

Caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux souterraines de l'Ahaggar et leur relation avec la recharge des nappes

* Omar SAÏGHI et * Mohamed MESBAH

*USTHB/ IST; BP 32 El Alia; 16111 Bab-Ezzouar, Alger

Résumé - Les ressources en eaux du massif cristallophyllien et magmatique de l'Ahaggar, sont fournies essentiellement par de petites nappes phréatiques "d'inféro-flux " qui sont renouvelées par des crues épisodiques d'oueds. Les zones aquifères les plus favorables sont localisées dans les vallées et se présentent en trois niveaux superposés, d'importance très inégale : les alluvions superficielles, la couche altérée du substratum sous-jacent et le réseau fissuré du socle dont le domaine d'extension ne se limite pas seulement aux oueds. Les alluvions renferment des eaux faiblement minéralisées, dont les teneurs en isotopes lourds et l'activité en carbone 14, comparables à celles des eaux météoriques actuelles, permettent de les identifier comme étant des eaux récentes. La couche d'altération est saturée d'eau un peu plus minéralisée, dont les teneurs isotopiques plus appauvries et une "activité¹⁴C " intermédiaire, attestent d'une composante ancienne de ces eaux. Quant à la nappe du réseau fissuré, ses teneurs isotopiques qui s'écartent nettement de celles des précipitations actuelles ainsi que la quasi absence de tritium et d'activité en radiocarbone, militent en faveur d'un héritage ancien, résultant d'une période plus pluvieuse et plus froide que la période actuelle.

Mots clés - Ahaggar - Zone aride - Aquifère - Zone altérée - Socle fissuré - Recharge - Infiltration - Evaporation - Minéralisation - Isotopes.

Isotopic and chemical characteristics of Ahaggar's ground water and their relation with recharge of aquifers

Abstract - In the cristallophyllien and magmatic Ahaggar massif, the water resources are produced in some little phreatic aquifers, which are recharged by the sporadic swelling's wadi. The aquifers are generally situated in the valleys as three superposed levels of unequal importance : the alluvial aquifer, the weathered zone of the underlying substratum and the deep aquifer of fissured basement. The alluvion, contain weakly mineralised water. Their stables isotopes contents and ¹⁴C activity allows to identify present meteoric waters. The weathered zone groundwater are more mineralised and its isotopic contents and intermediate radiocarbon activity, prove their old water component. The basement's groundwater are more mineralised and their very weakly isotopic contents diverge clearly from the present precipitation. The absence of ³H and ¹⁴C activity indicate an old heritage, resulting from a recharge during the last humid Holocene.

Key words - Ahaggar- Arid zone - Ahreatic sheet - Weathered zone - Basement - Recharge - Infiltration - Evaporation - Mineralization - Isotopes.

I - INTRODUCTION

Situé au milieu des régions hyper-arides du Sahara, le massif de l'Ahaggar bénéficie cependant, grâce aux effets de l'altitude, de conditions climatiques relativement douces et humides. Dans l'Attakor, partie centrale et élevée du massif (plus de 2000 m d'altitude), les précipitations moyennes atteignent 120 mm par an, mais les plaines périphériques sont beaucoup moins arrosées : 48 mm/an à Tamanghest (1376 m d'altitude) et moins de 10mm/an à In-Guezzam (500 m) et In-Azaoua (Saïghi, 1998). Cette pluviométrie, en partie gouvernée par les déplacements extrêmes du FIT (Front intertropical), se caractérise à cette latitude, par une grande irrégularité inter-annuelle par fait que le total annuel dépend de deux ou trois

événements pluvieux seulement. Par ailleurs, seuls les orages brefs et de forte intensité, occasionnent des ruissellements qui constituent la principale possibilité de recharge des nappes, jalonnant les oueds (Dubief, 1953).

Dans cette région aride, la température dépend considérablement des variations d'altitude et l'évaporation potentielle atteint 1,5m par an sur les parties élevées du massif et dépasse 4m, ailleurs. On peut se demander alors si en dehors des terrasses alluviales des oueds, qui fournissent les maigres ressources en eau disponibles, les terrains encaissants granitiques et métamorphiques du Précambrien, sont eux aussi capables d'absorber et de restituer des débits intéressants. Quel serait alors leur taux de recharge?

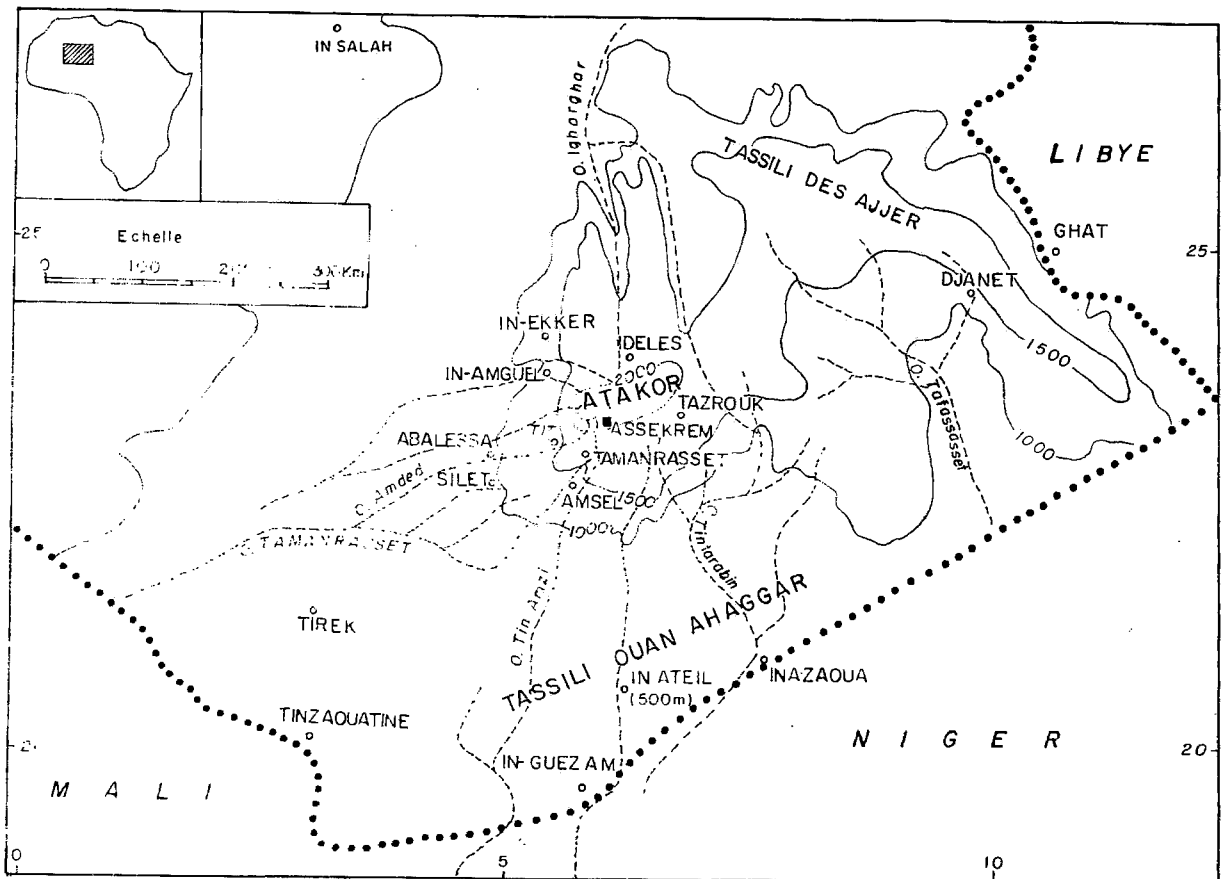


Fig. 1 - Carte orohydrographique de l'Ahaggar
Orographical map of the Ahaggar

La "signature isotopique" des précipitations dans cette région, étant désormais connue (Saïghi, à paraître), on se propose dans ce qui suit, d'apporter une "réponse hydrochimique" à cette question, pour compléter les connaissances acquises par forages et essais de débits, réalisés durant les années 1970 et 1980 par la *Sonarem*. A cet effet, un échantillonnage de tous les points d'eaux du versant sud du massif (une centaine), depuis la partie centrale de l'*Attakor* jusqu'aux zones de bordures méridionales, représentées par les terrains sédimentaires paléozoïques du *Tassili ouan Ahaggar*, a été réalisé. De plus des analyses isotopiques (oxygène-18 et deutérium) et chimiques (ions majeurs), de même que quelques mesures de tritium et d'activité en carbone-14 des eaux souterraines, ont été effectuées.

II - CADRE GÉOLOGIQUE

Les terrains précambriens de l'Ahaggar forment les principaux reliefs sahariens et couvrent une superficie de 450 000 Km². La caractéristique essentielle de la géologie de cette région, est sa structuration en bandes méridiennes larges d'une centaine de kilomètres (fig.2), séparées par des accidents tectoniques majeurs (Caby, 1970). Cette structure en domaines longitudinaux, est le résultat d'une collision qui a eu lieu lors de l'orogénèse panafricaine [620-580 Ma], entre le *Craton Ouest africain* et une chaîne mobile située plus à l'Est, comprenant l'Ahaggar (Black, 1978). Les conséquences de cette collision sont (Haddoum, 1992) :

- un métamorphisme général dans le faciès schistes verts, rajeunissant les gneiss anciens;
- la mise en place d'intrusions, généralement granitiques;
- le jeu des grands accidents tectoniques subméridiens, qui se caractérisent par de larges bandes mylonitiques et un remplissage siliceux.

Enfin, dès le Jurassique supérieur-Crétacé inférieur, une phase d'extension liée à l'ouverture de l'Océan Atlantique, accompagnée d'une remontée asthénosphérique, se manifeste par des émissions volcaniques le long des accidents majeurs (Dautria, 1988).

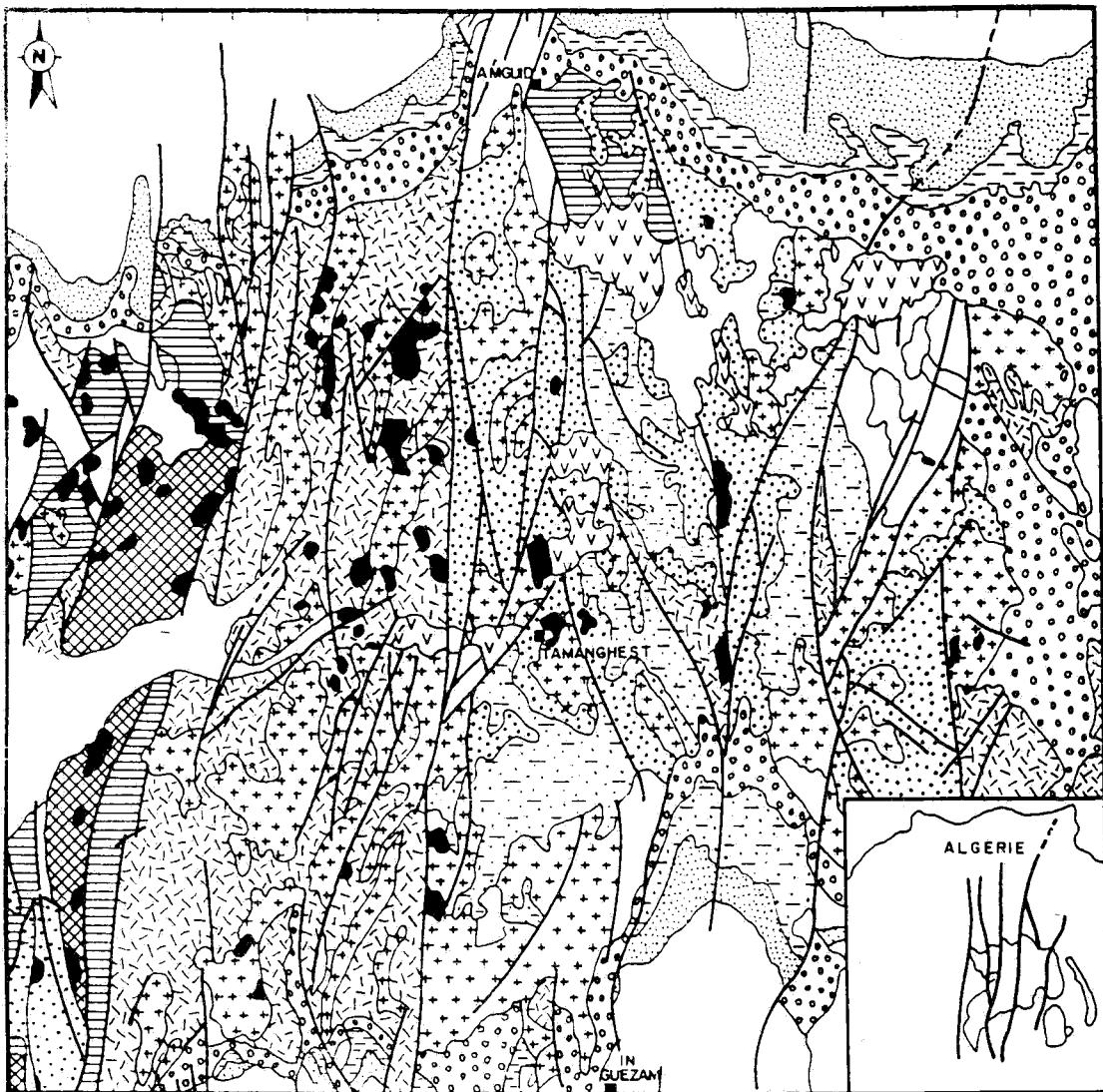
Tous ces événements aboutissent à la formation de domaines géologiques caractérisés par des roches cristallophylliennes, souvent très métamorphisées, et magmatiques (essentiellement granitiques). Ces roches, pétrographiquement et génétiquement variées, sont représentées, soit par des gneiss et des micaschistes plus ou moins migmatisés (Lelubre, 1952), soit par des granites (Boissonas, 1973), soit encore par des formations volcaniques qui se sont mises en place du Jurassique supérieur à l'Actuel (Dautria, 1988), à partir de plusieurs centres d'émission; l'*Attakor* qui occupe la partie centrale du massif, est l'un des plus importants.

A la périphérie du massif de l'Ahaggar, des terrains sédimentaires, essentiellement gréseux et conglomératiques, d'âge Paléozoïque à Mésocénozoïque, constituent les reliefs périphériques, discontinus, des *Tassilis*.

III - CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

1 - Caractéristiques hydrodynamiques

Les formations géologiques décrites ci-dessus se caractérisent habituellement d'un point de vue pétrophysique, par une porosité et perméabilité primaires négligeables, et n'acquièrent un caractère aquifère intéressant, que par suite de fissurations et d'altération. La question posée est celle de savoir si, malgré la faiblesse des précipitations, le socle précambrien de l'Ahaggar, très fortement fracturé, permet d'espérer grâce à la présence d'une porosité secondaire de fissures, l'existence de réservoirs



PALEOZOIQUE

MAGMATISME

PRECAMBRIEN



Dévonien inf.



Volcanisme (basaltes)
Crétacé - Quaternaire



Protérozoïque supérieur (P2)
Série verte pharusien (cycle panafricain)



Silurien



Cambro-Ordovien



Granites, sécants tardifs
des différentes orogénèses



Protérozoïque supérieur (P1) quartzites et
calcaires à stromatolita



Archéen



Granites syntectoniques ou tardi
panafricains (580 M.a. environ)



Protérozoïque inférieur (cycle
Eburnéen) (2000 à 1700 M.a.)



Protérozoïque supérieur présumé (P1) :gneiss
marbre, quartzites et amphibolites S. et protérozoïque
moyen présumé (Egere arefsa)

0 50 100 150Kms



Fig. 2 - Carte géologique de l'Ahaggar. D'après Fabre, simplifiée

Simplified geological map of Ahaggar area

morphologique et plus fine dans les zones avales. Ces alluvions sont généralement caractérisées par une bonne perméabilité et leur épaisseur est d'environ 15 m;

- une frange d'altération du substratum encaissant, de nature lithologique essentiellement argileuse et dont l'épaisseur qui peut atteindre 30 m, est liée à l'ampleur de l'accident tectonique auquel elle est associée;

- un socle fissuré qui passe progressivement vers le bas au socle sain.

L'intersection de ces deux générations de failles induit par endroits dans les oueds, des seuils rocheux constituant de véritables "verrous topographiques" engendrés par le resserrement de la vallée et le relèvement du socle sain. Ces seuils rocheux sont propices à l'accumulation des eaux souterraines canalisées par les terrasses alluviales : ils font remonter le niveau piézométrique près de la surface (*abankor*) et donnent naissance à des résurgences et des ruisseaux qui se déversent un peu plus en aval, dans des *guelta*.

3- Disposition morphologique, hydrographie et recharge des nappes

La disposition du massif montre trois zones morphologiques plus ou moins concentriques, qui épousent presque exactement les zones climatiques. Elle se compose :

- d'un noyau central élevé : l'*Attakor*, partie la plus arrosée et génératrice des crues d'oueds, où l'infiltration efficace paraît faible malgré l'existence sporadique d'une couverture basaltique;

- d'une auréole de basses plaines, presque sans pluies, donc dénuée d'infiltration directe;

- des reliefs périphériques, très développés au Nord et au Nord-Est, peu apparents au Sud : les *Tassillis*.

Du fait de cette disposition, le ruissellement des précipitations survenant sur l'*Attakor* se fait de façon radiale sur tout le pourtour du massif, par un réseau hydrographique aréique. Le ruissellement brutal qui résulte des rares pluies de forte intensité, provoque des crues violentes favorisées par les pentes raides des zones amont et les surfaces peu perméables des terrains cristalloylliens. Les écoulements se concentrent dans les vallées et se répandent sur les alluvions d'oueds où leur infiltration partielle permet de recharger des nappes phréatiques dites d'inféroflux.

Les niveaux piézométriques sont peu profonds, s'approfondissant d'amont en aval de 1 à 20 m dans les nappes alluviales et atteignant 75 m dans les zones marginales de la nappe du socle. Les fluctuations piézométriques sont liées à l'occurrence des crues ; elles sont sensibles dans l'axe de l'oued, où des remontées de 2 m peuvent être enregistrées après le passage d'une crue, faibles dans le socle altéré des berges et insignifiant partout ailleurs.

IV - INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS HYDROCHIMIQUES

La majorité des points d'eaux échantillonnés, au nombre d'une centaine, correspondent à des puits artisanaux situés dans la zone centrale de l'*Ahaggar*, où les conditions climatiques moins extrêmes permettent d'entretenir l'état des pâturages et de cultiver des petites parcelles agricoles, le long des oueds. Une quinzaine d'échantillons seulement ont été prélevés dans les zones marginales du Sud et du Sud-Est du massif, frontalières du Niger.

Malgré les conditions climatiques sévères, qui soumettent les eaux superficielles (ruisseaux et *guelta*) à une forte évaporation avant leur infiltration (ou réinfiltration après le franchissement des seuils), les minéralisations globales des eaux souterraines restent modérées. Ces

potentiels, comme au Mali et au Niger (Joseph *et al.*, 1992) qui sont soumis néanmoins à des conditions climatiques moins arides. D'autre part, ce socle a subi de nombreuses phases d'altérations dont les produits ont été déblayés au cours des cycles d'érosions successifs. La dernière phase d'altération a pu être recouverte et localement protégée de l'érosion par les épanchements basaltiques (*in* Burgeap, 1975). Elle pourrait constituer des couloirs de drainages préférentiels, ou "paléo-oueds", avec de bonnes transmissivités. Enfin, les dépôts volcaniques, formant une couverture, à priori absorbante, sont pelliculaires et l'érosion les a décapés parfois jusqu'au socle sous-jacent.

Dans un tel contexte, où seules les alluvions qui tapissent les fonds des vallées présentent de bonnes transmissivités ($T \approx 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) et un excellent coefficient d'emmagasinement ($s \approx 10\%$; Saïghi, 1984), quelle pourrait être la proportion des "eaux actuelles" dans les aquifères semi-perméables d'altérations, et dans le réseau fissuré du socle ?

2 - L'impact de la Fracturation.

Les formations géologiques de l'Ahaggar sont affectées par une multitude de failles de différentes générations, qui ont joué à

différentes époques et qui ont abouti à un réseau de fractures où se distinguent deux grandes familles :

- l'une de direction subméridienne, correspond aux accidents les plus anciens (Panafricain), réactivés au cours du Paléozoïque (époque hercynienne notamment) et après le Crétacé (phase alpine). Le remplissage des failles étant généralement silicifié et induré, ces accidents apparaissent souvent en lignes de crêtes dans le paysage et se comportent, d'un point de vue hydrogéologique, comme des barrières vis à vis des eaux souterraines;

- l'autre, de direction N40, regroupe des failles plus récentes, réactivées par la tectonique post-Crétacé. Les failles de cette deuxième génération se présentent souvent en creux dans la nature, formant "des gouttières topographiques" empruntées par les oueds. Non silicifiées donc tendres, elles se comportent comme des "drains", vis à vis des eaux souterraines (Burgeap, 1975). Le profil géologique habituel dans ces gouttières topographiques montre successivement de haut en bas, 3 niveaux superposés (fig.3) dont les caractéristiques hydrodynamiques sont très inégales;

- des dépôts alluviaux à dominante quartzitique et de texture grenue dans la première zone

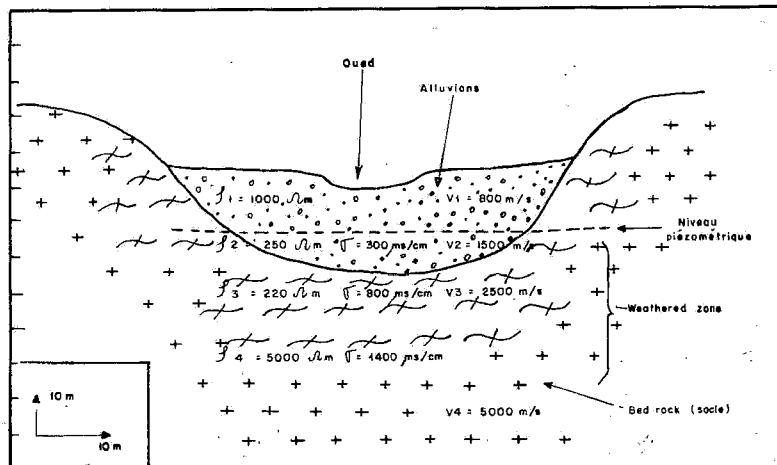


Fig. 3 - Profil géologique type dans une vallée alluviale

Geological profile in alluvial valley

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DES EAUX SOUTERRAINES DE L'AHAGGAR

minéralisations avoisinent 0.5g/l et ne dépassent 1g/l que dans des niveaux profonds ou en des points situés à l'écart des axes d'oueds. D'une manière plus détaillée cependant, il y a une évolution des concentrations en fonction de la profondeur qui se traduit par une stratification des faciès hydrochimiques, où se distinguent 3 groupes fondamentaux (fig.4): le premier correspond aux inféro-flux très peu minéralisés, le second aux eaux de mélanges de la couche d'altération, et le troisième intéresse des eaux plus chargées en sels dissous, qui imprègnent le réseau fissuré du socle.

1- Les nappes phréatiques d'inféro-flux

a - On appelle inféro-flux des écoulements souterrains drainés et canalisés par les alluvions d'oueds. Dans la zone centrale de l'Ahaggar, à proximité des aires génératrices de crues, les eaux d'inféro-flux présentent des salinités inférieures à 0,3 g/l. Leur composition chimique type, est reportée dans le tableau 1. La représentation des concentrations dans le diagramme de Piper, permet de les classer dans le "faciès bicarbonaté"

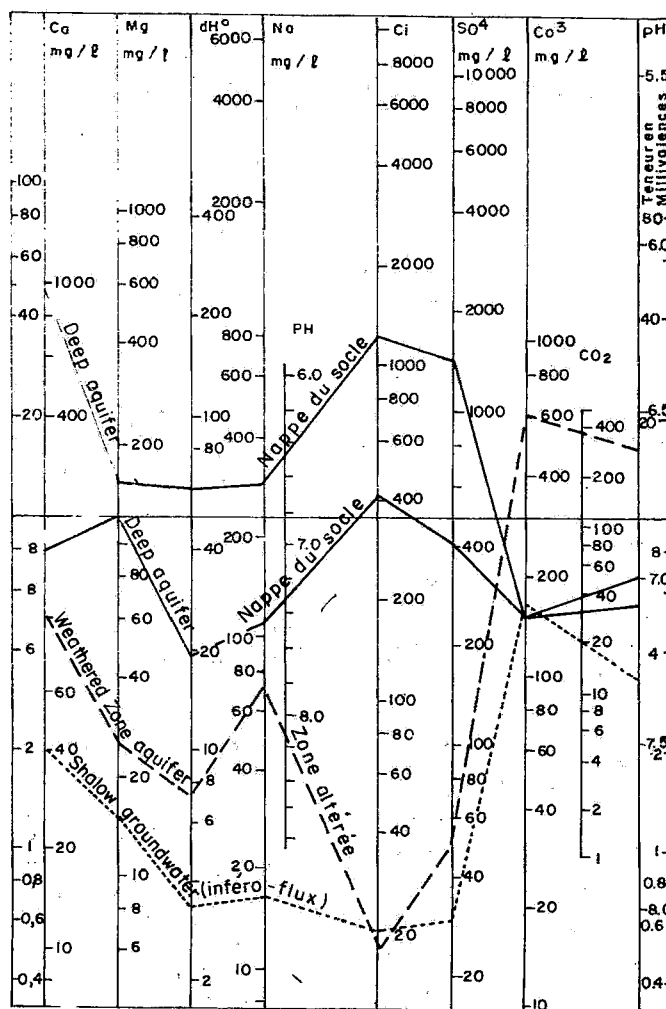


Fig. 4 - Représentation sur diagramme semi-log des eaux souterraines de l'Ahaggar
Graphics representations in semi-log diagram of Ahaggar's groundwater

Tableau 1- Teneurs chimiques (mg/l) de quelques types représentatifs d'eaux souterraines de l'Ahaggar

Chemical concentration of groundwater from Ahaggar

Type de nappe	nb éch	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	σ(μS/cm)	PH
Inféro-flux, amont	48	40	15	15	3	20	30	165	20	300	7.5
Inféro-flux, aval	5	50	20	45	10	50	135	140	20	500	7.4
Zone altérée	35	75	22	75	10	20	50	450	10	800	6.5
Idelès (basalte)	4	4	80	40	13	19	60	500	1	1200	6.6
Source Tahabort	1	64	10	80	10	15	10	480	5	630	6.1
Nappe du socle	5	154	125	107	1	400	427	153	3	1400	

(fig. 5), caractéristique d'eaux peu évoluées, typiques d'aquifères bien aérés et en relation avec les précipitations. L'homogénéité de ce faciès en tout point de la terrasse alluviale, traduit le bon mélange des eaux, et témoigne de la bonne perméabilité de cet aquifère, qui bénéficie d'un taux de renouvellement élevé. Leur pH, légèrement basique, s'explique par le fait qu'elles sont par intermittence ramenées à la surface au niveau des "seuils rocheux", où elles séjournent dans les *guelta* et subissent l'évaporation. Leur température, en équilibre avec celle de l'air, oscille autour de 23°C. Quant à leur indice de déséquilibre chlore-alcalin : $(rCl-rNa) / rCl \approx -0,2$, il reflète la nature essentiellement quartzitique et peu soluble de la matrice poreuse, ainsi que la brièveté de l'interaction fluide/roche, qui confirme le caractère récent de ces eaux.

Les inféro-flux circulent dans toutes les terrasses alluviales qui jalonnent les oueds de la première zone morphologique de l'Ahaggar : *Outoul, Tit, Tin-Amzi, in-Amguel, Hirafok, Ideles, Tazrouk, ...* Ils sont en permanence exploités pour l'alimentation des populations et l'irrigation des parcelles agricoles de subsistance. Ces nappes alluviales "filiformes" se caractérisent malheureusement par une épaisseur et une extension latérale réduites, qui expliquent leur faible inertie et leur étroite dépendance des aléas climatiques.

b - Dans les zones en aval, où les crues d'oueds sont plus rares et le pouvoir évaporant plus fort, les teneurs en éléments chimiques dissous sont

un peu plus élevées, notamment en chlore et sodium, qui mettent en cause principalement l'évaporation, et secondairement la dissolution liée à la longueur du trajet souterrain. Le résultat d'analyse d'un échantillon provenant d'*In-Ateil*, à 300km de l'*Attakor* et à 500m d'altitude, illustre cette situation (tab.1). Le faciès chimique évolue dans ce cas vers le pôle "sulfaté calcique et sodique" (fig.5), conséquence des effets combinés de l'évaporation et d'un temps de séjour plus long dans l'aquifère, en liaison avec la diminution graduelle de la recharge, vers l'aval.

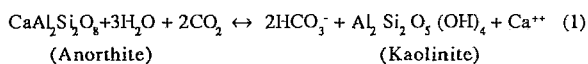
A noter enfin, que les inféro-flux sont d'un point de vue hydrodynamique, généralement isolés les uns par rapport aux autres et reflètent quelques fois des conditions locales d'infiltration. Ainsi, au voisinage d'affleurements basaltiques, comme à *Idelès*, la concentration des ions Mg⁺⁺ augmente sensiblement par lessivage des minéraux ferro-magnésiens tels l'olivine, et ce cation peut devenir l'élément chimique dominant.

2- La nappe de la couche d'altération

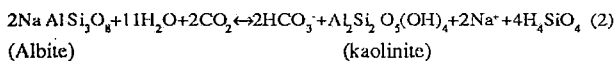
Les alluvions d'oueds reposent généralement sur une couche d'altération du socle, qui est imbibée d'eaux plus minéralisées que celles de la nappe phréatique sus-jacente. Une composition hydrochimique représentative de ce réservoir (tab.1), montre des teneurs très élevées en bicarbonates et accessoirement en calcium et sodium. La minéralisation totale dans ce cas, oscille autour de 0,7g/l, avec cependant des concentrations plus élevées à la base, qu'au

toit de cette couche, qui semble se comporter comme une zone de mélange entre des eaux atmosphériques, apportées par les crues et infiltrées, et des eaux plus anciennes. Le fort gradient de salinité en fonction de la profondeur, traduit le ralentissement vers le bas, des percolations au sein de cette formation altérée.

Le pH mesuré est légèrement acide et cependant toujours plus faible que leur pH d'équilibre, indiquant des eaux agressives. Les ions bicarbonates sont largement dominants et représentent 30 à 50% de la minéralisation totale. Un tel pH et cette teneur très élevée en bicarbonates, en milieu non carbonaté, s'expliquent par l'hydrolyse en présence de CO_2 , des minéraux silicatés comme les feldspaths, minéraux cardinaux dans ce contexte géologique. Plusieurs types de réactions d'hydrolyse sont possibles, comme par exemple l'attaque de feldspaths plagioclases (anorthite), par une eau riche en CO_2 , aboutissant à la formation de kaolinite, roche blanchâtre et friable, fréquente à la base des alluvions, dans la cuvette d'*Hadriane*, (7km au Nord-Est de *Tamanghest*) :

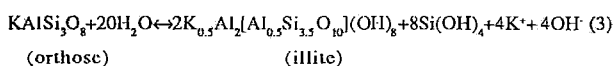


La dominance cationique, variable d'un point à un autre, dépend du cortège minéralogique, soumis à l'hydrolyse. Ainsi, la réaction analogue qui met en jeu le pôle sodique des plagioclases (Albite), s'écrit :



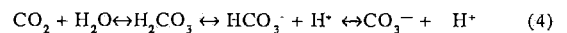
Les cations Ca^{++} et Na^+ , mis en solution, sont alors disponibles pour augmenter la charge dissoute et/ou s'intégrer, selon les conditions, aux composés de la matrice.

En domaine granitique, l'hydrolyse des feldspaths potassiques, aboutit à la formation de l'illite, autre minéral argileux, selon le schéma :



Cette dernière réaction entraîne le lessivage de 53% du stock de silicium et 80% de potassium (Lameyre, 1986), lequel est alors disponible pour entrer dans la composition d'illites, nées de l'évolution des hydrolysats venant du plagioclase, ou être adsorbé par d'autres minéraux argileux néoformés. Ceci explique aussi les teneurs élevées en silice, observées dans certains émergences (source *Tahabort*, *Ahidja*, *Sérouanout...*), dont la concentration en cet élément atteint 80 mg/l, soit deux fois plus que dans la couche d'altération et trois fois plus que dans les inféro-flux.

Le CO_2 , catalyseur de ces réactions d'hydrolyse peut avoir plusieurs origines dont la plus immédiate est atmosphérique, mais les transformations biochimiques dans le sol et la respiration des végétaux, y contribuent aussi. Il est ensuite entraîné vers la nappe par les eaux d'infiltration, à travers la zone non saturée, où la chaîne des équilibres classiques, régis par la pression partielle de CO_2 , s'établit :



Ces réactions règlent l'alcalinité (6 meq/l à la source *Tahabort*) en conduisant d'une part à l'accumulation des ions HCO_3^- dans la phase liquide et d'autre part à l'augmentation des ions H^+ qui constituent un facteur primordial de l'agressivité des eaux souterraines à l'égard des silicates. Dans le cas qui nous intéresse cependant, une pluviométrie insignifiante et une végétation éphémère cantonnée autour des guelta et dans les lits d'oueds, ne militent pas en faveur de cette seule explication. Une origine endogène du CO_2 est plus plausible, liée soit au métamorphisme dont la plupart des réactions libèrent l'eau et le CO_2 , soit à des émanations volcaniques, à la faveur des accidents tectoniques profonds. Cette dernière hypothèse est confortée par l'émergence de petites sources carbogazeuses sur les traces des failles majeures, et par la présence le long de ces failles de roches carbonatées qui appartiennent

au socle Protérozoïque et enfin par des teneurs en carbone-13 de ces émergences ($\delta^{13}\text{C} \approx -3\text{‰}$), en parfait accord avec une origine endogène du CO_2 (Blavoux, 1978). Notons par ailleurs, que les profils d'altérations du socle les plus épais, sont associés à ces couloirs de broyages tectoniques.

Le faciès hydrochimique, dans la couche d'altération, présente des analogies avec celui des inféro-flux (fig. 4). Il est en effet également du type "bicarbonaté calcique", mais plus varié et dispersé dans l'aire qui définit ce faciès, en fonction de la composition minéralogique de la roche encaissante locale (fig. 5). Il évolue ainsi,

du pôle franchement calcique dans les gneiss, vers le pôle sodique et potassique dans les granites ou encore chloruré et sulfaté, au voisinage des grandes agglomérations et dans certains centres agricoles, où des indices de pollution ont été mis en évidence, et qui posent le problème de la contamination des nappes par les eaux usées et d'irrigation. Cette similitude de faciès avec celui des inféro-flux, suggère l'existence d'infiltrations d'eaux récentes vers la zone altérée. Néanmoins, l'indice de déséquilibre [Cl-Na], nettement négatif dans ce cas, ($i = -6$), minimise le degré de ces percolations. En effet, l'abondance des ions sodium par rapport au chlore, élément conservatif, traduit

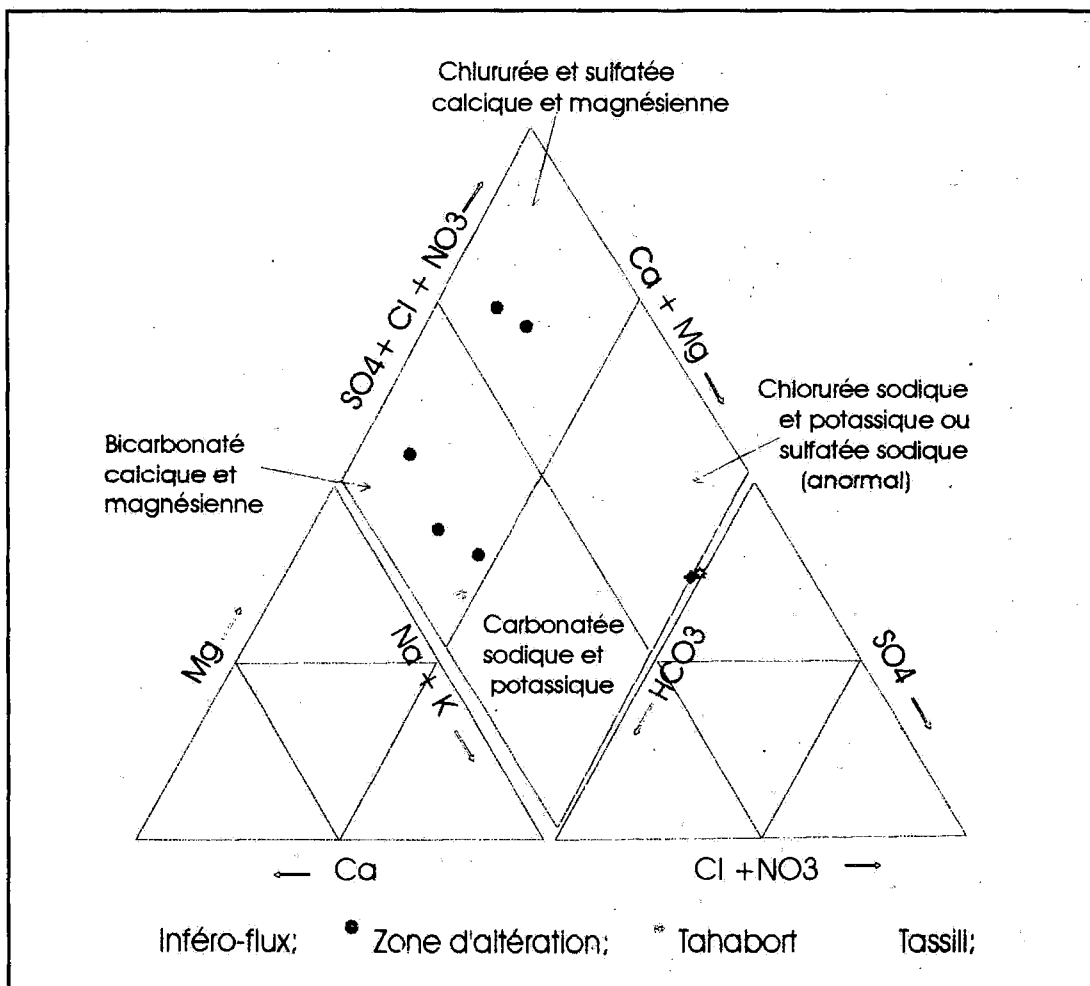


Fig. 5 - Classification dans le diagramme de Piper de quelques types représentatifs d'eaux souterraines de l'Ahaggar
Piper diagram of the chemical composition of groundwater samples

ici un stade poussé du processus de dissolution de la matrice, soulignant la durée du temps de séjour des eaux, dans le milieu encaissant. Ceci signifie que la composante ancienne des réserves de la zone altérée est prépondérante et qu'elles ne sont que très lentement approvisionnées.

La couche d'altération offre une seconde, mais moindre, possibilité de ressources en eau, lorsque la terrasse alluviale est complètement dénoyée. Cette situation s'observe dans les principaux périmètres agricoles de l'Ahaggar, surexploités (*Tamanghest, Abalessa, Tazrouk Amsel, etc...*). Au départ, les parcelles agricoles sont implantées à l'amont immédiat d'un seuil rocheux, véritable barrage souterrain, favorisant l'accumulation de l'inféro-flux et constituant un secteur privilégié de prélèvements, le niveau piézométrique étant sub-affleurant. Mais, l'introduction massive de motopompes, au début des années 1970, dans cette région habituellement adaptée à des pratiques de prélèvements traditionnels (foggara, puisage manuel ou animal), a entraîné la surexploitation des inféro-flux, et l'équilibre naturel s'est rompu. Au fur et à mesure que les puits tarissent, ils sont d'abord surcreusés pour capter la couche d'altération sous-jacente, et quand celle-ci est à son tour épuisée, de nouveaux ouvrages sont réalisés un peu plus en amont, où subsiste l'inféro-flux, entraînant la migration des parcelles de culture, le long de l'oued.

3 - La nappe du socle fissuré

La nappe formée par les eaux imprégnant le réseau fissuré du socle a, contrairement aux inféro-flux, une extension latérale qui ne se limite pas seulement aux oueds. Elle paraît fonctionner dans son ensemble comme une seule et grande unité hydrogéologique, du fait que ses niveaux piézométriques sont concordants d'une zone à l'autre ou évoluent régulièrement (*in Burgeap, 1975*). Ses potentialités sont malheureusement très réduites et son seul avantage réside dans le fait que ses ressources, bien que

très faibles, sont disponibles en n'importe quel point. La minéralisation globale de ses eaux est généralement plus élevée dans les domaines cristallophylliens que magmatiques et augmente d'amont en aval, variant dans une large gamme, allant de 1 à 5g/l.

Dans les plaines marginales, on note une prépondérance du chlore et des sulfates sur les autres ions dissous. L'indice de déséquilibre [Cl-Na] est généralement positif ($i \approx +0,35$), traduisant la superposition de divers processus intervenant dans le mode d'acquisition de cette minéralisation : dissolution, précipitation et évaporation..., la part de chaque facteur étant difficile à déduire. Quant à l'indice d'absorption

du sodium $S.A.R = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{1}{2}rCa + rMg}}$ qui reflète en partie ces interactions, il est dans cette nappe de l'ordre de +2, c'est à dire beaucoup plus élevé que dans les inféro-flux (+0,34) et la couche altérée (+0,7), du fait de l'évaporation et d'une durée du séjour prolongée des eaux dans leur milieu encaissant. Le faciès hydrochimique de cette nappe est généralement chloruré et sulfaté calcique et magnésien, soulignant tous ces effets ainsi que l'âge ancien des eaux. Les fortes teneurs en calcium pourraient s'expliquer par la présence d'anciens bassins évaporitiques à gypses.

Cet aquifère qui ne fournit que des ressources d'appoint, semble très peu perméable et quelque peu isolé des eaux actuelles. Son taux de renouvellement apparaît insignifiant.

V - LES TENEURS ISOTOPIQUES

Les isotopes de l'environnement (^{18}O et 2H) sont des traceurs naturels qui marquent intimement la molécule d'eau et permettent de suivre le cycle hydrologique. Les variations de leurs teneurs dans les eaux naturelles contribuent à répondre aux questions liées à leur origine, les altitudes de recharge et les taux d'infiltration.

Les activités en carbone-14 et en tritium, donnent des indications sur les temps de circulation ou de séjour dans le milieu encaissant.

1 - La composition isotopique des précipitations sur l'Ahaggar

A la station météorologique de l'*Assekrem*, située dans l'*Attakor*, partie centrale et élevée de l'Ahaggar (2776m d'altitude), sont recueillis depuis plus d'une décennie des échantillons de pluies, à des fins d'étude isotopique. Les résultats de cette chronique montrent qu'à cette altitude, les teneurs moyennes en oxygène-18 et en deutérium des pluies sont : $\delta^{18}\text{O} = -3\text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = -15\text{‰}$ (O. Saïghi, à paraître). Ces valeurs caractérisent le "signal isotopique" des eaux météoriques, avant leur infiltration dans les systèmes hydrologiques. Pour l'*Attakor*, qui représente une aire génératrice des crues d'oueds, la droite de corrélation entre ces deux isotopes, admet pour équation : $\delta^2\text{H} = 6,5\delta^{18}\text{O} + 6,5$. Sa pente étant inférieure à la valeur 8 qui caractérise les précipitations océaniques, appelée Droite des Précipitations Mondiales (DMM) ou *Global Meteoric Water Line* (Craig, 1961), traduit les effets de l'évaporation qui s'exerce sur les gouttes de pluies en cours de chute. Signalons aussi que la teneur en tritium des précipitations mesurée sur une dizaine d'échantillons collectés à la même période, est en moyenne de 12UT (unités tritium).

A la station de *Tamanghest*, située 50km plus au Sud et à une altitude plus basse (1376m), les teneurs isotopiques observées sont toujours plus élevées ($\delta^{18}\text{O} = +3\text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = 0,5\text{‰}$), les pluies étant d'avantage affectées par la réévaporation dans les basses couches surchauffées de l'atmosphère.

2- Les isotopes stables des eaux souterraines

Les teneurs en oxygène-18 des eaux souterraines s'échelonnent entre -11 à -1‰; cependant,

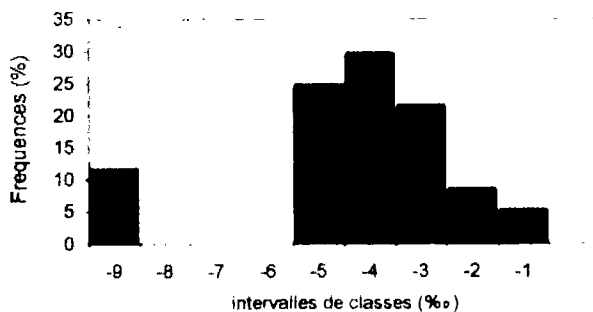


Fig. 6 - Histogramme des fréquences des teneurs en oxygène -18 dans les eaux souterraines de l'Ahaggar

Oxygen -18 contents Frequences of Ahaggar's groundwater

90 % des échantillons prélevés s'inscrivent dans une gamme plus restreinte, allant de -5 à -2‰ (fig. 6). Ces teneurs se regroupent autour de deux valeurs moyennes :

- l'une, en accord avec celles des précipitations actuelles ($\delta^{18}\text{O} = -3\text{‰}$), correspond aux eaux des nappes phréatiques et s'étend à celles de la frange d'altération;

- l'autre nettement appauvrie ($\delta^{18}\text{O} = -9\text{‰}$), représente des échantillons moins nombreux, prélevés soit dans des forages profonds, soit dans des petites sources carbogazeuses qui émergent à la faveur de failles majeures bordant des inselbergs granitiques, soit encore dans les couches sédimentaires des *Tassili*, aux confins du massif cristallophyllien, où il ne pleut quasiment jamais (*In-Azaoua*, *In-Guezzam*, ...).

A l'image des concentrations en ions majeurs, le profil des teneurs isotopiques est stratifié, marqué par l'appauvrissement en isotopes lourds en fonction de la profondeur de gisement et la nature lithologique de l'aquifère (Tab. 2).

a - Les eaux enrichies

Elles circulent dans les terrasses alluviales et leurs teneurs moyennes ($\delta^{18}\text{O} = -2,7\text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = -14\text{‰}$), sont comparables à celles des précipitations collectées à la station de

Tableau 2 - Teneurs en oxygène-18 (en δ ‰) des eaux souterraines de l'Ahaggar*Oxygen-18 contents of Ahaggar's groundwaters*

Type d'aquifère	nb échantil.	Min.	Max.	Moyenne	écart type
Inféro-flux	40	-3.5 ‰	-1	-2.7	0.77
Zone altérée	33	-5.5	-3.8	-4.2	0.71
Nappe du socle	7	-11	-9	-10	-

l'*Assekrem*. Un tel résultat traduit une altitude élevée de la source d'alimentation des nappes d'inféro-flux qui corrobore l'hypothèse d'une recharge assurée presque exclusivement par les épandages des crues d'oueds. En effet, l'empreinte d'une infiltration directe par des pluies locales enrichies, n'est pas significative. Cela met en évidence le fait que seuls les écoulements arrivant en grosses masses sur les alluvions des vallées, sont susceptibles de provoquer une infiltration efficace.

Les nappes phréatiques sont par endroits soumises à l'évaporation, en particulier au voisinage des "seuils rocheux" où l'ascension capillaire, favorisée par un niveau piézométrique sub-affleurant, les expose à un enrichissement isotopique notable ($\delta^{18}\text{O} = -1$ ‰). Dans les eaux des *guelta* avoisinant ces seuils, la teneur en oxygène-18 peut atteindre +20‰.

A ce groupe, se rattachent les eaux de mélange saturant la couche altérée sous-jacente, où les teneurs en isotopes stables sont toujours plus faibles ($\delta^{18}\text{O}$ moyen = - 4,2‰), que celles des eaux imprégnant les alluvions. L'appauvrissement isotopique graduel vers le bas, traduit la diminution concomitante de la proportion des eaux récentes dans ce niveau aquifère et souligne sa mauvaise hydraulicité.

b - Les eaux appauvries

Elles imprègnent le réseaux fissuré du socle et se caractérisent par des teneurs en oxygène-18, inférieures à -7‰. Elles s'apparentent ainsi

à celles qui saturent les grès du Cambro-Ordovicien de la bordure *tassilienne*, où il ne pleut presque pas et où les crues dévalant des lointains reliefs de l'*Attakor* n'arrivent plus, sous les conditions climatiques actuelles.

Ce type d'eaux est dépourvu de tritium et se caractérise par une activité infime en radiocarbone, qui les différencie formellement des eaux de précipitations actuelles. Elles sont donc héritées d'une époque plus humide et plus froide que celle prévalant actuellement.

3 - La relation $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$

Le diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (fig. 7) illustre une différenciation des eaux selon deux composantes, suggérant des époques de recharge distinctes. L'une est imputable aux précipitations actuelles enrichies, l'autre résultant d'une paléorecharge.

La corrélation entre les teneurs en oxygène-18 et celles du deutérium est bonne ($R^2 = 0.97$) et son équation s'écrit :

$$(\delta^2\text{H} = 7.4\delta^{18}\text{O} + 6.5)$$

Sa pente est donc plus proche de la valeur 8 de la DMM, que de celle des précipitations locales, au cachet évaporé. Ce résultat traduit la prépondérance de la composante ancienne des eaux exploitées, qui témoigne de la précarité des ressources renouvelables. Il signifie aussi que la paléo-recharge s'était réalisée sous des conditions climatiques plus fraîches et humides, qu'actuellement.

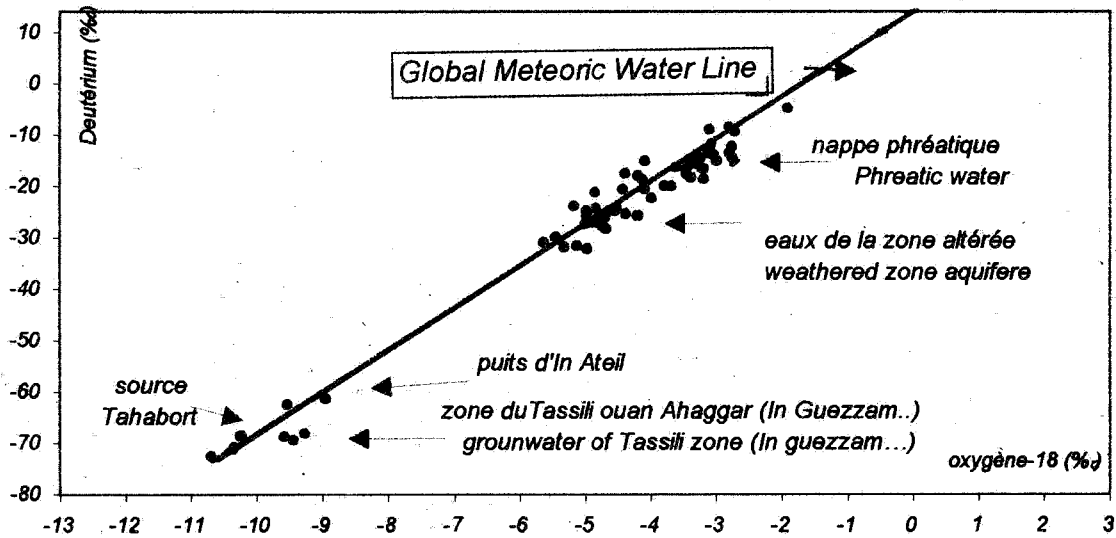


Fig. 7 - Corrélation entre les teneurs en oxygène -18 et deuterium

Deuterium vs Oxygen -18 relationship of Ahaggar's grounwater

4 - L'excès en deutérium

Il est défini comme étant l'ordonnée à l'origine de la droite des précipitations océaniques et s'exprime par: $d = 8\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$. Mais comme l'évaporation agit sélectivement sur les différents atomes et affecte préférentiellement les éléments légers plus volatiles, un déséquilibre en faveur de l'oxygène-18 apparaît dans les eaux souterraines soumises à l'évaporation. Leur excès en deutérium devient inférieur à la valeur 10, qui caractérise la *Global Meteoric Water Line*.

Dans le cas des eaux souterraines de l'Ahaggar l'excès en deutérium avoisine $+6\text{‰}$ dans les nappes phréatiques, $+9\text{‰}$ dans la couche altérée et est de $+10\text{‰}$ à la source *Tahabort*. Ces valeurs traduisent le caractère quelque peu évaporé des eaux des nappes phréatiques et confirme la faible part d'eaux récentes dans la frange altérée et la nappe du socle, exploitées en "vidange".

5 - Les isotopes radioactifs : le carbone-14 et le tritium

Comme pour les variations des concentrations en ions majeurs et en isotopes stables, l'activité

en carbone-14 des eaux souterraines et leur contenu en tritium, sont liés à la nature lithologique et la position stratigraphique du niveau aquifère intéressé.

- Dans les alluvions, les échantillonnages effectués entre 1994 et 1997 montrent un contenu en tritium équivalent à celui des précipitations, soit 10 à 15 UT et une activité en radiocarbone, compatible avec celle de l'atmosphère, soit 113 pmc (pour cent de carbone moderne). Ces valeurs correspondent aussi aux teneurs en oxygène-18 les plus élevées (supérieures à -3‰), qui caractérisent les nappes alluviales, en relation avec les eaux récentes des crues épisodiques d'oueds.

- La couche d'altération se singularise par des teneurs plus élevées en tritium ($^3\text{H} = 40$ à 120 UT). Elle renferme donc une part d'eaux infiltrées durant les années 1960, contaminées par les retombées radioactives engendrées par les essais thermonucléaires aériens effectués à cette époque. Ce résultat prouve la difficulté des circulations dans cette couche, où le drainage apparaît lent et différé. L'activité en ^{14}C varie de 30 à 80 % pmc, et reflète les divers degrés

des mélanges intervenant entre des eaux séculaires, dépourvues de radiocarbone et celles infiltrées récemment.

- L'aquifère fissuré du socle et les grès du Cambro-Ordovicien de la ceinture *tassilienne*, montrent des teneurs infimes en tritium, généralement inférieure à 1 UT. Ces eaux ne comportent donc pas de traces de contaminations par les essais thermonucléaires et se caractérisent par une quasi absence d'activité en radiocarbone. Elles sont donc très anciennes, ne bénéficiant presque pas de recharge actuelle.

Le caractère récent des eaux d'inféro-flux est, une fois encore, vérifié. Les terrasses alluviales sont les seules à pouvoir bénéficier d'une recharge substantielle dans les parties actives des bassins versants, localisées dans la première zone morphologique du massif. Mais ces rubans alluvionnaires sont très étroits et peu épais et les potentialités de ce type de nappes qui leur sont associées, sont limitées et leur autonomie très faible. Dans le substratum altéré, la composante ancienne des eaux est prépondérante, traduisant la lenteur des percolations consécutives aux passages des crues. Enfin, les eaux imprégnant le socle fissuré, ont un caractère "fossile".

VI - CONCLUSION

Les maigres ressources disponibles dans la région de l'Ahaggar, sont liées presque exclusivement aux nappes phréatiques qui circulent dans les alluvions jalonnant les oueds principaux. Ces alluvions surmontent une frange d'altération du socle qui se révèle être faiblement aquifère, passant progressivement en profondeur au socle fissuré, pratiquement sans intérêt hydrogéologique.

Dans ce contexte climatique et lithologique défavorables, les résultats isotopiques traduisent les difficultés d'alimentation des nappes, réalisée de façon très aléatoire par les crues d'oueds.

Les eaux contenues dans les alluvions sont faiblement minéralisées (0,3mg/l), leur pH est neutre ou légèrement basique et leurs teneurs en isotopes stables ($\delta^{18}\text{O} = -2,7\text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = -14\text{‰}$), sont comparables à celles des précipitations actuelles. Leur activité en carbone-14, supérieure à 100% de carbone moderne et la teneur en tritium équivalente à celle des précipitations (12UT), permettent de les identifier comme des eaux récentes.

Les eaux de la frange altérée sous-jacente sont plus minéralisées (0,7 mg/l), leur pH est légèrement acide ($\text{pH} \approx 6,5$) et leur contenu en isotopes stables ($\delta^{18}\text{O} \approx -4,2\text{‰}$) est plus faible que dans le niveau alluvial superficiel. Leur activité en ^{14}C est inférieure à 75 % pmc et témoigne de l'importance de leur composante ancienne. La teneur en tritium est de l'ordre de 75 UT, indiquant la présence d'eaux "tritiées", infiltrées durant les années 1960.

Enfin, dans la nappe du socle et les suintements qui jalonnent les failles majeures, les eaux sont nettement plus minéralisées (2mg/l environ) et très appauvries en isotopes stables ($-10 < \delta^{18}\text{O} < -7\text{‰}$). La quasi absence d'activité en ^{14}C et en tritium, reflètent le caractère "fossile" de ces eaux, qui se seraient infiltrées lors des dernières phases pluvieuses du Néolithique.

La stratification des faciès chimiques et isotopiques des eaux souterraines, en fonction de la profondeur atteste des mauvaises communications hydrauliques entre les différents niveaux. Elle reflète la durée des temps de séjour des eaux dans le milieu encaissant et renseigne sur leur taux de renouvellement. L'interprétation déduite de cette approche hydrochimique et isotopique montre que seules les nappes alluviales d'inféro-flux, qui sont caractérisées par de bonnes perméabilités, bénéficient d'un taux de renouvellement appréciable. La couche d'altération est très faiblement rechargée alors que le rôle supposé, joué par la fissuration des formations du socle, dans les processus d'infiltration et circulations souterraines, apparaît insignifiant.

Remerciements : Cette étude a été initiée au départ, en collaboration avec le Centre des Techniques Nucléaires d'Alger. Elle a bénéficié d'une aide de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique de Vienne, du support analytique du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de l'Université de Paris Sud et du soutien logistique du Centre d'Astronomie, Astrophysique et Géophysique de Tamanrasset. Elle a pu profiter également de la contribution du laboratoire d'analyses chimiques de l'Institut des Sciences de la Terre (USTHB) et celui de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Blida.

BIBLIOGRAPHIE

- BLACK, R., 1978.** Propos sur le panafricain. *Bull. Soc. Géol., Fr.*, XX pp. 843-850
- BLAVOUX, B., 1978.** Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrogéologie dans la zone tempérée. *Thèse Doct. Ès Sciences, Univ. Paris VI*, 333 p.
- BOISSONAS, J., 1973.** Les granites en structures concentriques et quelques autres granites tardifs de la chaîne panafricaine en Ahaggar, Sahara central, Algérie. *Tome 1 et 2, ed. BRGM, Paris Fr.*
- BURGEAP-SONAREM, 1975.** Etude de mise en valeur des eaux souterraines dans le Hoggar, mission d'expertise hydrogéologique dans le Hoggar.
- CABY, R., 1970.** La chaîne panafricaine dans le NW de l'Ahaggar, Algérie. Sa place dans l'orogénèse du Précambrien supérieur en Afrique. *Thèse Doc. Etat, USTL, Montpellier, France.*
- CRAIG, H., 1961.** Isotopic variations in meteoric waters. *Science, vol. 133*, p 1701-3.
- DAUTRIA, J. M., 1988.** Relation entre les hétérogénéités du manteau supérieur et le magnétisme en domaine distensif. Exemple des basaltes alcalins du Hoggar, (Sahara central, Algérie) et leurs enclaves. *Thèse Doc. Etat, CGG, Montpellier Fr.*
- DUBIEF, J., 1953.** Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. *S.E.S., Birmandreis, Alger.*
- FABRE, J., 1976.** Introduction à la géologie du Sahara Algérien. *Société Nationale d'Édition et de Diffusion (SNED), Alger.*
- HADDOUM, H., 1992.** Etude structurale du môle In Ouzzal, Hoggar Occidental, Algérie. *Thèse Doc. Etat, USTHB, Alger, Algérie.*
- IAEA.** Les ressources en eaux du Sahel, Etudes hydrogéologiques et hydrologiques en Afrique de l'Ouest par les techniques isotopiques. Agence Internationale de l'Energie Atomique, *TECDOC-721*. Vienne.
- JOSEPH, A. ET AL., 1992.** Isotopic characteristics of meteoric water and groundwater in the Sahelo-Soudanaise Zone. *Journal of Geophysical research, vol 97*. No D7, pages 7543-7551.
- JOSEPH, A., ARANYOSSY, J. F. ET KANTA, I., 1990.** Recharges and paleo-recharges of discontinuous aquiferes in Air basement (Niger). *Géodynamica Acta (Paris)*, 4,3, 185-197
- LAMEYRE, J., 1986.** Roches et minéraux; *Doin Editeurs-Paris.*
- LELUBRE, M., 1952.** Recherches sur la géologie de l'Ahaggar central et occidental, (Sahara central). *Bull. Serv. Géol. Alger*, 2° série No 22.
- SAÏGHI, O., 1984.** Possibilités aquifères au Hoggar central, *Thèse de 3° cycle, USTHB, Alger.*
- SIDORO, M., GUERRE, A. ET ARANYOSSY, J. F.** Apport des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères fissurés au Mali
- ZAKARA, L., KABRO, A., ET ARANYOSSY, J. F.** Application des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères des Korama, Sud de Zinder (Niger).