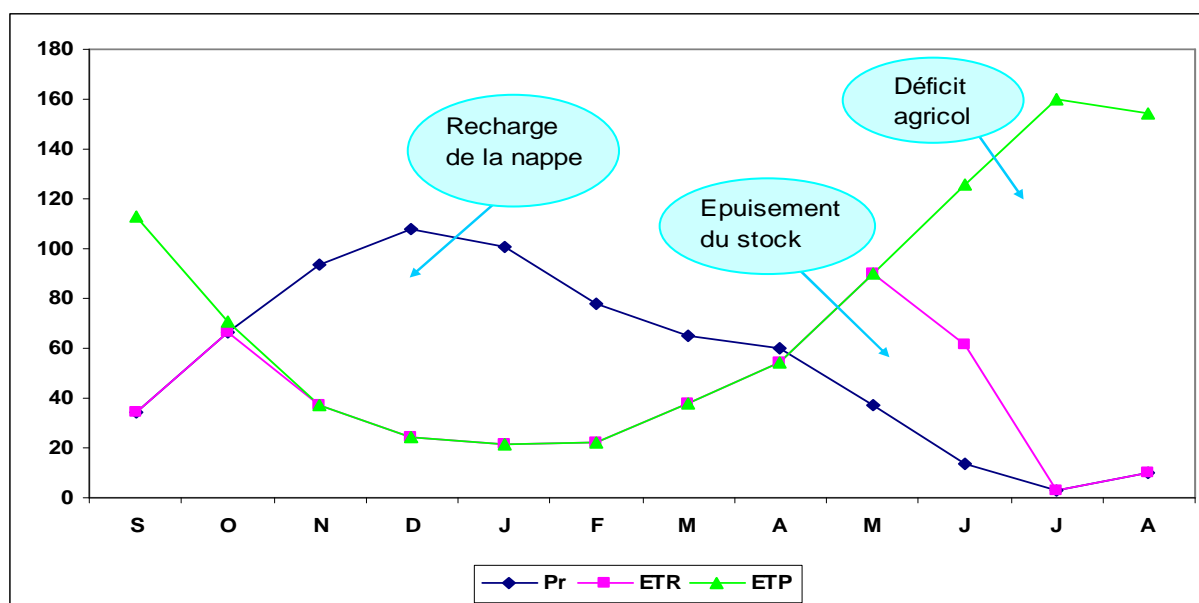


Fig. 14- Représentation graphique du bilan de Thornthwaite, station des salines (1972-2004).

Ce graphe montre que l'évapotranspiration maximum a été observée pendant le mois de juillet pour une valeur 159.9 mm, ce qui produit un déficit agricole et nécessite une irrigation pour les zones cultures. Par contre, on observe une recharge de la nappe à partir du mois de novembre, pour atteindre son maximum 100 mm.mois⁻¹ jusqu'au mois d'avril, Lorsque la recharge dépasse la RFU, le surplus d'eau va partir soit sous forme du ruissellement, soit sous forme d'infiltration vers la nappe.

II.4- Hydrologie de surface

Cette étude est nécessaire pour comprendre l'évolution chimique des eaux de l'oued ainsi que celles des berges. Elle consiste à déterminer l'origine des différents apports des oueds, les différents paramètres qui influent sur les variations du débit et la relation oued-nappe.

La station de Mirbek représente la seule station de jaugeage au niveau de la zone d'étude (fig.15), elle est située sur l'oued Seybouse. Cette dernière va servir de référence dans notre étude.

II.4.1- Description de l'oued Seybouse

Le bassin de l'oued Seybouse est l'un des plus grands bassins hydrographiques en Algérie, sa superficie est de l'ordre de 6471 km². L'oued prend naissance dans les hautes plaines de l'Haracta et de Sallaoua au niveau de Aïn Abid et Sedrata et se termine dans la mer Méditerranée au nord, après un parcours de 160 km (fig.15B).

La zone d'étude est située à l'aval de l'oued Seybouse, entre la ville de Dréan et la mer Méditerranée (fig. 15C), elle comprend deux oueds :

- la basse vallée de l'oued Seybouse ;
- l'oued Meboudja, le dernier affluent de l'oued Seybouse, qui constitue le collecteur des eaux du lac Fetzara et draine une superficie de 203 km².

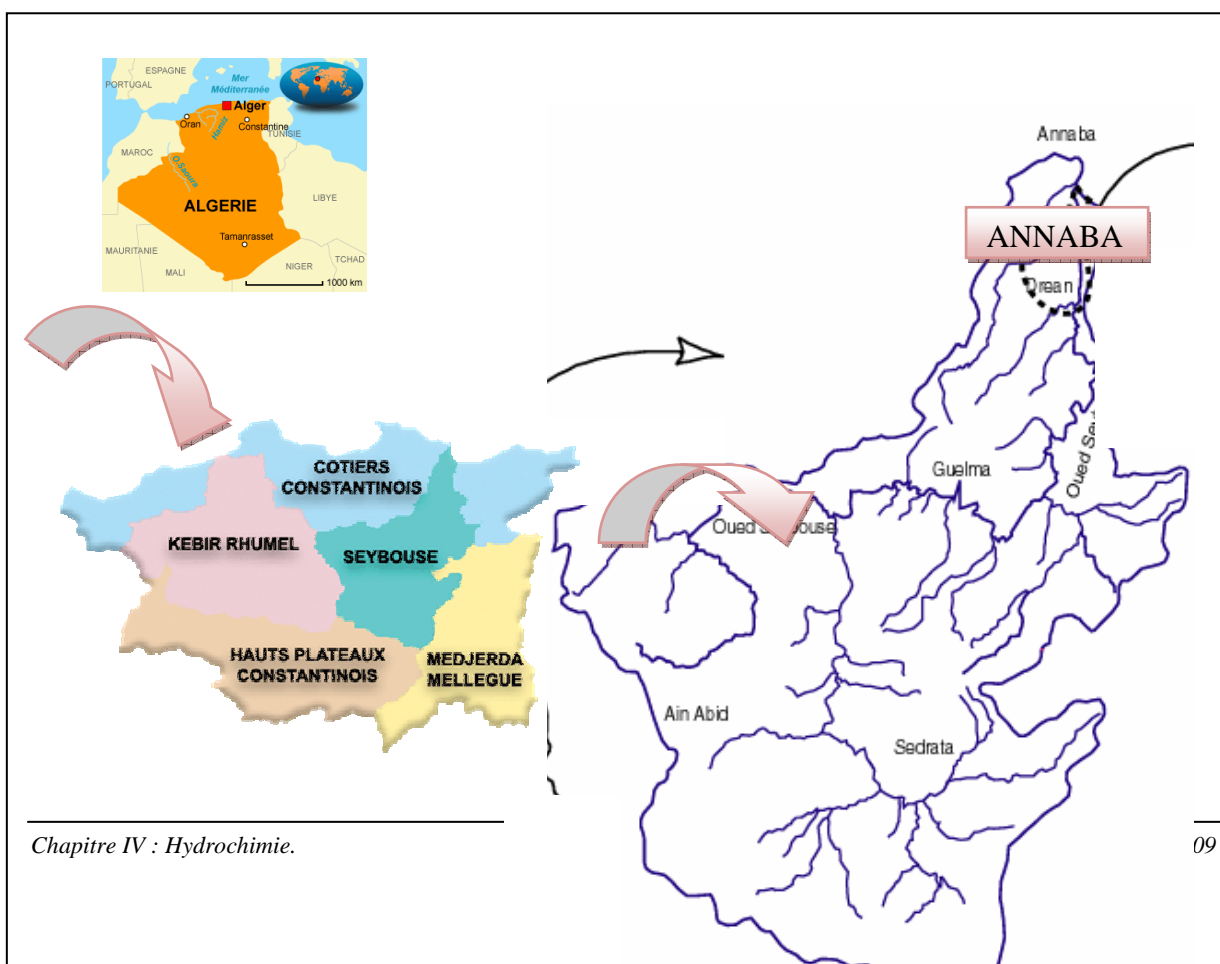


Fig. 15 - Situation du bassin de la Seybouse.

II.4.2- Evolution du débit en fonction de la pluie

Le débit de l'oued Seybouse dans la majorité des cas varie entre 0 et 100 m³.s⁻¹, mais pendant les périodes de fortes averses, il atteint des valeurs de l'ordre de 630 m³.s⁻¹ (observées le 1/1/1985, selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Annaba). Le débit de l'oued Meboudja est moins important que celui de l'oued Seybouse (aucune station de jaugeage n'a été installée au niveau de cet oued), une estimation de son débit par jaugeage au flotteur, pendant la période du suivi (février à décembre 1999) a donné des valeurs qui varient entre 1 et 20 m³.s⁻¹.

Une classification de débit a été effectuée selon le nombre des observations au niveau de la station de Mirbeck (Oued Seybouse) pendant la période de 1980 à 1999. Trois classes de débit sont observées (tableau 4).

Tableau 4 : Classification du débit en fonction du nombre d'observations

Class du débit (m ³ /s)	Nbre d'observations	Pourcentage (%)
0 - 10	66	56
10 - 100	23	32
100 - 650	6	10

La première classe montre une dominance de 58 % pour des débits inférieurs à 10 m³.s⁻¹, elle caractérise les périodes les moins pluvieuses (période d'été et les périodes de sécheresse). La

deuxième classe est présentée par un pourcentage de 32 % pour les débits qui varient entre 10 et 100 m³.s⁻¹, ces débits sont observés pendant les périodes pluvieuses. Enfin un pourcentage de 10 % pour les forts débits qui varient entre 100 et 650 m³.s⁻¹, ces derniers représentent les périodes des averses ou des fortes pluies qui tombent sur l'ensemble du bassin, ce qui produit dans la plupart des cas des inondations au niveau des terrains qui se situent près de l'oued. Cette dernière favorise une recharge directe de la nappe par les eaux de l'oued et une modification rapide de la chimie des eaux souterraines.

II.4.3- Effet des variations spatiales de la précipitation sur le débit de l'oued

Pour montrer ce phénomène, on a étudié les variations du débit de l'oued Seybouse au niveau de la station de Mirbeck en fonction de la hauteur mensuelle de précipitations au niveau de deux stations : l'une à l'aval de l'oued Seybouse (station de Pont Bouchet) et l'autre à l'amont de l'oued (station de Aïn Makhoulf). Les données utilisées sont celles de l'ANRH (Annaba), elles sont réparties sur la période de 1980 à 1999 avec des mesures discontinues du débit (fig. 16A).

Les variations spatiales de la hauteur des pluies pendant la période d'octobre 1984 à mai 1985, montrent bien l'effet sur la variation du débit de l'oued (tableau 5).

Tableau 5 : Evolution du débit en fonction de la précipitation

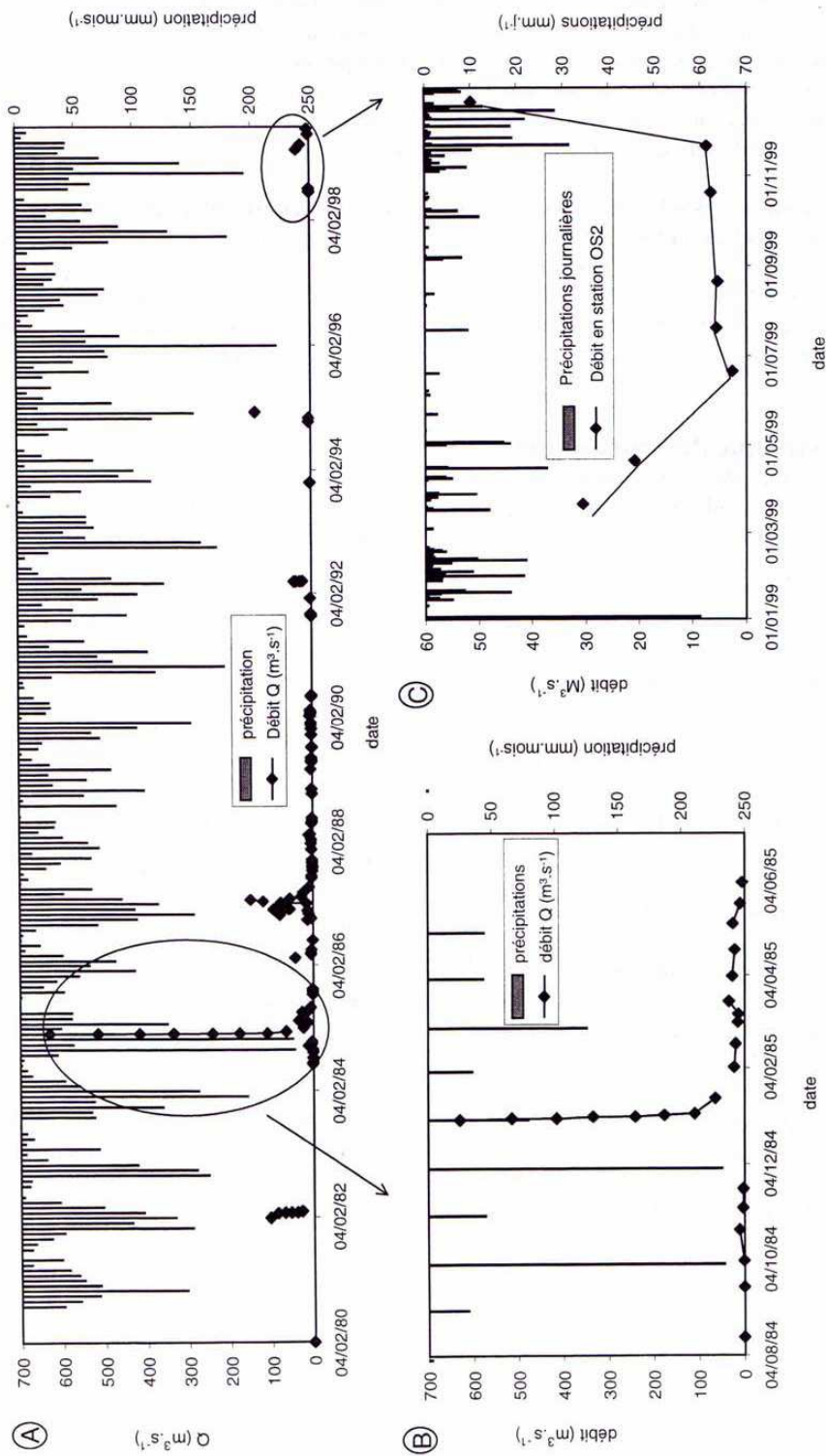
Date	Précipitations mensuelles (mm.mois)		Débit (m ³ /s)
	Pont Bouchet	Ain Makhoulf	Mirbek
OCT-84	234.3	53	0.492
Nov-84	45.1	16	2.685
Déc-84	232.3	257.5	non.mesurable
Jan-85	79.4	38.5	630.4
Fév-85	34.6	39	22.52
Mar-85	125.4	83	14.56
Avr-85	43.7	34.5	27.28
Mai-85	44.1	48	25.88

L'observation de l'épisode 1 (fig.16B), montre que les pluies locales ne produisent pas de crues importantes au niveau de l'oued, ce cas a été observé pendant le mois d'octobre 1984 où une averse a été enregistrée seulement à l'aval de l'oued (234 mm au pont Bouchet et 53 mm au niveau de Ain Makhoulf) et a produit seulement un débit de 2,7 m³.s⁻¹. Par contre les pluies de décembre 1984 qui sont tombées sur tout le bassin versant (232 mm à la station Pont Bouchet et 257 mm à la station de Ain Makhoulf), ont produit un débit de l'ordre de 630 m³.s⁻¹ au mois de Janvier 1985.

Cette différence de débit entre les deux périodes nous montre que le débit des oueds est lié plus aux apports de l'ensemble du bassin versant, à la hauteur de précipitations, à la durée et à la répartition spatiale des précipitations. La composition chimique des eaux de l'oued sera également liée aux différentes formations géologiques parcourues par les eaux de surface et à l'importance du débit des rejets par rapport au débit de l'oued. Pendant la période des averses ou des fortes pluies, la chimie des eaux des oueds sera diluée par les eaux des pluies.

II.4.4- Les variations mensuelles du débit en fonction de la précipitation journalière

Un suivi mensuel du débit de l'oued a été effectué au cours de l'année 1999 (fig.16C), ce dernier montre que les variations saisonnières, pendant la période des hautes eaux (décembre - avril) sont importantes (10 à 50 m³.s⁻¹), cela produit une dilution des eaux de l'oued. Par contre pendant la période des basses eaux (juin - novembre) le débit est faible (0 à 10 m³.s⁻¹), ce qui sous l'effet des rejets et de l'évaporation va jouer sur l'augmentation des concentrations des différents éléments chimiques.



Evolution du débit au niveau de l'oued Seybouse (station Merbeck SO2) en fonction de la précipitation (station Pont Bouchet MO3)

Fig. 16 - Evolution du débit de l'oued Seybouse en fonction de la précipitation.

II.5-Conclusion

La région d'étude compte parmi les régions les plus arrosées de l'Algérie .elle est soumise à un climat méditerranéen, doux et humide en hiver et chaud et sec en été, ce qui produit des modifications périodiques de la chimie des eaux par effet de dilution pendant les périodes pluvieuses et par l'effet de l'évaporation pendant les périodes sèches. Le bilan hydrologique de la région présente les caractéristiques suivantes: l'évapotranspiration représente 69% de la précipitation, le ruissellement 15% et l'infiltration 16%.

Les eaux de surfaces présentent des débits d'écoulement très variables, dépendant de la hauteur des précipitations, de sa durée et de sa répartition spatiale au niveau du bassin versant.

Chapitre III : CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DU SYSTEME AQUIFERE DE ANNABA-BOUTELDJA

III.1- Introduction

Le remplissage mio-plio-quadernaire décrit précédemment renferme des ressources hydriques assez importantes. Cependant l'accroissement des besoins en eau pour l'alimentation des populations et pour satisfaire les activités industrielles et agricoles a conduit les services de l'hydraulique à intensifier les prélèvements au niveau des principaux champs captant (de Bouteldja, des Salines et d'El-Hadjar). Cette situation a eu pour conséquence une chute des niveaux des nappes, une diminution des débits des sources et une méconnaissance du fonctionnement hydrodynamique des aquifères sur de vastes zones (Nafaa, 1985 ; Hani, 2003).

Dans cette étude, l'utilisation des méthodes statistique et géostatistique est apparue comme un puissant moyen pour l'identification des zones les plus favorables à l'implantation des ouvrages de captage et pour mettre en évidence l'influence de la structure profonde sur la répartition des caractéristiques physiques des principaux aquifères.

III.2- Interprétation des données de pompage d'essai

III.2.1- La nappe superficielle

Grâce aux observations de terrain ou des résultats acquis lors de différentes études (Khérici, 1993 ; Djabri, 1996 et Debièche, 2002), il est démontré que l'aquifère phréatique des plaines de Annaba et de Bouteldja présente des caractéristiques hydrodynamiques médiocres et ne peut être exploitée que pour l'alimentation de quelques hameaux ou pour l'irrigation de petites parcelles de terrain. Pour donner un ordre de grandeur des principales caractéristiques hydrodynamiques de cet aquifère, nous reprenons ici les résultats des pompages d'essai réalisés dans la région située au Sud-Est des Salines, l'un dans la zone à dominante argileuse, l'autre dans une zone à dominante sableuse. Les résultats sont consignés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Résultats de deux pompages d'essai effectués dans la nappe phréatique.

Coordonnées		Transmissivité ($m^2.s^{-1}$)	Coefficient d'emmagasinement	Epaisseur de la nappe (m)	Perméabilité ($m.s^{-1}$)
X	Y				
957.150	401.550	2.10^{-6}	?	5	4.10^{-7}
957.250	399.800	8.10^{-5}	2 %	5	$1.6.10^{-5}$

Ailleurs, des estimations ont permis d'obtenir des ordres de grandeur de la transmissivité. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Estimation des transmissivités de la nappe phréatique ($m^2.s^{-1}$).

Zone	Epaisseur nappe (m)	Dominante de la formation		sablo-argileuse à passées sableuses
		Argileuse	sablo-argileuse	
A	4	$9.2.10^{-7} < T < 14.10^{-5}$	$1.1.10^{-5} < T < 9.2.10^{-5}$	-
B	4	$2.3.10^{-6} < T < 1.2.10^{-5}$	$1.1.10^{-5} < T < 2.3.10^{-5}$	$4.4.10^{-5}$
C	2	$2.2.10^{-6}$	-	-
D	1	$5.8.10^{-7} < T < 3.10^{-6}$	$3.5.10^{-6} < T < 4.6.10^{-6}$	$1.1.10^{-5} < T < 2.2.10^{-5}$

III.2.2- Les nappes des graviers et des sables dunaires

Le dépouillement de 105 pompages d'essai effectués dans les forages a permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques des principaux horizons aquifères. Les données proviennent des services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) ainsi que des Directions d'Hydraulique des Wilaya d'Annaba et d'El-Tarf. Les points de mesure sont particulièrement nombreux le long de l'oued Seybouse ainsi que dans la partie orientale du massif dunaire de Bouteldja (fig. 17). L'interprétation des données de pompages d'essai a été effectué en tenant compte des particularités hydrogéologiques induites par l'hétérogénéité du milieu (alimentation à partir d'un plan d'eau, barrière étanche, drainance à partir d'aquifère secondaire selon le schéma de Hantush, égouttement selon le modèle de Boulton, etc...) (Hantush and Jacob, 1955 ; Hantush, 1956 ; 1964 ; Boulton, 1963). Les valeurs douteuses déduites de l'interprétation de pompages d'essais défectueux (débits variables, air-lift, mesures erronées...) ont été éliminées. Dans la nappe des graviers les valeurs de transmissivité les plus élevées sont situées le long de la Seybouse et les plus faibles à l'Ouest

dans la région d'El-Kerma et à l'Est vers les marécages de Mekrada. Dans le massif dunaire, les transmissivités varient de 3.10^{-5} à 1.10^{-2} m²/s.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont en moyenne de 11.5 % pour les sables dunaires et correspondent à une nappe libre. Pour la nappe captive des graviers, elles varient de 10^{-4} à 10^{-3} dans le secteur de Dréan-Chihani où elle devient libre.

Le dépouillement des données a également permis de définir la perméabilité de l'horizon semi-perméable qui varie de 10^{-8} à 10^{-7} m/s.

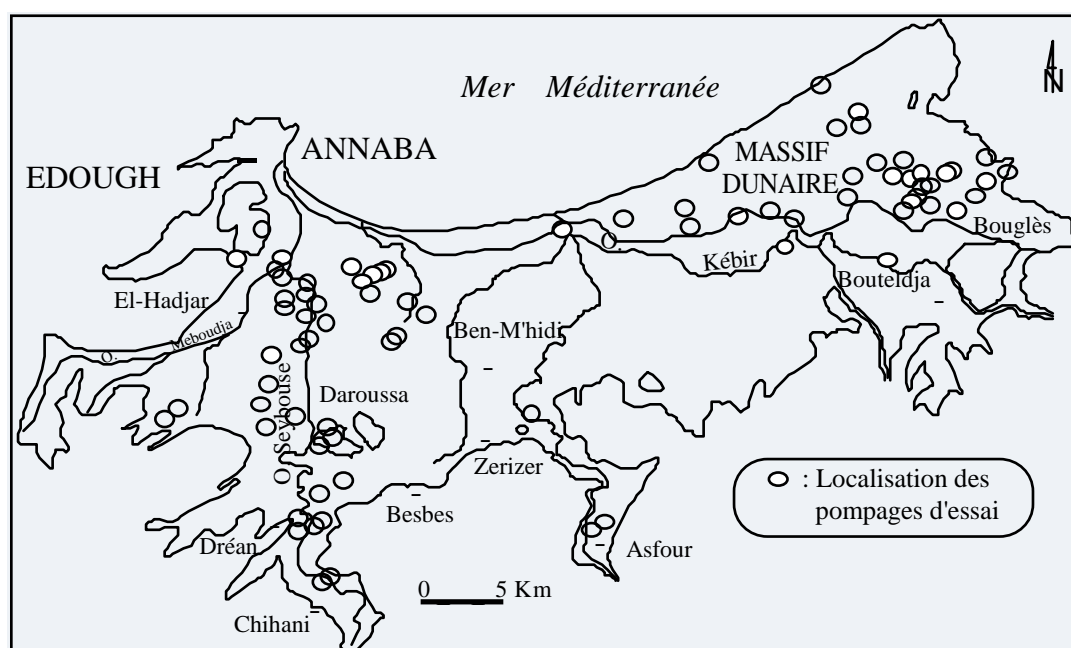


Fig. 17- Localisation des dispositifs des pompages d'essai dans la région d'Annaba – Bouteldja.

1 : Alluvions récentes et actuelles ; 2 : Dunes; 3 : Alluvions anciennes; 4 : Marécage ou lac ; 5 : Grés et argile numidiens ; 6 : Formations métamorphiques ; 7 : Faille ; 8 : Pompages d'essai ; 9 : Axe des fosses ; 2 : Tracé de coupe.

III.3- Analyse et identification des modalités de transferts hydrauliques

Le dépouillement et l'analyse des données de pompages d'essai effectués dans les forages captant les nappes des graviers et des sables dunaires de Bouteldja ont permis de constituer une base de données assez importante. Elle a permis également de définir les principales modalités de transfert de débit dans le système aquifère (Djabri et al., 2000). Les différents schémas hydrodynamiques dans ce système peuvent être de plusieurs types :

- Dans la région de Dréan, où les niveaux de graviers sont peu profonds (14 m), l'apparition d'un début de palier sur les courbes de descente dans le forage (fig. 18A) et dans le piézomètre (fig. 18B) indique un phénomène d'alimentation de la nappe des graviers par égouttement des alluvions de la Seybouse. Le niveau de la nappe au repos se trouve en effet à 9.72 m du sol, soit approximativement à une côte proche du niveau piézométrique des alluvions de la Seybouse.
- Ce type de schéma est aussi observé dans le massif de Bouteldja où l'hétérogénéité granulométrique des sables, plus fins dans la partie supérieure, entraîne l'apparition d'un palier suivi par un léger accroissement des rabattements typique du schéma de Boulton (fig. 18C). En effet, il n'existe pas entre les sables fins à moyens superficiels et les sables grossiers de couche semi-perméable. La faible durée de l'essai (24 heures) n'a point permis d'accéder à la période de la troisième phase où un accroissement des rabattements se manifeste à nouveau comme dans le cas théorique de l'égouttement répondant au schéma de Boulton.
- Dans le secteur central de la plaine de Annaba, l'horizon des graviers est captif sous une couche d'argile épaisse de 26 m. L'interprétation des données de pompage, observées sur le piézomètre de la figure 24, montre un ajustement parfait à la courbe standard de Theis et permet d'obtenir des valeurs de transmissivité et de coefficient d'emménagement identiques à celles calculées à partir de la droite de Jacob et à l'aide d'un programme automatique basée sur une procédure itérative (Mania, 1978) (tableau 8).

Tableau 8 : Résultats du pompage effectué dans le secteur central de la plaine de Annaba.

Paramètres	Méthode			Méthode automatique (6 ^{ème} itération)
	Descente (Jacob)	Remontée (Jacob)	Descente (Theis)	
Transmissivité ($m^2 \cdot s^{-1}$)	3.5×10^{-3}	4.0×10^{-3}	3.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}
Coefficient d'emménagement	3.6×10^{-4}	-	4.3×10^{-4}	4.0×10^{-4}

- Enfin, à l'Ouest d'El Hadjar, l'aquifère des graviers est alimenté à travers les argiles sableuses par une épaisse couche de sables alluvionnaires qui joue le rôle du niveau d'eau constant du schéma de Hantush. La nappe superficielle serait dans ce cas alimentée de manière constante par l'oued Meboudja. Les courbes bilogarithmiques des figures 18E et 18F montrent une superposition parfaite des points expérimentaux à l'une des courbes de Hantush.

D'une manière générale, l'interprétation d'un nombre considérable de données de pompage d'essai, selon des schémas analytiques très variés, a permis de constituer un stock d'information très dense. Elle a permis également de mettre en évidence l'existence d'hétérogénéités assez importantes dues en général aux transferts de débit issus des oueds, de la drainance d'aquifères annexes et de l'égouttement des niveaux aquifères superficiels. Néanmoins, la concentration des pompages d'essai au niveau de certains secteurs réputés favorables (champs de captage de Bouteldja, des Salines, d'Allélick et de Pont Boucher) a eu des conséquences négatives sur l'équilibre des aquifères (apparition de zones de dépression en particulier) et une méconnaissance relative des caractéristiques hydrodynamiques sur de vastes zones (Nafaa, 1985).

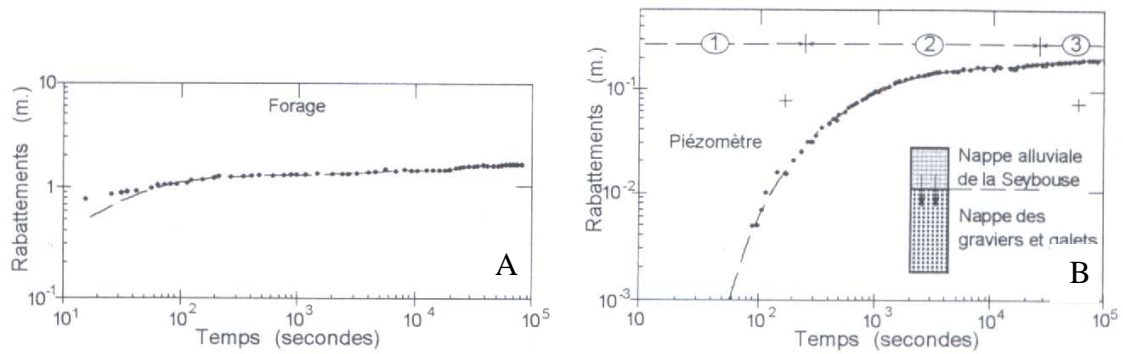


Fig. 18 A - B – Pompage d’essai dans la nappe des graviers dans la région de Dréan-
Graphique de descente :A) Dans le forage ;B) dans le piézomètre.

Legende : 1 : La baisse très rapide des niveaux ne permet pas à l’horizon supérieur de « s’égoutter » ;
2 : drainage par égouttement ; 3 : la baisse de niveau dans l’horizon perméable est suffisamment petite que le niveau supérieur le suive très exactement.

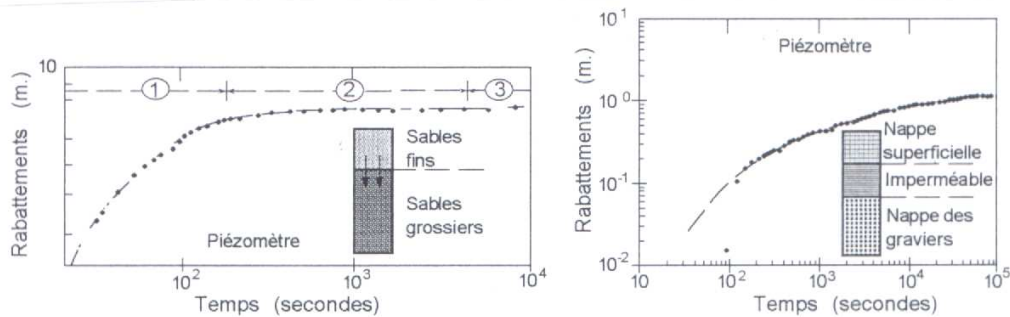


Fig. 18C – Pompage d’essai dans l’aquifère
sableux de Bouteldja.

Fig. 18D – Pompage d’essai dans l’aquifère
des graviers dans le secteur central de la plaine
de Annaba.

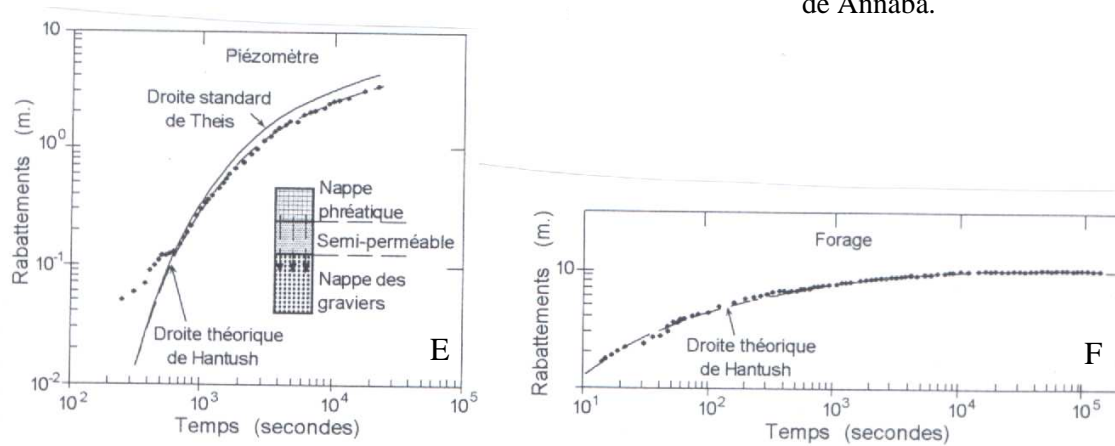


Fig. 18 E-F – Pompage d’essai dans la nappe des graviers dans le secteur ouest d’El-
Hadjar. E) bilogarithmique dans le piézomètre ; F) bilogarithmique dans le forage.

III.4- Cartographie des transmissivités

Le krigeage ordinaire des transmissivités a été effectué aux nœuds des mailles carrées de 1km de côté. La carte des transmissivités krigées (Hani, 2003) (fig. 19) montre:

- un secteur de fortes valeurs correspondant à deux zones bien distinctes. La première se situe le long de la vallée de la Seybouse et coïncide avec l'axe de la fosse de Ben-Ahmed. Les coupes géologiques des forages permettent de reconnaître dans ce secteur, deux niveaux de graviers uniformes et dépourvus de matériaux fins. Le premier, reconnu par les forages à une profondeur de 35 m, présente une épaisseur de près de 8 m tandis que le second, plus profond, peut atteindre 40 m d'épaisseur au milieu de la fosse. Il convient également de remarquer que le remplissage de la fosse par des sédiments plio-quadernaires grossiers a permis la formation d'une importante zone d'accumulation à écoulement préférentiel (voir carte piézométrique). La seconde zone se localise dans la partie orientale du massif dunaire. Dans ce secteur, les sables éoliens qui surmontent les alluvions de la fosse d'effondrement de Ben-Mhidi, présentent des caractéristiques hydrodynamiques exceptionnelles.
- Les plus faibles transmissivités sont situées à l'Est de Ben-M'hidi et s'étendent sur toute la partie littorale du massif dunaire.

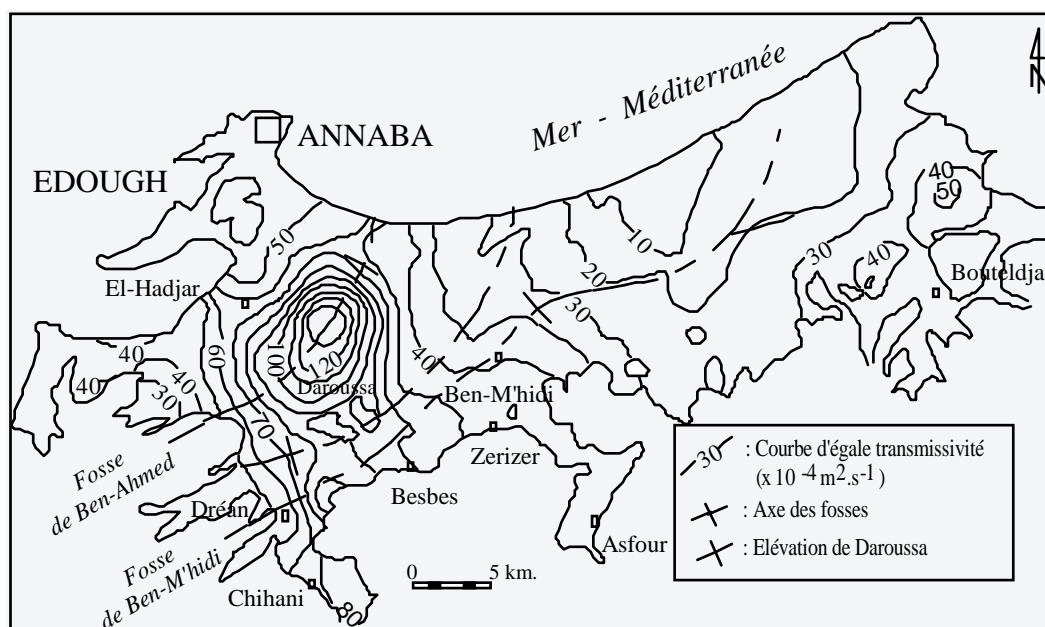


Fig. 19 - Carte des transmissivités krigées.

III.5- Conclusions

L'analyse des paramètres hydrodynamiques dans le système aquifère de Annaba-Bouteldja, a permis d'identifier trois classes ;

- la première, correspondant aux plus faibles valeurs de transmissivité, de débit spécifique et de perméabilité, est formée par les forages captant les sables à passées graveleuses de la bordure Ouest de la plaine de Annaba et surtout les formations dunaires ;
- la deuxième, formée par les forages caractérisés par des valeurs intermédiaires, est localisée dans les secteurs de contact nappe dunaire-nappe des graviers à l'Est et sur les flancs de la fosse de Ben-Ahmed à l'Ouest ;
- enfin, la troisième caractérisée par les plus fortes valeurs, se localise le long de la vallée de la Seybouse et à l'Est dans la partie orientale du massif dunaire où les sables éoliens surmontent les dépôts alluviaux de la fosse d'effondrement de Ben-Mhidi.

Si l'on pose le tracé des structures tectoniques sur la carte des transmissivités déduites du krigeage, on s'aperçoit que la distribution spatiale des deux objets l'un par rapport à l'autre, n'est pas aléatoire. En effet, les zones les plus transmissives ($7 \cdot 10^{-3}$ à $1.3 \cdot 10^{-2}$) coïncide avec l'axe de la fosse de Ben-Ahmed. Les coupes géologiques des forages permettent de reconnaître dans ce secteur, deux niveaux de graviers uniformes et dépourvus de matériaux fins. Le premier, reconnu par les forages à une profondeur de 35m, présente une épaisseur de près de 8 m tandis que le second, plus profond, peut atteindre 40m d'épaisseur au milieu de la fosse. Il convient également de remarquer que le remplissage de la fosse par des sédiments plio-quaternaires grossiers a permis la formation d'une importante zone d'accumulation à écoulement préférentiel. La seconde zone de bonne transmissivité se localise dans la partie orientale du massif dunaire. Dans ce secteur, l'épaisseur des dépôts alluviaux de la fosse d'effondrement de Ben-Mhidi peut atteindre près de 70m. Entre ces deux zones d'accumulation, le secteur situé sur le prolongement de la butte de Daroussa s'est vraisemblablement trouvé à l'abri des apports alluviaux d'où l'absence de niveaux grossiers

de remplissage. Cette situation se traduit par des valeurs de transmissivité relativement plus faibles. Les cartes obtenues peuvent être utilisées aussi bien pour localiser les zones favorables à l'implantation de captage des eaux souterraines, que pour aider au calage des modèles de simulation des écoulements souterrains et de transferts de polluants. Le chapitre IV consacrée à l'analyse des facteurs influençant la chimie des eaux des différents horizons aquifères de la région permettra à cet effet d'identifier les zones vulnérables à la pollution.

Chapitre IV : HYDROCHIMIE

IV.1- Introduction

Le développement économique de la plaine d'Annaba, et particulièrement la croissance des activités agricoles et la forte expansion démographique, ont fait que les eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées par les utilisateurs, avec une surexploitation de la nappe, malgré la baisse des niveaux piézométriques constatée depuis près d'une vingtaine d'année.

L'alimentation directe par les eaux de pluie n'arrive plus à rétablir l'équilibre de la nappe, par suite des conditions climatiques difficiles et des sécheresses à répétition.

Ozler et Younsi définissent l'intrusion marine comme la migration des eaux salées dans les eaux douces de l'aquifère, sous l'influence de l'évolution des ressources en eau de la nappe.

Le mouvement se fait naturellement, soit à l'intérieur des terres, on parle ainsi de mouvement descendant des sources de surface et des eaux d'irrigation vers l'aquifère et de mouvement ascendant des formations inférieures vers l'aquifère, soit dans les zones côtières, où les eaux de l'aquifère sont connectées hydrauliquement avec l'eau de mer. Dans ce dernier cas, les deux systèmes ne se mélangent pas, puisque les eaux salées se déplacent au-dessous des eaux douces, par suite de la différence de densité entre les deux types d'eau.

Plusieurs auteurs (El Achheb *et al.*, 2001 ; Trabelsi *et al.*, 2005 et Younsi *et al.*, 1997) ont essayé, par des méthodes analytiques et numériques de modélisation, de décrire le phénomène, de prévoir la position de l'interface entre eau douce et eau marine et de prévoir les changements des niveaux piézométriques et de la salinité. La caractérisation du phénomène d'intrusion nécessite une approche multidisciplinaire. La démarche consiste à établir la structure géologique et à déterminer les propriétés hydrologiques et géochimiques, à travers un nombre suffisant de mesures et d'analyses pour caractériser les sources et les origines de la salinisation, la localisation de l'interface et les fonctions qui engendrent son évolution spatio-temporelle. Plusieurs auteurs (El Achheb *et al.*, 2001 ; Trabelsi *et al.*, 2005) ont essayé de définir les processus et les réactions chimiques qui caractérisent la minéralisation et seraient ainsi responsables de l'enrichissement ou de l'appauvrissement des

eaux souterraines en éléments chimiques. Ainsi, dans les différentes études réalisées (Khérici, 1993 ; Djabri, 1996 ; Debieche, 2002 ; Hani, 2003) sur la nappe des graviers de la plaine d'Annaba, la forte salinité des eaux est expliquée par l'infiltration des eaux à partir de la nappe superficielle dans la partie sud. Par contre dans la partie nord, on observe une pollution représentée par une augmentation de la salinité des eaux, ainsi que des teneurs en Na^+ , Cl^- et K^+ , indiquant l'effet d'une salinité d'origine marine.

L'objectif spécifique de la présente étude englobe la caractérisation géochimique de cette nappe côtière, l'identification des processus et des réactions chimiques qui gouvernent sa salinisation et la détermination précise de la limite de l'intrusion marine.

VI.2- Analyse du comportement physico-chimique des eaux de la nappe des graviers dans son ensemble : Utilisation de l'analyse en composantes principales (ACP)

L'identification des principaux facteurs responsables de l'évolution de la qualité chimique de l'eau de la nappe des graviers de Annaba est basé premièrement sur les résultats analytiques obtenus pour une série d'échantillonnages, de périodicité plus au moins semestrielle, réalisés entre 1983 et 2008. Ces analyses ont été réalisées notamment par les services de l'agence nationale des ressources hydrauliques (A.N.R.H.) et de l'entreprise de production de l'eau (E.P.E.A.). Aussi des échantillonnages sont réalisés par nous même, dont les analyses ont été réalisées par le service de toxicologie à l'hôpital Ibn Sina. Les données analytiques ont été traitées par l'Analyse en Composantes Principales (ACP). L'ACP est en effet une méthode statistique multidimensionnelle descriptive, utilisable comme aide à l'interprétation d'une matrice de données (Travi et Mudry, 1997). Les tableaux des données physico-chimiques comportent m analyses (ou éléments mesurés). Cette méthode, en cherchant les directions préférentielles d'allongement d'un nuage de points multidimensionnel (valeurs propres), permet de résumer l'information en projetant le nuage de points sur ses directions préférentielles (axes factoriels). Les facteurs sont des combinaisons linéaires des variables de départ. Chaque variable contribuant au facteur intervient avec un coefficient appelé vecteur propre. Pour l'analyse des teneurs chimiques, dont les gammes de variation peuvent être disparates, il convient de dépondérer ces variables en les centrant et en les réduisant. Pour ce faire, les teneurs sont centrées sur une moyenne nulle et divisées par l'écart type. La variance apportée par chacune des variables est dès lors égale à 1 et donc l'inertie (variance) totale du nuage de points égale à $1 \times n$ si l'on traite n variables sur m individus. Le premier axe factoriel est celui qui explique le plus grand pourcentage de cette variance totale, le second

explique ensuite le plus grand pourcentage de variance résiduelle. Cette étude statistique par l'analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée sur des analyses physico-chimiques des 11 variables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , pH, CE et RS) et sur l'ensembles des observations effectuées sur chacune des 13 campagnes collectées.

La conductivité présente un ensemble de valeurs comprises entre 840 et 4400 microS/cm ; les valeurs extrêmes correspondent à des mesures obtenues dans des points d'eau situés au centre et dans la partie côtière de l'aquifère de Annaba, alors que les bordures sud et ouest de la plaine enregistrent des valeurs minimales. Ainsi la conductivité augmente dans le sens de l'écoulement souterrain (du sud au nord). La température varie entre 18,7 et 26°C, avec une valeur moyenne de 21°C alors que le pH varie entre 6,2 et 8,9.

VI.2.1- Campagne de Juin 1983 (11 variables et 36 observations) :

Pour interpréter cette ACP, nous allons nous contenter du cercle formé par les axes I et II, qui fournissent 93.2% de l'information. L'axe I (70.9% de la variance totale) montre un regroupement de l'ensemble des éléments de la minéralisation liées au pH (partie positive de l'axe), la projection des individus montre que ce groupe est représenté par les forages d'El Hadjar (M7, K7, I9), Pont Bouchet (H11), les Salines (I12, H18), Ben Mhidi (N24, O21), Daroussa (Q13, R15), Besbes(U16, S17), Dréan(W5) et Zerizer (R22). L'axe II (22.3% de la variance totale) montre une opposition entre les nitrates (partie positive de l'axe) représentés sur le plan des individus par les forages Q19, J8, N12 qui correspondent respectivement aux zones de Zerizer, El Hadjar et Daroussa et la conductivité électrique (partie négative de l'axe) représenté par les forages des Salines I15, G14, D11, F14, F16 et G22 et Sidi Salem (C5), d'El Hadjar (J10, J9, L6), Ben Mhidi (L19), Dréan (W5, U8) ,Chihani (Z5) et Daroussa (N10, N13).

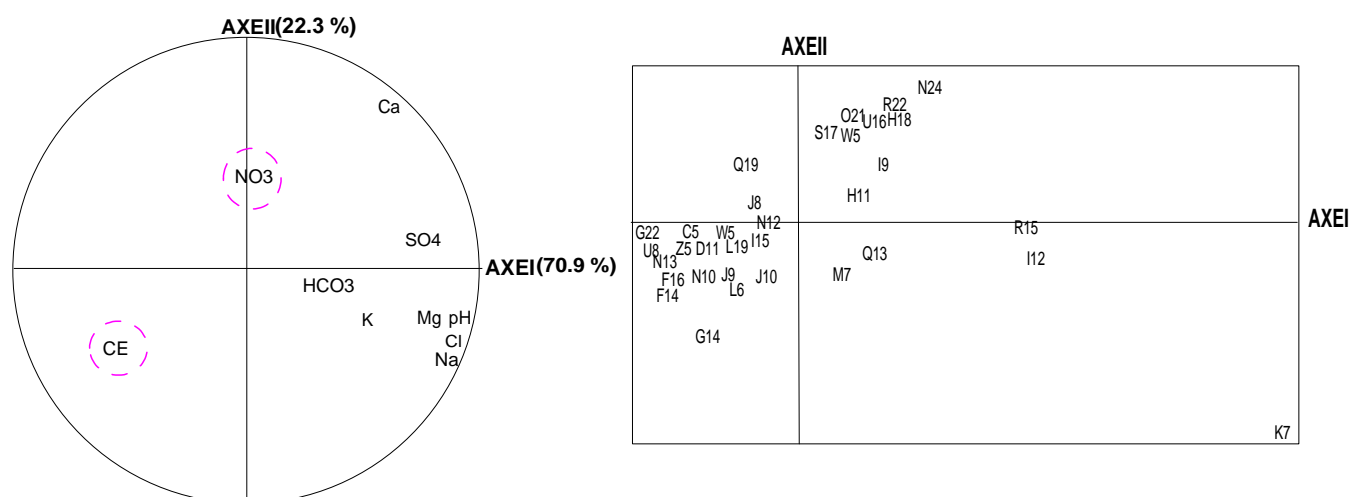


Fig. 20a- Cercle (I-II) des variables (Juin 1983).**Fig. 20b-** Plan (I-II) des individus (Juin 1983).**VI.2.2- Campagne de Mai 1985 (11 variables et 31 observations) :**

Le cercle formé par les axes I et II, montre l'occupation de la partie négative de l'axe I (52,5%) par les eaux fortement minéralisées caractérisées par le sodium (Na), le potassium (K), les chlorures (Cl), le magnésium (Mg), le résidu sec (RS) et la conductivité électrique (CE). Les individus qui sont liés à cet axe sont les forages F25, K25 et H20 situés à Ben M'hidi et V11, U11, U9 situés à Dréan, E15 localisé aux Salines, D8 et I6 à El Hadjar. Selon l'axe II (31,6%), on remarque les eaux riches en calcium (Ca) accompagnées des sulfates (SO₄) occupent la partie négative de l'axe. Ce groupe est représenté sur le plan des individus par les forages U7, R8, R11, Q7, Q8, Q10 localisés dans la partie sud à Dréan et Daroussa.

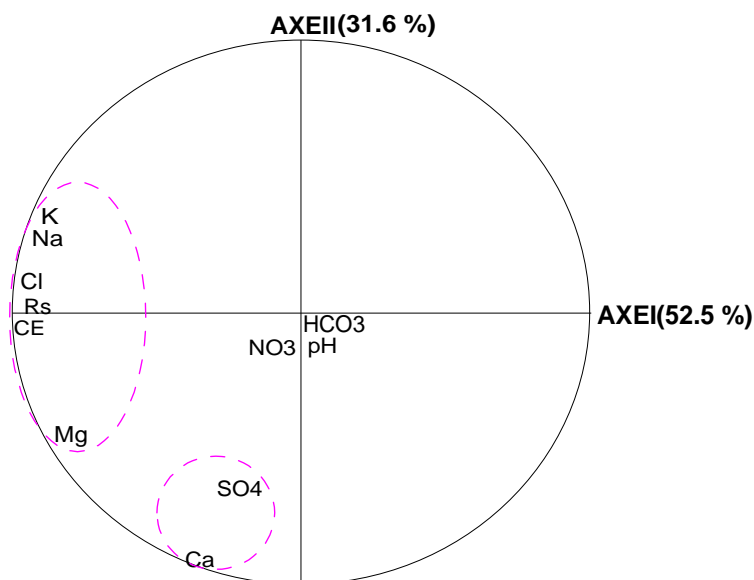
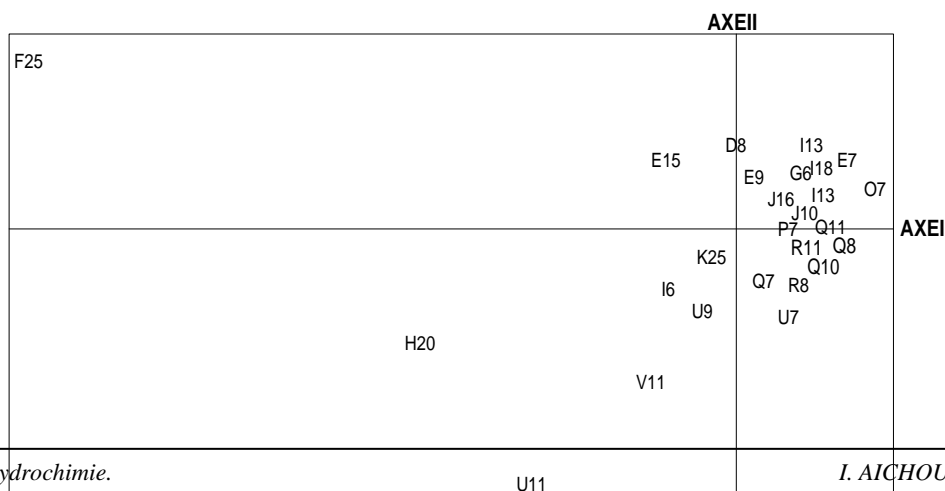
**Fig. 21a-** Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Mai 1985.

Fig. 21b- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Mai 1985.

VI.2.3- Campagne de Octobre 1985 (11 variables et 24 observations) :

Le cercle formé par les axes I et II, montre l'occupation de la partie positive de l'axe I (45,7%) par les éléments de la minéralisation caractérisée par le sodium (Na), les chlorures (Cl), le magnésium (Mg), le calcium (Ca), les sulfates (SO₄), le résidu sec (RS) et la conductivité électrique (CE). Les individus qui sont liés à cet axe sont les forages de Pont Bouchet (F8), El Hadjar (I6), El Bouni (E9), les Salines (G16), Dréan (V10, U10) et Daroussa (N7), qui s'opposent au pH basique (partie négative de l'axe) qui caractérise les zones de Pont Bouchet (F8), les Salines (H13, J17, I14), El Hadjar et l'usine Sidérurgique Mittal Steel (I10, J10 et O6), Daroussa (P7, R8, Q7) et Dréan (W11).

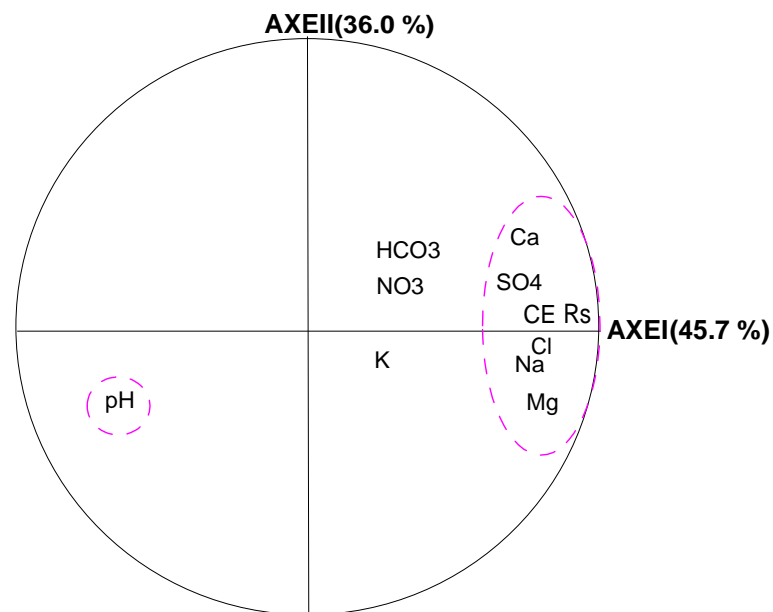


Fig. 22a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Octobre 1985.

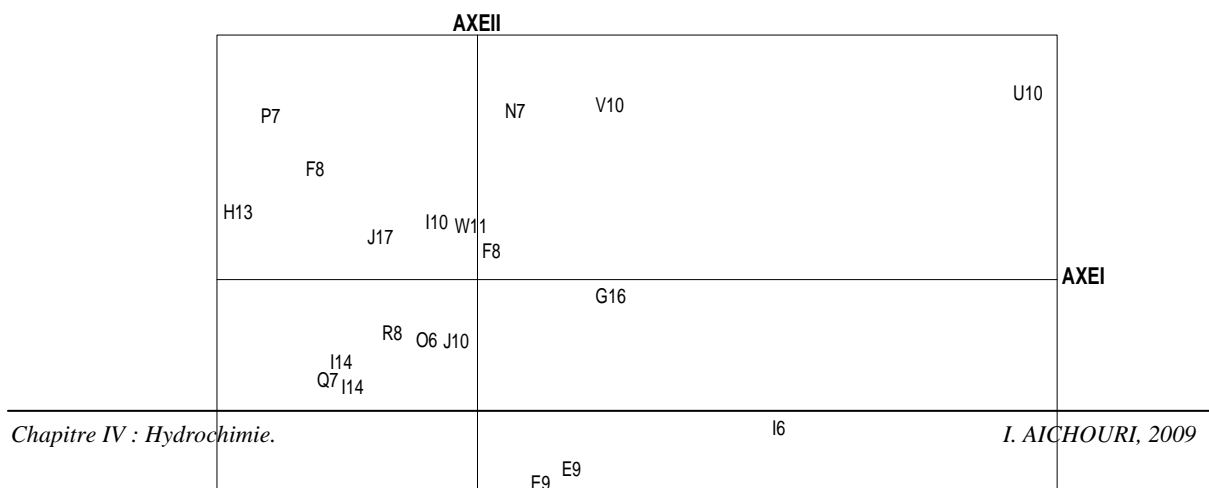


Fig. 22b- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Octobre 1985.

VI.2.4- Campagne de Avril 1986 (10 variables et 46 observations) :

L'axe I (72.9%) est déterminé positivement par l'ensemble des éléments : Na, Cl, Mg, K et la conductivité électrique avec un pH acide, alors que l'axe II (22.5% de la variance) regroupe dans sa partie positive Ca, SO₄ et NO₃ qui ne s'opposent à aucun autre élément sauf peut être au pH. Sur le plan I-II des individus, les eaux des forages situés à Dréan, El Hadjar, les salines et Ben Mhidi représenté par (U11,W10,V11,T9), (I6,K7,O6), (E10,D9), (N22,F24,K24) respectivement sont très minéralisées à l'opposé des secteurs de Besbes, Daroussa et Chbaita représentés respectivement par les forages (T11), (07, R11, P8), (Q7) ; ainsi que les salines et El Hadjar représenté par les forages E11, J9, J10 et L9 qui sont relativement minéralisés.

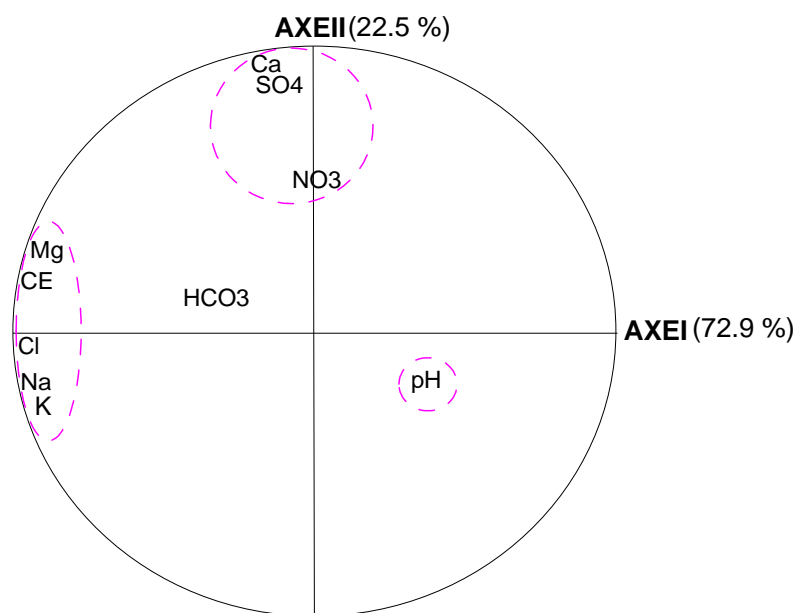


Fig. 23a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Avril 1986.

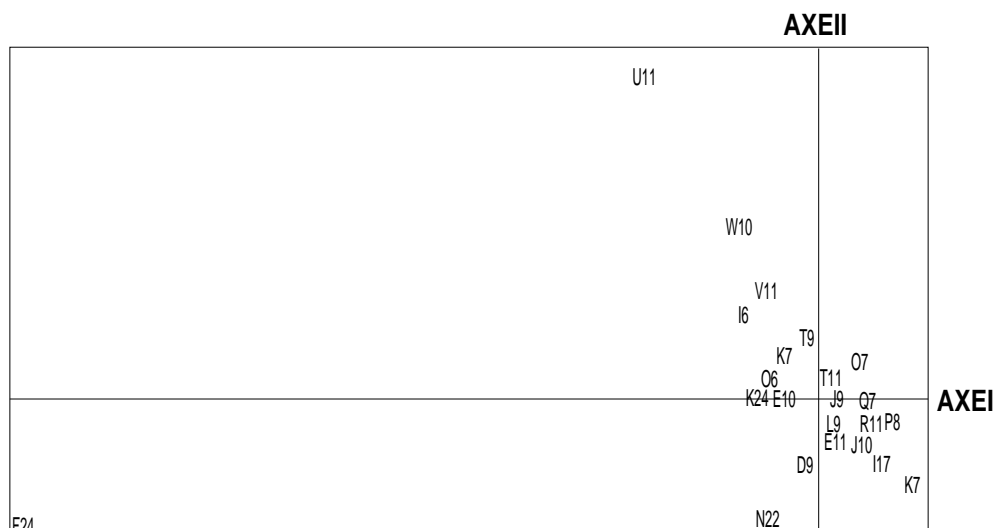


Fig. 23b- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Avril 1986.

VI.2.5- Campagne de Octobre 1986 (10 variables et 37 observations) :

L'axe I avec 66.8% de l'information totale montre un regroupement des éléments de la minéralisation, représentée par la conductivité électrique corrélée au Mg, Cl, Na et K avec un pH acide. La projection des individus montre que ce groupe est représenté par les forages de la nappe superficielle situés à Dréan (V10, V11, U12) et les forages de la nappe profonde ceux des Salines (H19, G16, E9, D9), El Hadjar (I6, J8, K8), Ben Mhidi (K25), Pont Bouchet (H8) et la Mafragh (F25). L'axe II (27.5%) montre que les Nitrates liées au sulfates et au calcium (partie positive de l'axe) représenté sur le plan des individus par les forages de Pont Bouchet (G6), de l'usine sidérurgique Mittal Steel (N7), El Hadjar (H13) et Dréan (W10) s'opposent au pH accompagnée des bicarbonates (partie négative de l'axe) représenté sur le plan des individus par les forages des Salines (I14, H15, I18, H15), d'El Hadjar (J10), d'El Bouni (D7), Ben Mhidi (K17) et de Daroussa (O15, P10).

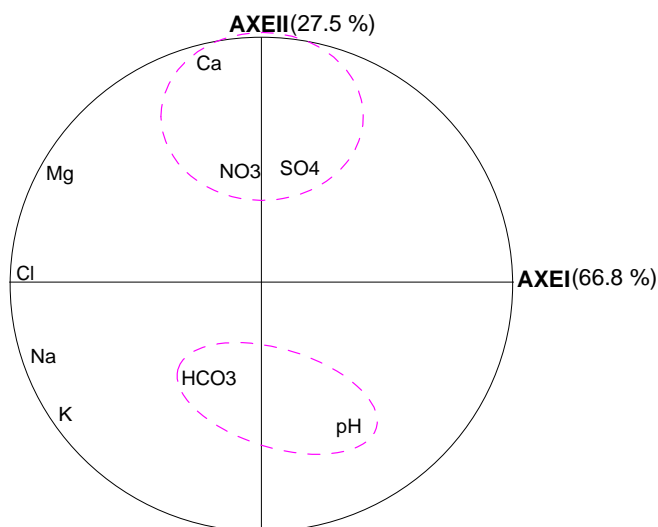


Fig. 24a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Octobre 1986.

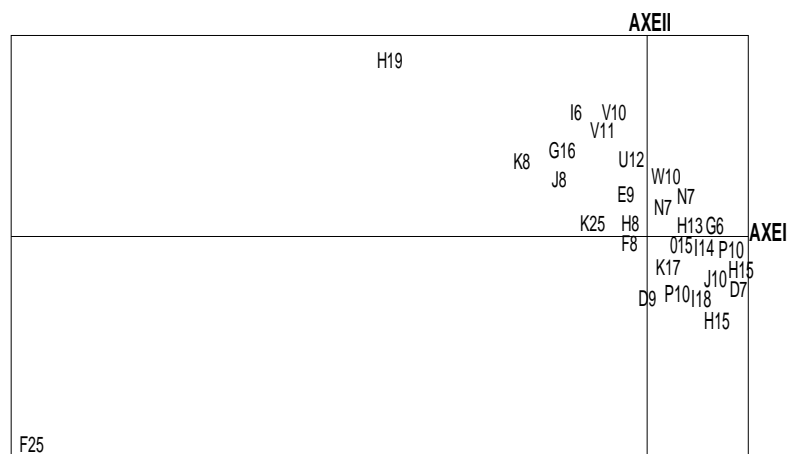
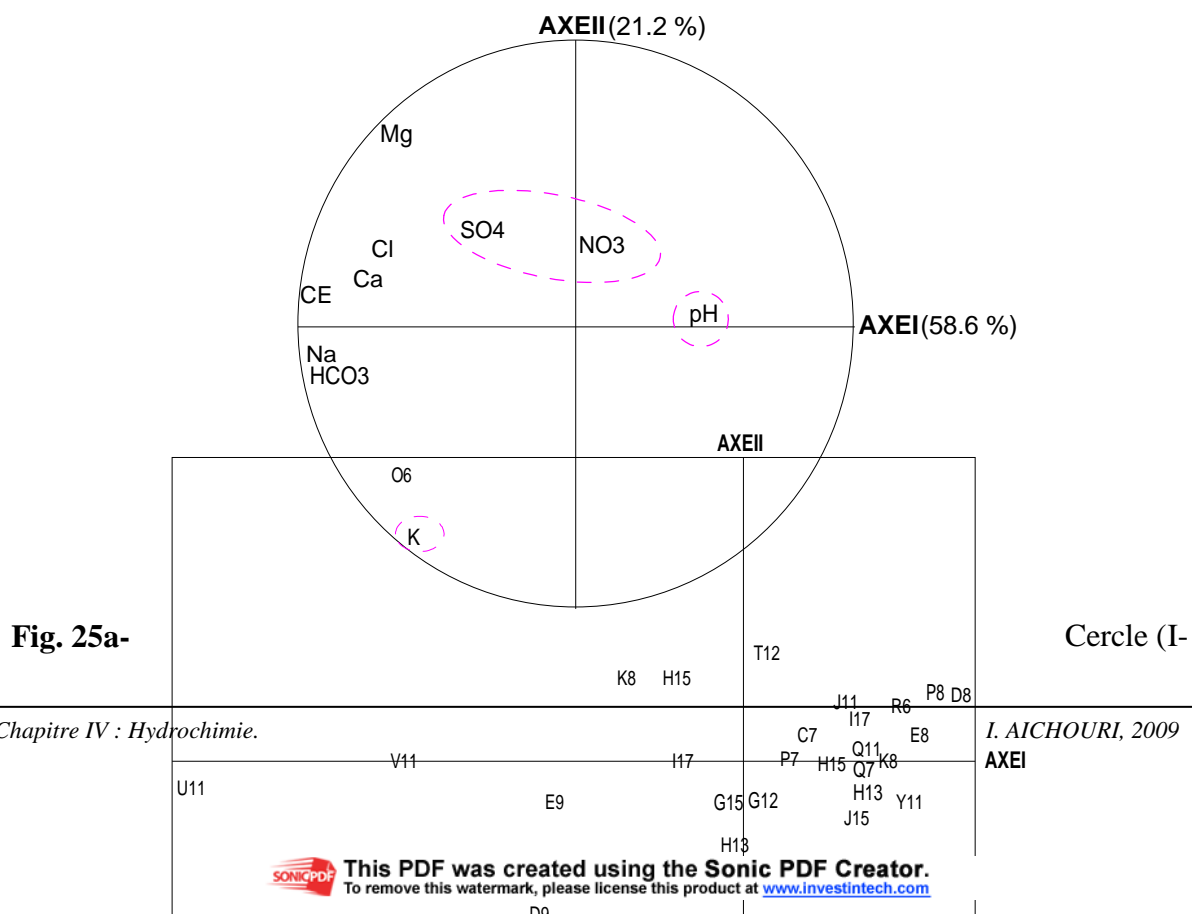


Fig. 24b- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Octobre 1986.

VI.2.6- Campagne de Mai 1987 (10 variables et 31 observations) :

L'axe I (58,6% de la variance totale) montre un regroupement des éléments de la minéralisation, représenté par la conductivité électrique corrélée au Ca, Na, Cl et HCO₃ avec un pH acide. La projection des individus montre que ce groupe est représenté par les forages de la nappe profonde situés aux Salines (H15, D9, G15, H13), l'usine sidérurgique Mittal Steel (O6), El Hadjar (K8), El Bouni (E9), Ben Mhidi (I17) et les deux forages de la nappe superficielle au niveau de Dréan (U11, V11). L'axe II (21,2% de la variance totale) oppose les nitrates et les sulfate au potassium K. Les individus qui sont liés à cet axe sont les forages d'El Hadjar (J11, K8), les Salines (D8, E8, C7, H15), Daroussa (R6, P8, Q11, P7), Besbes (T12) et Ben Mhidi (I17).



II) des variables. ACP de la campagne de Mai 1987.

Fig. 25b- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Mai 1987.

VI.2.7- Campagne de Octobre 1987 (10 variables et 35 observations) :

L'axe I (75.1% de la variance totale) montre un regroupement des éléments de la minéralisation, représenté par la conductivité électrique, corrélées au Ca, Na, HCO₃, Cl et Mg et avec un pH acide. La projection des individus montre que ce groupe est bien représenté par les forages situés au Salines (H20), El Hadjar (J8), Ben Mhidi (K23), Dréan (V11, W12), Daroussa (R11, O16). Le deuxième axe, représente (14,3%) de la variance et il est déterminé positivement Par les Nitrates NO₃ qui s'opposent au Potassium K (partie négative de l'axe). Les individus qui sont liés à cet axe sont les forages situés aux Salines (C7, D8, I14, J15, G17, H15, G15, I13), à El Hadjar (I11, J11, K8, L10, I11, J11, I12), à Ben Mhidi (J17, I16, I16), à Daroussa (P8, Q10, O16, Q11, O15) et Besbes (T12,T12).

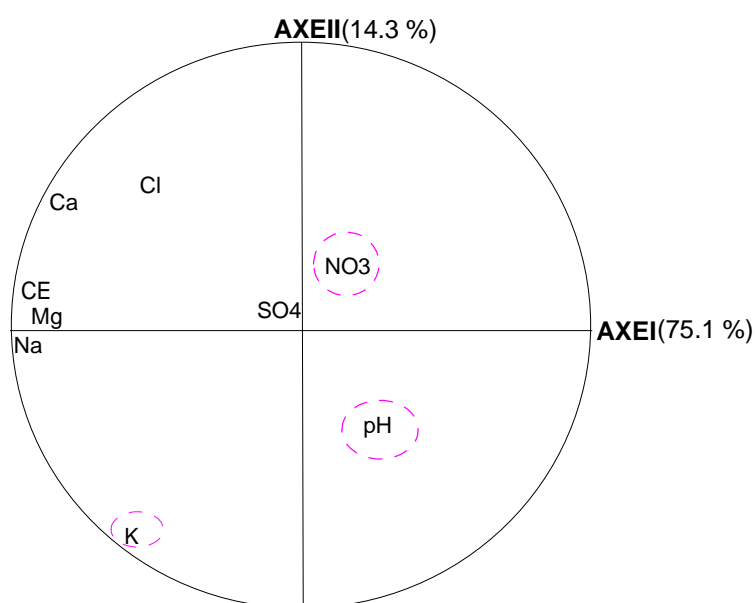


Fig. 26a- Cercle (I-II) des variables .ACP de la campagne de Octobre 1987.

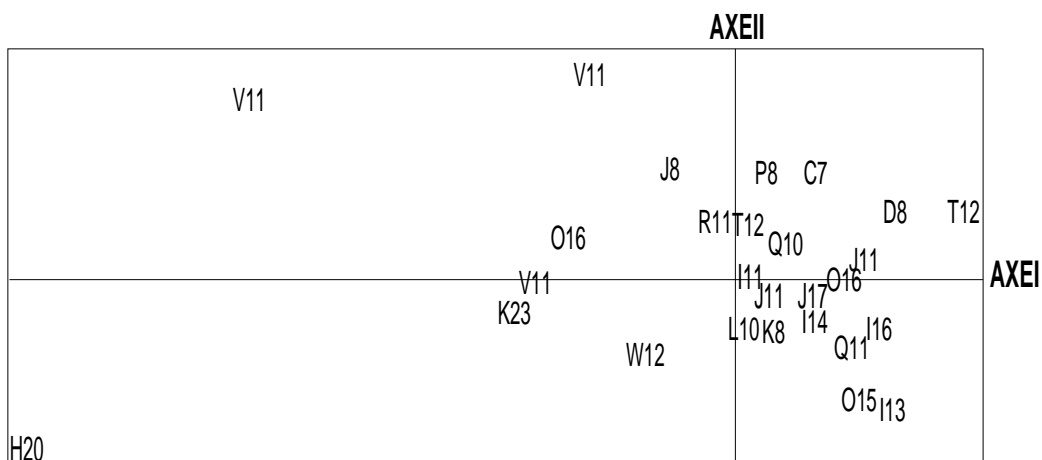


Fig. 26b- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Octobre 1987.

VI.2.8- Campagne de Mai 1988 (11 variables et 37 observations) :

L'axe I (61,4%) est représenté par l'ensemble des éléments de la minéralisation, à savoir CE, RS, Na, Ca, Mg et HCO₃. Il discrimine donc les zones relativement minéralisées Daroussa (O15, O15, Q7, O7, R11), Dréan (W10, V10, W10), Chihani (Y10), les salines (H13, G15, H13), Pont Bouchet (I10, I10, F8), El Hadjar (K11) ; des zones qui le sont moins Daroussa (P7, N7, R11, P11, O15, R11, Q11), Dréan (T12, U11, U10), Besbes (R18), El Hadjar (I9, D8), Les salines (H12, J15, G14, G15), Mittal Steel (O6), Sidi Amar (G5, G8) et Ben Mhidi (J24). L'axe II (17,4%) oppose légèrement les NO₃ associés au pH aux Cl, K et SO₄. On peut penser que cette opposition pourrait discriminer l'origine de l'acquisition de la chimie. En effet, les chlorures peuvent représenter le milieu profond au niveau des forages situés à El Hadjar (K11), Pont Bouchet (F8) et les Salines (W10), alors que les nitrates sont plutôt d'origine superficielle qui représentée les forages de Chihani (Y10).

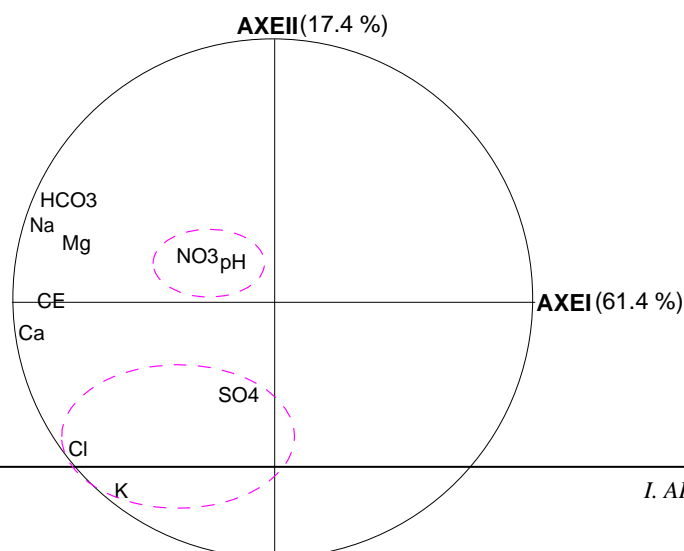


Fig. 27a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Mai 1988.

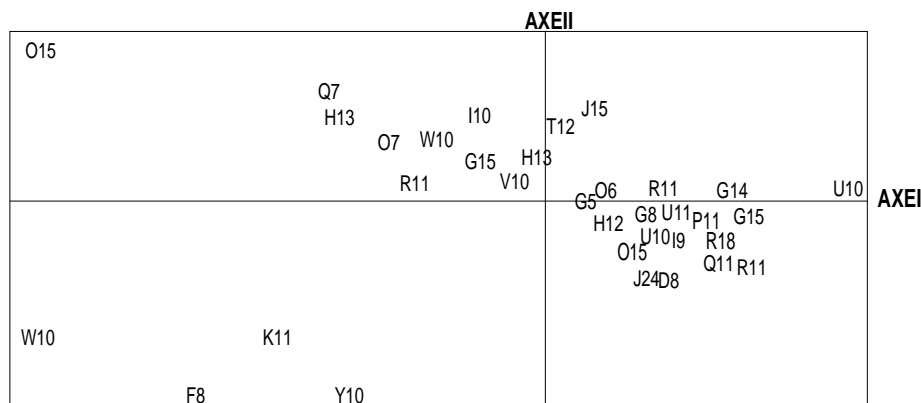


Fig. 27b- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Mai 1988.

VI.2.9- Campagne de Octobre 1988 (11 variables et 27 observations) :

En ce qui concerne le tableau relatif au mois d'octobre 1988, l'ACP montre que l'axe I (67.2%) oppose l'ensemble des éléments de la minéralisation Mg, HCO₃, K, Na, Ca, RS et CE au pH, ce qui indique un axe de minéralisation et de mise en équilibre des éléments. La projection des individus montre que ce groupe est représenté par les forages (D8, L10, K7, J10) situés à El Hadjar, (C6) à El Bouni, (E9, H15) aux Salines, (I10) à Pont Bouchet et (I18, K25) à Ben Mhidi. L'axe II (17,3%) est porté négativement les nitrates NO₃, les sulfates SO₄ et les chlorures. Les individus qui sont liés à cet axe sont les forages K25 localisé à Ben Mhidi, K17 aux Salines et L10 situé à El Hadjar.

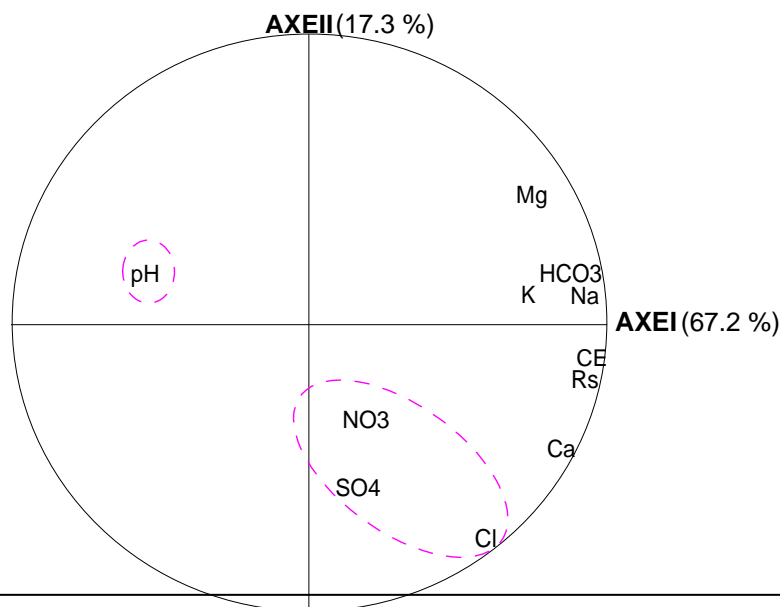
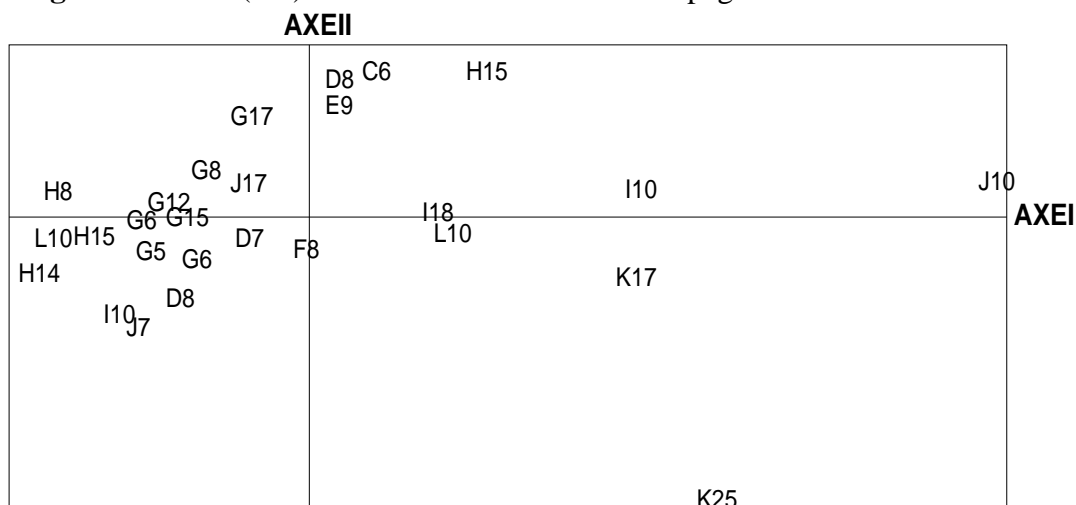


Fig. 28a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Octobre 1988.**Fig. 28b-** Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Octobre 1988.**VI.2.10- Campagne de Juillet 1989 (11 variables et 65 observations) :**

Pour interpréter cette ACP, nous allons nous contenter du cercle formé par l'axe I et l'axe II, qui fournit 80,2% de l'information. L'axe I, représente 58,7% de la variance totale et il est déterminé positivement par l'ensemble des éléments caractérisé par le Ca, K, Mg, Cl, Na, SO₄, HCO₃, excepté la conductivité électrique avec un pH basique. La projection des individus montre que ce groupe est représenté par les forages situés à Pont Bouchet (H8, G8, H10, I8), les Salines (E8, D9, D11, I12, H16), Sidi Salem (C6, C7), El Hadjar (L6, L5, K8), El Bouni (E9, D7), Sidi Amar (I6), l'usine sidérurgique Mittal Steel (O6), Ben Mhidi (K25) et Dréan (W10).

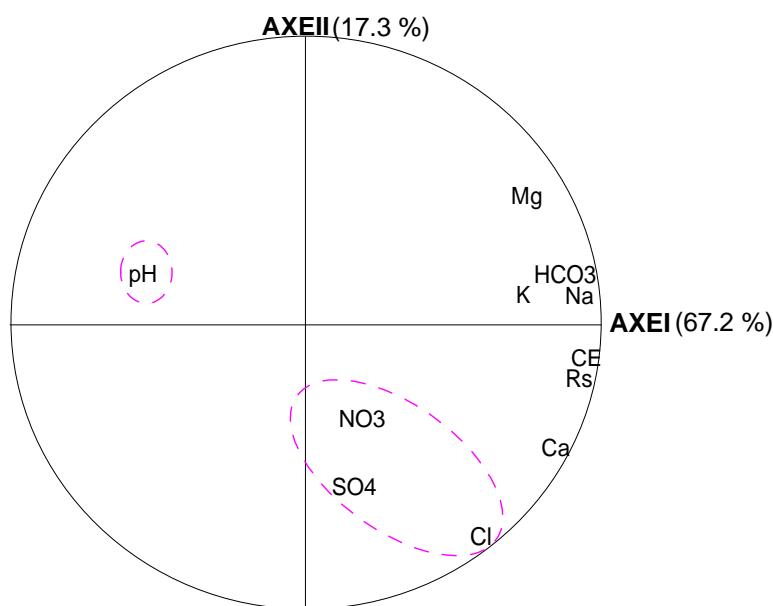


Fig. 29a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Juillet 1989.

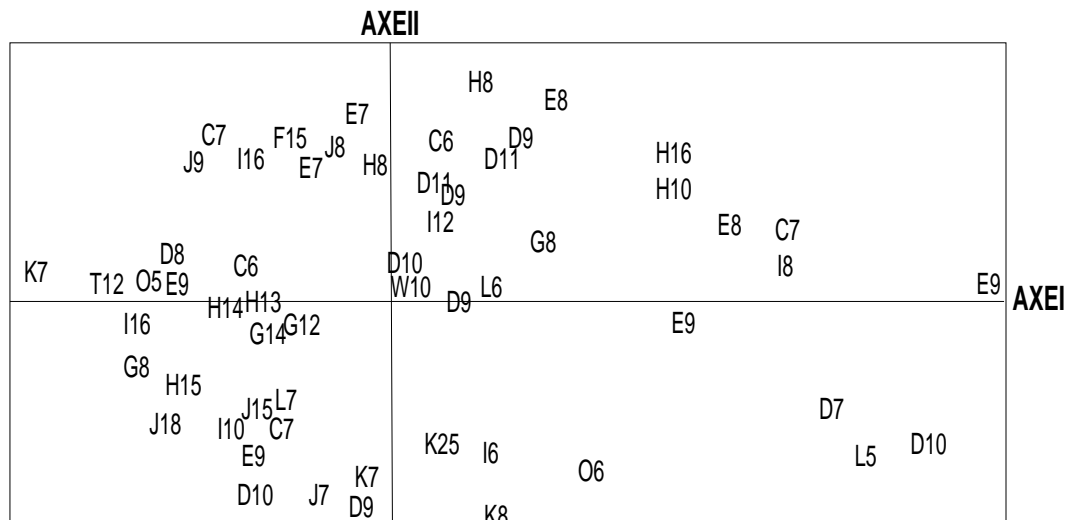


Fig. 29b- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Juillet 1989.

VI.2.11- Campagne de Octobre 1989 (11 variables et 28 observations) :

L'axe I (56.7% de l'information) porte négativement les éléments de la minéralisation Cl, Na, Ca, Mg et RS qui sont bien corrélés avec la conductivité électrique avec un pH acide (partie positive de l'axe I). La projection des individus montre que ce groupe est représenté par les forages (I10, K7) situés à El Hadjar et O7 à l'usine sidérurgique Mittal Steel, ainsi (D10, H13, G15, G12 et G10) au Salines et Pont Bouchet, aussi à Ben Mhidi (K25), Daroussa (Q7) et Dréan (U7). alors que l'axe II (20,9%) oppose les NO₃, K et HCO₃ (partie positive de l'axe) au SO₄ (partie négative de l'axe). Les forages liés au pôle positive sont L5, I9, J18, H14 situés à El Hadjar et les Salines et les deux forages R18 et Q11 situés à Besbes et Daroussa ; les autres forages liés au pôle négative sont (G15, G12, H13 et G10) situés à Pont Bouchet et les Salines, I10 à El Hadjar, Q7 et U7 à Daroussa et Dréan.

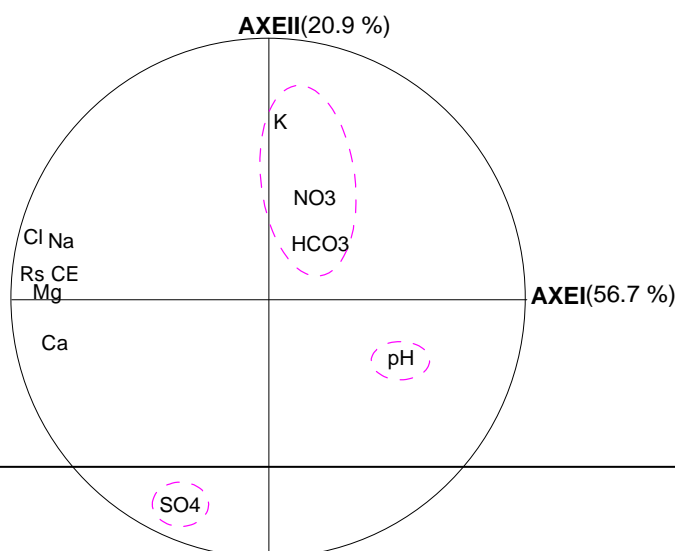


Fig. 30a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Octobre 1989

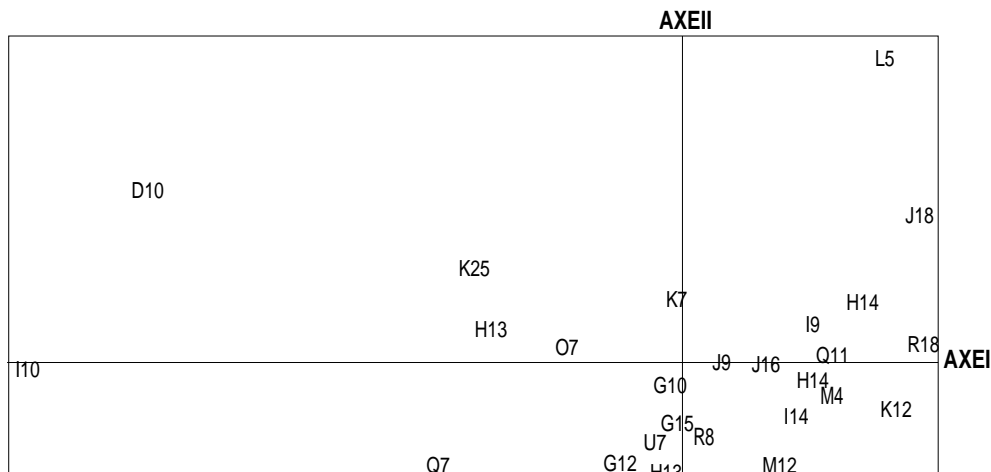


Fig. 30b- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Octobre 1989.

VI.2.12- Campagne de Décembre 1999 (9 variables et 12 observations) :

Pour interpréter cet ACP, nous allons nous contenter du cercle formé par l'axe I et l'axe II, qui fournissent 90.2% de l'information. L'axe I représente 57,4% de la variance totale, il est déterminé positivement par l'ensemble des éléments Na, Cl, Ca et SO₄, qui s'opposent aux éléments Mg, HCO₃ et K ; représenté sur le plan I-II des individus par les forages situés à Dréan (W9), à Daroussa (O10, R10), au Salines (E10, D9), à El Hadjar (L10, J10). L'axe II représente 32,8% de la variance et il est déterminé par la conductivité électrique et le pH représenté sur le plan des individus par les forages situés à Dréan (U8) et Daroussa (R10).

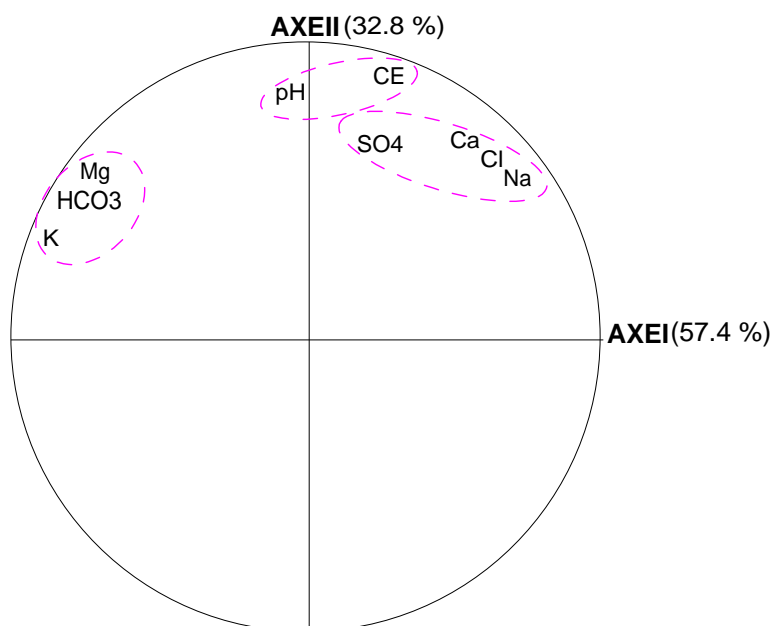


Fig. 31a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Décembre 1999.

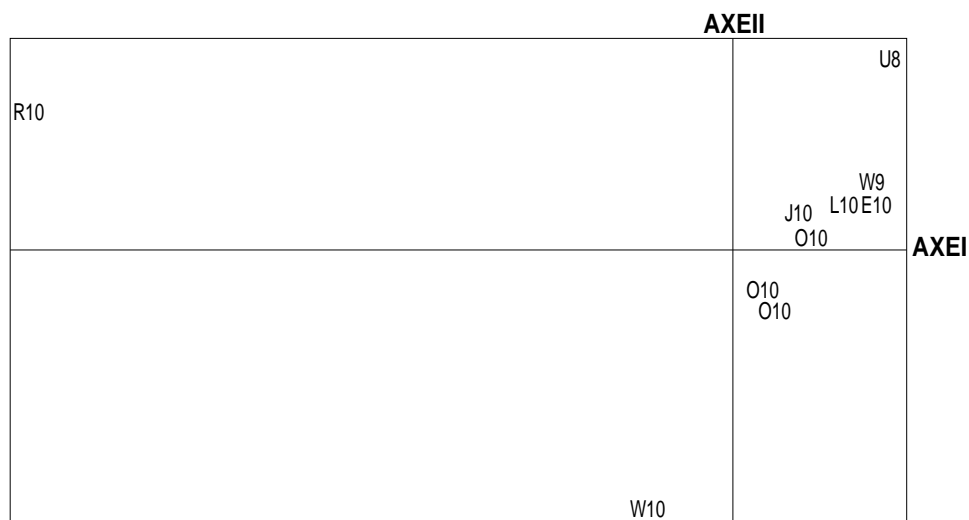


Fig. 31b- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Décembre 1999.

VI.2.13- Campagne de Décembre 2007-Janvier 2008 (8 variables et 16 observations) :

Le premier axe, représente 67.5% de la variance totale, il est déterminé positivement par les éléments caractérisé par le magnésium et le calcium. La projection des individus montre que ce groupe est représenté par les forages situés à Dréan (V8), à Daroussa (O12), à Besbes (T16) et à Ben Mhidi (N18). L'axe II (26,7%) est déterminé par le sodium et les chlorures liées a la conductivité électrique (partie négative de l'axe). La projection des individus montre que ce groupe représente les forages situés à Pont Bouchet (T15) et Ben Mhidi (K17), Besbes (T15) et Zerizer (Q23).

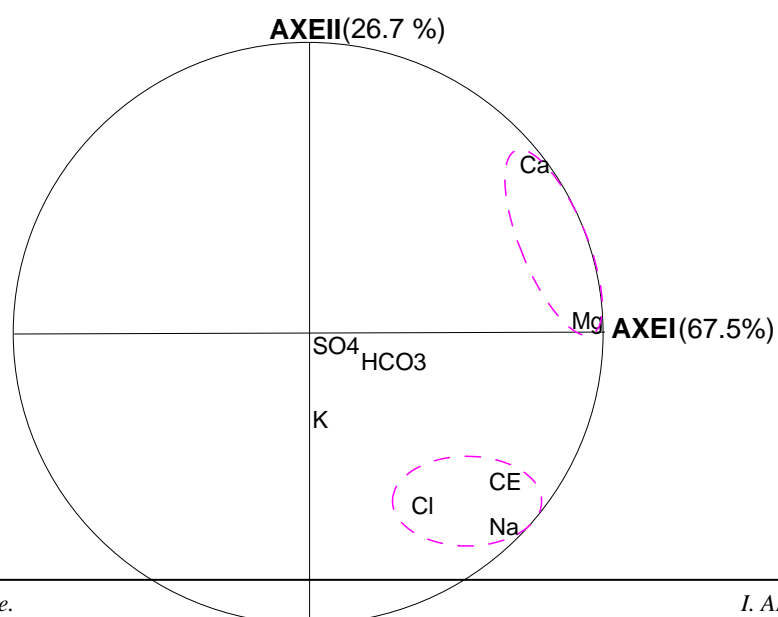


Fig. 32a- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Décembre 2007-Janvier 2008.

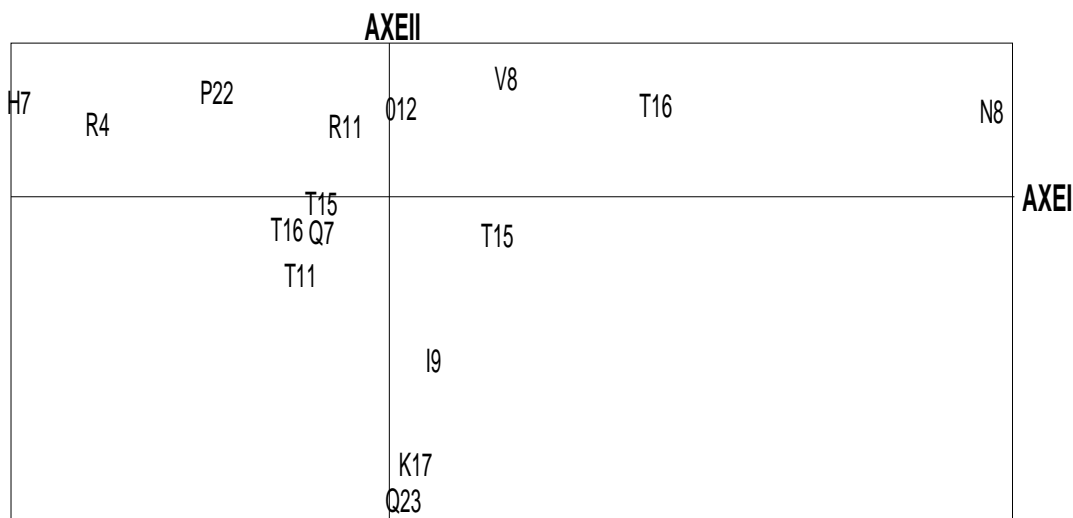


Fig. 32b- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Décembre 2007-Janvier2008.

VI.3 - Synthèse de l'étude par l'analyse en composante principale :

L'analyse des données analytiques par l'analyse en composantes principales a permis d'identifier les deux principaux facteurs qui agissent sur le comportement des eaux de la nappe des graviers de la plaine d'Annaba, i) facteurs naturels ou la minéralisation est due vraisemblablement au lessivage des formations géologiques (argiles, évaporites, carbonates), ii) facteur anthropiques : - la pollution par les nitrates dans les zones où la couverture argileuse protectrice est faible ou inexistante ce qui permet une contamination des eaux notamment dans les zones à forte activité agricole ; - aussi à la proximité de la mer par le phénomène de l'invasion marine induite par l'exploitation de la nappe.

IV.4 - Evolution des éléments chimiques

Une analyse complète des éléments majeurs a été effectuée sur les eaux prélevées de la nappe profonde pendant la période du suivi de 1983 à 2008 selon un pas d'échantillonnage semestriel ; mai et octobre, les résultats montrent la richesse des eaux en éléments Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} liée à la dissolution des formations évaporitiques, les éléments HCO_3^- , K^+ sont dus à l'effet de l'altération des schistes et du gneiss et à la dissolution des cipolins. Par contre, les éléments Ca^{2+} et Mg^{2+} proviennent de deux origines : les formations gypseuses (évaporites) et le cipolin dans le cas des carbonates.

Deux faciès chimiques dominants sont observés (Fig. 33a) : l'un, chloruré sodique (eaux salées, Conductivité supérieure à $2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), représente 74% et l'autre, bicarbonaté sodique généralement observé pour les eaux où la conductivité est inférieure à $2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ représente 18%. Le reste est représenté par les faciès chloruré calcique (3%), bicarbonaté calcique (2%) et chloruré bicarbonaté sodique (3%).

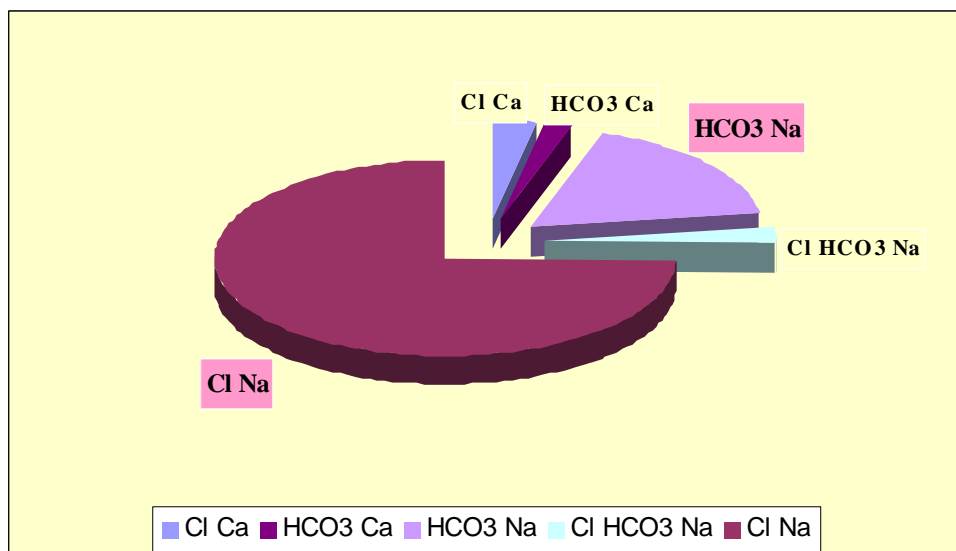


Fig. 33a- Répartition des faciès chimiques en (%) (Période 1983 à 2008).

Vu la prédominance de ces ions (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et HCO_3^-) dans l'eau de la nappe, une représentation des faciès chimiques dans un diagramme ($\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+}$) – ($\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$) (fig. 33b) a été effectuée. Ce diagramme montre l'existence de six pôles caractéristiques de la nappe. Entre les deux pôles extrêmes représentés par le faciès bicarbonaté calcique et l'autre chloruré sodique s'observe, selon la période, un passage progressif du faciès bicarbonaté sodique et calcique au bicarbonaté sodique et enfin au chloruré bicarbonaté sodique (Fig. 33b). (Le reste des graphiques est donné en Annexe I).

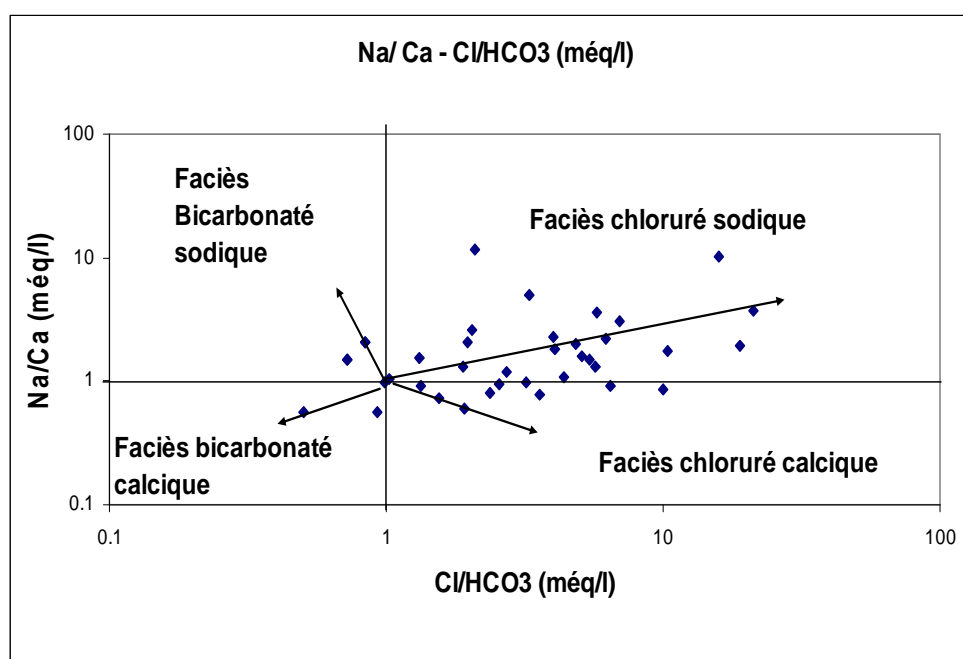


Fig. 33b- Utilisation du rapport $(\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+})-(\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-)$ pour la détermination des faciès chimiques (Juin 1983).

IV.5 - Etude de l'origine des éléments chimiques :

L'origine géologique des éléments chimiques est étudiée à l'aide des corrélations qui peuvent exister entre eux. Les régressions effectuées utilisent les données de toutes les analyses réalisées au cours des années (1983-2008). Deux relations principales seront examinées :

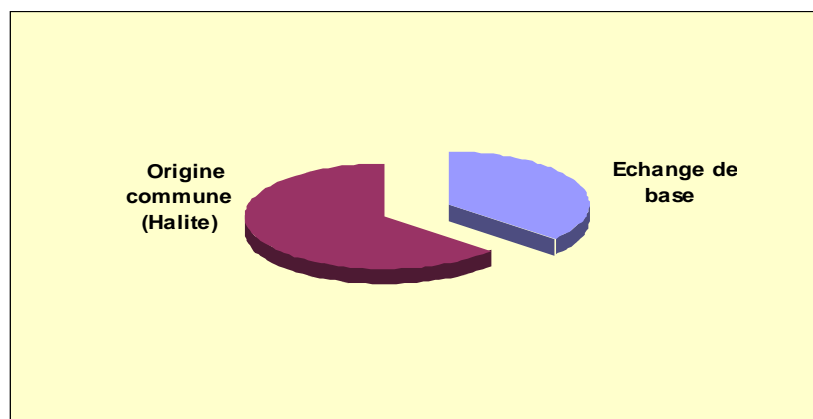
IV.5.1. Le couple $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$:

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution de Na^+ est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydoréduction et peu influencé par l'intervention des bactéries. En plus son déplacement n'est pas retardé dans l'eau. L'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures est représentée sur un diagramme à échelle logarithmique (fig. 34c). Ce dernier montre deux processus :

- pour les fortes concentrations en chlorure (supérieures à 10 méq.l^{-1}) : on observe une évolution semblable des ions Na^+ et Cl^- (fig. 34c), pour près de 64% des points (fig. 34a), indiquant l'origine chlorurée sodique commune (Halite) de ces deux éléments chimiques.

- pour les faibles concentrations en chlorure (inférieures à 10 méq.l^{-1}) : on observe un excès en sodium par rapport à la pente 1 (fig. 34c), cela s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques qui a fait accroître la concentration du sodium par rapport à celle des chlorures. Cet apport supplémentaire pourrait provenir de l'altération des silicates sodiques (feldspaths). Aussi, étant donné que cet excès en Na^+ est accompagné par un déficit en Ca^{2+} par rapport à HCO_3^- et SO_4^{2-} (fig. 34d), l'augmentation des teneurs en Na^+ ne peut pas s'expliquer par l'altération du socle métamorphique mais par un échange de base lié aux

minéraux
qui fixent un
après
de deux ions
représente
total des
(fig.34a).



argileux
ion Ca^{2+}
libération
 Na^+
36% du
points

Fig. 34a- Origine des éléments chimiques en (%) (Le couple $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$).

Les résultats de la projection des différents points sur le diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ (fig. 34d) montre que 41 % des points d'eau subissent un échange de base, 41 % des points présentent l'état naturel et 18 % un excès en Ca^{2+} par rapport aux ions HCO_3^- et SO_4^{2-} (fig.34b) dû vraisemblablement aux formations gypseuses qui fournissent plus d'ions Ca^{2+} que ne peut consommer l'effet de la précipitation chimique ou l'effet de la fixation du calcium par les argiles.

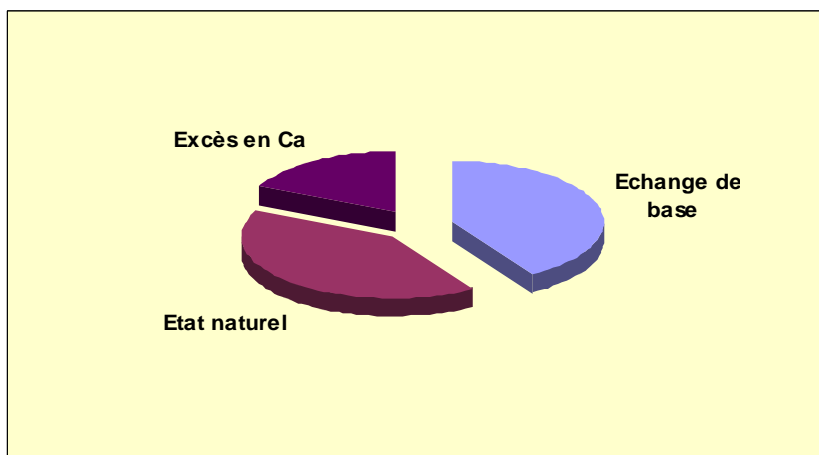


Fig. 34b- Résultats du diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - (\text{Na}^+ / \text{Cl}^-)$ en (%).

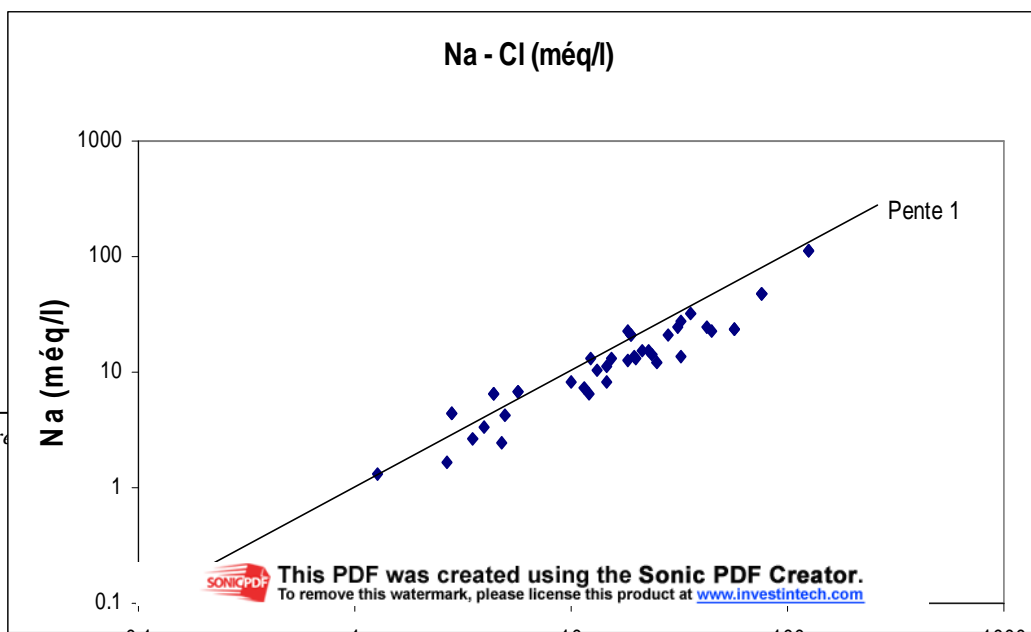


Fig. 34c- Diagramme $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ (Juin 1983).

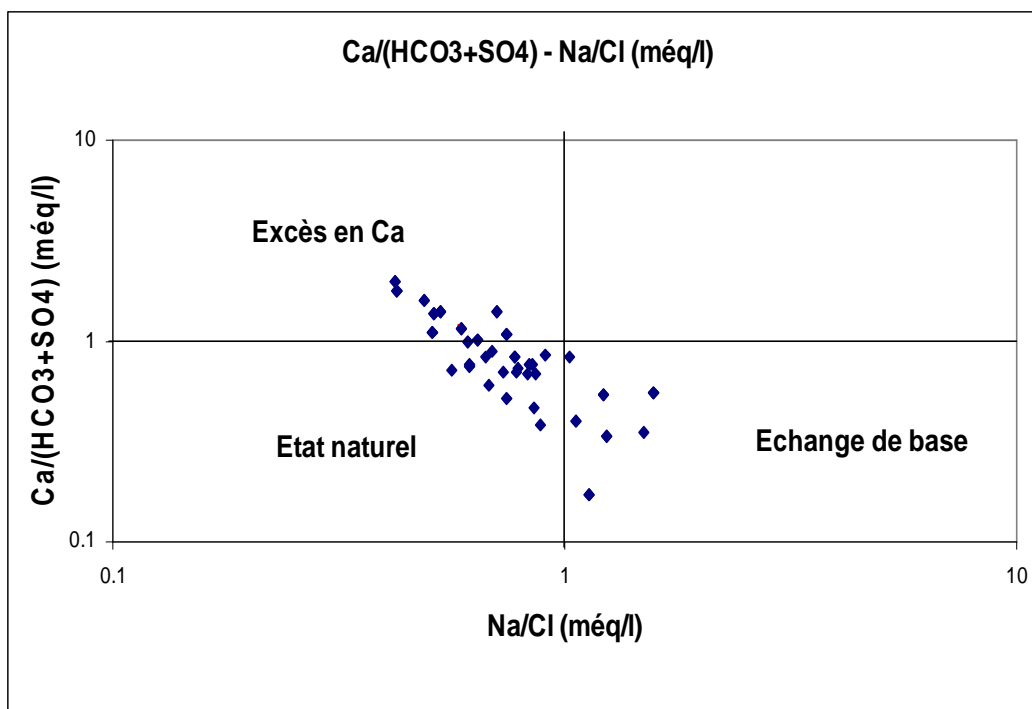
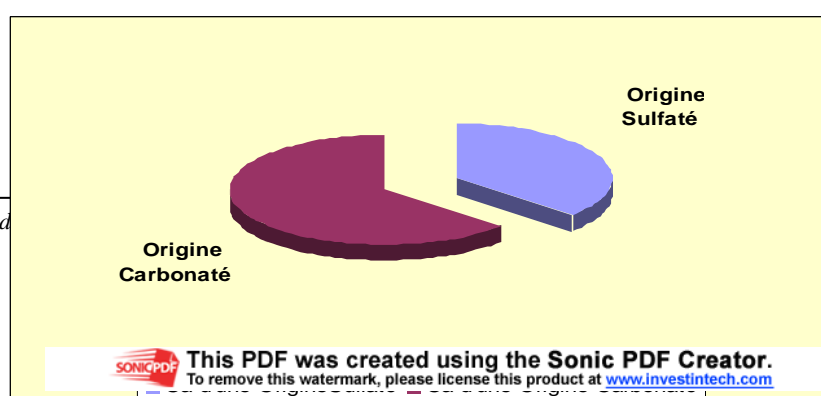


Fig. 34d- Echange de base.

IV.5.2- Origine du Calcium

IV.5.2.1- Les éléments $\text{Ca} - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$

L'origine du calcium est étudiée en fonction des deux éléments chimiques (bicarbonates et les sulfates) qui indiquent ses deux origines principales (carbonates et le gypse) (fig. 35d). La représentation graphique de l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates (fig. 35c), montre un groupe de points qui se positionnent



sur la droite à pente 1, indiquant l'origine carbonatée des ions du calcium, soit 63 % du total des points (fig. 35a). Par contre les autres présentent un excès des teneurs en Ca^{2+} (fig. 35c), interprété comme le résultat de la mise en solution du gypse qui représente 37 % du total des points (fig. 35a).

Fig. 35a- Origine de Ca en (%).

Pour étudier l'évolution du calcium en fonction de ces deux éléments, une représentation graphique des teneurs en Ca^{2+} en fonction de $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ a été réalisée (fig. 35d), cette dernière fait apparaître deux évolutions : un excès en Ca^{2+} , indiquant l'origine évaporitique de Ca^{2+} par le gypse et d'autre part, on observe une évolution linéaire, interprétée comme le résultat de la dissolution des formations carbonatées.

Ces deux représentations nous montrent que la dissolution des ions calcium à partir des carbonates (85 %) (fig. 35b) est plus importante que celle des évaporites (15 %) (fig. 35b).

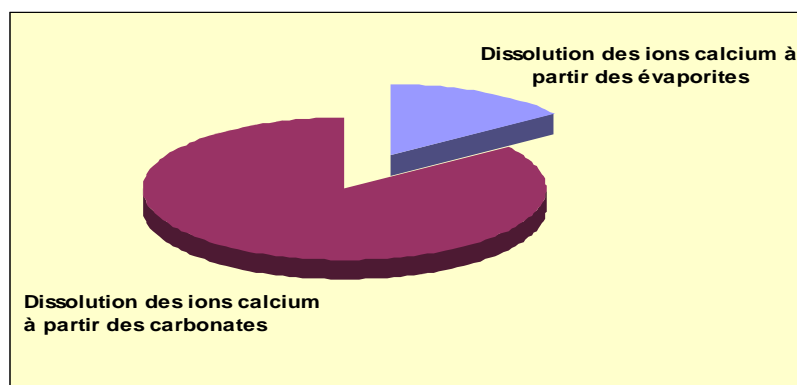


Fig. 35b- Origine de la dissolution des ions du calcium.

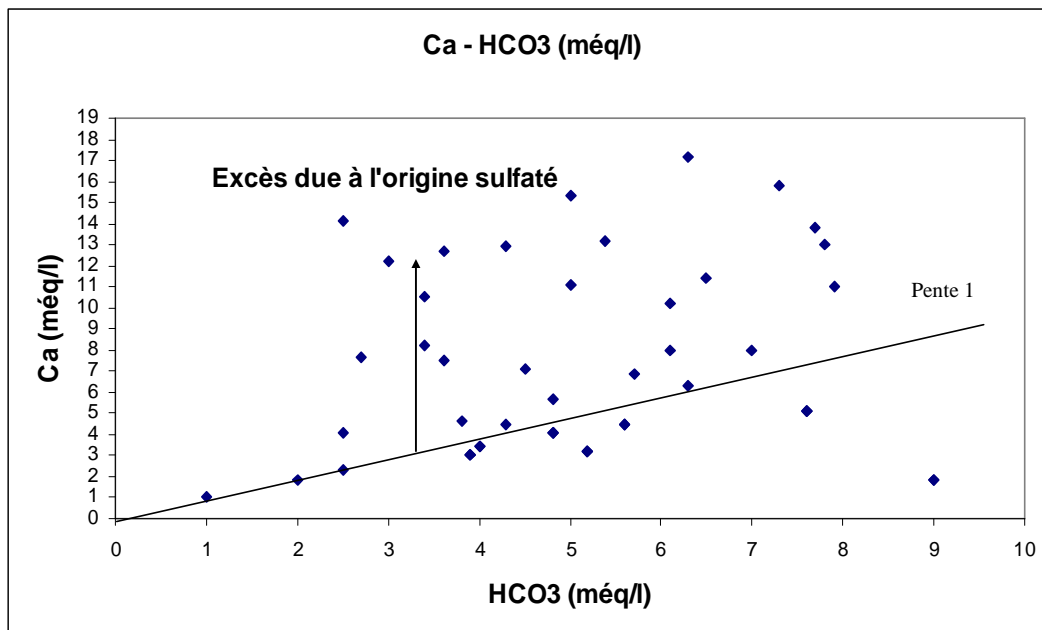


Fig. 35c- Diagramme Ca-HCO₃.

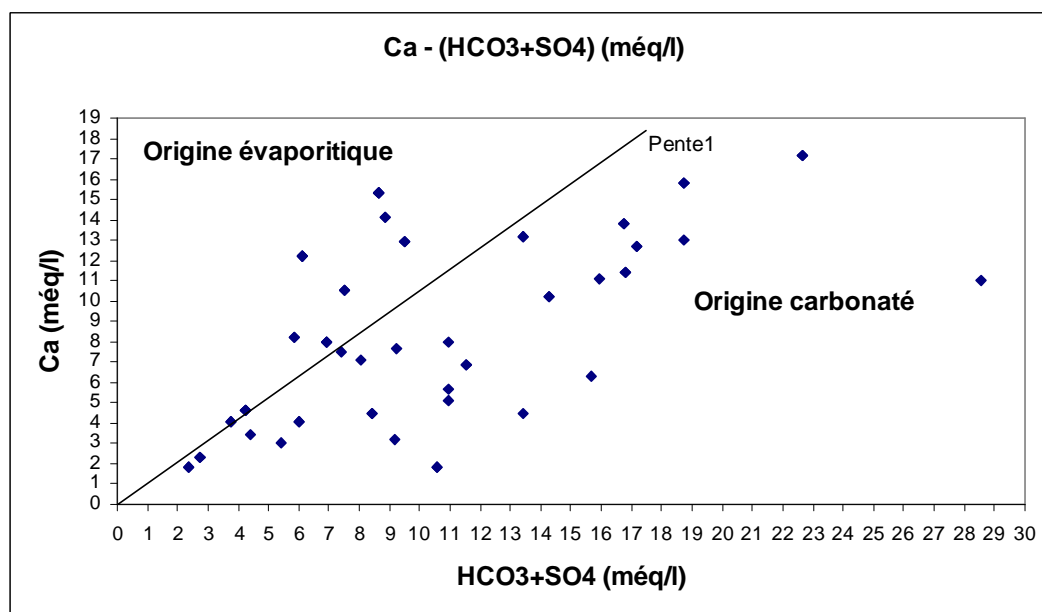


Fig. 35d- Evolution du calcium en fonction des deux éléments HCO₃⁻ et SO₄⁻².

IV.5.3- Etudes des rapports croisés

Le deuxième moyen d'interprétation utilisé dans cette étude est constitué par les diagrammes croisés des concentrations des différents ions, analysés en fonction des chlorures.

IV.5.3.1- Le diagramme Ca - Cl

Le graphique Cl⁻ contre Ca⁺ montre que tous les points se trouvent au-dessus de la droite de pente 1, qui est expliqué par le phénomène d'échange ionique entre l'eau et l'aquifère et se traduisant par une adsorption de Na⁺ et une libération de Ca⁺⁺ (fig. 36).

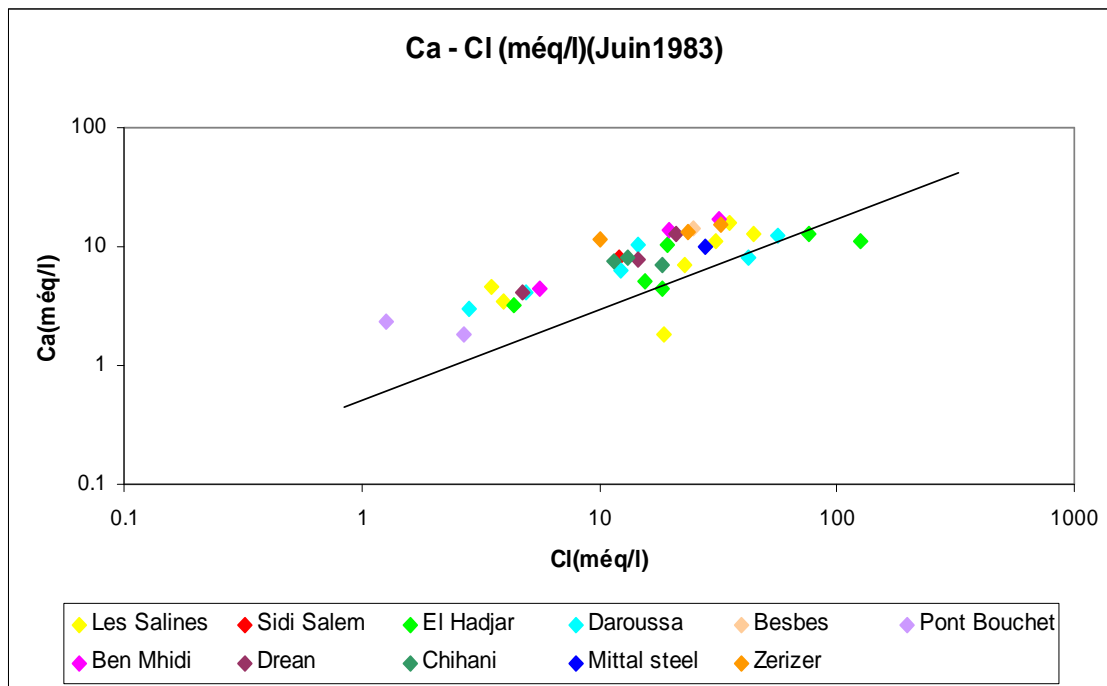


Fig. 36- Diagramme Ca – Cl.

IV.5.3.2- Le diagramme K – Cl

La relation entre le K^+ et le Cl^- indique que la majorité des points se trouve au dessous de la droite de pente 1 à l'exception de quelques points situés sur la cote qui se rapprochent de cette droite montrant que l'origine le plus probable du K^+ est plutôt marine (fig. 37).

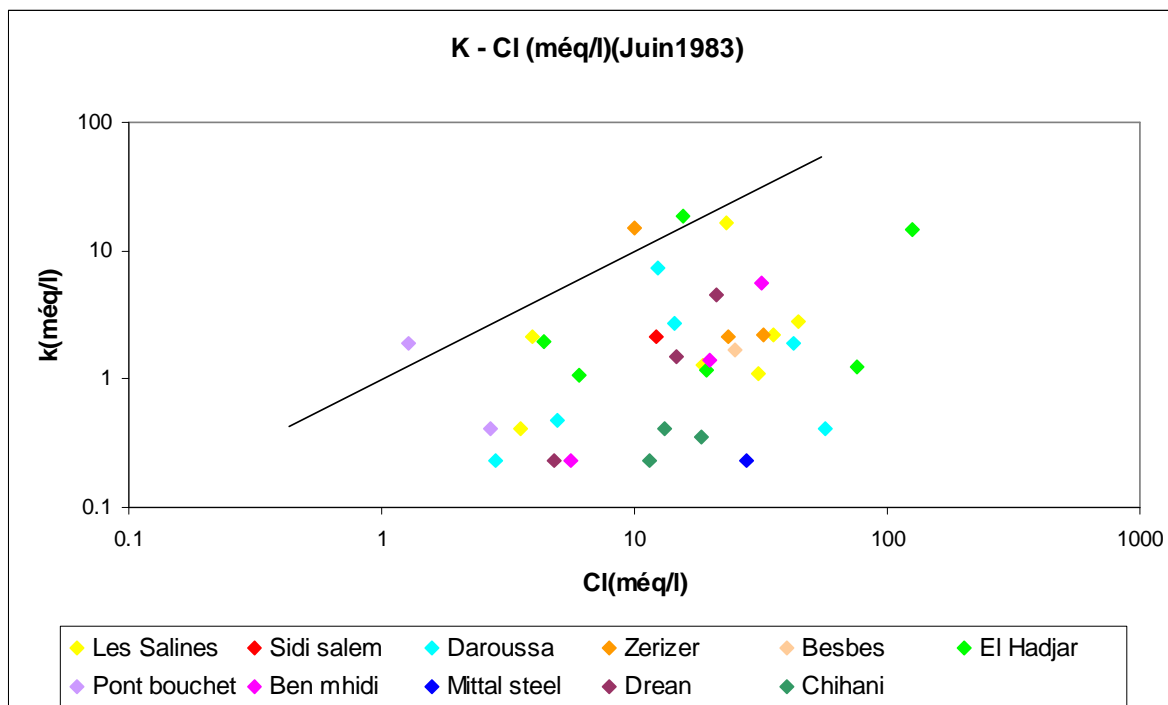


Fig. 37- Diagramme K-Cl.

IV.5.3.3- Le diagramme $SO_4 - Cl$

La relation entre les sulfates et les chlorures montre que la majorité des points se trouve en dessous de la droite de pente 1 à l'exception de quelques points qui se trouve au dessus cette droite. L'enrichissement des points en sulfates est lié à la présence des évaporites dans les aquifères comme le cas des régions de Zerizer, ou due à une contamination d'origine agricole ; le reste des points se situe en dessous de la droite de pente 1. cet excès peut être due à une origine marine (fig. 38).

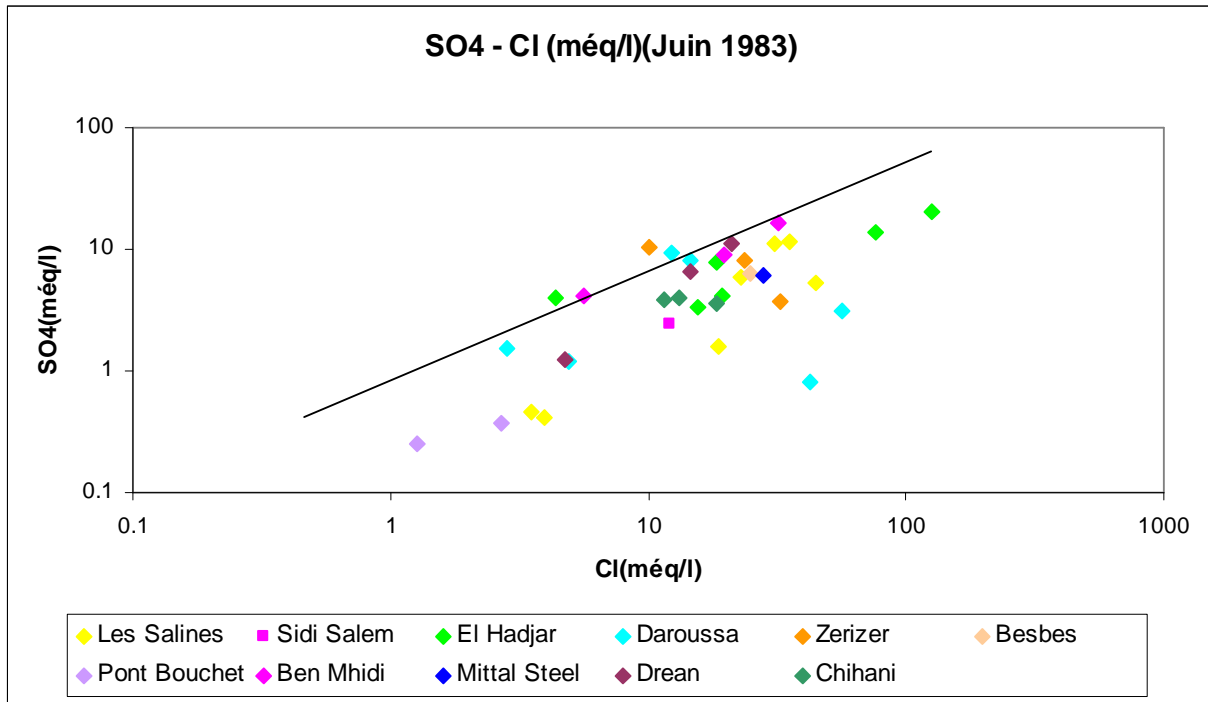


Fig. 38- Diagramme SO4 – Cl.

IV.5.3.4- Le diagramme Mg/Ca - Cl

L'enrichissement en magnésium et l'appauvrissement en calcium sont dus essentiellement aux réactions d'échange ionique, caractéristiques des mouvements de mélange eaux douces/eaux de mer. Sur la figure 39, les points qui se positionnent sur les zones côtières (les salines et El Hadjar) présentent les plus hautes valeurs de ce rapport, prouvant l'origine marine de la minéralisation de ces eaux. Les points qui se localisent sur la droite de pente 1 ; (Chihani, Dréan et Daroussa) confirmant ainsi le phénomène de retour des eaux d'irrigation. Tandis que les autres points présentent les plus faibles valeurs du rapport, en raison de sa richesse en ion calcium, qui a pour origine la dissolution du gypse dans le réservoir (fig. 39).

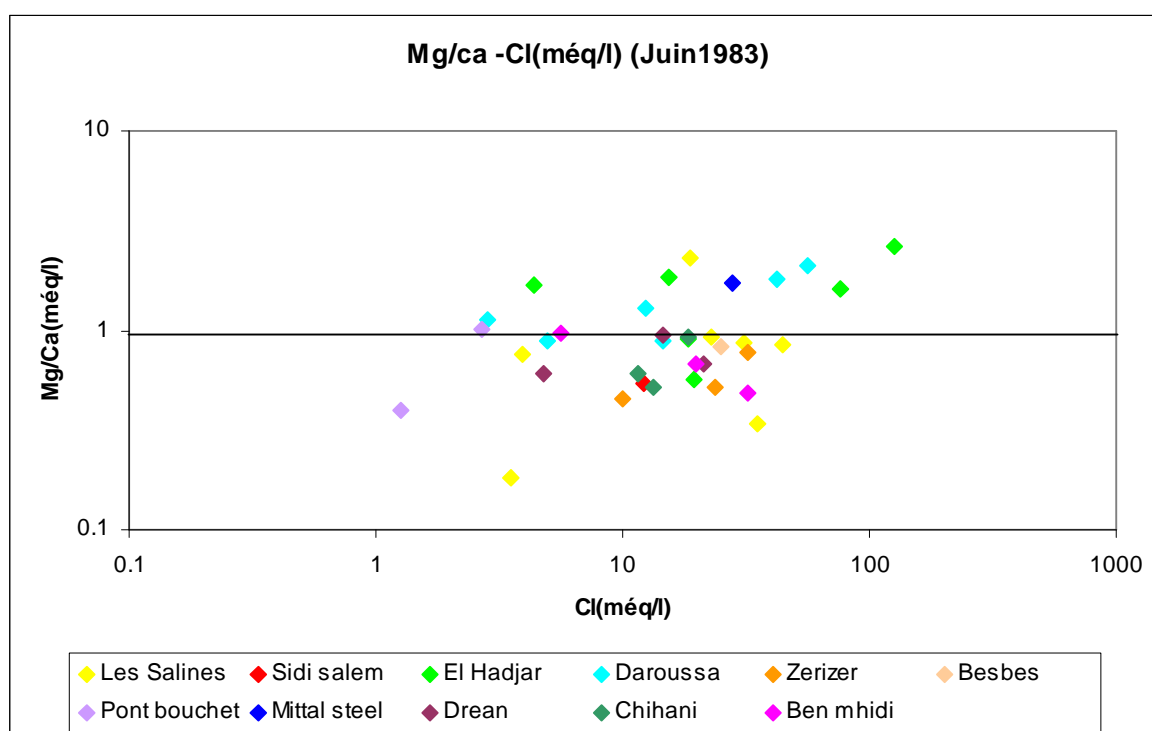
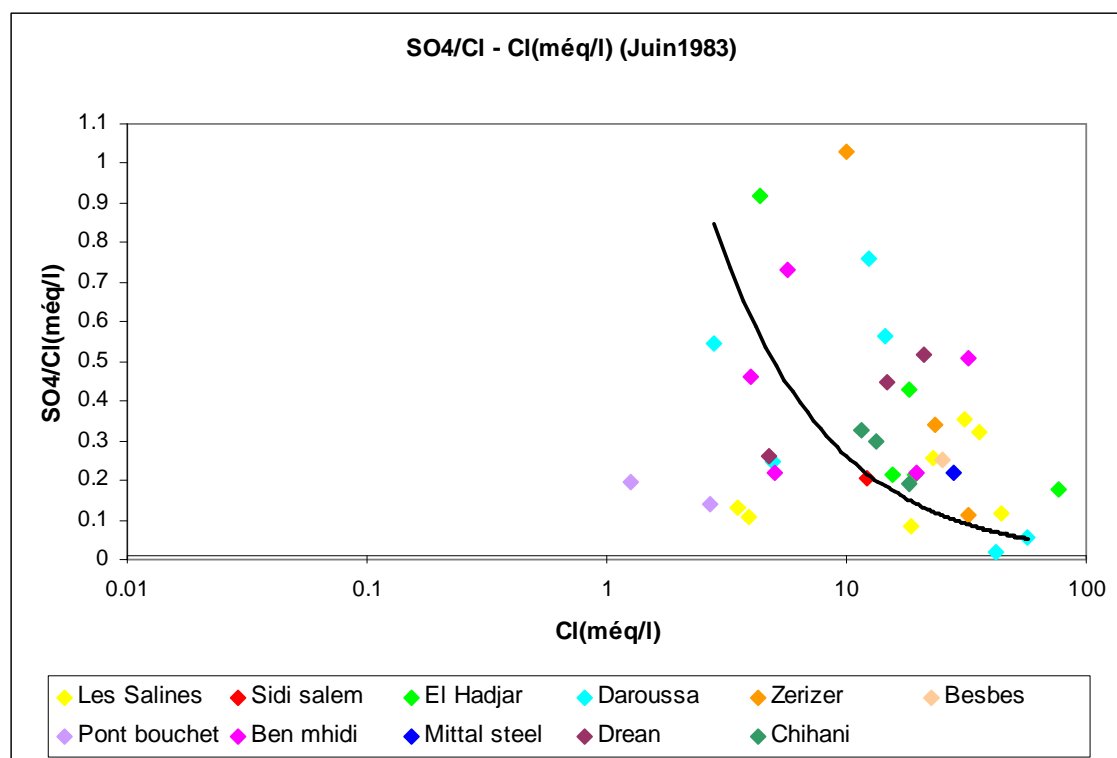


Fig. 39- Diagramme Mg/Ca – Cl.

IV.5.3.5- Le diagramme SO₄/Cl - Cl

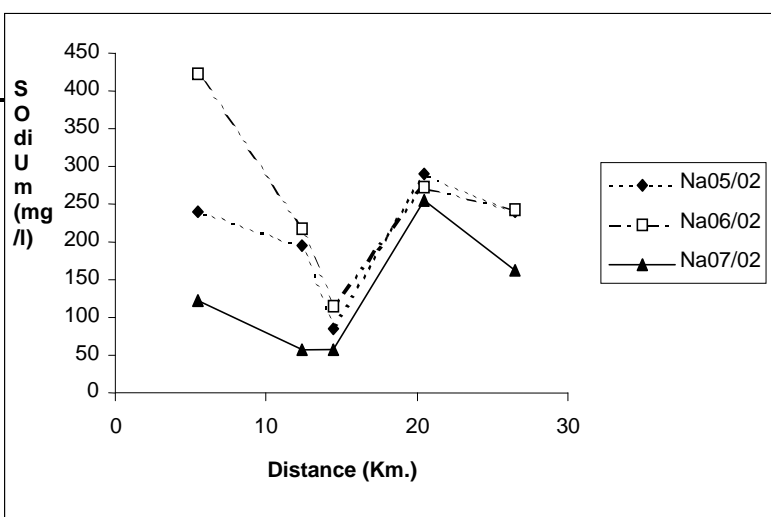
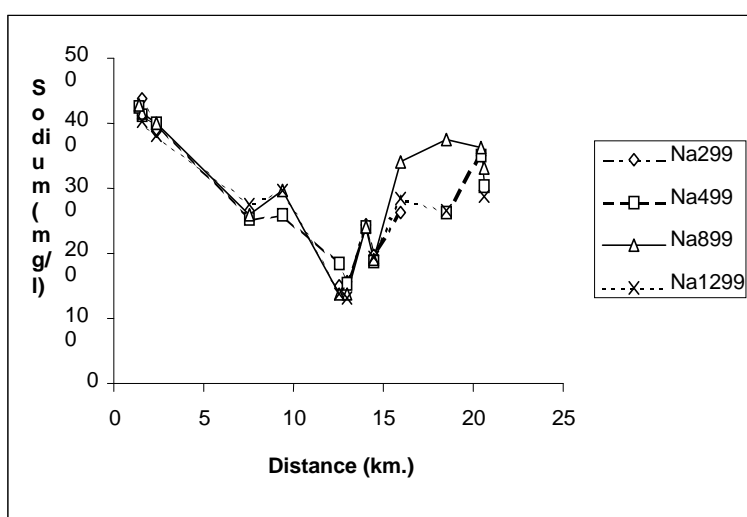
La figure 40 montre que les points qui se situent dans les zones côtières exemptes (les Salines et El Hadjar), présentent les plus faibles valeurs du rapport, vérifiant l'origine marine des eaux. A l'inverse, les autres points présentent des valeurs importantes des teneurs en chlorures et du rapport SO_4/Cl , indiquant une autre origine de la minéralisation ; on pense que cette augmentation du rapport est due à la dissolution du gypse dans le réservoir.



Pour mettre en évidence l'influence de l'éloignement à la côte sur la qualité des eaux souterraines, nous reprenons ici les analyses d'échantillons d'eau souterraine effectuées par Debièche (2002) et Aoun-Sebaiti (2003) selon un profil S-N perpendiculaire à la côte et parallèle à la ligne de courant correspondant à la Seybouse en surface.

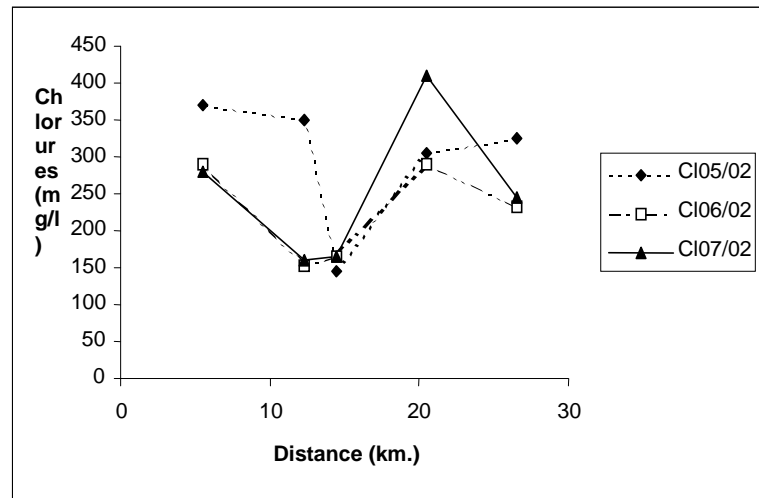
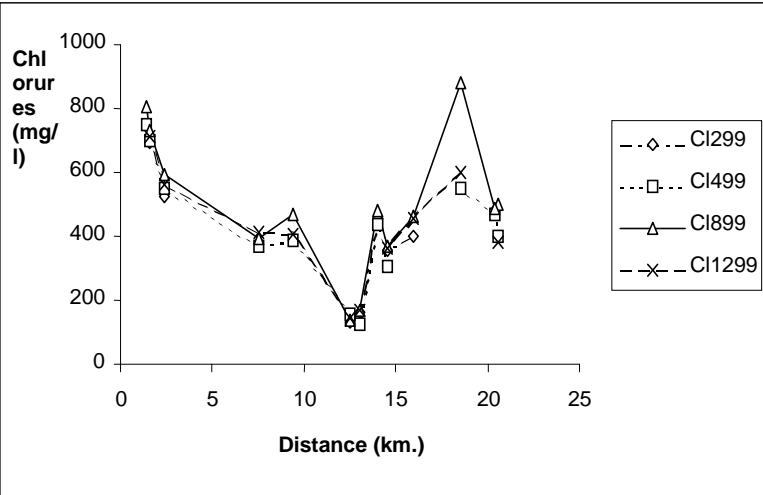
Les graphiques des figures 41 a-f montrent une chute importante des valeurs pour l'ensemble des chlorures, sodium et conductivité électrique. Cette chute est très significative dans les 15 premiers kilomètres de la côte. Dans ce secteur, les valeurs de chlorure passent de 800 mg/l à moins de 200 mg/l et les valeurs de sodium chutent de 400 mg/l à moins de 100 mg/l. Enfin la conductivité diminue de près de 3500 à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vers le Sud, les valeurs remontent à nouveau pour atteindre des valeurs très importantes pour les différents éléments dosés.

Il est clair que la mise en évidence de l'intrusion marine passe par la multiplication des suivis de plusieurs paramètres (CE , Cl^- , Na^+ , Br^- , O18 , et...) sur plusieurs profils perpendiculaires à la mer et parallèles aux lignes de courant (Mania *et al.*, 1985 ; Younsi, 1994 ; Younsi *et al.*, 1997 ; Younsi, 2001). Dans la plaine de Annaba, le seul profil disponible est celui parallèle à la Seybouse où l'on dispose d'un nombre de point d'observation suffisant. Dans les autres secteurs on assiste plutôt à la disparition des points les plus sensibles à l'intrusion marine.



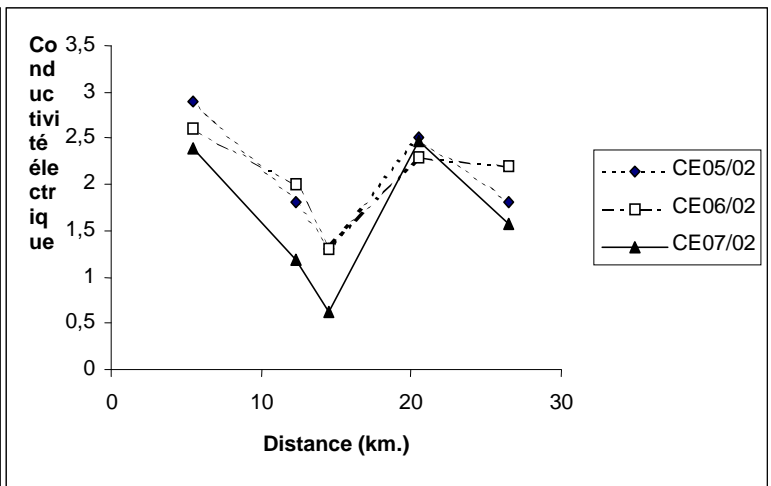
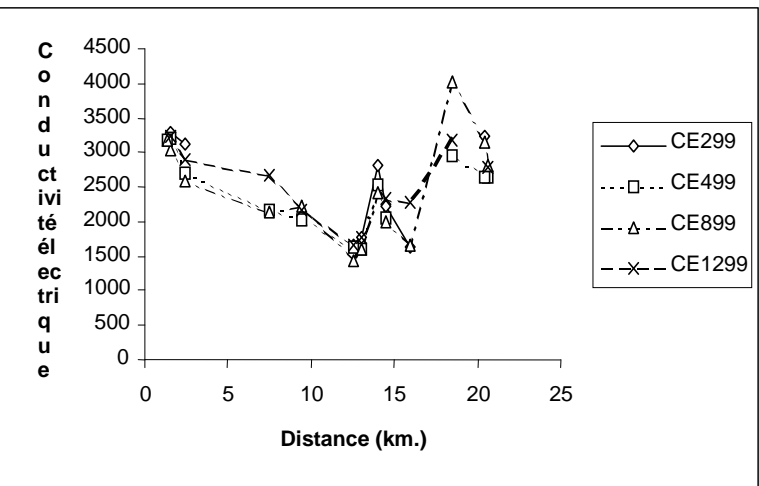
a-Evolution du Sodium (1999)

b-Evolution du Sodium (2002)



c- Evolution des Chlorures (1999)

d- Evolution des chlorures (2002)



e- Evolution de la conductivité électrique (1999)

f- Evolution de la conductivité électrique (2002)

Fig. 41 a-f - Evolution de la conductivité électrique, des chlorures et du sodium selon un profil orthogonal à la mer.

IV.7 - Conclusion :

L'étude hydrochimique des eaux de la plaine de Annaba, montre une forte salinité des eaux. Deux faciès dominants sont observés, l'un chloruré sodique et l'autre, bicarbonaté sodique. L'observation du contexte géologique du site et de la répartition spatiale des éléments chimiques montre que son origine est liée principalement à la dissolution des formations évaporitiques et carbonatées et à l'invasion des eaux de mer.

La détermination du bilan ionique entre les éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-) qui caractérisent les formations argileuses principales du site, nous a permis de montrer la dominance des ions salifères (Na^+ et Cl^-) par rapport au gypse (Ca^{2+} et SO_4^{2-}) et aux carbonates (Ca^{2+} et HCO_3^-) dans l'augmentation de la salinité, ainsi que l'existence du phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe et les formations géologiques.

Les diagrammes croisés des concentrations des différents ions analysés en fonction des chlorures identifient trois processus responsables de la salinisation des eaux de la nappe des graviers : i) l'intrusion d'eau marine dans la nappe le long de la partie littorale (biseau salé), ii) la dissolution de la formation aquifère (carbonatée et évaporitiques) et iii) le retour des eaux d'irrigation chargées en sels dans les périmètres irrigués.

Chapitre V : Modélisation Hydrodynamique & Hydrodispersive

V.1- Introduction

L'utilisation des modèles numériques en hydrogéologie est devenue aujourd'hui indispensable pour l'amélioration de la connaissance et la maîtrise des réservoirs aquifères, la planification et la gestion des ressources en eau (Bonnet, 1978 ; Bear et Verruijt, 1987 ; McDonald et Harbaugh, 1988 ; Anderson et Woessner, 1991). La représentativité des modèles est d'autant bonne que les différentes étapes de leur construction (identification, calage et validation) sont conduites avec succès (de Marsily *et al.*, 1992). Dans ce travail, nous présentons les résultats de la modélisation du système aquifère de la basse plaine de Annaba soumis à un régime d'exploitation intensive. L'objectif de ce travail est de vérifier les hypothèses émises concernant la configuration de l'ensemble du système aquifère de Annaba est de prévoir les effets de l'accroissement des prélèvements dans les champs captant situés en majorité sur la partie littorale.

V.2- Problématique du système aquifère de Annaba-Bouteldja dans son ensemble

Le système aquifère de Annaba-Bouteldja, situé au nord-est de l'Algérie, s'étend sur près de 758 Km². Il renferme des nappes souterraines exploitées par de nombreux ouvrages de captage pour répondre aux besoins en eau des populations, des unités industrielles et agricoles. Les investigations sur les aquifères ont débuté vers les années cinquante, mais ce n'est qu'à la fin des années 70 que les premières quantifications ont permis d'estimer les ressources en eau souterraines renouvelables de l'ensemble des aquifères du SAAB à 100.10⁶ m³/an (Biout, 1989). Des calculs effectués récemment dans la basse plaine de la Seybouse donnent un volume renouvelable de l'ordre de 24.10⁶ m³/an pour NSAS et 10.10⁶ m³/an pour NG (Debièche, 2002). Avec la construction du barrage sur l'oued Bounamoussa au début des années 60 a commencé la désarticulation du système aquifère des plaines de Annaba-Bouteldja. La nappe « profonde » des plaines de Annaba et de Bouteldja et puis la nappe dunaire ont été considérées comme les seuls réservoirs à ressource importante permettant de pallier le déficit escompté en années sèches. Elles ont été retenues comme complément au projet de développement de toute la région, basé sur les eaux du barrage. La simulation du système aquifère à partir du modèle VTDN du BRGM (1988) a prédit un rabattement généralisé continu, sans aucune stabilisation en perspective, atteignant jusqu'à 12 m en 12 ans, et une influence considérable sur l'ensemble des nappes en terme de rabattement. Malgré les résultats alarmistes de ces simulations, l'exploitation du système n'a cessé de croître depuis les années 80. Tous les usagers tentent de prélever au présent le maximum surtout sur

les nappes de graviers et dunaire sans se soucier de l'avenir. La surexploitation des nappes, associée à une période déficitaire en pluviométrie, s'est traduite par un abaissement considérable du niveau piézométrique de toutes les nappes du système.

V.3- Evolution des prélèvements et des variations de la piézométrie dans le système aquifère de la plaine de Annaba

La nappe superficielle est exploitée par des puits artisanaux à usage domestique et surtout agricole dont la profondeur ne dépasse pas 10 m. L'exploitation de cette nappe était évaluée, en 1975, à près de $0.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (Gaud, 1976) et de près de $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ en 1983 selon les fiches des relevés piézométriques de l'ANRH. Le suivi des niveaux de NSAS n'a pas pu être analysée à cause des nombreuses lacunes dans la série collectée. Nous pensons qu'après la construction du barrage de la Cheffia destiné à répondre aux besoins en eau pour l'alimentation des populations, des unités industrielles mais aussi agricoles, le volume des prélèvements devrait diminuer considérablement. De plus, l'exploitation de la nappe profonde s'est manifestée par l'assèchement depuis les années 90 d'une grande partie des puits dans plusieurs secteurs de la plaine où la nappe profonde est fortement sollicitée.

La nappe des graviers de la plaine de Annaba est passée en l'espace de 18 années (1978 à 1996) d'un état de non-exploitation à un état de surexploitation. En effet, son exploitation a connu une croissance très rapide dès 1982. De 6.3 m^3 en moyenne sur les années antérieures à 1982, le volume annuel d'exploitation par les forages est passé à $19.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1988 (tabl. 9). La quasi-totalité de ces prélèvements est concentrée aux Salines, Allélick et Dréan dans des secteurs restreints (fig. 42).

Le régime intensif d'exploitation s'est manifesté par une baisse importante et continue du niveau piézométrique. Dans l'ensemble l'abaissement total de la nappe profonde entre 1983 et 1996 peut atteindre plus d'une dizaine de mètres (fig. 43).

Tabl. 9 : Historique des prélèvements dans la nappe des graviers.

Région	Débit (l.s^{-1})					
	1982	1983	1985	1987	1988	1996
Seybouse Ouest	10	20	23	55	75	110
Dréan Sud	85	85	103	110	150	170
Ben M'hidi Nord	30	210	225	210	220	250
Besbes-Ben M'hidi Est	75	65	87	120	180	200
Total	200	380	438	495	625	730

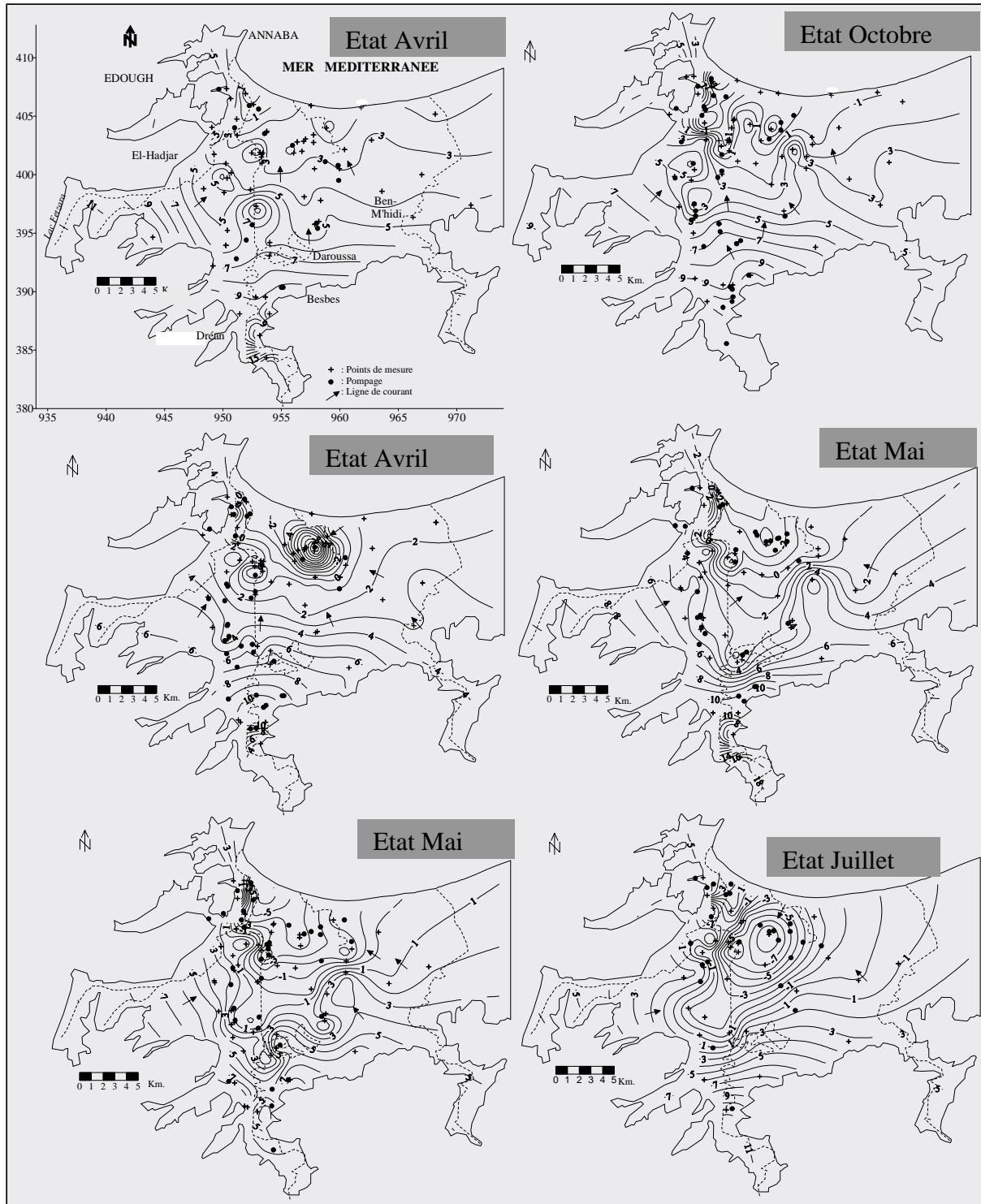


Fig. 42- Evolution de la piézométrie dans NG (Hani, 2003).

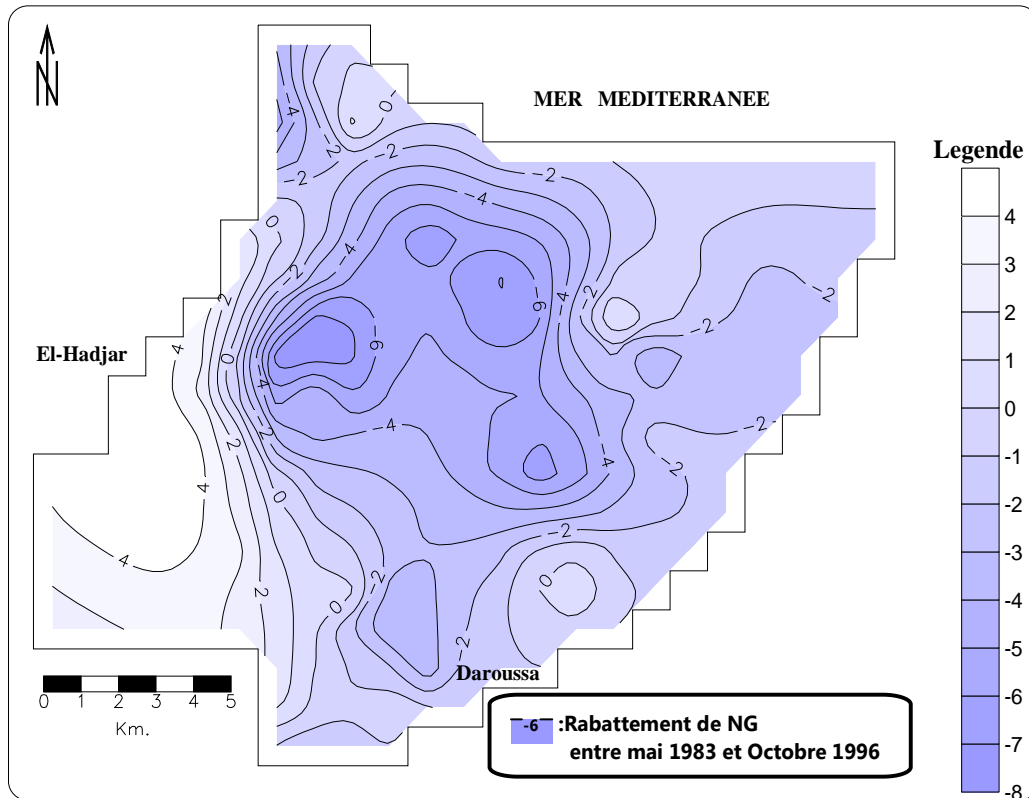


Fig. 43- Carte de rabattement de la nappe des graviers (mai 1983-octobre 1996).

V.4- Cadre hydrogéologique du domaine étudié

Le système aquifère étudié est un fossé d'effondrement subsidiant qui se raccorde aux reliefs de bordure à l'ouest par des failles et à l'est par un horst subméridien, représenté par l'élévation de Daroussa (fig. 44). Schématiquement, le système aquifère de la plaine d'Annaba ainsi définie est assimilé à deux couches communicant entre elles par drainance verticale à travers un horizon argilo-sableux semi-perméable : la première, se rapportant à l'horizon superficiel, représente la nappe phréatique « NSAS » captée par les puits domestiques ; la seconde concerne l'horizon principal des graviers « NG » (fig. 44).

La nappe superficielle est limitée au Nord, le long de la côte, par le cordon dunaire qui contient une nappe à une charge plus élevée, ceci a pour effet de bloquer son écoulement vers la mer et de créer des marécages. La limite ouest est constituée par les massifs anciens de l'Edough (micaschistes et gneiss) dont les parties altérées contiennent un aquifère de faible perméabilité, non exploités. Au Sud de la bordure ouest, dans le bourrelet dunaire du Lac Fetzara, les isopièzes montrent un très faible apport d'eau à partir du lac. Au Sud et à l'Est, le long de la limite avec le tracé de l'élévation de Daroussa, les cartes piézométriques mettent en

évidence une continuité de l'aquifère ce qui laisse supposer des échanges permanents avec le reste de la plaine.

L'alimentation de la nappe superficielle est assurée par l'infiltration des eaux de pluie et de ruissellement des oueds (Seybouse, Meboudja en particulier). Les exutoires de la nappe sont constitués par le drainage des eaux de surface et par l'évaporation.

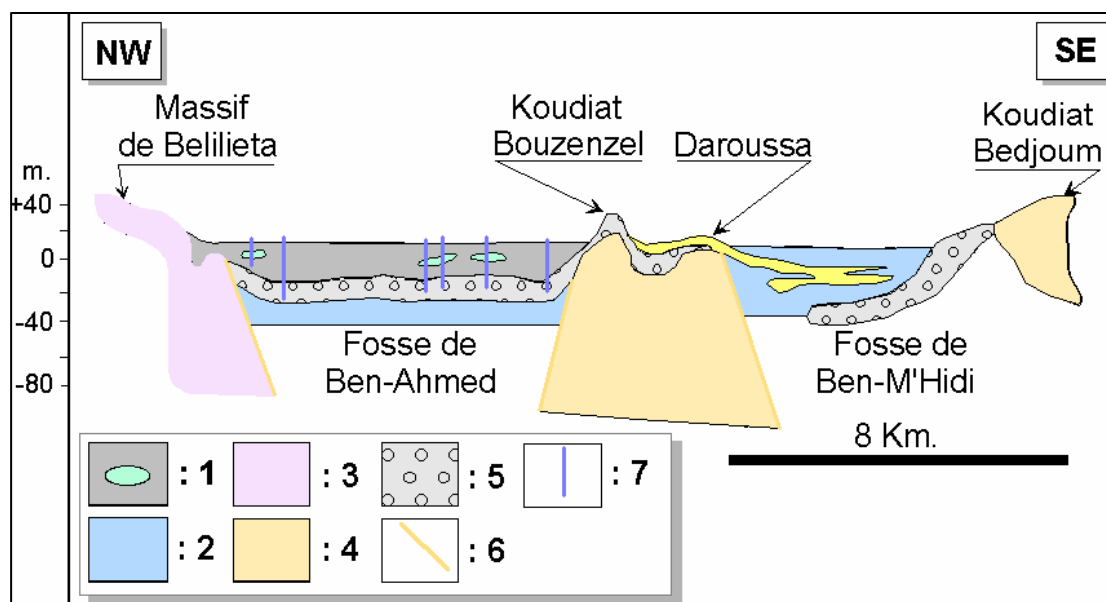


Fig. 44- Coupes au travers de la plaine de Annaba.

Légende : 1 : Argile limoneuse avec passées sableuses (nappe phréatique) ; 2 : Argile détritique Plio-quadernaire ; 3 : Socle métamorphique (micaschistes, gneiss, cipolins) ; 4 : Grès Numidiens ; 5 : Galet et graviers (nappe principale ou profonde) ; 6 : Faille ; 7 : Forage.

La nappe des graviers est limitée au Nord par la mer Méditerranée qui constitue son principal exutoire. A l'Ouest la nappe reçoit une faible alimentation à partir des cipolins et des alluvions des hautes terrasses. Pour ce qui est de la limite est, deux hypothèses peuvent être envisagées. Etant donné l'amincissement des niveaux de graviers dans ce secteur bordant la fosse Ben-Ahmed et que la piézométrie indique une continuité des écoulements sur l'ensemble de la plaine, la limite est assimilable soit à une limite étanche, soit à une limite d'alimentation. La validité de ces hypothèses sera testée numériquement lors du calage du modèle.

V.5- Modélisation des écoulements souterrains

Nous avons utilisé le programme de modélisation MODFLOW, développé en Fortran par l'USGS (McDonald et Harbaugh, 1988). Ce logiciel a pour qualités premières d'être simple, modulaire et d'avoir été rendu fiable par une utilisation mondiale massive. La version que

Nous utilisons fonctionne sur une interface en Visual Basic : Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic 1999).

C'est un modèle à bases physiques, déterministe, capable de représenter des écoulements laminaires monophasiques tridimensionnels dans des systèmes multicouches. Il résout l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux (combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité) par la méthode des différences finies. Pour se faire, l'aquifère doit être discrétisé en mailles quadrangulaires et des conditions aux limites doivent être imposées. Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources (nombre, distribution, qualité). La piézométrie calculée au centre de chaque maille tient compte des paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique, porosité), des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, possible liaison avec un réseau hydrographique, etc...) et des conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration, éventuels pompages).

Le modèle s'articule autour de deux hypothèses fondamentales : les gradients hydrauliques doivent être faibles et la continuité hydraulique de l'aquifère respectée. Nous avons montré que ces conditions étaient vérifiées pour la nappe des graviers de la plaine d'Annaba.

Le code Modflow a été utilisé pour vérifier les hypothèses émises et analyser les effets de l'intensification des pompages dans la plaine. Le domaine retenu, couvrant une superficie de 383 km², est repéré dans le système Lambert par Xmin : 944.5 ; Xmax : 969.5 et Ymin : 384.5 ; Ymax : 409.5. Le domaine étudié, correspondant à la fosse Ben-Ahmed, est discrétisé horizontalement en 1532 mailles carrées de 500 m de coté et verticalement en trois couches ; nappe superficielle, semi-perméable et nappe des graviers. Chaque maille 3-D est un parallélépipède dont le côté vertical est variable pour les trois couches (fig. 45a).

V.5.1- Données d'entrée

La pluie efficace a été calculée avec les précipitations mensuelles par la formule de Thornthwaite. Pour le code numérique d'écoulement, il est nécessaire d'introduire les caractéristiques géométriques de chacun des trois horizons (fig. 46). Les côtes du toit et du mur ont été déterminées essentiellement à partir de l'analyse des données de forage et exprimées par rapport au nivellement général. L'introduction des valeurs de perméabilité de chaque couche est également indispensable. En effet, ce dernier dans le calcul des flux d'eau entrant ou sortant d'une maille, intègre pour chaque face de la maille, la vitesse de Darcy $V = -K.gradh$ sur une surface $\Delta x.h_m$ avec Δx : pas du maillage et h_m : charge calculée sur la face. Par conséquent, les valeurs de transmissivité issues des pompages d'essai effectués sur NSAS en se référant à la granulométrie et à l'épaisseur des alluvions ou de krigeage des

transmissivités (NG) sont divisées par l'épaisseur de l'horizon considéré avant d'être introduites dans le modèle. La perméabilité de l'horizon semi-perméable est déterminée à partir de trois pompages d'essai de longue durée. Parallèlement, l'historique des prélèvements sur les forages (captant la nappe profonde) est connu avec une précision acceptable. Ce sont les quantités d'eau prélevées dans NSAS qui sont assorties d'incertitude. Le débit de l'oued Seybouse est déterminé à partir des jaugeages effectués par l'ANRH à l'amont de la plaine.

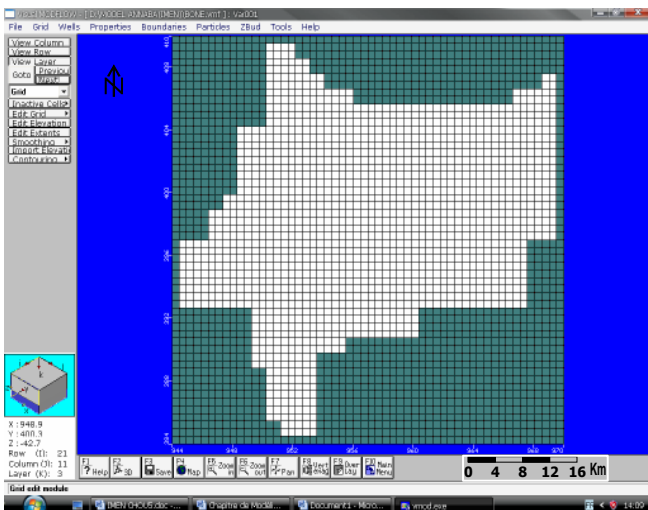


Fig. 45a- Discrétisation du domaine d'étude.

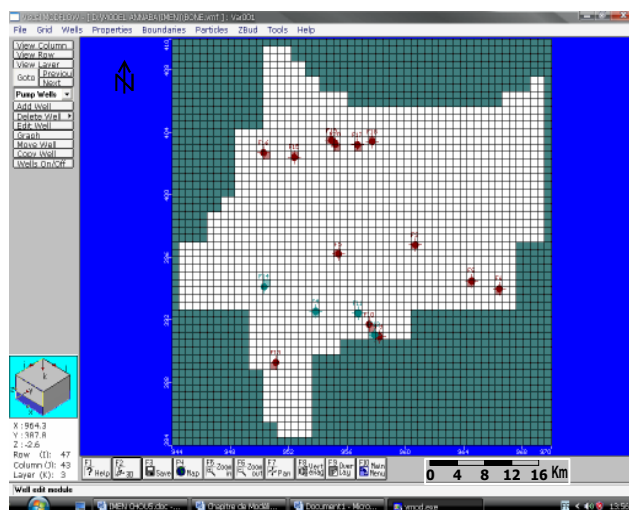
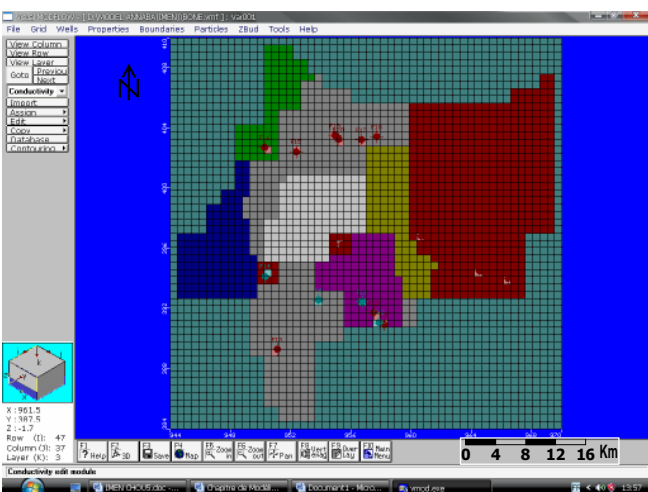


Fig. 45b-



localisation des forages.

Fig. 45c- Répartition des conductivités électriques dans la zone d'étude.

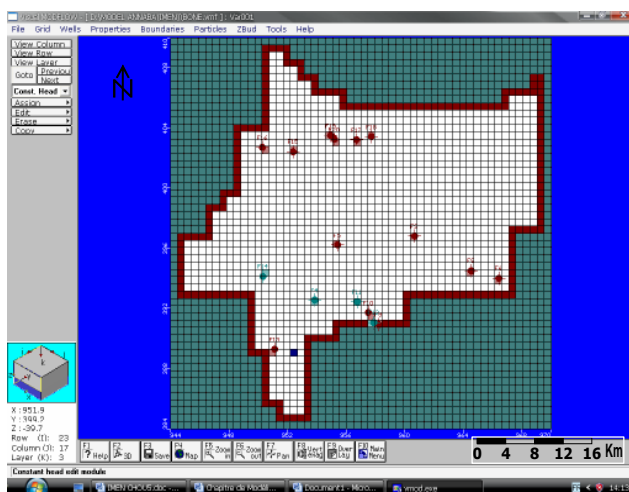


Fig. 45d- conditions aux limites dans la zone d'étude.

Fig. 45 a-b - Discrétisation du domaine d'étude et conditions aux limites du modèle.

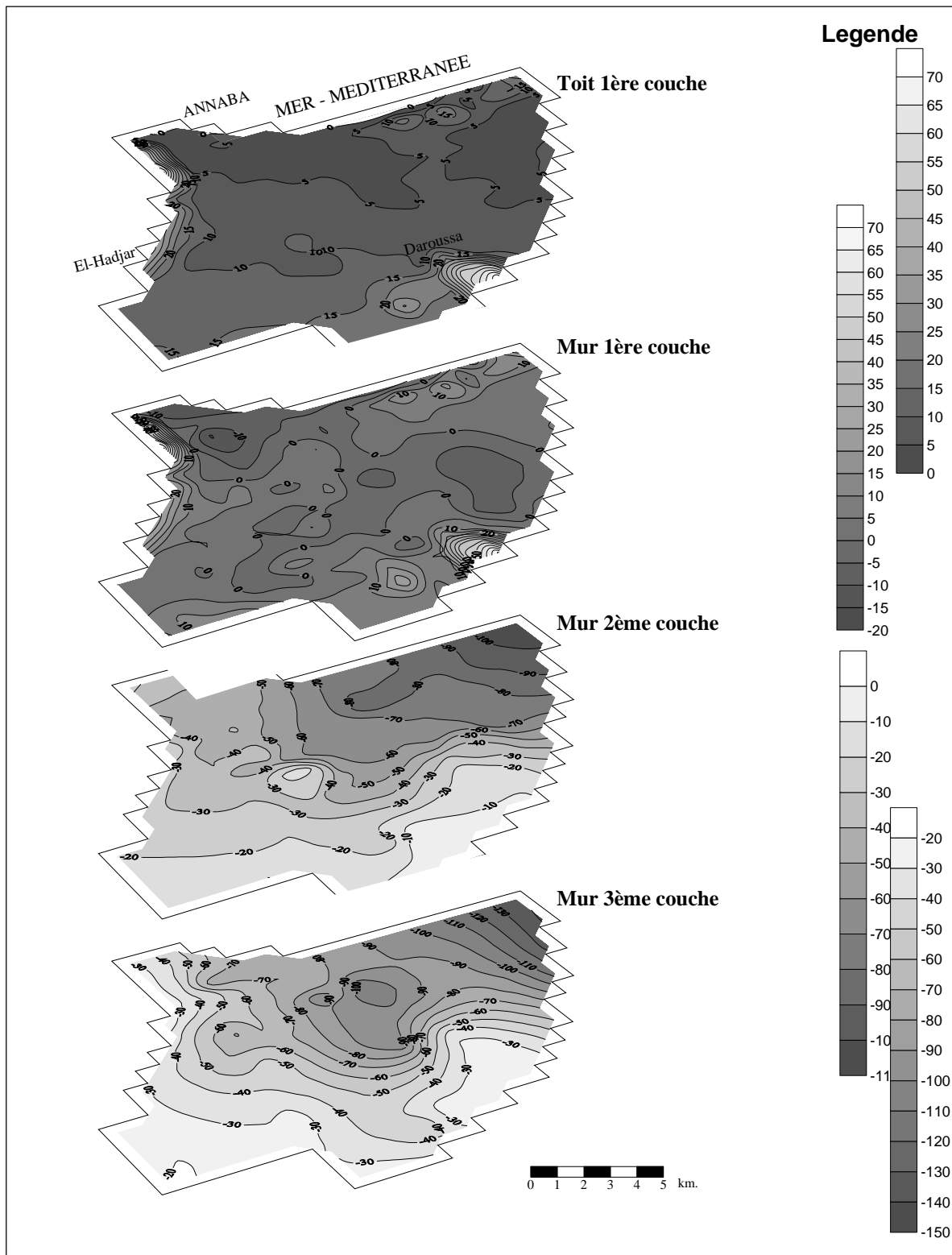


Fig. 46- Caractéristiques géométriques des trois couches.

Les limites du complexe aquifère peuvent être formulées de la manière suivante :

■ **Nappe superficielle** : Le long de la côte au Nord, la nappe est bordée par le cordon dunaire, renfermant une nappe à charge plus élevée, qui constitue donc une limite hydraulique à charge constante. A l'Ouest, sur la bordure située entre Annaba et Dréan, la nappe ne reçoit pas d'apport extérieur. C'est donc une limite à flux nul sauf à l'extrême sud où une alimentation à partir des hautes terrasses est possible. A l'Est, la nappe reçoit une faible alimentation à partir des alluvions des plaines de Ben-M'hidi sauf en bordure des formations imperméables des marécages de Mekrada.

■ **Semi-perméable** : Toutes les limites sont considérées à flux latéral nul.

■ **Nappe des graviers** : Au Nord, la nappe est limitée par la mer Méditerranée qui constitue une limite à potentiel imposé. A l'Ouest les formations métamorphiques constituent une limite à flux entrant. Au Sud Ouest, la nappe reçoit des apports assez significatifs en provenance du lac Fetzara ; c'est donc une limite à flux entrant. En revanche, les isopièzes sont toujours perpendiculaires aux bordures situées à l'extrême sud-ouest de la plaine. A l'Est, le comportement des mailles représentant l'élévation de Daroussa doit être caractérisé pour une bonne représentation du système hydrogéologique. Une hypothèse classique est de considérer la bordure Est comme condition à flux nul, notamment à proximité de la butte, compte tenu de la nature imperméable des formations mio-pliocènes correspondant au relèvement du substratum et de l'amincissement des couches de graviers dans ce secteur. Une autre hypothèse lorsque manifestement l'on constate que les isopièzes montrent presque toujours la même allure avec une alimentation du domaine étudié par les niveaux de graviers de la fosse Ben-M'hidi à travers le horst de Daroussa.

Les débits entrants sont estimés grâce à la loi de Darcy : $Q = SK \frac{\Delta h}{\Delta x}$ avec S : la section de l'aquifère, K : la conductivité hydraulique, Δh : la perte de charge entre mailles voisines, Δx : le pas de la maille.

V.5.2- Calage du modèle des écoulements souterrains en régime permanent

Le code Modflow est utilisé en régime permanent sur l'état piézométrique relevé en Octobre 1982. En cette période, l'écoulement peut être considéré comme permanent car entre janvier et mai, les niveaux piézométriques fluctuent très peu. Les raisons en sont : la régularité des apports pluviométriques, l'absence d'une importante végétation pouvant modifier les quantités infiltrées, l'absence de toute campagne d'irrigation. De plus, le nombre de mesures synchrones réalisées est relativement plus élevé que pour les autres périodes (79 pour la nappe superficielle et 60 pour la nappe des graviers). Néanmoins, la plaine de la basse Seybouse couvre une superficie importante et ces mesures restent insuffisantes. Pour vérifier les

hypothèses relatives à la nature de la condition aux limites sur la bordure Est, nous avons testé numériquement les deux cas (la nappe superficielle et la nappe des graviers) dans le premier cas le calage nécessite des modifications très importantes des perméabilités alors que dans le second la distribution spatiale des perméabilités reste comparable à celle obtenue par le krigeage. C'est donc la seconde option que nous avons retenu en s'appuyant sur l'observation des cartes piézométriques de la nappe des graviers.

Pour ce premier essai, sur un domaine qui jusqu'à présent était relativement mal connu, nous avons choisi d'ajuster le modèle par un simple procédé manuel d'essai-erreur. Lorsque les piézométries semblent correctes, il est nécessaire de vérifier la conservation des flux en eau. Le code numérique permet d'accéder au bilan en eau de chacun des termes d'écoulement et au bilan total de chaque couche.

Les résultats du calage, en régime permanent, illustrés par la carte de différence piézométrique simulée et observée (fig. 47b) indique un écart absolu moyen de 0.4 m, avec néanmoins un maximum de 2 m au nord de Daroussa où le nombre de pompage d'essai est limité. Nous pouvons donc considérer que le calage est bon. En particulier sur des zones caractéristiques comme par exemple le nord de la plaine (la zone littorale), où l'on observe que la dépression piézométrique est bien reconstituée sur la carte calculée (fig. 47a), due aux nombres élevés des forages et aux variations fréquentes des prélèvements dans ce secteur. Une définition plus fine aurait permis une meilleure similitude avec la piézométrie de référence.

Si l'on compare, là où des mesures sont disponibles, les perméabilités calculées (fig. 48) et celles mesurées, elles sont globalement du même ordre de grandeur ce qui donne pratiquement la même répartition des transmissivités obtenues à partir des pompages d'essai.

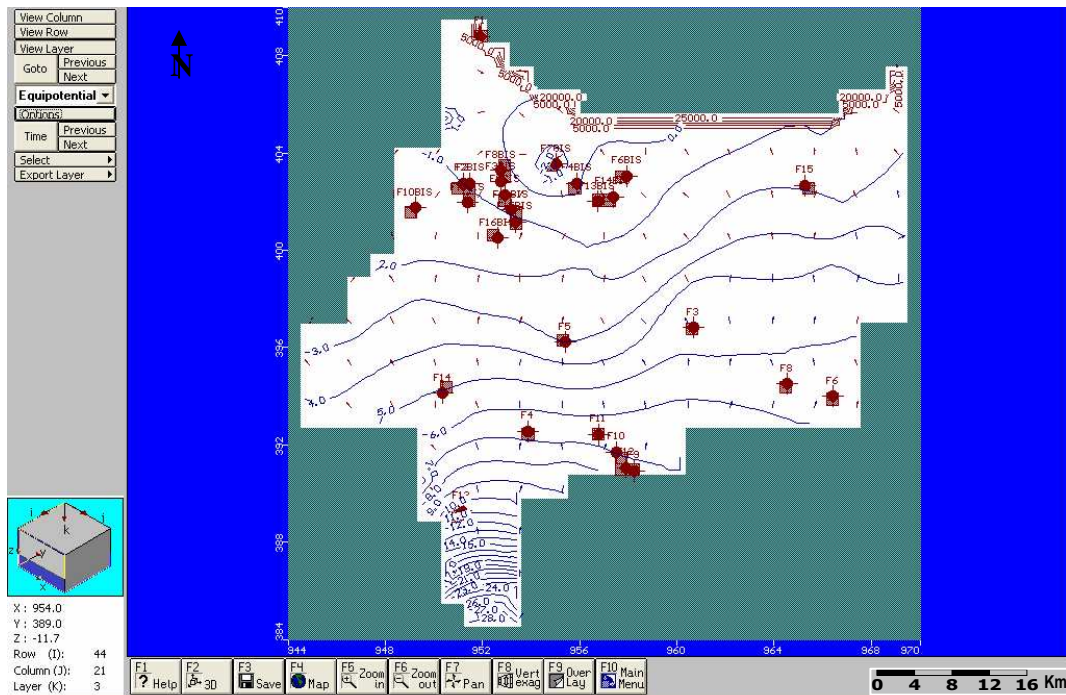


Fig. 47a- Piézométrie calée de la nappe des graviers (octobre 1982).

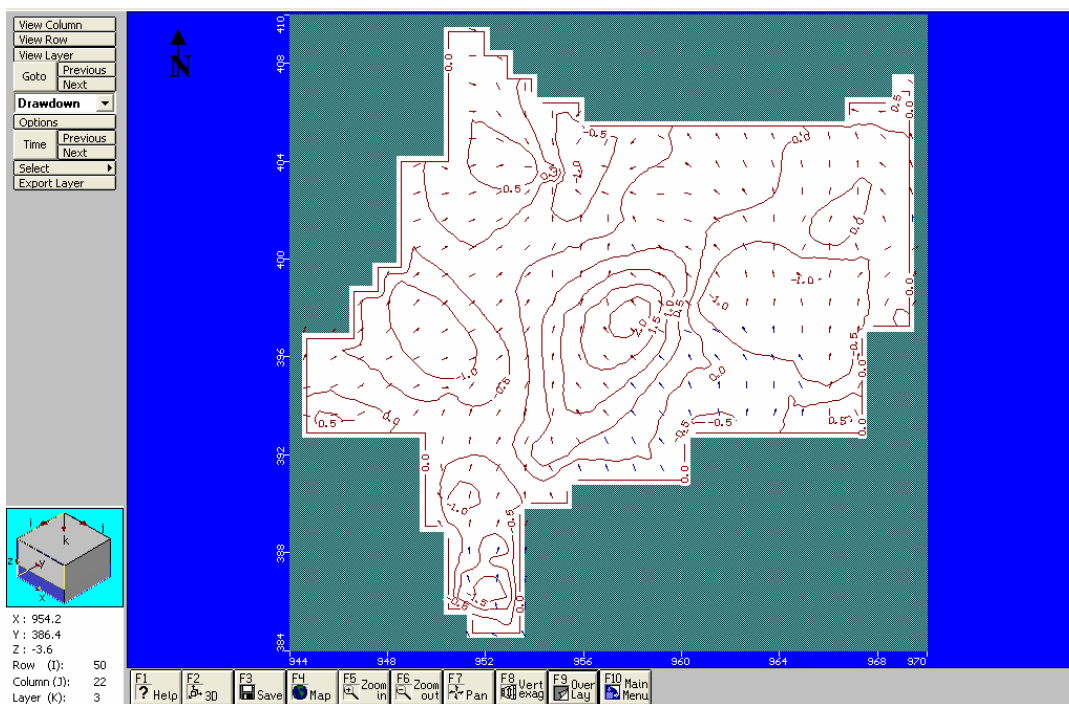


Fig. 47b- Cartes de différence entre Piézométrie simulée et mesurée de la nappe des graviers (octobre 1982).

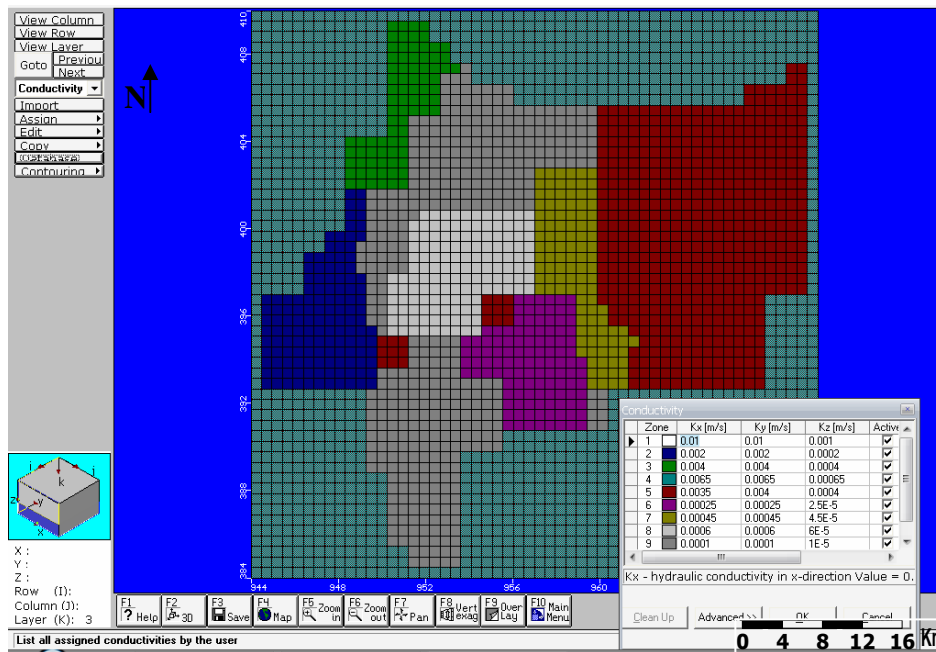


Fig. 48- Répartition des conductivités hydrauliques obtenues par calage de NG.

Les bilans hydrauliques du système aquifère restitués par le modèle montrent que la somme des entrées est égale à la somme des sorties, le volume stocké est par conséquent nul (loi de conservation des masses). Les apports aux systèmes calculés par le modèle sont constitués par les pluies efficaces sur nappe superficielle et par l'alimentation à partir des flux entrants par les limites pour la nappe des graviers. Les sorties sont représentées essentiellement par les potentiels imposés pour la nappe superficielle et par les prélèvements dans les forages dans la nappe des graviers (tabl. 10 et 11).

Tableau 10 : Bilan hydrique ($m^3 \cdot s^{-1}$) de la nappe superficielle en régime permanent (octobre 1982).

Termes d'écoulement	Entrées	Sorties	Entrée-Sortie
Emmagasinement	0	0	0
Charge constante	1.38E-02	0	1.38E-02
Puits	0	3.17E-02	-3.17E-02
Drains	0	0	0
Recharge	7.04E-01	0	7.04 E-01
ET	0	0	0
Drainance	1.21E-01	1.64E-01	-4.30E-02
Flux aux limites	5.67 E-02	0	5.67E-02
Potentiel	4.48E-02	7.37E-01	-6.92E-01
Somme	9.40E-01	9.33E-01	7.80E-03

Tableau 11 : Bilan hydrique ($m^3 \cdot s^{-1}$) de la nappe des graviers en régime permanent

(octobre 1982).

Termes d'écoulement	Entrées	Sorties	Entrée-Sortie
Emmagasinement	0	0	0
Forages	0	4.76E-01	-4.76E-01
Drains	0	0	0
Recharge	0	0	0
ET	0	0	0
Drainance	1.64E-01	1.21E-01	4.30E-02
Flux aux limites	3.32E-01	0	3.32E-01
Potentiel	1.89E-01	8.73E-02	-1.02E-01
Somme	6.86E-01	6.84E-01	1.50E-03

V.5.3- Calage du modèle des écoulements souterrains en régime transitoire :

La seconde étape des simulations est effectuée afin de faire le point sur les effets engendrés par l'accroissement des prélèvements effectués depuis octobre 1982 sur la nappe superficielle et la nappe des graviers. Le calage en régime transitoire, à plus au moins long terme, couvre une période de 19 ans au cours de laquelle des relevés piézométriques ont été effectués, à un pas de temps irrégulier entre 1989, 1999 et 2001. Les potentiels précédents calculés en régime permanent sont utilisés comme des valeurs initiales. Le calage du modèle en régime transitoire a nécessité plusieurs simulations. Au cours de cette phase, la reproduction des fluctuations piézométriques des aquifères a permis d'ajuster au mieux les coefficients d'emmagasinement utilisés par le modèle. Les valeurs initiales des caractéristiques hydrodynamiques des nappes ont été introduites puis réajustées en cours du calage. C'est ainsi que la valeur de 3% du coefficient d'emmagasinement introduite dans un premier temps pour la nappe superficielle a été conservée. Pour la nappe des graviers, une valeur de l'ordre de 1.10^{-4} a été prise en compte excepté dans la partie amont de la Seybouse où l'emmagasinement est plus élevé soit 10^{-3} .

Si l'on compare les piézométries calculées et les piézométries de référence interpolées à partir des relevés réalisés sur le terrain (fig.52), l'ajustement peut être considéré comme acceptable.

Le comportement piézométrique des nappes observé sur la période qui s'étale entre (1982, 1989, 1999 et 2001) (fig. 49,50,51), a pu être reconstitué dans la plupart des piézomètres avec un écart moyen de 0.3 m. En particulier sur des zones caractéristiques de la nappe des graviers comme par exemple au nord de la plaine; ou on retrouve bien sur les cartes piézométriques calculées la dépression piézométrique visible et on remarque une progression de la dépression (extension permanente de l'isopièze de côte 0) qui augmente à partir des zones côtières en se dirigeant plus au sud dans le secteur situé à proximité des alluvions des terrasses ou alors à l'est en bordure de la limite représentée la vallée de la Bounamoussa. Ceci est dû probablement au pompage intensif pratiqué dans les principaux champs captants dans ce secteur. Une définition plus fine aurait permis une meilleure similitude avec la piézométrie de référence.

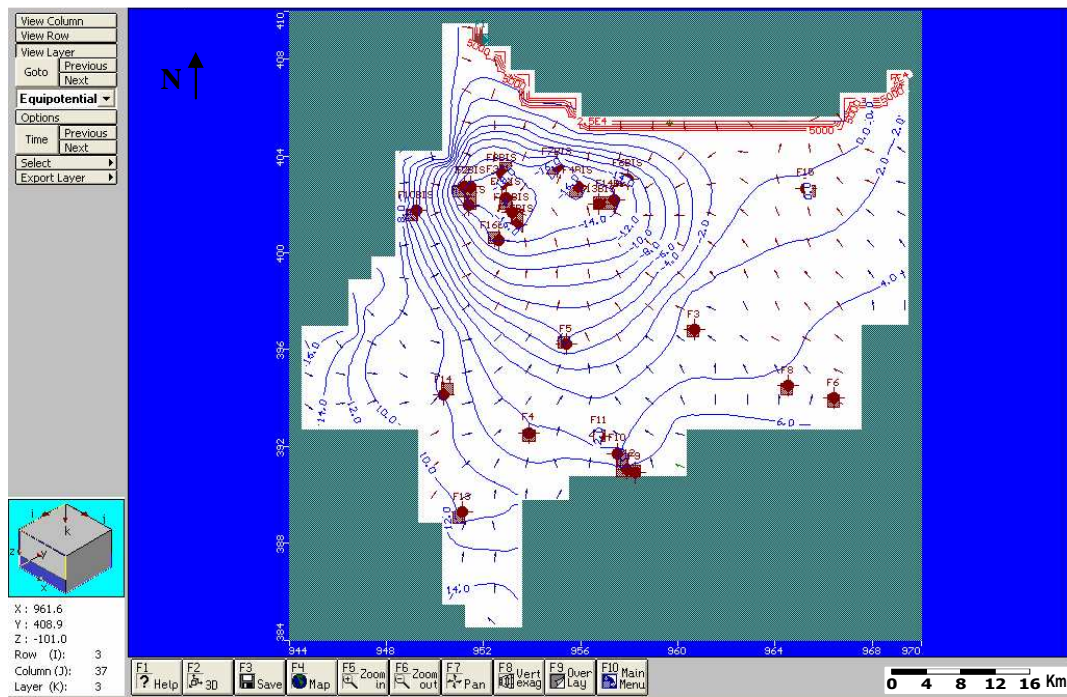


Fig. 49- Piézométrie calée de la nappe des graviers (octobre 1989).

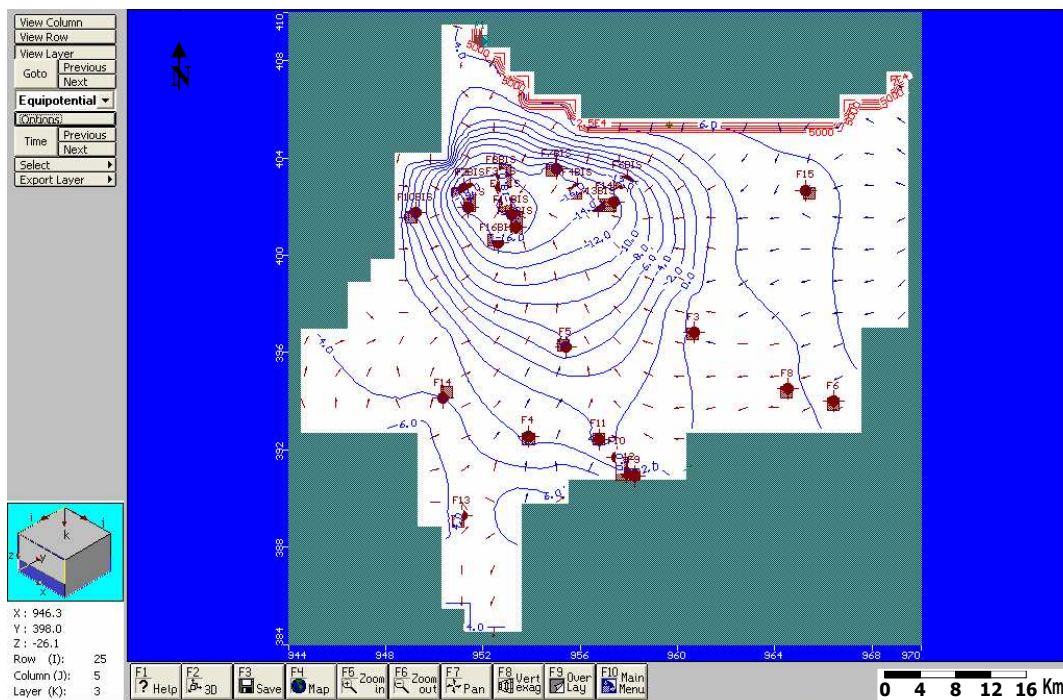


Fig. 50- Piézométrie calée de la nappe des graviers (octobre 1999).

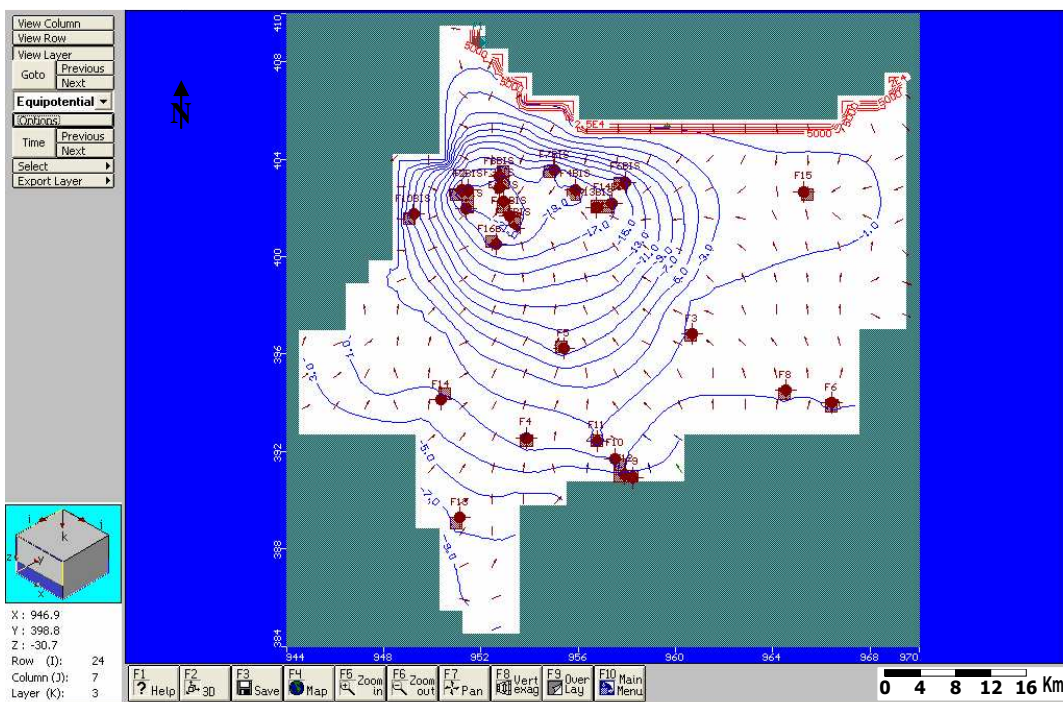


Fig. 51- Piézométrie calée de la nappe des graviers (octobre 2001).

Concernant la nappe superficielle, le modèle calque assez bien la piézométrie observée sauf en quelques points où les écarts peuvent atteindre 0.8 m.

Les apports aux systèmes calculés par le modèle s'élèvent à environ 25.10^6 m³/an et 21.10^6 m³/an respectivement pour la nappe superficielle et la nappe des graviers. Ils sont constitués essentiellement par les précipitations efficaces sur la nappe superficielle et par les flux aux limites pour NG. La comparaison des bilans de flux calculés entre 1982 et 2001 (fig. 53) montre que l'exploitation intensive s'est traduite par la récupération d'une grande partie du débit d'exhaure naturel et une contribution assez importante des réserves. Les échanges hydrauliques entre les deux nappes ont été fortement perturbés entre 1982 et 2001. Initialement la drainance vers la nappe des graviers, au sud de la plaine (zone d'alimentation) équilibrait à peu près la drainance ascendante ayant lieu au nord (zone d'exutoire). En 2001, la drainance se fait vers le bas mettant à contribution la nappe superficielle sur la quasi-totalité de la plaine, excepté quelques mailles limitrophes au nord où l'échange est demeuré ascendant. Le modèle montre une baisse importante, dans les deux nappes essentiellement localisées dans les zones centrales et littorales. Dans les champs de captage des Salines et d'Allélick, l'abaissement piézométrique, calculé en 2001, a atteint près de 8 m dans la nappe des graviers.

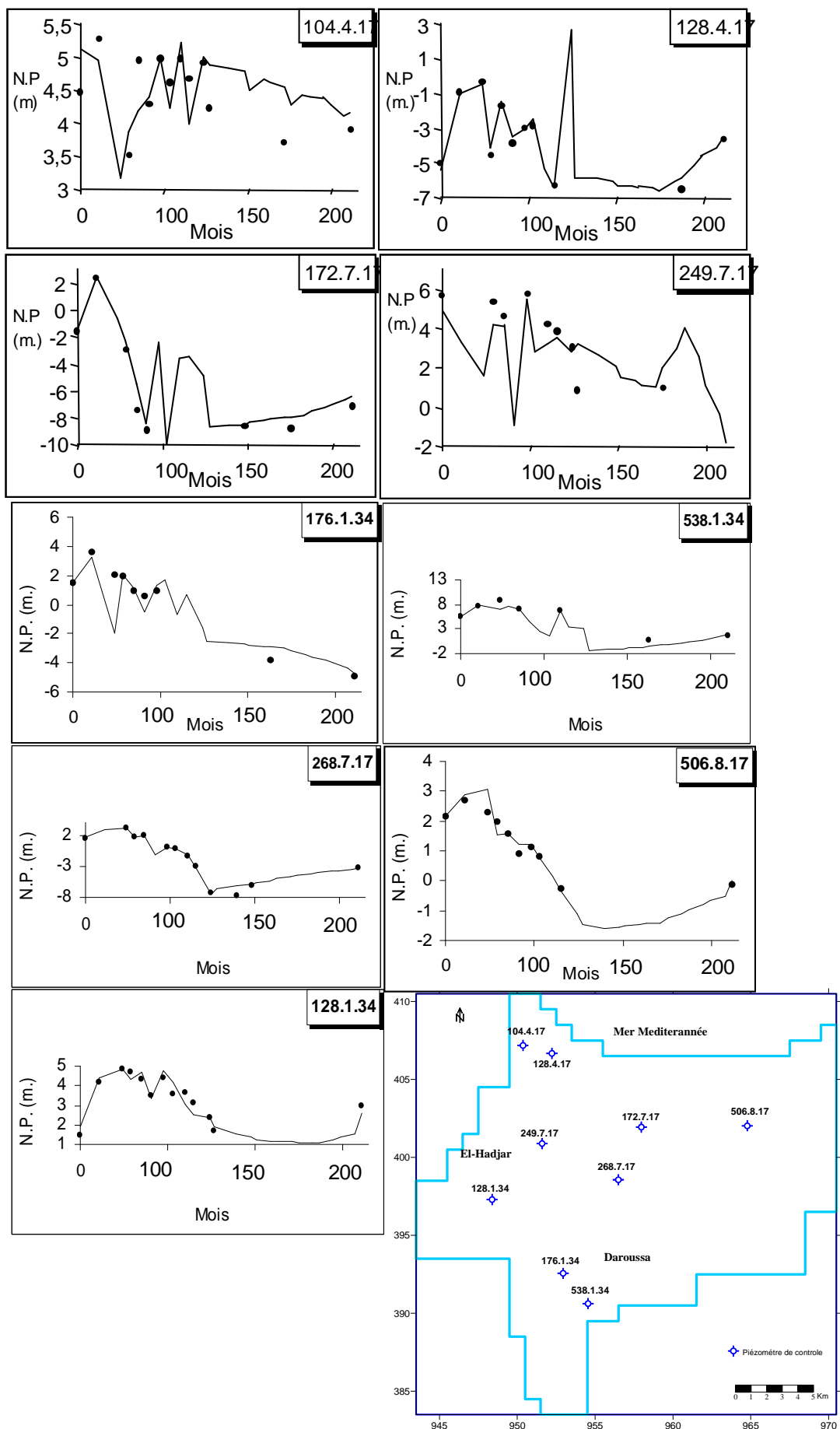
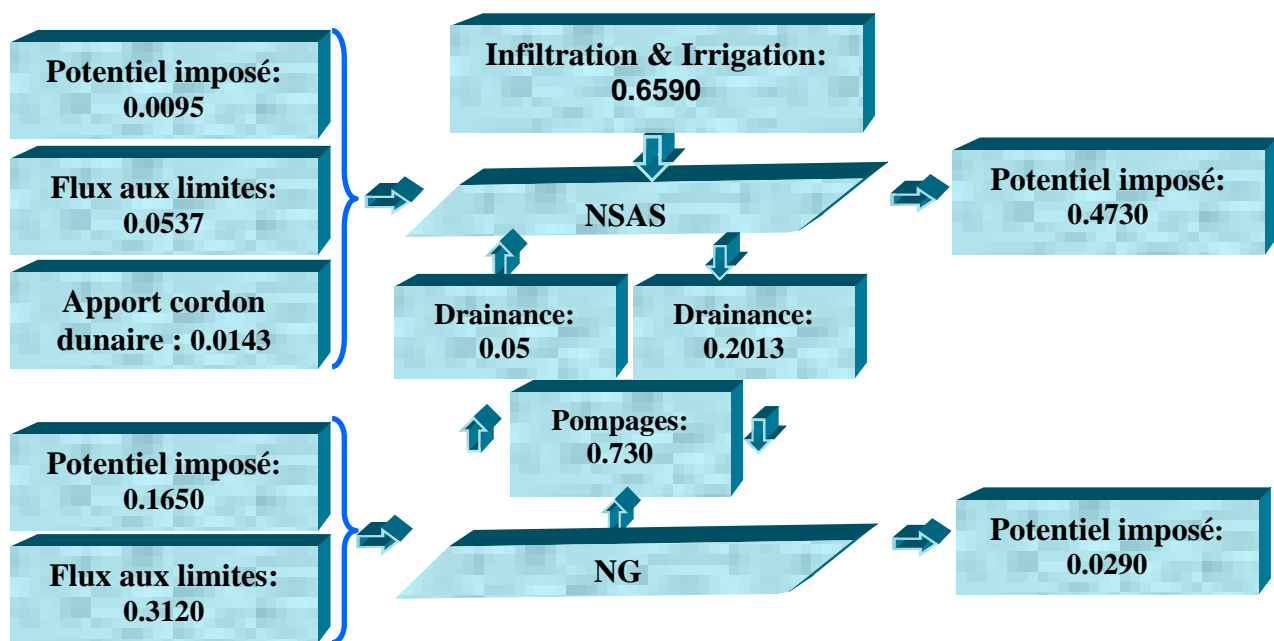


Fig. 52- Calage du modèle en régime transitoire (Piézomètres de contrôle).



NSAS	NG
Somme des entrées : $7.87E-1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Somme des entrées : $6.78E-1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Somme des sorties : $8.31E-1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Somme des sorties : $8.09E-1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 53 - Diagramme représentatif des bilans hydriques ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de la nappe superficielle et de la nappe des graviers (2001).

Par ailleurs, le modèle est utilisé pour simuler le régime naturel sur la période 1982-2001 afin d'appréhender le comportement du système vis-à-vis de la variabilité des apports. Durant cette période, le volume est pris égal à zéro. Toutes les mailles du modèle montrent de 1982 à 1989, une baisse de près de 0.7 m en moyenne pour les deux nappes ; de 1989 à 1999, les niveaux ont tendance à la remontée de 1.0 et 1.3 m en nappe libre et 0.5 à 0.9 m en nappe captive. Une tendance à la baisse reprend à partir de 2001, suivie d'une remontée d'amplitude moyenne variant de 0.6 m dans la nappe superficielle et 0.4 m dans la nappe des graviers. Les résultats de cette simulation confirment que la baisse du niveau piézométrique ne peut être attribuée qu'au rythme de pompage intensif pratiqué dans les principaux champs captants. Le faible taux d'alimentation ne fait qu'aggraver le problème de surexploitation du système aquifère.

V.6- Simulations de l'évolution de la salinité des eaux

V.6.1- Introduction :

Les problèmes posés par l'exploitation des aquifères en zone littorale sont généralement délicats, car ils associent la notion de quantité à celle de qualité (Ledoux, 1986). Ils sont d'autant plus complexes que les zones côtières constituent souvent des secteurs où l'on observe une demande en eau en général très grande. Cela est dû à l'intensité des activités agricoles favorisées par un type de climat généralement humide et modéré et au fait que ces régions côtières sont fortement peuplées et où l'activité économique est assez grande.

Par ailleurs, il est reconnu que dans un aquifère côtier en contact avec la mer et naturellement en équilibre, les eaux souterraines en provenance de l'infiltration des eaux pluviométriques, constituent une nappe s'écoulant vers la mer qui surmonte une masse d'eau salée affectant la forme d'un biseau pénétrant à l'intérieur des terres (fig. 54). Tout prélèvement intense d'eau douce au niveau d'un champ de captage va modifier cet état d'équilibre en provoquant une diminution du débit des eaux souterraines et un abaissement de la surface piézométrique. Cela se traduit par une avancée vers les terres, du biseau d'eau salée qui peut atteindre dans certains endroits, le fond du puits et entraîner même un changement du sens d'écoulement (Bonnet *et al.*, 1974 ; Todd, 1980 ; Mania et Meens, 1984 ; Gourgand *et al.*, 1988).

Il en ressort que les secteurs côtiers (partie nord) de la région étudiée où l'on constate des pompages intensifs destinés à l'alimentation des populations et de l'industrie, constituent des zones où les nappes sont vulnérables à la contamination par les sels et où les aquifères sont en contact direct avec la Méditerranée.

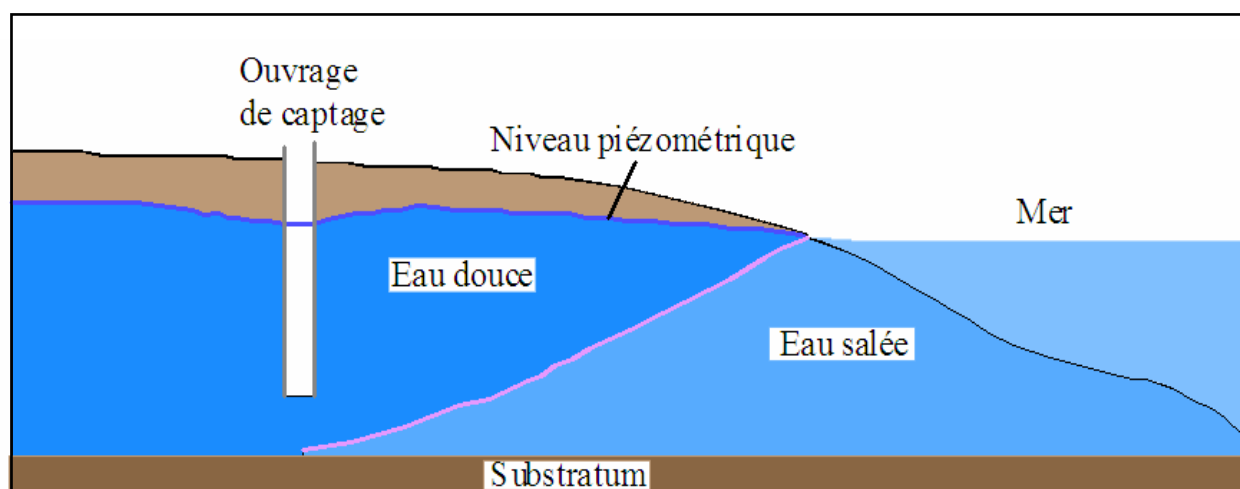


Fig. 54- Schéma de la relation eau douce-eau salée dans un aquifère côtier (Ledoux, 1986).

Le but recherché par ces études est d'étudier les mécanismes d'intrusion marine, de caractériser la pollution saline et de mettre en évidence les facteurs déterminants et les moyens de lutte contre la contamination des nappes par les eaux marines.

V.6.2- Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères d'Annaba :

V.6.2.1- Arguments hydrodynamiques :

Comme il a été constaté dans les chapitres précédents, les secteurs côtiers où les aquifères sont en contact avec la mer (Nord de la plaine de Annaba), sont les plus vulnérables aux intrusions marines qui sont favorisées par les critères suivants (Chen *et al.*, 1997):

✓ la perméabilité : dans la nappe des graviers les valeurs de perméabilité les plus élevées sont situées le long de la Seybouse ;

✓ l'épaisseur des graviers et galets : elle passe en effet de quelques mètres en bordure ouest du système, à près de 25 m au Nord selon l'axe de la fosse de Ben-Ahmed, orientée Sud-Nord, puis elle diminue à moins de 10 m sur l'élévation de Daroussa. Entre la butte de Boukhadra et El-Khous, un autre niveau à éléments grossiers, de près de 8 m d'épaisseur, a été localisé à une profondeur de 35 à 40 m (Djabri *et al.*, 2000) ;

✓ les caractéristiques géométriques et le pendage des graviers montrent que l'aquifère déboucherait en mer à plusieurs kilomètres de la côte (fig. 55) ;

✓ gradients hydrauliques faibles ;

✓ pompages intensifs dans les champs de captage des Salines et d'Allélick provoquant un abaissement importante des niveaux piézométriques jusqu'à -8 m.

✓ baisse des niveaux piézométriques : extension permanente de l'isopièze de côte 0 provoquée par les pompages traduit une généralisation de l'intrusion de l'eau marine dans l'eau douce par l'intermédiaire d'une zone de transition. Citons particulièrement les dépressions des Salines et d'Allélick dont les côtes peuvent atteindre -10m et où l'écoulement des eaux souterraines est dirigé de la mer vers les batteries de forage.

Le suivi des chroniques piézométriques permettent de mettre en évidence une baisse généralisée des niveaux et de tirer les conclusions suivantes (fig. 56 a-h) :

- la présence de quelques dépressions avec des cotes inférieures au niveau de la mer et la baisse du niveau général de la nappe entraîne principalement une élévation de l'interface eau douce-eau salée qui peut atteindre rapidement le fond des forages profonds. Nous citerons la dépression d'Allélick et des Salines où les niveaux peuvent atteindre plus de 10 m sous le niveau de la mer,

- l'extension permanente de la courbe de cote zéro provoquée par les pompages traduit une généralisation de l'intrusion de l'eau marine dans les eaux douces par l'intermédiaire d'une zone de transition,
- la baisse significative des niveaux piézométriques surtout en période de basses eaux et les faibles fluctuations saisonnières de la nappe entraîne une réduction des débits d'eau douce et une pénétration des eaux marines sous les masses d'eau douce de la nappe.

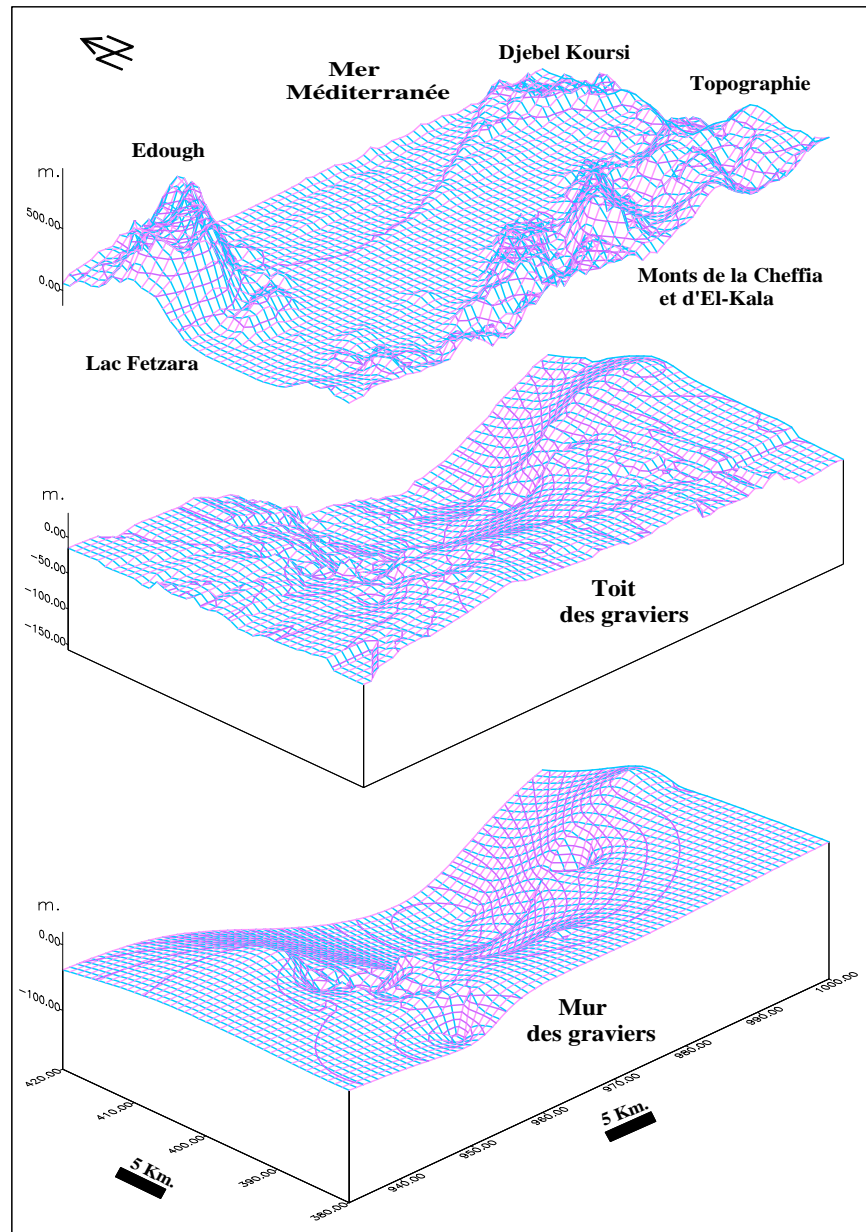


Fig.55- Géométrie des graviers dans le système aquifère de Annaba-Bouteldja.

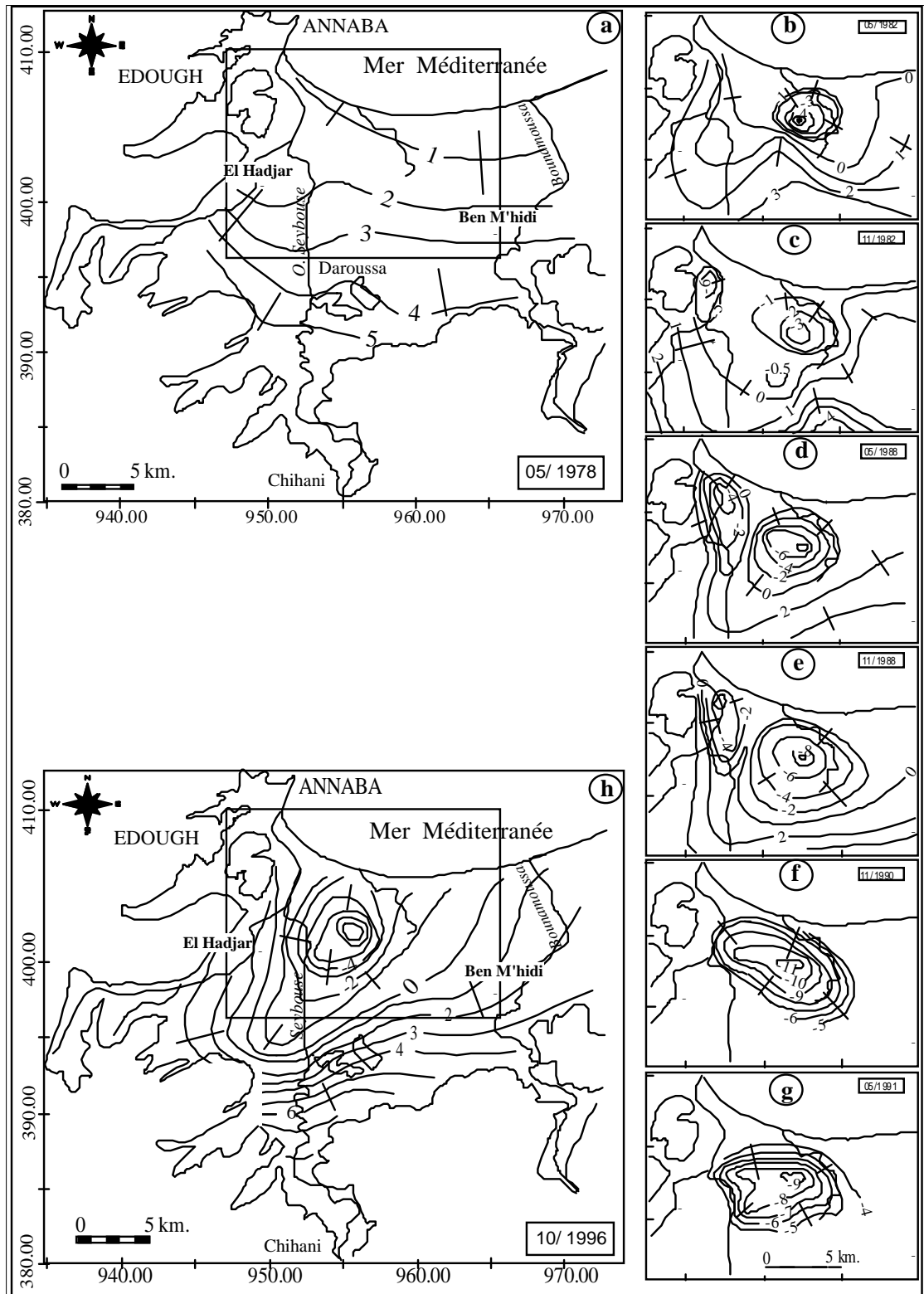


Fig. 56- Evolution de la piézométrie de 1978 à 1996.

V.6.2.2- Arguments chimiques :

Nous avons vu par l'intermédiaire des diagrammes binaires, des rapports caractéristiques, de l'évolution dans l'espace des éléments physico-chimiques des eaux de la nappe des graviers que les secteurs côtiers sont les zones les plus sensibles à l'intrusion marine.

V.6.3- Modélisation du transfert des chlorures

Un modèle de transport de masse Modpath (Pollock, 1989) est utilisé pour déterminer l'évolution de la salinité des eaux profondes pour les mêmes états que pour les écoulements souterrains. Le calage du modèle Modpath a été effectué sur les résultats d'analyses des chlorures obtenus en 1982, 1989, 1999 et 2001 pour lesquels nous disposons de valeurs de chlorures sur la nappe des graviers et sur la nappe superficielle.

La nappe des graviers présente une augmentation des teneurs en chlorures sur tout le secteur littoral et ouest de la plaine avec des valeurs minimales de 0.5 g/l et maximale de près de 2.5 g/l (fig.57, 58, 59 et 60). La drainance étant presque partout de haut en bas, c'est NG qui semble la plus menacée par les eaux salées de la Méditerranée. La structure profonde de l'aquifère, l'inversion des gradients hydrauliques et le pendage des dépôts de graviers sont autant de facteur qui favorisent l'intrusion des masses d'eau salées vers le continent. On observe une extension visible et nette des courbes d'isoconcentrations en chlorure dirigé vers les zones correspondants aux dépressions piézométriques, ces fortes teneurs en chlorures atteignent les zones littorales et centrales, Par suite des exploitations excessives dans les champs de captage des salines et d'Allélik. Les prélèvements constituent donc le facteur le plus important à l'origine de l'intrusion marine, plus ceux-ci sont intenses et prolongé, plus le degré de pollution augmente, marqué par l'avancement des courbes d'isoconcentrations élevées vers le sud de la plaine.

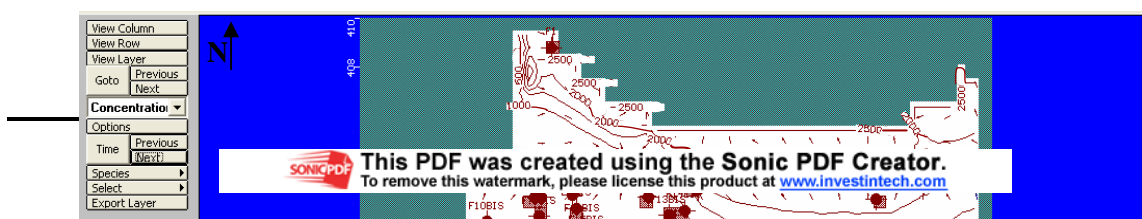


Fig. 57- Teneurs en chlorures dans la nappe des graviers en octobre 1982

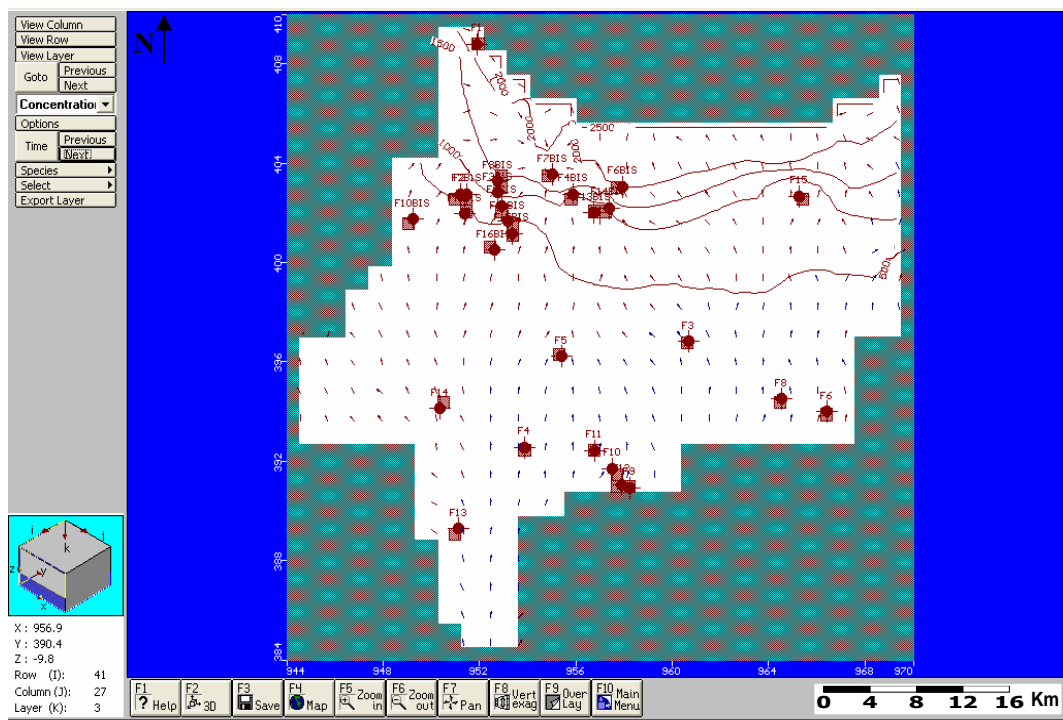


Fig. 58- Teneurs en chlorures dans la nappe des graviers en octobre 1989.

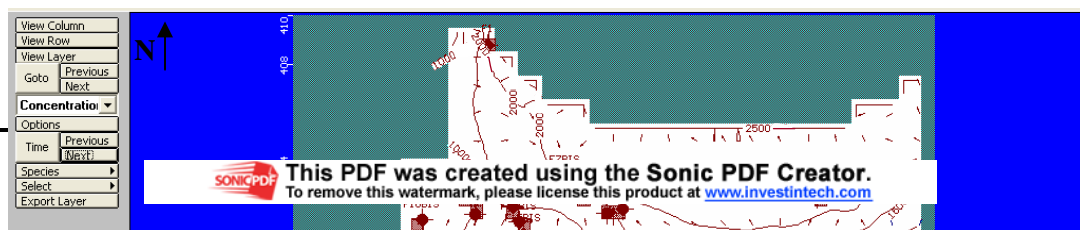


Fig. 59- Teneurs en chlorures dans la nappe des graviers en octobre 1999.

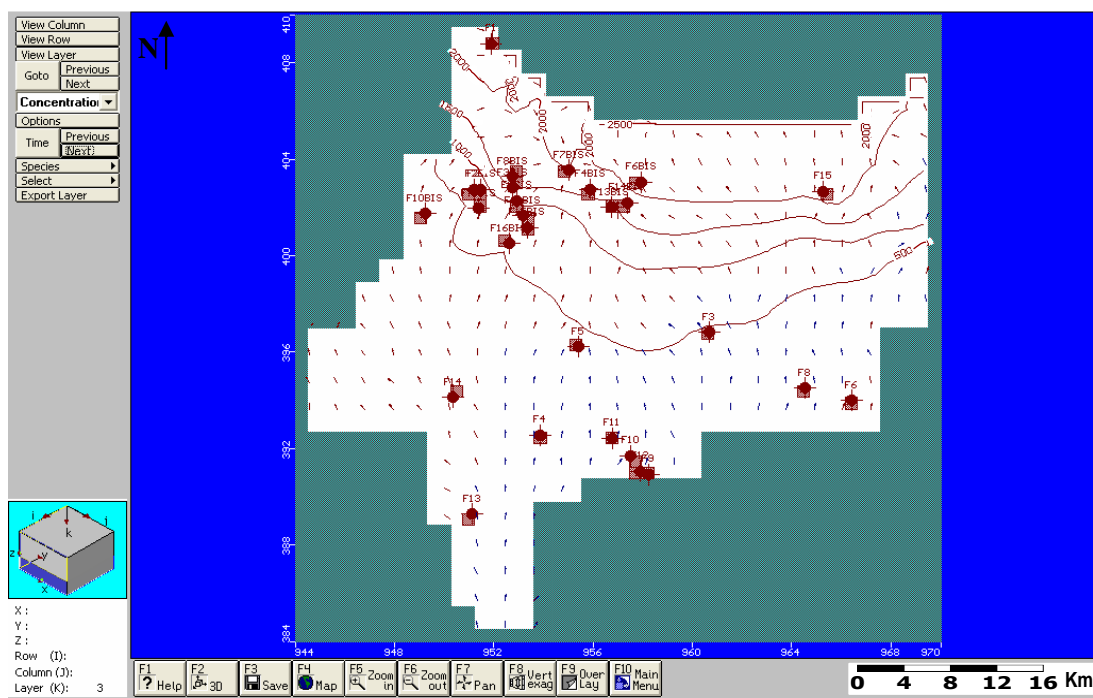


Fig. 60- Teneurs en chlorures dans la nappe des graviers en octobre 2001.

V.7- Conclusion :

La modélisation du système aquifère d'Annaba, couvrant la totalité de la plaine, a permis de vérifier les hypothèses émises sur l'hétérogénéité du système et d'étudier le comportement hydrodynamique des nappes.

Par ailleurs, la simulation des écoulements souterrains entre 1982 et 2001 montre une chute très marquée des niveaux piézométriques dans les deux nappes. Elle serait due essentiellement à l'exploitation intensive surtout dans la nappe des graviers dont le volume des prélèvements est passé de $12 \cdot 10^6$ à $23 \cdot 10^6$ m³/an en 19 ans. La simulation des écoulements montre un déséquilibre important des échanges entre les différents horizons aquifères et un abaissement significatif des niveaux de près de 5 m dans les deux nappes. Cette baisse se traduit par des appels d'eau de plus en plus importants à partir de la mer. En effet, l'utilisation d'un modèle de transport de masse met en évidence une augmentation très nette des teneurs en chlorures surtout dans les secteurs côtiers où la nappe profonde est fortement sollicitée.

CONCLUSIONS GENERALES & RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS GENERALES

- ❖ La région d'étude est bordée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par les marécages de Mekrada, à l'Ouest par le massif de l'Edough, dominant Annaba, et par le lac Fetzara situé plus au Sud. Elle est limitée au Sud par le prolongement oriental de la chaîne numidique.
- ❖ La région est constituée par des sédiments mio-plio-quaternaires comblant une zone d'effondrement. Les travaux réalisés dans la région ont montré qu'il existait deux fosses séparées par un haut-fond qui porte la butte de Daroussa :
 - la fosse Ben-Ahmed, orientée S-N,
 - la fosse Ben-M'hidi , orientée SW-NE.
- ❖ L'étude géométrique confirme l'extension et la superposition des nappes superficielle et profonde qui sont séparées par un niveau semi-permeable. celui ci disparaît au sud de la plaine laissant se confondre les deux nappes.
- ❖ Cette région compte parmi les régions les plus arrosées de l'Algérie. Elle est soumise à un climat méditerranéen, doux et humide en hiver et chaud et sec en été, ce qui produit des modifications périodiques de la chimie des eaux par effet de dilution pendant les périodes pluvieuses et par l'effet de l'évaporation pendant les périodes sèches. Le bilan hydrologique de la région montre une évapotranspiration qui représente 69% des précipitations, un ruissellement de 15% et une infiltration de 16% des pluies.
- ❖ Les eaux de surface présentent des débits d'écoulement très variables, dépendant de la hauteur des précipitations, de sa durée et de sa répartition spatiale au niveau du bassin versant.
- ❖ Une synthèse des résultats issus de l'interprétation des données d'une centaine de pompage d'essais montre l'existence d'hétérogénéités assez importantes dues en général aux transferts de débit issus des oueds, de la drainance d'aquifères annexes et de l'égouttement des niveaux aquifères superficiels. L'analyse des transmissivités obtenues révèle une grande dispersion des valeurs. Les plus fortes valeurs de transmissivité coïncident avec les axes des deux bassins d'effondrement. Par contre, dans le secteur central, correspondant au haut fond qui sépare les deux fosses, les transmissivités et la productivité des ouvrages sont relativement les plus faibles.
- ❖ L'étude hydrochimique a été effectuée à l'aide de l'analyse statistique (analyses en composantes principales) et de la méthode des rapports caractéristiques des données obtenues sur les réseaux de mesure de la qualité de l'eau pendant la période allant de 1982 à 2008.

❖ Les principaux facteurs responsables de l'évolution de la qualité chimique de l'eau observée au niveau de la plaine de Annaba sont la minéralisation, et la pollution par les eaux marines. La teneur totale en sels minéraux des eaux de l'aquifère est due à deux causes : naturelle et anthropique. Les processus naturels sont dus à l'évaporation et à la concentration par dissolution ; en ce qui concerne les processus anthropiques : l'invasion marine induite par l'exploitation de la nappe et l'irrigation observé par l'existence d'une pollution des eaux de l'aquifère par les nitrates qui se manifeste essentiellement sur les bordures sud et ouest où la nappe est peu profonde et la couverture argileuse protectrice est presque absente.

❖ La modélisation du système aquifère d'Annaba a été réalisée à partir du logiciel Modflow, afin de faire l'état de la ressource d'un point de vue quantitatif et d'évaluer les risques liés à l'exploitation intensive des ressources en eau souterraine, notamment pour le transfert des chlorures à l'intérieur des aquifères.

❖ Le domaine retenu, couvrant une superficie de 383 km² et correspondant à la fosse Ben-Ahmed et à la partie sud de la fosse de Ben M'hidi, est discrétisé horizontalement en 1532 mailles carrées de 500 m de côté et verticalement en trois couches ; nappe superficielle, semi-perméable et nappe des graviers à permis de vérifier les hypothèses émises sur l'hétérogénéité du système et d'étudier le comportement hydrodynamique des nappes. Par ailleurs, la simulation des écoulements souterrains entre 1982 et 2001 montre une chute très marquée des niveaux piézométriques dans les deux nappes. Elle serait due essentiellement à l'exploitation intensive surtout dans la nappe des graviers. La simulation des écoulements montre un déséquilibre important des échanges entre les différents horizons aquifères et un abaissement significatif des niveaux de près de 5 m dans les deux nappes. Cette baisse se traduit par des appels d'eau de plus en plus importants à partir de la mer. En effet, l'utilisation d'un modèle de transport de masse met en évidence une augmentation très nette des teneurs en chlorures surtout dans les secteurs côtiers où la nappe profonde est fortement sollicitée.

RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus par cette approche combinant plusieurs méthodes ont permis de mettre en évidence une forte salinité des eaux due en partie à une intrusion marine et de déceler les zones sensibles à la pollution marine dans cette zone côtière. Les causes principales de ce phénomène sont dues aux pompages intensifs associés au déficit pluviométrique et à la nature lithologique et géométrique des aquifères. Ces facteurs engendrent une perturbation au niveau de l'interface eau douce - eau salée et accentuent l'avancement des eaux marines vers le continent. L'exploitation dans ce type de zone doit être contrôlée de près, de façon à éviter la

contamination et l'extension de la pollution. Il est indispensable de proposer des périmètres de protection pour les aquifères côtiers et plus particulièrement en pays semi-aride à aride où les ressources en eau sont rares. L'utilisation des eaux contaminées par l'invasion marine pour l'irrigation pourrait engendrer des problèmes de salinisation des sols.

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 total.
- 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 et arrêter la foration de nouveaux ouvrages de captage.
- Arrêter le fonctionnement des forages qui captent l'interface eau douce - eau salée.
 - Irriguer à partir des eaux superficielles des oued qui écoulent des volumes importants vers la mer ce qui éviteraient aux ruraux les prélèvements illicites dans la nappe.
 - Irriguer par le système goutte à goutte qui s'adapte bien aux régions de moins en moins arrosées.
- La ré alimentation artificielle de la nappe qui reste parfois coûteuse et demande des connaissances précise 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).

Cette étude ne se prétend pas exhaustive. Néanmoins, nous avons essayé par une approche intégrant plusieurs facteurs de mettre en évidence une intrusion marine et son impact sur la qualité de l'eau. Au stade actuel des recherches, ce travail constitue un point de départ. La poursuite de cette étude doit être orientée vers la localisation de l'interface et la surveillance des limites de l'intrusion marine.

Listes des figures

Fig.1	-Situation géographique et géologique des plaines de la région de Annaba-Bouteldja (d'après Strojexport, 1975, modifié).....	3
Fig. 2	- Esquisse structurale des plaines de Annaba-Bouteldja (d'après Sonatrach, 1969, modifiée).....	8
Fig. 3	- Bloc diagramme au travers de la plaine de Annaba.....	10
Fig. 4	- Extension des différents aquifères dans les plaines de Annaba-Bouteldja (d'après Gaud, 1976).....	12
Fig. 5	- Coupe au travers de la plaine de Annaba (ANRH, 1976, modifiées).....	13
Fig. 6	- Carte des isopaches de la nappe phréatique.....	14
Fig. 7	- Carte des isobathes du toit de la nappe des graviers.....	15
Fig. 8	- Carte des isobathes du substratum de la couche de graviers.....	15
Fig. 9	- Carte des isopaches des couches de graviers et galets.....	16
Fig. 10	- Carte des isopaches du niveau semi-perméable.....	16
Fig. 11	- Histogrammes précipitations - températures à la station des salines (1972-2004).....	18
Fig. 12	- Histogramme des moyennes mensuelles de l'humidité à la station des Salines en% (1974/2004).....	19
Fig. 13	- Histogramme des moyennes mensuelles de la vitesse du vent (m/s) (1984/2004).....	20
Fig. 14	- Représentation graphique du bilan de Thornthwaite station des salines (1972-2004).....	22
Fig. 15	- Situation du bassin de la Seybouse.....	23
Fig. 16	-Evolution du débit au niveau de l'oued seybouse en fonction de la précipitation.....	26
Fig. 17	-Localisation des dispositifs des pompages d'essai dans la région d'Annaba – Bouteldja.....	30
Fig.18A-B	- Pompage d'essai dans la nappe des graviers dans la région de Dréan- graphique de descente :A) Dans le forage ;B) dans le piézomètre.....	32
Fig.18C	- Pompage d'essai dans l'aquifère sableux de Bouteldja.....	32
Fig.18D	- Pompage d'essai dans l'aquifère des graviers dans le secteur central de la plaine de Annaba....	32
Fig.18E-F	- Pompage d'essai dans la nappe des graviers dans le secteur ouest d'El-Hadjar. E) bilogarithmique dans le piézomètre ; F) bilogarithmique dans le forage.....	32
Fig. 19	-Carte des transmissivités krigées.....	33
Fig. 20a	-Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Juin 1983.....	37
Fig. 20b	- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Juin 1983.....	37
Fig. 21a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Mai 1985.....	38
Fig. 21b	- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Mai 1985.....	38
Fig. 22a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Octobre 1985.....	39
Fig. 22b	- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Octobre 1985.....	39
Fig. 23a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Avril 1986.....	40
Fig. 23b	- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Avril 1986.....	40
Fig. 24a	- Cercle (I-II) des variables .ACP de la campagne de Octobre 1986.....	41
Fig. 24b	- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Octobre 1986.....	41
Fig. 25a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Mai 1987.....	42
Fig. 25b	- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Mai 1987.....	42
Fig. 26a	- Cercle (I-II) des variables .ACP de la campagne de Octobre 1987.....	43
Fig. 26b	- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Octobre 1987.....	43
Fig. 27a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Mai 1988.....	44
Fig. 27b	- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Mai 1988.....	44
Fig. 28a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Octobre 1988.....	45
Fig. 28b	- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Octobre 1988.....	45
Fig. 29a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Juillet 1989.....	46
Fig. 29b	- Plan I-II des individus. ACP de la campagne de Juillet 1989.....	46

Fig. 30a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Octobre 1989.....	47
Fig. 30b	- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Octobre 1989.....	47
Fig. 31a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Décembre 1999.....	48
Fig. 31b	- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Décembre 1999.....	48
Fig. 32a	- Cercle (I-II) des variables. ACP de la campagne de Décembre 2007-Janvier 2008.....	49
Fig. 32b	- Plan (I-II) des individus. ACP de la campagne de Décembre 2007-Janvier 2008.....	49
Fig. 33a	- Répartition des faciès chimiques en (%) (Période 1983 à 2008).....	51
Fig. 33b	- Utilisation du rapport $(Na^+/Ca^{2+})-(Cl/HCO_3^-)$ pour la détermination des faciès chimiques (Juin 1983).....	52
Fig. 34a - Origine des éléments chimiques en (%) (le couple $Na^+ - Cl^-$).....	53
Fig. 34b	- Résultats du diagramme $Ca^{2+} / (HCO_3^- + SO_4^{2-}) - (Na^+ / Cl^-)$ en (%).....	53
Fig. 34c	- Diagramme $Na^+ - Cl^-$ (Juin 1983).....	54
Fig. 34d	- Echange de base.....	54
Fig. 35a	- Origine de Ca en (%).....	55
Fig. 35b	- Origine de la dissolution des ions du calcium.....	55
Fig. 35c	- Diagramme Ca- HCO_3^-	56
Fig. 35d	- Evolution du calcium en fonction des deux éléments HCO_3^- et SO_4^{2-}	56
Fig. 36	- Diagramme Ca – Cl.....	57
Fig. 37	- Diagramme K- Cl.....	58
Fig. 38	- Diagramme $SO_4 - Cl$	59
Fig. 39	- Diagramme Mg/Ca – Cl.....	60
Fig. 40	- Diagramme $SO_4/Cl - Cl$	61
Fig. 41a-f	- Evolution de la conductivité électrique, des chlorures et du sodium selon un profil orthogonal à la mer.....	63
Fig. 42	- Evolution de la piézométrie dans NG.....	67
Fig. 43	- Carte de rabattement de la nappe des graviers (mai 1983-octobre 1996).....	68
Fig. 44	- Coupes au travers de la plaine de Annaba.....	69
Fig. 45a-b	- Discrétisation du domaine d'étude et conditions aux limites du modèle.....	71
Fig. 46	- Caractéristiques géométriques des trois couches.....	72
Fig. 47a	- Piézométrie calée de la nappe des graviers (octobre 1982).....	75
Fig. 47b	- Cartes de différence entre piézométrie simulée et mesurée de la nappe des graviers (octobre 1982).....	75
Fig. 48	- Répartition des conductivités hydrauliques obtenues par calage de NG.....	76
Fig. 49	- Piézométrie calée de la nappe des graviers (octobre 1989).....	78
Fig. 50	- Piézométrie calée de la nappe des graviers (octobre 1999).....	79
Fig. 51	- Piézométrie calée de la nappe des graviers (octobre 2001).....	79
Fig. 52	- Calage du modèle en régime transitoire (Piézomètres de contrôle).....	81
Fig. 53	- Diagramme représentatif des bilans hydriques ($m^3.s^{-1}$) de NSAS et NG (2001).....	82
Fig. 54	- Schéma de la relation eau douce-eau salée dans un aquifère côtier (Ledoux, 1986).....	83
Fig. 55	- Géométrie des graviers dans le système aquifère de Annaba-Bouteldja.....	85
Fig. 56	86
Fig. 57	- Evolution de la piézométrie de 1978 à 1996.....	88
Fig. 58	- Teneurs en chlorures dans la nappe des graviers en octobre 1982.....	88
Fig. 59	- Teneurs en chlorures dans la nappe des graviers en octobre 1989.....	89
Fig. 60	- Teneurs en chlorures dans la nappe des graviers en octobre 1999.....	89
	- Teneurs en chlorures dans la nappe des graviers en octobre 2001.....	89

Listes des tableaux

Tabl. 1	: Moyennes mensuelles de l'humidité relative à la station des Salines en % (1974-2005).....	19
Tabl. 2	: Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station des Salines (1984/2005).....	20
Tabl. 3	: Bilan de l'eau selon C.W Thorntwaite, station des salines (1972-2004)	21
Tabl. 4	: Classification du débit en fonction du nombre d'observations.....	24
Tabl. 5	: Evolution du débit en fonction de la précipitation.....	25
Tabl. 6	: Résultats de deux pompages d'essai effectués dans la nappe phréatique.	28
Tabl. 7	: Estimation des transmissivités de la nappe phréatique ($m^2.s^{-1}$).	29
Tabl. 8	: Résultats du pompage effectué dans le secteur central de la plaine de Annaba.	31
Tabl. 9	: Historique des prélèvements dans la nappe des graviers.....	66
Tabl.10	: Bilan hydrique ($m^3.s^{-1}$) de la nappe superficielle en régime permanent (octobre 1982)	76
Tabl.11	: Bilan hydrique ($m^3.s^{-1}$) de la nappe des graviers en régime permanent (octobre 1982).....	77

TABLE DES MATIERES

	1
INTRODUCTION GENERALE	
Chapitre I : APPORT DU CONTEXTE GEOLOGIQUE, STRUCTURAL & GEOMETRIQUE	3
	4
I.1- Introduction	4
I.2- Cadre lithostratigraphique	4
I.2.1- Le Paléozoïque	5
I.2.2- Le Mésozoïque	8
I.2.3- Le Cénozoïque	11
I.3- Cadre structural	11
I.4- Géométrie du système aquifère	12
	14
I.4.1- <i>Les matériaux aquifères et leur comportement hydrogéologique</i>	14
I.4.2- <i>Caractéristiques géométriques du système aquifère</i>	17
I.4.2.1- La nappe des sables fins superficiels (ou nappe superficielle)	
I.4.2.2- <i>La nappe des graviers (ou nappe profonde)</i>	18
I.5- Conclusion	18
	18
Chapitre II : CARACTERISTIQUES HYDROCLIMATOLOGIQUES	19
	20
II.1- Introduction	20
II.2- Traitement des données climatologiques	22
II.2.1- Etude des précipitations et des températures.....	22
II.2.2- L'humidité	24
II.2.3- Le vent	24
II.3- Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite	25
II.4- Hydrologie de surface	27
II.4.1- Description de l'oued Seybouse.....	
II.4.2 - Evolution du débit en fonction de la pluie	
II.4.3-Effet des variations spatiales de la précipitation sur le débit de l'oued	
II.4.4- Les variations mensuelles du débit en fonction de la précipitation journalière	
II.5- Conclusion	28
	28
Chapitre III : EVOLUTION SPATIALE DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DU SYSTEME AQUIFERE DE ANNABA-BOUTELDJA	29
	30
	33
	34
III.1- Introduction	
III.2- Interprétation des données de pompage d'essai	35
III.2.1- La nappe superficielle.....	36
III.2.2- Les nappes des graviers et des sables dunaires	37

III.3- Analyse et identification des modalités de transferts hydrauliques.....	38
III.4- Cartographie des transmissivités.....	39
III.5- Conclusion.....	40
	41
	42
Chapitre IV : HYDROCHIMIE	43
	44
IV.1- Introduction.....	45
IV.2-Analyse du comportement physico-chimique des eaux de la nappe des graviers dans son ensemble : Utilisation de l'analyse en composantes principales (ACP)	46
	47
VI.2.1-Campagne de Juin 1983.....	48
VI.2.2-Campagne de Mai 1985.....	49
VI.2.3-Campagne de Octobre 1985.....	50
VI.2.4-Campagne de Avril 1986.....	51
VI.2.5-Campagne de Octobre 1986.....	52
VI.2.6-Campagne de Mai 1987.....	52
VI.2.7-Campagne de Octobre 1987.....	55
VI.2.8-Campagne de Mai 1988.....	55
VI.2.9-Campagne de Octobre 1988	57
VI.2.10-Campagne de Juillet 1989.....	57
VI.2.11-Campagne de Octobre 1989.....	58
VI.2.12-Campagne de Décembre 1999.....	59
VI.2.13-Campagne de Décembre 2007-Janvier 2008.....	60
VI.3-Synthèse de l'étude par l'analyse en composante principale.....	61
IV.4. Evolution des éléments chimiques.....	62
IV.5- Etude de l'origine des éléments chimiques	64
IV.5.1- Le couple Na ⁺ - Cl ⁻	
IV.5.2- Origine du Calcium.....	
IV.5.2.1- Les éléments Ca- (HCO ₃ +SO ₄).....	65
IV.5.3- Etudes des rapports croisés.....	65
IV.5.3.1- Le diagramme Ca – Cl.....	
IV.5.3.2- Le diagramme K – Cl.....	66
IV.5.3.3- Le diagramme SO ₄ – Cl.....	68
IV.5.3.4- Le diagramme Mg/Ca - Cl	70
IV.5.3.5- Le diagramme SO ₄ /Cl – Cl.....	77
IV.6-Evolution des éléments de la minéralisation en fonction de la distance à la mer	83
	83
IV.7- Conclusion.....	84
	84
Chapitre V : MODELISATION HYDRODYNAMIQUE & HYDRODIPERSIVE	87
	87
	90
V.1- Introduction.....	91
V.2- Problématique du système aquifère de Annaba-Bouteldja dans son ensemble.....	92
V.3- Evolution des prélèvements et des variations de la piézométrie dans le système aquifère de la plaine de Annaba	93
V.4- Cadre hydrogéologique du domaine étudié	94
V. 5- Modélisation des écoulements souterrains.....	94
V.5.1- Données d'entrée	
V.5.2- Calage du modèle en régime permanent	109
V.5.3- Calage du modèle en régime transitoire	
V.6- Simulations de l'évolution de la salinité des eaux	

V.6.1- Introduction.....

V.6.2 - Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères d'Annaba

V.6.2.1- Arguments Hydrodynamique

V.6.2.2- Arguments chimique.....

V.6.3- Modélisation du transfert des chlorures.....

V.7- Conclusion

Chapitre VI : CONCLUSIONS GENERALES & RECOMMANDATIONS

-Conclusions générales.....

-Recommandations.....

ANNEXES.....

Références bibliographiques.....

