

## Isotopes et ressources en eau, exemple du bassin Synclinal d'essaouira (Maroc Occidental)

M. BAHIR<sup>1</sup>, M. O. SILVA<sup>2</sup>, J. MENDONÇA<sup>2</sup>, P. CARREIRA<sup>3</sup>, GALEGO  
FERNANDES<sup>3</sup>; M. BENBIBA<sup>4</sup> & M. ELMERAJI<sup>4</sup>

1 : Laboratoire d'Hydrogéologie, Faculté des Sciences Semlalia, B.P. 2390, Marrakech, Maroc,

2 : *Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa,*

3 : Instituto Tecnológico e Nuclear, Sacavém, Portugal,

4 : Agence du Bassin Hydraulique du Tensift

**Abstract** Indépendamment de tout changement climatique, la gestion de l'eau est l'un des grands problèmes qui conditionne l'avenir du Maroc. Le pays devrait être en situation de stress hydrique et devra, au delà de 2025, se retrouver en situation de pénurie d'eau, car des problèmes importants de qualité se poseront en relation avec l'érosion, la salinisation et la pollution (Bahir, 2002). Les changements climatiques pourraient exacerber les impacts négatifs de la rareté, de la disparité spatio-temporelle et de la forte dégradation qui caractérise les ressources en eau sur le développement socio-économique. En ce qui concerne les ressources en eau souterraines, on dénombre 32 nappes profondes (profondeur allant de 200 à plus de 1000 m) et 48 nappes superficielles (faible profondeur du niveau d'eau). La datation des eaux de la zone côtière d'Essaouira, a permis de mettre en évidence des eaux très anciennes et un faible taux de renouvellement de ces eaux, principalement ceux de l'aquifère Turonien qui pourvoie en eau potable avec un fort pourcentage la ville d'Essaouira. Un épuisement de la ressource, des déséquilibres hydrochimiques et une dégradation de la qualité sont à craindre par suite d'une exploitation par des débits toujours soutenus pour satisfaire la demande de plus en plus importante. Lors de la campagne de 2004, les résultats d'analyses isotopiques ont confirmé une descente des niveaux piézométriques toujours accentuée, ce qui pose un problème au niveau de la gestion de la ressource en eau.

**Mots clefs** changement climatique, stress hydrique, eau souterraines, analyses isotopiques, écoulements, datation des eaux, l'aquifère Turonien, Maroc

### INTRODUCTION

La région étudiée, dite zone synclinale d'Essaouira, appartient au bassin d'Essaouira. D'une superficie de 300 km<sup>2</sup> environ, elle est limitée au Nord par l'oued Ksob, au Sud par l'oued Tidzi, à l'Est par le diapir de Tidzi et à l'Ouest par l'Océan Atlantique (Fig. 1). Elle est peu accidentée et se caractérise par un relief de collines basses, modelées par un réseau hydrographique peu dense.

La zone synclinale d'Essaouira fait partie des zones semi-arides du Maroc avec des précipitations très irrégulières qui ne dépassent pas les 300 mm/an en moyenne. La



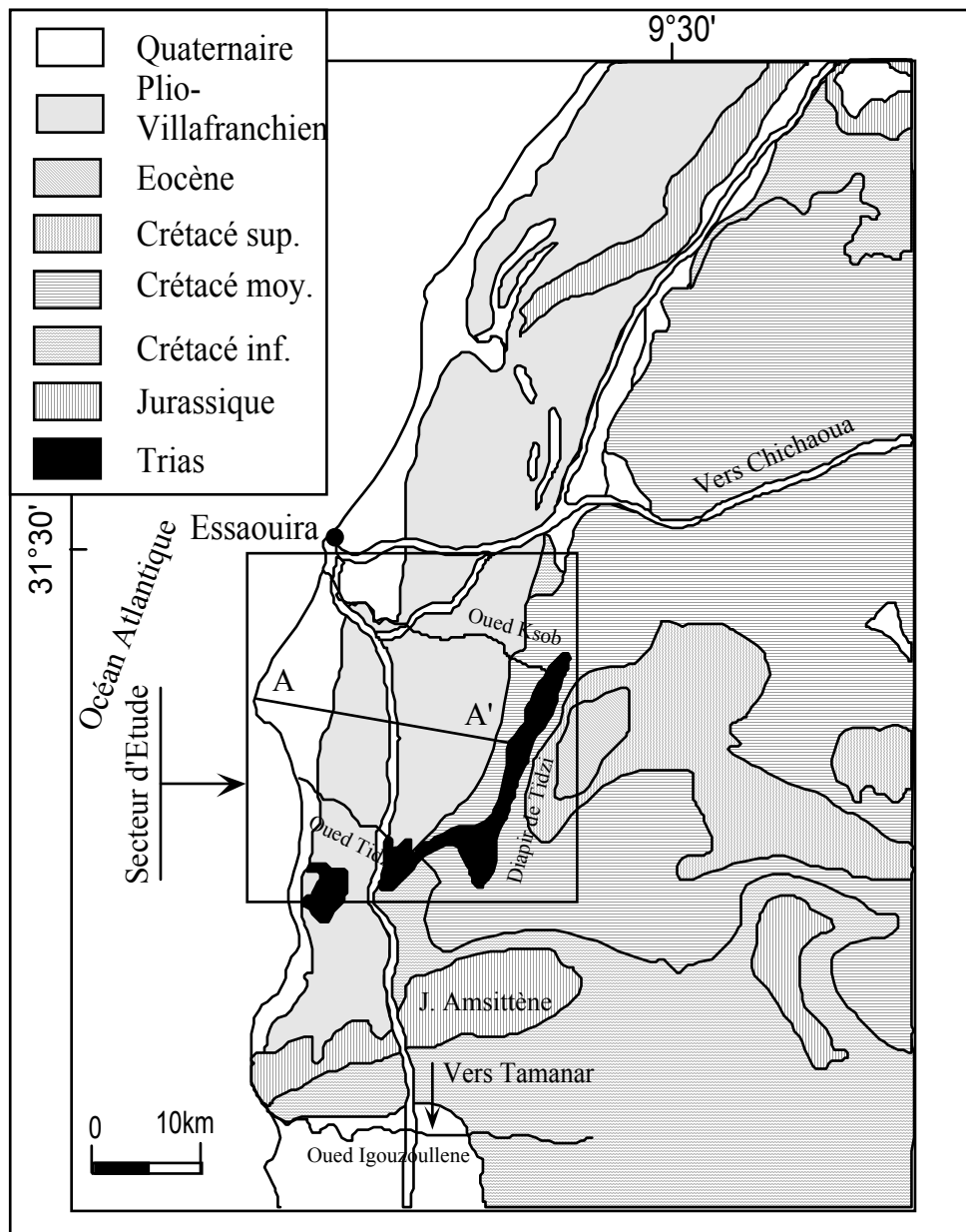
température moyenne oscille autour de 20°C, l'écart entre le mois le plus froid (janvier) et le mois le plus chaud (août) peut atteindre 17°C (bahir, 2001).

Dans cette région, les ressources en eau souterraine sont contenues dans deux réservoirs principaux : le Plio-Quaternaire et le Turonien. Le Plio-Quaternaire à matrice de grès calcaire marin ou dunaire présente une conductivité hydraulique primaire par porosité et renferme une nappe libre importante dont le mur est formé, dans la structure synclinale, par les marnes du Sénonien. Il est exploité en domaine rural et assure l'alimentation en eau potable, les besoins domestiques (Bahir *et al.*, 2000) et d'une façon moins importante l'irrigation de terres agricoles. Le Turonien renferme une nappe très rapidement captive sous les marnes sénoniennes dans la structure synclinale et probablement en contact direct avec le Plio-Quaternaire sur les bordures de cette structure, au Nord vers l'oued Ksob, à l'Ouest à l'approche du diapir caché d'Essaouira, à l'Est et au Sud au voisinage du diapir de Tidzi. Il a été sollicité depuis la fin des années 80 par des forages profonds qui sont surtout destinés à satisfaire les besoins en eau de la ville d'Essaouira et de quelques villages importants.

Dans le secteur étudié, les structures sont représentées à l'Est et au Sud par le diapir de Tidzi orienté NNE-SSW (sur 20 Km) depuis l'oued Ksob jusqu'à l'oued Tidzi où il prend une direction Est-Ouest et à l'Ouest par l'anticlinal d'Essaouira à cœur triasique, masqué par les recouvrements plio-quaternaires et mis en évidence par géophysique.

On note aussi une intense fracturation de direction générale N110 qui découpe les formations carbonatées du Crétacé.





**Fig. 1** Situation du secteur d'étude (d'après la carte géologique de Marrakech, 1/50000)  
Piézométrie et Hydrochimie

La carte piézométrique de la nappe plio-quaternaire réalisée en mars 2004 (fig. 3), montre un sens d'écoulement général du SE vers le NW, imposé par l'inclinaison de son substratum.

Toutefois vers l'aval les eaux divergent pour contourner l'anticlinal caché d'Essaouira orienté NE-SW. La nappe est alors séparée en deux compartiments :



Le compartiment nord a des lignes de courant orientées d'une façon identique à l'écoulement global, tandis que le compartiment sud montre des lignes d'écoulement plutôt dirigées de l'Est vers l'Ouest.

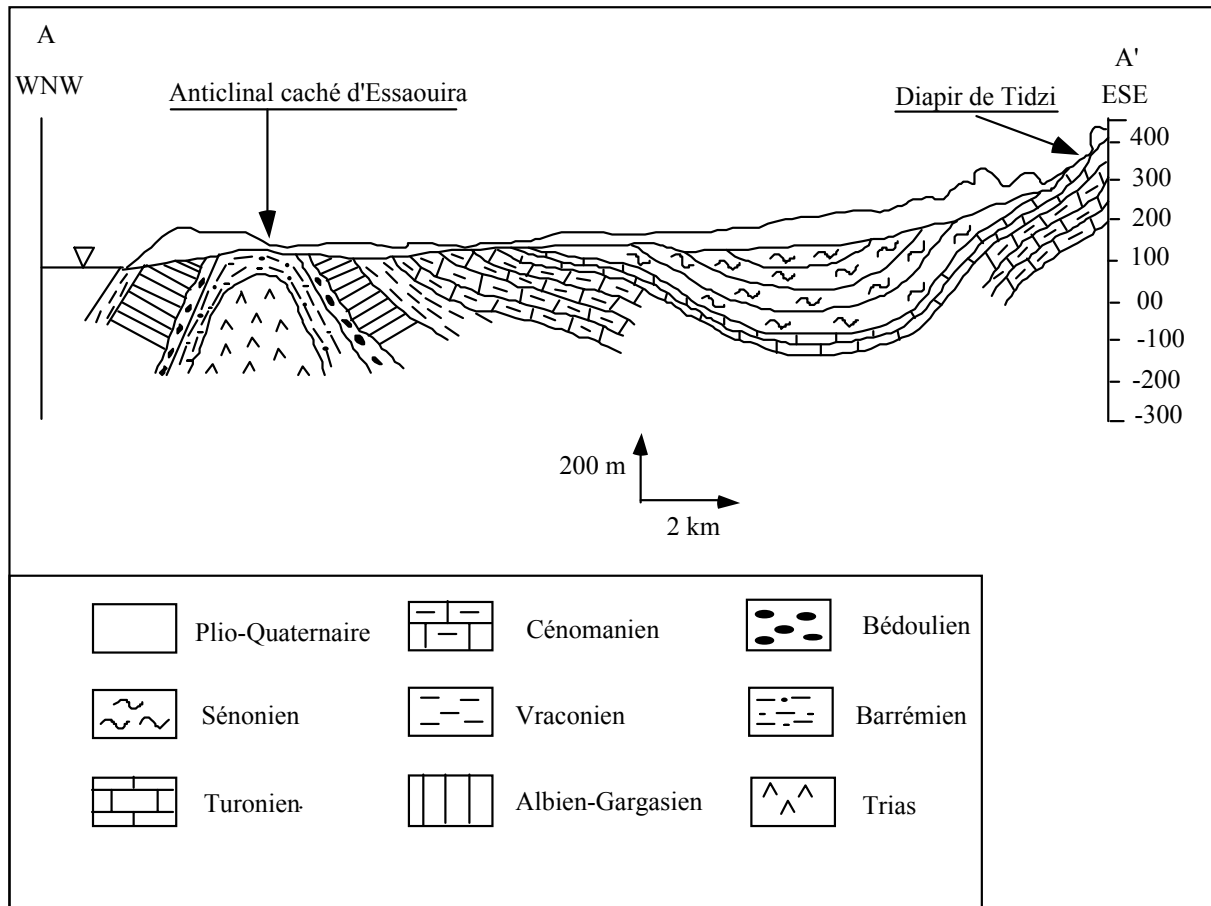


Fig. 2 : Coupe géologique du synclinal d'Essaouira

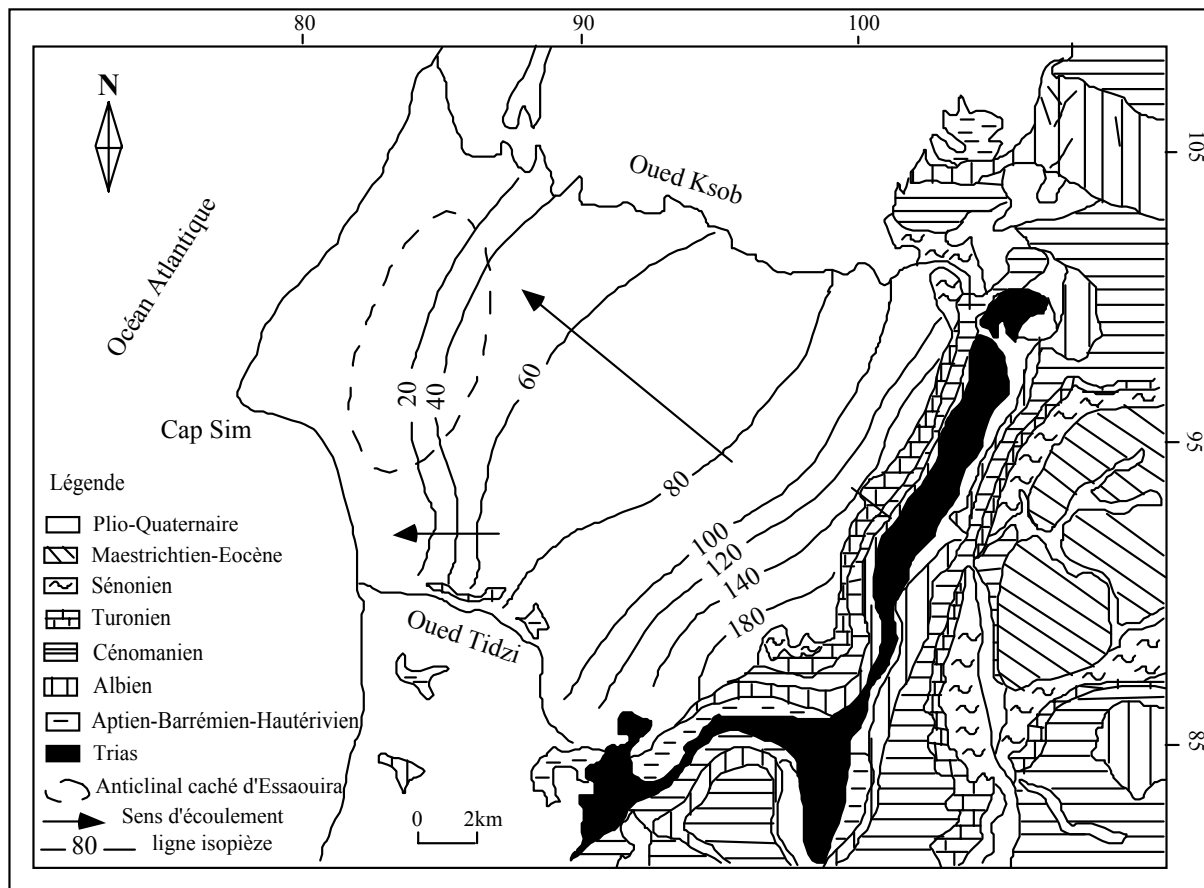
Le niveau piézométrique est à 180 m d'altitude en amont où le gradient hydraulique est fort, de l'ordre de 2%, en raison de la forte inclinaison du mur de l'aquifère liée à la montée du diapir de Tidzi. Le gradient hydraulique diminue vers le centre de la zone où il ne dépasse pas 0,3%. Ensuite, il tend à augmenter vers l'aval pour atteindre de nouveau 2% à la verticale de l'anticlinal caché qui rétrécit la section de l'aquifère (Mennani, 2001).

Des jaugeages différentiels effectués au cours du cycle hydrologique 1990-1991 et confirmés en 2004 ont permis d'estimer les débits infiltrés à partir de l'oued Ksob vers l'aquifère plio-quaternaire à un débit 42 l/s (Fekri, 1993). Le passage de cette rivière dans les



gorges où affleure le Turonien se traduirait également par des pertes de 64 l/s au bénéfice de l'aquifère turonien.

Un échantillonnage portant sur une quarantaine de points d'eau, puits, forages et sources captant le Plio-Quaternaire et le Turonien a été réalisé, la conductivité électrique et la température ont été mesurées sur le terrain. Les eaux de la nappe plio-quaternaire présentent des conductivités électriques très variables allant de 1590  $\mu\text{s/cm}$  (puits M5) jusqu'à 5040  $\mu\text{s/cm}$  (puits 18/51)



**Fig. 3** : Carte piézométrique de la nappe plio-quaternaire de la zone synclinale d'Essaouira en mars (2004)

Malgré cette variabilité, elles forment une seule et même famille et se caractérisent par le faciès chloruré-sodique. Il existe d'ailleurs une bonne corrélation entre la conductivité électrique et les teneurs en chlorures et en sodium.



Les conductivités électriques les plus faibles se situent dans le quart NE immédiatement au Sud de l'oued Ksob ; elles augmentent assez régulièrement vers le SW pour atteindre un maximum près du diapir caché d'Essaouira dans le quart Sud-Ouest.

Au-delà de cette structure, vers l'Ouest, les conductivités électriques observées s'abaissent sauf pour le puits n°11/51 qui est situé en bordure de l'océan et dans lequel une invasion d'eau marine est mise en évidence par la teneur en oxygène 18.

La carte des chlorures confirme cette évolution, elle révèle une zone d'alimentation par les pertes de l'oued Ksob au NE avec des teneurs modérées en chlorures. Ces teneurs augmentent approximativement dans le sens des écoulements jusqu'à une zone où l'aquifère plio-quaternaire repose directement sur les terrains évaporitiques du diapir caché d'Essaouira. Ainsi, la minéralisation en chlorures des eaux s'obtient d'une part au contact des terrains détritiques de l'aquifère plio-quaternaire contenant des éléments arrachés aux reliefs triasiques de l'Est et ceci en fonction du temps de séjour et d'autre part au contact direct avec les évaporites du diapir caché d'Essaouira (jalal, 2001).



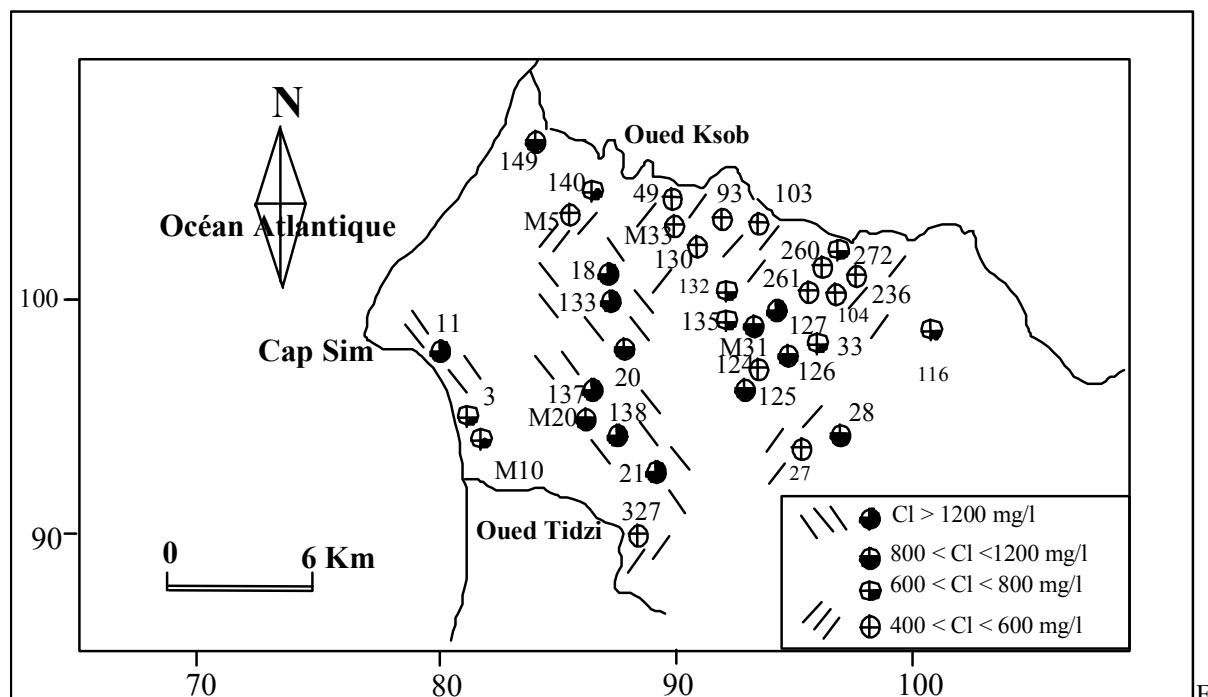


Fig. 4 : Répartition des chlorures des eaux de la nappe plio-quaternaire (campagne de janvier 1996)

Lors de la campagne de mars-avril 2004, les mêmes tendances ont été observées :

Tableau 1 : Résultats de la campagne 2004 pour l'aquifère plio-quaternaire.

| N°Echantil lon | N°IRE          | X     | Y      | Z(m)  | N.P(m ) | H(m)  | CE(µs/c m) | T°C  | pH   | Aquifère   |
|----------------|----------------|-------|--------|-------|---------|-------|------------|------|------|------------|
| point 1        | 149/51         | 85.1  | 105.8  | 40    | 36      | 4     | 3280       | 23.4 | 7.28 | Plio-Quat. |
| point 2        | 132/51         | 89.75 | 98.25  | 99    | 26.2    | 72.8  | 1260       | 18.6 | 8.47 | Plio-Quat. |
| Piont 4        | M98            | 89    | 100    | 125   | 84      | 41    | 2330       | 22.2 | 7.34 | Plio-Quat. |
| Ech.5          | 15/51          | 86    | 97     | 70    | 5       | 65    | 3240       | 18.7 | 7.46 | Plio-Quat. |
| Ech.6          | 11/51          | 80.45 | 96.45  | 8     | 3       | 5     | 1940       | 21.7 | 7.25 | Plio-Quat. |
| Ech.14         | 21/51          | 89.4  | 91.4   | 89.6  | 62.6    | 27    | 6940       | 22   | 7.05 | Plio-Quat. |
| Ech.15         | 380/51         | 89.35 | 91.8   | 135   | 75      | 60    | 2180       | 21.6 | 8.09 | Plio-Quat. |
| Ech.29         | 327/51         | 88.8  | 88.8   | 130   | 21.1    | 108.9 | 2390       | 22.6 | 7.58 | Plio-Quat. |
| Ech.30         | 27/51          | 95.5  | 91.3   | 208   | 28      | 180   | 798        | 22.6 | 7.54 | Plio-Quat. |
| Ech.31         | M24            | 95    | 91.5   | 200   | 174     | 26    | 4660       | 27.7 | 7.5  | Plio-Quat. |
| Ech.32         | 28/51          | 97.2  | 91.8   | 225   | 177     | 48    | 1080       | 23.1 | 7.99 | Plio-Quat. |
| Ech.33         | 140/51         | 87.3  | 103.6  | 60    | 8.5     | 51.5  | 2010       | 23.7 | 6.82 | Plio-Quat. |
| Ech.34         | 148/51         | 85.7  | 102.05 | 60    | 14      | 46    | 1590       | 20.4 | 7.35 | Plio-Quat. |
| Ech.36         | oued amont     | 86    | 106    | 20    |         | oued  | 2160       | 20.9 | 8.01 | oued Amt.  |
| Ech.37         | 389/51(M65)    | 91.6  | 96.8   | 105   | 64      | 41    | 4600       | 24.2 | 7.35 | Plio-Quat. |
| Ech.38         | 134/51         | 91.65 | 97.6   | 101   | 37      | 64    | 3040       | 23   | 7.5  | Plio-Quat. |
| Ech.39         | 53/51          | 92.7  | 104.18 | 75    | 61      | 14    | 1490       | 21.6 | 7.26 | Plio-Quat. |
| Ech.40         | 93/51          | 92.37 | 101.9  | 98    | 70      | 28    | 1750       | 23   | 7.39 | Plio-Quat. |
| Ech41          | puit particul. | 97.6  | 101.2  | 108   | 87.5    | 20.5  | 1890       | 21.2 | 7.18 | Plio-Quat. |
| Ech.42         | oued aval      | 100.5 | 100.4  | 111   |         | oued  | 1840       | 25.8 | 8.8  | oued aval  |
| Ech.44         | 272/51         | 97.17 | 100.76 | 105.5 | 36      | 69.5  | 2000       | 21.2 | 7.43 | Plio-Quat. |



Contrairement à la nappe plio-quaternaire, les eaux du Turonien ont des conductivités électriques assez homogènes comprises entre 2000  $\mu\text{s/cm}$  et 2500  $\mu\text{s/cm}$ . Les échantillons de la nappe turonienne présentent le même profil chimique chloruré-sodique que celui des eaux plio-quaternaires et il est difficile de les distinguer, par leurs seules minéralisations, des eaux peu ou moyennement minéralisées du Plio-Quaternaire .

**Tableau 2** : Résultats de la campagne 2004 de la zone côtière d'Essaouira Aquifère Turonien

| N°Echantillon  | N°IRE         | X         | Y     | Z(m)  | N.P(m) | H(m)   | CE( $\mu\text{s/cm}$ ) | T°C  | pH   | Aquifère  |
|----------------|---------------|-----------|-------|-------|--------|--------|------------------------|------|------|-----------|
| <b>Point 3</b> | <b>386/51</b> | 92        | 98.65 | 105   | 30     | 75     | 2240                   | 17.3 | 7.66 | Turonien  |
| <b>Ech.28</b>  | <b>363/51</b> | 89.7<br>5 | 88.2  | 150   | 60     | 90     | 2410                   | 19.9 | 7.71 | Turonien  |
| <b>Ech.35</b>  | <b>157/51</b> | 86.5<br>5 | 105.3 | 30    |        | source | 1950                   | 23.8 | 7.42 | Turonien  |
| <b>Ech.43</b>  | <b>390/51</b> | 97        | 100   | 105.5 | 26.2   | 79.3   | 1820                   | 27.5 | 7.15 | Turonien  |
| <b>Ech.45</b>  | <b>346/51</b> | 97.2<br>5 | 100.7 | 105   | 26     | 79     | 1950                   | 26.5 | 7.16 | Turonien. |

Globalement les résultats de la campagne de 2004 pour la nappe turonienne confirment l'homogénéisation des conductivités dans un éventail allant de 1800 à plus de 2400  $\mu\text{s/cm}$ , témoignant par là de l'effet mineur de la sécheresse qui a sévi dans la région en raison de l'effet captif de cet aquifère.

Par contre pour l'aquifère plio-quaternaire, les conductivités sont allés crescendo pour atteindre plus de 7000  $\mu\text{s/cm}$  et c'est à la fois en raison d'une surexploitation de la nappe par suite d'une poussée démographique la région et d'une persistance de la sécheresse dont les effets n'ont pas encore été résorbés complètement (bahir, 2002).

Par contre, si la plupart des échantillons de la nappe plio-quaternaire sur lesquels des analyses en nitrates ont été faites accusent des valeurs très supérieures à la norme O.M.S. de 50 mg/l, les teneurs de l'aquifère turonien restent bien en deçà de cette norme.





## HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE

Dans le secteur étudié, le fonctionnement hydrodynamique est fortement influencé par la structure (plis et failles) qui commande les écoulements et détermine les émergences. Dans un tel contexte, les isotopes stables constituent un outil performant pour déterminer l'origine et l'histoire des eaux, les aires de recharges et les relations entre les nappes. Les résultats des analyses isotopiques d'oxygène 18 et du deutérium sont regroupés dans le tableau 3.

Les teneurs isotopiques des eaux plio-quadernaires sont généralement comprises entre  $-3,7$  ‰ et  $-4,7$  ‰ si l'on exclut le point 11/51 en bordure d'océan qui est atteint par le biseau salé.

Lors de la campagne de 2004, les résultats d'analyses isotopiques réalisées par l'institut technologique et nucléaire de Lisbonne pour la nappe plio-quadernaire sont résumés dans le tableau comme suit :



**Tableau 3 :** Résultats isotopiques de la nappe plio-quaternaire de mars 2004 et ceux de l'oued ksob Amont et Aval.

| Ref. de Echantillon   | Type | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | $\delta^2\text{H}$ |
|-----------------------|------|---------------------------|--------------------|
| Marrocos 1 149/51     | Água | -3.68                     | -21.9              |
| Marrocos 2 132/51     | “    | -3.70                     | -17.6              |
| Marrocos 3 M98        | “    | -4.03                     | -23.7              |
| Marrocos 4 15/51      | “    | -3.84                     | -16.9              |
| Marrocos 5 11/51      | “    | -3.43                     | -17.0              |
| Marrocos 6 21/51      | “    | -4.53                     | -23.8              |
| Marrocos 7 380/51     | “    | -4.57                     | -26.5              |
| Marrocos 8 327/51     | “    | -4.00                     | -4.00              |
| Marrocos 9 27/51      | “    | -4.86                     | -4.86              |
| Marrocos 10 M24       | “    | -4.47                     | -4.47              |
| Marrocos 11 28/51     | “    | -4.85                     | -4.85              |
| Marrocos 12 140/51    | “    | -4.63                     | -4.63              |
| Marrocos 13 148/51    | “    | -4.06                     | -4.06              |
| Marrocos 14 389/51    | “    | -3.28                     | -3.28              |
| Marrocos 15 134/51    | “    | -4.29                     | -4.29              |
| Marrocos 16 53/51     | “    | -3.69                     | -3.69              |
| Marrocos 17 93/51     | “    | -4,35                     | -4,35              |
| Marrocos 18 Part/51   |      | -2,52                     | -2,52              |
| Marrocos 19 272/51    |      | -2,85                     | -2,85              |
| Marrocos 20 Oued Amt  |      | -3.06                     | -3.06              |
| Marrocos 21 Oued Aval |      | -2.17                     | -2.17              |

Les échantillons 18 et 19, respectivement le puits particulier jouxtant le village d'Idda Ou Gard et le puits 272/51 alimentant en eau potable la ville d'Essaouira, avec des valeurs en riches en oxygène-18 de -2.52 et -2.85 très proches de ceux de l'oued Amont avec une valeur de -3.06, confirment une alimentation de ces deux points d'eaux par l'oued Ksob.

Ceci est corroboré en outre par des valeurs de conductivités très proches les unes des autres et qui sont respectivement de 2160, 2000 et 1890.

Dans sa partie aval lors des résurgences des sources de Sidi Yassine, les eaux de l'oued sont plus enrichies en oxygène 18 et sont autour de -2.17. Autrement les valeurs en oxygène 18 varient de -3.20 à -plus de -4.80.



Celles des eaux de la nappe turonienne sont comprises entre -4,88 et -5,25 ‰ et beaucoup plus regroupées autour de la valeur plus basse de -5 ‰. Cette différence persiste malgré les variations saisonnières perceptibles dans l'aquifère plio-quaternaire. Elle peut être mise sur le compte d'une différence d'altitude des zones de recharges, le Turonien affleurant entre 400 et 500 m d'altitude au pied des affleurements du diapir de Tidzi, alors que l'altitude moyenne de l'impluvium plio-quaternaire se situe entre l'altitude de 300 m et le niveau de la mer. Les résultats de mars 2004 pour l'oxygène 18 sont comprises entre -4.00 et -4.50 et sont plus regroupés autour de -4.50, témoignant par là d'une recharge plus haute, notamment sur les affleurements du diapir de Tidzi. Ceci est appuyée par des valeurs de conductivités très proches les unes des autres et tournant autour de 2200µs/cm.

**Tableau 10** : Résultats isotopiques de l'aquifère Turonien.

| N°IRE  | X     | Y     | Z(m)  | N.P(m) | H(m)   | CE(µs/cm) | T°C  | pH   | Aquifère  | Oxygène 18 |
|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-----------|------|------|-----------|------------|
| 386/51 | 92    | 98.65 | 105   | 30     | 75     | 2240      | 17.3 | 7.66 | Turonien  | -4.03      |
| 363/51 | 89.75 | 88.2  | 150   | 60     | 90     | 2410      | 19.9 | 7.71 | Turonien  | -4.46      |
| 157/51 | 86.55 | 105.3 | 30    |        | source | 1950      | 23.8 | 7.42 | Turonien  | -4.49      |
| 390/51 | 97    | 100   | 105.5 | 26.2   | 79.3   | 1820      | 27.5 | 7.15 | Turonien  | -4.07      |
| 346/51 | 97.25 | 100.7 | 105   | 26     | 79     | 1950      | 26.5 | 7.16 | Turonien. | -4.20      |

Pour le 386/51, forage de l'Aérodrome d'Essaouira, sa valeur plus élevée pourrait être imputée à un contact probable avec le plio-quaternaire, confirmée en cela par une profondeur de 100 mètres environ.

La source Leroux 157/51 confirme ses origines Turoniennes avec une valeur de -4.50.

Les résultats des analyses de deutérium permettent de définir sur un diagramme de corrélation oxygène 18-deutérium la droite météorique locale d'équation :  $\delta^2\text{H} = 7,95 * \delta^{18}\text{O} + 11,3$  (n = 11, r = 0,97) proche de la Droite des eaux Météoriques Mondiale (DMM) de pente 8 avec un excès en deutérium voisin de 10 (Craig, 1961). Elle caractérise les précipitations d'origine océanique. L'équation de cette droite a été calculée sans tenir compte des trois points d'eau



(65/51, 272/51 et oued Ksob) identifiés comme évaporés parce qu'ils s'inscrivent au-dessous de la droite météorique. Les autres points d'eau analysés s'alignent sur la droite météorique ce qui signifie que l'alimentation des deux aquifères et surtout celle de l'aquifère turonien s'effectue rapidement sans évaporation notable.

Treize points d'eau bien répartis et captant les différents aquifères de la zone côtière d'Essaouira ont été choisis pour le dosage du tritium en 1996. Ces teneurs varient entre une valeur minimale inférieure à 0,8 UT et une valeur maximale de 4,2 UT.

Tableau 4 : Paramètres physiques et analyses des isotopes radioactifs des eaux souterraines de la zone côtière d'Essaouira

| 14C         | Nature | Origine | Altitude | Prof (m) | T (°C) | C.E $\mu\text{s/cm}$ | PH   | Alc. $\text{m}\acute{\text{e}}\text{q/l}$ | 3H UT     | 14C pcm    | 13C $\text{‰}$ |
|-------------|--------|---------|----------|----------|--------|----------------------|------|---|-----------|------------|----------------|
| 272/51      | Puits  | Plio-Q  | 105.5    | 38.4     | 20.6   | 1660                 | 7.65 | 3.30                                      | 3,9+/-0,5 |            |                |
| 21/51       | Puits  | Plio-Q  | 135      | 29       | 21.7   | 5170                 | 7.13 | 2.80                                      | 2,0+/-0,5 |            |                |
| 327/51      | Puits  | Plio-Q  | 130      |          | 22.2   | 3880                 | 7.23 | 4.03                                      | 3,2+/-0,4 |            |                |
| 65/51       | Puits  | Turon   | 15       | 20.3     | 22.5   | 2870                 | 7.48 | 4.64                                      | 2,8+/-0,5 | 88,9+/-0,5 | -9,8           |
| 390/51      | Forage | Turon   | 95       | 200      | 26.7   | 1995                 | 7.35 | 4.94                                      | <2        | 32,5+/-0,4 | -9,4           |
| 386/51      | Forage | Turon   | 105      | 100      | 23.2   | 1828                 | 7.56 | 4.26                                      | 4,2+/-0,5 | 84,8+/-0,6 | -10,3          |
| 380/51      | Forage | Turon   | 135      | 194      | 26.1   | 2280                 | 7.54 | 4.67                                      | <2        | 3,0+/-0,5  | -9,0           |
| M98         | Forage | Bar-Apt | 90       | 100      | 22.0   | 2380                 | 7.59 | 3.55                                      | <2        | 79,6+/-0,6 | -9,3           |
| A.Agh balou | Forage | Bar-Apt | 80       |          | 23.1   | 2720                 | 7.50 | 3.58                                      | <2        | 72,0+/-0,4 | -10,0          |
| 216/51      | Source | Por-Ber | 160      |          | 23.1   | 1663                 | 7.28 | 4.53                                      | <2        |            |                |
| 218/51      | Source | Por-Ber | 308      |          | 22.5   | 1620                 | 7.29 | 4.24                                      | <2        | 68,5+/-0,6 | -9,9           |
| 361/51      | Forage | Lias    | 382      | 90       | 23.5   | 1780                 | 7.22 | 4.45                                      | 2,0+/-0,4 |            |                |
| 203/51      | forage | Callov  | 14       | 50       | 22.7   | 5330                 | 7.11 | 4.26                                      | 3,8+/-0,4 |            |                |



Il en résulte d'après ce tableau, que les eaux récentes de la zone côtière d'Essaouira ont des teneurs en tritium comprises entre 2 et 4 UT. C'est le cas notamment des points d'eau 65/51, 272/51, 327/51, et du 386/51, confortés en cela par les activités élevées en 14C pour certains d'entre eux. Les eaux ayant des teneurs inférieures ou égales à 2 UT sont considérées comme étant des eaux anciennes, tel le cas des points 21/51, M98, 216/51, 218/51, 361/51, 380/51, 390/51 et Ain Aghbalou, dont certains ont fait l'objet d'analyses au carbone 14 pour confirmer ou infirmer l'hypothèse.

Dix points d'eau bien répartis et captant les principaux aquifères alimentant en eau potable la ville d'Essaouira ont été choisis pour le dosage du tritium de leurs eaux au mois de Mai 2004. Les analyses ont été effectuées à l'Institut technologique de Sacavem de Lisbonne au département de chimie analytique et environnementale dans le cadre de l'Action Intégrée reliant les universités de Marrakech et de Lisbonne et financée conjointement. Les teneurs en tritium figurant dans le tableau 5, varient entre une valeur minimale inférieure à 1.1 UT et une valeur maximale de 4,2 UT.

**Tableau 5** : Campagne du mois de Mai 2004 pour la datation au Tritium des principaux points alimentant en eau potable la ville d'Essaouira.

| N°IRE  | X     | Y      | Z (m) | N.P (m) | H (m) | CE (µs/cm) | T°C   | pH   | Aquifère   | Teneur Tritium (UT) |
|--------|-------|--------|-------|---------|-------|------------|-------|------|------------|---------------------|
| 261/51 | 96.42 | 99.25  | 124   | 46      | 88    | 1900       | 23.2  | 7.40 | Plio-Quat. | 1.4+/-0.6           |
| 390/51 | 97    | 100    | 105.5 | 26.2    | 79.3  | 1890       | 25.9  | 7.15 | Turon.     | 2.0+/-0.6           |
| 386/51 | 92    | 98.65  | 105   | 30.7    | 74.30 | 2260       | 18.5  | 7.70 | Turon.     | 2.5+/-0.7           |
| 272/51 | 97.17 | 100.76 | 105.5 | 36      | 69.5  | 1917       | 20.9  | 7.42 | Plio-Quat. | 4.2+/-0.7           |
| 6/51   | 86.1  | 105.4  | 25    | 25      |       | 2780       | 23.4  | 7.01 | Turon..    | 1.4+/-0.7           |
| 346/51 | 97.25 | 100.7  | 105   | 26      | 79    | 1830       | 26.5  | 7.24 | Turon.     | 1.5+/-0.6           |
| 363/51 | 89.75 | 88.2   | 150   | 60      | 90    | 2600       | 24.5  | 7.14 | Turon.     | 1.2+/-0.8           |
| 380/51 | 89.35 | 91.8   | 135   | 55      | 80    | 2180       | 21.10 | 8.26 | Plio-Quat  | 0.9+/-0.7           |
| M98    | 89    | 100    | 125   | 80      | 45    | 2460       | 21.5  | 7.47 | Plio-Quat  | 1.1+/-0.6           |
| 149/51 | 85.1  | 105.8  | 40    | 36.2    | 3.8   | 2800       | 23.3  | 7.83 | Plio-Quat  | 0.2+/-0.8           |



Il en résulte d'après ce tableau, que les eaux récentes de la zone côtière d'Essaouira ont des teneurs en tritium supérieures à 2 UT. C'est le cas notamment des points d'eau 272/51, 386/51 dits forage d'Idda ou Gourd et forage de l'Aérodrome qui alimentent respectivement en eau Essaouira et Idda ou gourd, confortés en cela déjà par les résultats de 1996. Donc la campagne de 2004 nous a définitivement confirmé la recharge récente de ces points d'eaux. Par contre, les eaux ayant des teneurs inférieures ou égales à 2 UT sont considérées comme étant des eaux anciennes, tel est le cas des points 261, 390, 346/51, 6/51 et M98. Les eaux de l'aquifère Turonien qui pourvoient en eau potable la ville d'Essaouira, pour plus de 50 pour cent, notamment les forages de plus de 300 mètres de profondeur 346/51 et 390/51, et la source 6/51 présentent des valeurs de Tritium inférieures ou égales à 2 UT (bahir, 2001).

La nouvelle donnée de la campagne de 2004 pour les analyses en tritium sont la recharge faible ou inexistante pour des forages du Plio-quadernaire, notamment le forage 261/51 qui alimente pour plus de 6 litres/seconde la ville d'Essaouira. Ceci est corroboré par sa position lointaine de l'oued Ksob, qui alimente lors des crues les points d'eaux le jouxtant. Le carbone 14 est le radioélément le plus utilisé pour dater les eaux anciennes à très faibles teneurs en tritium.

Pour estimer les activités initiales en  $^{14}\text{C}$  des eaux souterraines de la zone côtière d'Essaouira, plusieurs modèles ont été testés (tableau 6). Ces différents modèles peuvent tenir compte de la dilution chimique du carbone 14 des mélanges isotopiques ou encore des mélanges isotopiques avec échange isotopique.



**Tableau 6 :** calcul de l'activité initiale du carbone -14 et de l'âge des eaux souterraine de la zone côtière d'Essaouira

| Points d'eau | Tamers    |                      | Pearson   |                      | Fontes Garnier |                      | AIEA      |                      | Evans     |                      |
|--------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|----------------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------------|
|              | Age (ans) | A <sub>0</sub> (pcm) | Age (ans) | A <sub>0</sub> (pcm) | Age (ans)      | A <sub>0</sub> (pcm) | AGE (ans) | A <sub>0</sub> (pcm) | AGE (ans) | A <sub>0</sub> (pcm) |
| 65/51        | actuel    | 53.6                 | actuel    | 46.7                 | Actuel         | 46.4                 | actuel    | 76.5                 | actuel    | 44,6                 |
| 390/51       | 4267      | 54.5                 | 2646      | 44.8                 | 2558           | 44.3                 | 6445      | 70.9                 | 2128      | 42,0                 |
| 386/51       | actuel    | 53.0                 | actuel    | 49.0                 | Actuel         | 48.9                 | actuel    | 79.9                 | actuel    | 47,0                 |
| 380/51       | 23739     | 53.0                 | 21984     | 42.9                 | 21891          | 42.4                 | 25829     | 68.2                 | 21443     | 40,1                 |
| M98          | actuel    | 52.8                 | actuel    | 44.3                 | Actuel         | 44.0                 | actuel    | 72.9                 | actuel    | 42,2                 |
| A.Aghbalou   | actuel    | 53.4                 | actuel    | 47.6                 | actuel         | 47.4                 | 624       | 77.6                 | actuel    | 45,5                 |
| 218/51       | actuel    | 55.3                 | Actuel    | 47.1                 | Actuel         | 46.8                 | 994       | 77.3                 | actuel    | 45,1                 |

L'étude des tableaux 4, 5 et 6 permet de déduire que :

Parmi les points d'eaux analysés deux présentent des teneurs significatives en tritium et des pourcentages en carbone 14 supérieures à 85 % et doivent être considérées comme actuels. On trouve naturellement parmi ces deux points d'eau, le puits 65/51 situé à proximité de l'oued ksob et qui alimente en eau potable la ville d'Essaouira avec un débit de 6 l/s (5% du total). Ce puits qui capte les eaux de l'aquifère Turonien présente une teneur en oxygène-18 de -4,53, valeur intermédiaire entre la teneur isotopique de -4 des eaux plio-quadernaires et -5 des eaux turoniennes, indiquant par là une drainance en pompage de l'aquifère plio-quadernaire. Le deuxième point est le forage 386/51, captant les eaux de l'aquifère turonien et qui pourvoie en eau potable l'aérodrome de la ville d'Essaouira.

Le forage M98 qui n'a pas de tritium détectable et qui a une teneur en carbone 18 de 80 %, a une alimentation antérieure aux essais nucléaires des années 1952 à 1963 et son âge radiocarbone ne peut pas dépasser quelques centaines d'années quelque soit le modèle d'interprétation utilisé.

Le forage 390/51 captant les eaux de l'aquifère turonien, alimente la ville d'Essaouira avec un débit de 60 l/s, soit 50 % des besoins en eau. Ce forage a un âge radiocarbone l'ordre de 6500 ans d'après le modèle de l'AIEA, un peu inférieur mais toujours de plusieurs milliers



d'années selon les autres modèles. Ceci traduit qu'on est en présence d'une eau très ancienne et qu'on est entrain d'épuiser une ressource stratégique, qui pouvait être utilisée dans un cas extrême, ce qui risque de mettre à mal l'alimentation en eau potable de la ville.

Le forage 380/51, captant les eaux de l'aquifère Turonien et qui alimente en eau potable le village de Si Ahmad ou Hmad (5 000 habitants), se trouve dans la même situation. Ce forage a un âge radiocarbone supérieur à 20 000 ans quelque soit le modèle utilisé, indiquant par là également le faible taux de renouvellement de l'aquifère Turonien.

L'activité actuelle en carbone 14 (autour de 70 %) de la source Aghbalou qui sourde de l'aquifère Barrémien-Aptien, alimentant en eau potable et abreuvant cheptel d'une population de 10 000 habitants, avec un débit de 30 l/s, présente une teneur en tritium inférieure à 2 UT. Son alimentation est donc antérieure aux essais nucléaires et son âge radiocarbone est de quelques centaines d'années quelque soit le modèle.

La source Igounitene, captant les eaux du Portlandien-Berriasien avec un débit de 0,5 l/s, présente une activité en carbone 14 également autour de 70 % et une teneur en tritium inférieure à 2 UT. Son alimentation est donc antérieure aux essais nucléaire et son âge radiocarbone est de quelques centaines d'années.

Enfin, la datation des eaux de l'aquifère turonien, qui a montré que certaines pouvaient être très anciennes, doit être absolument prise en compte dans la gestion de cet aquifère et les projets futurs d'aménagement.

## CONCLUSION

L'alimentation en eau potable de la ville d'Essaouira et des agglomérations rurales avoisinantes est basée essentiellement sur les eaux souterraines, notamment celles de la nappe plio-quadernaire. Cette dernière est soumise à plusieurs contraintes. Peu profonde, elle est





d'une part, très sensible aux épisodes de sécheresse, qui sont très répandues au Maroc, la plus sévère est celle de 1995 dont les effets sont encore ressentis.

Il en ressort un risque de pénurie d'eau à court terme pour la ville d'Essaouira, d'autant plus que le taux de recharge est faible pour la nappe turonienne profonde. Toutefois, si le contexte de sécheresse des années passées revient, comme le laisse entrevoir la tendance mondiale actuelle, les pouvoirs publics n'auront d'autres alternatives qu'au recours aux ressources non conventionnelles, notamment le dessalement des eaux de mer.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bahir M., Mennani A., Jalal M., et Youbi N. (2000) : Contribution à l'étude des ressources hydriques du bassin synclinal d'Essaouira ( Maroc). Estudios Geologicos, Vol 56 (3-4), septembre 2000, pp. (185-195).
- Bahir M., Jalal M. et Blavoux B. (2001) : Isotops and water resources in the arid and semi-arid area, exemple of Essaouira (Morocco). SWICA 2001, Essaouira, Maroc.
- Bahir M., Jalal M., Mennani A., et Laftouhi N.E. (2001) : Potentialités hydrogéologiques du synclinal de Kourimat ( Bassin synclinal d'Essaouira, Maroc). Estudios Geologicos, Vol 56 (5-6), septembre 2001, pp (47-52).
- Bahir M., Mennani A., Jalal M. et Fakir Y. (2002) : Impact de la sécheresse sur les potentialités hydriques de la nappe alimentant en eau potable la ville d'Essaouira (Mogador, Maroc). Revue Secheresse, Mars 2002, pp (13-19) FRANCE.
- Mennani A., Blavoux B., Bahir M., Bellion Y., Jalal M. et Daniel M. (2001) : Apports des analyses chimiques et isotopiques à la connaissance du fonctionnement des aquifères plio-quadernaire et turonien de la zone synclinale d'Essaouira (Maroc occidental). Journal of African Earth Sciences, Vol. 32/4, pp (819-835), septembre 2001.
- Jalal M., Blavoux B., Bahir M., Bellion Y., Laftouhi N.E., Puig J.M., Mennani et Daniel M. (2001).: Etude du fonctionnement du système aquifère karstique Cénomano-Turonien de l'oued Igrounzar (Bassin d'Essaouira, Maroc). Journal of African Earth Sciences, Vol. 32/4, pp (803-817), septembre 2001.
- Bahir M., Jalal M. et Mennani A. (2001) : Pollution nitratée des eaux souterraines du bassin synclinal d'Essaouira. Journal of Environmental Hydrology, *Electronic journal of the International Association for Environmental Hydrology, Paper 18, Volume 9, pp(1-9) 2001.*
- Fekri, A. 1993. Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrogéochimique de la zone synclinale d'Essaouira (Bassin synclinal d'Essaouira). Thèse 3ème cycle, Marrakech, 172p.
- Craig, H. 1961. Standarts for reporting concentration of deuterium and oxygene 18 in natural waters . Science, 133, 1833-1834.

