

## **Détermination des modalités de recharge des aquifères par le biais des traceurs chimiques et isotopiques. Cas de la zone de contact Haut Atlas occidental – Plaine du Souss (SW du Maroc)**

*Determination of recharge modes of aquifers by use of chemical and isotopic tracers. Case study of the contact zone between the Western High-Atlas Chain and Souss Plain (SW Morocco)*

S. Boutaleb<sup>1</sup>, L. Bouchaou<sup>1</sup>, Y. Hsissou<sup>1</sup>, T. Tagma<sup>1</sup>

### RÉSUMÉ

La détermination de l'origine des apports d'eau pour la nappe phréatique de la rive droite de l'oued Souss entre Agadir et Taroudant (Sud-Ouest du Maroc) s'est basée sur l'utilisation des analyses hydrochimiques et isotopiques de la nappe, des eaux de surface et des sources de contact entre la chaîne du Haut-Atlas et la plaine du Souss.

La correspondance dans l'évolution spatiale des différents éléments chimiques d'origine évaporitique ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ) des eaux de la nappe phréatique, des sources de piémont, et des eaux de surface a permis de mettre en évidence l'existence d'une recharge d'eau de la nappe à partir de la chaîne haut-atlasique adjacente.

L'analyse du mode d'alimentation des différents aquifères (Haut Atlas et plaine du Souss) à partir des analyses isotopiques, montre que l'alimentation de la nappe du Souss à partir du Haut-Atlas semble être composite entre une infiltration directe au niveau des lits des affluents haut-atlasiques, et une alimentation lointaine à partir des nappes bordières du Haut Atlas.

**Mots Clés:** Plaine du Souss, Haut-Atlas, Maroc, recharge d'aquifères, Hydrochimie, isotopes.

### ABSTRACT

Determination of the origin of recharge of the unconfined aquifer in the right side of the Souss wadi between Agadir and Taroudant (South-west of Morocco) was based on the use of hydrochemical and isotopic analysis of groundwater, surface water and springs of the contact zone between the High-Atlas Chain and the Souss plain.

The correspondence in the space evolution of the various chemical elements of evaporitic origin ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ) in groundwater, piedmont springs, and surface water reveals the existence of recharge water from the adjacent High-Atlas Chain.

The various recharge modes of the different aquifers (High Atlas and Souss plain) determined by isotopic analysis, shows that the source of groundwater for the unconfined Souss aquifer seems to be composite between a direct infiltration on the High-Atlas tributaries and a remote recharge from the bordering High Atlas aquifers.

**Keywords:** Souss plain, High-Atlas, Morocco, aquifer recharge, hydrochemistry, isotopes.

---

<sup>1</sup> Laboratoire de Géologie Appliquée et de Géo-environnement. Fac des sciences, Univ. Ibno Zohr. Agadir.  
Email: saidboutaleb@hotmail.com

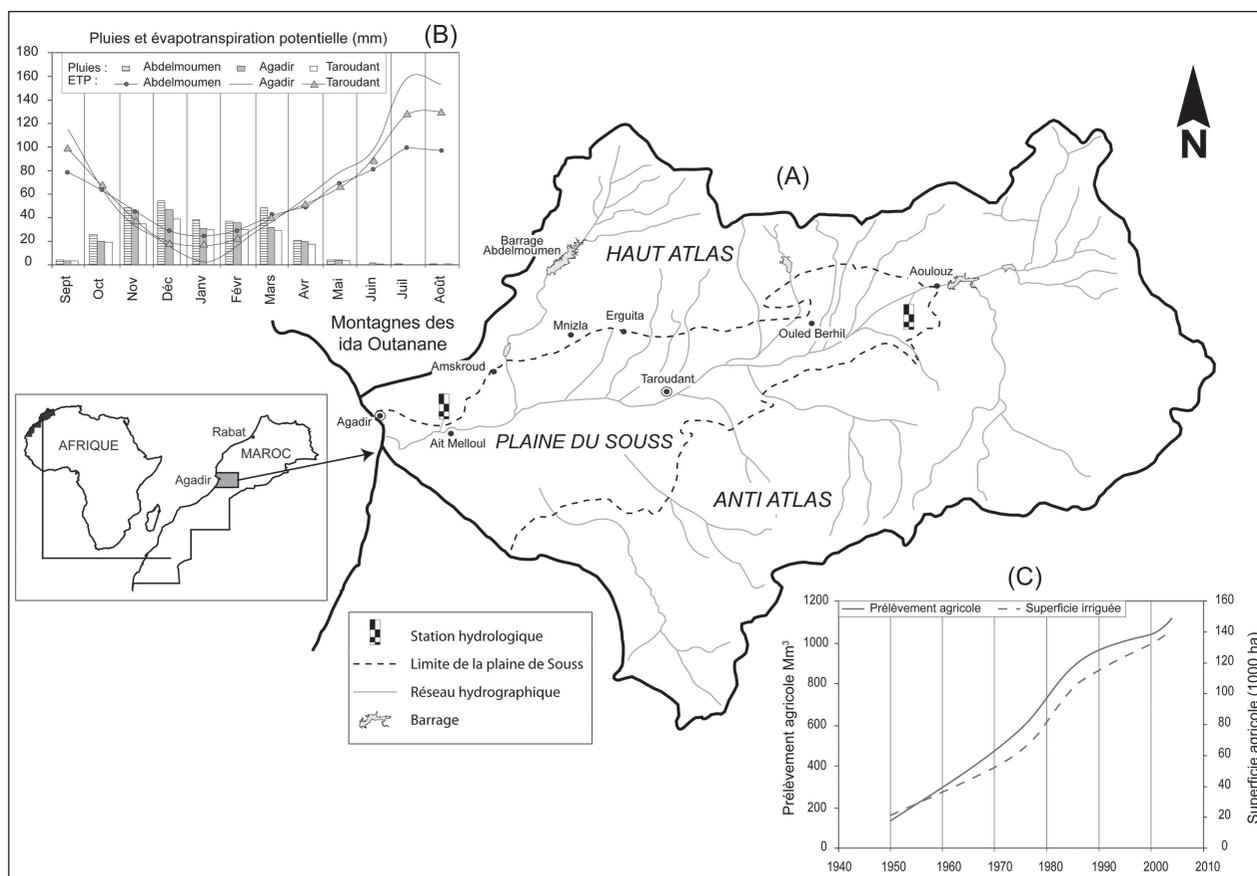


Fig 1.—Carte de situation du domaine d'étude. (A) Bassin versant de l'oued Souss, (B) Variation des précipitations et de l'évapotranspiration dans les trois stations Agadir, Taroudant, et Abdelmoumen (1996), (C) Evolution des surfaces irriguées et la demande en eau correspondante.

## Introduction

La région du Souss, située au sud-ouest du Maroc (fig. 1), est en plein essor économique et dispose de potentialités importantes à plusieurs niveaux. Elle se caractérise par une image positive au niveau national, une dynamique socio-économique et un patrimoine environnemental riche et diversifié.

L'agriculture constitue un des piliers de ce développement remarquable à côté du tourisme, de la pêche et de l'industrie agroalimentaire. Les besoins en eau dépassent actuellement les 1100 mm<sup>3</sup>/an pour satisfaire 150 000 ha de terres irrigables dans la plaine du Souss (fig. 1). Ces besoins en eau, puisés essentiellement au niveau de la nappe phréatique, se voit heurtée à un climat à prédominance semi-aride, avec un fort taux d'évaporation (2000 mm à Agadir) et une pluviosité généralement faible surtout en plaine (280 mm à Agadir).

Plusieurs enquêtes ont été effectuées pour déterminer les volumes prélevés de cette nappe pour l'irrigation. La dernière en date, a été réalisée par l'Agence du Bassin Hydraulique du Souss en 2003 et a recensé 7 034 exploitations agricoles et 569 systèmes d'AEP (Alimentation en eau potable), utilisant 9 141 points d'eau.

Les prélèvements nets, à partir de la nappe, pour l'irrigation sont passés de 295 mm<sup>3</sup> en 1976 à près de 517 mm<sup>3</sup> en 2003, soit près du double tandis que les prélèvements pour l'AEP sont passés de 8 mm<sup>3</sup> en 1976 à près de 42 mm<sup>3</sup> en 1998. Les bilans annuels de la nappe du Souss établis montrent un déstockage annuel moyen de l'ordre de 200 mm<sup>3</sup>.

Plusieurs barrages (Abdelmoumen, Imi Elkheng, Aoulouz) ont été construits pour régulariser des volumes annuels destinés à la recharge artificielle de cette nappe et pour fournir des volumes d'eau supplémentaires aux périmètres traditionnels situés en leur aval.

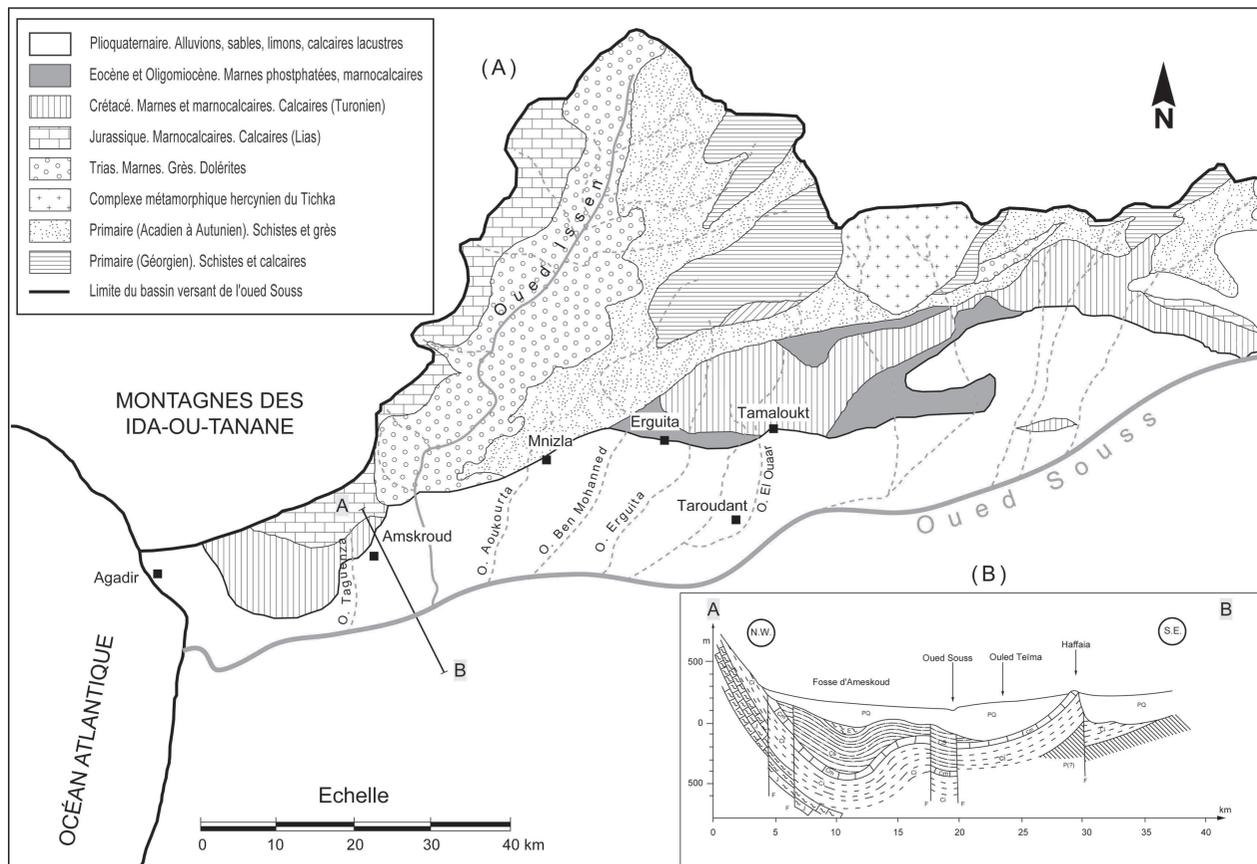


Fig 2.—(A) Carte géologique simplifiée du domaine d'étude, (B) Coupe géologique NW-SE simplifiée des formations de remplissage de la plaine.

Vu son rôle primordial dans l'avenir de la région, cette nappe mérite un suivi régulier et continu surtout le côté relatif à sa recharge naturelle.

Le présent travail rentre dans ce cadre, et consiste à vérifier à l'aide des outils hydrochimique et isotopique, les différentes modalités d'alimentation de cette nappe phréatique du Sous (région située entre Agadir et Taroudant) à partir de la chaîne du Haut-Atlas occidental qui constitue à notre égard une zone de recharge potentielle.

### Cadre géographique, climatique et géologique de la zone d'étude

La plaine du Sous (4.400 km<sup>2</sup> de superficie) qui fait partie du bassin du Sous (fig. 1) présente une forme de gouttière à très faible courbure, redressée vers les piémonts montagneux (Haut-Atlas et Anti-Atlas) et dans l'axe de laquelle l'oued Sous a tracé son lit. Elle appartient au sillon préafricain qui cor-

respond à une étroite zone d'effondrement, à remplissage fluvio-lacustre (marno-calcaires, grès avec intercalations de conglomérats) pliocène (Combe & Elhebil, 1977). La «formation du Sous» qui constitue le remplissage essentiel de cette plaine surmonte un synclinal crétacé-éocène orienté est-ouest (fig. 2a et 2b).

Les aquifères potentiels de la nappe phréatique sont constitués par la «formation du Sous» pliocène très hétérogène dans la plaine, par les lits fossiles de l'oued Sous (C.A.G., 1970) et par les grès calcaires et sables côtiers du Pliocène (Dijon, 1969).

Ces différentes formations présentent des caractéristiques hydrodynamiques variables à savoir des valeurs de transmissivité qui oscillent entre ( $10^{-1}$  à  $10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup>), et une perméabilité variant entre 1 et  $10 (10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$ .

L'oued Sous, principal cours d'eau dans le bassin, ne coule que quelques jours ou quelques semaines par an sur l'ensemble de son cours traver-

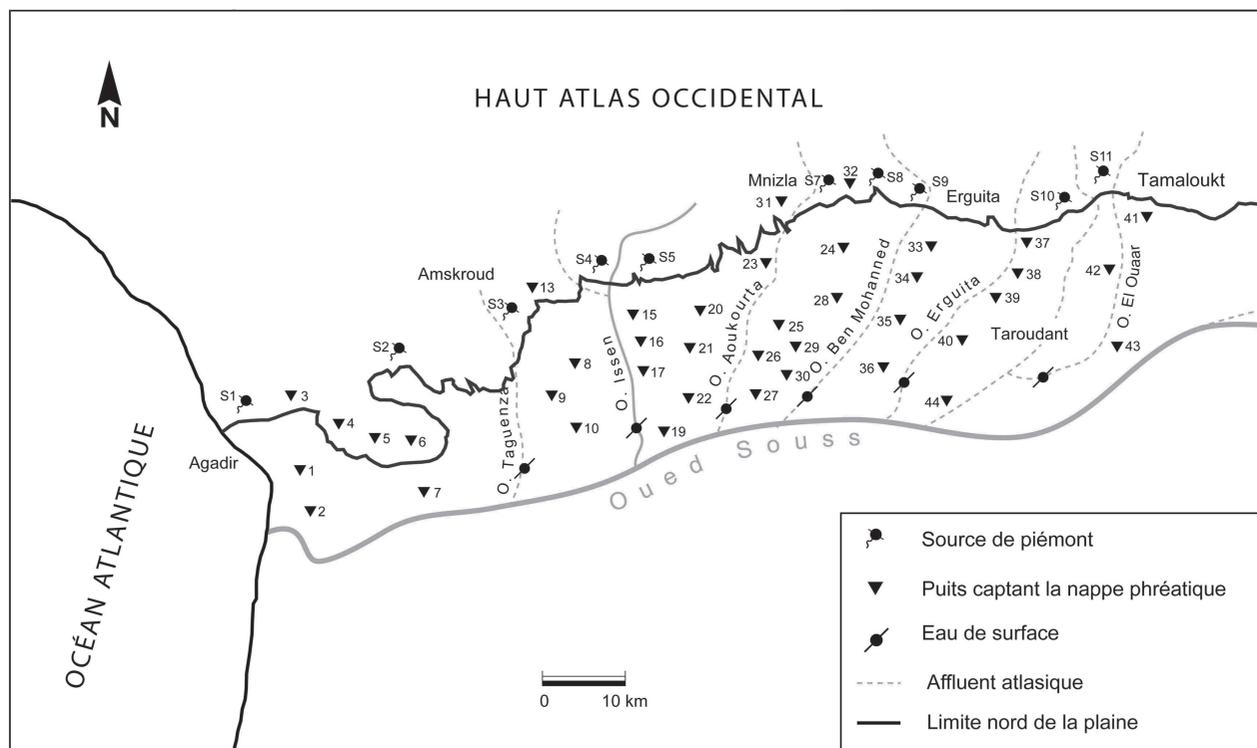


Fig 3.—Carte des points d'eau échantillonnés pour les analyses chimiques (mars 1996).

sant la plaine. Son débit moyen annuel (1932-1980) enregistré à la station d'Aoulouz (4450 km<sup>2</sup> de surface) est de l'ordre de 7.2 m<sup>3</sup>/s pour une pluie moyenne annuelle de l'ordre de 360 mm. Dans la partie aval, le débit moyen annuel pour la même période atteint 10 m<sup>3</sup>/s enregistré à la station d'Ait Melloul (bassin versant de l'ordre de 16100 km<sup>2</sup>). La différence des débits entre les deux stations est due aux apports des affluents haut-atlasiques puisque ceux de la rive droite n'atteignent que rarement l'oued Souss.

Sur le plan lithologique, la majorité des terrains de la chaîne du Haut-Atlas occidental située au nord de la plaine est imperméable. Les formations sont constituées (1) d'un matériel paléozoïque au niveau du massif central du Haut Atlas, formé de schistes, de gneiss, de quartzites ou de granites, d'andesites et de rhyolites (De Koning, 1957; Petit, 1976; Pearson *et al.*, 1977; Saber, 1989 et Errami *et al.*, 2002), (2) d'un matériel triasique au couloir d'Argana; formé d'un complexe détritique, tantôt argilo-marneux, tantôt gréseux (Tixeront, 1973; Dutuit, 1976; Medina *et al.*, 2001), renfermant du gypse et du sel gemme (Combe & Elhebil, 1977), (3) d'un matériel Jurassique, dans les montagnes

des Ida Ou Tanane, constitué de calcaires dolomitiques liasiques riches en gypse (Daoudi, 1991), de calcaires du complexe Callovien-Rauracien-Séquanien et de calcaires dolomitiques du jurassique terminal (Laville & Piqué, 1991), (4) et des formations crétacées et éocènes formées essentiellement de marnes et de calcaires riches en gypse (Ambroggi, 1963; Amrhar, 1995).

Plusieurs auteurs (Saidi, 1994) considèrent que le Haut-Atlas occidental est le pourvoyeur en eaux de surface pour la plaine vu la nature imperméable des terrains en affleurement (Schistes, marnes et argiles). Les ressources en eau s'y chiffrent à 370 mm<sup>3</sup>/an dont 65 à 75 mm<sup>3</sup>/an sont consommés localement.

## Matériels et méthodes

La caractérisation des eaux de la nappe du Souss ainsi que les mécanismes de sa recharge sont basés sur l'analyse de la composition physico-chimique et isotopique des eaux de la zone de contact entre le Haut-Atlas occidental et la plaine du Souss. Les analyses réalisées au mois de mars de l'année 1996 concernent 56 points d'eau dont 33 puits captant la

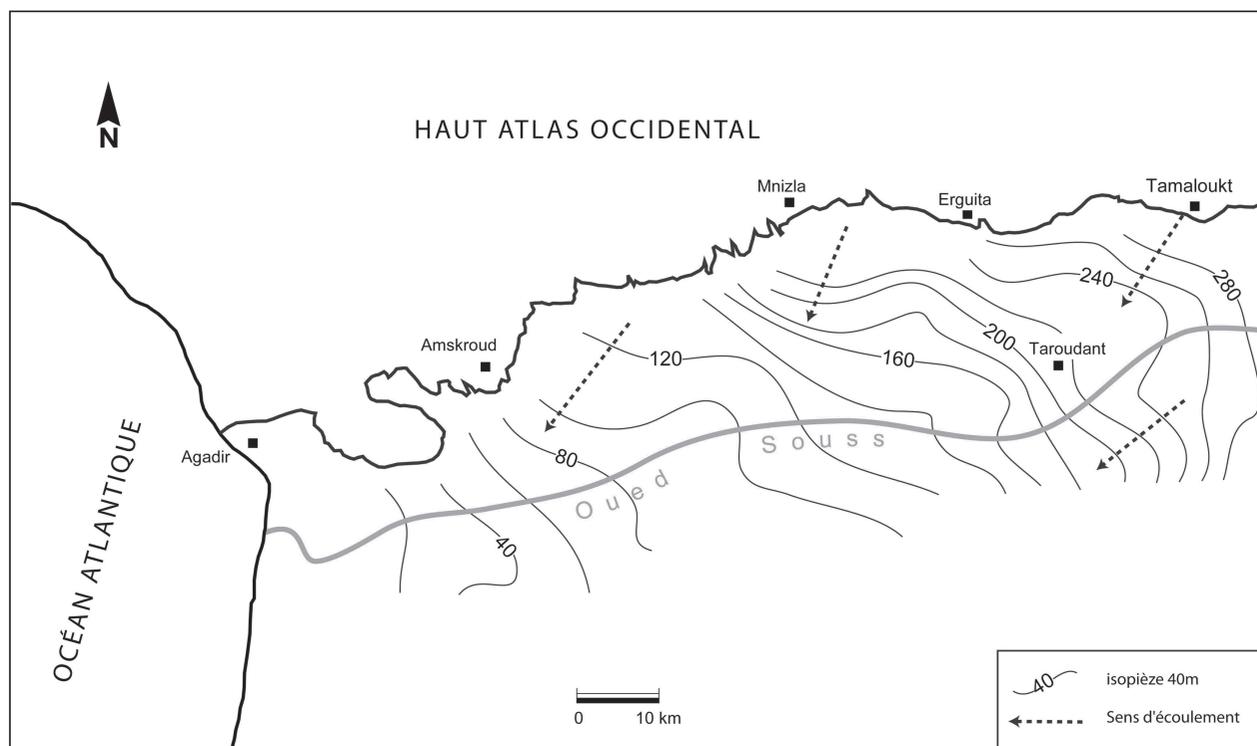


Fig 4.—Carte piézométrique (mars 1996) de la nappe de la rive droite du Souss (Région située entre Agadir et Taroudant).

nappe phréatique du Souss, 7 puits captant les alluvions des affluents haut-atlasiques, échantillonnés juste avant leur débouché dans la plaine, 6 échantillons des affluents atlasiques et 10 sources sourdant en faveur des formations du Haut-Atlas dans la zone de contact avec la plaine (fig. 3).

Les méthodes d'analyse utilisées sont:

- le dosage volumétrique pour les bicarbonates, les chlorures, le calcium et le magnésium;
- la spectrophotométrie pour les sulfates et les nitrates;
- la spectrophotométrie à flamme pour le sodium et le potassium;
- la spectrophotométrie d'absorption atomique pour le strontium;
- la spectrométrie de masse pour les isotopes de la molécule d'eau.

En plus des analyses physico-chimiques et isotopiques, une carte piézométrique (mars 1996) a été réalisée en se basant sur les relevés de l'Agence du Bassin du Souss. Cette carte nous a guidé au choix du lieu de prélèvement des eaux de la nappe et nous a permis de déterminer les axes d'écoulement de celle-ci.

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques des eaux de la nappe sont comparés à ceux

des sources et des affluents atlasiques pour comprendre l'influence et les modalités de recharge de celle-ci.

## Discussion et Interprétation

### *Piézométrie de la nappe*

La carte piézométrique (fig. 4) de la rive droite de l'oued Souss montre une possibilité de recharge de la nappe à partir du Haut-Atlas au nord. Elle montre, l'existence de deux importants axes de drainage naturels; le premier coïncide avec les lits actuels et fossiles de l'oued Souss, et le deuxième coïncide avec les lits actuels des affluents haut-atlasiques. Ces deux axes de drainage, laissent penser que l'essentiel des apports en eau pour la nappe pourrait provenir de trois sources:

- 1) une infiltration directe à partir des eaux de crues au niveau des lits des affluents haut-atlasiques,
- 2) par abouchement souterrain entre les nappes bordières des deux domaines (Haut-Atlas-Plaine du Souss),

Tableau 1.—Tableau d'analyses Physico-chimiques des eaux du domaine d'étude (mars 1996)

Nom	Nature	X	Y	Z	Cote piéz.	t (°C)	Cond	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	% erreur
P1	P. repos	97,50	386,20	30,00	4,60	25,00	4.350,00	7,14	130,00	158,00	620,00	6,80	1,92	469,00	1.092,00	440,00	16,50	-1,00
P2	P. repos	99,85	383,20	20,00	4,84	25,00	4.470,00	6,90	254,00	181,00	550,00	6,90	3,49	506,00	1.138,00	360,00	—	4,00
P3	P. repos	98,20	390,40	250,00	—	25,00	1.976,00	7,11	160,00	124,00	140,00	10,40	—	445,00	457,00	260,00	5,40	-2,00
P4	P. repos	104,30	390,30	210,00	—	23,00	1.653,00	7,07	120,00	98,00	48,00	12,50	0,76	466,00	215,00	185,00	39,00	-5,00
P5	P. repos	106,65	380,40	180,00	—	22,00	2.729,00	7,33	155,00	208,00	205,00	18,00	1,32	410,00	480,00	420,00	—	8,00
P6	P. repos	108,70	386,90	200,00	—	24,00	2.227,00	6,60	190,00	97,00	135,00	7,70	1,36	506,00	383,00	320,00	1,00	-4,00
P7	P. repos	112,40	384,40	67,00	35,67	25,00	1.986,00	7,60	198,00	96,00	144,00	3,80	1,38	405,00	309,00	375,00	12,00	2,00
P8	P. repos	127,10	394,00	160,00	103,45	26,00	1.014,00	7,07	184,00	29,00	52,00	1,30	3,00	180,00	67,00	340,00	15,00	7,00
P9	P. repos	126,20	393,50	155,00	93,57	26,00	1.587,00	6,92	265,00	98,00	40,00	2,10	3,23	178,00	94,00	720,00	13,00	5,00
P10	P. repos	126,60	387,70	104,00	85,32	22,00	1.151,00	7,76	100,00	47,00	78,00	4,40	0,23	286,00	128,00	160,00	15,00	2,00
P13	P. repos	122,15	398,60	250,00	—	22,00	1.389,00	7,19	284,00	12,00	51,00	5,90	—	399,00	43,00	300,00	42,00	9,00
P15	P. repos	128,00	397,80	190,00	132,34	25,00	4.470,00	7,40	276,00	49,00	740,00	9,00	2,41	217,00	1.482,00	220,00	6,00	0,00
P16	P. repos	129,20	396,00	155,00	124,45	28,00	2.922,00	7,74	295,00	54,00	690,00	2,90	2,55	296,00	1.267,00	230,00	9,00	4,00
P17	P. repos	129,50	394,00	118,00	116,05	24,00	2.308,00	7,21	200,00	24,00	220,00	3,20	2,15	264,00	610,00	185,00	8,00	-8,00
P19	P. repos	130,00	387,67	97,00	87,54	23,00	2.265,00	7,30	144,00	33,00	280,00	3,50	1,23	161,00	532,00	155,00	—	3,00
P20	P. repos	133,10	397,99	171,00	151,23	27,00	1.516,00	7,26	172,00	61,00	138,00	2,90	—	357,00	209,00	320,00	8,00	3,00
P21	P. repos	135,80	392,00	140,00	121,22	26,00	630,00	7,23	80,00	12,00	47,00	0,80	0,23	252,00	50,00	30,00	7,00	6,00
P22	P. repos	135,20	392,80	130,00	103,35	24,00	650,00	7,18	83,00	15,00	46,00	1,10	—	280,00	65,00	58,00	7,00	-2,00
P23	P. repos	137,90	398,60	188,00	202,34	26,00	601,00	7,24	82,00	34,00	45,00	1,00	0,02	348,00	35,00	30,00	3,00	9,00
P24	P. repos	147,75	406,65	350,00	223,76	25,00	1.075,00	7,14	96,00	31,00	60,00	2,00	0,04	290,00	126,00	60,00	13,00	1,00
P25	P. repos	142,10	398,10	194,00	181,56	26,00	510,00	7,90	85,00	26,00	30,00	1,10	0,10	258,00	37,00	49,00	22,00	7,00
P26	P. repos	141,50	394,35	161,00	158,89	28,00	543,00	6,40	84,00	22,00	34,00	1,20	—	330,00	27,00	37,00	4,00	3,00
P27	P. repos	140,80	393,90	142,00	130,04	27,00	512,00	7,90	96,00	22,00	35,00	1,00	0,07	316,00	35,00	65,00	10,00	3,00
P28	P. repos	143,20	390,10	198,00	173,33	26,00	621,00	7,80	79,00	47,00	38,00	1,50	0,06	313,00	60,00	43,00	14,00	9,00
P29	P. repos	142,80	394,40	160,00	162,21	26,00	546,00	8,10	78,00	45,00	27,00	1,30	0,04	318,00	48,00	47,00	18,00	6,00
P30	P. repos	142,75	393,80	158,00	142,25	25,00	678,00	7,70	79,00	79,00	26,00	1,20	0,18	323,00	62,00	300,00	1,00	-7,00
P31	P. repos	141,00	405,00	320,00	—	25,00	1.502,00	7,13	160,00	63,00	124,00	8,10	0,42	470,00	161,00	210,00	31,00	5,00
P32	P. repos	142,10	404,75	310,00	—	25,00	1.614,00	7,00	152,00	71,00	128,00	4,70	—	528,00	205,00	80,00	50,00	6,00
P33	P. repos	153,50	404,80	301,00	262,45	24,00	785,00	7,11	134,00	40,00	35,00	4,50	0,25	354,00	43,00	128,00	38,00	6,00
P34	P. repos	154,20	400,30	246,00	248,85	26,00	724,00	7,25	120,00	33,00	52,00	2,40	0,11	354,00	80,00	80,00	15,00	5,00
P35	P. repos	151,20	398,50	232,00	198,66	24,00	519,00	7,38	112,00	3,60	15,00	1,90	—	271,00	44,00	74,00	5,00	-5,00
P36	P. repos	148,10	397,20	225,00	170,03	26,00	505,00	7,12	96,00	28,00	21,00	3,70	—	329,00	65,00	63,00	18,00	-4,00
P37	P. repos	163,40	405,25	420,00	270,33	23,00	1.750,00	7,06	220,00	52,00	62,00	3,50	1,60	187,00	82,00	520,00	16,00	5,00
P38	P. repos	163,45	393,30	304,00	240,05	26,00	770,00	7,21	126,00	30,00	41,00	1,70	0,96	287,00	35,00	215,00	10,00	1,00
P39	P. repos	162,75	397,00	262,00	221,75	24,00	669,00	7,21	118,00	26,70	30,00	1,70	0,73	284,00	30,00	175,00	16,00	0,00
P40	P. repos	160,40	392,30	255,00	202,35	26,00	595,00	—	91,60	20,00	28,00	1,20	0,45	278,00	22,00	142,00	7,00	-5,00
P41	P. repos	170,40	402,00	317,00	296,54	22,00	580,00	7,10	96,00	20,70	9,00	1,30	—	232,00	23,00	110,00	3,00	1,00
P42	P. repos	169,40	398,10	275,00	280,96	26,00	607,00	—	98,00	22,00	27,00	1,30	0,66	274,00	17,00	125,00	8,00	1,00
P43	P. repos	168,40	397,40	255,00	240,45	24,00	1.105,00	6,68	188,00	4,90	56,00	1,80	—	317,00	62,00	185,00	11,00	6,00
P44	P. repos	159,10	391,00	245,00	180,05	25,00	708,00	—	105,00	22,00	16,00	2,20	0,50	258,00	19,00	140,00	4,00	0,00
S1	—	96,00	390,70	206,00	—	25,00	2.540,00	7,85	164,00	140,00	295,00	10,60	—	420,90	680,00	250,00	5,50	2,00
S2	—	109,50	397,05	402,00	—	22,00	838,00	8,35	54,80	99,00	25,00	2,50	—	272,70	46,10	247,00	3,20	5,00
S3	—	110,00	396,50	389,00	—	25,00	1.392,00	8,11	262,00	49,00	54,00	4,20	—	390,40	97,60	425,00	0,76	4,00
S4	—	123,05	399,15	245,00	—	26,00	2.449,00	6,88	668,00	90,00	31,00	5,70	11,57	219,60	62,10	1.725,00	6,94	1,00
S5	—	128,75	400,10	245,00	—	26,00	958,00	7,20	120,00	57,00	58,00	3,00	—	342,45	99,40	113,00	14,00	9,00
S7	—	137,10	402,50	300,00	—	24,00	1.217,00	7,07	248,00	77,00	210,00	8,60	—	503,20	186,40	420,00	44,14	10,00
S8	—	138,80	402,85	325,00	—	27,00	686,00	7,86	102,00	18,00	58,00	1,40	0,12	356,80	49,70	60,00	11,04	3,00
S9	—	151,60	408,20	475,00	—	25,00	520,00	7,08	108,00	3,00	56,00	69,00	0,13	360,00	50,00	84,00	15,08	3,00
S10	—	163,30	409,50	430,00	—	25,00	1.006,00	—	322,00	93,00	150,00	5,30	1,35	128,10	170,40	925,00	0,86	7,00
S11	—	1.701,00	406,90	420,00	—	27,00	2.181,00	—	364,00	119,00	83,00	3,90	2,33	323,40	134,90	1.000,00	0,18	3,00
O. Taguenza	En crue	108,50	395,10	90,00	—	26,00	815,00	8,42	94,00	53,00	37,00	3,00	—	256,00	67,40	180,00	1,62	4,00
O. Issen	En crue	129,00	393,50	140,00	—	18,00	3.376,00	7,63	120,00	11,00	520,00	5,00	—	2,23	20,21	1,05	0,03	-2,00
O. Aoukourta	En crue	136,10	391,60	130,00	—	18,00	40,00	8,30	24,00	7,00	8,00	7,30	—	56,00	12,00	61,00	8,10	-7,00
O. Beni mohanned	En crue	143,50	391,40	145,00	—	18,00	442,00	8,26	60,00	16,00	10,00	1,10	0,10	223,00	18,00	50,00	7,40	-5,00
O. Erguitta	En crue	163,30	409,50	430,00	—	20,00	814,00	8,39	116,00	31,00	15,00	1,60	—	180,00	28,40	260,00	13,40	-2,00
O. El Ouuar	En crue	165,30	389,40	389,00	—	18,00	382,00	8,08	82,00	10,00	11,00	1,80	0,15	257,00	15,00	40,00	11,70	-2,00

Tableau 2.—Tableau d'analyses isotopiques des eaux du domaine d'étude

Nom	Date d'échantillonnage	Altitude d'échantillonnage	Teneurs en Deutérium	Teneurs en <sup>18</sup> O (%)
2	Mars 1996	40	-37	-5,9
28	Mars 1996	86	-30,7	-5,11
42	Mars 1996	304	-47,8	-7,35
45	Année 1970	174	—	-6,74
46	Année 1970	265	-44,1	-7,27
47	Année 1970	10	-34,8	-5,61
48	Année 1970	514	-38,3	-6,28
49	Année 1970	590	-43,2	-7,33
50	Année 1970	720	-35,3	-5,92
51	Année 1970	86	—	-6,16
52	Année 1970	64	—	-4,84
59	Année 1970	155	—	-5,74
Pluies Agadir	Mars 1996	96	—	-3,6
Pluies Amsoul	Mars 1996	880	-49,6	-7,57
Oued Issen	Mars 1996	200	-32,4	-5,34
S1	Mars 1996	100	-23,3	-4,32
S3	Mars 1996	210	-21,3	-3,82
S4	Mars 1996	310	-36,9	-5,88
S10	Mars 1996	440	-39,7	-6,35
S11	Mars 1996	420	-38,2	-6,27

3) et finalement par des apports latéraux à partir des dévergements des calcaires du massif d'Aoulouz situé à l'est. La part de chaque mode d'alimentation pour la recharge de la nappe reste à éclaircir, et pour ce faire on a utilisé l'outil chimique pour essayer d'y répondre.

#### Apport des paramètres chimiques

L'analyse des résultats chimiques a permis de distinguer 3 types de faciès chimiques, bicarbonaté-calcique, Sulfaté-calcique et Chloruré-sodique.

La carte des faciès chimiques établie à partir de ces résultats, montre une variation latérale apparente dans la zone d'étude, (fig. 5) avec un faciès chloruré-sodique dans la zone aval et aux alentours de l'oued Issen, un faciès sulfaté-calcique retrouvé en aval des terrains liasiques, un faciès franchement bicarbonaté calcique en face des terrains paléozoïques, et finalement un faciès bicarbonaté calcique à concentration en  $\text{SO}_4^{2-}$  assez élevée en aval du domaine des Erguittas.

Une cartographie de l'aquifère contenant la nappe phréatique du Souss (fig. 6), basée essentiellement sur les coupes de forages, montre que l'essentiel de remplissage de l'aquifère est constitué par la « formation du Souss » calcaréo-gréseuse (Dijon, 1969), très hétérogène dans l'ensemble du périmètre d'étude. La prospection par sondages et

diagraphies électriques effectuée par la C.A.G (1970) ne montre aucun passage de formations évaporitiques sulfatés ( $\text{CaSO}_4$ ) ni chlorurés ( $\text{NaCl}$ ) dans cette formation sauf au niveau des formations du Pliocène marin situées en aval de la plaine, et dont la limite Est ne dépasse guère la région d'Ait Melloul (= 15 Km de l'océan Atlantique).

Cette très grande variation latérale des faciès hydrochimiques reste donc probablement liée aux variations lithologiques spatiales du Haut-Atlas occidental, riche en faciès évaporitiques et lagunaires. Cependant, les modalités et la relation qui lient les eaux des deux domaines (Haut-Atlas et plaine du Souss) restent à expliquer ?

L'étude de la variation des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) selon un profil W-E entre les eaux de la nappe et ceux des sources du piémont (sources qui constituent ici le signal hydrochimique des entrées d'eau du Haut Atlas vers la plaine), montre une même évolution (fig. 7 a, b). Les fortes teneurs en sulfates des sources s'expliquent par les conditions géologiques de celles-ci; elles sourdent en effet en aval des formations calcaires et marnocalcaires riches en gypse du Jurassique et Crétacé. Ce résultat semble indiquer une forte influence des eaux en provenance du Haut Atlas sur la qualité des eaux de la nappe phréatique au niveau de la plaine.

L'existence d'anomalies en  $\text{NaCl}$  dans les deux parties aval et médiane de la plaine induit l'intervention d'autres facteurs à l'égard d'une alimenta-

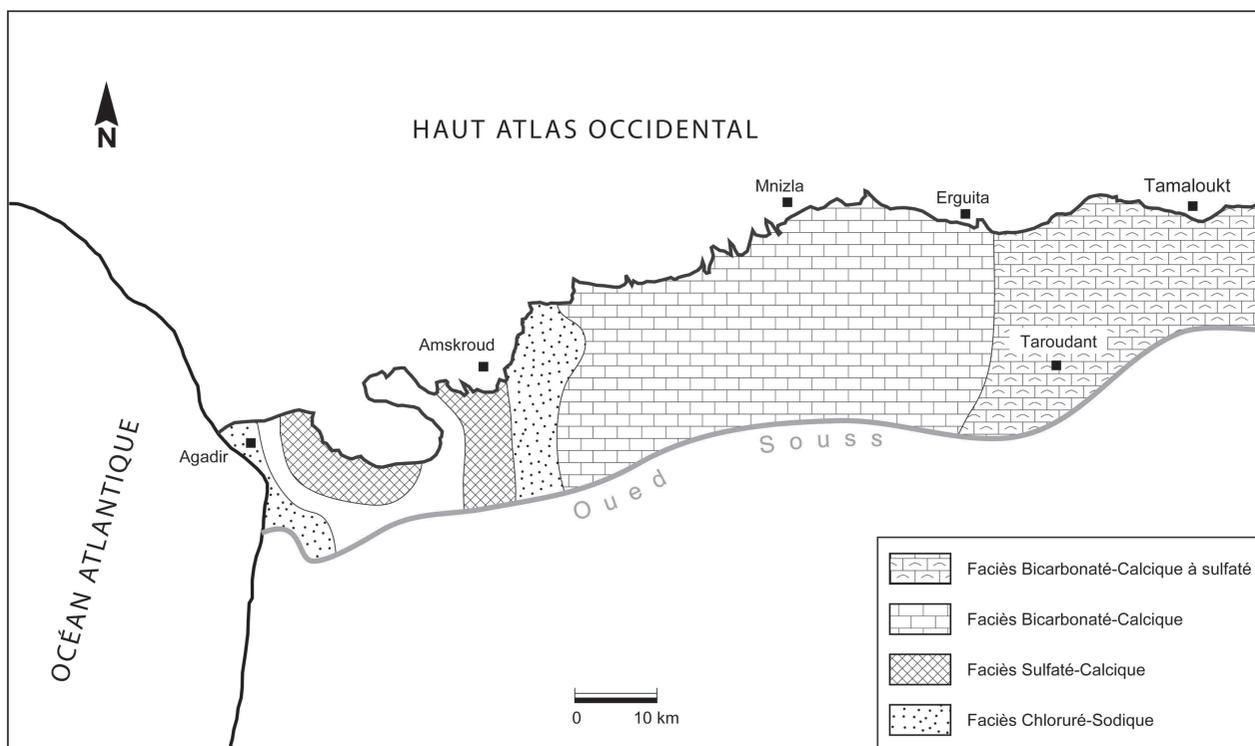


Fig 5.—Carte des faciès chimiques des eaux de la nappe de la rive droite de l'oued Souss (région située entre Agadir et Taroudant).

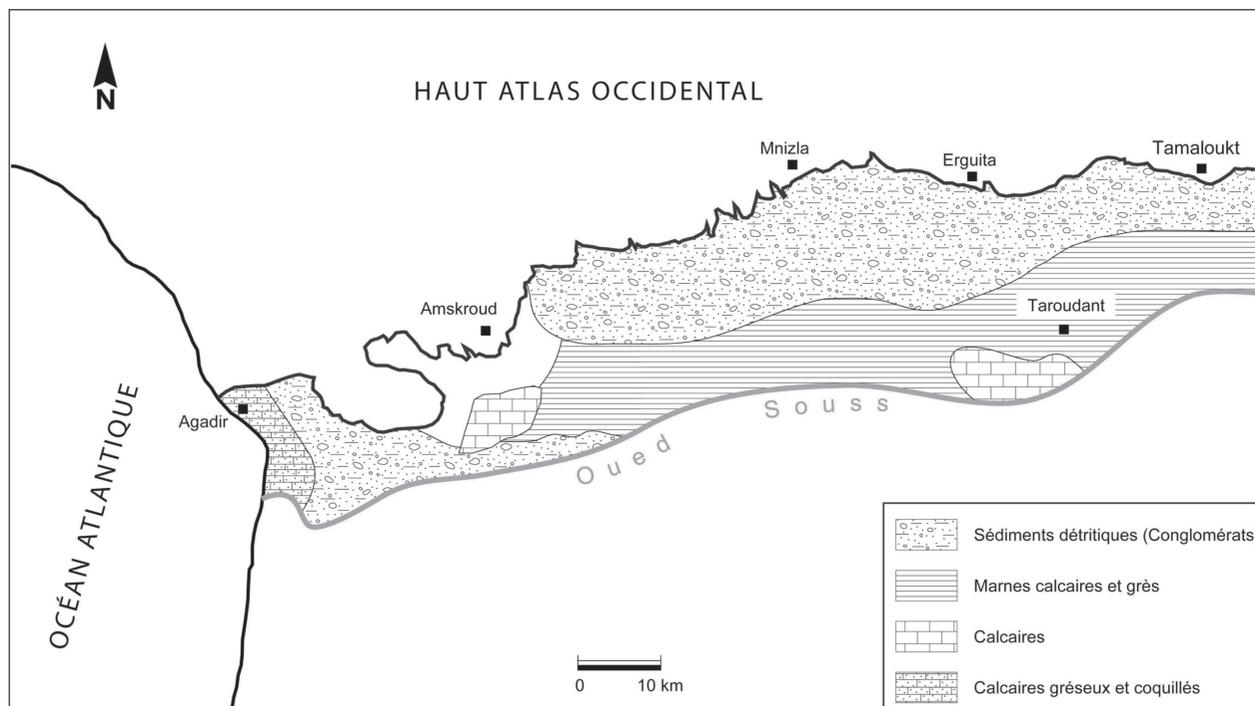


Fig 6.—Carte lithologique de l'aquifère de la nappe phréatique du Sous (rive droite de l'oued Souss entre Agadir et Taroudant).

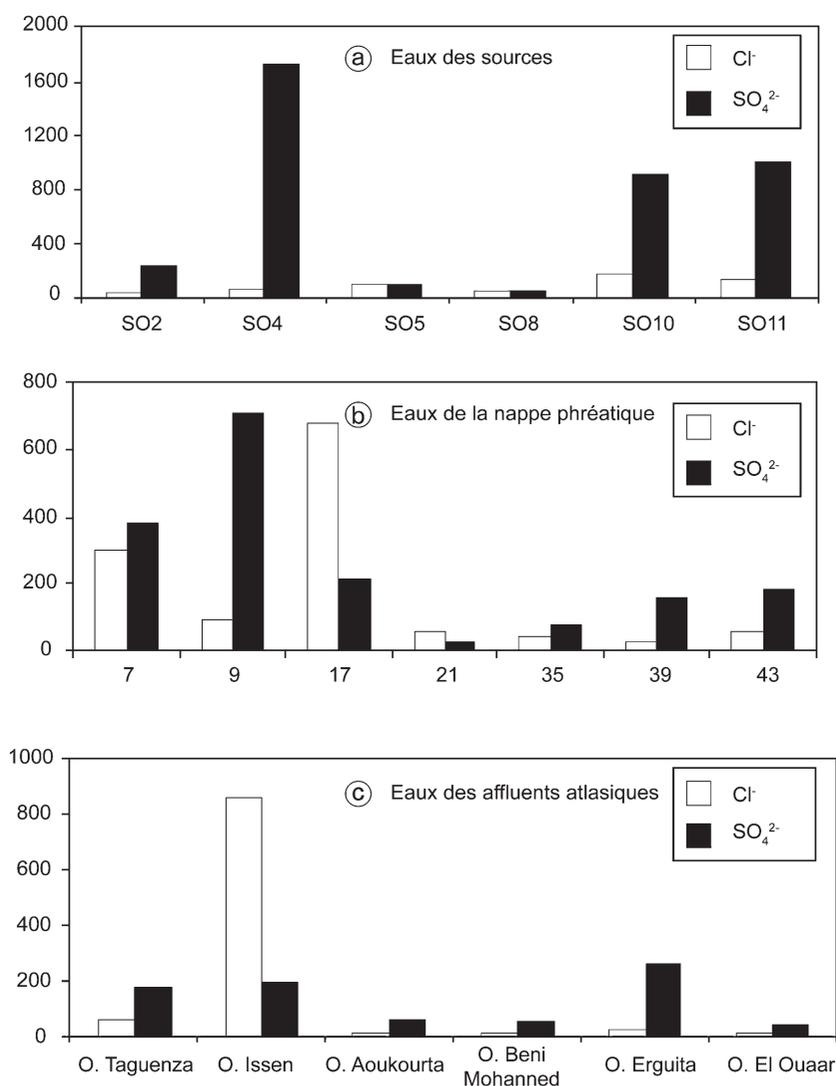


Fig 7.—Evolution des  $\text{SO}_4^{2-}$  et des  $\text{Cl}^-$  des eaux des sources (a), des puits de la nappe (b) et des affluents haut-atlasiques (c) selon un axe W-E.

tion unique à partir des aquifères du Haut Atlas. Les études établies par Hsissou *et al.* (1997, 1999, 2001) et Hsissou (1999) basées essentiellement sur l'évolution de la piézométrie, sur la cartographie chimique ( $\text{Br}^-$  et  $\text{Cl}^-$ ) et sur les analyses isotopiques, a montré une origine composite des concentrations élevées en NaCl entre une avancée du biseau salé (invasion des eaux marines) et une remontée de paléosalinité d'origine sédimentaire dues toutes les deux à une surexploitation de la nappe et à la sécheresse prolongée qu'a connu le bassin du Souss ces dernières décennies. L'examen par ailleurs de l'évolution du  $\text{Na}^+$  et du  $\text{Cl}^-$  au niveau des eaux de surface, montre une augmenta-

tion des concentrations au niveau de l'oued Issen dont l'emplacement coïncide avec l'anomalie de la partie médiane de la plaine (fig. 6 c). Les fortes teneurs en NaCl des eaux de l'oued Issen s'expliquent par l'héritage paléogéographique et structural des formations triasiques qui ont conduit à l'individualisation de sources très salées qui sourdent en faveur de formations gréseuses triasiques salifères le long des affluents de l'oued Issen (Boutaleb, 2000). La contamination en NaCl des eaux de la nappe est due à une infiltration directe des eaux de l'oued Issen au niveau des cônes de déjection dans la zone du piémont (Boutaleb *et al.*, 2000).

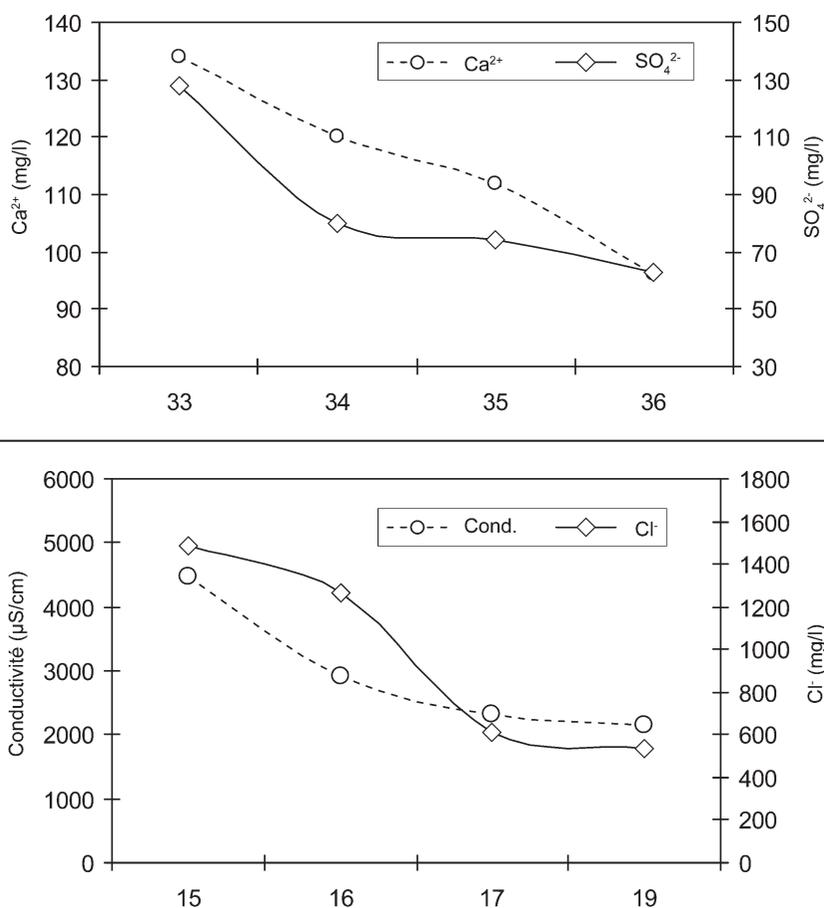


Fig 8.—Evolution des paramètres chimiques suivant un profil N-S au niveau des puits de la plaine.

L'absence d'affluents au niveau de la région d'Ameskroud (partie médiane de la zone d'étude) laisse envisager un apport d'eau, riche en sulfates, à partir d'un contact direct entre les nappes bordières des deux domaines.

La dynamique des écoulements souterrains et la chimie des eaux indiqués ci-dessus, montrent que l'alimentation des eaux de la plaine à partir du Haut Atlas au nord, semble avoir une origine composite entre un abouchement souterrain des eaux des aquifères bordiers et une infiltration directe à partir des cours d'eau qui entaillent le versant sud de la chaîne en direction de l'oued Souss. Cependant, l'analyse spatiale des paramètres chimiques ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ ) des eaux de la nappe montre une diminution des concentrations suivant des profils sensiblement orientés N-S au niveau de l'axe de drainage de cette dernière (fig. 8). Ce résultat confirme l'hypothèse de l'alimentation à partir du Haut Atlas et démontre par ailleurs un effet de dilution continue qui s'opère

à partir des eaux douces (à faciès bicarbonaté calcique) en provenance de l'E et du NE (massif ancien du Haut Atlas) pour les eaux situées en aval des terrains éocènes et crétacés de la région d'Erguitta, et à partir des eaux des formations paléozoïques de la région de Mnizla pour les eaux situées aux alentours de l'oued Issen. Une troisième zone d'alimentation pour la plaine à partir de l'E et du NE peut donc être envisagée.

Pour confirmer ces résultats, on a utilisé le strontium dont la présence est toujours liée aux sels évaporitiques. La présence de fortes teneurs de cet élément dans les eaux souterraines ne peut s'expliquer que par la dissolution de la Célestine ( $\text{SrSO}_4$ ), minéral associé au gypse. Il forme ainsi un bon marqueur de la présence d'eau à origine évaporitiques.

Le dosage du strontium dans les eaux de la nappe montre une très grande variation des teneurs suivant les secteurs. Le rapport ionique (en concentrations

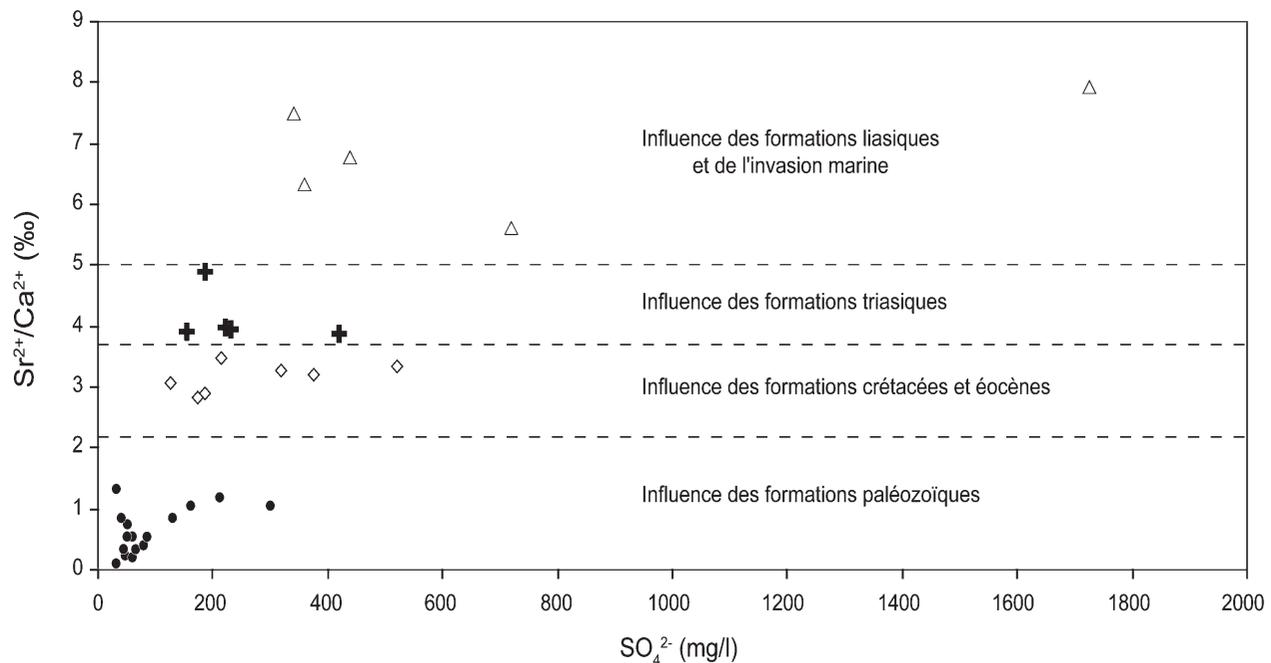


Fig 9.—Evolution du rapport  $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  en fonction des  $\text{SO}_4^{2-}$  pour les eaux du domaine d'étude (37 points d'eau analysés).

molaires)  $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  est caractéristique d'une origine évaporitique s'il est égal ou supérieur à 1‰ (Bakalowicz, 1988). Quand il est supérieur à 5‰ il peut être attribué aux évaporites du Trias alpin (Meybeck, 1984). La variation des valeurs du rapport  $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  (exprimé en ‰) en fonction des sulfates permet de distinguer les familles d'eaux déjà différenciées (fig. 9):

— un premier groupe avec des valeurs toujours inférieures à 2 ‰ lié aux eaux en provenance des terrains paléozoïques;

— un deuxième groupe avec des valeurs du rapport qui oscillent entre 2,3 et 3,65‰, représenté par les eaux en provenance des terrains crétacés et éocènes;

— un troisième groupe avec des valeurs du rapport qui varient entre 3,70 et 4,7‰ lié aux eaux des terrains triasiques;

— un dernier groupe avec des teneurs supérieures à 5,3‰ influencées par les terrains évaporitiques riches en gypse du Lias sup.;

Se basant donc sur le comportement des paramètres chimiques ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ ) liés essentiellement à la dissolution du gypse ( $\text{CaSO}_4$ ), de l'halite ( $\text{NaCl}$ ) et de la Célestine ( $\text{SrSO}_4$ ) assez fréquents dans les formations lithologiques du Haut Atlas et quasiment absents au niveau des «forma-

tions du Souss», il a été démontré que les apports en eau qui alimentent la nappe du Souss peuvent avoir plusieurs origines:

1) un apport par abouchement souterrain entre les nappes bordières des deux domaines (zone de Tamaloukte et celle d'Ameskroud),

2) des apports à partir des affluents haut-atlasiques, en période des hautes eaux, par infiltration directe dans les cônes de déjection du piémont,

3) un apport à partir des eaux de dégorgeement des calcaires du massif ancien d'Aoulouz situé à l'est.

### Confirmations isotopiques

Les deux isotopes Oxygène-18 et Deutérium, représentent souvent l'outil le plus efficace pour étudier la possibilité de connexion entre les eaux de différentes origines (Etcheverry, 2002) puisqu'ils se conservent dès qu'ils atteignent le niveau de la nappe.

Ils seront utilisés dans cette étude pour vérifier les possibilités d'alimentation de la nappe du Souss à partir du Haut-Atlas en corrélant leurs signatures dans les eaux de la nappe avec celle des eaux du Haut Atlas, plus précisément avec celles du signal d'entrée « pluies du Haut-Atlas ».

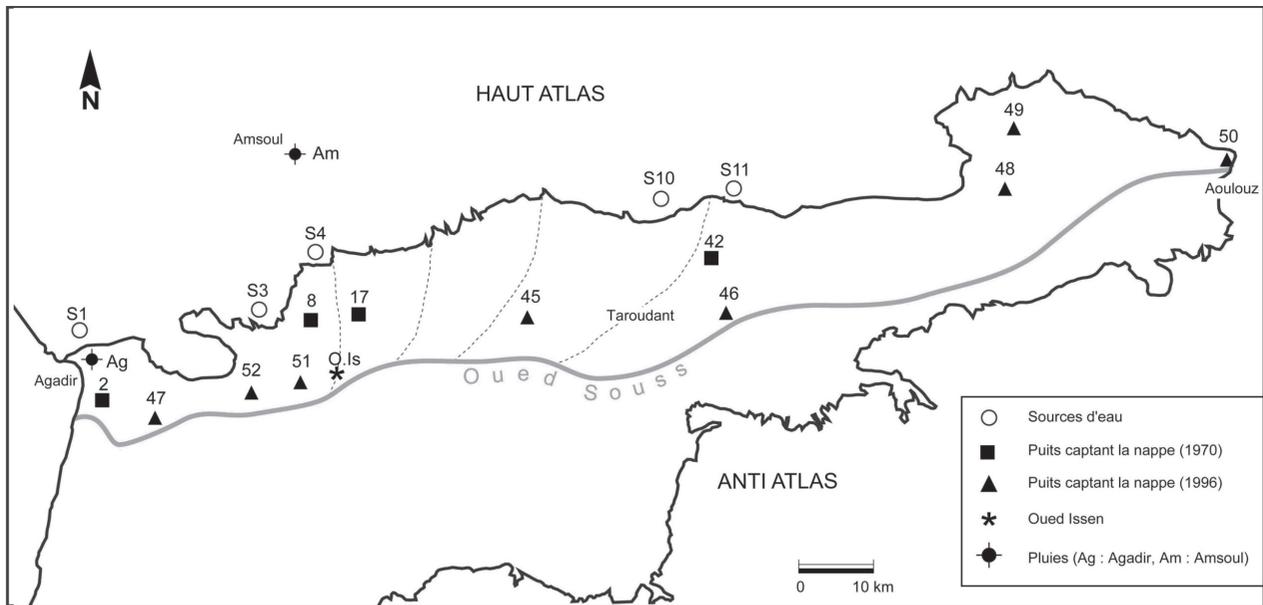


Fig 10.—Carte des points d'eau échantillonnés pour analyses isotopiques.

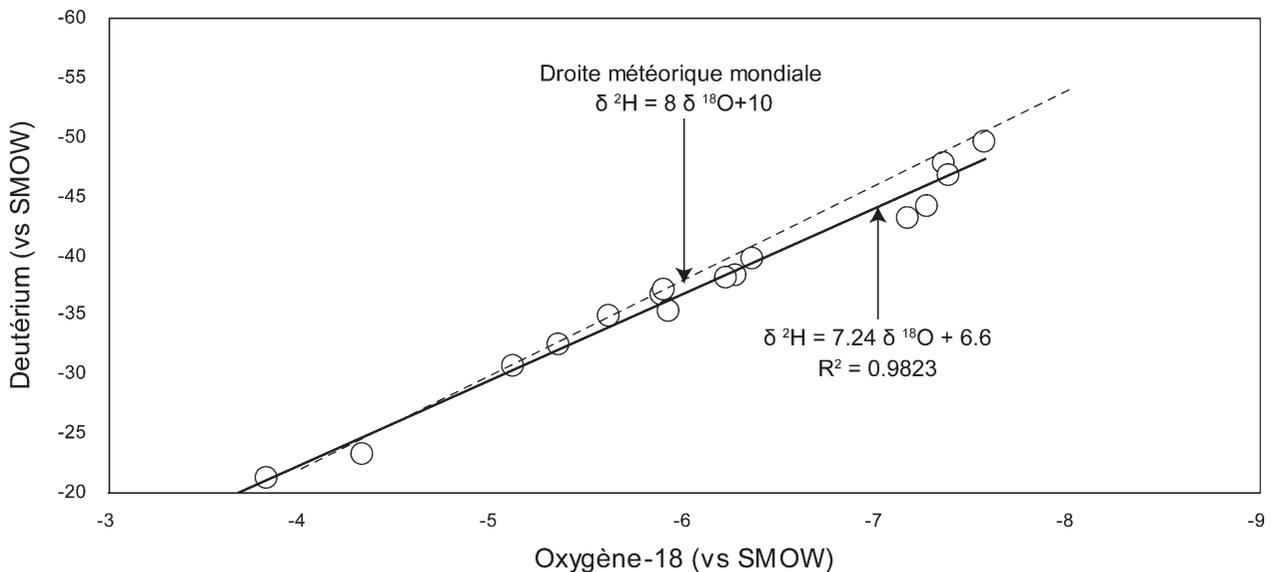


Fig 11.—Relation entre teneurs en  $^2\text{H}$  et teneurs en  $\delta^{18}\text{O}$  (mars 1996) pour les eaux du domaine d'étude (16 points d'eau).

Au total 21 échantillons ont été prélevés et analysés (fig. 10). La corrélation des concentrations en  $^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  (fig. 11), montre que la totalité des points se regroupe autour de la droite « mondiale » des eaux météoriques (Craig, 1961), représentative des précipitations à partir d'une vapeur d'origine océanique. Cette bonne linéarité des points traduit une absence d'évaporation lors de l'infiltration rapide de ces eaux.

La projection des différentes teneurs en  $\delta^{18}\text{O}$  en fonction des altitudes d'émergence des échantillons sur la droite du gradient régional du Haut Atlas avec l'altitude (établie par Bouchaou *et al.*, 1995), permet de déterminer l'altitude moyenne de recharge des différents aquifères (Pearson *et al.*, 1977) (fig. 12). Elle montre que les concentrations isotopiques en  $\delta^{18}\text{O}$  des différentes sources

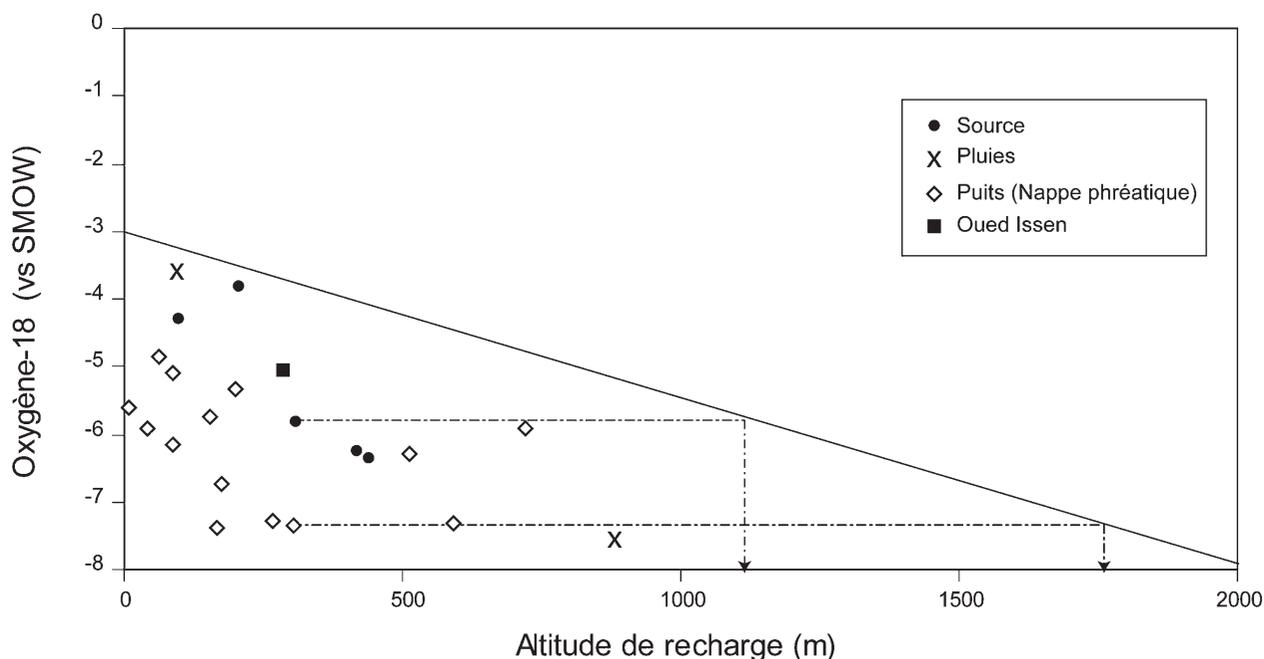


Fig 12.—Détermination des altitudes de recharge moyenne des différents aquifères, à partir des teneurs en oxygène-18 (21 points d'eau).

atlasiques (S1, S3, S4, S10 et S11) respectivement de -4.32, -3.82, -5.88, -6,35 et -6, 27 ‰ correspondent à des altitudes de recharges de 516, 333, 883, 1390 et 1340 m compatibles aux affleurements géologiques respectifs d'où débitent ces sources.

Par ailleurs, les différents puits échantillonnés présentent des concentrations en  $\delta^{18}\text{O}$  correspondant à des altitudes de recharge supérieures d'une part à l'altitude d'échantillonnage de ces puits et d'autre part à l'altitude de recharge des pluies en plaine (450 m). Cette différence de concentration démontre que l'alimentation de la nappe s'établit à partir d'autres origines différentes d'une unique alimentation à partir d'une infiltration directe des précipitations au niveau de la plaine.

Les résultats de la campagne d'analyse réservée exclusivement aux eaux de la nappe dans sa partie la plus en amont (région d'Aoulouz) montrent une concentration moyenne en  $\delta^{18}\text{O}$  de l'ordre de -6.5 ‰ (Dindane *et al.*, 2003). La valeur moyenne estimée pour les eaux des nappes d'origine haut-atlasique (région d'Aoulouz) est de -7.7 ‰ (P.N.U.D., 1971; P.N.E., 2003). Cette concentration est proche de celle des précipitations échantillonnées à Amsoul (860m d'altitude dans Haut-Atlas) ayant une valeur de -7.57‰.

Il est à remarquer aussi que la concentration en  $\delta^{18}\text{O}$  du puits 17 de -5.11‰ (supérieure aux deux moyennes citées ci-dessus) semble plus proche de la valeur retrouvée au niveau de l'oued Issen -5.34 ‰. La proximité du puits à l'oued et la concordance entre faciès chloruré - sodique des deux types d'eau, confirme l'hypothèse de l'alimentation des eaux du Haut Atlas à partir d'une infiltration directe de l'oued Issen.

La valeur de -7.35‰ en  $\delta^{18}\text{O}$  du puits 42 sensiblement égale à la moyenne calculée pour les eaux du Haut Atlas, est d'une part, inférieure à celle trouvée aux deux sources S11 et S10 situées à proximité de ce puits, et d'autre part légèrement supérieure à -7.7‰ évaluée pour les précipitations d'origine haut-atlasique. Il semble donc, qu'un mélange entre les deux types d'eau (de surface et souterraine) s'effectue dans cette partie de la nappe.

L'analyse de l'état de la piézométrie et du rapport Br/cl dans la partie la plus en aval de la plaine, établie par Hsissou *et al.* (1999) évoque un apport d'eau de 3 origines: l'océan atlantique par invasion marine, le Haut Atlas occidental (eaux de surface et profondes) et enfin un apport à partir de l'est selon l'axe de l'oued Souss. La concentration de -5.90‰ analysée au niveau du puits 2 est différente de la moyenne des eaux haut-atlasiques ainsi qu'à celle

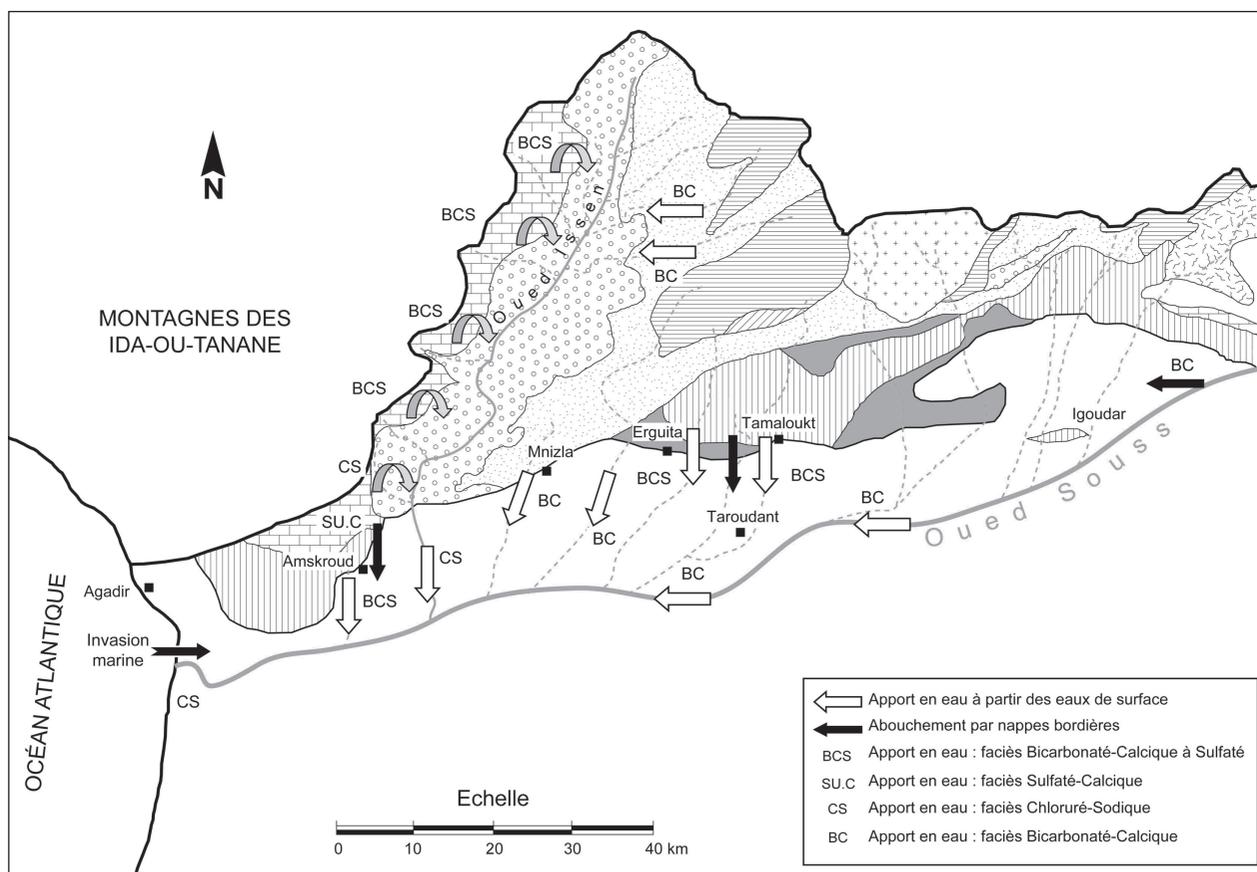


Fig 13.—Modèle d'alimentation et d'acquisition de la salinité des eaux dans la zone de contact Haut-Atlas occidental et Plaine du Souss.

des eaux de la région d'Aoulouz. Il semblerait donc qu'à ce niveau de la nappe, on assiste à un mélange d'eau de différentes origines.

Enfin l'ensemble de ces résultats a permis d'établir un modèle de fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique de la partie septentrionale de la nappe du Souss entre Agadir et Taroudant (fig. 13).

## Conclusion

L'analyse d'une part, des cartes géologiques et piézométriques de la zone de contact entre le Haut-Atlas et la plaine du Souss, et d'autre part de la correspondance dans l'évolution spatiale de différents éléments chimiques d'origine évaporitique ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ) au niveau de la nappe, des sources de piémont, et des eaux de surface, a permis de mettre en évidence l'existence d'une recharge d'eau de la nappe à partir de la chaîne haut-atlasique adjacente.

L'analyse du mode d'alimentation des différents aquifères (Haut Atlas et Plaine du Souss) à partir des analyses isotopiques montre que:

— pour les eaux des sources sourdant en faveur des formations jurassiques et crétacées, les teneurs en  $\delta^{18}\text{O}$  évoquent des altitudes de recharge compatibles aux affleurements d'où débitent ces sources.

— L'alimentation de la nappe phréatique à partir du Haut Atlas semble être composite entre, une infiltration directe au niveau des lits des affluents haut-atlasiques (pour les puits situés près des cours d'eau), et une alimentation lointaine à partir des nappes bordières du Haut Atlas.

— Il ne faut cependant pas négliger l'apport d'eau à partir du massif ancien situé à l'est et dont le rôle est de diluer les eaux de la nappe suivant l'axe de drainage de cette dernière.

— Enfin, au niveau de la partie la plus aval de la nappe, un mélange d'eau de différentes origines s'opère. Il s'agit essentiellement d'eau d'origine:

haut Atlasique, marine et enfin des eaux drainées selon l'axe de l'oued Souss à partir de la zone amont de la plaine.

## Références

- Ambroggi, R. (1963). Etude géologique du versant méridional du Haut Atlas occidental et de la plaine du Souss. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 157: 1-321.
- Amrhar, M. (1995). *Tectonique et inversions géodynamiques post-rift dans le Haut-Atlas occidental: structures, instabilités tectoniques et magmatismes liés à l'ouverture de l'Atlantique central et la collision Afrique-Europe*. Thèse d'état Es-Sciences, Université de Marrakech, Maroc, 262 pp.
- Bakalowicz, M. (1988). Géochimie des sources carbonatées des Corbières et formations de travertins, travaux UA 903. *CNRS et ATP-Piren, n°XVII, les Edifices Travertineux et Environnement Dans le Midi de la France, Aix-en Provence*, 209-225.
- Bouchaou, L.; Michelot, J.L.; Chauve, P.; Mania, J. & Mudry, J. (1995). Apports des isotopes stables à l'étude des modalités d'alimentation des aquifères du Tadla (Maroc) sous climat semi-aride. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 320: 95-101.
- Boutaleb, S. (2000). *Impact de la géologie et du climat des bassins versants sur la qualité des eaux d'une grande nappe alluviale en climat semi-aride. Application aux relations hydrologiques entre le Haut-Atlas-occidental et la plaine du Souss*. Thèse doctorat national, Université Ibn Zohr, Faculté des Sciences, Agadir, 189 pp.
- Boutaleb, S.; Bouchaou, L.; Mudry, J.; Hsissou, Y.; Mania, J. & Chauve, P. (2000). Hydrogeologic effect on the quality of water in the oued Issen watershed, western Upper Atlas Mountains, Morocco. *Hydrogeology Journal*, 8: 230-236. doi:10.1007/s100400050009
- Compagnie Africaine de Géophysique (1970). *Etude par prospection électrique de la vallée de l'oued Souss*. Direction régionale de la planification de l'eau Rabat, Maroc, Unpublished Report.
- Combe, M. & Elhebil, A. (1977). Ressources en eau du Maroc 3, Domaine Atlasique et Anti-atlasique, Vallée du Souss. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 231: 169-201.
- Craig, H. (1961). Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygène-18 in natural waters. *Science*, 133: 1702-1703. doi:10.1126/science.133.3467.1833
- Daoudi, L. (1991). *Sédimentation et diagenèse des argiles du Jurassique supérieur à l'Eocène dans le bassin du Haut Atlas occidental (Maroc)*. Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, 196 pp.
- De Koning, G. (1957). Géologie des Ida ou Zal (Maroc). Stratigraphie, pétrographie et tectonique de la partie SW du bloc occidental du Massif ancien du Haut Atlas. *Leidse Geologische Medelelingen*, 23: 129-146.
- Dijon, R. (1969). Etude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau de la vallée du Souss. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 214: 1-291.
- Dindane, K.; Bouchaou, L.; Hsissou, Y.; Krimissa, M. & Mosleh, N. (2003). Application des techniques chimiques et isotopiques à l'étude de l'alimentation de la nappe libre du Souss dans sa partie amont (Bassin du Souss, Sud-Ouest du Maroc). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 452: 221-228.
- Dutuit, J.P. (1976). Où en est la stratigraphie à base paléontologique de la formation rouge d'Argana (Haut Atlas occidental) *Comptes Rendus de la Société Géologique de France*, 6: 272-273.
- Errami, A.; Medina, F.; Hoepffner, C.; Ahmamou, M. & Bensahal, A. (2002). Etude structurale des formations stéphano-autuniennes d'El Menizla et nouvelle chronologie des phases tardihercyniennes dans le Haut Atlas occidental (Maroc). *Africa Geoscience Review*, 9: 157-170.
- Etcheverry, D. (2002). Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines. Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène. *Federal Office for Water and Geology. Berne, Switzerland, FOWG reports, Geological Series*, 2: 1-70.
- Hsissou, Y. (1999). *Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi-aride - cas de la plaine du Souss (Maroc)*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Ibnou Zohr, Agadir, Maroc, 228 pp.
- Hsissou, Y.; Mudry, J.; Mania, J.; Bouchaou, L. & Chauve, P. (1997). Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 244: 73-82.
- Hsissou, Y.; Mudry, J.; Mania, J.; Bouchaou, L. & Chauve, P. (1999). Utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines: exemple de la plaine du Souss (Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 328: 381-386.
- Hsissou, Y.; Bouchaou, L.; Krimissa, M. & Mudry, J. (2001). Caractérisation de l'origine de la salinité des eaux de la nappe côtière d'Agadir (Maroc). *First International Conference on Salt Water and Coastal Aquifers, Monitoring, Modelling and Management*, 23-25.
- Laville, E. & Piqué, A. (1991). La distension crustale atlantique et atlasique au Maroc au début du Mésozoïque: le rejeu des structures hercyniennes. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 162: 1161-1171.
- Medina, F.; Vachard, D.; Colin, J.P.; Ouarhache, D. & Ahmamou, M. (2001). Charophytes et ostracodes du niveau carbonaté de Taourirt Imzilen (Membre d'Aglegal, Trias d'Argana); implications stratigraphiques. *Bulletin de L'Institut Scientifique (Section Sciences de la Terre)*, 23: 21-26.
- Meybeck, M. (1984). *Les fleuves et le cycle géochimique des éléments*. Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences Naturelles N° 84-35. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 320 pp.
- Pearson, F.J.; Balderer, W.; Loosli, H.H.; Lehmann, B.E.; Matter, A.; Peters, T.; Proust, F.; Petit, J.P. & Taponnier, P. (1977). L'accident de Tizi n'Test et le

- rôle des décrochements dans la tectonique du Haut Atlas occidental (Maroc). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7: 541-551.
- Petit, J.P. (1976). *La zone de décrochements du Tizi n'Test (Maroc) et son fonctionnement depuis le Carbonifère*. Thèse de troisième cycle, Université de Montpellier, France, 99 pp.
- Programme des Nations Unies Pour le Développement (P.N.U.D.) (1971). Amélioration de l'irrigation dans la vallée du Souss, Maroc. *Rapports du Programme des Nations Unies Pour le Développement*, 42 pp.
- Plan National de l'Eau (P.N.E.) (2003). Mission III: La région de l'Agence de Bassin de Souss Massa. *Rapport de Gestion des Ressources en Eau, Etude du Plan National de l'Eau, Maroc*, 245 pp.
- Saber, M. (1989). *Les événements sédimentaires et tectoniques au tardi-Hercynien dans le Haut Atlas occidental: exemple des bassins des Ida-Ou-Ziki, de l'oued Zat et du bloc d'Imin Tanoute*. Thèse de Troisième Cycle, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences, Marrakech, 145 pp.
- Saidi M. (1994). Genèse et propagation des crues en milieu semi-aride: exemple de l'oued Souss (Maroc). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 71: 94-111.
- Tixeront, M. (1973). Lithostratigraphie et minéralisations cuprifères et uranifères stratiformes, syngénétiques et familières des formations détritiques permotriassiques du couloir d'Argana, Haut Atlas occidental (Maroc). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 33: 147-177.

Recibido el 5 de junio de 2007

Aceptado el 13 de febrero de 2008

Publicado online el 26 de mayo de 2008