

FACIÈS HYDROCHIMIQUES ET MINÉRALISATION DES EAUX SOUTERRAINES CÔTIÈRES DE LA NAPPE DU TRARZA (MAURITANIE)

Bakari Mohamed SEMEGA*¹, Christian ARNAUD², Raoul CARUBA³
et Jean PIRO¹

- *1. Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie, B.P. 5026 - Nouakchott - Mauritanie.*
- 2. Département de Math-informatique, Institut Universitaire de Technologie, Université de Nice-Sophia Antipolis, 41, Boulevard Napoléon III, 06041 Nice - Cedex, France.*
- 3. Institut des Relations Interuniversitaires avec la Mauritanie (IRIM), Université de Nice-Sophia Antipolis, Parc Valrose - F 060108 Nice - Cedex 02, France.*

(Reçu le 5 juin 1997 - Révisé le 6 décembre 1998)

Summary : The physio-chemical profiles of the Idini waters, oriental border of the salted coastline fringe of the Trarza water table are established through the hydro-chemical facies. The latter which appears at first chloride sodic is in fact a mixed chlorinated sulphate and chlorinated bicarbonate with sulphato-chlorinated sodo-calcic, revealing an important ionic mixture.

The differentiation of this chlorinated sodic facies into secondary mixed facies results from the combination of various influences, mainly the interactions water - rocks and the basic exchanges which confer to the waters their mineralization. The relationship between chemical facies and mineralization is well known and it enables to associate a fresh water to a marked chloruro-bicarbonated nature, a mediumly mineralized water to a sulphato-chlorinated nature and a loaded water to a predominant chloruro-sulphated property.

Key-words : Facies, mineralization, coastline water, Idini, Trarza, Mauritania

INTRODUCTION

La nappe douce du Continental Terminal du Trarza renferme d'importantes ressources d'eaux fossiles dont l'accumulation se serait effectuée à la dernière période pluvieuse de l'Holocène entre 7 000 et 4 000 ans /1/.

La minéralisation actuelle de ces eaux peut être la conséquence d'une intrusion saline, favorisée par la géométrie en "creux" de la nappe et la nature semi-perméable à perméable des matériaux et/ou le résultat d'interactions eau-roche dans les systèmes aquifères /2/. La composition chimique des eaux paraît alors liée à la lithologie et à la nature des terrains, à la géographie et au climat de la région et à la profondeur des niveaux d'eau. La conjugaison de ces phénomènes divers peut conduire à des variations importantes des caractéristiques des eaux.

Les études hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe du Trarza (aquifères multicouches) en général et du champ captant d'Idini pour l'approvisionnement de la ville de Nouakchott en particulier, visent la définition et l'explication du fonctionnement des aquifères. Les différentes études effectuées (13/, 14/, 15/, 16/, 17/) sur la nappe subphréatique dans le but de cerner ses caractéristiques en relation avec les facteurs d'influence, ont abouti à l'hypothèse de l'existence d'un "front salé" qui avancerait dans le temps, de l'océan vers le continent, menaçant à terme les ressources d'eau douce de la nappe Continental Terminal.

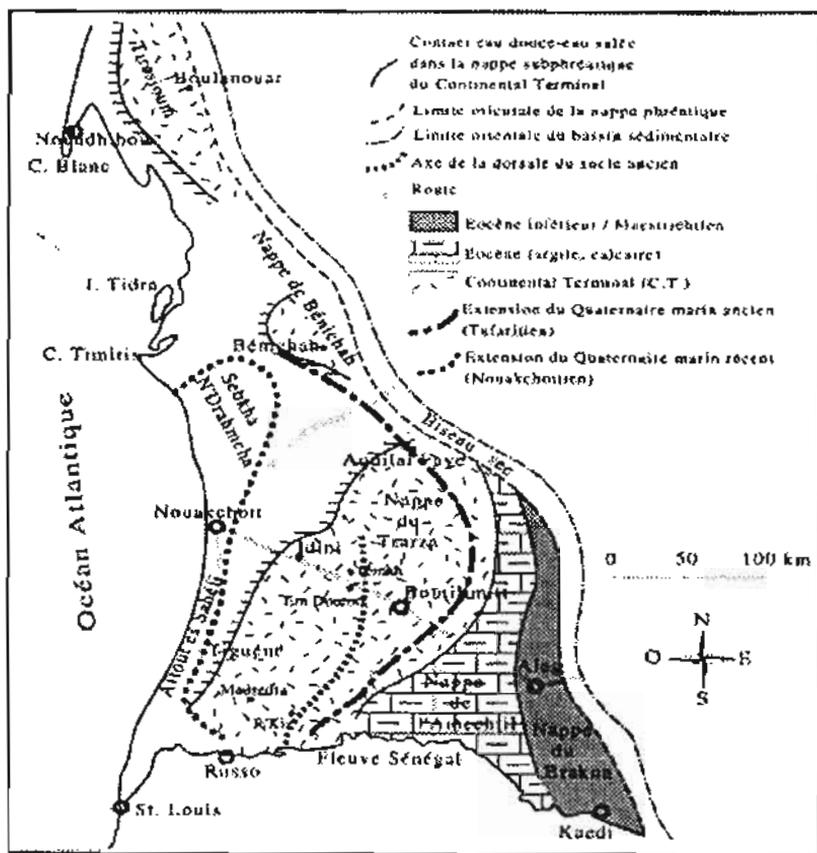
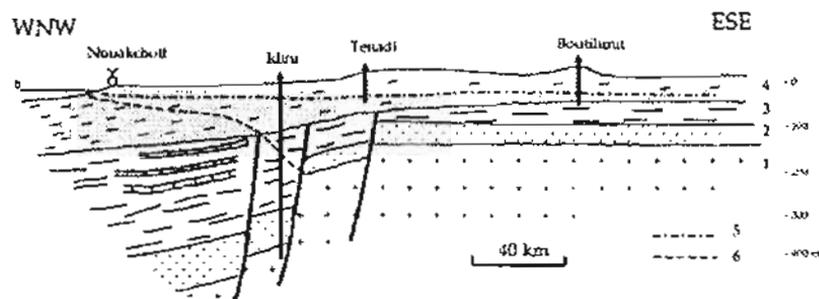


Fig. 1.1. Bassin sédimentaire côtier sénégal-mauritanien (d'après BRGM, 1986, modifié)



1 : Soile 2 : Crétacé supérieur 3 : Eocène inférieur et moyen 4 : Continental terminal (CT) et quaternaire 5 : Niveau piézométrique de l'aquifère du C.T.

Fig. 1.2. Coupe géologique et hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier (d'après R. Guiraud, 1991)

L'objectif de cette étude est de réaliser pour cette nappe une description physico-chimique par l'établissement des faciès hydrochimiques des eaux et leurs relations avec la minéralisation et ainsi préciser la qualité des eaux et leurs évolutions.

II Etude hydrochimique

Les échantillons étudiés proviennent du champ captant d'Idini, situé à une soixantaine de kilomètres à l'est de l'océan atlantique et dans le bassin sédimentaire côtier sénégal-mauritanien (fig. 1-1). Les forages captent la nappe subphréatique du Continental Terminal (sur une épaisseur variant de 8 à 24 m, entre 46 m et 97 m de profondeur) qui présente une sédimentation lentiforme et stratiforme d'horizons sablo-argileux et argilo-sableux continus sur une centaine de kilomètres carrés autour d'Idini. Le bassin côtier présente la structure d'un ensemble de failles normales de direction sub-méridienne qui effondrent progressivement vers l'ouest le socle et sa couverture détritique suivant un dispositif "en marche d'escalier". La série lithostratigraphique s'échelonne du Crétacé au Quaternaire représentés par des sédiments détritiques de faciès marins littoraux ou continentaux d'épaisseurs très variables (fig. 1-2) :

- le Maastrichtien formé de sables fins et argileux (10 à 60 m) à l'est et au nord et de grès (80 à 170 m) à l'ouest de la dorsale de R'Kjz ;
- le Paléocène et l'Eocène, constitués d'une série marine de calcaires marneux et d'argiles surmontés par des marnes gréseuses et sableuses ;
- le Continental Terminal représenté par un faciès détritique à alternances d'argiles, de sables grossiers, de grès et de grès argileux versicolores, lenticulaires ou stratiformes ;
- le quaternaire, formé de dépôts marins et lacustres (grès glauconieux, grès ferrugineux, sables et faluns) et des formations éoliennes actuelles de faible épaisseur.

A Idini, les faciès géologiques s'individualisent sur une épaisseur de 150 m, essentiellement en trois niveaux bien distincts :

- à la base du C.T., entre 170 et 148 m, on rencontre des sables grossiers plus ou moins argileux alternant avec des couches d'argile ;
- une série épaisse de grès argileux, identifiée entre 148 et 84 m de profondeur. Ces grès faiblement consolidés renferment une fraction sableuse très fine et sont traversés par des passées sableuses ou argileuses et certains contiennent une forte proportion de gravillons ferrugineux ;
- au sommet du C.T., on distingue une série de sables variés où alternent des niveaux plus ou moins fins ou grossiers et plus ou moins argileux. Un niveau plus argileux qui n'est pas toujours présent, sépare cette série en deux ensembles.

Les nappes du Continental Terminal sont des aquifères multicouches, variables selon la zone considérée du bassin. Dans la région d'Idini, trois horizons aquifères, séparés par des niveaux de grès argileux et d'argiles lenticulaires, sont observés et correspondent à une nappe phréatique libre dans des sables grossiers, (10 à 40 m de profondeur, 1 g.l⁻¹ de sel dissous), à une nappe subphréatique captive de grès argileux, nappe douce (0,3 g.l⁻¹) située entre 60 à 90 m de profondeur et à un niveau profond (150 à 170 m) de sables grossiers et argiles avec une salinité de 4 g.l⁻¹.

Les analyses des eaux concernent la température, le pH, la conductivité électrique, la minéralisation, les éléments majeurs Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ et NH_4^+ pour les cations et Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{--} , NO_3^- et NO_2^- pour les anions et quelques éléments traces : Br, F, Fe, Cu, Cr, Zn et Pb. Les eaux sont également caractérisées par les rapports ioniques : i.e.b., SO_4/Cl , HCO_3/Cl , SO_4/HCO_3 , Cl/M , Br/Cl , Na/Cl , Na/Ca et Mg/Ca .

La minéralisation est déterminée à partir de mesure de conductivité électrique à 20°C effectuée à l'aide de conductimètre à microprocesseur WTW 196. Les dosages des chlorures et des bicarbonates ont été réalisés respectivement par la méthode de Mohr et par volumétrie à l'acide chlorhydrique. Les dosages des sulfates par néphélométrie au chlorure de baryum, des nitrates au salicylate de sodium, des nitrites au réactif de Zambelli et de l'ammonium à l'orthophénathroline sont réalisés sur un spectrophotomètre Spectronic 20 D (Milton Roy Company). Le calcium et le magnésium sont dosés simultanément par la méthode complexométrique à l'E.D.T.A. La teneur en sodium et potassium est déterminée par photométrie de flamme sur un Flame Photometer JENWAY PFP 7. Ces caractéristiques physico-chimiques sont connues avec une précision comprise entre 2 et 6 %. La teneur en fer, cuivre, chrome, zinc et plomb des eaux a été déterminée par dosage spectrophotométrie d'absorption atomique.

Les résultats obtenus sur des prélèvements effectués entre septembre 1992 et août 1993 sont regroupés dans le tableau 1. La composition moyenne de l'eau (exprimée en mg.l^{-1}) est constituée par ordre de prédominance, de chlorures-sulfates-bicarbonates pour les anions et de sodium-calcium-magnésium-potassium pour les cations. Cette prédominance ionique indique, en première approximation, que les eaux sont de faciès "chloruré sodique".

Forage	C ₂₀	TH	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	Br	F	Σi	B.i
F1	468	2,08	1,24	0,84	2,89	0,23	2,10	1,06	2,19	0,0025	0,0055	10,6	3,0
F2	505	2,24	1,39	0,85	2,97	0,24	2,28	0,96	2,30	0,0031	0,0042	11,0	1,8
F3	468	2,12	1,28	0,84	2,82	0,23	2,15	1,58	1,61	0,0027	0,0053	10,5	3,4
F4	559	2,73	1,65	1,09	3,14	0,24	2,71	1,37	2,15	0,0038	0,0087	12,4	2,0
F5	1122	6,29	4,00	2,29	5,84	0,37	5,64	1,11	5,63	0,0082	0,0345	24,9	-0,6
F6	1009	5,33	3,21	2,11	5,71	0,38	5,55	1,16	4,74	0,0079	0,0303	27,9	0,7
F7	863	5,16	3,32	1,84	4,18	0,31	4,69	0,85	4,27	0,0064	0,0229	19,5	1,9
F8	1092	6,73	4,29	2,43	5,42	0,37	5,79	0,96	5,45	0,0081	0,0324	24,8	-2,2
F9	766	4,20	2,73	1,48	4,33	0,28	4,27	1,09	3,33	0,0055	0,0132	17,5	-1,3
F10	402	2,02	1,32	0,71	2,43	0,21	1,92	1,06	1,51	0,0025	0,0063	9,2	-3,7
F11	1024	5,28	3,38	1,90	5,68	0,37	7,49	1,04	3,05	0,0111	0,0297	23,0	2,5
F12	555	2,59	1,58	1,01	3,40	0,24	2,73	1,10	2,39	0,0038	0,0132	12,5	0,1
F13	618	3,02	1,82	1,20	3,44	0,25	2,68	1,05	3,08	0,0036	0,0124	13,5	1,7
F14	958	5,36	3,45	1,91	5,08	0,33	4,97	0,77	4,61	0,0069	0,0142	21,1	-3,8
F16	424	1,71	1,14	0,57	2,85	0,22	1,81	1,20	1,89	0,0024	0,0074	9,7	2,7
F17	383	1,69	1,05	0,64	2,35	0,21	1,80	1,10	1,27	0,0023	0,0074	9,4	-1,7
F18	249	1,21	0,78	0,43	1,46	0,20	1,07	1,02	0,69	0,0014	0,0105	9,5	-2,8
F19	337	1,76	1,17	0,59	1,75	0,19	1,65	1,04	0,97	0,0019	0,0068	9,7	-0,8
F20	517	3,08	2,03	1,05	2,37	0,21	2,34	1,03	2,35			11,4	0,1
F23	276	1,29	0,92	0,37	1,57	0,19	1,32	0,91	0,92	0,0019	0,0105	9,6	3,6

Forage	T °C	pH	M ₂₀	SO ₄ /Cl	HCO ₃ /Cl	SO ₄ /HCO ₃	i.e.b	Cl/M	Br/Cl	Na/Cl	Na/C _a	Mg/C _a
F1	32,9	7,16	335	1,05	0,51	2,09	-0,49	0,22	0,0012	1,38	2,34	0,68
F2	32,6	7,31	362	1,01	0,42	2,40	-0,41	0,22	0,0014	1,31	2,13	0,61
F3	32,5	7,40	335	0,75	0,73	1,02	-0,42	0,23	0,0013	1,32	2,20	0,66
F4	31,1	7,20	400	0,79	0,50	1,62	-0,25	0,24	0,0014	1,16	1,91	0,66
F5	32,0	7,13	851	1,00	0,20	5,06	-0,10	0,24	0,0014	1,04	1,46	0,57
F6	32,1	7,13	765	0,85	0,21	4,13	-0,10	0,26	0,0014	1,03	1,79	0,66
F7	32,5	7,16	655	0,91	0,18	5,14	0,04	0,25	0,0014	0,89	1,26	0,55
F8	32,3	7,27	828	0,94	0,17	5,99	0,00	0,25	0,0014	0,94	1,26	0,57
F9	33,0	7,30	555	0,77	0,26	3,09	-0,09	0,28	0,0013	1,02	1,63	0,54
F10	32,7	7,20	297	0,79	0,58	1,43	-0,40	0,23	0,0013	1,29	1,85	0,54
F11	33,5	7,31	768	0,41	0,14	2,96	0,19	0,35	0,0015	0,76	1,68	0,56
F12	33,2	7,37	397	0,88	0,40	2,18	-0,34	0,24	0,0014	1,25	2,15	0,64
F13	33,3	7,65	442	1,15	0,39	2,95	-0,38	0,22	0,0013	1,29	1,89	0,66
F14	33,1	7,06	726	0,93	0,16	6,13	-0,09	0,24	0,0014	1,02	1,47	0,55
F16	33,6	7,26	303	1,05	0,66	1,59	-0,70	0,21	0,0013	1,58	2,51	0,50
F17	32,9	7,30	274	0,71	0,61	1,16	-0,42	0,23	0,0013	1,30	2,24	0,62
F18	33,3	7,47	192	0,65	0,95	0,69	-0,54	0,20	0,0013	1,36	1,87	0,55
F19	33,0	7,38	246	0,59	0,63	0,94	-0,18	0,24	0,0011	1,07	1,50	0,51
F20	32,6	7,76	370	1,00	0,44	2,29	-0,10	0,22		1,01	1,16	0,52
F23	33,2	7,76	212	0,70	0,70	1,01	-0,34	0,22	0,0014	1,19	1,70	0,40

Tableau 1 - Résultats d'analyse des eaux des forages d'Idfai de septembre 1992 à août 1993
 fon (még.l⁻¹) ; C₂₀ (μ.S.cm⁻¹) ; M₂₀ (mg.l⁻¹) ; Σi : somme des ions ; B.i : Balance ionique

III Profils hydrochimiques des eaux

1. Caractères physico-chimiques

Suivant la règle des prédominances ioniques /9/ et des proportions relatives des ions dominants /8/, le faciès chloruré sodique général se différencie (fig. 2) en trois faciès chimiques sodo-calciques ($\text{Na} > \text{Ca}$) mixtes : chloruro-sulfaté, sulfato-chloruré et chloruro-bicarbonaté, respectivement caractérisés par l'ordre de prédominance : $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3$, $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$ et $\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4$. La représentation des diagrammes carrés des éléments majeurs permet d'illustrer sur la figure 3, le profil chimique de ces faciès. Cette figure met en évidence la relation entre faciès chimique et minéralisation, ainsi on observe que le chloruro-bicarbonaté correspond aux eaux plus douces, le sulfato-chloruré aux eaux intermédiaires et le chloruro-sulfaté aux eaux plus chargées.

Les propriétés hydrochimiques des eaux, notamment la minéralisation et les faciès chimiques, peuvent être illustrées sur un diagramme Piper qui permet de reporter simultanément et de façon synthétique, la composition chimique majeure d'un grand nombre d'échantillons. La représentation des éléments majeurs des eaux d'Idini, corrélativement à la minéralisation, effectuée sur un diagramme Piper (figure 4-1) montre dans le triangle des anions que les eaux les plus douces se situent entre les pôles chloruré et bicarbonaté. Par contre, les eaux les plus chargées sont regroupées en position médiane entre les pôles chloruré et sulfaté. Ceci traduit le caractère mixte chloruro-bicarbonaté des eaux douces et chloruro-sulfaté des eaux minéralisées.

Pour les cations, on observe un caractère mixte alcalins-calcium avec une prédominance sensible des alcalins. Ce caractère ne présente pas une évolution bien définie avec la minéralisation : les eaux restent indifférenciées. Le mélange global, toutes eaux confondues, est fortement de type Cl-SO_4 ($\text{Cl} + \text{SO}_4 >> \text{HCO}_3$) avec des eaux chargées légèrement de type Ca-Mg ($\text{Ca} + \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$) et les eaux plus douces à tendance Na-K ($\text{Na} + \text{K} > \text{Ca} + \text{Mg}$).

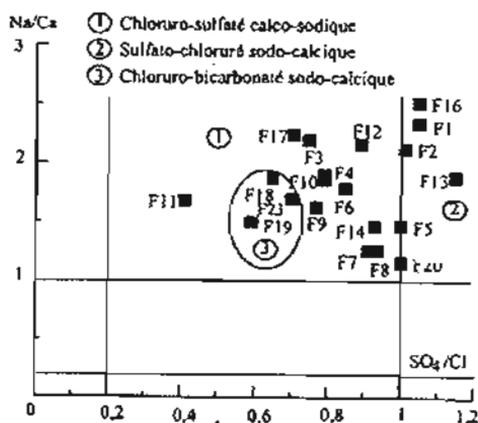


Fig. 2 : Projection des eaux d'Idini dans l'espace des faciès hydrochimiques

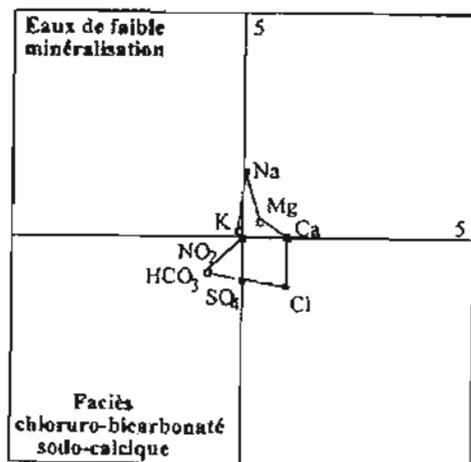


Fig. 3 : Diagrammes carrés des éléments majeurs des principaux faciès hydrochimiques des eaux du champ captant d'Idini

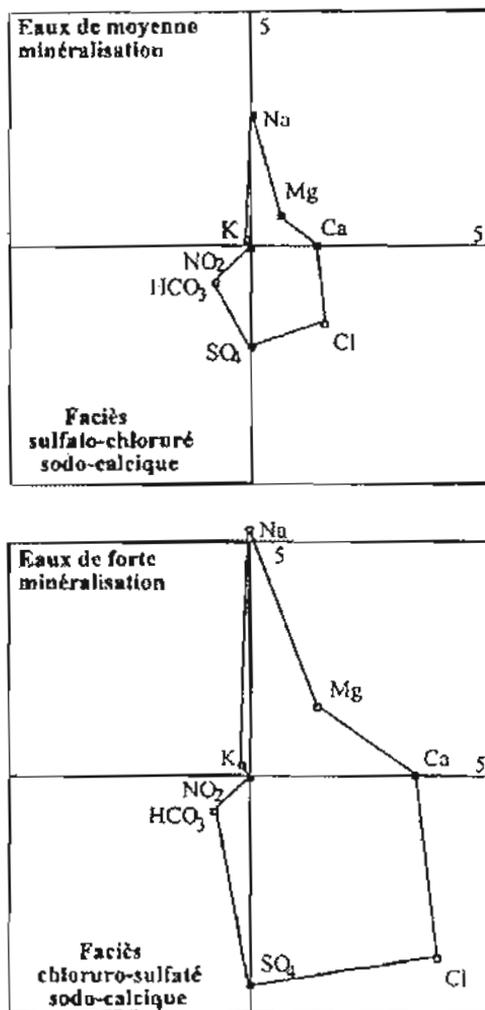


Fig. 3 : Diagrammes carrés des éléments majeurs des principaux faciès hydrochimiques des eaux du champ captant d'Idini

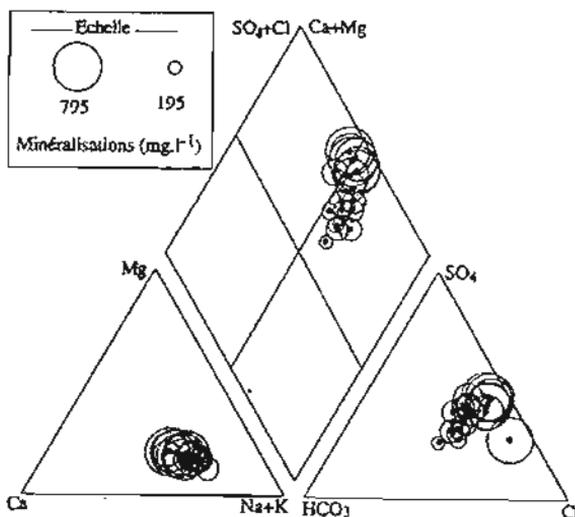


Fig. 4-1 : Diagramme Piper de la minéralisation (mg.l⁻¹) des eaux des forages d'Idini

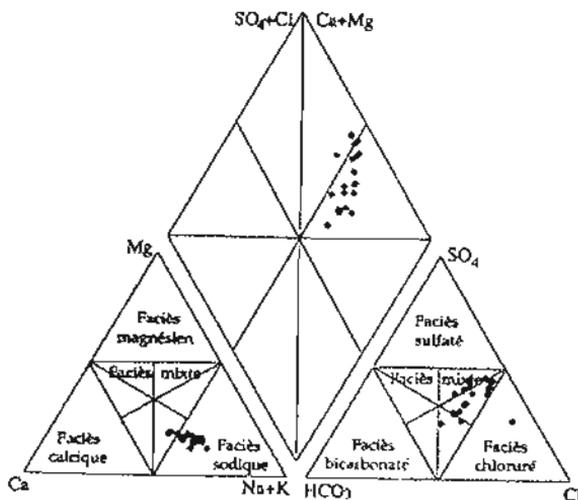


Fig. 4-2 : Diagrammes Piper de la composition chimique des ions majeurs (meq.l⁻¹) des eaux des forages d'Idini

Le diagramme Piper relatif à la composition des majeurs des eaux d'Idini, présenté sur la figure 4-2, met en évidence trois faciès mixtes (chloruro-sulfaté, sulfato-chloruré et chloruro-bicarbonaté) pour les anions et un faciès mixte (sodo-calcique) pour les cations. La dominante générale est celle du faciès chloruro-sulfaté avec deux tendances secondaires sulfato-chlorurée et chloruro-bicarbonatée. Cette répartition des faciès est en accord avec celle établie sur la base des rapports caractéristiques SO_4/Cl , HCO_3/Cl et Na/Ca .

Les faciès mixtes exprimés par les eaux d'Idini et leurs tendances vers d'autres faciès mixtes dénotent d'une influence plus continentale qu'océanique. Le caractère chloruré sodique typique de l'eau de mer est alors fortement altéré par les faciès mixtes d'origine continentale.

III-2. Examen des caractères

Dans les eaux, parallèlement à l'évolution globale, ont constamment lieu des variations des éléments chimiques, souvent dépendantes les uns des autres. L'établissement du comportement physico-chimique s'appuie sur des déterminations obtenues par l'examen d'un ensemble de points et de paramètres divers. Aussi, les études statistiques, lorsque les variables sont nombreuses, se prêtent aisément à une exploitation plus systématique des données. L'analyse multivariée en composantes principales (A.C.P.) est adaptée à l'exploitation et à l'interprétation des données physico-chimiques. Elle permet de dégager les liens entre variables chimiques pour donner des informations sur l'évolution chimique des eaux et de déterminer les caractères dominants dans le milieu aquifère. Les relations entre les variables permettent, en déterminant les axes principaux, de les regrouper en variables ayant des caractéristiques identiques.

L'A.C.P., par des résolutions d'algèbre linéaire et de calcul matriciel, conduit à la détermination d'un ou de plusieurs "plans factoriels" sur le ou lesquels on projette les variables et les individus. Elle permet en outre de calculer le pourcentage de l'information ainsi récupérée et figurant sur le ou les plans factoriels et de révéler les relations entre caractéristiques physico-chimiques, entre individus et entre caractéristiques et individus.

Corrélations entre caractéristiques chimiques

Le tableau 2 qui représente la matrice de corrélations entre variables, montre que la minéralisation totale (ou la conductivité électrique ou encore la somme des ions) réalise avec les espèces ioniques, une forte corrélation (plus de 90%). Ce fait traduit une évolution quasi-homogène entre minéralisation et éléments dissous. Une corrélation similaire existe également avec les rapports SO_4/HCO_3 et HCO_3/Cl qui, du fait de leur forte liaison aux ions majeurs, semblent caractériser la composition chimique, le faciès chimique et la minéralisation. Ainsi, un rapport HCO_3/Cl important correspond à une eau douce alors qu'un rapport SO_4/HCO_3 élevé à une eau relativement minéralisée.

Les fortes corrélations entre les différents ions majeurs semblent indiquer la présence de minéraux constitués essentiellement d'associations de ces ions. En particulier, les minéraux sulfatés : le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), l'anhydrite ($CaSO_4$), l'épsonite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), l'hexahydrate ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$), la kieserite ($MgSO_4 \cdot H_2O$), l'arcanite (K_2SO_4), la mirabilite ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) et la themadite ($Na_2SO_4 \cdot 2H_2O$), les chlorures alcalins (la sylvite : KCl et la halite : $NaCl$) et alcalino-terreux (hydrophyllite : $CaCl_2$, antarctite : $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, chloromagnésite : $MgCl_2$ et bischofite : $MgCl_2 \cdot 6H_2O$), la fluorine CaF_2 et les minéraux carbonatés : la calcite et l'aragonite ($CaCO_3$), la magnésite ($MgCO_3 \cdot 2H_2O$), la dolomite ($CaMgCO_3$) et la huntite ($CaMg(CO_3)_4$), pourraient être rencontrés dans les sédiments de l'aquifère ou dans son environnement immédiat. En effet, les aquifères du Continental Terminal sont contenus dans des matériaux sédimentaires hétérogènes : argiles, sables, grès et calcaires qui sont en mesure de produire par altération ces composés. Ce fait semble être confirmé par l'état de saturation de eaux par rapport diverses phases minérales /1, 2, 8/ et par la nature des sels dissous théoriques susceptibles de constituer la minéralisation des eaux /2/.

La variation de la conductivité électrique à 20 °C en fonction de la teneur en sodium et en chlorures (figure 5), met en évidence leur forte liaison. En effet, les droites de régression des évolutions de la conductivité électrique par rapport aux espèces dissoutes, se caractérisent par des coef-

ficients de détermination supérieurs à 90 %. Aussi, les eaux de la nappe d'Idimi, quelque soit la minéralisation, se constituent de manière uniforme en espèces ioniques. Par contre, il y a absence de liaison entre conductivité électrique et les autres caractéristiques ($R^2 < 0,60$), à l'exception des rapports HCO_3/Cl et SO_4/HCO_3 .

Élément	T	pH	M20	TH	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	NO ₂	NO ₃	SO ₄	Br	F
T	1,00	0,34	-0,29	-0,37	-0,29	-0,36	-0,25	-0,27	-0,19	-0,36	0,11	0,37	-0,35	-0,19	-0,22
pH	0,34	1,00	-0,50	-0,45	-0,44	-0,48	-0,36	-0,53	-0,46	-0,01	-0,03	0,01	-0,49	-0,43	-0,37
C20	-0,30	-0,50	1,00	0,99	0,98	0,99	0,98	0,96	0,96	-0,20	-0,20	0,08	0,95	0,96	0,88
M20	-0,29	-0,50	1,00	0,99	0,98	0,99	0,98	0,96	0,96	-0,22	-0,21	0,10	0,95	0,96	0,89
TH	-0,32	-0,45	0,99	1,00	1,00	0,99	0,94	0,95	0,94	-0,27	-0,21	0,09	0,96	0,93	0,88
Ca	-0,29	-0,44	0,98	1,00	1,00	0,99	0,93	0,94	0,94	-0,30	-0,21	0,11	0,95	0,93	0,87
Mg	-0,36	-0,48	0,99	0,99	0,99	1,00	0,96	0,97	0,94	-0,21	-0,19	0,06	0,96	0,93	0,88
Na	-0,25	-0,36	0,98	0,94	0,93	0,96	1,00	0,98	0,96	-0,13	-0,19	0,08	0,92	0,93	0,86
K	-0,27	-0,53	0,98	0,95	0,94	0,97	0,98	1,00	0,97	-0,18	-0,21	0,10	0,92	0,96	0,91
Cl	-0,19	-0,46	0,96	0,94	0,94	0,94	0,96	0,97	1,00	-0,21	-0,21	0,14	0,85	1,00	0,88
HCO ₃	-0,36	-0,01	-0,22	-0,27	-0,30	-0,21	-0,12	-0,18	-0,21	1,00	-0,12	-0,51	-0,26	-0,20	-0,20
NO ₂	0,11	-0,03	-0,21	-0,21	-0,21	-0,19	-0,19	-0,21	-0,21	-0,12	1,00	-0,30	-0,13	-0,24	-0,28
NO ₃	0,32	0,01	0,10	0,09	0,11	0,06	0,08	0,10	0,14	-0,51	-0,30	1,00	0,03	0,16	0,20
SO ₄	-0,35	-0,49	0,95	0,96	0,95	0,96	0,92	0,92	0,85	-0,26	-0,13	0,03	1,00	0,83	0,81
Br	-0,19	-0,43	0,96	0,93	0,93	0,93	0,95	0,95	1,00	-0,20	-0,24	0,16	0,83	1,00	0,89
F	-0,22	-0,37	0,89	0,88	0,87	0,88	0,86	0,91	0,88	-0,20	-0,28	0,20	0,81	0,89	1,00
Ca	-0,29	-0,50	1,00	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97	-0,20	-0,20	0,08	0,95	0,96	0,88
SO ₄ /Cl	-0,14	-0,06	0,13	0,13	0,12	0,15	0,12	0,05	-0,09	-0,11	0,31	-0,34	0,38	0,10	0,07
HCO ₃ /Cl	0,23	0,43	-0,92	-0,90	-0,90	-0,90	0,90	-0,86	-0,89	0,36	0,09	-0,08	-0,88	-0,87	-0,71
SO ₄ /HCO ₃	-0,24	-0,48	0,90	0,93	0,93	0,92	0,85	0,86	0,80	-0,46	-0,09	0,14	0,96	0,78	0,74
l.e.b.	-0,26	-0,18	0,77	0,81	0,82	0,78	0,69	0,72	0,83	-0,32	-0,25	0,19	0,65	0,83	0,69
Cl/M	0,03	-0,27	0,62	0,58	0,58	0,57	0,65	0,64	0,79	-0,04	-0,20	0,16	0,38	0,79	0,58
Br/Cl	-0,19	0,33	-0,11	-0,12	-0,13	-0,10	-0,11	-0,07	-0,05	0,36	-0,06	-0,36	0,16	0,03	0,14
Na/Cl	0,24	0,13	-0,72	-0,77	-0,78	-0,74	0,63	-0,68	-0,79	0,35	0,25	-0,23	-0,59	-0,79	-0,67
Na/Cr	0,24	-0,10	-0,51	-0,62	-0,65	-0,57	-0,36	-0,43	-0,40	0,49	0,27	-0,24	-0,51	-0,49	-0,48
Mg/Cr	0,38	-0,35	0,17	0,09	0,03	0,18	0,24	0,19	0,10	0,47	0,21	-0,42	0,18	0,09	0,02

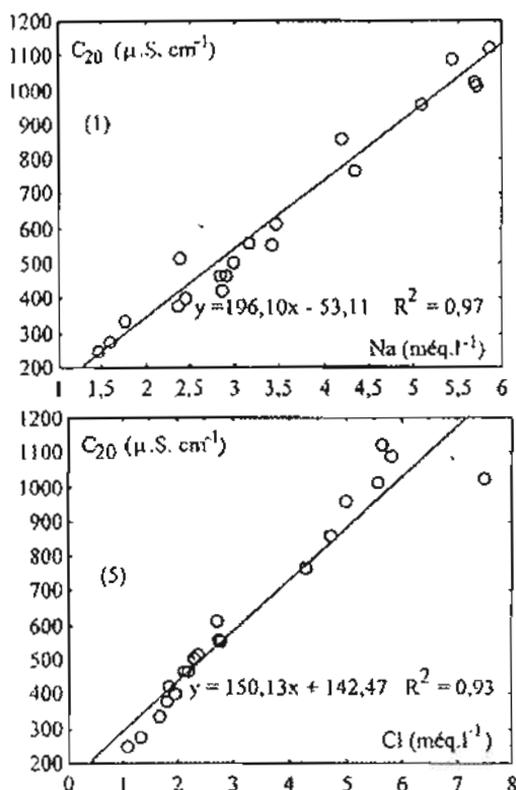


Fig. 5 : Variation de la conductivité électrique en fonction des teneurs en sodium (1) et en chlorures (2) des eaux des forages d'Idini.

Les résultats de l'analyse factorielle sont regroupés dans les tableaux 3 qui présentent les valeurs propres de la matrice de corrélation, le pourcentage de variance expliqué par chacun des facteurs ainsi que les vecteurs propres et les coordonnées des éléments. Les quatre premiers axes factoriels expliquent 85,56 % de la variance totale.

Élément	C20	Σ	SO4/Cl	HCO3/Cl	SO4/HCO3	i.e.b	Cl/M	Br/Cl	Na/Cl	Na/Ca	Mg/Ca
T	-0,30	-0,29	-0,14	0,23	-0,24	-0,26	0,03	-0,19	0,24	-0,24	-0,38
pH	-0,30	-0,50	-0,06	0,43	-0,48	-0,18	-0,27	0,31	0,13	-0,10	-0,35
C20	1,00	1,00	0,13	-0,52	0,80	0,77	0,62	-0,11	-0,72	-0,31	0,17
M20	1,00	1,00	0,12	-0,51	0,81	0,77	0,61	-0,12	-0,73	-0,32	0,14
TH	0,99	0,99	0,13	-0,90	0,93	0,81	0,58	-0,12	-0,77	-0,62	0,09
Ca	0,98	0,98	0,12	-0,90	0,93	0,82	0,58	-0,13	-0,78	-0,63	0,03
Mg	0,99	0,99	0,15	-0,90	0,92	0,78	0,57	-0,10	-0,74	-0,57	0,18
Na	0,98	0,98	0,12	-0,90	0,83	0,69	0,65	-0,11	-0,63	-0,36	0,24
K	0,98	0,98	0,05	-0,86	0,86	0,72	0,64	-0,07	-0,68	-0,43	0,19
Cl	0,96	0,97	-0,09	-0,89	0,80	0,83	0,79	-0,05	-0,79	-0,49	0,10
HCO3	-0,20	-0,20	-0,11	0,36	-0,46	-0,32	-0,04	0,26	0,35	0,49	0,47
NO2	-0,20	-0,20	0,31	0,09	-0,09	-0,25	-0,20	-0,06	0,25	0,27	0,21
NO3	0,08	0,08	-0,34	-0,08	0,14	0,19	0,16	-0,36	-0,23	-0,24	-0,42
SO4	0,95	0,95	0,38	-0,88	0,96	0,65	0,38	-0,16	-0,59	-0,51	0,18
Br	0,96	0,96	-0,10	-0,87	0,78	0,83	0,79	-0,03	-0,79	-0,49	0,09
F	0,88	0,88	-0,07	-0,71	0,74	0,69	0,58	0,14	-0,67	-0,48	0,02
Σ	1,00	1,00	0,12	-0,91	0,90	0,77	0,63	-0,10	-0,75	-0,51	0,16
SO4/Cl	0,13	0,12	1,00	-0,21	0,36	-0,27	-0,53	-0,11	0,33	0,09	0,27
HCO3/Cl	-0,92	-0,91	-0,21	1,00	-0,87	-0,80	-0,64	0,14	0,74	0,51	-0,15
SO4/HCO3	0,90	0,90	0,36	-0,87	1,00	0,66	0,33	-0,34	-0,62	-0,58	0,06
i.e.b	0,77	0,77	-0,27	-0,80	0,66	1,00	0,76	-0,04	-0,92	-0,88	-0,11
Cl/M	0,62	0,63	-0,55	-0,64	0,33	0,76	1,00	0,12	-0,74	-0,30	0,03
Br/Cl	-0,11	-0,10	-0,11	0,14	-0,34	-0,04	0,12	1,00	0,03	0,12	0,08
Na/Cl	-0,72	-0,72	0,33	0,74	-0,62	-0,99	-0,74	0,93	1,00	0,83	0,17
Na/Ca	-0,31	-0,31	0,09	0,51	-0,58	-0,80	-0,30	0,93	0,83	1,00	0,41
Mg/Ca	0,17	0,16	0,27	-0,15	0,06	0,11	0,02	0,08	0,17	0,41	1,00

Tableau 2 : Matrice de corrélations des caractéristiques physico-chimiques des eaux des forages d'Idini

Facteur N°	Valeur propre	% de Variance Expliquée	% de Variance cumulée
1	15,54	59,78	59,78
2	3,04	11,70	71,48
3	2,20	8,46	79,94
4	1,46	5,62	85,56
5	1,09	4,20	89,75
6	0,95	3,64	93,39
7	0,55	2,12	95,52
8	0,45	1,75	97,26
9	0,32	1,23	98,49
10	0,22	0,84	99,33
11	0,09	0,33	99,66
12	0,03	0,12	99,78

Tableau 3-1 : Valeurs propres, pourcentages et cumuls

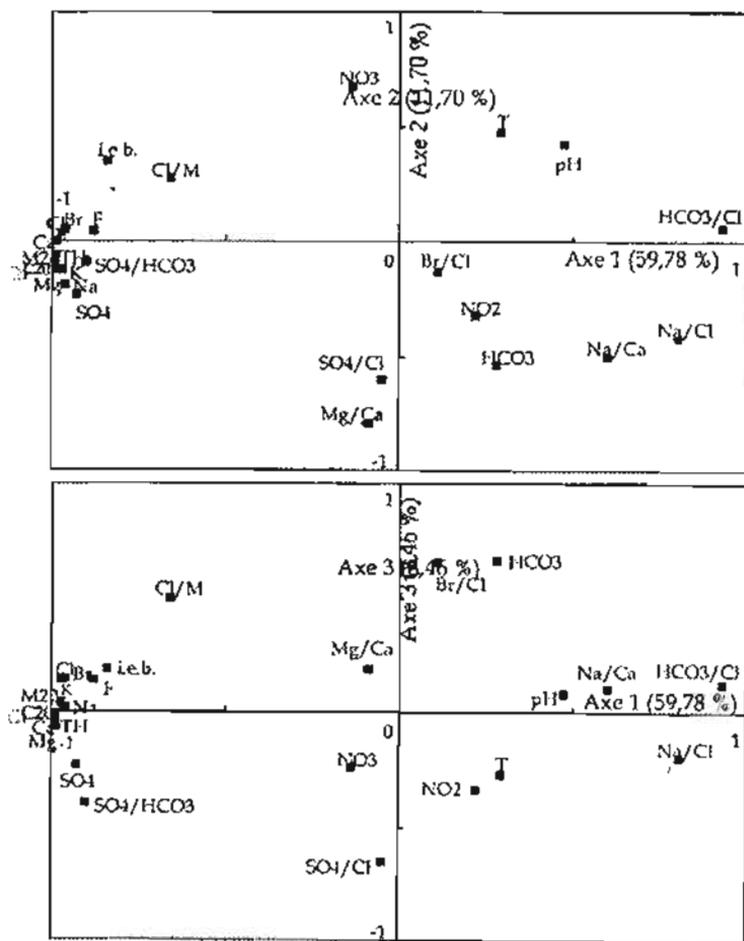


Fig. 6. A.C.P. des caractères hydrochimiques (espaces des variables des eaux des forages d'Idni)

Etude de la minéralisation en rapport avec les variables

La projection des variables (figure 6) dans les plans factoriels formés par les trois premiers axes qui expliquent 79,94 % du phénomène, illustre les corrélations entre la minéralisation et les autres propriétés des eaux.

- le premier axe (59,78 % d'information), fortement corrélé avec la conductivité électrique, les éléments essentiels dissous (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, Br et F), i.e.b., les rapports SO₄/HCO₃ et HCO₃/Cl et dans une moindre mesure avec les rapports Cl/M, Na/Cl et Na/Ca, représente l'influence des caractéristiques prédominantes des eaux. Il définit l'augmentation des ions en solution qui peut être due soit à un temps de séjour long pour permettre à l'eau d'acquérir une minéralisation importante /12, 13/ ou soit à des dissolutions et altérations de minéraux de l'encastant et des échanges de base dans les systèmes aquifères /1, 2, 8/. Sur cet axe, la minéralisation, les ions majeurs, l'i.e.b. et les rapports SO₄/HCO₃ et Cl/M sont opposés aux rapports HCO₃/Cl, Na/Cl et Na/Ca qui représentent les propriétés bicarbonatée et sodique des eaux /14, 15/ ;
- le deuxième axe factoriel (11,70 % de variance totale) représente les nitrates, correspondant aux facteurs externes au système aquifère /12/ en opposition aux rapports Mg/Ca et SO₄/Cl qui caractérisent les propriétés magnésienne et sulfatée par rapport à celles calcique et chlorurée des eaux.
- le plan factoriel 1-2 met en évidence le profil de la répartition selon la minéralisation, l'influence extérieure et le faciès chimique représenté par le rapport SO₄/Cl ;
- le troisième axe factoriel (8,46 % d'inertie) souligne les bicarbonates et le rapport Br/Cl. Il indique comme l'axe 2, une influence des caractères externes aux systèmes aquifères. Les teneurs en bicarbonates sont influencées par les équilibres calco-carboniques, d'où l'absence de leur corrélation avec la minéralisation.

Élément	Axe 1 (59,78 %)	Axe 2 (11,70 %)	Axe 3 (8,46 %)	Axe 4 (5,62 %)
T	0,29	0,47	-0,27	0,45
pH	0,47	0,42	0,08	-0,49
C ₂₀	-0,99	-0,12	-0,01	0,03
M ₂₀	-0,99	-0,09	-0,02	0,03
TH	-0,99	-0,07	-0,06	-0,08
Ca	-0,99	0,00	-0,07	-0,09
Mg	-0,99	-0,12	-0,03	-0,06
Na	-0,96	-0,19	0,02	0,17
K	-0,97	-0,12	0,04	0,12
Cl	-0,97	0,03	0,14	0,14
HCO ₃	0,28	0,54	0,66	0,03
NO ₂	0,22	-0,32	-0,34	0,03
NO ₃	-0,14	0,67	-0,24	0,38

Élément	Axe 1 (59,78 %)	Axe 2 (11,70 %)	Axe 3 (8,46 %)	Axe 4 (5,62 %)
SO ₄	-0,93	-0,23	-0,23	-0,10
Br	-0,96	0,05	0,15	0,13
F	-0,88	0,04	0,14	0,01
ΣI	-0,99	-0,12	-0,01	0,03
SO ₄ /Cl	-0,05	-0,60	-0,65	-0,33
HCO ₃ /Cl	0,93	0,06	0,12	0,01
SO ₄ /HCO ₃	-0,90	-0,09	-0,40	-0,07
i.e.b.	-0,84	0,35	0,19	-0,19
Cl/M	-0,66	0,27	0,50	0,31
Br/Cl	0,11	0,13	0,65	-0,39
Na/Cl	0,80	-0,42	-0,20	0,20
Na/Ca	0,60	-0,50	0,11	0,54
Mg/Ca	-0,09	-0,79	0,19	0,18

Tableau 3.2 : Coordonnées des descripteurs sur les quatre premiers axes principaux

Étude des caractères des prélèvements

La projection des individus dans le plan factoriel 1-2 (figure 7) met en évidence sur l'axe 1, l'opposition entre les eaux de minéralisation supérieure à 500 mg.l⁻¹ (abscisses négatives) et les eaux de salinité inférieure à cette valeur (abscisses positives). Suivant l'axe 2, il apparaît une répartition selon le faciès défini par les rapports SO₄/Cl et Mg/Ca. Ce qui fait distinguer en abscisses négatives les forages F5, F6 et F8 (minéralisées) et F1, F2, F3, F4, F12, F13, F16 et F17 caractérisés par des propriétés sulfatée et magnésienne plus prononcées et les forages F7, F9, F11 et F14 (minéralisés) et F10, F18, F19 et F23 avec ces propriétés plus faibles. Le plan factoriel 1-3 correspondant à la distribution des forages en fonction des caractères bicarbonaté et bromique suivant l'axe 3, montre dans la partie des eaux plus douces, les forages F3 et F4 exprimant le plus ces caractères et dans la partie des eaux plus chargées une opposition entre les forages F14 et F11.

La classification automatique (classification ascendante hiérarchique par la méthode Ward et la classification par nuées dynamiques) a permis d'obtenir quatre groupes pour les eaux des forages d'Idini (figure 8). Cette classification, avec des inerties interclasses et intraclasses respectives de 74,15 % et 25,85 %, caractérise ces groupes comme suit :

- le groupe C1 constitué par les forages F5, F6, F7, F8, F9, F11 et F14 rassemble les eaux de minéralisation supérieure à 500 mg.l⁻¹ et de

faciès chloruro-sulfaté à sulfato-chloruré sodo-calcique. Dans ce groupe, les caractères chloruré et calcique augmentent sur la figure 8 de bas en haut au détriment des caractères sulfaté et sodique ;

- le groupe C2, les forages F1, F2, F3, F4, F12, F13, F16 et F17 de minéralisation moyenne, définit les eaux sulfato-chlorurées à chloruro-sulfatées atypiques. Les eaux de ces forages sont à caractère essentiellement sulfaté et sodique ;
- les forages C3 rassemble F10, F18, F19 et F23 de minéralisation plus faible. La propriété sulfatée de ce groupe est relativement faible et est dominée par le caractère bicarbonaté qui s'exprime dans leur faciès chloruro-bicarbonaté ;
- le groupe C4, composé du seul forage F20 avec des caractéristiques intermédiaires de ceux des trois groupes. Les eaux de ce forage sont relativement sulfatées, moyennement chlorurées et sodiques et les plus calciques des forages étudiés.

Ces quatre groupes qui distinguent la répartition des propriétés physico-chimiques des eaux, sont distribués de manière uniforme dans le champ captant, chacun d'eux définit une localisation propre non dispersive (figure 9). Cette répartition spatiale est en accord avec celle de la minéralisation et des éléments majeurs.

IV. Étude de la qualité chimique des eaux

Les eaux souterraines ne sont pas chimiquement "pures", elles renferment toujours des substances minérales dissoutes qui leur confèrent certaines de leurs caractéristiques, en particulier celles physico-chimiques /16/. La minéralisation constitue le premier élément caractéristique qui, pour une eau de boisson de bonne qualité, ne dépasse pas quelques centaines de milligrammes par litre. Elle peut être très variable suivant les conditions climatiques : une eau de concentration en sels au plus 500 mg.l⁻¹ s'accommode avec une alimentation en zone humide alors qu'en milieu aride, une eau trop douce présente des inconvénients pour la consommation humaine. Le tableau 4 présente quelques caractéristiques chimiques de l'eau potable et les valeurs moyenne, minimale et maximale des concentrations dans les eaux étudiées.

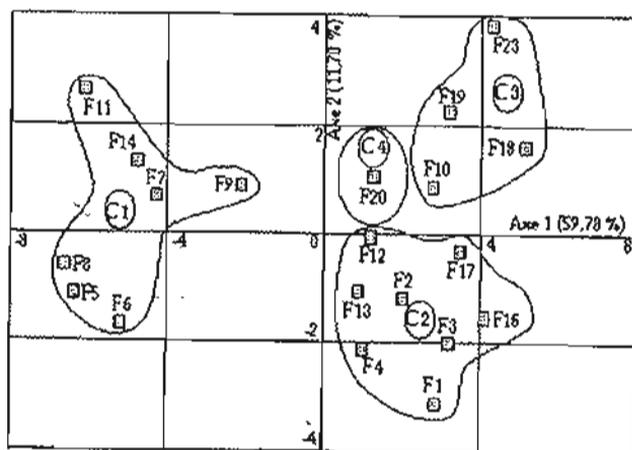


Fig. 8 : Classification automatique des eaux des forages d'Idini

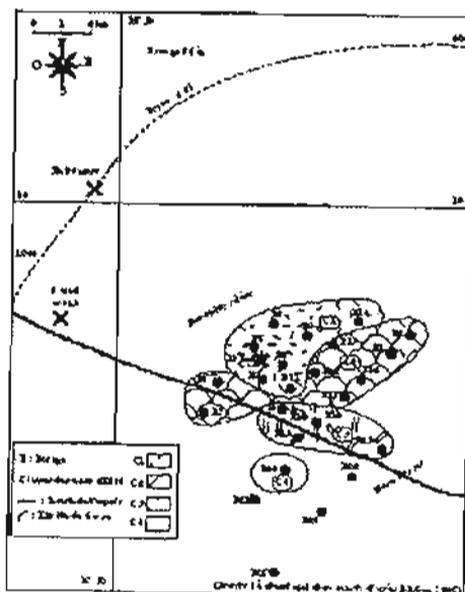


Fig. 9 : Répartition spatiale dans le champ captant d'Idini des classes d'eau obtenues par A.C.P.

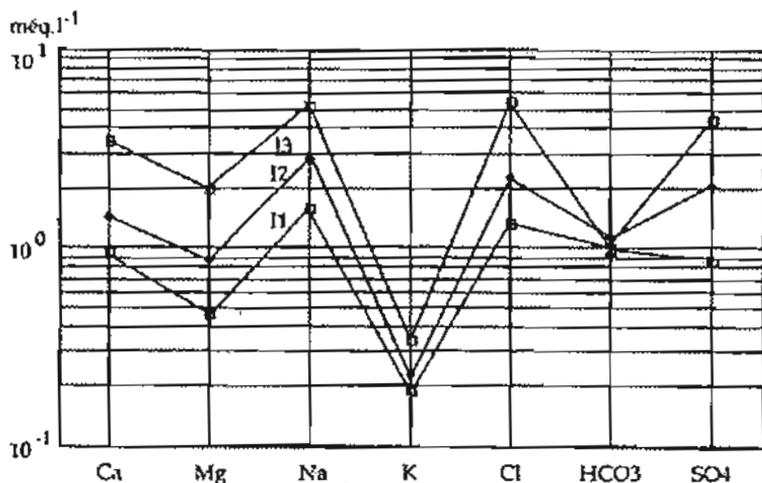


Fig. 10 : Diagramme Schöeller de potabilité des classes d'eaux d'Idini

Dans le tableau 5, sont regroupés les critères d'appréciation de la qualité chimique de l'eau en zones arides. Ce tableau constitue la grille de classification normative à partir de laquelle la potabilité de l'eau est étudiée par diagramme Schöeller.

Le tableau 6 présente la composition chimique des majeurs des classes I1, I2, I3 des eaux d'Idini. Sur la figure 10 présente le diagramme Schöeller de potabilité de ces eaux. Cette figure 10 montre que les échantillons I1 et I2 qui correspondent respectivement aux eaux douces et aux eaux de moyenne minéralisation à Idini, sont de bonne qualité chimique, les concentrations des espèces chimiques sont inférieures à 3 m.éq.l⁻¹. Par contre, la classe I3 qui représente les eaux plus minéralisées avec des teneurs en TH, Na, Cl et SO₄ supérieures à 5 m.éq.l⁻¹, est de qualité passable. Pour toutes les classes, les pics les plus élevés correspondent aux chlorures et au sodium, indiquant ainsi la prédominance de ces ions et le minimum pour le potassium. Les espèces chimiques susceptibles d'altérer la qualité des eaux à Idini sont les chlorures, les sulfates, le sodium et le potassium. Les teneurs de ces ions confèrent une qualité passable aux eaux

plus minéralisées. Ces dernières ont teneurs en potassium supérieures aux normes.

La présence de métaux lourds ou de composés azotés (nitrites, nitrates, ammoniacque), même à des teneurs faibles, peut altérer la qualité chimique. Les eaux d'Idini renferment des quantités de nitrites faibles (en moyenne $0,016 \text{ mg.l}^{-1}$) (tableau 1), de même que pour les nitrates (moyenne $0,25 \text{ mg.l}^{-1}$) ainsi que pour l'ammoniacque (moyenne $0,05 \text{ mg.l}^{-1}$). Mais, cependant, durant l'hivernage, ce dernier élément peut se trouver présent à des teneurs importantes dépassant la limite admise par les normes : ces teneurs varient globalement en juillet et en août 1993 pour la plupart des eaux entre $0,108$ à $1,28 \text{ mg.l}^{-1}$. Les concentrations en fer, en cuivre, en chrome et en plomb (tableau 1) de ces eaux, sont faibles et très inférieures aux valeurs établies par les normes.

V Discussion

Les compositions chimiques des eaux d'Idini sont quantitativement hétérogènes, mais qualitativement homogènes. Les prédominances chlorurée ou sulfatée pour les anions et exclusivement sodique pour les cations déterminent les faciès fondamentaux des eaux qui sont, à priori, chlorurés sodiques. Mais, la présence d'ions secondaires, en proportions relativement importantes, différencie ces faciès en faciès mixtes. Aussi, trois types de faciès sodo-calciques ont été identifiés : le faciès chloruro-sulfaté, le plus fréquemment rencontré dans les eaux d'Idini et qui, associé aux tendances sulfato-chlorurée et/ou calco-sodique, caractérise les eaux plus chargées ; le faciès sulfato-chloruré qui distingue les eaux moyennement minéralisées et le faciès chloruro-bicarbonaté correspondant aux eaux plus douces /2/, /8/. Ces faciès traduisent la forte continentalité des eaux, sujet à des interactions diverses dont une incidence marine apparaît non conséquente. En effet, les relations entre chlorures et teneurs en ions majeurs établissent que les eaux d'Idini ont une charge ionique relative par rapport aux chlorures, plus importante que l'eau de mer /2/, /17/. Ce qui traduit une faiblesse du caractère marin de ces eaux.

La corrélation faciès chimique-minéralisation totale établit le fait que les eaux les plus minéralisées se distinguent par les caractères plus chloruré et calcique, les eaux intermédiaires par les propriétés plus sulfatées et

sodiques et les eaux plus douces par les caractères plus bicarbonatés. Le développement de ces propriétés, des eaux douces aux eaux plus minéralisées, met en jeu une perte du caractère bicarbonaté par perturbation des équilibres calco-carboniques due à des teneurs de plus en plus importantes en sulfates. L'apport de ces derniers est estompé par des phénomènes de sursaturation des eaux vis-à-vis des composés sulfatés. La compétition sulfates-chlorures devient alors à l'avantage des chlorures qui imposent graduellement leur prédominance lorsque les eaux sont à plus forte minéralisation /2/, /8/.

Les corrélations entre la conductivité électrique et les concentrations des diverses espèces chimiques indiquent que les éléments dissous proviennent principalement des interactions des eaux avec les minéraux de l'environnement. Les profils des espèces ioniques et de la minéralisation attestent que les processus de salinisation sont liés aux caractéristiques de l'aquifère, notamment aux interactions eau-roche, cependant, ce fait n'exclut pas l'avancée du front salé. Ce phénomène apparaît pour le moment relativement peu conséquent, donc diffus et son action est alors masquée par les interactions eau-encaissant.

VI Conclusion

Les eaux d'Idini présentent des faciès mixtes qui dénotent des influences diverses dont la plus prépondérante paraît être les interactions eau-roche qui, par des dissolutions et altérations des sédiments, des échanges de bases et des phénomènes évaporatoires dans le système aquifère, régissent les processus de minéralisation. Les faciès identifiés, même s'ils semblent avoir une empreinte de base chlorurée sodique, se caractérisent par des mélanges ioniques importants. Les profils des eaux, à travers le faciès, évoluent avec la minéralisation. De fortes liaisons entre les ions majeurs traduisent le fait que les eaux manifestent de manière uniforme les propriétés induites par les espèces dissoutes. Ainsi, les corrélations entre propriétés et caractéristiques soulignent le fait que la forte minéralisation des eaux est associée à un caractère chloruré important et à un caractère sulfaté assez marqué. La prédominance sodique dans ce cas est peu prononcée. Le caractère bicarbonaté marqué s'exprime dans les eaux plus douces et celui sulfaté dans les eaux intermédiaires.

Les interactions eau-roche et la contamination de la sebkha environnante qui déterminent les propriétés des eaux indiquent que les caractères sulfaté et bicarbonaté (qui peut être l'un et l'autre associé au caractère chloruré) ne peuvent pas être prédominants ensembles. De ce fait, les faciès sulfato-bicarbonatés et bicarbonato-sulfatés ne pourraient être rencontrés dans les eaux de la nappe du Trarza /2/.

A l'échelle du champ captant d'Idini, dans un domaine d'environ 10 km², les propriétés des eaux ne se manifestent pas toujours uniformes. Pour une meilleure compréhension des mécanismes hydrochimiques et du fonctionnement de cette nappe, il est important d'affiner les modèles établis ici, en s'appuyant sur des données acquises dans un domaine plus étendu car les évolutions hydrochimiques peuvent être très rapides.

La qualité chimique des eaux apparaît liée à la nature du faciès chimique. Elle varie de bonne à passable (première à deuxième qualité) pour les eaux étudiées. Cependant, l'existence de substances indésirables comme l'ammonium peut altérer cette qualité. D'autre part, cette altération pourrait être engendrée par des apports d'espèces ioniques, telles que les chlorures, les sulfates, le sodium et le potassium dont les sursaturations des sols, eaux saumâtres, sebkha et/ou emprunts marins, paraissent être les principales causes.

Références bibliographiques

- [1] Séméga. B. M., Travi. Y., Caruba. R. et Piro. J, 2èmes Journées Annuelles de la SOACHIM (1996), Dakar, 29 juillet - 3 août 1996.
- [2] Séméga. B. M. Thèse de doctorat d'Université, Nice, (1995), 232 pages.
- [3] BURGEAP, Rapport RIM-Direction Hydraulique (1979).
- [4] Clouet D'orval. M., Moulaye. A. et Pent. J.-P, Bull. BRGM, (1980-1981), (2) III, n° 4 ; pp. 361-368.
- [5] Rapport Mission Chinoise BEIJING (1982).
- [6] BRGM, Rapport Sonelec-Direction Hydraulique (1986).
- [7] BRGM, Rapport Direction Hydraulique (1990).
- [8] Séméga. B. M., Caruba. R., Piro. J. Vaillant. A. et N'Dongo. M. M., 2èmes Journées Annuelles de la SOACHIM, (1996), Dakar, 29 juillet - 3 août 1996.

- [9] Servant. J.-M., Bull. BRGM, (1978), (2) III, n° 2, pp. 123-142.
- [10] Piper. M., Transactions, American geophysical Union, Papers Hydrology, (1944), pp. 914-928.
- [11] Derec. F., et Louvier. M., BULL. BRGM. (1973), (2) III, n° 2, pp. 107-112.
- [12] Mudry. J. et Blavoux. B. Hydrogéologie, (1986), n° 1, pp. 53-59.
- [13] Thomas O., Szymanski K., Mazas N. et Martin-Bouyer M., T.M.S. - l'eau, (1986), 5, pp. 253-259.
- [14] Melloul. A. et Collin. M., J. of Hydrology,(1992), 140, pp. 49-73.
- [15] Soukatchoff. V. Hydrogéologie, (1988), n° 3, pp. 209-226.
- [16] Margat. J. et Monotien. L, Bull. BRGM, (1970), (2) III, n° 4, pp. 5-12.
- [17] Fontes. J.-C., Andrews. J.-N., Edmunds. W.-M., Guerre. A. and Travi. Y, Water. Resources. Research. (1991), vol. 27, n° 2, pp. 199-214.