

Modélisation de la nappe de Chaouia Côtière (Maroc)

A. ZEROUALI* , L .LAKFIFI**, A . LARABI*, A . AMEZIANE **

*LIMEN, Ecole Mohammadia d'ingénieurs ,Rabat ,Maroc

**Direction de la Recherche et de la Planification de l'eau (DRPE),Rabat

RESUME

La modélisation hydrodynamique de la nappe par le code Modflow a permis de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère, en estimant les échanges latéraux de la nappe avec l'océan et l'oued Oum Er Rbia. Ainsi le calage du modèle mathématique en régime permanent sur l'état piézométrique de 1949 a permis d'affiner la distribution spatiale de la perméabilité sur l'ensemble du domaine et de dresser le bilan de la nappe en régime permanent. Le calage du modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emménagement de l'aquifère. Le bilan issu de ce calage a mis en évidence des entrées d'eau de mer et de l'Oued Oum Er Rbia. Le déstockage enregistré est de l'ordre de 2,5Mm³/an. La recharge artificielle de la nappe dans la zone de Tnine Chtouka – Azemmour avec un débit d'injection de 200 l/s est capable d'inverser le gradient hydraulique et donc de faire reculer le biseau salé dans cette zone.

Mots clés : Chaouia côtière, hydrogéologie, surexploitation de la nappe, modélisation, régime permanent - transitoire, biseau salé.

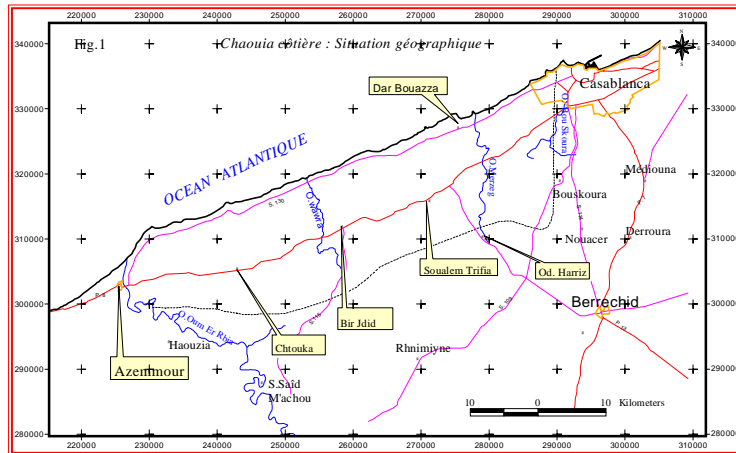
INTRODUCTION

La Chaouia côtière, située entre les villes de Casablanca et Azemmour est une plaine subatlantique qui s'est développée en bordure de l'océan atlantique (Fig.1). D'une superficie totale de 1200 km², cette plaine est limitée par l'Océan atlantique au Nord, la zone d'affleurements schisteux au Sud, l'Oued Bouskoura à l'Est, l'Oued Oum-Er-Rbia à l'Ouest. Elle est comptée parmi les principaux aquifères des plaines subatlantiques. Cette plaine est dépourvue de cours d'eau pérennes et l'apport des Oueds Wawra et Merzeg qui la traversent n'est apparent qu'en période de crues. Ainsi, la seule ressource en eau disponible sur place, provient des eaux souterraines peu profondes. Cette disposition favorable à l'irrigation par pompage a été l'un des atouts majeurs du développement des cultures. Par ailleurs, le développement des pompes a engendré la surexploitation de la nappe, son dénoyage par endroits et par conséquent l'avancée, a un rythme très accéléré, du biseau salé.

CONTEXTE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE GENERAL

Le climat de la Chaouia côtière est du type semi-aride à influence océanique. La pluviométrie moyenne annuelle est de 400 mm (300 mm à Azemmour et 500 mm à Casablanca). La température moyenne est de 25°C (40°C en été et 10°C en hiver). Les Oueds Merzeg et Wawra qui traversent la plaine sur toute sa largeur, sont de faible importance, leur écoulement n'est possible que pendant de courtes durées et en périodes des crues.

Les oueds Oum Er Rbia et Bousskoura, qui constituent respectivement les limites Ouest et Est de la nappe, ne contribuent pas à son alimentation, l'oued Oum Er Rbia draine la nappe aux points topographiquement bas à la faveur de sources.



CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les terrains paléozoïques (schistes grès et quartzites) plissés et tectonisés sont recouverts en discordance par les formations Mésozoïques et Cénozoïques subtabulaires, elles mêmes recouvertes par des dépôts quaternaires. Du point de vue géologique, la région peut être divisée en deux unités différentes :

- la zone d'Azemmour-Tnine Chtoouka, où le Paléozoïque est recouvert par les marno-calcaires du Cénomaniens.
 - La zone de Tnine Chtoouka-Casablanca où le Paléozoïque est recouvert par les sables dunaires consolidés, calcarénites et calcaires gréseux du Pliocène. Le Quaternaire est constitué d'un recouvrement pelliculaire de conglomérats limons et sables argileux.
- A l'exception de la tectonique ayant intéressé le socle Paléozoïque, aucun accident postérieur n'est à signaler.

CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Dans les formations Primaires, la circulation de l'eau est restreinte aux zones fracturées ou altérées, sur des épaisseurs variant de 10 à 20 m, avec de faibles productivités. Des bancs de quartzites fissurés, en intercalation dans les schistes, peuvent aussi être le siège d'une circulation d'eau.

Dans les formations Cénomaniennes, constituées par une série marno-calcaire, ces formations affleurent en bordure de l'Oued Oum Er Rbia. D'une épaisseur variable pouvant atteindre 60 m, leur productivité dépend de l'épaisseur des bancs calcaires.

Les formations Plio-quaternaires sont représentées par deux faciès principaux :

- Les dunes consolidés de 10 m d'épaisseur environ, présentes dans la bande littorale sur une largeur de 2 à 3 km.
- Les grès calcaires lumachelliques de 4 à 20 m d'épaisseur. Ces formations sont omniprésentes

Les principales caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de la Chaouia côtières sont récapitulées dans le tableau 1.

Aquifère	Recharge	Substratum	Epaisseur saturée (m)	Profondeur (m)	T (m ² /s)	S
Marno-calcaire Cénomaniens	Pluies	Schistes	10 à 20	20 à 40	510 ⁻⁴ à 10 ⁻³	9%
Sable Dunaire et calcarénites Plioquaternaire	Pluies	Schistes	10 à 15	<10	10 ⁻³ à 10 ⁻⁴	6%
Calcaire et grès Schistes altérés Primaire	Pluies	Schistes	5 à 15	15 à 25	10 ⁻⁵ à 10 ⁻³	4%

Tableau 1 : caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de la Chaouia côtière :
T est la transmissivité et S est le coefficient d'emmagasinement [2]

Le sens de l'écoulement de la nappe se fait généralement du Sud-Est vers le Nord-Ouest, sauf au droit de Tnine Chtouka où il change de direction pour s'orienter vers l'oued Oum Er Rbia. Entre les centres de Tnine Chtouka et Bir Jdid, la surface piézométrique est plate, présentant un espacement constant et un gradient hydraulique faible (1%). Entre Bir Jdid et Bouskoura, le gradient est de l'ordre de 3%. Cette différence du gradient hydraulique d'une zone à l'autre est due principalement à la variation de la perméabilité.

SALINITE DES EAUX DE LA NAPPE

La carte de la de salinité de la nappe (juillet 1995) [2] montre une concentration excessive de l'eau dans la bande côtière, ayant dépassée 6g/l à l'Ouest de la plaine (Tnin Chtouka - Azemmour), au Nord de Bir Jdid et à l'Ouest de l'oued Merzeg, alors qu'elle n'excédait pas dans ces lieux 3 g/l en 1971. Cette augmentation de la salinité est due à l'appel du biseau salé suite à la multiplication des pompages et la réduction des apports à la nappe ce qui a entraîné l'abandon de plusieurs puits au début de l'année 1990. En dehors de la bande côtière, la salinité de l'eau a atteint 2.5 g/l entre Tnine Chtouka et Azemmour contre 1.5 g/l en 1971 et 4 g/l entre Tnine Chtouka et Casablanca contre 3 g/l en 1971.

ETAT D'EXPLOITATION DE LA NAPPE

L'intensification de l'exploitation de la nappe, conjuguée à la sécheresse, a entraîné :

- une baisse du plan d'eau atteignant 20 m par endroits, avec une baisse moyenne de 60 cm par an.
- un dénoyage total des calcarénites dans certains secteurs où l'aquifère est réduit uniquement à la partie altérée des schistes.
- l'avancée de l'isopièze zéro à environ 2 km à l'intérieur de la plaine.
- la dégradation de la qualité de l'eau avec des salinités pouvant atteindre 10 g/l notamment dans la bande côtière.

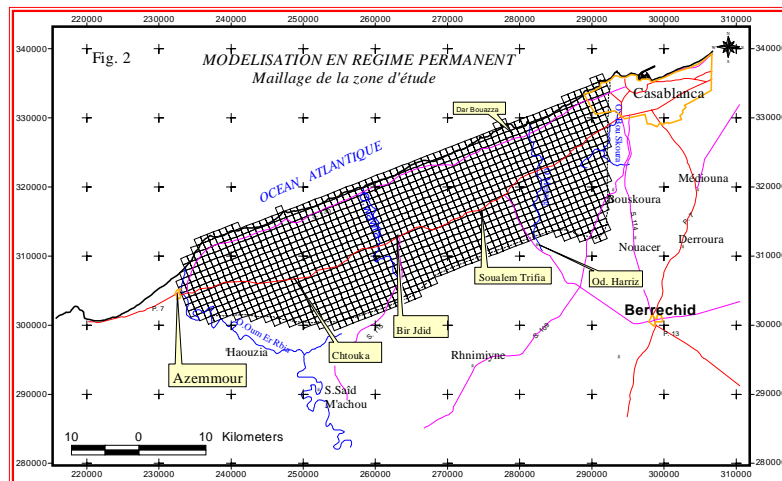
Cette situation a été confirmée par l'enquête menée par la DRPE en 1995 qui a montré que sur les 1083 puits enquêtés durant les mois de Juin et Juillet 1995, 592 puits ont été totalement abandonnés et leurs moyens d'exhaure enlevés. Parmi ces derniers, 96 (16%) d'entre eux ne sont plus opérationnels à cause de leur assèchement. Le reste (84 %) a été abandonné à cause de la forte salinité de l'eau pompée dépassant 3 g/l, seuil tolérable en agriculture. Les résultats de l'enquête ont permis également de constater que 54 puits seulement captent les niveaux Plio-quaternaires et Cénomaniens (5 %), alors que 1092 représentant 95 % captent les schistes altérés. Ce constat montre clairement le degré de dénoyage des formations sus-jacentes, ce qui accule les agriculteurs à se rabattre sur le niveau potentiel restant formé des schistes altérés.

Les volumes d'eau prélevés à partir des eaux souterraines ont été estimés à 1100 l/s, soit un volume total annuel de 34.70 Mm³/an [2], (1000 l/s pour l'irrigation et 100 l/s pour l'alimentation en eau potable des populations et l'abreuvement du cheptel). Il a été constaté que malgré la réalisation de certains puits en 1950, leur utilisation effective à des fins agricoles n'a démarré qu'en 1971. Ainsi, sur les 1083 puits visités, 70 % ont été réalisés et équipés en motopompes entre 1980 et 1990. D'autre part, la fréquence des pompages opérés est souvent inférieure à 15 mn/jour à cause des baisses rapides des niveaux d'eau.

Avant 1971 le bilan était équilibré et les prélèvements modérés par rapport à la recharge moyenne [3]. Par contre le bilan de 1995 (Total des entrées: 35 Mm³, Total des sorties: 48 Mm³) montre un déficit relativement important de 13 Mm³, corollaire d'une exploitation abusive de la nappe et d'un déficit pluviométrique d'environ 225 mm/an. Les prélèvements, évalués d'après l'enquête à 34.70 Mm³ par an [2], constituent la fraction la plus significative au niveau des sorties, suivis des pertes d'eau vers la mer (8 Mm³/an) et de l'évaporation directe (5 Mm³/an).

MODELISATION DE LA NAPPE EN REGIME PERMANENT ET BILAN

La modélisation hydrodynamique de l'aquifère de la Chaouia côtière est réalisée par l'application du code MODFLOW [4]. La discrétisation du domaine est composée de 71 colonnes et 24 lignes, soient 1704 mailles carrées régulières de 1000 m de côté, dont 1210 mailles sont actives (Fig.2). La dimension des mailles a été choisie en tenant compte de la densité et de la variabilité des données disponibles .



les conditions aux limites adoptées dans la conception du modèle sont : potentiel imposé constant égal à zéro le long de l'océan ; potentiel imposé constant le long de la limite Ouest constituée par l'Oued Oum Er Rbia et le long de la limite de la nappe avec la nappe de Berrchid au Sud. Une limite à flux nul a été imposée au niveau de la ligne du courant reliant la limite amont à l'oued Oum Er Rbia et au niveau des affleurements des schistes primaires le long de l'Oued Bouskoura à l'Est.

La distribution des perméabilités est représenté au tableau 2.

Secteur	Minimum	Maximum	Moyenne
Aval de bir Jdid	$6, 10^{-6}$	$6, 10^{-3}$	10^{-3}
Est Tnine Chtouka	$2, 10^{-6}$	$2, 10^{-4}$	$4, 10^{-5}$
Ouest Tnine Chtouka	$2, 10^{-6}$	$7, 10^{-4}$	$2, 10^{-4}$
Frangè còtère	$4, 10^{-6}$	$2, 10^{-3}$	$6, 10^{-4}$

Tableau 2 : Distribution des perméabilité (m/s) par secteur[2]

L'alimentation naturelle de la nappe est évaluée à $52.6 \text{ Mm}^3/\text{an}$ pour un coefficient d'infiltration estimés à 15% pour les affleurements Plio-quaternaires dominants et 8% pour le reste des terrains.

L'évaporation directe est considérée non nulle lorsque la profondeur de la nappe est inférieure à 10 m [4]. Pour chaque maille du modèle l'évaporation ne peut dépasser une valeur maximale. Dans le présent modèle, cette valeur maximale est estimée à une fraction de l'évaporation du bac suivant la formule empirique proposée par Breil [2] :

$$E(\text{mm}) = B(\text{mm})/2h$$

Où, B est l'évaporation (en mm) du bac et h est la profondeur (en m) de la nappe. Les valeurs obtenues présentent cependant une représentativité limitée puisque, ne disposant pas de mesures de l'évaporation du bac, nous avons approché cette grandeur par l'évaporation potentielle mesurée par Piche à la station de Casablanca, soit 970 mm/an .

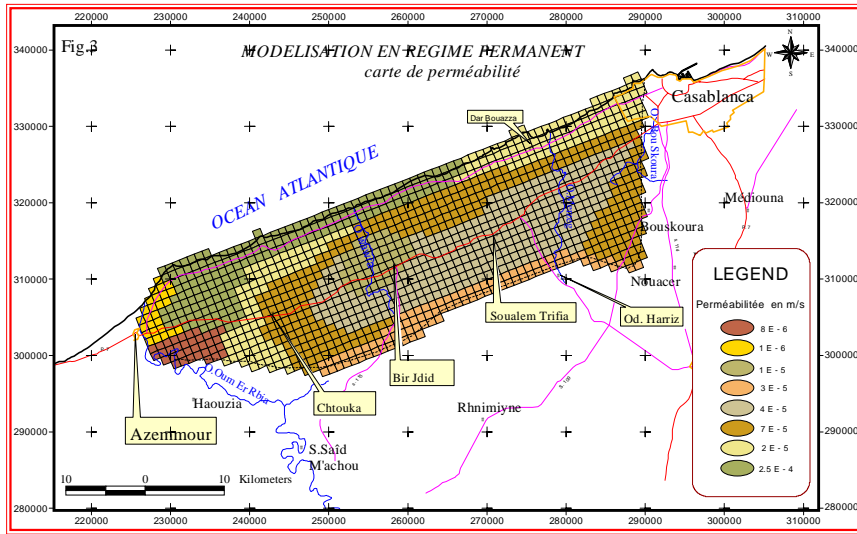
Les deux sources situées aux mailles (3,69) et (13,63) sont simulées sous formes de drains dont les conductances sont respectivement $2.6 \cdot 10^{-3}$ et $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2/\text{s)}$.

Les prélèvements par pompages sont supposés nuls en régime permanent (état piézométrique de 1949).

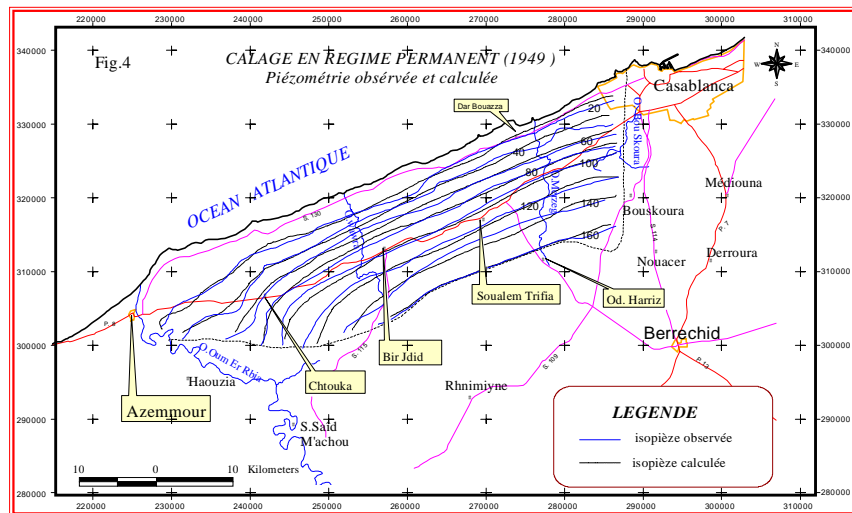
Calage du modèle

L'état de référence retenu pour caler le modèle en régime permanent est la piézométrie de 1949 correspondant à l'état avant le début des pompages. La carte (Fig. 3) montre la distribution de la perméabilité obtenue à l'issue du calage. On distingue principalement quatre zones :

- à l'Ouest de Tnine Chtouka où la nappe circule dans les calcaires et les dolomies du Cénomanien, la perméabilité varie entre 10^{-4} et $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.
- à l'Est de Tnine Chtouka où la nappe circule dans les schistes, la perméabilité varie entre $2 \cdot 10^{-5}$ et $7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, avec $4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ comme valeur prépondérante.
- le long de la bande côtière, elle est en général de l'ordre de 10^{-4} m/s , ce qui est légèrement inférieur à l'ordre des perméabilités mesurées.
- au voisinage de l'Oued Oum Er Rbia, la perméabilité est faible, allant de 10^{-5} - 10^{-6} m/s (les dépôts d'alluvions limoneux peuvent expliquer ces faibles valeurs).



La figure 4 illustre la superposition de la piézométrie calculée par le modèle avec celle observée en 1949 et montre un calage satisfaisant.



Ce calage du modèle en régime permanent a permis la reconstitution du bilan global de la nappe par évaluation de ses différentes composantes (tableau 3).

	Termes du bilan	Volumes en Mm ³ /an
Entrées	Recharge par précipitation	52,42
	Alimentation par la nappe de Berrchid	6,16
	Total	58,58
Sortie	Perte vers l'océan	48,95
	Sortie vers l'Oued Oum Er Rbia	1,58
	Evaporation	7,48
	Drainage par les sources	0,53
	Total	58,54
Entrée - Sortie	0,04	
Erreur %	0,068	

Tableau 3 : Bilan hydrique calculé en régime permanent

Le bilan obtenu par le modèle est comparable avec celui de la synthèse hydrogéologique de 1949 [2].

MODELISATION EN REGIME TRANSITOIRE

Cette partie, consacrée au modèle en régime transitoire représente une continuité au calage en régime permanent. L'objectif principal de cette étape de la modélisation hydrodynamique est le calage du coefficient d'emmagasinement et l'homogénéisation des données du système hydraulique en régime transitoire.

Les pompages n'ayant commencé à se développer qu'à partir de 1960 [2], ce qui laisse supposer que la piézométrie de 1949 s'est maintenue jusqu'à cette date.

La phase de simulation est considérée de 1961 à 2000. L'absence de données consistantes nous a conduit à subdiviser cette phase en 8 périodes avec un pas de temps de 5 ans. La distribution de la porosité efficace a été obtenue à partir des données disponibles variant entre 0,13 à 7 %, qui est adoptée au cours des phases de calage.

Pour calculer la recharge de chaque période, deux coefficients d'infiltration sont utilisés : 15% pour les affleurements Plio-quadernaires et 8% pour les affleurement des schistes et quartzites et le long des oueds Houara et Bouskoura, et particulièrement pour les limons rouges superficielles en amont. Le tableau 4 donne le taux de recharge pour chaque période .

Période	1	2	3	4	5	6	7	8
Recharge (Mm ³ /an)	65,22	60,32	63,92	60,25	34,46	48,44	44,45	46

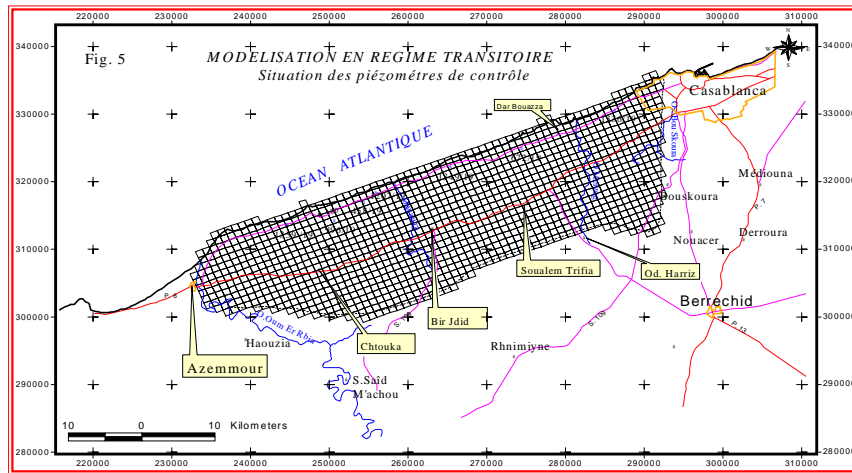
Tableau 4 : Recharge de la nappe en Mm³/an par période

Les pompages, entre 1961 et 1980, sont concentrés surtout entre Bir jdid et Casablanca, alors qu'entre 1980 et 2000 il y a eu migration progressive des pompages vers l'Ouest, en se concentrant entre Tnine Chtouka et Azemmour, et diminution du débit global prélevé du fait de la régression des pompages à cause de l'assèchement et de la salinité. Le tableau 5 donne les prélèvements par périodes.

Période	1	2	3	4	5	6	7	8
Prélèvement Mm ³ /an	16,38	32,83	51,69	41,63	42,26	30,91	34,37	34,50

Tableau 5 : Prélèvement par périodes en Mm³/an

Le calage est basé sur le suivi piézométrique disponible au niveau de 5 points d'observation choisis pour leurs séries longues parmi le réseau de contrôle existant (Fig. 5).



La figure 6 montre l'évolution de la piézométrie calculée et celle mesurée durant la période de simulation. Dans l'ensemble, la piézométrie calculée au droit du contrôle présente des résultats satisfaisants avec celle mesurée.

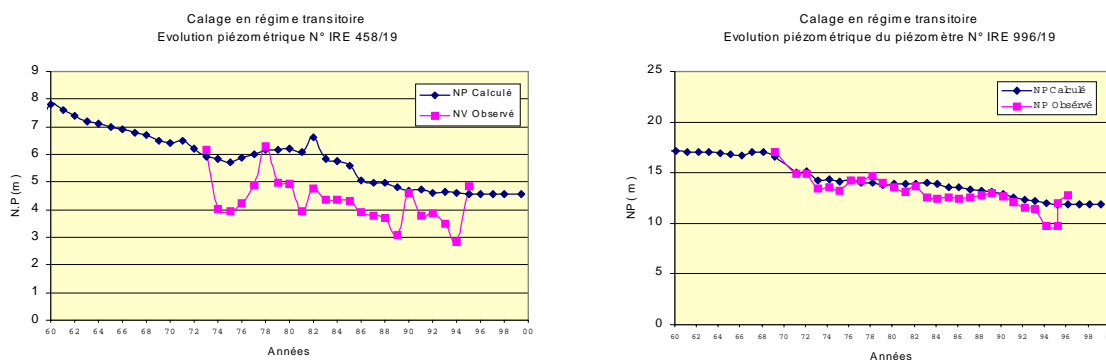
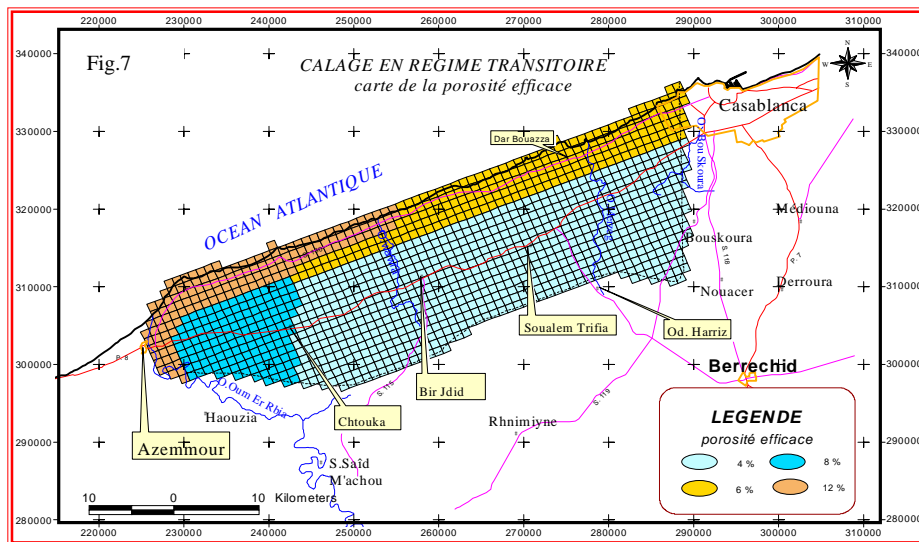


Fig. 6. Comparaison de l'évolution de la piézométrie calculée et mesurée

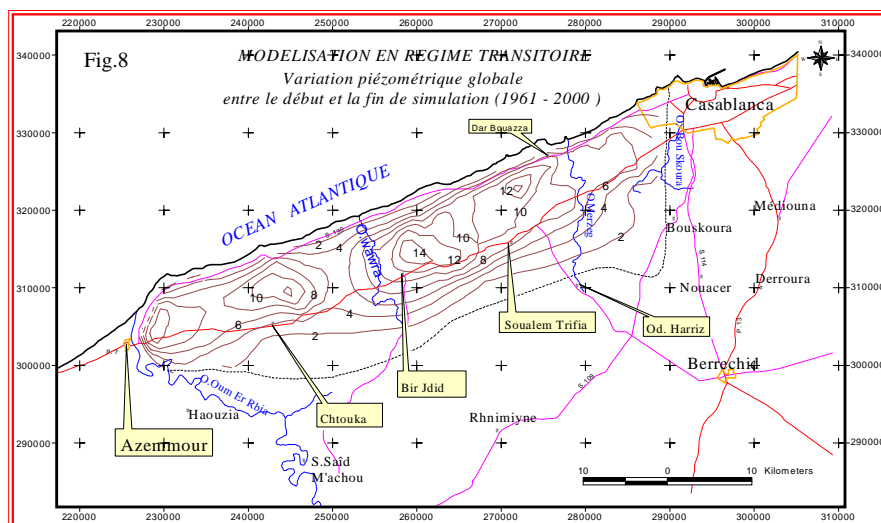
En l'absence de mesures disponibles de la porosité efficace, on a considéré que chaque faciès géologique à une porosité relativement constante. La carte de la répartition de la porosité efficace obtenue par le calage du modèle est assez homogène, avec les caractéristiques suivante (Fig. 7) :

- dans la zone côtière, à l'Ouest de Tnine Chtouka, une porosité efficace de 12% correspond à l'aquifère des calcaires gréseux qui est doté de bonnes capacités d'emménagement
- pour les schistes, elle varie de 6 % dans la bande côtière à 4 % dans le reste de la zone, dénotant un aquifère microfissuré et poreux, peu capacitif
- Pour les marno-calcaires, elle est de 8 %, confirmant le caractère plus capacitif de ces formations



Evolution des réserves

La carte de variation piézométrique globale entre le début et la fin de la période de simulation est représentée par la figure 8. La baisse piézométrique traduit la diminution des réserves de la nappe qui est de l'ordre de 81.35 Mm^3 durant la phase de simulation, ceci est dû à l'effet de sécheresse et surtout à l'action des prélèvements par pompage.

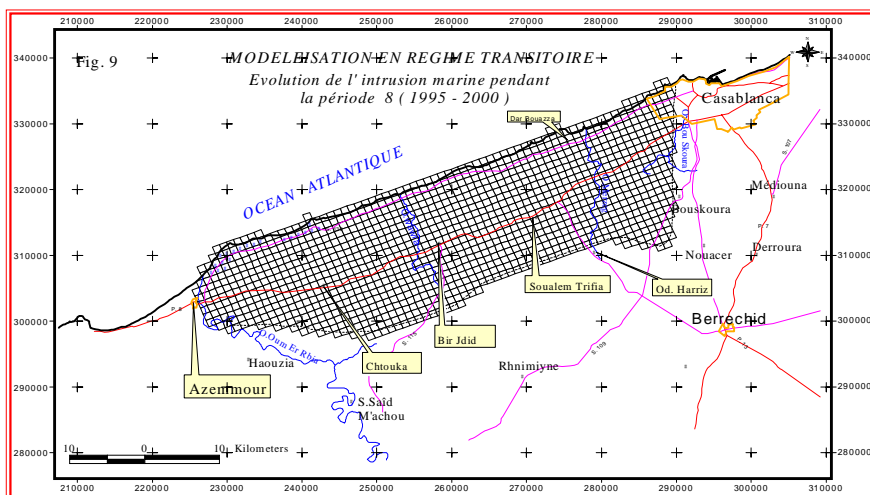


Intrusion marine

D'une manière globale, l'analyse des bilans calculés montre que les entrées d'eau de mer dans la nappe de la Chaouia côtière commencent à se manifester à partir de 1980–1985. Les mailles affectées étaient localisées au niveau d'un petit secteur à proximité d'Azemmour où les gradient hydrauliques sont inversés.

Malgré la reprise pluviométrique au cours des années suivantes, ces entrées se poursuivaient progressivement du fait de la concentration massive des pompages entre Tinine Chtouka et Azemmour. La figure 9 montre l'extension des mailles affectées en 2000, ainsi, le débit de ces entrées est de 18,5 l/s.

L'analyse du bilan, maille par maille, montre que les entrées d'eau de mer se font sur presque toute la ligne littorale entre Azemmour et Tnine Chtouka. Ces entrées doivent être interprétées comme une intrusion marine en profondeur qui compense les volumes déstockés entre deux positions successives de l'interface eau douce-eau salée. Notons également que les entrées de la nappe par l'oued Oum Er Rbia évaluées en 2000 à 9,8 l/s traduisent également le déséquilibre hydrodynamique de la nappe. Le secteur le plus touché par l'intrusion est le tronçon aval de l'Oum Er Rbia et la côte entre Azemmour et Tnine Chtouka. Ce secteur constitue donc une zone menacée par l'intrusion saline du fait de la prolifération continue des pompages.



MESURES DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU DANS LA ZONE

Les résultats du modèle hydrodynamique en régime transitoire montrent que la nappe de la Chaouia côtière est surexploitée avec un déstockage moyen de l'ordre de 2,5 Mm³/an. Ce déstockage a engendré la baisse du niveau piézométrique et la dégradation de la qualité de l'eau, en raison de l'intrusion marine. Ces deux facteurs limitent le développement agricole dans la zone entre Tnine Chtouka et Azemmour. De ce fait, des mesures devront être prises pour améliorer la qualité de l'eau. Pour le secteur en état de surexploitation (la zone entre Azemmour et Tnine Chtouka), une stabilisation des pompages à leur niveau actuel couplée à une recharge artificielle de la nappe permettront vraisemblablement une amélioration de la qualité des eaux de la nappe. Pour cela on a adopté une méthodologie basée sur l'index d'amélioration de la salinité qui a été défini en comparant le rapport eau douce / eau de mer dans le bilan de 2005 par rapport à la situation actuelle (2000) qui est utilisé comme référence, les valeurs d'index inférieures à 1 témoignent d'une détérioration de la qualité de l'eau,

les valeurs supérieures à 1 dénotent une amélioration qui est d'autant plus importante que l'index est élevé. Après plusieurs scénarios d'injection, il s'est avéré que l'impact positif de ce projet ne se fait sentir qu'à partir d'un débit d'injection supérieur à 100 l/s. Deux scénarios ont été choisis : a - injection de 100 l/s dans les mailles (3/7) ; (4/6) ; (5/5), b - injection de 200 l/s dans les mailles (4/16) ; (4/17) ; (4/18) ; (4/19). Eventuellement les ressources en eau superficielles de l'Oued Oum Rbia peuvent être utilisées pour accomplir la recharge artificielle de la nappe de la Chaouia côtière. Les résultats de la recharge artificielle sont donnés par le tableau 6.

	Situation en 2000		Situation en 2005	
Débit de recharge l / s	-		100	200
Apport eau douce l/s	211,16		197,19	197,79
Entrée eau de mer l/s	18,5		14,5	7,42
Eau douce/ eau de mer	11,41		13,59	26,56
Index d'amélioration de salinité	1		1,19	2,33
Piézométrie minimum (m)	- 2,4		- 1,4	- 0,2

Tableau 6 : Effet d'une recharge artificielle sur la qualité des eaux

La recharge artificielle dans la zone menacée, a un effet direct sur la salinité de la zone en réduisant les entrées d'eau de mer et en provoquant une remontée de la piézométrie. Un débit de recharge supérieur à 200 l/s est nécessaire pour obtenir une amélioration significative de la salinité dans le secteur Azemmour – Tnine Chtouka avec un rapport eau douce / eau de mer supérieur à 2 et une piézométrie minimum égale à - 0,2 m.

CONCLUSIONS

La modélisation hydrodynamique de la nappe de la Chaouia côtière par le code Modflow a permis de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère, en estimant les échanges latéraux de la nappe avec l'océan et de l'oued Oum Er Rbia. Le modèle mathématique en régime permanent a permis d'affiner la distribution spatiale de la perméabilité sur l'ensemble du domaine et de dresser le bilan de la nappe en régime permanent. Le modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emménagement de l'aquifère. Le bilan hydrique issu de ce calage a mis en évidence des entrées d'eau de mer traduisant une avancée du biseau salé et également des entrées d'eau de l'oued Oum Er Rbia. Le déstockage enregistré est de l'ordre de 2,5 Mm³/an. La simulation des scénarios dans la zone Tnine Chtouka –Azemmour a montré qu'un débit d'injection de 200 l/s permet d'inverser le gradient hydraulique et donc de faire reculer le biseau salé dans cette zone.

Références

- 1- Le Cointre G., et Gigout M, 1949 :Carte géologique provisoire des environs de Casablanca 1/200000 et sa notice explicative, Note et Mém, du Serv, Géol, du Maroc , n° 72 , 28p.
- 2- DRPE , 1995 : Etude hydrogéologique de la Chaouia côtière, rapport inédit de la DRPE.
- 3- Tome de ressources en eau du Maroc,(Tome2), 1975 : Plaines et bassins du Maroc atlantique , Note et Mém, Du Serv, Géol, du Maroc.
- 4- Macdonald ,M., G. & Harboagh A., W., 1988 : A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model.