

Contamination saline dans les eaux souterraines de la plaine d'Akkar au Liban**

SALINE CONTAMINATION IN GROUNDWATER OF AKKAR PLAIN IN LEBANON

HALWANI JALAL ¹, OUDDANE BAGHDAD ², CRAMPON NORBERT ³
et WARTEL MICHEL ²

(1) Université Libanaise. Faculté de Santé Publique, Section 3, B. P. 246, Tripoli, Liban. E-mail: jhalwani@ul.edu.lb - Tel: 00 961 3 674 817 – Fax: 00 961 6 436 741.

(2) Université des Sciences et Technologies de Lille. Laboratoire de Chimie Analytique et Marine, (UPRESA CNRS 8013, FR CNRS 1818), Bâtiment C8 - 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France. E-mail: Baghdad.Ouddane@univ-lille1.fr

(3) Professeur émérite à l'Université d'Artois, membre du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France. Tel: 00 33 3 21 01 03 00 - Fax: 00 33 3 21 68 49 57

(Article reçu le 2 novembre 2001, accepté le 4 février 2002)

** Ce travail a été effectué dans le cadre du programme franco-libanais CEDRE

Résumé

La salinité des eaux souterraines de la partie nord-ouest de la plaine d'Akkar au Liban du Nord constitue un aspect de la dégradation de la qualité des eaux utilisées dans la consommation humaine et en irrigation. Cette contamination vient s'ajouter à la pollution microbiologique et à la teneur excessive des nitrates dépassant les seuils autorisés. Afin de déterminer l'ampleur de cette intrusion saline, les raisons de cette contamination dans la nappe alluviale de cette plaine côtière et les solutions possibles pour mettre fin à cette situation, la conductivité électrique de 94 puits de cette plaine a été suivie durant quatre années consécutives (de 1997 à 2000), 46 échantillons ont subi des analyses chimiques approfondies. Les valeurs obtenues ont été utilisées pour identifier les villages atteints et ont permis une zonation hydrogéochimique de l'aquifère de la plaine côtière en fonction de différents types d'eaux. L'évolution de la conductivité durant ces quatre dernières années montre une tendance à la croissance de la salinité dans les eaux souterraines mettant en danger l'agriculture, l'économie de la région et la santé des habitants. Les raisons de cette salinité seraient dues à la non conformité des salines du village de Cheikh Zennad, au pompage intensif des puits de la région, à l'excavation du sable et des cailloux le long de la côte de Cheikh Zennad et au déversement spontané des eaux thermales d'Es-Sammaqyé dans les champs. Des solutions sont proposées pour faire face aux besoins croissants de la région en eau et pour retrouver une meilleure qualité de la nappe côtière.

Mots clés: Liban, Eau souterraine, Intrusion saline, Aquifères, plaines côtières.

Abstract

The Akkar plain is situated in the north of Lebanon, its surface area is about 110 km², and approximately 130 000 people lived in this region. It is the second agricultural area and the largest coastal plain of Lebanon. The coastal plain is undulating, mixed fluvial and marine Quaternary deposits, mostly in the north, while Neogene marly limestones are more dominant in the south.

The inhabitants of the area live under deplorable hygiene conditions due to their poverty and the lack of both medical care and medical prevention centers. Moreover, there is no public networks of sewers and drinking water. Population, industries and farmers use private wells for their daily requirements of waters. Wastewaters are discharged directly in the environment without proper treatment.

A water quality study performed since 1997 reveals a significant microbiological pollution, a very serious contamination by nitrates, and an excess salinity problem. Since the eighties, the population started to live with saline water without any intervention of the public authorities. The inhabitants continued to consume brackish water without realizing the impending medical risks and despite of the occurrence of gastro-enteric diseases and cardiovascular disorders.

The study on the origin and the evolution of saline contamination were conducted during the period of 1997-2000. Ninety four accessible private wells covering the entire area were monitored with conductivity measurements and chemical analyses. This survey is used to locate primary sources of salinity contamination in the coastal aquifer. The results allowed a hydrogeochemical zonation of the aquifer, based on the presence of various types of water. The evolution of conductivity during the last four years showed an increase in the groundwater salinity.

The saline intrusion noted in the coastal aquifer is mainly due to four factors:

1 - The non-conformity of the salt marshes at the entry of the village of Sheikh Zennad. Two years after the construction of these salines in 1968, salted water have been stated by the population.

2 - The coastal aquifer of the plain was overexploited during the last years to ensure an agricultural activity in the area. This overexploitation generated the development of several depression to more than 30 meters under the sea level.

3 - In the absence of public authorities during the civil war (1976-1992), people excavated illegally sand and stones along the coast of Sheikh Zennad village. The excavated shoreline extends on 2 km length and 500 m width. This artificial modification of the shoreline increased by about 500 m of natural interface between fresh water and seawater.

4 - In 1965, an artesian well to approximately 650 m depth was done in Es-Sammaqiye village. At 575 m depth, a brackish hot sulphur water spouts out spontaneously with a flow of 60 litres/seconde. A spa center was built in Al-Arida village on the littoral located at approximately 3 km from the well. With the beginning of the tragic events in 1975, the project was stopped and the well was condemned. But, water continue to leak at several places along the pipe especially in Es-Sammaqiye village. This brackish water undoubtedly reached the water table and contribute to increase its salinity.

The use of brackish groundwater for both agricultural needs and human consumption is not recommended, so it is urgent to find a solution to this problem.

To stop the harmful consequences of saline water consumption, some decisions must be taken rapidly, such as :

- prohibition of non-conform salines in the area ;
- construction of water supply networks in the plain ;
- creation of a hydraulic barrier at the seawater and fresh water interface. This can be created by fresh water injection (artificial recharge) ;
- monitor the water quality and the evolution of the hydrological parameters ;
- management of groundwater exploitation ;
- declare a moratorium on the exploitation of all wells during at least 5 years to allow the return to a better quality of the groundwater in the coastal aquifer.

Key Words: Lebanon, Groundwater, Saline intrusion, Aquifers, Coastal plains.

INTRODUCTION

Située à l'extrême nord du Liban, la plaine d'Akkar s'étend sur environ 110 km², avec une population près de 130000 personnes réparties sur 60 villages ou hameaux. C'est la deuxième région agricole du Liban, c'est aussi la plus grande plaine côtière du pays. Les habitants de la région vivent dans des conditions d'hygiènes déplorables dues à leur pauvreté, à l'absence de couverture sociale, et au manque de centre de prévention sanitaire. De plus, il n'existe pas dans la plaine de réseaux d'assainissement et de distribution d'eau potable à l'exception de la ville de Halba (chef lieu de l'agglomération d'Akkar). La population, les industries et les agriculteurs ont recours à des puits privés pour leurs besoins quotidiens en eau ; les eaux usées sont déchargées dans des fosses non septiques ou directement dans les cours d'eau (METAP, 1995).

La plaine a fait l'objet d'études diverses par Guerre (1969), le Programme des Nations Unies pour le Développement (1970) et la FAO (1970) dans le cadre de développement agricole de la région en collaboration avec le Ministère des Ressources Hydrauliques et Electriques au Liban. Selon ces études, la plaine

d'Akkar est caractérisée par un climat méditerranéen modéré sec humide en été et reçoit une lame d'eau de 750 mm par an avec des températures mensuelles moyennes de 25 °C en été et 12 °C en hiver avec une valeur d'évapotranspiration ET_0 de 193 mm calculée durant la période de mai à septembre. Trois rivières traversent la plaine, deux d'entre elles alimentent la nappe : Nahr Arqa et Nahr Al-Oustouène, la troisième est drainante : Nahr Al-Kabir longe la frontière libano-syrienne.

Dans cette plaine d'Akkar, ce sont essentiellement les eaux souterraines contenues dans les formations récentes, qui sont sollicitées, tant pour l'irrigation que pour l'alimentation en eau potable. La qualité chimique et microbiologique des eaux souterraines utilisées dans la consommation humaine (Halwani, 1998), met en évidence une pollution microbiologique importante (63 %), une contamination très forte par les nitrates dont la teneur est supérieure à 50 mg/l dans 86 % des échantillons et une salinité excessive dans le secteur le plus occidental proche du littoral. Depuis les années 80, la population a consommé une eau salée sans aucune intervention pour y remédier, les habitants ont consommé de plus en plus d'eau saumâtre sans se rendre compte des risques sanitaires qu'ils encouraient et ce malgré l'apparition de maladies gastro-entériques et de troubles cardio-vasculaires.

Il est important de tenter de comprendre l'origine de la contamination saline dans l'aquifère de la plaine d'Akkar, en vue de proposer des solutions permettant de mettre fin à cette contamination en retournant à l'état d'équilibre naturel de la nappe. Une attention particulière sera portée sur les conséquences néfastes de cette situation sur la santé humaine, l'agriculture, l'environnement et l'économie de la région.

LES AQUIFERES ET NAPPES DE LA PLAINE D'AKKAR

Les formations mésozoïques des Monts du Liban du Nord, essentiellement jurassiques et crétacées, et en grande majorité calcaires, plongent vers le Nord-Ouest et l'Ouest sous la plaine d'Akkar. L'orogénèse alpine des Monts du Liban, principalement à la fin de l'Oligocène, mais qui s'est poursuivie par un rajeunissement des reliefs à la fin du Miocène, a repoussé la mer à l'Ouest du domaine côtier actuel. Une succession de transgressions et de régressions est à l'origine du remplissage actuel de la plaine d'Akkar, dont les plus anciens sont d'âge vindobonien. À la fin du Vindobonien, la régression permet des dépôts épais de matériaux grossiers interstratifiés et de dépôts lacustres dans les zones basses. Au Plaisancien, la mer revient dans la partie occidentale où elle dépose des marnes sableuses. Le Villafranchien est caractérisé par des conglomérats et des travertins qui affleurent au débouché du Nahr Arqa dans la plaine d'Akkar (Hoszowski, 1999). En même temps que se produisaient les plissements alpins des Monts du Liban, le volcanisme s'est réveillé au début du Miocène (aucune manifestation n'avait eu lieu depuis l'Aptien) et a persisté jusqu'à une période tardive du Quaternaire (Dubertret,

1955), donnant lieu à des larges coulées et entablements de brèches basaltiques, coulées et dépôts volcano-sédimentaires qui s'interstratifient ainsi dans les formations de remplissage de la plaine d'Akkar (figure 1).

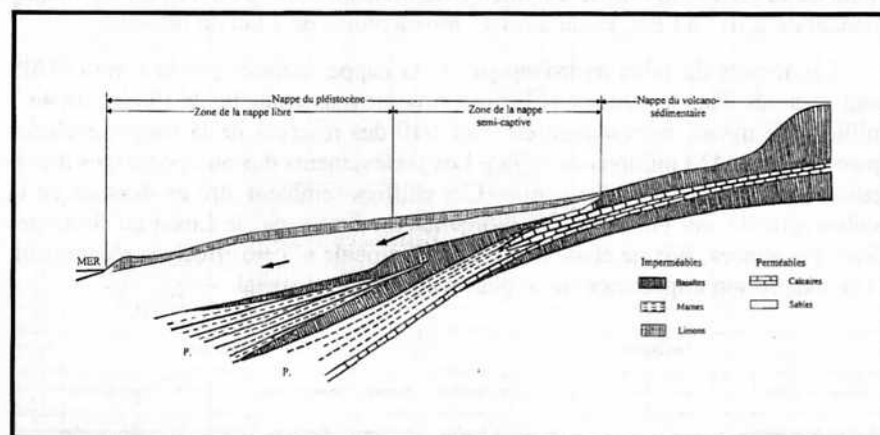


FIGURE 1.— Recharge de la nappe pléistocène (P.) par la nappe du volcano-sédimentaire plaisancien.

Refill of Pleistocene aquifer (P.) by volcano-sedimentary plaisancien aquifer.

Les calcaires crétacés des Monts du Liban sont très aquifères. Il semblerait qu'ils conservent, au moins encore partiellement cette propriété en profondeur sous les dépôts cénozoïques du bassin d'Akkar, puisque des eaux thermales (37 °C), ont été mis en évidence par un puits artésien à Es-Sammaqiyyé en 1965. Le complexe cénozoïque profond (formations miocènes à pliocènes) du bassin, avec ses multiples variations latérales de faciès et d'épaisseur, renferme plusieurs formations aquifères de faible épaisseur, compris entre des assises imperméables telles que basaltes altérés, marnes crayeuses ou argiles. Les eaux souterraines sont sous pression, captives ou semi-captives, dans ces aquifères profonds qui peuvent communiquer entre eux par endroit et même parfois communiquer avec l'aquifère plus superficiel des assises plio-quadernaires. Les dernières formations aquifères sont constituées par des dépôts gréseux et calcaires du Quaternaire marin séparés par des alluvions et des colluvions argilo-caillouteuses, l'ensemble ayant une cinquantaine de mètres d'épaisseur en moyenne.

L'hétérogénéité de cet ensemble aquifère multicouche ne remet pas en cause l'unicité de la nappe qui y est contenue. Toutefois le comportement hydrogéologique est différent à l'amont (Est) et à l'aval (Ouest) de la plaine d'Akkar. À l'Est, la nappe est semi-captive, les eaux circulant à travers des sables et limons d'une dizaine de mètres d'épaisseur, intercalés entre des basaltes altérés et un toit argileux. La nappe est alimentée par des eaux traversant les formations volcano-sédimentaires du Plaisancien. À l'aval, la nappe devient libre dans un aquifère plus épais qu'elle ne sature pas totalement. Le Nahr Arqa et le Nahr Al-Oustouène contribuent largement à sa recharge.

Globalement l'écoulement de cette nappe du Plio-Quaternaire s'effectue d'Est en Ouest, vers la mer, marqué par le caractère drainant du Nahr Al-Kabir. Les caractéristiques hydrodynamiques ont été déterminées en quelques points épars de la plaine (moins de 25 valeurs de transmissivité pour 110 km²), s'échelonnant de 2.10⁻⁶ à l'Est, jusqu'à 6.10⁻² m²/s à moins de 1 km du littoral.

Les termes du bilan hydrologique de la nappe, estimés par la FAO (1970), sont résumés dans le tableau 1. Les apports moyens annuels, de l'ordre de 44.7 millions de m³/an, représentent environ 1/10 des réserves de la nappe, évaluées quant à elles à 430 millions de m³/an. Les prélèvements dus aux pompages d'irrigation prédominent dans les sorties. Ces chiffres semblent être en dessous de la réalité actuelle, car en raison des difficultés traversées par le Liban au cours des dernières années, aucune étude hydrologique globale n'a été effectuée récemment, et ce malgré son importance sur le plan économique et social.

ENTREES		SORTIES	
Recharge par la pluie	16.5 millions de m ³ /an	Pompages (surtout irrigation)	20 millions de m ³ /an
Recharge par les rivières	10.7 millions de m ³ /an	Drainage par Nahr El-Kabir	11.5 millions de m ³ /an
Écoulement souterrain	6.0 millions de m ³ /an	Écoulement souterrain vers la mer	13.2 millions de m ³ /an
Débites restitués des pompages	5 millions de m ³ /an		
Débites restitués des irrigations par les eaux de surface	6.5 millions de m ³ /an		
Apport moyens annuels à la nappe	44.7 millions de m ³ /an		44.7 millions de m ³ /an

TABLEAU 1.- Bilan hydrologique de la nappe de la plaine d'Akkar d'après FAO (1970).
Hydrology balance of Akkar plain aquifer (FAO 1970).

MATÉRIEL ET MÉTHODES
D'INVESTIGATION HYDROCHIMIQUE

Pour étudier l'évolution de la contamination saline durant les quatre dernières années (1997, 1998, 1999 et 2000), et en l'absence de forages publics, 94 puits privés accessibles et répartis sur toute la région ont été observés chaque année au mois d'avril. Les principaux renseignements relatifs aux puits sont donnés dans le tableau 2. Parmi ces puits, 46 d'entre eux ont été choisis en tant que puits-témoins et ont subi une analyse chimique en 1998.

Les mesures de la conductivité électrique et du pH ont été réalisées sur place. Nous avons choisi de suivre l'évolution de la conductivité car elle est un excellent indicateur de la minéralisation qui reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous. Le dosage des métaux majeurs et traces (Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Si, Zn) a été effectué par spectrophotométrie d'émission atomique ICP (Inductively Coupled Plasma) à l'aide d'un spectrophotomètre à torche de plasma Varian Liberty Série II (observation axiale). Les étalons pour les

Zone A

N°	Site	Coordonnées géograph. X	Distance mer (m)	Prof.	Lieu	pH	Cond. 2000	Cond. 1999	Cond. 1998	Cond. 1997
4	Cheikh Zennad 1	295.4	300	10 m	Garage	7.13	3.95	3.68	3.37	3.72
5	Cheikh Zennad 2	295.4	250	23 m	Habitation	8.58	7.86	7.20	6.88	7.23
6	Cheikh Zennad 3	296	200	6 m	Habitation	6.89	14.3	14.1	13.3	14.6
7	Cheikh Zennad 4	296	200	6 m	Habitation	6.65	9.12	8.35	7.38	8.45
8	Cheikh Zennad 5	296.2	250	8 m	Habitation	6.83	7.16	6.60	6.01	6.58
9	Tall Farès - P3	297	1100	25 m	Champ	6.61	6.52	5.45	4.38	3.90
10	El-Arida 1	299	100	10 m	Frontières	7.18	7.02	6.17	5.43	5.71
11	El-Arida 2	299.2	400	8 m	Habitation	7.21	4.23	3.85	3.02	4.02
12	Es-Sammaqiye 1	299.2	2700	15 m	Habitation	7.59	5.23	4.70	4.08	4.98
13	Es-Sammaqiye 2	299.2	2800	10 m	Habitation	6.69	3.26	2.31	1.70	2.89
14	Es-Sammaqiye 3	298.5	3200	10 m	Habitation	7.26	2.26	1.80	1.42	1.95
30	El-Khirbé 1	294.2	3000	13 m	Habitation	6.85	3.14	2.25	1.96	2.15
33	Hay El-Bahar 1	290.5	200	13 m	Habitation	6.99	3.59	2.53	2.34	2.45
34	Cheikh Zennad 6	295	100	6 m	Saline	7.10	7.64	6.50	4.72	6.00
35	Es-Sammaqiye 4	298.7	2600	10 m	Makam	6.93	2.76	2.19	1.97	2.05
36	Es-Sammaqiye 5	298.8	2650	40 m	Champ	6.81	3.12	2.50	2.05	2.36
37	El-Arida 3	299.2	1400	15 m	Habitation	6.89	3.14	2.50	2.17	2.66
38	Cheikh Zennad 7	296.1	100	8 m	Plage	7.22	5.34	4.35	3.60	4.29
39	Cheikh Zennad 8	295.3	1000	10 m	Champ	6.96	9.23	8.50	7.29	9.00
40	Tall Bibi 1	297.2	2400	10 m	Champ	7.09	2.25	1.90	1.60	1.85
47	Cheikh Zennad 9	296.1	150	6 m	Habitation	6.84	12.85	12.25	13	12.1
48	Tall Farès P2	297.5	1000	25 m	Champ	6.94	6.35	5.48	4.19	2.30
49	Tall Farès P1	297.6	1000	25 m	Champ	7.10	6.45	5.55	4.95	2.00
50	Al-Arida 4	298.8	100	20 m	Centre	7.20	2.95	2.15	1.58	1.75
51	Hay Al-Bahr 2	291.5	150	40 m	Habitation	7.21	2.25	2.08	1.65	2.03
52	Hay Al-Bahr 3	291.5	150	20 m	Habitation	7.1	2.36	2.15	1.78	1.85
57	Al-Arida 5	299	100	7 m	Douane	7.32	6.24	5.03	4.21	5.23
58	Tall Bibi 2	297	2450	20 m	Habitation	7.72	2.49	1.95	1.55	2.29
63	El-Qlaiaat 4	293.8	2800	6 m	Habitation	6.76	2.86	2.25	1.57	2.15
65	Hay El-Bahar 7	290.5	150	8 m	Habitation	6.98	4.15	3.12	2.35	3.57
66	Cheikh Zennad 10	296.1	150	8 m	Habitation	6.78	7.50	5.95	4.50	5.68
67	Tall Farès - P5	298	200	15 m	Habitation	7.30	8.55	7.50	6.50	7.91
93	Tall Bibi 3	297	300	40 m	Champ	7.23	4.12	3.24	2.54	3

Zone B

N°	Site	Coordonnées géograph. X	Distance mer (m)	Prof.	Lieu	pH	Cond. 2000	Cond. 1999	Cond. 1998	Cond. 1997
15	Hakr Al-Dahr 1	298	4300	20 m	Habitation	6.89	1.86	1.45	1.16	1.52
16	Hakr Al-Dahr 2	298	4300	25 m	Habitation	7.07	1.25	1.15	1.15	1.58
17	Hakr Al-Dahr 3	297.8	4500	40 m	Champ	7.26	1.06	0.88	0.86	1.01
18	Al-Massaoudia 1	295	5900	30 m	Habitation	7.00	1.35	1.15	0.95	1.22
19	Al-Hisah 1	294.5	7000	30 m	Habitation	7.16	1.38	1.05	0.84	0.95
20	Al-Hisah 2	293.5	6400	30 m	Garage	7.05	1.37	1.06	0.85	0.98
21	Al-Hisah 3	293.2	4800	30 m	Champ	7.09	1.55	1.28	1.08	1.15
22	Tell Hayat 1	293	4000	20 m	Dispensaire	7.16	1.34	1.12	1.01	1.06
23	Tell Hayat 2	291	1000	25 m	Habitation	6.93	1.39	1.07	0.84	1.02
24	Haret Al-Jadidet 1	290.5	400	10 m	motorisé	6.97	1.31	1.05	0.93	1.15
29	Tell Maayaan 1	294.9	4800	32 m	Habitation	6.77	1.69	1.23	1.09	1.18
31	El-Qlaiaat 2	293.8	2800	10 m	Habitation	6.75	2.18	1.95	1.78	1.82
32	El-Qlaiaat 3	293.2	2500	20 m	Habitation	6.90	1.76	1.25	1.03	1.15
41	El-Kneissé	297.2	3700	16 m	Habitation	7.04	1.95	1.75	1.67	1.57
42	Tell Maayaan 2	295.1	4800	45 m	Champ	7.10	1.55	1.25	1.05	1.15
43	Tell Abbas Chariki	294	8400	45 m	Ecole	7.43	1.02	0.89	0.78	0.83
44	Tal Andi 1	296	8400	60 m	Champ	7.23	1.23	1.00	0.89	0.98
45	Qaabrine 1	291.5	4000	35 m	Champ	7.12	1.29	1.05	0.84	0.88
46	Roumoul	292	1000	30 m	Usine	7.10	1.38	1.25	1.24	1.04
53	Hay Al-Bahr 4	291.5	150	40 m	Garage	7.1	1.86	1.65	1.02	1.15
54	Hay Al-Bahr 5	291.5	200	11m	Habitation	7.1	1.73	1.55	0.93	1.03

55	Hay Al-Bahr 6	291.5	100	23 m	Habitation	7.07	2.10	1.70	1.15	1.28
56	Tall Farès- P4	296.7	2500	40 m	Champ	7.59	1.36	1.05	1.01	0.81
59	Tell Maayaan 3	295	4800	36 m	Champ	6.91	1.63	1.35	1.03	1.2
60	Tell Maayaan 4	295	4800	25 m	Habitation	6.78	1.62	1.35	1.01	1.54
61	Tell Maayaan 5	295	4800	40 m	Champ	6.84	1.95	1.68	1.15	1.86
62	El-Khirbé 2	294.2	3000	40 m	Champ	6.86	1.76	1.55	1.09	1.63
64	Tell Hayat 3	291.5	1300	50 m	Champ	6.89	1.54	1.38	0.95	1.39
69	Haret Al-Jadidet 2	291	300	25 m	Ecole	7.08	1.95	1.71	1.56	1.80
70	Hay El-Bahar 8	290.5	150	15 m	Habitation	7.01	1.54	1.23	1.20	1.15
71	Es-Sammaqiye 6	298.8	2700	8 m	Habitation	7.23	1.95	1.72	1.50	1.42
72	Al-Massaoudia 2	295.2	6000	25 m	Habitation	7.33	1.24	0.96	0.90	1.04
83	Tal Andi 2	296.6	8450	38 m	Habitation	7.25	1.35	1.19	1.08	1.15
84	Tell Biré 1	298	7000	60 m	Habitation	7.44	1.20	0.98	0.86	0.88
85	Tell Biré 2	297.8	7050	38 m	Habitation	7.29	1.35	1.21	1.12	1.16
86	Al-Massaoudia 3	295.3	6050	30 m	Habitation	7.32	1.15	1.00	0.85	0.89
87	El-Qlaiaat 5	293.5	2550	10 m	Habitation	6.85	1.53	1.31	1.12	1.20
88	Tell Hayat 4	292	1350	50 m	Champ	7.36	1.19	1.01	0.95	0.97
89	Tell Hayat 5	292.5	1350	50 m	Champ	7.30	1.17	1.02	0.95	0.99
90	Tell Hayat 6	293	1400	50 m	Champ	7.32	1.23	1.10	1.00	1.05
91	Tell Hayat 7	293.2	1450	50 m	Champ	7.33	1.25	1.11	1.01	1.06
92	Tell Abbas Gharbi	293.8	8000	47 m	Habitation	7.24	1.36	1.22	1.05	1.18

Zone C

N°	Site	Coordonnées géograph. X	Distance mer (m)	Prof.	Lieu	pH	Cond. 2000	Cond. 1999	Cond. 1998	Cond. 1997
1	Qoubet Chamra 1	288	300	35 m	Ecole	7.57	0.91	0.83	0.73	0.83
2	Qoubet Chamra 2	288.5	100	20 m	Champ	7.48	1.24	1.15	0.72	0.83
3	El-Qlaiaat 1	294	2400	40 m	Caserne	7.63	1.23	1.13	0.61	0.72
25	Al-Aabdah 1	286.5	150	30 m	Fontaine	6.82	1.25	1.01	0.98	0.95
26	Borj Al-Arab	287	2600	22 m	Garage	6.92	0.82	0.75	0.75	0.77
27	Ransié	287	4000	50 m	Garage	7.06	0.80	0.72	0.78	0.74
28	El-Mhammara 1	286	500	12 m	Garage	7.08	1.64	1.20	1.07	1.15
68	Al-Aabdeh 2	286	150	15 m	Habitation	7.04	1.23	1.04	0.95	1.05
73	Cheikh Ayyach	298	9150	-	Source	7.27	0.95	0.74	0.66	0.70
74	Al-Aabdeh 3	286.7	200	45 m	Centre agricole	7.73	1.03	0.85	0.75	0.81
75	Bebnine	285	1500	10 m	Habitation	7.06	1.12	0.90	0.80	0.88
76	Arka	287.5	4400	50 m	Fontaine	7.6	0.90	0.71	0.70	0.69
77	El-Mhammara 2	288	550	40 m	Habitation	7.70	0.95	0.85	0.80	0.84
78	Al-Kouaikhah	292.2	9100	20 m	Habitation	7.29	0.98	0.85	0.80	0.82
79	Koucha	291	9500	60 m	Fontaine	7.66	1.14	0.99	1.05	0.98
80	Qaabrine 2	292.5	4050	40 m	Champ	7.33	1.01	0.90	0.84	0.87
81	Qaabrine 3	293.5	4100	30 m	Habitation	7.30	1.15	1.02	0.88	0.98
82	Qaabrine 4	294	4150	30 m	Habitation	7.32	1.15	0.94	0.85	0.84
94	Halba 1	288.8	9000	100 m	Habitation	7.71	0.81	0.79	0.75	0.74

TABEAU 2.- Principaux renseignements sur les échantillons prélevés et mesure du pH et de la conductivité électrique en mS/cm.
Main information concerning samples & pH and electrical conductivity measures.

différents métaux ont été préparés à partir de solutions mères (titrisol, Merck) et d'eau ultra pure issue d'un système Millipore (Milli-Q plus). Les anions (Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) ont été déterminés suivant les normes françaises AFNOR, 1995).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats d'analyses obtenus sont donnée dans les tableaux 2 et 3. À partir des valeurs de conductivité, nous avons réparti les eaux souterraines de la plaine d'Akkar en 3 zones (figure 2):

Zone A: $CE > 1.9$ mS/cm, ces résultats correspondent aux villages situés dans la partie nord-ouest de la plaine qui s'étend du village Hay El-Bahar sur le littoral, jusqu'à Al-Arida et regroupe les villages Es-Sammaqiye, El-Kneissé, Tall Bibi et Al-Khirbé. La situation est dramatique à Cheikh Zennad où les valeurs de la conductivité électrique atteignent 12 mS/cm à certains endroits. Les eaux souterraines de cette partie sont saumâtres (chlorurées sodiques) et présentent une conductivité très élevée qui se traduit par une salinité très importante.

Zone B: $1.2 < CE < 1.9$ mS/cm, on peut classer dans ce groupe la région qui enveloppe la première, et regroupe les villages Haret Al-Jadidet (sur le littoral) Hakr Al-Dahr (au bord de la rivière Al-Kabir), Al-Massaoudia, Tell Biré, Tal Andi (à l'Est), Tell Maayaan, Tell Hayat, Al-Hisah, El-Qlaiaat et Tel Abbas Gharbi. Dans cette zone les eaux ont un faciès chloruré-calco-sodique, la minéralisation est très accentuée et se situe à la limite de la potabilité. La salinité semble diminuer en allant vers l'intérieur de la plaine en direction de l'Est.

Zone C: $CE < 1.2$ mS/cm, sont regroupées dans cet ensemble les villages de la plaine situés à l'est et au sud de la zone B qui s'étendent du village El-Mhammara (à l'entrée sud de la plaine) jusqu'à Qoubet Chamra (au nord), Qaabrine et Cheikh Ayyache (aux frontières). Les valeurs de la conductivité sont conformes aux normes internationales des eaux destinées à la consommation humaine et pour l'irrigation. Le faciès de ces eaux est chloruré-calco-sodique bien équilibré.

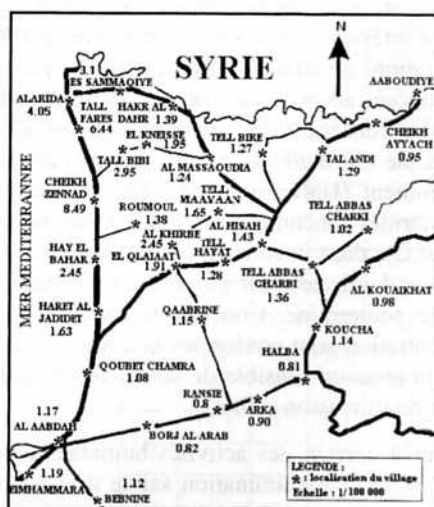


FIGURE 2.- Valeurs moyennes de la conductivité de l'année 2000 des eaux souterraines des villages de la plaine d'Akkar.

Average values of 2000 year electrical conductivity of groundwater of Akkar Plain villages.

The graph illustrates the change in water conductivity over a four-year period for various samples. Most samples show relatively stable, low conductivity levels. However, a subset of samples, particularly those labeled with 'Al-' or 'Tef', show a sharp increase in conductivity starting around 1998, with the most pronounced increases seen in 2000 for samples like Al-Jadida and Chirak Zennar.

Evolution of Electrical Conductivity of Akkar Plain groundwater from 1997 to 2000.

Après enquête sur le terrain, les activités humaines dans la région d'Akkar paraissent responsables de la contamination saline de l'aquifère côtier de quatre façons différentes :

Après enquête sur le terrain, les activités humaines dans la région d'Akkar paraissent responsables de la contamination saline de l'aquifère côtier de quatre façons différentes :

Zone A

N°	Localisation / Élément	Ba ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	H ₂ SiO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
	Unité	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	C.M.A	100	150	500	12	50	-	200	-	50
4	Cheikh Zennad 1	44.1	293	231	13.7	73.9	13.5	-	-	-
5	Cheikh Zennad 2	143.0	1186	492.6	26.8	87.4	10.6	-	-	-
6	Cheikh Zennad 3	160.5	2315	500.8	66	89.6	10.8	4310	329	130
7	Cheikh Zennad 4	157.4	812	506.8	20.8	83.4	12.6	-	-	-
8	Cheikh Zennad 5	113.1	768	505.1	20.6	83.2	12.5	1536	338	95
9	Tall Farès - P3	81.1	355	300.8	3.0	80.2	11.3	1100	317	106
10	El-Arida 1	22.2	882	194.5	99.7	80.4	5.8	1552	293	142
11	El-Arida 2	12.6	416	87.2	126.8	56.9	8.0	-	-	-
12	Es-Sammaqiye 1	20.4	770	94.7	31.3	63.9	3.9	-	-	-
13	Es-Sammaqiye 2	79.5	134	59.3	40.7	32.1	11.5	-	-	-
14	Es-Sammaqiye 3	18.0	158	77.2	1.6	40.6	14.3	24	464	33
30	El-Khirbé	55.5	83	178.6	1.9	39.4	8.3	93	354	137
33	Hay El-Bahar	34.4	254	65.2	7.5	58.7	7.8	300	390	112
34	Cheikh Zennad 6	30.4	794	74.9	31.1	67.4	7.1	-	-	-
35	Es-Sammaqiye 4	38.8	124	75	6.3	61.8	9.4	-	-	-
36	Es-Sammaqiye 5	57.7	115	132.9	11.3	54.3	8.1	-	-	-
37	El-Arida 3	51.7	133	91.8	1.7	69.5	7.9	48	326	85
38	Cheikh Zennad 7	48.4	375	229.1	8.9	60.4	11.9	-	-	-
39	Cheikh Zennad 8	134.8	683	293.3	26.3	91.2	9.5	-	-	-
40	Tall Bibi 1	10.7	82	18.2	2.7	62.6	10.1	200	476	110

Zone B

N°	Localisation / Élément	Ba ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	H ₂ SiO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
15	Hakr Al-Dahiri 1	31.1	55	43.2	1.5	44.5	13.3	-	-	-
16	Hakr Al-Dahiri 2	16.9	42	52.6	0.8	53.1	13.1	-	-	-
17	Hakr Al-Dahiri 3	14.9	32	28.8	1.5	33.9	13.1	11	366	50
18	Al-Massaoudia 1	12.8	29	44.2	1.6	38.4	9.6	47	329	95
19	Al-Hisah 1	4.9	25	30	1.2	36.8	9.0	-	-	-
20	Al-Hisah 2	26.2	33	36.8	1.5	22.8	9.5	-	-	-
21	Al-Hisah 3	21.1	34	45.5	2.1	38.7	9.3	11	390	110
22	Tell Hayat 1	35.1	38	60.2	1.5	34.1	8.5	10	317	157
23	Tell Hayat 2	24.4	29	43.7	1.5	39.6	8.4	-	-	-
24	Haret Al-Jadidet	10.7	41	47.8	2.7	39.6	7.2	73	390	85
29	Tell Maayaan 1	17.7	34	34.1	7.7	46.6	15	-	-	-
31	El-Qlaiaat 2	61.7	66	141.8	32.1	45.8	6.7	178	362	36
32	El-Qlaiaat 3	29.6	36	57.4	2.3	39	8.6	-	-	-
41	El-Kneissé	21.9	73	57.5	2.4	63.4	10.7	-	-	-
42	Tell Maayaan 2	22.7	46	45.4	1.6	39.2	8.5	-	-	-
43	Tell Abbas Charki	0	6.7	73.6	0.94	45.9	10.3	-	-	-
44	Tal Andi	0	11.75	82.6	0.81	65.4	14.3	-	-	-

45	Qaabirine	0	7.94	77.8	0.81	32.5	9.2	-	-	-
46	Roumoul	40.3	49.1	124.1	1.7	33.5	7.4	-	-	-

Zone C

N°	Localisation / Élément	Ba ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	H ₂ SiO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
1	Qoubet Chamra 1	23.7	21	70.9	1.9	30.2	7.3	7	342	71
2	Qoubet Chamra 2	26.0	23	31.5	2.1	30.1	5.9	40	355	30
3	El-Qiaiaat 1	18.8	28	55.6	1.2	45.1	8.7	8	317	163
25	Al-Aabdeh 1	41.4	25	50.3	1.3	28.8	6.4	-	-	-
26	Borj Al-Arab	26.1	20	31.1	1.6	20.5	5.8	30	315	26
27	Ransié	13.8	21	35.6	1.4	25	6.9	40	322	45
28	El-Mhammara 1	57.5	24	77	1.5	25.6	6	-	-	-

TABLEAU 3.- Résultats des analyses ioniques des eaux prélevées.
Results of ionic analysis of waters sampled.

1 - À proximité immédiate du littoral, s'étendent des marais salants sur plus de 40 hectares à l'entrée du village de Cheikh Zennad, plus de la moitié des bassins étant aménagés sans imperméabilisation par rapport au terrain naturel. L'eau de mer est pompée avec un débit d'environ 130 m³/h, fonctionnant de façon continue durant 8 mois de l'année (de mars à novembre); la capacité de production de ces salines est estimée à 3500 tonnes par an. Étant donnée la nature du sol de la région, les eaux de mer s'infiltrant dans le sol atteignant la nappe et entraînent une augmentation sensible des teneurs en sels dans les eaux souterraines. Deux ans après la construction de ces salines en 1968, la population avait déjà commencé à déceler le goût salé de l'eau des puits. Depuis le début des événements en 1975, rien n'a pu être fait pour enrayer ou limiter cette contamination per descensum par les salines.

2 - L'aquifère de la plaine d'Akkar a été surexploité au cours des dernières années pour assurer une activité agricole dans la région et répondre à la demande de la population en eau de boisson. En l'absence de tout contrôle des services publics, il y a eu durant ces 25 dernières années, une augmentation anarchique du nombre de puits privés qui se sont ajoutés aux forages déjà présents sur le territoire. Le réseau public d'adduction étant quasiment inexistant, certains puits prélevaient de façon continue l'eau nécessaire aux besoins quotidiens. De plus, les prélèvements d'eaux souterraines opérés par les agriculteurs à la suite d'extension des surfaces irriguées, se sont largement accrus au cours des dernières années. Ces prélèvements irréguliers ont la particularité d'être riches en sels pour l'essentiel sur une période déterminée, d'avril à septembre, précisément au moment où la recharge efficace par les pluies est la plus faible sinon nulle. Cette surexploitation a engendré plusieurs cônes de rabattement de la nappe descendant à plus de 30 m sous le niveau de la mer, en raison de la profondeur des forages. Si en 1960, la quantité d'eau pompée était estimée à 20 millions de m³/an, elle est vraisemblable-

blement doublée actuellement. Or, un tel prélèvement risque fort d'inverser les relations entre la nappe et le Nahr El-Kabir d'une part, et de diminuer voire annihiler tout écoulement souterrain vers la mer (tableau 1) permettant alors à l'interface eau douce/eau salée de pénétrer plus avant dans les terres.

3 - Entre 1976 et 1992, des excavations non contrôlées ont été opérées le long de la côte de Cheikh Zennad, pour l'exploitation de sables et cailloux destinés à la construction. La partie excavée s'étend sur 2 km de longueur et 500 m de largeur, le tonnage exploité est estimé à une dizaine de millions de tonnes. Cette modification artificielle du rivage a nécessairement engendré une avancée équivalente (de l'ordre de 500 m) de l'interface naturelle d'équilibre entre l'eau douce de la nappe des alluvions quaternaires et l'eau salée d'origine marine, le gradient hydraulique de l'aquifère littoral est égal à 0.5 ‰. Malgré l'arrêt officiel en 1997 de ces opérations d'excavation, une poursuite clandestine de l'exploitation a pu être constatée. Aussi, plusieurs villages côtiers ont été inondés à plusieurs reprises par la mer lors de tempêtes hivernales et les embruns salés sont lessivés en raison de l'irrigation et s'infiltrant vers la nappe.

4 - En 1965, dans le but d'assurer un approvisionnement important en eau pour la plaine d'Akkar, il a été décidé d'opérer un forage artésien dans le village d'Es-Sammaqiyyé de 650 mètres de profondeur pouvant atteindre l'aquifère de crétacé. À 575 mètres de profondeur une eau chaude (37 °C) saumâtre (conductivité: 6.2 mS/cm) chargée en soufre a jailli de façon spontanée avec un débit de 60 litres/seconde. Un centre de thalassothérapie a été construit dans le village Al-Arida sur le littoral situé à environ 3 km de l'émergence du puits. Avec le début des événements tragiques au Liban en 1975, le projet a été abandonné et le puits a été condamné. Cependant, l'eau saumâtre continue toujours à se déverser à plusieurs endroits à proximité dans le village d'Es-Sammaqiyyé. Ces eaux ont sans doute atteint les eaux souterraines par infiltration et ont contribué à l'augmentation de la salinité.

Le phénomène de contamination saline, notamment par intrusion d'eau marine est un cas fréquent dans les aquifères littoraux, à titre d'exemple, Mania et al. (1985) l'ont étudié en Algérie, Lhadi et al. (1996) au Maroc, Karahanoglu (1997) en Turquie, Nowrroozzi (1999) aux Etats Unis, etc. Dans la majorité des cas étudiés, la contamination des eaux douces dans les aquifères littoraux par des intrusions d'eaux marines serait essentiellement due à l'exploitation mal maîtrisée des eaux souterraines par des pompages excessifs des puits durant les périodes non pluvieuses, provoquant un abaissement significatif des niveaux des nappes en inversant le gradient d'écoulement souterrain. Au Liban, Hashash et al. (1995), ont pu déterminer par des études isotopiques et géochimiques l'origine de la salinité des eaux de l'aquifère littoral de Sarafand (Sud Liban). Elle serait due à une contamination de l'aquifère crétacé par les formations quaternaires et non pas à une intrusion saline. Attalah et Abu Shekra (1970), Petrekian (1980) et Khair et al. (1994) ont observé une augmentation de salinité dans les eaux de puits de Beyrouth qui serait due à une intrusion saline à cause du pompage intensif opéré sans contrôle administratif depuis des dizaines d'années pour subvenir aux besoins croissants de la population.

Les conséquences de cette contamination peuvent être ressenties à long terme sur le plan sanitaire et en agriculture. En effet, en se basant sur les recommandations sanitaires internationales (OMS, 1993), les eaux souterraines des villages situés dans la zone A de la plaine, et en particulier à Cheikh Zennad, sont impropres à la consommation humaine; en l'absence du réseau public d'eau potable, des maladies très graves peuvent apparaître dans la population qui utilise cette eau souterraine pour la consommation domestique. En effet, en plus du goût salé, la présence excessive des chlorures de sodium dans l'eau peut être préjudiciable aux personnes atteintes de maladies rénales ou cardio-vasculaires (Pozet, 1993). L'ingestion chronique de fortes doses de sodium joue un rôle important dans le développement de l'hypertension chez les sujets prédisposés alors qu'une ingestion excessive de chlorure de sodium peut provoquer des vomissements. L'excès de sodium dans l'eau provoque une hyper natrémie, et concerne principalement deux catégories de sujets: les personnes atteintes de troubles cardiaques, vasculaires, hépatiques et rénaux qui doivent suivre un régime hyposodé et les nourrissons en raison de l'immaturité de leurs reins (Brucker, 1989).

Par ailleurs, l'eau souterraine de la plaine d'Akkar peut entraîner des dégâts aux cultures si elle est utilisée en agriculture; en effet, une eau supérieure à $1\,500\text{ }\mu\text{S/cm}$ est difficilement utilisable pour l'irrigation, les terrains irrigués par de l'eau chargée en sodium peuvent lentement s'imperméabiliser et subir une augmentation catastrophique du pH. De plus la présence excessive de chlorures dans l'eau entraîne des effets nuisibles sur la croissance de certains végétaux (Durand, 1983).

CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence l'hétérogénéité et la complexité réelles de l'aquifère de la plaine d'Akkar. Elle a permis de classer les zones de cette aquifère atteintes par une contamination saline et d'en déterminer les causes. L'utilisation des eaux souterraines pour les besoins agricoles et humaines est fortement déconseillée. Compte tenu des perspectives de développement socio-économique de la plaine d'Akkar (ré-aménagement de l'aéroport d'El-Qlaiaat en le transformant en une zone de commerce libre, construction d'une zone industrielle), il est urgent de trouver une solution au problème de l'approvisionnement en eau.

Dans le contexte actuel de difficultés rencontrées dans les eaux souterraines tant sur le plan qualitatif (impossibilité d'utilisation de captages privés pour l'alimentation en eau potable pour cause de pollution microbiologique, salinité élevée et contamination par les nitrates) que sur le plan quantitatif (surexploitation de la nappe et intrusion saline en bordure côtière), il faut mobiliser d'autres ressources en eau disponibles, notamment celles des plateaux d'Akkar qui sont abondantes et de meilleures qualités (Halwani et al., 1999). La construction d'un réseau public

d'adduction alimenté par ces eaux pour subvenir aux besoins de la population, en eau potable et au développement économique et sociale est une nécessité urgente.

Pour arrêter les conséquences néfastes dues à la contamination saline, des décisions doivent être prises rapidement au niveau de l'utilisation et la gestion de la ressource en eau souterraine. On devrait, par exemple :

- interdire le fonctionnement des salines non conformes dans la région ;
- gérer d'une manière stricte l'exploitation de la nappe souterraine en attendant la construction rapide de 3 réseaux d'eaux dans la plaine : eau potable, irrigation et assainissement et d'une station de traitement des eaux usées ;
- créer une barrière hydraulique qui pourrait être réalisée par injection d'eau douce (recharge artificielle) au moyen d'une série de puits ou forages disposés en ligne, parallèlement au rivage, à quelques centaines de mètres à l'intérieur des terres. Il ne faudrait pas toutefois accroître les pompages d'eau douce dans les puits existants et éviter d'en créer de nouveaux à proximité de cette barrière hydraulique. Cette technique a été utilisée avec succès dans des cas similaires notamment en Belgique sur le littoral de la mer du Nord et en France (Grillot, 1988) ;
- faire un suivi permanent de la qualité des eaux souterraines de manière à se renseigner sur l'évolution de l'ensemble des systèmes aquifères et des domaines hydrogéologiques situés dans la plaine d'Akkar, et tendre vers un équilibre hydrodynamique et hydrochimique plus satisfaisant ;
- déclarer un moratoire de tous les puits privés pendant au moins 5 ans pour permettre l'arrêt de la progression de la zone contaminée par le sel.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, (1995). Recueil des normes françaises, Eaux-Méthodes d'essai. Paris La Défense.
- Attalah N.J., Abu Shekra S.J., (1970). Sea Water Intrusion in a coastal Aquifer in Lebanon. American University of Beirut, Faculty of Agricultural Sciences, Lebanon, *Scientific Report N° 335*, 15 p.
- Brucker G., Fassin D., (1989). Santé publique. Editions Ellipses, Paris.
- Dubertret L., (1955). Géologie et peuplement au Liban. *Hannoun*, Beyrouth, pp. 11-20.
- Durand J.H., (1983). Les sols irrigables. Presses Universitaires de France, Paris.
- FAO & MRHE, (1970). Projet de développement hydro-agricole du Liban Nord. Ministère des Ressources Hydrauliques et Electriques, Beyrouth, Liban.
- Grillot J.C., Chaffaut I., Moumtaz R., (1988). Effect of the Environment on the hydrochemical characteristics of an alluvial aquifer following an exceptional multiyear drought

(Mediterranean seashore, Herault, France): part I- Recharge of the aquifer. *Environ. Geol. Water Sci.*, vol. 11, N° 2, 163-173

Guerre A., (1969). Contribution à l'étude hydrologique de la plaine d'Akkar et ses confins (Liban-Syrie). Université de Montpellier, CERGH, *Thèse 3^e cycle*, 128 p.

Halwani J., Hamzé M., (1998). Pollution chimique et microbiologique des eaux souterraines de la plaine du Akkar (Liban du Nord), et leurs conséquences éventuelles sur la santé humaine. *Lebanese Scientific Research Reports*, vol. 3, N° 1, pp. 33-47.

Halwani J., Ouddane B., Ibrahim A.R., Wartel M., (1999). Caractéristiques des ressources en eau des plateaux d'Akkar au Nord du Liban. *Cahiers de l'Association Scientifique Européenne sur l'Eau et la Santé*; 4, pp. 3-13.

Hashash, A., Aranyossy, J.F., (1995). Mise en évidence de l'origine de la salinité des eaux de l'aquifère de Sarafand (Sud-Liban). *Inter. Ass. Sci Hydr.*, 232: pp. 35-41.

Hoszowski P., (1999). L'eau et l'homme dans la région du Akkar (Nord Liban), l'exemple du Nahr Arqa. Mémoire de maîtrise de géographie, Université de Paris 4; 169 p.

Karahanoglu N., (1997). Assessment of seawater intrusion in a coastal aquifer by using correlation, principal component, and factor analyses. *Water Environment Research*, 69, 3: pp. 331-342.

Khair K., Aker N., Haddad F., Jurdi M. And Hachach A., (1994). The Environmental impacts of humans on groundwater in Lebanon. *Water, Air and Soil Pollution* 78, pp. 37-49.

Lhadi E., Mountadar M., Younsi A., Martin G., Morvan J., (1996). Contamination par les sels marins du système aquifère côtier de la province d'El-Jadida (Maroc). *Hydrogéologie*, N° 3, pp. 35-49

Mania J., Imezoukene S., Braillon J.M., (1985). Pollution saline de la nappe côtière à l'Est d'Alger. *Hydrogéologie* N° 3, pp. 213-226.

METAP (Mediterranean Environmental Technical Assistance Program), (1995). Lebanon: Assessment of the state of the Environment. The World Bank, New York, 425 p.

Nowroozi A., Horrocks S., Henderson P., (1999). Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied Geophysics*, 42, pp. 1-22.

OMS, (1993). Directives de qualité pour l'eau de boisson, volume 1: Recommandations. 2^e édition. Organisation Mondiale de la Santé, Genève.

Petrekian A.A., (1980). Groundwater quality of greater Beirut in relation to geological structure and extent of seawater intrusion. M.S. Thesis, American University of Beirut, Lebanon.

PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement), (1970). Liban: étude des eaux souterraines. UNDP, New York, *Rapport technique*, 186 p.

Pozet N., Hadj-Aissa, Labeeuw M., Monnerot P., Zech P., (1993). Influence de la composition des eaux sur le fonctionnement rénal. *Revue de nutrition pratique* N° 7, Dietecom.