



Année 2007

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

Thèse
Présentée en vue de l'Obtention du diplôme de
DOCTORAT D'ETAT

**CONTRIBUTION DE LA GEOPHYSIQUE A L' ETUDE
HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE MERCURIELLE
NORD NUMIDIQUE (AZZABA) – DETERMINATION DU DEGRE DE
POLLUTION**

Option : Hydrogéologie

Par
BENHAMZA Moussa

Directeur de thèse : **KHERICI Nacer**
Président : **TOUBAL Abderrahmane**
Examineur : **MANSOURI Rachid**
Examineur : **MENANI Redha**
Examineur : **DERRADJI El- Fadel**
Invitée : Mme **PICARD-BONNAUD Françoise**

Professeur, Université de Annaba
M. de Conf. Université de Annaba
M. de Conf. Université de Guelma
M. de Conf. Université de Batna
M. de Conf. Université de Annaba
M. de Conf. Université d'Angers (France)

Résumé :

La contamination de l'environnement par le mercure a fait l'objet de plusieurs études en Algérie et dans le monde.

Notre contribution consiste à donner un aperçu géologique, géophysique, hydrogéologique, hydrochimique de la zone mercurielle de Azzaba et de quantifier la pollution de l'environnement de Azzaba par le mercure.

Les gisements de mercure de la zone Nord numidique sont situés sur le flanc Nord de la chaîne calcaire, au Sud de la ville de Azzaba, Nord-Est Algérie.

Les différents indices minéralisés affleurant dans la région de Azzaba sont classés en poly métalliques (Pb, Zn, Cu) et mercurio poly métalliques (Hg, Pb, Zn, Cu).

L'étude géophysique à travers les différentes méthodes a permis de mettre en évidence les deux nappes aquifères qui caractérisent la région. La nappe phréatique Oligocène et la nappe profonde Paléocène-Eocène, qui sont séparées par les roches imperméables du lutétien-Priabonien, caractérisé par les microbrèches calcaires, les argiles et les calcaires et représentant la minéralisation mercurielle.

La géochimie de la région de Azzaba, a montré que le mercure de la région présente un coefficient de migration moyen, par rapport à d'autres éléments.

Les eaux souterraines de la région révèlent trois principaux faciès le bicarbonaté calcique, le sulfaté calcique et le chloruré magnésien.

Le calcul des indices de saturation par le logiciel PHREEQC a montré que les eaux de la région sont en sous saturation par rapport à la halite et par endroits en sursaturation par rapport au gypse et à l'anhydrite.

Les minéraux carbonatés sont en sursaturation dans les eaux et tendent à se précipiter sous forme de calcite, d'aragonite et particulièrement de dolomie. Elles sont sous saturées en Hydroxyde de Plomb et en sulfates de plomb et sont sursaturées en $PbCO_3$. Les eaux sont sursaturées par rapport au $ZnCO_3$ et $Zn(OH)_2$.

Le complexe de mercure de Azzaba génère une pollution atmosphérique et une autre hydrique.

Les eaux de la nappe phréatique Oligocène présentent des teneurs élevées en Hg par rapport à celles de la nappe profonde Paléocène-Eocène.

Les eaux de surfaces de la région présentent des valeurs très élevées en mercure, dépassant les normes tolérées. La contamination des points situés en amont de la source de pollution est la preuve évidente d'une pollution atmosphérique.

Les teneurs excessives en Hg dans la nappe Oligocène ne sont pas le résultat uniquement du lessivage des formations géologiques encaissantes, mais aussi le résultat des rejets hydriques de l'usine.

L'imprégnation de la population de Azzaba et particulièrement les travailleurs de l'usine est indéniable. En effet les teneurs en mercure

inorganiques retrouvées dans les urines des travailleurs, ainsi que dans ceux des écoliers de Azzaba, vivants dans le voisinage de l'usine de mercure nous laisse tirer la sonnette d'alarme. Les signes cliniques d'une telle contamination sont bien visibles.

Abstract:

The environment contamination by mercury has been studied in Algeria and in the word.

As for as are concerned the contribution consists of giving a geological, geophysical, hydrogeological, hydrochemical out line of the mercurial area of Azzaba and quantifying the mercury environmental pollution.

The mercury ore deposits in the North numidian zone are situated in the North flank of the calcareous chain, south of the Azzaba town North East Algeria.

The different mineralised indices outcropping in the region are classified as polymetallics (Cu, Pb, Zn) ore mercuripolymetallics (Hg, Cu, Pb, Zn).

The geophysical study using different methods revealed the existence of two aquifers which is the feature of the area.

The study area is characterized by two aquifers. The Oligocene aquifer and the deep aquifer of Paleocene-Eocene age. These two aquifers are separated by the impermeable rocks of the Lutetian-Priabonian, which represents the mercurial mineralization of Cinnabar, characterized by breccias limestone, clays and limestone.

The results of the analyses of the nine drilling wells and two springs in the two different aquifers show three main facies: the bicarbonated calcic facies, the sulphated calcic and the chlorided magnesian facies.

Water of the area is under saturated compared to halite, and are in balance and in some locations are in super saturation compared to the gypsum and anhydrite. The carbonated minerals are supersaturated and tend to precipitate as calcite, aragonite and mainly as dolomite. Water of the area is under saturated with $Pb(OH)_2$ and $PbSO_4$ and is supersaturated with $PbCO_3$. Water is supersaturated compared to $ZnCO_3$ and $Zn(OH)_2$.

These results are highly interrelated to the weak-medium coefficients of migration for the Hg and Lead, calculated in the deep water layers of this region.

The enrichment of water in Hg and Pb in the Oligocene layer is not, therefore, due to the washing of the embanked geological formations in accordance with their weak-medium coefficients of migrations but rather to water waste from the mercury factory.

The mercury plant of Azzaba is the source of a hydric and atmospheric pollution.

The Oligocene phreatic aquifer shows high mercury contents compared to Paleocene-Eocene aquifer.

The running water of the area shows a very high mercury contents exceeding the acceptable standards.

The contamination of the sampled sites located in the upstream is evidence of the atmospheric pollution.

The abnormal high mercury contents in the Oligocene aquifer are not only the result of the leaching of the geological formation but also result from the hydric waste of the plant.

The contamination of the population of Azzaba, particularly the workers of the plant, is a matter of fact.

As a result the inorganic mercury contents in the urine of the workers as well as the school children living in the surrounding is a serious problem of public health, since the clinical symptoms are obvious.

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1 Cadre Géographique

1. Cadre géographique :	1
-------------------------------	---

Chapitre 2 Géologie

1. Structure géologique de la zone Nord numidique :	3
1.1. Introduction	3
1.2. Principales unités structurales	3
1.2.1. Le socle kabyle	3
1.2.2. La dorsale kabyle	3
a) Dorsale externe	3
b) Dorsale médiane	4
c) Dorsale interne	4
1.2.3. La série des Flyschs	4
a) Le Flysch massylien	4
b) Le Flysch maurétanien	5
c) Le Nummulitique II et l'Oligo-Miocène kabyle (O.M.K)	5
d) La série numidienne	5
1.3 Conclusion:	5
2- Lithostratigraphie et tectonique du district mercurifère	6
2. 1. Limites structurales	6
2.2. Les contacts tangentiels	8
2.2.1. Le chevauchement kabyle	8
2.2.2. Le chevauchement d'Ismaïl	8
2.2.3. Le chevauchement numidien	8
2.3. Tectonique cassante	8
2.3.1. Faille de Bir-Dar	9
2.3.2. Faille de Mra-Sma.	9
2.3.3. Faille de Chergui	9
2.3.4. Faille d'Ahmed Ben-Ali	9
2.3.5. Faille de Zebda	9
2.3.6. Faille de Saïafa	9
2.4. Principales phases tectoniques	10
3. Géologie régionale.....	10
3.1 Géologie et minéralisation du champ minier d'Ismaïl	10
3.2 Cadre lithologique et structural	10
a) La nappe numidienne	10
b) La « nappe » kabyle (P_z)	11
c) La «nappe» d'Ismaïl (e^{4-5})	11
d) L'horizon minéralisé : l'Hyprésien-Lutétien (e^{3-4})	11

3.3 Cadre géologique du gisement de Fendek	12
Paléogène :	13
Paléocène (e ¹)	13
Thanétien - Hyprésien (e ²⁻³)	14
Lutétien- Priabonien (e ⁴⁻⁵)	14
Paléozoïque (Pz):	14
Oligocène supérieur (g):	14
Quaternaire (Q):	14

Chapitre 3 Climatologie

1.Introduction	17
2. Le climat :	17
2.1 Les précipitations :	17
2.2 Température :	19
2.3 Courbe ombro-thermique:	19
3. Bilan hydrique :	20
3.1. L'évapotranspiration :	20
3.1.1. L'évapotranspiration réelle (ETR) :	21
3.1.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :	21
3.2 Déficit agricole (DA) :	22
3.3 Expression du Bilan Hydrique :	22
3.4 Méthode du bilan hydrique de Thornthwaite:	22
3.5 Interprétation du bilan :	23
Conclusion :	25

Chapitre 4 Géophysique

1. Introduction :	26
2. Méthodologie et volume des travaux :	26
2.1 Forage des sondages hydrogéologiques :	26
2.2 Travaux topographiques :	28
3. Travaux géophysiques :	28
3.1 Introduction :	29
3.2 Paramètres enregistrés :	30
3.3 But des mesures :	33
3.4 Interprétation qualitative :	33
3.4.1 Sondage N° 288 Hy :	33
Analyse des résultats :	36
Conclusion :	38
3.4.2 Sondage 289 :	39
Analyse des résultats :	41
3.4.3 Sondage 260 :	43

Analyse des résultats :	44
3.4.4 Sondage 342 :	47
3.5 Résultats des diagraphes :	50
4. Conclusion :	51

Hydrogéologie

1. Aperçu hydrogéologique de la zone mercurielle Nord numidique.....	52
2. Conditions hydrogéologiques du bassin versant de Azzaba :	52
2.1 Horizon aquifère des dépôts alluvionnaires récents :	53
2.2 Complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène (g2) :	53
2.3 Complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène :	53
3. Essais de pompages:	58
4. Dépouillement des données de pompages :	58
4.1 Résultats des travaux des essais de pompage dans le complexe aquifère de l'Oligocène:	59
4.2 Résultats des travaux des essais de pompage dans le Complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène :	63
4.3 Discussion des données de pompages:	66
4.3.1 Pompages isolés:	66
4.3.1.1 Aquifère des roches oligocène:	66
4.3.1.2 Aquifère des roches éocène-Paléocène:	66
4.3.2 Pompages de faisceau:	67
4.3.2.1 Aquifère des roches de l'Oligocènes:	67
4.3.2.2 Aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène:	67
4.4 Conclusion :	67

Chapitre 5 Hydrochimie

1. Introduction	71
2. Caractéristiques géochimiques de la zone Nord numidique	71
2.1 Migration des éléments	72
2.2 Classification des éléments	72
3. Hydrochimie des eaux souterraines	73
3.1 Le Faciès chimique	74
3.2 Le résidu sec	76
3.3 Le titre hydrotimétrique (TH)	76
4. Teneurs en micropolluants métalliques	78
5. Application de l'A.C.P	79
5.1 Introduction	79
5.2 Application de l'A.C.P	80
5.2.1 Matrice de corrélation	81
5.2.2 Diagonalisation	81
6. Indice de saturation	82

7. Conclusion	86
---------------------	----

CONSEQUENCES DE L'EXPLOITATION DES GISEMENTS MERCURIELS SUR L'ENVIRONNEMENT

1. Introduction :	87
2. Présentation de l'usine de mercure et mode d'extraction :.....	88
3. Pollution générées :	89
3.1 Pollution hydrique :	89
3.2 Pollution atmosphérique :	89
4. Evaluation des concentrations en mercure dans la région de Azzaba :	89
4.1 Désignation des points de prélèvement :	89
4.2 Matrice de corrélation :	91
4.3 Interprétation des résultats :	91
5. Conclusion :	93
6. Imprégnation de la population par le mercure inorganique	97
7. Conclusion	99
Conclusion générale	100

Rappels sur la géochimie du mercure

1. Introduction.....	104
2. Rappels sur la géochimie du mercure	105
2.1 Propriétés physico-chimiques	105
2.2 Origines du mercure	106
2.2.1 Origine magmatique	106
2.2.2 Origine sédimentaire	106
2.2.3 Origine métamorphique	107
2.2.4 Origine téléthermale	107
3. Transport du mercure	108
4. Répartition du mercure dans l'environnement et le rôle de la géologie sédimentaire (J.P. Vernet et R.L. Thomas)	110
4.1 Sources du mercure	110
4.1.1 Mercure naturel	111
4.1.2 Mercure d'origine industrielle	113
4.2 Cycle géochimique du mercure	116
5. Méthylation du mercure	119
5.1 La méthylation chimique	120
5.2 La méthylation enzymatique	120
5.3 Méthylation et eutrophisation des lacs	121
6. Rôle des sédiments	122
6.1 Teneur en mercure des sédiments	122
6.2 Association sédiments mercure	123
7. Décontamination des zones polluées par le mercure.....	123

7.1 Dragage :	124
7.2 pH :	124
7.3 Précipitation sous forme de sulfures :	124
7.4 Couverture par un matériau inerte :	124
7.5 Réduction de l'activité bactérienne:	124
8. Les grandes lignes de la question des empoisonnements par le mercure	125
8.1 Caractéristique des empoisonnements par le méthyl-mercure	125
8.2 Epidémie d'empoisonnement par le mercure	126
8.3 Conclusion	126
Références bibliographiques	128
Annexes	129

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Coordonnées de la station de Azzaba	17
Tableau 2 : Précipitation moyenne mensuelle station de Azzaba	18
Tableau 3 : Température moyenne mensuelle dans les stations d'Azzaba	19
Tableau 4 : Coefficients d'ajustement mensuel	22
Tableau 5 : Bilan hydrique station de Azzaba période (1984-2004)	24
Tableau 6 : Coordonnées topographiques des sondages	28
Tableau 7 : différentes méthodes géophysiques appliquées	29
Tableau 8 : Fourchettes de variation des résistivités et de radioactivité	38
Tableau 9 : fourchette de variation de la résistivité électrique et de la radioactivité.....	43
Tableau 10 : fourchette de résistivité électrique et de radioactivité	45
Tableau 11 : Variation des paramètres physiques	50
Tableau 12 : Résultats des pompages isolés	60
Tableau 13 : données de pompages 1 er faisceau	60
Tableau 14 : Paramètres calculés d'après les données de pompage	61
Tableau 15 : Paramètres calculés d'après les données de rétablissement	62
Tableau 16 : Données du pompage du 2 ^{eme} faisceau	64
Tableau 17 : Paramètres calculés d'après les données de pompages	64
Tableau 18 : Paramètres calculés d'après les données de rétablissement.	65
Tableau 19 : Coefficients de migration dans la zone Nord Numidique	72
Tableau 20 : Migration hypergène des éléments chimiques dans la zone Nord numidique	73
Tableau 21 : Normes pour la dureté des eaux O.M.S (1972)	76
Tableau 22 : Résultats des analyses chimiques	77
Tableau 23 : Matrice de corrélation	81
Tableau 24 : statistiques élémentaires des éléments dans les eaux de surfaces..	90
Tableau 25 : Matrice de corrélation	91
Tableau 26 : Hg urinaire inorganique en µg/G de créatinine chez les travailleurs de l'usine, les écoliers de Azzaba et d'Annaba.....	98
Tableau 27 : Signes cliniques chez les travailleurs de l'usine, les écoliers d'Annaba et de Azzaba	98
Tableau 28 : Cas recensés sur la population de Azzaba	99

Liste des Figures

Fig. 1 : Carte de la situation géographique de la zone d'étude	1
Fig. 2 : La zone mercurielle Nord numidique – région de Azzaba	7
Fig. 3 : Log stratigraphique de la zone mercurielle Nord numidique	12
Fig. 4 : Carte géologique schématique de la zone mercurielle Nord numidique.....	15
Fig. 5 : Coupe géologique dans la zone mercurielle Nord numidique	16
Fig. 6 : Histogramme des précipitations moyenne de la station de Azzaba	18
Fig. 7 : Courbe ombrothermique de la station de Azzaba	20
Fig. 8 Représentation graphiques du bilan hydrique station de Azzaba.....	25
Fig. 9: Faisceau 1 des sondages hydrogéologiques	26
Fig. 10: Faisceau 2 des sondages hydrogéologiques.....	27
Fig. 11: Log composite du sondage 288	35
Fig. 12: Log composite du sondage 289	40
Fig. 13: Log composite du sondage 260	46
Fig. 14: Log composite du sondage 342	49
Fig. 15 : Carte hydrogéologique schématique de la zone Nord numidique	69
Fig. 16 : Coupe hydrogéologique I-I	56
Fig. 17 : Coupe hydrogéologique II-II	56
Fig. 18 : Coupe hydrogéologique III-III	57
Fig. 19 : Situation géographique de la zone mercurielle Nord Numidique	71
Fig. 20 : Désignation des points de prélèvements dans la zone de Azzaba	74
Fig. 21 : Représentation des analyses chimiques d'après le Diagramme de Piper.....	75
Fig. 22 : Représentation des analyses chimiques d'après le Diagramme de Stiff	75
Fig. 23 : Carte du titre Hydrotimétrique de la zone Nord Numidique (°F)	76
Fig. 24 : Carte de répartition du Hg dans les eaux souterraines de Azzaba	78
Fig. 25 : Carte de répartition du Pb dans les eaux souterraines de Azzaba	79
Fig. 26 : Cercle de corrélation et projection des Individus	82
Fig. 27 : Etat des minéraux évaporitiques dans l'eau	84
Fig. 28 : Etat des minéraux carbonatés dans l'eau	84
Fig. 29 : Etat des minéraux de Pb dans l'eau	85
Fig. 30 : Etat des minéraux de Zn dans l'eau	85
Fig. 31 : Diagramme des sources potentielles de pollution	88
Fig. 32 : Désignation des points de prélèvements dans le réseau hydrographique.....	90
Fig. 33 : Cercles de corrélations	94
Fig. 34 : cercles de corrélations	95
Fig. 35 : Représentation des Individus	96
Fig. 36: Cycle géochimique du mercure	117

1. Cadre géographique :

La dépression de Azzaba est une plaine peu ravinée, large de 8 Km au maximum, elle se situe dans la zone mercurielle Nord numidique, Nord Est Algérien.

Administrativement la région fait partie de la wilaya de Skikda (Fig. 1) elle se trouve à 80 km au Nord-Est de Constantine, à 70 Km au Sud-Ouest de Annaba et à 32 Km au Sud-Est de Skikda.

Le terrain d'étude englobe essentiellement le flanc Sud du massif montagneux de Filfila, qui représente le prolongement Est du massif de la petite Kabylie.

Entre le flanc Sud de Djebel Filfila et le flanc Nord de la chaîne numidique se trouve la dépression de Azzaba.

Les éléments géographiques les plus importants sont :

- au Sud les chaînes numidiques avec les côtes absolues de 300 à 600m.

-Au Nord la plaine de Azzaba avec les côtes absolues de 70 à 120m.

La côte absolue maximale de 641 m correspond au mont de Dj. Tengout, situé à l'extrême Sud Ouest de la région.

La région d'étude est recouverte par une végétation assez dense.

Le réseau hydrographique est représenté par l'Oued hamimine, l'Oued zebda et l'Oued fendek.

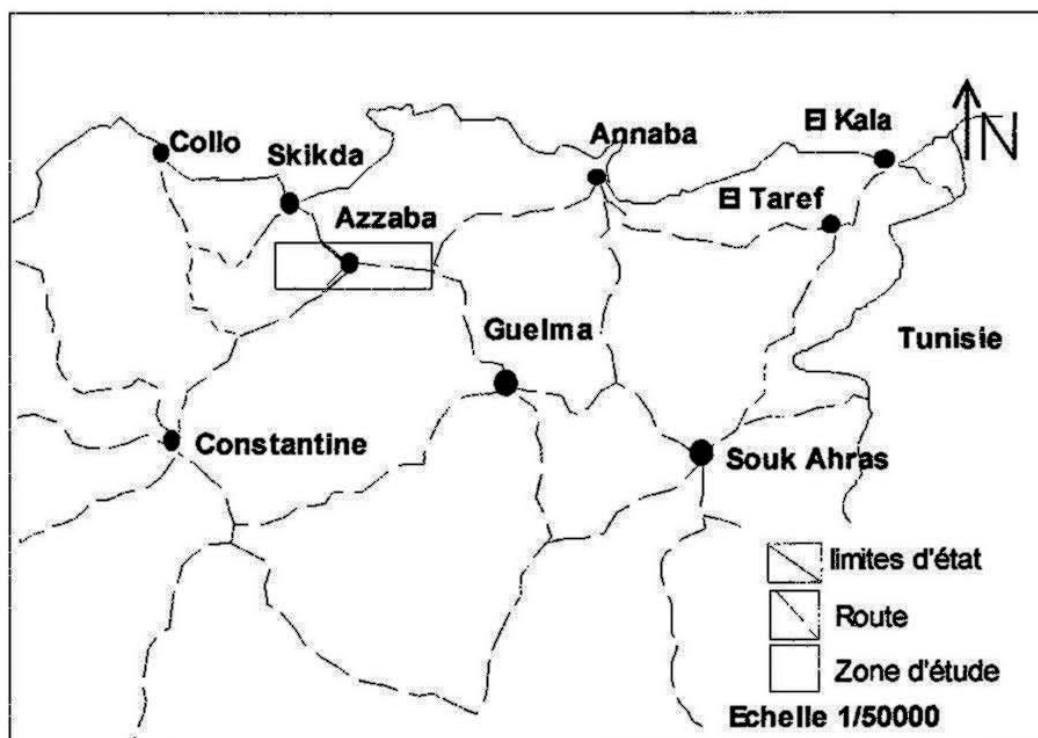


Fig. 1 : Carte de la situation géographique de la zone d'étude

Le climat de la région est de type méditerranéen, chaud et sec en été et froid et humide en hiver.

L'agriculture et l'élevage sont les occupations essentielles de la population de la région.

L'industrie est peu développée, elle est représentée essentiellement par des petites entreprises étatiques, en faisant abstraction de l'usine de mercure.

Sur le plan minier, la région de Azzaba se distingue par la zone mercurielle Nord numidique, regroupant les gisements miniers de mercure disposés en champs miniers à savoir : les gisements de Ras el Ma, Ismail, Guenicha, Mra Sma I et II et celui de Koudiat Sma.

Sur le plan géologique, les calcaires de Crétacé sont bien développés, ils servent comme matière première pour la cimenterie de Hadjar Essoud, située à une vingtaine de Km de Azzaba.

1. Structure géologique de la zone Nord numidique

1.1. Introduction

Les gisements mercuriels d'Azzaba sont situés sur le flanc nord de la chaîne calcaire, au sud de la ville d'Azzaba. La zone minéralisée s'étend sur 24 km de long et de 1 à 2,5 Km de large. Cette zone comporte des parties plissées, des écailles, des blocs tectoniques tardifs.

1.2. Principales unités structurales

Les principales unités structurales qui caractérisent la géologie de la région sont : le socle kabyle, la dorsale kabyle (chaîne calcaire), les flyschs maurétanien et massylien, le nummulitique II et l'Oligo-Miocène kabyle (O.M.K), et enfin l'Oligo-Miocène, avec tous les problèmes que pose son allochtonie. Le terme de Nummulitique II désigne, pour J.F. RAOULT (1974), les dépôts postérieurs à la phase fini-lutétienne et qui atteignent l'Oligocène supérieur.

1.2.1. Le socle kabyle

Le socle kabyle est un ensemble de formations métamorphiques (gneiss, micaschistes et phyllades), largement charrié vers le Sud sur différents niveaux stratigraphiques (Nummulitique II dans le champ minier d'Ismail et le Crétacé à Mra-Sma).

1.2.2. La dorsale kabyle

La dorsale kabyle est constituée par une série Mésozoïque à Eocène (du Permo-Trias au Lutétien). L'analyse paléogéographique et tectonique réalisée par J.F. RAOULT (1968 à 1980) montre qu'elle peut être divisée en plusieurs zones isopiques : externe, médiane et interne, à chacune desquelles correspond un édifice structural.

a) Dorsale externe

(Série de Tengout, Tasselemt, Maksem-koudiat-Aïssa, koudiat-Méra, Ghedir).

Elle s'étend du Jurassique moyen au lutétien supérieur, surmonté par le Nummulitique IIa (correspondant à des formations du Lutétien terminal au Priabonien inférieur). Cette unité peut être divisée à son tour en trois sous zones, caractérisées par des évolutions paléogéographiques bien individualisées (RAOULT, 1974).

- sous zone des Dj.Tengout-Tasselemt-Maksem - la base de la série est formée de bancs à silicifications blanches attribués au Vracono-Cénomaniens, surmontés par des calcaires à Nannoconus et Crassiocollaria. Cet ensemble est

plissé et les calcaires du Néocomien présentent une schistosité fruste et les niveaux microbréchiques des traces d'étirement. (RAOULT, 1974). Au dessus, les conglomérats du Campanien, à pendage faible, reposent en discordance sur ces niveaux tectonisés plus anciens.

- Sous-zone de koudiat-Méra - Elle correspond aux koudiats Aissa et Méra, qui sont un anticlinal NS déversé vers l'Est. Cette série se caractérise à sa base par des calcaires datés du Dogger et du Malm, qui sont surmontés en discordance par des conglomérats du Paléocène.

- Sous-zone du Ghedir - Elle correspond au massif calcaire du Dj. Ghedir au Nord, à l'Ouest et au Sud par les formations du socle paléozoïque. Le coeur de cet anticlinal daté du Permo-Tria est surmonté par du Lias inférieur (Hettangien-Sinémirien). Déjà en 1912, L. JOLEAUD nota que les schistes du socle kabyle chevauchaient les calcaires triasiques.

b) Dorsale médiane

La dorsale médiane comprend le Dj. Bou-Abed et le koudiat Sidi-Abdallah. Elle se caractérise par l'absence du Dogger et du Malm et par la présence de presque tous les étages du Crétacé supérieur. Ici le Nummulitique II présente la particularité de renfermer, par endroits, des lames, copeaux et klippes de la dorsale interne charriée.

c) Dorsale interne

La dorsale interne comprend les kefs Sebargoud-Msouna... et se caractérisent par une importante lacune du Barrémien au Sénonien supérieur, et quelques rares affleurements du Permo-Trias. Les séries internes et médianes recouvrent stratigraphiquement des niveaux carbonifères-ordovicien, qui reposent sur les schistes.

1.2.3. La série des Flyschs

a) Le Flysch massylien

Dans son mémoire, J.F. RAOULT note : « le Flysch massylien au sens où on l'entend actuellement, est strictement Crétacé » (1974). Il est représenté par le flysch « albo-aptien » argilo-quartzique des niveaux du Vraconien au Turonien inférieur, montrant soit des phtanites, soit des brèches du Sénonien marno-microbréchique « Flysch à microbrèches ».

Au Sud de la dorsale, le Flysch massylien est représenté par un flysch marno-bréchique du Sénonien, alors qu'au Nord sa lithologie est plus variée, avec des microbrèches accompagnées de calcaires fins, sableux et d'argiles.

b) Le Flysch maurétanien

Le terme maurétanien a été proposé pour une série allant du Malm au Lutétien supérieur et présentant partout des dépôts du Nummulitique I à l'inverse du Flysch massyien. Ce Flysch débute par le type Guerrouch (Crétacé inférieur) et se poursuit par le flysch sénonien à nummulitique (flysch de Penthièvre, de J.M. VILA (1967) dans la partie orientale de la dorsale).

c) Le Nummulitique II et l'Oligo-Miocène kabyle (O.M.K)

Dans la région étudiée, il est possible de distinguer un terme basal, ou Nummulitique II a (Lutétien terminal Priabonien inférieur), et un terme supérieur, Nummulitique II b (Priabonien inférieur Oligocène supérieur).

Le Nummulitique II constitue la couverture commune des différentes unités structurales de la dorsale kabyle et des séries maurétaniennes.

« Le terme O.M.K. désigne l'ensemble des formations détritiques discordantes sur le socle kabyle et datées, dès leur base, de l'Oligocène terminal et/ou Aquitanien inférieur» (RAOULT, 1974)

Dans les argiles de l'O.M.K. se rencontrent des blocs qui sont des éléments de toutes tailles, faits de terrain des nappes de flysch (Olistostrome).

d) La série numidienne

Dans la région d'étude, la série numidienne est très développée dans la dépression de Azzaba, sur le bord septentrional de la dorsale kabyle. La signification structurale de cet ensemble n'est pas encore clairement comprise. Mis à part les formations « post-nappes », elle occupe la position géométrique la plus haute.

1.3 Conclusion:

La distribution spatiale des minéralisations mercurifères, arséno-antimonifères, mercuro - polymétalliques et polymétalliques correspond aux directions paléogéographiques et structurales des grandes unités du Nord de l'Algérie orientale. Les minéralisations de la chaîne tello-rifaine sont sensiblement E-W, alors que celles des avant-pays africains sont NE, correspondant aux directions atlasiques.

Cette distribution spatiale du groupe méridional (NE) et septentrional (E-W), s'expliquerait par la présence des contacts majeurs entre les différentes unités structurales, qui ont joué durant les différentes phases tectoniques successives du Mésozoïque jusqu'au Tertiaire. Les minéralisations mercurifères de la zone Nord-numidique sont de direction E-W, correspondant à l'orientation (E-W) de la chaîne calcaire (Dorsale kabyle).

2- Lithostratigraphie et tectonique du district mercurifère

2. 1. Limites structurales

Dans la région étudiée, de Zit-Emba à Ras-El-Ma, des fenêtres d'érosion mettent à jour les schistes du Paléozoïque, qui pointent au milieu de terrain plus récents. Dans sa partie occidentale, ces fenêtres se disposent surtout en un alignement NE, qui souligne un accident tectonique de grande envergure, accompagné de minéralisations et de travertins. Cet alignement représente la limite occidentale du district mercurifère. Orienté NE-SW, cet accident à fort pendage délimite deux blocs tectoniques (zones).

La limite méridionale du compartiment mercurifère est représentée par l'importante faille de Kef-Hahouner, qui recoupe celle d'El-Kantour, au col des oliviers. D'extension

E-W, elle est suivie sur plus de 80 km, de Dj. Sidi-Dris, Kef-Hahouner, longe le Dj. Debagh et s'estompe dans la limite occidentale du bassin de Guelma. Le long de cet accident, au Nord, affleurent les formations carbonatées du Môle néritique du constantinois, qui sont en contact tectonique avec le Mio-pliocène continental au Sud. La localisation de sources thermales le long de cet accident, dont la composante verticale du rejet de plus de 2500 m, les nombreuses minéralisations en antimoine, arsenic et mercure, spatialement liées aux failles satellites de direction WSW-ENE, soulignent son importance.

La limite orientale du district est représentée par la faille de Zit-Emba, qui passe au SW de cette localité, puis longe le SW de la structure de la Safia et le NE de Koudiat-Sidi-Fritis (Fig. 2)

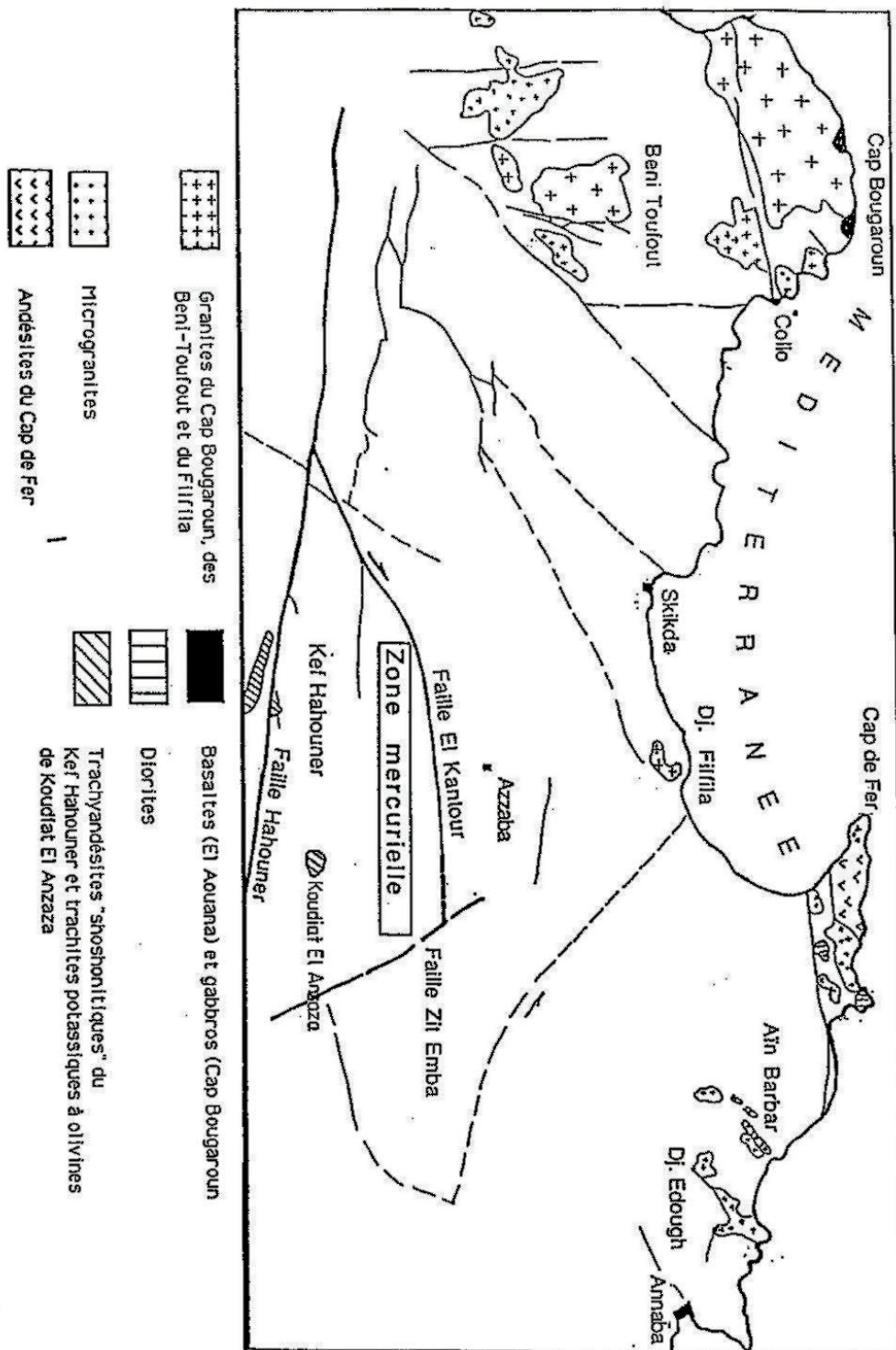


Fig.2 : La zone mercurielle Nord numidique – région de Azzaba ; dans le cadre magmatique du Nord-Est Algérien et position de quelques failles majeures. D’après Durand Delga (1978), complétée d’après M.T Bouarroudj (1986)

2.2. Les contacts tangentiels

Nous regroupons sous ce terme les contacts majeurs (de base de nappes) et les contacts secondaires (de duplication, de diverticulation et d'écaillage), car les uns et les autres sont susceptibles de jouer un rôle dans la création des pièges. Les géologues qui ont travaillé dans la région les ont qualifiés de « Chevauchement ».

Le nombre de chevauchement varie selon les auteurs. Les structures de ce type sont largement développées selon A.Menakov et J.Titov (1977), qui en dénombre quatre ; V.Raspopov (1970) en dénombre neuf, alors que M.T. Bouarroudj en dénombre trois.

2.2.1. Le chevauchement kabyle

Les schistes à chlorite-séricite, formant la « nappe » kabyle, chevauchent dans la région étudiée en certains endroits les formations du Néocomien et du Campanien et, en d'autres, les formations terrigènes du Lutétien-Priabonien. La surface du chevauchement est ondulée et a un pendage nord de 10 à 30°. Cette structure est suivie du Ghedir à Zit-Emba et affleure selon une direction E-W. Elle est affectée de failles postérieures, qui la décrochent en certains endroits, par exemple à Mra-Sma.

2.2.2. Le chevauchement d'Ismail

Cette structure est d'importance limitée dans l'espace du champ minier d'Ismail, ou elle n'est pas uniformément développée. Les roches terrigènes du lutétien-Priabonien constituent le toit de cette structure et ont formé un écran à la minéralisation dans les gisements du type Ismail. Le mur du chevauchement est formé par les conglomérats brèches calcaires de l'Hyprésien-Lutétien. Le pendage est de 10 à 30° N.

2.2.3. Le chevauchement numidien

Le front du chevauchement numidien suit celui du chevauchement kabyle, orienté sensiblement E-W, mais son mur est formé par les schistes du Paléozoïque et, en certains endroits, soit par les roches du Néocomien et Campanien, soit du Lutétien-Priabonien dans le champ minier d'Ismail.

2.3. Tectonique cassante

Les accidents disjonctifs se traduisent par des décrochements, des failles inverses et des failles normales, qui sont très développées dans la partie sud de la région et qui jouent un rôle important dans la localisation et la répartition des gisements et des indices mercurifères de la région. On observe trois directions principales : méridionale, nord-ouest et nord-est.

2.3.1. Faille de Bir-Dar

Cette faille limite la sous-zone de Saïafa à l'Ouest et la sépare de celle de Ghedir. De direction méridionale, elle traverse une assise homogène du Lutétien-Priabonien, qui ne permet pas d'établir sa morphologie ni l'amplitude du déplacement.

2.3.2. Faille de Mra-Sma

Elle traverse le versant droit de l'Oued Grayer. D'après la rupture du front kabyle, le rejet apparent horizontal est de 3,5 km. Elle traverse les formations de la dorsale et recoupe la « nappe » numidienne avec une direction N 300-310° W. Elle a été confirmée en profondeur par des travaux géophysiques.

2.3.3. Faille de Chergui

S'étend sur une distance de 5 km, cette faille, de direction N 50°E, longe le lit de l'Oued Chergui. La source thermique est localisée sur cette faille. Dans la partie centrale, elle décroche la faille de Mra-Sma sur 250 m. Les indices de Chergui et de Ferfour lui sont spatialement liés.

2.3.4. Faille d'Ahmed Ben-Ali

Elle possède une direction E-W au pied du versant nord de la chaîne numidique. Cette faille limite la dépression d'Azzaba au Sud. Dans l'Oued Saïafa, elle est cisailée par un accident méridional, qui provoque un déplacement horizontal de 200 m. A. Menakov et J.Titov lui confèrent le rôle principal de contrôle de la minéralisation dans la région d'Azzaba.

2.3.5. Faille de Zebda

Elle s'étend sur le flanc sud-est de l'anticlinal de Meksem. Morphologiquement, c'est une faille inverse de direction N 35°E, dont la lèvre affaissée est la partie sud-est. Cette faille est considérée comme une des principales structures contrôlant la minéralisation mercurifère du gisement de Ras-El-Ma.

2.3.6. Faille de Saïafa

C'est une faille de direction N 340°W, sécante par rapport aux structures plissées de la sous-zone de saïafa. Elle s'étend sur 2,5 km. C'est une faille normale redressée (75-90°), dont la partie affaissée est représentée par le flanc occidental. L'amplitude du rejet dépasse 200 m. Elle est accompagnée d'une zone de bréchification.

2.4. Principales phases tectoniques

La superposition de plusieurs épisodes tectoniques (jurassique-crétacé ; fini-lutétienne (priabonienne) ; fini-oligocène (burdigalienne) ; miocène (tortonienne) ; néotectonique) rend difficile une interprétation détaillée mais permet, néanmoins de souligner deux phases importantes : fini-lutétienne et fini-oligocène (tortonienne).

Les mouvements plus tardifs, résultant de la néotectonique, se traduisent surtout par des plissements et failles, qui confèrent à la région sa structure actuelle.

3. Géologie régionale

D'après l'état actuel des connaissances, tous les gisements de mercure de la région occupent une position géologique déterminée et peuvent être regroupés en champs miniers, caractérisés par une localisation spatiale et structurales communes. Le champ minier d'Ismail regroupant les trois gisements de Ras-El-Ma, Ismaïl, Guénicha, ayants pour horizon porteur de la minéralisation des conglomérats-brèches calcaires, datées de l'Hyprésien-Lutétien, chevauché par les alternances de siltites et grès du Lutétien-Priabonien (e^{4-5}), qui forment la couverture de la minéralisation.

Le champ minier de Mra-Sma, qui regroupe les gisements de Mra-Sma I, Mra-Sma II et Koudiat-Sma et a pour horizon porteur les pseudo-brèches calcaires du Campanien (C^5) et les grès du Néocomien (n^{1-3}), chevauchés par les schistes à chlorites-séricite du Paléozoïque.

La série numidienne, commune à ces deux champs miniers, forme la couverture des « nappes » kabyle à Mra-Sma et d'Ismail.

3.1 Géologie et minéralisation du champ minier d'Ismail

Trois « nappes » superposées sont connues dans le champ minier de Mra Sma. De haut en bas nous distinguons : la «nappe» numidienne, la «nappe» kabyle et la «nappe» d'Ismail. La majeure partie des réserves des gisements du type Ismaïl est toujours localisée dans la zone de broyage, formée de conglomérats brèches calcaires (e^{3-4}), recouverts par la «nappe» d'Ismail, composée de roches relativement imperméables (Fig. 3).

3.2 Cadre lithologique et structural

a) La nappe numidienne

La nappe numidienne forme une bande d'extension E-W dans toute la partie septentrionale du champ minier. On peut en distinguer deux parties :

- une partie supérieure formée de grès quartzeux avec une granulométrie moyenne, de couleur jaune ou brune, souvent fracturés en surface. Les grès sont souvent recouverts d'une carapace ferrugineuse de couleur marron.

- une partie inférieure formée d'argiles de couleur grise, verdâtre, violacée avec de rares intercalations de grès à grains fins et de couleur grise, gris-clair. Sa puissance dans le gisement varie de 0 à 200 m.

b) La « nappe » kabyle (P_z)

Les schistes à chlorites-séricites forment cette « nappe » dont le front de chevauchement a une extension E-W. En général, le front du numidien suit le contact du socle sur la dorsale, mais localement il peut le déborder et venir se reposer en discordance sur la dorsale. Cette « nappe » se développe au Nord et apparaît à Kalaa (Guénicha) ou à Ras-El-Ma sous forme de fenêtres d'érosion de dimensions variables.

A l'affleurement, ces schistes présentent des amandes de quartz blanc laiteux ou brun, quand il est fracturé. A Ras-El-Ma, des niveaux calcaires métamorphisés (cipolin) ont été mis à jour, près de l'ancienne usine de mercure. La puissance de la « nappe » varie de 0 à 40 m.

c) La «nappe» d'Ismail (e^{4-5})

La «nappe» d'Ismail affleure dans la partie orientale du gisement de Ras-El-Ma, la partie centrale du gisement d'Ismail et au Sud de Guénicha. Elle se développe toujours au Sud du front de chevauchement kabyle. Elle se compose de grès polygéniques, fins, finement lités, micacés parfois, intercalés dans des argiles et pélites de couleur brune, marron-foncé ou rouge lie de vin. Sa partie inférieure renferme souvent un niveau lenticulaire de microbrèches calcaires.

d) L'horizon minéralisé : L'Hyprésien-Lutétien (e^{3-4})

L'horizon porteur de la minéralisation est formé de conglomérats brèches calcaires dans sa partie supérieure, avec de rares intercalations d'argilites, de microbrèches calcaires et de calcaires gréseux. Localisé sous le chevauchement d'Ismail, sa partie supérieure est transformée en brèche tectonique, broyée, formant roche magasin. Sa puissance varie de 20 à 30 m.

Unité structurale	lithologie	Symbole et épaisseur (m)	Désignation et formation
La formation Post-nappe		q	Argilites sableuse et cailloutis
		M	Grès calcaires et conglomérat polymétalliques
Dorsale Kabyle		g ² :500m	Grès
			Argiles
			Conglomérats et grès polymétalliques
		ζ ² :400m	Conglomérats et grès polymétalliques
		e ⁴⁻⁵ :140m	Conglomérats bréchiqes avec une alternance de grès polymétalliques et argilites
		e ³⁻⁴ :45m	Conglomérats brèches calcaires, grès dolomitiques
		e ³ :20m	Grès calcaires parfois argilites et siltites
		e ²⁻³ :35m	Calcaires dolomitiques, gréseux et parfois argilites
		e ¹ :15m	Conglomérats massifs
		C ⁶ :13m	Aleurolites, calcaires gréseux et argilites
		C ⁵ :120m	Conglomérats de bas calcaires, calcaires siliceux, pseudo-brèches calcaires
		n ¹⁻³ :130m	Conglomérats brèches calcaires avec des microbrèche
		J ³ : 25-50m	Conglomérat brèches avec des microbrèches
		J ² :30m	Grès calcaireux et des schistes calcaireux
		J ¹ :23m	Dolomie, calcaires intercalé par des dolomies gréseux
	t ¹⁻³ :450-500m	Conglomérats quartzeux, grès polygéniques alternants avec des aleurolites	
Socle Kabyle		p _z :<400m	Schistes sériciteux, chlorite avec des lentilles de quartz et parfois des schistes charbonneux
		x _{go} : 150m	Gneiss

Fig.3 : Log stratigraphique de la zone mercurielle Nord numidique

3.3 Cadre géologique du gisement de Fendek

Situé dans la zone mercurielle Nord-numidique, le gisement de Fendek se distingue par des caractéristiques géologiques propres à cette situation, à savoir la présence de deux ensembles structuraux complexes : autochtone et allochtone (Fig. 4).

L'autochtone est composé de dépôts disloqués du Paléocène - Eocène (e^{1-3}), il est formé de Grès, calcaire, microbrèches carbonatées, brèches, conglomérats du Thanétien-Hyprésien (e^{2-3}) et de l'hyprésien-Lutétien (e^{3-4}). La surface de l'autochtone représente un soulèvement local compartimenté par une série de failles subparallèles de direction Nord-Ouest qui est à l'origine d'une structure linéaire en bloc constituant une zone métallifère principale.

L'allochtone est formé par une série d'écailles faites de roches d'âge et de composition diverses, allant des schistes métamorphiques du Paléozoïque, jusqu'aux argiles de l'Oligocène. On y retrouve certaines écailles datées de leur propres noms: Nappe numidienne, chevauchement kabyle, chevauchement d'Ismail.

La nappe Numidienne est une écaille supérieure composée de grès et d'argiles de l'Oligocène.

Le chevauchement kabyle est représenté par les schistes métamorphiques du Paléozoïque.

Le chevauchement d'Ismail est formé d'argiles et d'aleurolites du Lutétien - Priabonien. (e^{4-5}).

La quantité d'écailles Allochtone est différente. Au flanc Nord du gisement, on trouve une structure à deux termes qui sont les schistes paléozoïques et qui sont surmontés par série de grès et d'argile de l'Oligocène. Dans la partie centrale du gisement, à côté des argilites du chevauchement d'Ismail, on constate un autre niveau de schistes du Paléozoïque. La puissance de l'allochtone étant grande, elle varie de 115 à 280 mètres et augmente progressivement vers le Nord.

La stratigraphie de la région est représentée par des roches allant du Paléogène au Quaternaire.

Paléogène :

Le champ minier est largement représenté par les roches du Paléocène, du Thanétien-Hyprésien, de l'Hyprésien-Lutétien et du Lutétien-Priabonien. Ce sont des roches encaissant la minéralisation (Paléocène, Thanétien, Lutétien) et elles jouent également le rôle d'un écran (Lutétien - Priabonien) pour la minéralisation mercurielle.

- Paléocène (e^1)

Les roches du Paléocène reposent en discordance sur les roches du Maestrichien et représentent les conglomérats des calcaires à lits de grès et de conglomérats - brèches.

Dans la partie supérieure de la carte on trouve des grès et des argilites dont la puissance varie de 15 à 30 m.

- Thanétien - Hyprésien (e²⁻³)

Les dépôts du Thanétien - Hyprésien représentent une série de grès quartzeux calcaireux à lits de gravelites quartzueuses et à lentilles de microbrèches carbonatées. Il y'a également 3 à 4 lits d'argiles. A la base on trouve une couche de conglomérat-brèche à débris fins, de faible puissance.

La puissance de cette série est de 27 à 40 mètres.

- Lutétien- Priabonien (e⁴⁻⁵)

Les roches du Lutétien - Priabonien représentent une série fluschoïde d'aleurolites et de grès. Les aleurolites et les argiles prédominent. Les roches sont de couleur grise, vert-gris et brune. La puissance de la série est de 100 mètres. Les dépôts du Lutétien - Priabonien constituent le chevauchement d'Ismail.

Paléozoïque (Pz):

Les écaïlles du Paléozoïque sont représentées par les schistes graphiteux, les lentilles de calcaires métamorphisés et les filonnets lenticulaires de quartz amorphe blanc. La puissance des roches varie de quelques mètres jusqu'à 30 35 m.

Oligocène supérieur (g):

Cet étage est principalement composé d'argiles à lits de grès quartzeux finement lités de couleur grise et gris verdâtre.

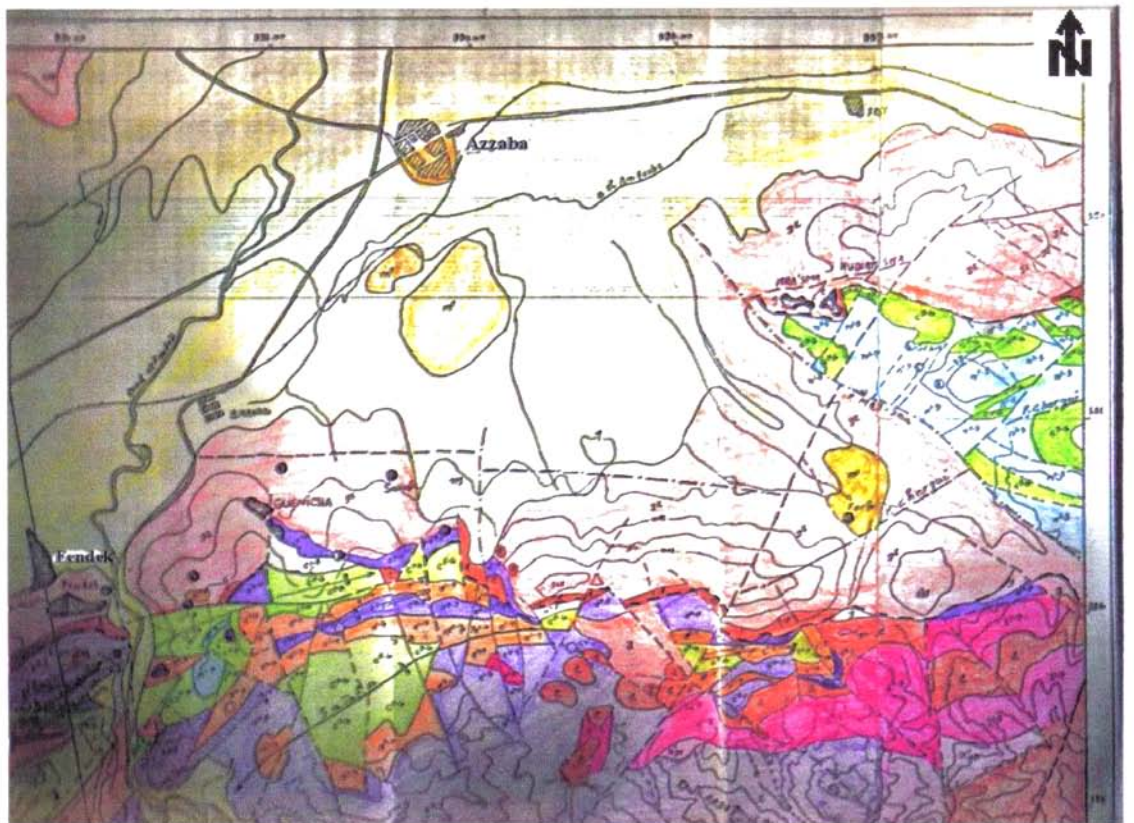
La partie supérieure de la série oligocène est représentée par des grès quartzeux à grains différents de couleur blanche, grise, brun - jaune. La puissance des dépôts augmente vers le Nord, en atteignant 300 mètres.

Quartenaire (Q):

Les dépôts en question sont représentés par les formations déluviales, proluviales, alluviales, les travertins et les tufs calcaireux.




Leur puissance varie de quelques mètres jusqu'à 15 - 20 mètres.

La minéralisation mercurielle s'associe à une zone de brèches sous - chevauchement, localisée à la limite de l'allochtone et de l'autochtone. La zone minéralisée plonge au NW sous un angle de 25 - 30°. Dans cette direction sa puissance augmente et la teneur en mercure aussi. Le gîte du minerai est stratiforme. Sa largeur varie de 200 à 50 mètres, en s'amincissant vers le Nord. La longueur est de 500 m. La puissance de la zone varie de 2-3 m à 30 mètres, en faisant 5 - 8 m en moyenne. La profondeur de cette zone varie de 130 mètres au flanc Sud à 300 mètres à celui du Nord (Fig. 5).



0.00 0.25 0.50 0.75 1.00 Km

Légende :

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> q Quaternaire : dépôts continentaux m³ Miocène Burdigalien : Grès calcaireux à intercalation d'aleurolites, d'argiles et de Conglomérats. t³⁻² micacés à intercalations. t²⁻³ Lutétien Supérieur-Priabonien : Argiles, Aleurolites, Grès polygéniques. t¹⁻⁴ Paléocène-Lutétien : Calcaires, conglomérats-brèches, microbrèches, calcaires-gréseux calco-quartzeux. c³⁻⁶ Campanien-maestrichien : Conglomérats-brèches, brèches calcaires, grès calco-quartzeux, intercalations d'argiles et d'aleurolites. n³ Néocomien : Conglomérats, Conglomérats-brèches, Grès calcaireux, Calcaire argileux, intercalations d'argilites et de Silex. j³⁻⁶ Jurassique supérieur : Grès d'aleurolites, Schistes silicito-argilitiques, Conglomérats brèches calcaires. | <ul style="list-style-type: none"> j¹⁻² Jurassique inférieur : Dolomies Calcaires Silex t¹⁻¹ Trias : Grès polygéniques, aleurolites, calcaires marneux, intercalations de dolomies. p² Paléozoïque inférieur : Schistes métamorphiques à intercalations de marbre et de quartzites. p¹ Protérozoïque inférieur : Gneiss  Limites des nappes de chevauchements  Faille principales et secondaires.  Contour des gisements et indices (a) de mercure (b) de Plomb, de Zinc, de Cuivre. AXES : <ul style="list-style-type: none"> (a) - des principaux anticlinaux et secondaires (b) - des synclinaux (c) - des plis renversés. |
|---|---|

D'après BENHAMZA Moussa (1996) .

Fig. 4 : Carte géologique schématique de la zone mercurielle Nord numidique

1. Introduction

Le principal cours d'eau traversant la région est l'oued Fendek qui prend sa source dans les contreforts septentrionaux de la chaîne numidique. En amont il a une direction subméridionale et dans la dépression de azzaba sa direction est proche de celle de l'Est.

Les pentes de la vallée varient de 0.05 - 0.01 (en amont) à 0.002 - 0.001 (à proximité de azzaba).

Le régime hydrologique de l'oued Fendek est en fonction de celui des précipitations. La consommation de l'oued varie de 0.5 - 0.1 litre/seconde en été, jusqu'à quelques dizaines de m³/s, durant les périodes de pluies en hiver.

Pendant les années de sécheresse (cela peut se produire quelques années successives), le ruissellement est pratiquement absent pendant 4 à 5 mois d'été.

L'étude des données climatologiques facilite la compréhension des mécanismes de l'alimentation et de la circulation des eaux naturelles. Elle permet de déterminer les termes du bilan hydrique notamment les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration.

Dans cette étude on a utilisé les données de la station météorologique de Azzaba pour une période allant de 1984 à 2004, dont les coordonnées sont mentionnées dans le Tableau 1

Coordonnées	X	Y	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
Station de Azzaba	892.35	391.35	7°5.4 SE	36°44 N	93	1984-2004

Tableau 1 : Coordonnées de la station de Azzaba

2. Le climat

L'étude climatologique permet de déterminer les processus en action dans le milieu physique et de conditionner les activités humaines en particulier l'agriculture.

Les précipitations atmosphériques (P), la température (T), l'évapotranspiration (ETP) et l'infiltration (I), sont les principaux facteurs climatiques ayant une influence sur le régime hydrologique de la région.

2.1 Les précipitations

On entend par précipitations la hauteur de la lame d'eau recueillie par le pluviomètre, quelque soit l'origine de cette eau, pluie, neige,...etc.

Nous nous intéressons dans cette étude uniquement aux précipitations liquides (pluies), qui constituent le facteur fondamental dans le comportement hydrogéologique de la région.

Pour avoir une idée sur la pluviométrie de la région pour la période 1984-2004, nous avons dressé l’histogramme des précipitations moyennes mensuelles pour la station de Azzaba.

Les maxima de la moyenne mensuelle des précipitations sont enregistrés durant les mois de Décembre et Janvier qui sont respectivement 126.7 mm et 108.13 mm. Le minimum est observés durant le mois de juillet avec la valeur de 0.95 mm (Fig. 6)

mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
station Azzaba	20,24	47,08	73,38	126,7	108,13	81,52	57,39	42,6	23,63	6,61	0,95	2,91

Tableau 2 : Précipitation moyenne mensuelle station de Azzaba (Période 1984-2004)

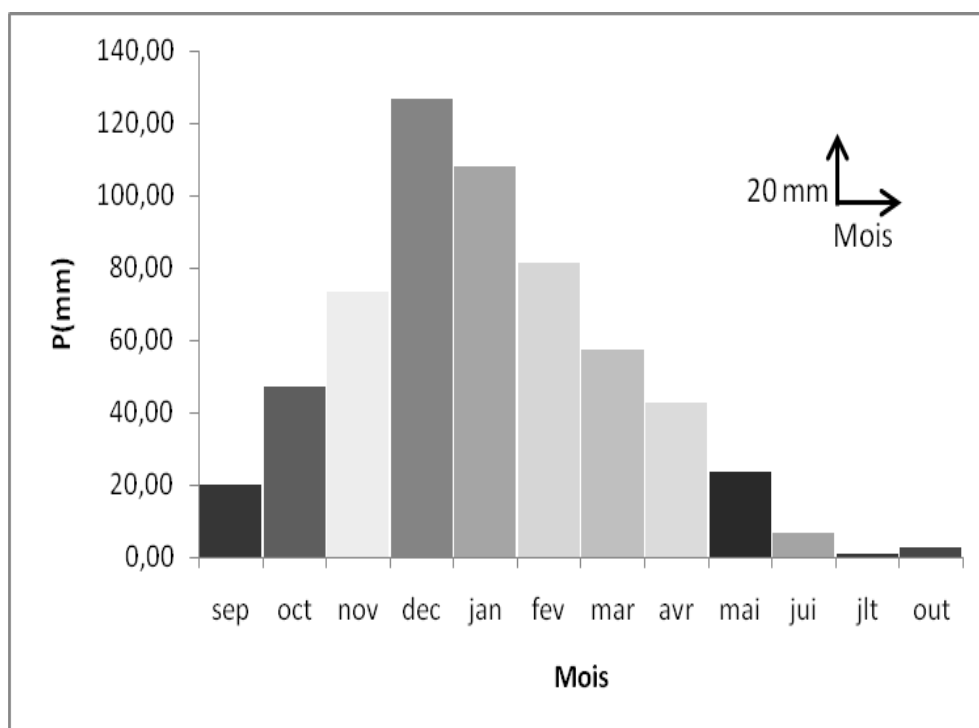


Fig. 6 : Histogramme des précipitations moyenne de la station de Azzaba pour la période (1984-2004)

2.2 Température :

La température est un facteur climatique très important ayant une influence sur le bilan hydrique du fait qu'il conditionne l'évaporation. Les données traitées concernent la station de Azzaba pour une période de 20 ans (1984-2004).

La température moyenne minimale est observée durant le mois de Janvier avec 13,0 C°, alors que la température moyenne mensuelle maximale est de 25,1 enregistrée durant le mois de Août (Tableau 3).

Station	Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
	T(C°)												
Azzaba	Tmoy(C°)	23,9	20,8	16,2	14,2	13,0	13,1	14,4	16,0	18,6	21,4	23,9	25,1

Tableau 3 : Température moyenne mensuelle dans les stations d'Azzaba (Période 1984-2004)

2.3 Courbe ombro-thermique :

L'analyse des deux paramètres climatiques : température et précipitation permet de tracer la courbe ombro-thermique qui permet de mettre en évidence les deux périodes sèche et humide.

L'étude de la courbe ombro thermique sur une période 20 ans (1984-2004) (Fig. 7), montre que la région de Azzaba est caractérisée par deux (02) périodes.

- L'une humide et pluvieuse s'étalant du mois d'Octobre jusqu'à la fin d'Avril, caractérisée par une précipitation considérable atteignant 126.7 mm durant le mois de Décembre.
- L'autre sèche s'étalant du mois de mai jusqu'au la fin de Septembre avec un maximum de précipitation de 42.60 mm et une température moyenne maximale de l'ordre de 25.12 °C

On peut donc dire que la région de Azzaba présente un climat sub-tropical méditerranéen caractérisé par deux saisons. L'une humide et pluvieuse et l'autre sèche.

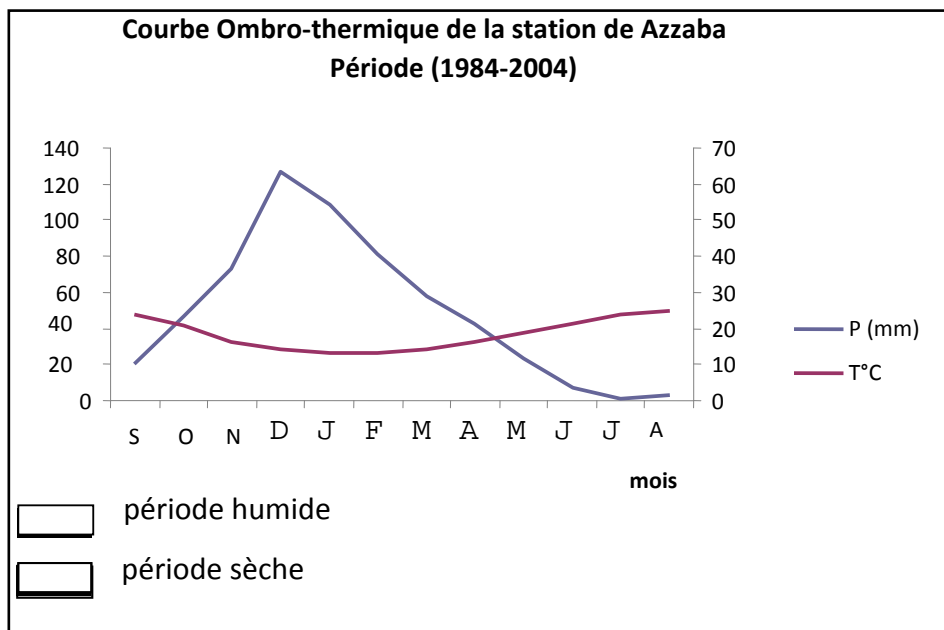


Fig. 7 : Courbe ombro thermique de la station de Azzaba (1984-2004)

3. Bilan hydrique

Le bilan hydrique permet de cerner plus précisément la notion de sécheresse. La sécheresse peut être reconnue de façon très approximative, lorsque les précipitations et les réserves d'eau capitalisées dans le sol ne compensent pas la capacité évaporatrice du sol et les besoins de la végétation qui représente l'évapotranspiration potentielle.

Le bilan étant le résultat d'une balance entre les apports ou entrées et les dépenses ou sorties.

Le bilan hydrique est estimé par la formule générale suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Ou :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm)

R : Ruissellement moyen annuel en (mm)

I : Infiltration moyenne annuelle en (mm)

Le but du bilan hydrique est d'évaluer la répartition des quantités d'eau reçues par un bassin versant des diverses composantes (écoulement, infiltration et évaporation).

3.1. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration englobe l'ensemble des phénomènes qui conditionne de façon importante le cycle de l'eau principalement au niveau de l'interface entre l'atmosphère et de la lithosphère (sol tranche saturée), ou bien, c'est l'ensemble des phénomènes qui par un processus physique transforment l'eau en vapeur

On distingue :

- L'évapotranspiration réelle (ETR)
- L'évapotranspiration potentielle (ETP)

3.1.1. L'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle est la somme de l'évaporation et la transpiration réelle pour une surface donnée est une période définie.

On estime l'ETR à partir de la formule de « TURC »

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm)

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm)

T : Température moyenne annuelle en C°

3.1.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau qui se serait évaporée ou transpirée à la surface du sol, et peut être calculée par la formule de C.W. Thornthwaite suivant la relation :

$$ETP = 16 \left[\frac{10T}{I} \right]^a \cdot K \quad (\text{cm/mois})$$

Avec :

$$a = 0.0016 I + 0.5 \quad /a = \text{cst régionale déterminée par la méthode de régression}$$

$$I = \sum_1^{12} i \quad \text{.au} \quad i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.5}$$

K : coefficients d'ajustement mensuel

T : Température moyenne mensuelle en C°

ETP : évapotranspiration potentielle en mm

I : indice thermique mensuel

I : indice thermique annuel

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24

Tableau N°4 : Coefficients d'ajustement mensuel

3.2 Déficit agricole (DA)

La différence entre l'évapotranspiration potentielle (ETP), et l'évapotranspiration réelle (ETR) ainsi calculée constitue le déficit d'eau, car il représente la quantité d'eau supplémentaire qui aurait pu être utilisée par les plantes et le sol si la disponibilité en eau avait pu être artificiellement complétée par un système d'irrigation.

Le déficit agricole représente sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux cultures (par l'irrigation) pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse. Il est donné par l'expression :

$$DA = ETP - ETR$$

3.3 Expression du Bilan Hydrique

En admettant que la répartition de la hauteur des précipitations sur le sol se divise en trois fractions : Le ruissellement de surface (R), l'infiltration (I) et l'évapotranspiration réelle (E) d'où :

$$P = E + I + R$$

3.4 Méthode du bilan hydrique de Thornthwaite:

Thornthwaite a développé une méthode de calcul de l'évapotranspiration réelle mois par mois, connaissant l'**ETP** et la pluviosité **P** et en admettant que les premières couches du sol et du sous sol contiennent un stock optimum d'eau qu'il faut reconstituer avant qu'il puisse y avoir infiltration ou ruissellement et dont une partie alimente l'évapotranspiration en cas de déficit pluviométrique. C'est la méthode dite du bilan hydrique pour laquelle on établit un bilan mois par mois.

La difficulté essentielle réside dans le choix de la valeur optimum du stock : 50, 100, 200 mm.

La valeur la plus généralement admise pour un grand nombre de sols est de 100 mm.

On fait remarquer que plus les précipitations sont inégalement réparties plus l'ETR diffère de l'ETP.

Le bilan hydrique permet de quantifier les transferts d'eau issus des précipitations et convient de caractériser un sol au point de vue sécheresse ou d'humidité.

L'étude du bilan hydrique portant sur une période plus ou moins longue, permet d'esquisser plusieurs caractéristiques de l'écoulement :

1. $P > ETP$:

Si les précipitations (p) d'un mois sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle (ETP).

- a. L'évapotranspiration réelle (ETR) est égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP)
- b. L'excédent (EX) des précipitations sur l'évapotranspiration potentielle est emmagasiné dans l'humidité du sol, dont il augmente les réserves jusqu'à la saturation.
- c. La partie de l'excédent dépasse éventuellement les réserves cumulées 100 mm et se trouvent disponibles pour l'alimentation de l'écoulement de surface et des nappes profondes (ruissellement et infiltration).

2. $P < ETP$:

Si les précipitations (P) sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle est la somme des précipitations du mois et de tout ou d'une partie de la réserve d'eau du sol, celle-ci est supposée comme suit :

- a. Si les réserves antérieures d'humidité du sol sont assez fortes pour combler l'insuffisance des précipitations (P) est encore égale à l'ETP. Les réserves du sol sont alors réduites de la différence entre l'ETP et P du mois considéré.
- b. Si La réserve d'humidité des sols est insuffisante pour satisfaire l'ETP, l'ETR reste inférieure celle-ci est égale à la somme de précipitations du mois et des réserves disponibles.

3.5 Interprétation du bilan

En ce qui concerne le cas de la station de Azzaba pour la période allant de 1984 à 2004 (Tableau 5), on voit que les précipitations ont une sommation de 740.4 mm, la somme de l'évapotranspiration est de l'ordre de 495,6 mm représentant pratiquement 67 % des précipitations.

L'écoulement représentant l'excédant en eau, qui commence après le remplissage de la réserve facilement utilisable, estimée dans notre cas à 100 mm, est estimé à 244,8 mm et ne concerne que la période humide allant du mois de Décembre jusqu'à Avril

La R.F.U est vidée complètement depuis le mois de Juin jusqu'à octobre.

Le déficit est marqué depuis le mois de juin jusqu'à octobre représentant 401,9 mm nécessitant ainsi une irrigation (Fig. 8).

mois	T (°C)	<i>i</i>	K	ETP (mm)	P (mm)	BH	VR	RU	ETR (mm)	Def	Exc
S	23,86	10,7	1,03	109,5	46,745	-62,8	0,0	0,0	46,7	62,8	0,0
O	20,995	8,8	0,97	80,6	65,115	-15,4	0,0	0,0	65,1	15,4	0,0
N	16,665	6,2	0,86	45,7	90,485	44,8	44,8	44,8	45,7	0,0	0,0
D	13,68	4,6	0,81	29,4	141,25	111,9	55,2	100,0	29,4	0,0	56,6
J	12,515	4,0	0,87	26,6	116,39	89,8	0,0	100,0	26,6	0,0	89,8
F	12,61	4,1	0,85	26,3	91,55	65,2	0,0	100,0	26,3	0,0	65,2
M	14,2	4,9	1,03	40,2	62,745	22,6	0,0	100,0	40,2	0,0	22,6
A	15,82	5,7	1,10	52,9	63,405	10,5	0,0	100,0	52,9	0,0	10,5
M	18,75	7,4	1,21	80,8	38,355	-42,4	-42,4	57,6	80,8	0,0	0,0
J	22,25	9,6	1,22	113,3	13,16	-100,2	-57,6	0,0	70,8	42,6	0,0
J	24,98	11,4	1,24	144,1	3,275	-140,8	0,0	0,0	3,3	140,8	0,0
A	26,235	12,3	1,16	148,2	7,95	-140,2	0,0	0,0	8,0	140,2	0,0
Annuel	18,5	89,6		897,5	740,4	-157,1			495,6	401,9	244,8

Tableau 5 : Bilan hydrique station de Azzaba période (1984-2004)

T (°C)	Température mensuelle	VR	Variation des réserves
I	Indice thermique	RU	Réserves utiles RFU Réserves facilement utilisable
K	Coefficient de latitude	ETR (mm)	Evapotranspiration réelle
ETP (mm)	Evapotranspiration potentielle calculée	Def.	Déficit agricole
P (mm)	Précipitation mensuelle	Exc.	Excédent
BH	Bilan hydrique		

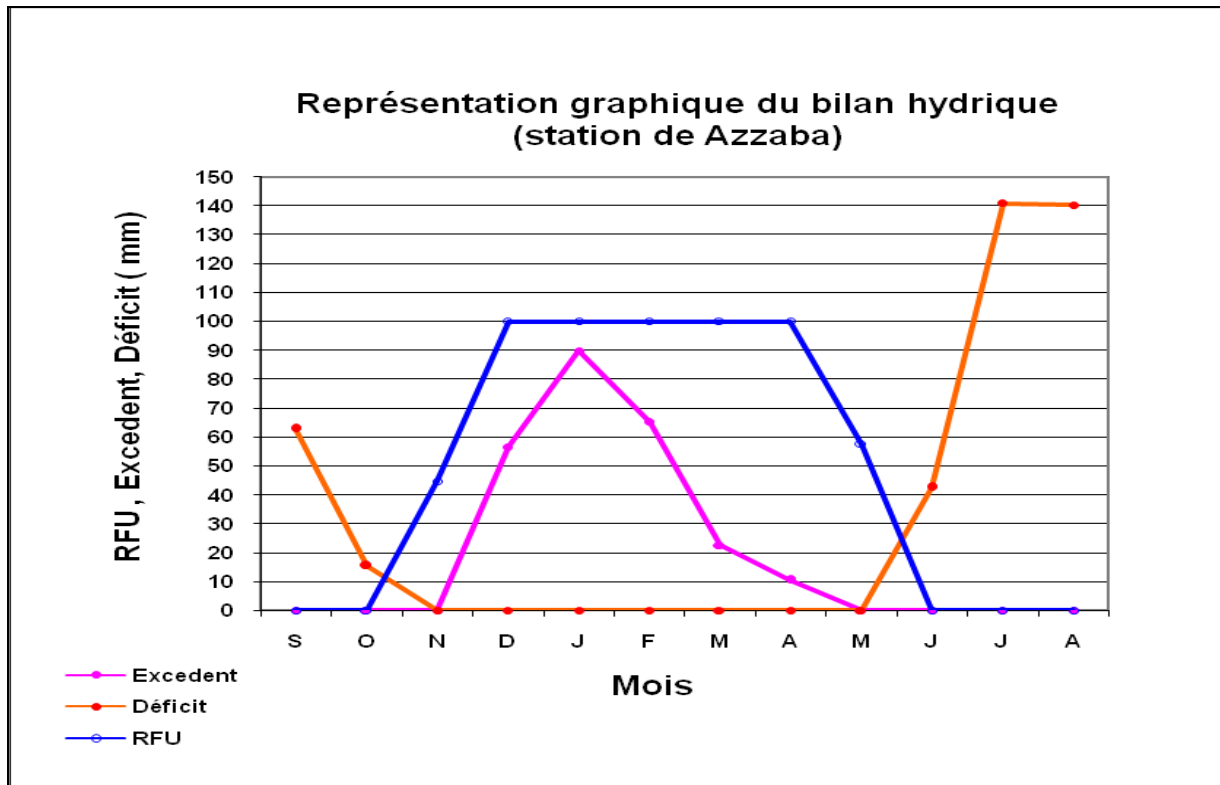


Fig.8 Représentation graphiques du bilan hydrique station de Azzaba (1984-2004).

Conclusion :

Les données climatiques étudiées ont permis de conférer de Azzaba un climat sub-tropical méditerranéen caractérisé par une saison humide longue s'étalant du mois d'Octobre jusqu'à la fin d'Avril et par une autre saison sèche courte qui va de Mai à Septembre.

La région de Azzaba reçoit en moyenne une précipitation annuelle de 740,4 mm/an avec une température moyenne annuelle de 18.5 C°

Le déficit agricole dans la région correspondant à 401,9 mm représente 54.28 % des précipitations.

L'évapotranspiration réelle est de l'ordre de 495,6 mm représentant 66.93 % des précipitations.

1. Introduction

Le chapitre de géophysique a pour but de mettre en évidence les particularités hydrogéologiques de la région et de déterminer le nombre d'aquifères caractérisant la région d'étude.

2. Méthodologie et volume des travaux

Au cours de l'étude hydrogéologique réalisée par l'équipe de l'O.R.G.M, dans la zone Nord numidique et notamment le gisement de Fendek, plusieurs travaux ont été réalisés :

- le forage des sondages hydrogéologiques
- l'étude géophysique des sondages
- les essais hydrogéologiques

2.1 Forage des sondages hydrogéologiques

Les forages ont été réalisés afin de recouper les complexes aquifères, les accidents tectoniques aquifères et les zones de broyage, afin d'étudier les conditions de leur disposition et leur extension.

L'équipe de l'O.R.G.M a foré deux faisceaux de sondages hydrogéologiques.

Le premier a été destiné au recouplement du complexe aquifère de l'Oligocène et à l'échantillonnage des carottes des roches argileuses (Fig.9)

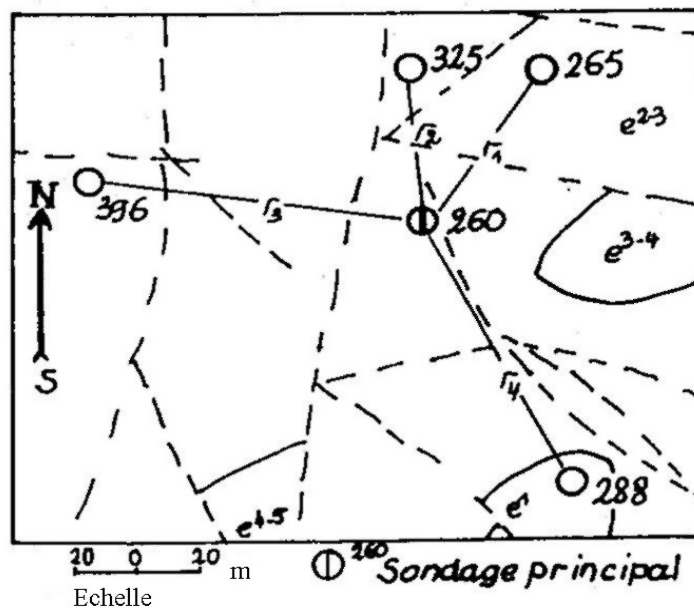


Fig. 9: Faisceau 1 des sondages hydrogéologiques

Le deuxième a été destiné à recouper le complexe aquifère des zones de broyage sous chevauchement et des accidents tectoniques (complexe aquifère du Paléocène-Eocène) et à réaliser l'échantillonnage de carottes des roches métallifères.

Pour le premier faisceau le sondage central 260 recoupant la nappe aquifère de l'Oligocène, a été foré à proximité du sondage de prospection 260. Les quatre (04) sondages d'observations (325, 396, 265, 288), ont été forés pour étudier les conditions aux limites et le caractère de développement de la dépression aux flancs N, E, S, W du gisement.

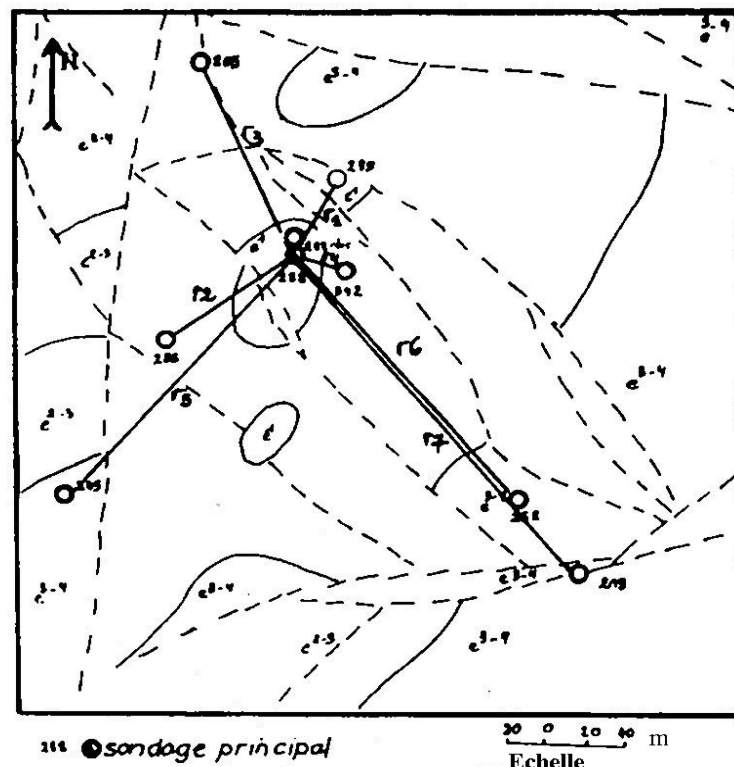


Fig.10: Faisceau 2 des sondages hydrogéologiques

Le sondage central 288 du deuxième faisceau a été foré sur le site du sondage de prospection 288. Le choix de l'emplacement a été conditionné par les facteurs suivants :

Lors du forage du sondage 288, on a recoupé une puissante zone de broyage de 30 m ; il a été constaté une chute de matériel de 02 mètres, ce qui indique la présence de vides karstiques.

Dans le deuxième faisceau on a 8 sondages d'observations. Pour étudier la caractéristique d'expansion de la dépression et le rôle des limites naturelles à l'Ouest et au Sud, les forages suivants ont été forés : 285, 245, 342, 358, 219 et 265, montrant la liaison au Nord et à l'Est. (Fig.10)

Afin d'étudier les liaisons hydrauliques du complexe aquifère du Paléocène-Eocène avec les eaux souterraines de l'Oligocène, à côté du sondage 288 Hy, le sondage d'observation 288 a été foré dans les dépôts de l'Oligocène.

2.2 Travaux topographiques

Les travaux topographiques ont eu pour objectif le rattachement des sondages des deux faisceaux. Ainsi 12 sondages ont été rattachés aux points géodésiques.

Les coordonnées sont consignées dans le tableau 6

<i>N° du Sondage</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
260	889.661.48	386.380.04	143.87
396	889.576.92	386.384.71	143.88
325	889.643.48	386.421.34	137.99
288 Hy	889.711.41	386.300.83	155.92
265	889.700.00	388.431.08	139.48
219	889.844.73	386.124.38	192.01
258	889.799.17	386.158.32	184.50
289	889.735.17	386.312.83	155.73
245	889.605.92	386.161.65	175.83
285	889.648.22	386.229.51	164.29
342	889.727.83	386.266.69	163.50
288 obs.	889.705.99	386.310.48	153.92

Tableau 6 : Coordonnées topographiques des sondages

3. Travaux géophysiques

Les objectifs principaux des travaux géophysiques de diagraphe le long des trous de sondages hydrogéologiques réalisés étaient :

1°) La différenciation lithologique des roches le long des trous de sondages et la détermination de leur épaisseur.

2°) Le Positionnement des venues d'eau existantes le long des trous, pour le placement des crépines avant le pompage.

3°) La correction des log, là où il y'a une mauvaise récupération de la carotte.

4°) L'étude de la porosité et de la perméabilité des roches le long des trous de sondages.

Il n'existe pas dans le secteur de d'étude une grande diversité de roches pouvant compliquer l'interprétation des diagraphies. La coupe géologique de ce secteur est constituée principalement de deux roches différentes les grès et argiles de l'Oligocène et ceux du Paléocène-Eocène.

Du point de vue propriétés physiques, ces deux roches sont bien distinctes (Radioactivité naturelle, porosité, conductibilité électrique, densité...etc.).

Ces différentes propriétés ont facilité l'étude des diagraphies, pour le choix des méthodes convenables, pour résoudre les problèmes cités ci dessus, d'une part et l'interprétation des données, d'autre part.

Les principales méthodes utilisées pour la résolution de ces problèmes en question sont:

- diagraphie électrique (résistivité, polarisation spontanée), radioactivité naturelle et résistivité des fluides plus température.
- des méthodes auxiliaires telles que le Diamètreur et la Résistance mono.

Le Tableau 7 ci dessous montre les différentes méthodes effectuées dans chaque sondage.

<i>N° de sondage</i>	<i>METHODES UTILISEES</i>
258	γ ray, δ fluide, T, R mono, 0,4 AM.
289	γ ray, δ fluide, δ 0,4 AM, δ 0,6 AM, PS, T.
245	γ ray, δ fluide, T, diamètreur, δ 0,4 AM, PS.
219	γ ray, R mono, δ 0,4 AM, PS, diamètreur, δ fluide.
342	γ ray, R mono, δ 0,4 AM, δ fluide, diamètreur, T°.
288	γ ray, R, PS, δ 0,4 AM, δ fluide, T°, δ 0.6AM
325	γ ray, PS, δ 0,4 AM, δ fluide, T.
396	γ ray, PS, δ 0,4 AM, δ fluide, T.
265	γ ray, PS, δ 0,4 AM, δ fluide, T.
285	γ ray, PS, δ 0,4 AM, δ fluide, T, R mono.
260	γ ray, PS, δ 0,4 AM, Rmono, δ fluide, T.

Tableau 7 : différentes méthodes géophysiques appliquées

3.1 Introduction

Les Diagraphies ou Logging sont l'enregistrement de paramètres physiques dans les forages.

Pour autant qu'on sache relier ces paramètres et leur variations aux propriétés physiques et/ou chimiques des formations géologiques et des fluides contenus, on dispose alors d'un instrument sans égal pour étudier les roches et leur contenu éventuel.

De plus, la modification d'un paramètre géologique doit se répercuter sur un ou plusieurs paramètres physiques, toute variation de paramètres physiques aura donc généralement une signification géologique. Les diagraphies donnent des indications précieuses sur les variations lithologiques.

Par comparaison des différents log au sein d'un même forage et par corrélation de ces enregistrements avec ceux d'autres forages, on peut déterminer avec une assez grande précision l'extension, la forme et la potentialité d'un réservoir.

L'utilisation des diagraphies pour délimiter, cette fois, des réservoirs d'eau souterraines se résume à :

- la définition des limites des bancs poreux et perméables (PS - mono - électrode)
- la distinction entre bancs poreux perméables et bancs imperméables et une implantation judicieuse des crépines (sondes normales et latérales PS).
- la localisation des venues d'eau latérales et des interfaces eau douce - eau salée (résistivité des fluides),

Ce qui apporte des renseignements sur les circulations dans les aquifères.

- faciliter les corrélations entre forages (sondes normales et latérales, PS, γ ray etc..).
- indication lithologique
- estimation de la porosité et de la perméabilité.
- estimation du % d'argile dans les formations argilo sableuses.

3.2 Paramètres enregistrés

Une bonne compréhension des enregistrements passe par une étude préalable des phénomènes enregistrés.

Nous allons donc passer en revue les différents outils utilisés dans notre étude.

a) le log PS

Le log PS (S.P. en anglais) est la mesure, en fonction de la profondeur, de la différence de potentiel naturelle existant entre une électrode qui descend dans le trou et une électrode fixe en surface.

Ce sont les différences entre les caractéristiques du fluide utilisé pour le forage, boue ou eau et celles du milieu originel qui sont à l'origine de la création des courants de polarisation spontanée.

Le développement et l'amplitude des courants PS seront le résultat et le reflet:

- de la présence d'argile,
- des salinités des fluides en présence dans la formation et dans le trou de forage.

- de la perméabilité de la roche.
- de la lithologie.

L'examen d'une courbe PS permet de:

- localiser les bancs poreux et perméables
- localiser les bancs d'argile
- estimer le % d'argile
- déterminer la quantité de l'eau de la formation.

b) les log électriques

La résistivité électrique d'une roche (qui s'exprime en ohms m) est presque toujours de type électrolytique, C'est à dire que les roches conduisent le courant électrique grâce à l'eau qu'elle contiennent. La résistivité électrique du sous-sol dépend essentiellement:

- de la qualité de l'électrolyte
- de la quantité d'électrolyte contenue dans la roche, ce qui dépend essentiellement de la porosité.
- du mode de distribution de l'électrolyte.

Les diagraphies électriques sont des mesures du paramètre de **résistivité**.

Toutes les sondes de résistivité nécessitent l'émission de courant par l'intermédiaire d'électrodes descendues dans le forage.

Il existe un très grand nombre d'outils (sondes) permettant d'obtenir la résistivité.

Les sondes utilisées dans notre travail sont les sondes normales: petite (0,4m = AM, 16'') et grande normale (1,6m=AM 64''). Les électrodes B et N sont rejetées à l'infini à la surface du sol. A et M sont descendues dans le trou.

Les log électrique nous donnent des renseignements sur:

- la lithologie
- la porosité
- les fluides présents, eau douce, eau salée, air et leur % réciproque.
- l'ensemble des phénomènes d'anisotropie lors de l'exécution des log électrique (PS et résistivité), le fluide de forage participe à la mesure et cela introduit une limitation à la réalisation de ces mesures qui ne peuvent s'effectuer que si le fluide de forage est conducteur (boue ou l'air) et en l'absence de tubage métallique.

c) Le gamma ray

Le gamma- ray est une mesure de la radioactivité naturelle existant dans certaines roches.

En général, les calcaires, les grès, les sables et les dolomies contiennent un % d'éléments radioactifs assez faibles. Le sel (chlorure de sodium) a une radioactivité pratiquement nulle. Par contre, les argiles et les marnes de formation marine, les argiles et les schistes carbonneux ou bitumineux, ainsi que les cendres volcaniques acides sont porteur des radioactifs. IL semble que:

- la radioactivité d'une roche soit fonction de son contenu en matière argileuse.
- Le gamma ray peut être enregistré en trou tubé ou non, vide ou rempli de fluide.

Le log gamma ray est particulièrement utile pour:

- repérer les bancs argileux
- estimer le % d'argile dans les formations argilo- sableuses.
- la détection et l'évaluation de minerais radioactifs.
- les corrélations entre forage lorsqu'on dispose de trous tubés métalliques.

An pourra recourir au log gamma ray chaque fois que la PS est inutilisable. C'est le cas dans les trous tubés ou remplis d'air par exemple.

d) Log résistivité du fluide

La qualité du fluide utilisé pour le forage joue un rôle primordial, que ce soit de la boue ou de l'eau, les qualités de ce fluide doivent être contrôlées soigneusement: c'est le log de résistivité du fluide. Cette diagraphie permet de mettre en évidence des venues et des pertes d'eau ce qui apporte des renseignements sur les circulation dans les aquifères.

e) Le log température lui aussi est très utile, certains outils sont sensibles à la température il faudra donc corriger les résultats en fonction de la température. D'autre part tout changement de température peut être un indice de venue ou de perte d'eau. Cette diagraphie est donc précieuse pour étudier les différents aquifères.

f) Enfin la plupart des diagraphies sont très sensibles aux variations de diamètre du trou ; il est donc essentiel de disposer du log caliper « diamètreur » qui enregistre les variations de diamètre du trou. De plus les variations du diamètre peuvent donner des indications sur les zones sous compactées ou au contraire sur les zones d'argile gonflante par exemple.

Nous avons parlé des principaux log utilisés dans notre étude, mais il existe sur le marché une gamme beaucoup plus étendue d'outils (sonde). Il

est malheureusement impossible de passer en revue toutes les possibilités offertes.

3.3 But des mesures

Les diagraphies exécutées sur les différents forages avaient pour but:

- de déterminer l'épaisseur et la profondeur des couches traversées par le forage.
- d'indiquer le lithologie
- de faciliter les corrélation
- d'estimer les paramètres directement utiles à l'étude de hydrogéologique de la région investiguée, en particulière: la porosité, et la perméabilité.
- et enfin d'apprécier la salinité des eaux souterraines.

Pour atteindre ces objectifs, le programme de diagraphie adopté comprend les outils (sondes) suivants:

- La polarisation spontanée (PS)
- La résistivité mesurée avec deux types de sondes normales (petite normale 0,4m AM, grande normale 1,6m AM)
- le gamma ray
- la thermométrie
- la résistivité du fluide
- le diamètreur

3.4 Interprétation qualitative

Dans une 1^{ère} phase nous avons élaboré pour chaque sondage un log composite sur lequel on a regroupé l'ensemble des informations enregistrées à une échelle de profondeur commune et appropriée.

Dans une 2^{ème} phase nous avons alors procédé à l'analyse qualitative des différents log composites en se basant sur les réponses données par chaque sonde. Nous donnerons, ci-dessous, l'interprétation de quatre (04) log composites, choisis pour les raisons de représentativité et de complémentarité.

3.4.1 Sondage N° 288 Hy

Coordonnées : X = 889.711.41

Y = 386.300.83

Z = 155.92

Foré à une profondeur de 220 m au centre de la région investiguée, le sondage N° 288 Hy est considéré comme sondage principal du faisceau II. Il a recoupé les formations suivantes:

0 - 150 m : alternance de grès quartzeux fissurés et d'argiles verstes souvent broyées.

150 - 162 m : Schistes noirs charbonneux de Paléozoïque

163 - 184 m : argiles, aleurolites calcaires et lentilles de grès du Lutétien-Priabonien.

184 - 189 m : Schistes noirs du Paléozoïque

210 - 220 m : Calcaires et grès

Le Log du sondage N°288 Hy comprend les diagraphies classiques suivantes: (Fig.11)

- Log PS - échelle 20 mv/cm

- Log petite normale (16'', AM=0.4 m) enregistrée en une échelle de 20 ohm.m/cm

- Log grande normale (64'', AM=1.6 m) enregistrée en une échelle de 20 ohm.m/cm.

- Log gamma ray - échelle 20 cps/cm

- Log thermométrie - échelle 10°/cm

- Log résistivité du fluide - échelle 0.5 ohm.m/cm

- Log Résistance - échelle 20 ohm/cm.

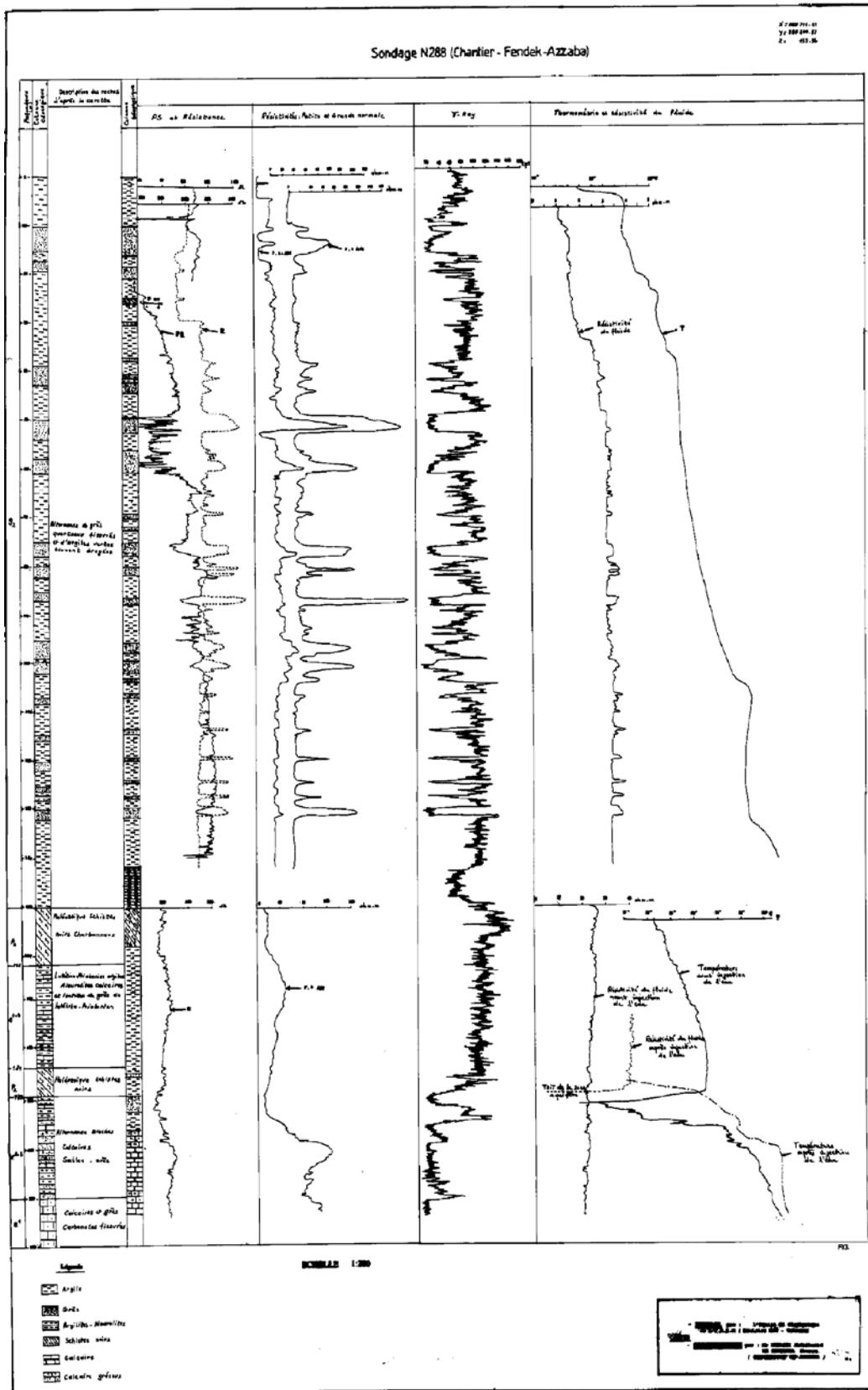


Fig.11: Log composite du sondage 288

Analyse des résultats :

a) L'enregistrement de la PS n'a couvert que l'intervalle 22 -140 m. Sa ligne de base a dérivée dès le début du log (22 - 50 m).

Cette dérive est due semblablement aux instabilités dans la colonne de boue car cette instabilité a disparue rapidement par la suite.

Aussi la ligne de base des argiles a été tracée à droite à partir de la profondeur de 60 m. En observant le Log on peut distinguer :

1) de 22 à 50 m : apparition d'une couche argileuse

2) de 50 à 60 m : la déflexion négative de la couche par rapport à la ligne de base marque la présence d'un banc perméable attribué aux grès quartzeux.

3) de 60 à 78 m : on constate un changement de la ligne de base dû principalement au changement des propriétés des argiles. Il s'agit probablement d'argilites, aleurolites où la fraction argileuse est bien différente que dans les argiles.

4) de 78 à 140 m : couche argileuse recoupée à des intervalles irréguliers par des bancs minces de grès.

b) Le gamma - ray a été enregistré sur toute la profondeur du sondage. Généralement il fournit des réponses analogues à celles de la PS et améliore ainsi la définition verticale des bancs là où la PS reste impuissante.

Dans ce cas il vient compléter l'information manquante de la PS (intervalle non enregistré).

Le gamma ray montre une courbe très contrastée. On y distingue:

1) de 0 à 10 m : un banc argileux surmontant une couche mince gréseuse d'une épaisseur de 6 m (10 - 16 m).

2) de 16 à 50 m : Couche argileuse présentant à des intervalles irréguliers de minces intercalations de grès.

3) de 50 à 60 m : Contrairement à la PS où la différenciation n'est pas nette, le gamma ray dans cet intervalle révèle la présence d'un banc argileux pris entre deux couches gréseuses.

4) de 60 à 140 m : Le gamma ray met en évidence la présence d'une couche épaisse argileuse traversée fréquemment par de petits bancs gréseux d'épaisseur ne dépassant pas les 02 mètres, décelable par la déflexion de la courbe vers la gauche.

5) de 140 à 150 m : inflexion de la courbe gamma ray mettant en évidence une couche d'argilite ou aleurolite.

6) de 150 à 189 m : Dans cet intervalle le gamma ray semble se différencier tant par son allure uniforme que par son intensité et vient

confirmer la présence d'une couche de schistes noirs reconnue par le forage.

Cependant le gamma ray n'a pu reconnaître la couche aleurolite mentionnée par le sondage, il s'agit probablement d'une couche argileuse.

7) de 189 à 192 m : mince couche de grès.

8) de 192 à 220 m : nette régression de l'intensité du gamma -ray marquant ainsi la présence d'une couche et calcaire gréseux surmontée par un banc argileux (192 - 193 m).

c) Les courbes des sondes normales 16'' et 64'' se chevauchent bien dans l'intervalle enregistré soit 0-140 m, indiquant une bonne correspondance des valeurs de résistivités des formations perméables. En face des couches résistantes (Grès) les couches produisent un effet très prononcé alors que ce dernier s'atténue face à des couches peu résistantes (argiles).

Les deux sondes marquent bien les différents horizons précédemment décelés par la PS et surtout par le gamma ray.

Au delà de la profondeur de 140 m, seule la petite normale (14'') a pu être enregistrée. Cette dernière met en évidence la couche de calcaire se trouvant à la fin du trou (au niveau de 194 m) mais ne fournit aucune précision supplémentaire quant à la présence de la couche de schistes noirs décelée par le forage.

d) Les log thermométrie et résistivités du fluide :

On remarque sur les deux log une augmentation progressive des températures et des résistivités du fluide avec la profondeur.

On note par ailleurs de petites inflexions de la courbe de résistivités du fluide en face des bancs gréseux, qui marquent, par une augmentation de la résistivité, une perte d'eau dans ces niveaux.

Le log température, aux deux niveaux (102 et 130 m) annonce probablement des pertes d'eau, ce qui se marque par des anomalies très prononcées du log de température.

On a cherché à provoquer des anomalies dans la distribution des températures et de la résistivité du fluide en injectant de l'eau dans le forage. Ceci a permis de localiser la couche poreuse et perméable et de mettre en évidence le toit de l'aquifère correspondant au niveau (189 m).

En effet on constate une variation brusque de la température et de la résistivité du fluide.

e) Le log résistance : vient confirmer les limites des bancs marqués par les différentes sondes (sondes normales et gamma ray).

Quelles que soient leurs épaisseurs, les bancs résistants se marquent sur l'enregistrement par une augmentation de la résistance. On constate qu'avec ce log, on peut améliorer la définition verticale des bancs minces.

Conclusion :

L'analyse qualitative des diagraphies, nous permet de définir:

a) Les limites lithologiques des différentes formations que l'on peut résumer comme suit:

0 - 16 m : banc argileux surmontant une mince couche gréseuse.

16 - 50 m : Couche argileuse avec intercalation de grès.

50 - 60 m : deux bancs de grès prenant en sandwich une couche argileuse.

60 - 150 m : Couche argileuse traversée par des bancs gréseux.

150 - 189 m : Schistes noirs surmontant une couche argileuse épaisse.

189 - 192 m : mince couche de grès.

192 - 220 m : Calcaires surmontés par un banc argileux.

b) de préciser une fourchette de variation des résistivités et de radioactivité pour chaque formation ainsi reconnue.

Roches	Plage des variations des paramètres physiques	
	<i>Résistivité ohm.m</i>	<i>Radioactivité naturelle cps</i>
argiles	< 10	60 - 120
grès	100 - 180	<20
schistes noirs	20 - 40	100 - 140
calcaire	100 - 140	<20

Tableau 8 : Fourchettes de variation des résistivités et de radioactivité

c) d'apporter des informations importantes sur les venues d'eau et de préciser le toit de l'aquifère.

Au point de vue hydrogéologique le niveau des calcaires fissurés présente un intérêt d'ordre aquifère. Le gamma ray face à ce niveau se distingue par des anomalies négatives, le log des résistivités normales donne des résistivités élevées par rapport à l'encaissant argileux, les log température et résistivité des fluides montrent une chute des valeurs après déversement de l'eau.

3.4.2 Sondage 289

Les coordonnées sont:

X = 889.735.17, Y = 386.312.83, Z = 155.73

Situé au NE du forage principal N° 288 HY., le sondage 289 est réalisé jusqu'à une profondeur de 232 m. Il a recoupé respectivement de haut en bas (Fig. 12):

- une alternance de grès quartzeux et argiles grises (0-150 m)
- des schistes noirs du Paléozoïque (150 - 158 m)
- des argiles aleurolites du Lutétien-Priabonien intercalées par de minces bancs de grès fins (158 - 184 m)
- grès et calcaire du Paléocène (198 - 232 m).

La diaggraphie utilisée comprend :

- un log PS
- un log gamma ray
- log petite normale (AM = 0.4 ; 16'')
- log grande normale (AM = 1.6 m ou 64'')
- résistivité du fluide
- température

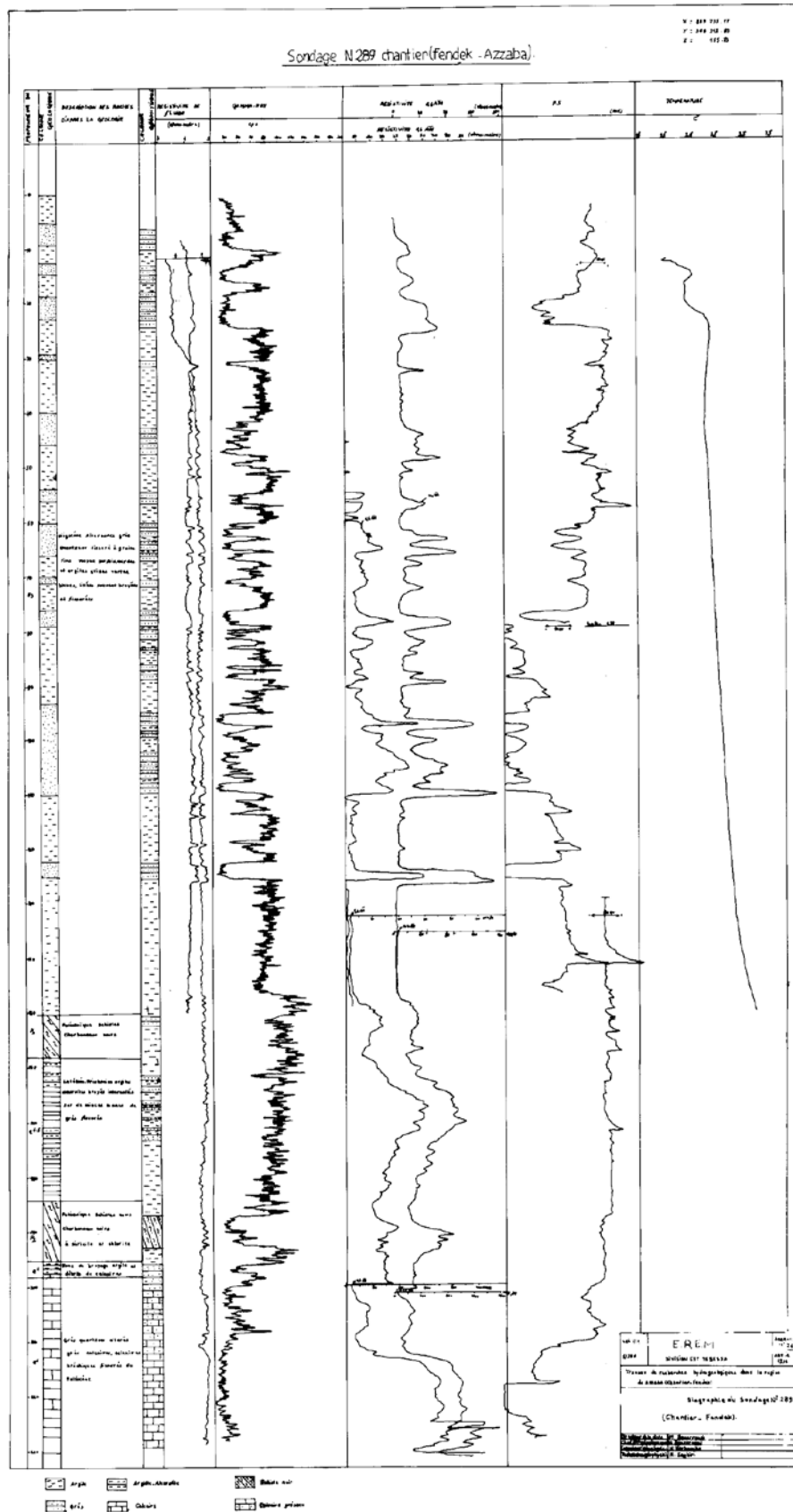


Fig. 12: Log composite du sondage 289

Analyse des résultats :

a) La PS a une allure très contrastée. La ligne de base des argiles peut être représentée facilement sur le log PS par une droite (à droite) jusqu'à la profondeur 78 m. Aussi les déflexions négatives par rapport à cette ligne marquent bien la présence de formations poreuses. On observe alors

- un horizon gréseux (0-220 m) avec intercalation par endroits, de minces bancs d'argiles
- un horizon aquifère (22 -78 m) avec des intercalations de minces couches gréseuses.

Puis la ligne de base dérive vers la gauche cela s'explique probablement par la dissymétrie entre l'électrode de référence fixe baignant dans le bac à boue et celle qui est mobile dans le trou, ce qui complique l'interprétation et la rend difficile. Aussi on constate que la PS définit les limites entre les formations suivantes :

- un horizon gréseux entaché par endroit par des intercalations argileuses (78 - 110 m)
- un horizon à prédominance argileuse (110 - 140 m) à l'intérieur duquel se trouve un banc gréseux mince (environ 2 m d'épaisseur au niveau de 122 - 154 m)

L'allure de la PS devient plate entre 140 et 186 mètres, on ne peut y différencier les argiles des bancs poreux, ce qui nous permet d'en déduire que ces derniers (bancs poreux) présentent une fraction argileuse non négligeable qui diminue la zone envahie et par conséquent la déflexion PS.

Enfin la déflexion de la PS se fait vers le négatif marquant ainsi la présence d'un horizon perméable correspondant probablement aux calcaires du Paléocène.

b) Le gamma ray, qui est sensé mettre en évidence les argiles, montre lui aussi une courbe très contrastée, comprime et précise les limites des formations poreuses (améliore la définition verticale des bancs). En effet on relève :

- de 0 à 22 m : un banc gréseux traversé à intervalles irréguliers, par de minces couches argileuses.

- de 22 à 148 mètres : un horizon argileux comportant à des intervalles irréguliers des lits de grès quartzeux compacts. Les épaisseurs des bancs argileux augmentent avec la profondeur.

- de 148 à 188 mètres une couche épaisse marquée par un gamma ray presque uniforme mettant en apparence la présence d'une couche lithologiquement différente de celle supposée argileuse au même niveau dans le log PS correspondant.

- de 188 à 232 mètres un horizon perméable probablement calcaireux traversé par une zone argileuse supposée de broyage.

c) les sondes normales (16'' et 64'') se chevauchent presque, ce qui indique une bonne corrélation entre elles, tant dans les valeurs de résistivités des formations perméables que dans leurs limites.

Les réponses des sondes normales en face des bancs résistant varient en fonction de l'épaisseur de ces niveaux.

Quelles que soient leurs épaisseurs les couches conductrices (argiles) se marquent sur l'enregistrement des courbes 16'' et 64'' par une chute de résistivité.

En observant les courbes de résistivités (16'' et 64''), il en ressort ce qui suit :

- de 0 à 148 mètres, on est en présence d'une formation conductrice et épaisse traversée à des intervalles irréguliers par des formations minces et résistantes ; il s'agit certainement d'argiles recoupées par des bancs minces gréseux.

- de 148 à 198 m : Cet intervalle décelé auparavant par le gamma ray marqué par des résistivités différentes de celles de l'horizon sus-jacent. Cette couche pourrait correspondre éventuellement aux schistes noirs.

- de 198 à 232 mètres on est en présence d'un banc très résistant correspondant aux calcaires. Ces derniers présentent des résistivités de l'ordre de 200 Ohm.m au niveau 198-210m probablement fissurés et des résistivités atteignant 800 ohm.m et plus au delà de 210 mètres probablement compacts.

d) Les log résistivités du fluide et température:

Le log de résistivité du fluide a une allure uniforme. Le log température marque une augmentation progressive du gradient géothermique du haut vers le bas.

L'analyse qualitative des log enregistrés au sondage N°289 nous a permis de définir et de préciser dans un premier temps, les limites lithologiques des différentes formations en présence. On peut y distinguer de haut en bas :

- de 0 à 22 m : Grès traversés par de minces bancs argileux
- de 22 à 148 m : argiles à intervalles irréguliers de lits de grès quartzeux compacts.
- De 148 à 198 m des schistes noirs
- De 198 à 232 m des calcaires

Dans un second temps, on peut définir pour chacune des formations décelées une fourchette de variation de la résistivité électrique et de la radioactivité

Roches	Résistivité (ohm.m)	Radioactivité (cps)
Argile	<20	70-80
Grès	60-110	10-40
Schistes noirs charbonneux	40-80	100-140
Calcaires fissurés	200-400	20-40
Calcaires compacts	800	<20

Tableau 9 : fourchette de variation de la résistivité électrique et de la radioactivité

Du point de vue hydrogéologiques deux horizons peuvent présenter un intérêt d'ordre aquifère.

- l'un au niveau superficiel (0-22 m), représenté par les grès.
- L'autre au niveau 198-210 m, caractérisé par des calcaires certainement fissurés et karstifiés (le log diamètreur aurait permis de déceler ce niveau).

3.4.3 Sondage 260

X= 889.661.48 , Y= 386.380.04 , Z=143.87

Situé presque au Nord du sondage principal 288, le sondage 260 traverse sur toute sa profondeur du trou (172 m) une alternance de grès et d'argiles (Fig. 13).

Le log comprend les diagraphies classiques suivantes :

- Log PS
- log gamma ray
- courbe normale
- résistivité des fluides
- température
- la résistance

Analyse des résultats :

a) La P.S est plate presque sur toute la longueur du trou, on ne peut y différencier les argiles et les bancs poreux perméables.

b) Le gamma ray est utilisé pour repérer les argiles quand la P.S ne donne rien. En effet, le log gamma ray est très contrasté, on y observe :

- de 0 à 53 m un horizon argileux parsemé irrégulièrement par de minces lits de grès.

- de 53 à 70 m un banc poreux perméable dont les limites sont bien marquées. Elles se situent aux points d'inflexion de la courbe gamma ray, il s'agit de bancs gréseux quartzeux.

- de 70 à 172 m, on a un horizon argileux avec des intercalations irrégulières de grès quartzeux peu fissurés.

c) Le log petite normale (16'') confirme l'existence des formations précédemment décelées par le gamma ray et améliore la définition verticale des bancs. En effet le log petite normale complète et affirme la définition des limites des bancs gréseux à l'intérieur même des formations argileuses.

d) Résistivité du fluide et température :

Sur le log résistivité du fluide, on note de légères inflexions de la courbe à la profondeur de 40 m, qui marque sans doute, par une augmentation de résistivité une certaine perte d'eau de boue à ce niveau.

Par ailleurs la courbe de résistivité est uniforme et plate à partir de cette profondeur, jusqu'à la fin du trou.

La température enregistrée indique un accroissement important de la température au niveau de 80 m, il s'agit probablement de trou cimenté à ce niveau et l'accroissement brusque indique le toit du ciment.

On remarque également une élévation de la température et une diminution de la résistivité de l'eau face au banc gréseux (niveau 150 m), marquant ainsi une certaine circulation d'eau dans ce niveau perméable.

e) La résistance : Ce log confirme les résultats apportés par les log gamma ray et petite normale. En effet on y remarque les mêmes formations précédemment dégagées par les autres log.

De cette analyse se dégage la lithologie suivante :

- de 0 à 53 m : argiles avec de minces couches de grès
- de 53 à 70 m : grès quartzeux compacts
- de 70 à 172 m : argiles avec intercalations de grès fissurés.

Une fourchette de résistivité électrique et de radioactivité figure dans le tableau 10.

Roches	Résistivité (ohm.m)	Radioactivité (cps)
Argiles	<20	100-250
Grès	50-100	<50

Tableau 10 : fourchette de résistivité électrique et de radioactivité

La porosité approximative déduite de la normale

$$R_{mf} = 6$$

$$R_{X0} = 100$$

$$\Phi = (6/100)^{1/2} = 2.45\%$$

Du point de vue hydrogéologique un seul niveau présente un intérêt d'ordre aquifère, celui des grès (53 – 70 m).

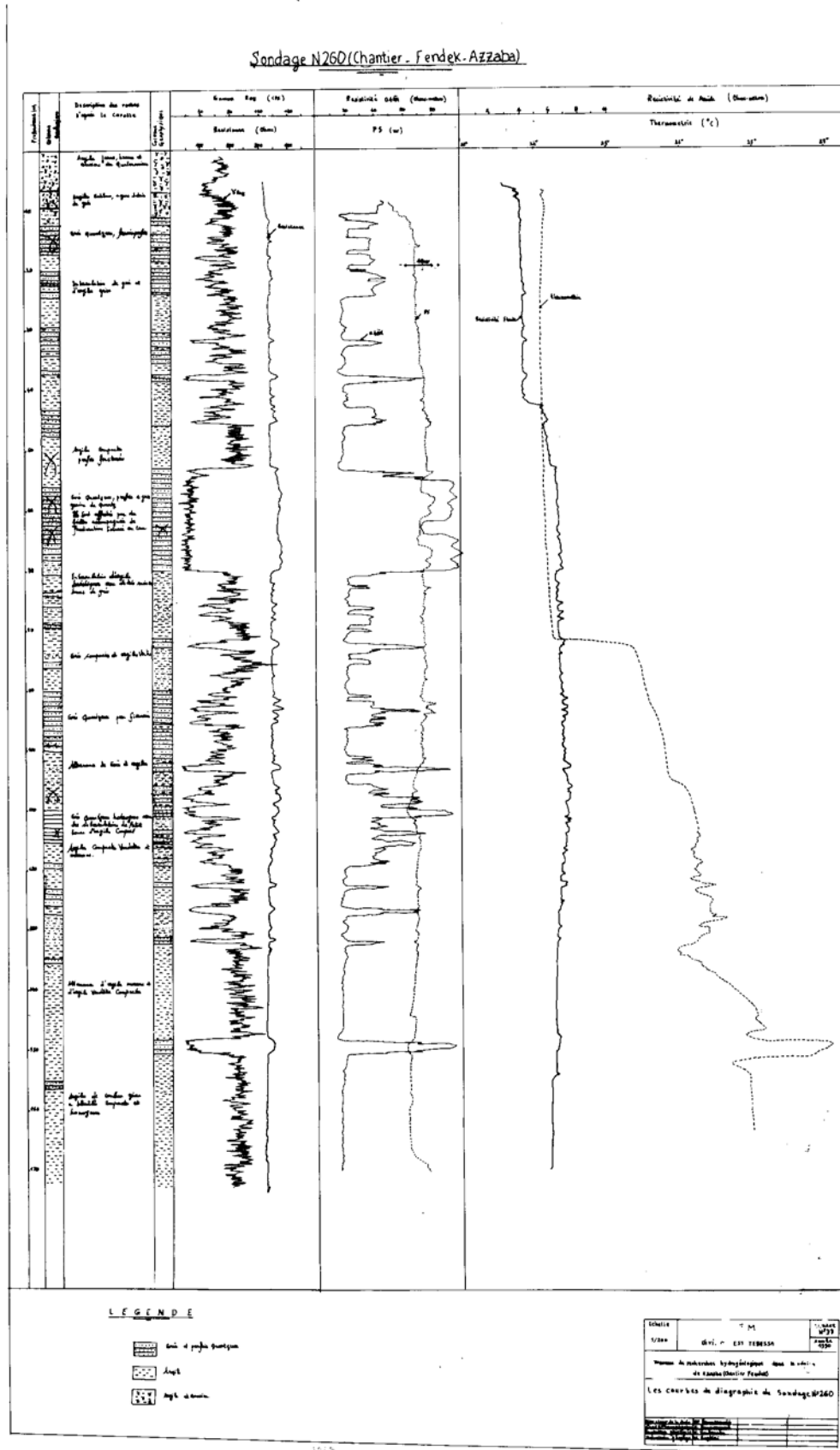


Fig. 13: Log composite du sondage 260

3.4.4 Sondage 342

Sondage situé dans le secteur de Fendek et a pour coordonnées :

X= 889.727.893, Y= 386.266.69, Z= 163.50

Placé à l'Est du sondage principal N° 288, ce forage est constitué en grande partie d'argiles et grès alternés de 0 à 150 m, puis viennent les schistes noirs du paléozoïque comportant des argilites et aleurolites (150-187 m). Les calcaires gréseux fissurés apparaissent uniquement à la fin du trou (187-220 m) (Fig. 14).

Le log comprend les diagraphies classiques suivantes :

- gamma ray
- résistivité des fluides
- résistivité diamétreur
- température

Analyse des résultats :

En observant les courbes des log enregistrés, on peut dire :

a) La normale 16'' met en évidence :

- de 35 à 65 m une couche épaisse relativement résistante, il s'agit probablement de grès avec quelques intercalations de bancs minces argileux.
- de 65 à 150 m une couche conductrice épaisse correspondant aux argiles du numidien avec quelques passages de petits bancs gréseux.
- de 150 à 185 m un banc relativement résistant et épais identique au banc décelé précédemment au niveau 35-65 m, il s'agit de grès faiblement argileux.
- de 185 à 202 m la courbe normale subit une déflexion importante marquant ainsi la présence de formations résistantes probablement calcaireuses.

b) Le log résistance est très contrasté le long du trou, décelant ainsi les mêmes horizons reconnus par la petite normale et améliorant par conséquent la définition verticale des bancs.

La réponse de cette sonde varie en fonction des épaisseurs des différents niveaux.

c) le log gamma ray semble mettre en évidence trois niveaux :

- Le premier gréseux (jusqu'à 65 m), avec quelques lits argileux.
- Le second argileux (jusqu'à 185 m) avec quelques passages gréseux.

- Enfin le troisième calcaireux (jusqu'à la fin du trou).

d) Le log résistivité du fluide et de température se démarque des autres log précédemment évoqués par le fait que la courbe fait apparaître une limite nette au niveau de 86 m, que l'on peut interpréter comme quoi l'élévation de température entraîne aussi une diminution de la résistivité de l'eau.

En effet le log température indique bien une augmentation continue de la température avec la profondeur.

L'abaissement de la résistivité sous le niveau de 86 m signifie sans doute une certaine circulation d'eau dans ce niveau.

e) Le diamètreur : Ce log marque essentiellement des déflexions à l'intervalle 125-150 m, correspondant à un élargissement du trou lié probablement à des zones d'éboulement dans les grès.

Par ailleurs, plus haut et plus bas de cet intervalle, le trou ne semble subir aucune variation sensible.

Il ressort alors de l'analyse des différents log que le trou est composé essentiellement :

- D'un banc argileux
- D'une couche perméable gréseuse porteuse d quelques intercalations argileuses.
- D'un banc relativement épais et résistant correspondant aux schistes noirs.
- Enfin d'une couche calcaire gréseux fissuré.

On peut indiquer par ailleurs, que les formations présentent les résistivités électriques suivantes :

- Argiles <20 ohm.m
- Grès 30-100 ohm.m
- Schistes noirs 40- 80 ohm.m
- Calcaires 150ohm.m et plus.

Du pont de vue hydrogéologique, deux (02) horizons semblent présenter un intérêt d'ordre aquifère :

- Les grès numidiens
- Les calcaires gréseux fissurés.

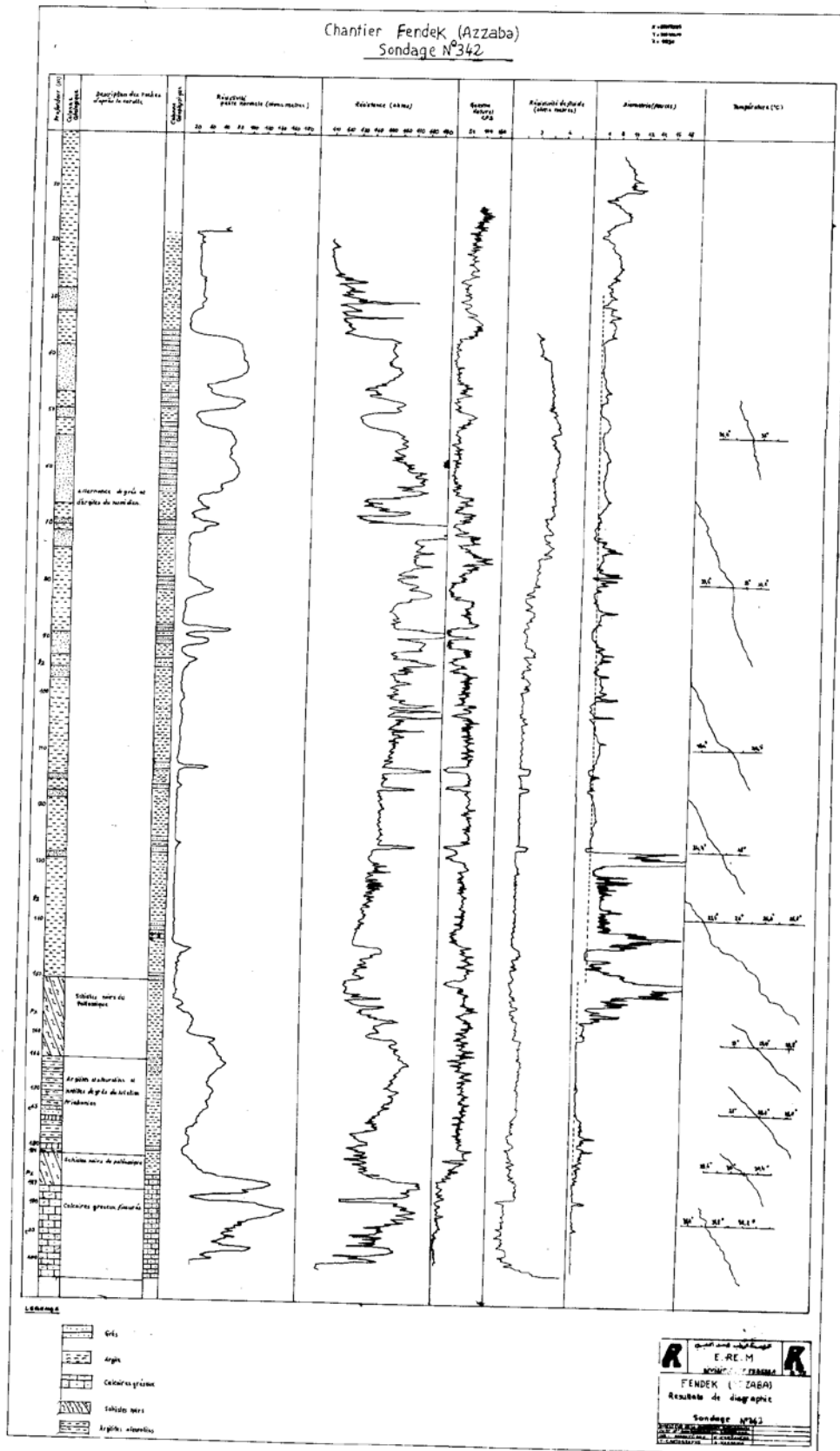


Fig. 14: Log composite du sondage 342

3.5 Résultats des diagraphes

L'analyse qualitative des diagraphies nous a mené à dresser un tableau récapitulatif (Tableau 11) des différents paramètres physiques des formations traversées par les forages.

Formation	roches	Plage de variation des paramètres physiques		
		Résistivité (ohm.m)	PS ($\mu.v$)	Gamma-ray (cps)
g^2	Argile verte Souvent broyée Grès quartzeux	<20 60-110	nulle négative	100-120 10-30
P_z	Schistes noirs	20-40	-	120-150
e^{2-3}	Argilites Aleurolites Grès Brèches calcaires	40-60 40-60 50-180 100-120	- - Négative Pas de significat	100-110 100-110 <20 <20
e^1	calcaire	120-140	-	<10

Tableau 11 : Variation des paramètres physiques

Possédant un jeu de log interprétés, nous allons essayer d'apporter, si possible, les réponses aux questions suivantes:

- Existe-t-il des réservoirs aquifères dans la zone investiguée
- Quelle est alors leur position
- Quelles sont leurs caractéristiques
- Quelles sont les qualités physiques de l'eau qu'ils contiennent.

De l'analyse qualitative deux niveaux ont été retenus comme les plus intéressants du point de vue hydrogéologique. Il s'agit des grès de l'Oligocène (g^2) et des calcaires fissurés de l'Eocène (e^1).

Les grès sont caractérisés par

- une réflexion négative de la PS
- une résistivité moyenne (60-120)
- une valeur de gamma ray faible (10-30)

Les calcaires fissurés sont caractérisés par

- une résistivité élevée

- une valeur de gamma ray faible (<10 cps)
- la PS n'a pas de signification dans cette formation.

4. Conclusion

La combinaison des deux méthodes de résistivité et de Gamma naturelle, a permis de bien différencier les grès des argiles, car les couches de grès sont caractérisées par une résistivité relativement grande de l'ordre de 50-150 Ohm.m (en fonction de leur porosité et la qualité des eaux qu'ils contiennent), et une faible intensité des rayons Gamma naturels et vis versa pour les argiles.

On note une très bonne corrélation entre la méthode Gama ray et de résistivité, cette dernière nous a permis de déterminer les épaisseurs des couches des différentes formations avec précision.

La méthode auxiliaire (Diamètreur) a été appliquée dans deux sondages et on remarque clairement que le diamètre du trou de sondage augmente en face des couches d'argiles, tandis que le diamètre minimal du trou se conserve en face des couches de grès.

La polarisation spontanée (PS) nous a indiqué sur les couches poreuses (potentiel négatif).

Le gamma ray est utilisé pour repérer les argiles quand la P.S ne donne rien.

On note la complémentarité des différentes méthodes utilisées.

Nous remarquons sur les log composites élaborés la bonne corrélation des informations obtenues par les différents enregistrements et les données de forages.

Les différentes méthodes ont permis d'établir pour les formations décelées une fourchette de variation de la résistivité électrique et de la radioactivité.

L'analyse qualitative des diagraphies nous a permis d'estimer la variation des différents paramètres physiques des formations traversées par les forages.

Du point de vue hydrogéologique les deux horizons pouvant présenter un intérêt d'ordre aquifère sont représenté par les grès de l'Oligocène et les calcaires fissurés du Paléocène -Eocène.

1. Aperçu hydrogéologique de la zone mercurielle Nord numidique

Dans la carte hydrogéologique schématique de la zone mercurielle Nord Numidique (Fig.15), on distingue plusieurs horizons aquifères à savoir :

- Le complexe aquifère formé principalement de roches carbonatées du Crétacé moyen - paléogène moyen, (Cr₂Pg₂) constitué de conglomérats brèches calcaire , de conglomérats , de grès et de calcaire.

Ce premier horizon aquifère affleure dans la région de Fendek.

- Le complexe aquifère dans les roches terrigènes du Paléogène supérieur (Pg3), constitué de grès, argilites et argiles.

Ce complexe est développé dans la chaîne numidique.

- Le complexe situé dans les formations d'Infra crétacé (Cr1), il est constitué principalement de marnes, de calcaires siliceux, d'aleurolites, de jaspes et de grès.

Ce complexe affleure à l'Est de la région d'étude et au Sud Ouest.

- Le complexe des roches Permo-Triasiques (P-T), constitué de grès rouges, d'aleurolites, de rares dolomies et de calcaires.

Ce complexe affleure dans notre terrain d'étude, près des gisements de mercure.

Notre étude hydrogéologique s'est limitée au terrain d'étude correspondant au bassin versant de Azzaba, présentant les coordonnées suivantes:

X : 889.200 - 890.400

Y : 385.600 - 386.800

2. Conditions hydrogéologiques du bassin versant de Azzaba

Dans le terrain d'étude, on rencontre deux complexes aquifères ayant des charges piézométriques très proches : le complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène et le complexe aquifère du Paléocène-Eocène.

Ces deux complexes sont séparés par les roches imperméables du Paléozoïque et du Lutétien-Priabonien.

Sur les terrains avoisinants, situés au NE, on trouve un autre horizon dans les alluvions récents. (Fig.15).

2.1 Horizon aquifère des dépôts alluvionnaires récents

L'horizon aquifère des dépôts alluvionnaires récents et des terrasses situées au dessus de la plaine inondable de l'Oued Fendek a une extension limitée. Les eaux phréatiques comprises dans les sables hétéro grenus et au sein des dépôts de galets et des graviers ont un niveau libre. La puissance de la nappe varie de 2 à 5 m.

Le niveau des eaux souterraines diminue en été jusqu'à la base des dépôts alluvionnaires, l'alimentation en eau de cet horizon aquifère se fait principalement par les précipitations atmosphériques.

2.2 Complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène (g2)

Les roches aquifères des dépôts de l'Oligocène sont les grès fissurés alternant avec des lits d'argiles. La puissance totale des grès varie entre 32 et 62 m. Les grès aquifères sont recoupés par une série de sondages, dans la partie centrale du terrain d'étude (sond.288 Hy, 325, 260, 265). Les eaux souterraines s'écoulent vers le Nord.

Les eaux souterraines circulent aux profondeurs de 10,0 m (sond.260) à 44,0 m (sond.325). Au fur et à mesure du plongement des couches au Nord et au nord-ouest, la profondeur de leur circulation descend jusqu'à 62 m (sond.396). Les coupes hydrogéologiques établies illustrent la schématisation des nappes aquifères de la région (Fig.16, 17, 18).

L'alimentation des eaux souterraines se fait par les précipitations atmosphériques dans les endroits où les grès affleurent et le drainage des eaux des horizons sous-jacents, qui circulent suivant les accidents tectoniques.

Le mur séparant la nappe aquifère de l'Oligocène de celle du Paléocène-Eocène est représenté par les schistes carbonneux du Paléozoïque, les argilite et les aleurolites du Lutétien-Priabonien. La puissance des roches imperméables est de l'ordre de 50-60 m. (Fig.16, 17, 18).

2.3 Complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène e¹⁻³

Le complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène est largement développé dans la région d'étude. Les eaux souterraines du gisement s'associent aux grès, aux calcaires, aux conglomérats-brèches de la zone sous-chevauchement, aux calcaires caverneux et fissurés, aux grès calcaireux du Paléocène, aux zones aquifères des accidents tectoniques.

Vu l'absence de murs imperméables, les horizons aquifères ont une liaison hydraulique étroite et forment un complexe aquifère uni des eaux de filons et de diaclases

La puissance des roches aquifères varie en larges plages La profondeur de leur disposition augmente vers le Nord.

Le mur supérieur résistant à l'eau, est représenté par les schistes carbonneux graphiteux métamorphisés du Paléozoïque, ainsi que les argilites et les aleurolites du Lutétien-Priabonien. Leur puissance totale est de 50-60 m. La position du mur imperméable inférieur est contrôlée par l'amortissement de la fissuration des roches. (Fig. 16, 17, 18).

Pendant les travaux de prospection réalisés au gisement et les recherches de l'eau pour l'alimentation du complexe mercuriel, la plupart des sondages recoupant le complexe aquifère étaient jaillissants. Les sondages jaillissants se trouvent dans la partie Nord du gisement (sond.308, 325 Hy) avec des débits respectifs de 0,1 et 2,5 l/sec et à son flanc Est avec un débit jaillissant de 0,2 l/s pour le sondage 123 et 8,5 l/s pour le sondage 130.

L'alimentation des eaux souterraines du complexe se fait par les précipitations atmosphériques. Ce type d'alimentation se situe dans la partie SW de la région, là où affleurent les roches du Paléocène-Eocène. Les grands accidents tectoniques affectant les formations du Paléocène-Eocène, jouent en conditions hydrogéologiques du complexe un rôle de drains naturels. Par ces derniers les eaux souterraines sont drainées des terrains voisins. En s'enfonçant vers le Nord, les eaux souterraines s'accumulent dans des calcaires fissurés et karstiques et des grès calcaireux du Paléocène-Eocène.

La direction d'écoulement des eaux souterraines au NNE et à l'Est coïncide avec la direction d'enfoncement des principales structures géologiques et à l'abaissement général du relief (voir fig.5).

Le complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène prendra la principale part de la formation des venues d'eau dans les ouvrages miniers.

Cette dernière est déterminée par les facteurs naturels suivants :

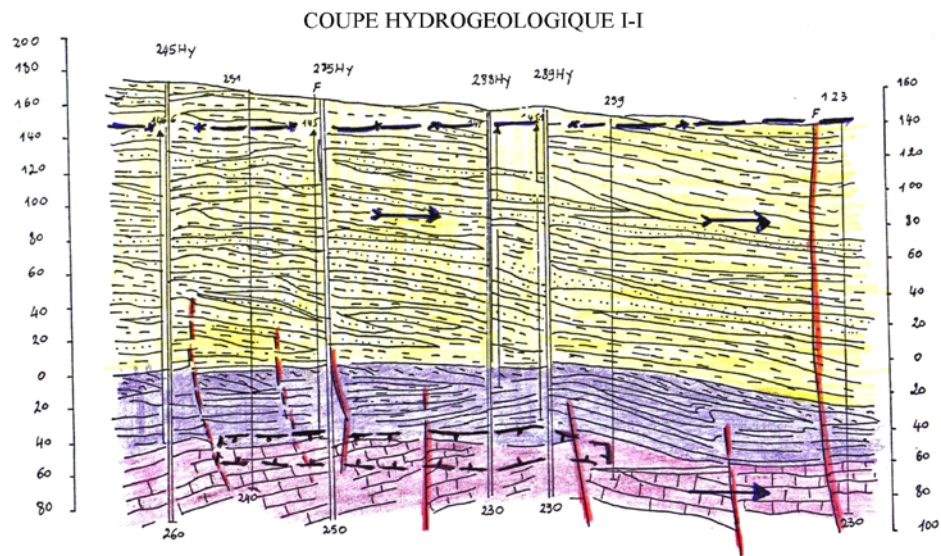
1- Hétérogénéité de la série des formations très disloquées du Paléocène-Eocène.

A côté des calcaires bien perméables, des conglomérats calcaireux, des conglomérats brèches, des grès, on trouve des aleurolites peu perméables. Dans de telles séries hétérogènes, la fissuration et la karstification se développent irrégulièrement. C'est avec ces deux dernières que sont étroitement liés la

perméabilité de l'eau, la transmissivité, le coefficient de diffusivité et le coefficient d'emmagasinement.

2- complexité des conditions quant à la disposition géologo-structurale des calcaires, des grès, des conglomérats-brèches aquifères ; des rapports entre eux et avec les dépôts de l'Oligocène.

Donc les principaux paramètres pour la prévision des venues d'eau sont les paramètres obtenus à la suite du pompage de faisceau. Ils reflètent amplement la situation hydrodynamique de tout le massif.



D'après BENHAMZA Moussa (1996).

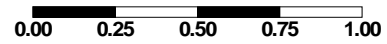
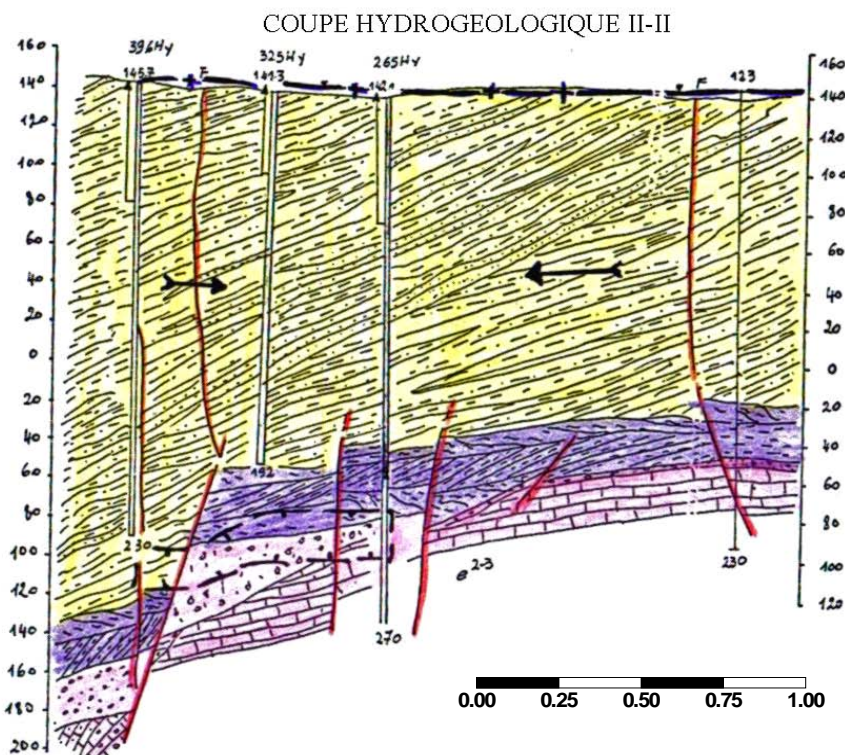
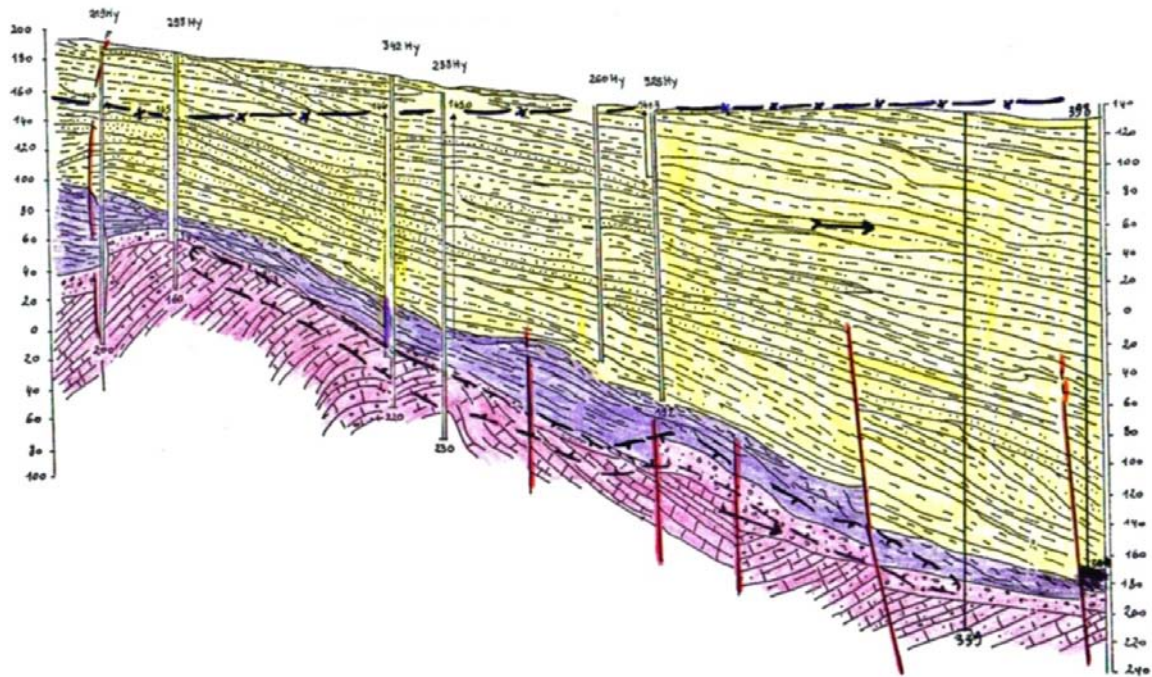


Fig.16 : Coupe hydrogéologique I-I



D'après BENHAMZA Moussa (1996).

Fig.17 : Coupe hydrogéologique II-II



D'après BENHAMZA Moussa (1996).

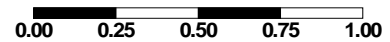


Fig.18 : Coupe hydrogéologique III-III

Légende des coupes Hydrogéologiques

- | | | | |
|--|--|--|---|
| | Brèches et conglomérats
brèches calcaires | | Argiles |
| | Microbrèches calcaires | | Calcaires métamorphiques |
| | Calcaires | | Schistes charbonneux et
graphiteux |
| | Calcaires argileux | | Complexe aquifère des
roches de l'oligocène |
| | Grès calcaires et
calcaires gréseux | | Complexe aquifère des roches
du paléocène-éocène |
| | Calcaires gravéolitiques | | Roches imperméables |
| | Grès massifs | | Complexe aquifère des dépôts de l'oligocène |
| | Gravélites | | Complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène |
| | Conglomérats et
conglomérats brèches | | Direction du courant Souterrain |
| | Argilites et aleurolites | | Limites des travaux miniers |

3. Essais de pompages:

Les essais de pompages ont été réalisés pour estimer les paramètres de capacité et de filtration des dépôts de l'Oligocène, du Paléocène - Eocène et étudier leur liaison hydraulique.

Pour obtenir une caractéristique comparative préliminaire des propriétés de filtration des roches aquifères, de la qualité des eaux souterraines, des teneurs en eau des sondages, il a été réalisé 12 pompages isolés.

Avec 5 pompages (sond.265, 396, 325, 288, 288), le complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène a été échantillonné.

Sept pompages ont été effectués dans les sondages 285, 219, 265, 342, 289,258, 245. Ces derniers ont recoupés les eaux souterraines de la zone de broyage sous-chevauchement (Complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène).

Afin d'obtenir les paramètres de filtration et de capacité fiable des roches aquifères de l'Oligocène, de la zone sous-chevauchement, deux pompages de faisceau ont été réalisés.

Le premier faisceau a été destiné à l'étude du complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène. Le sondage 260 Hy est central, les sondages 325, 265, 396 sont ceux d'observation (fig. 9).

Le deuxième a consisté à l'étude de l'horizon aquifère de la zone de broyage sous-chevauchement (complexe aquifère du Paléocène-Eocène) ; le sondage 288 Hy est central et les sondages 265, 289, 342, 285, 245, 258 et 219 sont ceux d'observation. Ces derniers devaient suivre le développement du cône de dépression. Le sondage 288 suivait les variations du niveau dans la nappe supérieure de l'Oligocène. (Fig. 9).

Les pompages des sondages centraux ont été réalisés à l'air lift à débit maximum. Après avoir réalisé les pompages des faisceaux, on a observé le rétablissement du niveau d'eau.

4. Dépouillement des données de pompages

Pour calculer le rabattement prévisionnel du niveau d'eau pendant la période d'exhaure, il convient de connaître les paramètres des nappes, dont les plus importants sont les suivants :

- le coefficient de transmissivité : **T**
- Le coefficient d'emmagasinement : **S**
- Le coefficient de diffusivité : **a**

Les nappes aquifères des terrains Oligocènes et Paléocène-Eocène sont interprétées comme des nappes homogènes, aquifères, captives et non limitées. De ce fait l'analyse des données provenant des travaux d'essais se fait par l'équation de Theis.

4.1 Résultats des travaux des essais de pompage dans le complexe aquifère de l'Oligocène.

Le complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène représente une assise à plusieurs couches avec la succession des lits aquifères peu puissants (grès) et peu perméables (argiles).

L'interaction hydraulique des lits perméables se produit dans quelques heures (les premières 24 heures). La coupe est caractérisée par une morphologie complexe irrégulière des lits. On note la variation rapide de leur puissance jusqu'à la disparition complète des lits.

Dans ces conditions malgré que l'effet de l'interaction des bancs aquifères puisse être obtenue, l'application des formules exactes (plus particulièrement celle de Hantouch), pour déterminer les paramètres de calcul ne devient pas possible, puisque les conditions réelles sont différentes de celles déduites par ces formules. Cela concerne la constante de la puissance.

Dans les conditions du complexe aquifère de l'Oligocène la puissance s'avère variable, le mécanisme de drainage devient complexe à cause donc de cette puissance variable des couches et de l'existence des interruptions.

Ces faits ont poussé l'équipe de l'O.R.G.M à recouper entièrement l'assise à plusieurs couches du complexe de l'Oligocène, afin de l'étudier totalement par pompage.

C'est à dire que dans ces conditions le coefficient de transmissivité d'eau de l'assise à plusieurs couches est égal à la somme des coefficients de chaque couche ; le logarithme du coefficient de diffusivité est égal à la moyenne de la valeur logarithmique des coefficients de chaque couche.

Ainsi, après avoir recoupé le complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène, la courbe de la dépression formée lors des pompages a été décrite par une équation de Teiss-Jacob, ce qui à son tour a permis de déterminer par la méthode de l'observation temporaire le coefficient sommaire de la transmissivité et la diffusivité moyenne suivant l'assise.

Les résultats des pompages isolés dans les sondages sont évoqués dans le tableau 12.

Numéro du sondage	Méthode de traitement	débit l/sec	rabat. (m)	Coef. angulaire C	Trans. m ² /jour	Nombre secteurs graph.
396 Hy	s-log t	0,32	50,4	1,39	3,63	I
				1,51	3,34	II
325 Hy	s-log t	0,50	41,0	1,23	6,42	-
265 Hy	s-log t	0,40	29,1	0,54	11,7	I
				0,71	8,9	II
288 Hy	s-log t	0,09	29,3	14,6	0,10	I
				-	0,31	II
288 obs	s-log t	0,13	43,4	44,5	0,05	I
				-	0,3	II
				valeur	moyenne	3,9

Tableau 12 : Résultats des pompages isolés

- Données de pompage du 1^{er} faisceau - 1992:

Niveau stat.	Niveau dyn.	Débit (l/s)	S.260	S.265	S.325	S.396	S.288
1.73	36		Δ_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
		0.40	34.3	14.39	12.40	1.83	0.43
				r1	r2	r3	r4
				64	54	108	100

Tableau 13 : données de pompages 1 er faisceau

Le temps de pompage est de 138 heures.

Lors des pompages isolés par air-lift, sur les graphiques d'observation du rabattement, il a été noté la dispersion des points, suite aux variations irrégulières du débit. Pour cette raison les coefficients de transmissivité d'eau, déterminés d'après les données de pompages isolés, représentent les paramètres du traitement initial et ne peuvent être utilisés comme ceux de base lors des calculs hydrodynamiques.

D'après les données des pompages isolés les coefficients de transmissivité varient dans de larges limites, leur valeurs maximales (11,7 - 8,9 m²/j) ont été obtenues dans le sondage 265 Hy, les valeurs minimales (0,05 - 0,03 m²/j) dans le sondage 288 Hy. La valeur moyenne du coefficient de transmissivité d'eau est de 3,6 m²/j. (Tableau 14).

Au cours du rétablissement sur les graphiques on note une dispersion peu importante.

Pour les graphiques il existe un point commun, c'est l'influence du drainage au stade du rétablissement. Après l'arrêt du pompage, aux valeurs véritables de la montée du niveau on ajoute les valeurs de la montée du niveau due au drainage qui continue et se produit jusqu'à ce que le gradient indispensable de charge existe.

Pour cette raison les valeurs du rétablissement des niveaux dans les sondages se sont avérées élevées, donc les coefficients angulaires étaient aussi élevés. Ceci a amené à la diminution des coefficients de transmissivité d'eau dont la valeur moyenne était de l'ordre de 0,35 m²/j (d'un ordre inférieur à celles calculées d'après les données de pompages).

Les coefficients de transmissivité d'eau (d'après le rétablissement) ne peuvent pas également être adoptés comme ceux de base, puisque cela amènerait inévitablement à diminuer les valeurs de transmissivité. Pour cette même raison on ne peut pas également utiliser dans la prévision détaillée les coefficients de transmissivité d'eau calculés d'après les données de rétablissement de niveau après l'arrêt du pompage du faisceau dans le sondage 260 Hy (Tableau 15).

N° des sondages	type d'obs.	mode de traitement	coef.ang $c = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\lg t_2 - \lg t_1}$	trans. $T = \frac{0,183Q}{C}$ T(m ² /j)	diffus. $\lg a = 2 \lg r - 0,35 + \frac{A}{C}$ a(m ² /j)	emmaga. $S = \frac{T}{a}$
260	rabat.	$\Delta 0 - \lg t$	16,5	0,38	-	-
			0,9	7,04	-	-
			1,36	4,7	-	-
265	rabat.	$\Delta 1 - \lg t$	8,1	0,78	$1,2 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
			6,1	1,04	$3,0 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
325	rabat.	$\Delta 2 - \lg t$	6,2	1,02	$0,9 \cdot 10^3$	$11,310^{-4}$
396	rabat.	$\Delta 3 - \lg t$	1,62	3,91	$0,3 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^{-4}$
			3	2,11	$0,1 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
288	rabat.	$\Delta 4 - \lg t$	0,58	10,9	$0,2 \cdot 10^3$	$545 \cdot 10^{-4}$

Tableau 14 : Paramètres calculés d'après les données de pompage

N° des sondages	type d'obs.	mode de trait.	coef.ang $C = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\lg \frac{t_2}{t_2+T} - \lg \frac{t_1}{t_1+T}}$	trans. $T = 0,183 \frac{Q}{C}$ $T(m^2/j)$	diffus. $\lg a = \lg r - 0,35 + \frac{\Delta \max}{C} - \lg T$ $a(m^2/j)$	coef. emmag. $S = \frac{T}{a}$
260	rétab.	$\Delta_0 - \lg \frac{t}{t+T}$	19,99	0,32 0,7	- -	- -
265	rétab.	$\Delta_1 - \lg \frac{t}{t+T}$	9,05	0,7	12.10^3	$0,6.10^{-4}$
325	rétab.	$\Delta_2 - \lg \frac{t}{t+T}$	7,5	0,84	10.10^3	$0,8.10^{-4}$
396	rétab.	$\Delta_3 - \lg \frac{t}{t+T}$	0,9	7,04	$1,7.10^3$	$41,410^{-4}$

Tableau 15 : Paramètres calculés d'après les données de rétablissement

Les coefficients de transmissivités d'eau sont exagérés et ceux de la diffusivité sont minimisés, ce qui est dû aux perturbations à la limite et à l'absence du régime quasi stationnaire.

La comparaison des paramètres de transmissivité d'eau et de diffusivité dans les sondages 325 et 265 donne pratiquement une convergence des valeurs. Les deux paramètres sont assez proches. Donc, les sites choisis des graphiques pour le calcul des paramètres peuvent être authentiquement écrits par une équation de Jacob, et les paramètres calculés représentent les caractéristiques sommaires et les valeurs moyennes pondérées du complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène. Ceci nous permet de qualifier ces paramètres comme authentiques pour le calcul des prévisions.

Ainsi, pour les calculs des venues d'eau, les paramètres de filtration et de capacité, estimées d'après les données de rabattement de niveau dans les sondages 325 et 265 au cours du pompage de faisceau dans le sondage 260, les valeurs sont les suivantes:

1,0 m²/j pour le coefficient de transmissivité d'eau (T) et 2.10³ pour le coefficient de diffusivité (a).

4.2 Résultats des travaux des essais de pompage dans le Complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène :

Sur le plan hydrodynamique le complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène constitué par les roches fissurées et karstiques, représente un système hétérogène avec une (double porosité), c'est à dire un milieu irrégulier fissuré avec deux systèmes (et plus) de fissures différemment remplies ; le réseau dense de microfissures et de microcavernes de genèse différente, étant superposé à celui plus ou moins rares de fissures de cavernes et de karsts plus grands.

Dans le massif des roches du Paléocène-Eocène les macro fissures et les macro cavernes, ainsi que certaines zones tectoniques représentent les principales voies conductrices des eaux souterraines et déterminent essentiellement la perméabilité des roches. Le système de ces vides est caractérisé par une forte transmissivité, une faible capacité et une forte diffusivité.

Les blocs perméables à vides de deuxième ordre (les plus petites fissures et cavernes) se caractérisent par une faible transmissivité d'eau, par une forte capacité et par une diffusivité plus ou moins forte.

Les graphiques temporaires d'observation du niveau dans le complexe du Paléocène-Eocène montrent qu'elles sont de même type et se composent de deux secteurs rectilignes. L'existence de deux secteurs est due à l'effet de double porosité.

Le premier secteur correspond au régime faussement stationnaire de filtration, qui est dû à la distribution des charges d'eau dans les grandes et petites fissures.

A cause d'une faible perméabilité des petites fissures et cavernes la filtration de l'eau se produit lentement et la charge peut rester comme initiale plus ou moins longtemps.

Suite à ces phénomènes il apparaît une autre charge d'eau qui remplit les petits vides et celle des fissures. La disparition de cette différence et donc la redistribution des charges se produit progressivement à la suite du drainage d'une partie de l'eau des petites fissures aux grandes fissures, ce qui cause l'apparition du régime faussement stationnaire de filtration et la présence du premier secteur doux sur les graphiques.

Ce deuxième secteur correspond à l'asymptote reflétant les conditions de filtration dans le milieu normal poreux. C'est dans ce secteur qu'on a déterminé les paramètres du complexe aquifère, caractérisant les propriétés de filtration et

la capacité du milieu aquifère, les valeurs moyennes pondérées des transmissivités d'eau, de diffusivité et d'emménagement.

Les résultats des pompages dans les sondages sont résumés dans les tableaux 16 et 17.

Résultats de pompages du faisceau II: sondage principal 288 Hy, sondages d'observations(289, 285, 265, 342, 258, 219, 288 obs.)

Niveau d'eau		deb.	rabattement (m) fin de pompage								
(m)		l/s	288Hy	289	285	265	342	245	258	219	288 o
stat	Dyn.	14	Δ_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6	Δ_7	Δ_8
12.7	74.8		62.1	45.2	56.3	48.3	57.2	56.4	48.9	56.8	5.88
			distance jusqu'aux sondages d'observations (m)								
			289	285	265	342	245	258	219	288o	
			r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	
			30	92	130	54	170	170	224	12	

Tableau 16 : Données du pompage du 2^{ème} faisceau

On note que la durée de pompage est de 13 jours.

N° de sondage	mode de traitement	coef.ang. $C = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\lg t_2 - \lg t_1}$	trans.(T) $T = 0.183 \frac{Q}{C}$ T(m²/j)	diffusivité $\lg a = 2 \lg r - 0.35 \frac{A}{C}$ a(m²/j)	coef. emmag. $S = \frac{T}{a}$
288	$\Delta_0 - \lg t$	33.2	6.3	-	-
289	$\Delta_1 - \lg t$	30.6	6.9	$5.6 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
285	$\Delta_2 - \lg t$	31.6	6.6	$4.2 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^{-4}$
265	$\Delta_3 - \lg t$	32.6	6.5	$2.8 \cdot 10^4$	$2.3 \cdot 10^{-4}$
342	$\Delta_4 - \lg t$	31.8	6.6	$1.7 \cdot 10^1$	$3.9 \cdot 10^{-4}$
245	$\Delta_5 - \lg t$	32.8	6.4	$1.3 \cdot 10^5$	$4.2 \cdot 10^{-5}$
258	$\Delta_6 - \lg t$	31.6	6.7	$1.5 \cdot 10^5$	$4.5 \cdot 10^{-5}$
219	$\Delta_7 - \lg t$	30.2	7.0	$3.2 \cdot 10^5$	$2.2 \cdot 10^{-5}$

Tableau 17 : Paramètres calculés d'après les données de pompages

<i>N° de sondage</i>	<i>mode de traitement</i>	<i>coef.ang.</i> $C = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\lg \frac{t_2}{t_2+T} - \lg \frac{t_1}{t_1+T}}$	<i>Trans.</i> $T = \frac{0.183Q}{C}$ <u>T(m2/j)</u>	<i>diffusivité</i> $\lg a = 2 \lg r - 0.35 + \frac{\Delta_{max}}{C} - \lg T$ <u>a(m2/j)</u>	<i>emmag.</i> $S = \frac{T}{a}$
288	$\Delta_0 - \lg \frac{t}{t+T}$	31.8	6.6	-	-
289	$\Delta_1 - \lg \frac{t}{t+T}$	35.8	5.9	$1.3 \cdot 10^3$	$4.5 \cdot 10^{-4}$
285	$\Delta_2 - \lg \frac{t}{t+T}$	31.6	6.6	$1.6 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^{-4}$
265	$\Delta_3 - \lg \frac{t}{t+T}$	46.0	4.6	$6.6 \cdot 10^3$	$0.7 \cdot 10^{-4}$
342	$\Delta_4 - \lg \frac{t}{t+T}$	39.2	5.4	$3.2 \cdot 10^4$	$1.7 \cdot 10^{-4}$
245	$\Delta_5 - \lg \frac{t}{t+T}$	36.4	5.8	$3.5 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^{-4}$
258	$\Delta_6 - \lg \frac{t}{t+T}$	35.4	5.9	$4.0 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^{-4}$
219	$\Delta_7 - \lg \frac{t}{t+T}$	35.8	5.9	$6.5 \cdot 10^4$	$0.9 \cdot 10^{-4}$

Tableau 18 : Paramètres calculés d’après les données de rétablissement

Comme on le voit dans les tableaux 17 et 18 les coefficients de transmissivité d’eau calculés d’après les données de pompage et de rétablissement coïncident pratiquement.

Les valeurs varient dans les limites de 6,3 à 7,0 m2/j (données de pompage) et de 4,6 à 6,6 m2/j (données de rétablissement).

Ceci plaide en faveur du fait que les secteurs finaux des graphiques, utilisés pour les calculs, doivent être décrits par une équation Teiss-jacob et sont représentatifs pour le traitement avec cette méthode.

Les paramètres de transmissivités calculés peuvent être qualifiés comme authentiques, correspondant aux conditions naturelles.

Pour s’assurer d’un certain taux de « sécurité » sur les prévisions des venues d’eau dans les ouvrages miniers, pour la valeur de base, on peut adopter la valeur maximale de transmissivité d’eau calculée d’après les données du pompage multiple. Elle est égale à 7,0 m2/j (sondage 219).

Contrairement aux coefficients de transmissivités les paramètres de capacité sont caractérisés par une dispersion importante des valeurs, ce qui est typique pour les couches à forte fissuration.

Les coefficients de diffusivité varient de $5,6 \cdot 10^3$ à $3,2 \cdot 10^5$ m2/j (données de pompages) et de $6,6 \cdot 10^3$ à $1,3 \cdot 10^3$ m2/j (données de rabattement).

Les coefficients d'emmagasinement sont de $1,2 \cdot 10^{-3}$ - $4,2 \cdot 10^{-5}$ et $0,7 \cdot 10^{-3}$ - $4,5 \cdot 10^{-4}$ respectivement pour les données de pompage et de rétablissement.

L'analyse comparative des données des paramètres de capacité indique l'augmentation visible des valeurs calculées des coefficients de diffusivité au fur et à mesure de l'éloignement des sondages d'observation à partir du sondage central.

Donc pour les coefficients de base de diffusivité on peut prendre ceux qui ont été estimés dans les sondages 219, 285 et 245 éloignés à partir du sondage central sur une distance de 224, 170 et 170 mètres respectivement. Leur valeur moyenne égale à $2 \cdot 10^4$ m²/j, est admise comme celle de base pour les calculs prévisionnels.

Ainsi, pour la prévision des venues d'eau lors de l'avancement des ouvrages miniers dans les dépôts du Paléocène-Eocène, il a été admis les valeurs de 7 m²/jour pour la transmissivité et $2 \cdot 10^4$ m²/j pour la diffusivité.

4.3 Discussion des données de pompages:

4.3.1 Pompages isolés:

4.3.1.1 Aquifère des roches Oligocène:

Les valeurs de transmissivités calculées à partir des graphiques de $\Delta:f(t)$ et $\Delta^*:f(\frac{t}{t+T})$ présentent beaucoup de différences. Parfois la courbe de descente présente trois droites; c'est à dire trois valeurs de transmissivités. Ceci est dû à la présence de la tectonique et à la perméabilité des roches y compris l'écoulement fissural dans les grès et argiles compactes fissurées.

On constate que les valeurs de transmissivités calculées à partir de la remontée sont très faibles, par rapport à celles de la descente, ceci est dû certainement à la perméabilité des roches; surtout l'infiltration verticale (K_v faible), sauf dans le cas des zones de broyages.

Cette interprétation peut se confirmer par l'analyse des rabattements, où on a constaté de forts rabattements (14 m) dans les sondages artésiens et de faibles rabattements dans des sondages à niveau statique (0.43 m). Ceci est dû à l'alternance de niveaux perméables et imperméables et à la présence de failles.

4.3.1.2 Aquifère des roches Paléocène-Eocène:

Les valeurs de transmissivité calculées à partir de la courbe de descente sont un peu élevées par rapport à celles de la remontée, ceci est dû surtout à la présence d'une zone bréchique presque uniforme et homogène et ceci peut traduire la bonne alimentation verticale et horizontale ($K_v < K_h$).

4.3.2 Pompages de faisceau:

4.3.2.1 Aquifère des roches de l'Oligocènes:

Pour les valeurs du coefficient d'emmagasinement calculées, elles correspondent à celles des nappes captives de l'ordre de 10^{-4} , sauf pour les sondages N° 396 et 288 où nous avons des valeurs supérieures à 2.10^{-2} égales à celles des nappes libres. Ceci est dû à la tectonique caractérisant la région. Par contre les valeurs de ce coefficient sont très proches de la réalité en ce qui concerne la courbe de remontée.

4.3.2.2 Aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène:

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement calculées à partir de la courbe de descente et remontée sont identiques à celle d'une nappe captive décrite par G.Castany 1982.

Pour ce qui est du rabattement, on déduit que pour des sondages éloignés et dans des endroits différents on arrive à la même valeur de rabattement, on pense que ceci est dû à la fragmentation des blocs et que leur alimentation se fait par failles et que les sondages ayant la même valeur de rabattement appartiennent aux mêmes blocs structuraux ou s'alimentent par le même chemin souterrain.

Cette vision du schéma est certainement très importante, du moment qu'elle pourra servir de base pour le schéma conceptuel dans le cadre d'une éventuelle modélisation du système aquifère souterrain.

4.4 Conclusion :

La région d'étude est caractérisée par deux complexes aquifères ayant des charges piézométriques très proches : le complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène et celui du Paléocène-Eocène.

Ces deux complexes sont séparés par les roches imperméables du Paléozoïque et du Lutétien-Priabonien.

Sur les terrains avoisinants, situés au Nord Est, on trouve un autre horizon aquifère dans les alluvions récents.

Les essais de pompages réalisés pour estimer les paramètres de capacité et de filtration des dépôts de l'Oligocène et du Paléocène - Eocène ont montré que

pour la nappe Oligocène, d'après les données des pompages isolés les coefficients de transmissivité varient dans de larges limites. Les valeurs maximales varient entre 11,7 et 8,9 m²/j et la valeur minimale est de 3,6 m²/j.

Au cours du rétablissement aux valeurs véritables de la montée du niveau on ajoute les valeurs de la montée du niveau due au drainage qui continue et se produit jusqu'à ce que le gradient indispensable de charge existe.

Pour cette raison les valeurs du rétablissement des niveaux dans les sondages se sont avérées élevées, donc les coefficients angulaires étaient aussi élevés. Ceci a amené à la diminution des coefficients de transmissivité d'eau dont la valeur moyenne était de l'ordre de 0,35 m²/j (d'un ordre inférieur à celles calculées d'après les données de pompages).

Sur le plan hydrodynamique le complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène constitué par les roches fissurées et karstiques, représente un système hétérogène avec une (double porosité), c'est à dire un milieu irrégulier fissuré avec deux systèmes (et plus) de fissures différemment remplies ; le réseau dense de micro fissures et de micro cavernes.

Les coefficients de transmissivité d'eau calculés d'après les données de pompage et de rétablissement coïncident pratiquement. Les valeurs varient dans les limites de 6,3 à 7,0 m²/j (données de pompage) et de 4,6 à 6,6 m²/j (données de rétablissement).

Contrairement aux coefficients de transmissivité les paramètres de capacité sont caractérisés par une dispersion importante des valeurs, ce qui est typique pour les couches à forte fissuration. Les coefficients de diffusivité varient de 5,6.10³ à 3,2.10⁵ m²/j (données de rabattement).

Les coefficients d'emmagasinement varient de 1,2.10⁻³ à 4,2.10⁻⁵ et de 0,7.10⁻³ à 3,5.10⁻⁴ respectivement pour les données de pompage et de rétablissement.

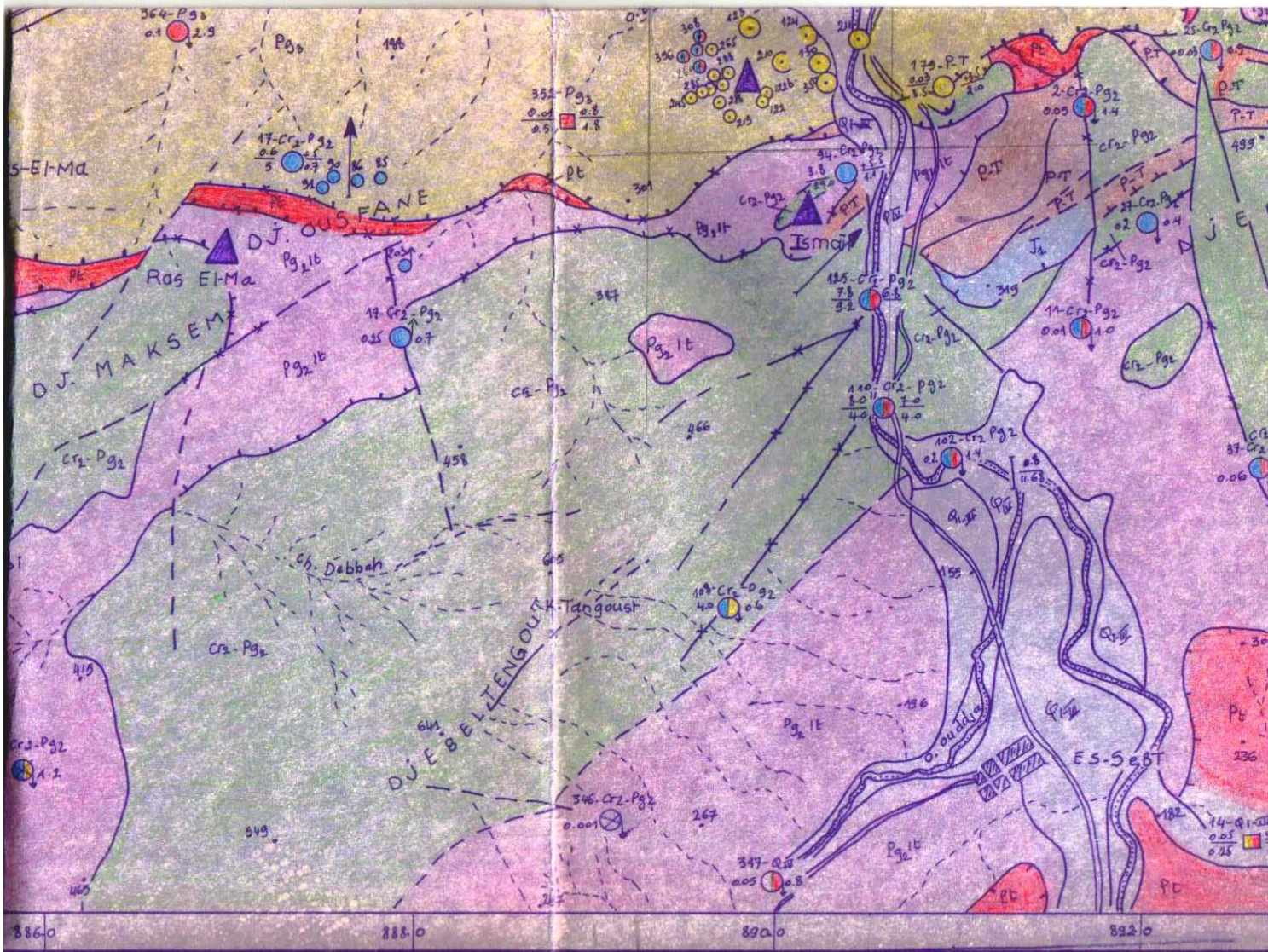












Fig. 15 : Carte hydrogéologique schématique de la zone Nord numidique

Légende de la carte Hydrogéologique

-  **Q_{IV}** Nappe aquifère des dépôts alluvionnaires contemporains des terrasses alluviales : cailloutis, graviers, sables, sablons et limons.
-  **C₁₃ P₁₂** Complexe aquifère très abondant des roches au bon état du Crétacé moyen - du moyen : conglomérats - brèches - calcaires, conglomérats, grès et calcaires.
-  **J₁** Complexe aquifère des roches du Jurassique inférieur : calcaires et dolomites.
-  **Q_{1-III}** EAUX SOUTERRAINES D'EXTENSION SPORADIQUE : dans les formations de dépôts alluvionnaires (sables, limons, sablons et argiles).
-  **P₃₃** dans les roches térigènes du paléogène supérieur : grès, argilites et argiles.
-  **C₁₄** dans les formations d'âge fructifère (Marnes, calcaires pelliculaires, alburnolites, jaspes et grès).
-  **P-T** dans les roches permotriassiques : grès rouges, pleurdites, dolomites (rares) et calcaires.
-  **Pr** dans les roches protérozoïques métamorphisées : gneiss, calcaires, porphyroïdes, schistes chloro-sépiciteux.
-  **P_{3a11}** EXTENSION DES ROCHES PRATIQUEMENT IMPERMEABLES. Argilites et alburnolites du paléogène moyen (Lutétien).
-  **P₁** Schistes métamorphiques à quartz du Protérozoïque.

1. Introduction

La région d'étude est située au Nord de l'Algérie sur le flanc Nord de la chaîne Numidique à 30 Km de Skikda et de 3 à 10 Km de Azzaba.

Les gisements de mercure du district occupent une position géologique déterminée et sont regroupés en deux champs miniers. Le champ d'Ismail regroupant les trois gisements (Ras El Ma, Ismail et Guenicha) ayant pour horizon porteur de la minéralisation mercurielle les conglomérats brèches calcaires de l'Hyprésien-luthétien. Le second de Mra-Sma constitué par les gisements (Mra-Sma I, MraSma II et koudiat Sma) ayant pour horizon porteur de la minéralisation les pseudo-brèches calcaires du Campanien et les grès du Néocomien (Fig. 19).

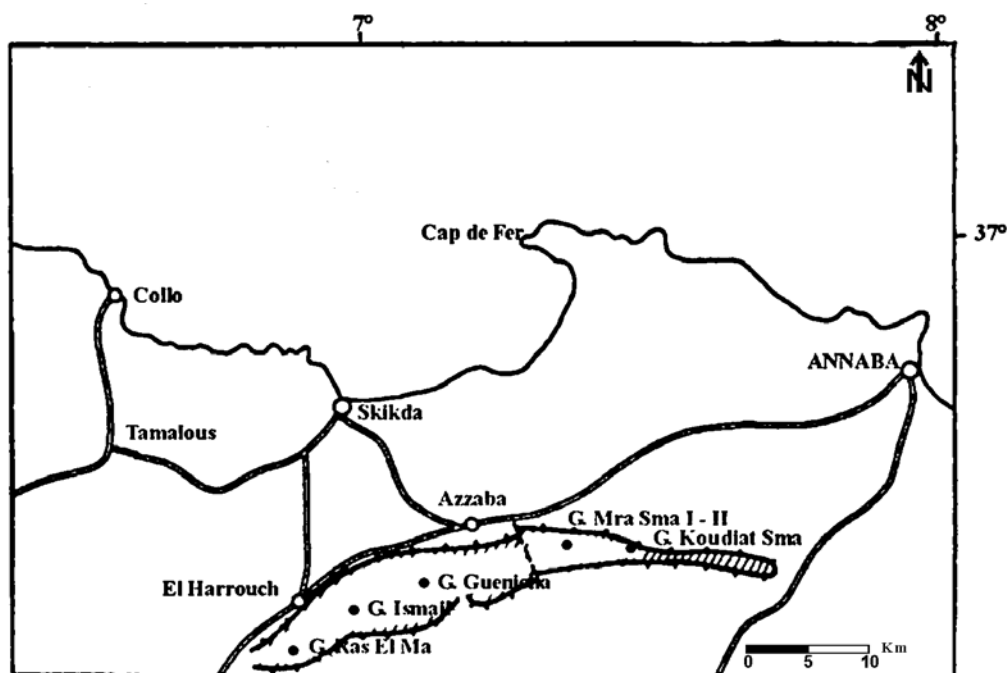


Fig. 19 : Situation géographique de la zone mercurielle Nord Numidique
Location map of the North Numidian mercurial zone

2. Caractéristiques géochimiques de la zone Nord numidique

Bikmeev a étudié les caractéristiques géochimiques la zone mercurielle Nord Numidique à partir d'échantillons prélevés essentiellement sur des carottes de sondages et dosés par spectrométrie d'émission semi quantitative. Les résultats montrent que les faciès litho stratigraphiques présentant des Clarke élevés en Hg sont les micro brèches calcaires du Thanétien Hyprésien (1.5 ppm), les grès et conglomérats du Permo Trias (1.4 ppm), les argiles et siltites du Luthétien Priabonien (0.9 ppm), alors que les grès et les argiles de l'Oligocène présentent des teneurs de fond en Hg faibles de l'ordre de 0,6 ppm.

2.1 Migration des éléments

Le coefficient de migration d'un élément chimique est défini comme le rapport de sa teneur moyenne dans l'eau sur le Clarke de la roche dans laquelle circule cette eau.

$$A = (B/C) \times 10^{-4}$$

Où : A= coefficient de migration

B= teneur moyenne de l'élément dans l'eau

C= Clarke de l'élément dans la roche

D'après Bikmeev le mercure et le Plomb de la zone mercurielle Nord Numidique présentent respectivement des coefficients de migration faible à moyen de 0.15 et 0.11 (Tableau 19).

Tableau 19 : Coefficients de migration dans la zone Nord Numidique (Bikmeev, 1970)
Migration coefficient of the North Numidian zone (Bikmeev, 1970)

Eléments chimiques	Nombre d'échantillons	Coefficient de migration (A)	Eléments chimiques	Nombre d'échantillons	Coefficient de migration (A)
Soufre	30	563	Manganèse	30	0.15
Chlore	30	973	Fer	30	0.007
Sodium	29	6.51	Mercure	28	0.15
Potassium	28	0.82	Zinc	30	2.56
Calcium	35	5.75	Plomb	30	0.11
Strontium	30	5.60	Cuivre	30	0.31
Silice	30	0.11			

2.2 Classification des éléments

Le calcul du coefficient de migration permet de classer les éléments de la région d'étude en quatre groupes en fonction de leur intensité de migration (Bikmeev, 1970). Il en ressort que les éléments chalcophiles Zn et (As-Sb) sont plus mobiles que le Hg, Cu, Pb et (Sb-As).

Le calcul du coefficient de migration permet de classer les éléments de la région d'étude en quatre groupes en fonction de leur intensité de migration (Bikmeev, 1970). Il en ressort que les éléments chalcophiles Zn et (As-Sb) sont plus mobiles que le Hg, Cu, Pb et (Sb-As). (Tableau 19).

Tableau 20 : Migration hypergène des éléments chimiques dans la zone Nord numidique
 hypergene migration of chemical element in the North numidian zone

Intensité de Migration	Milieu oxydant						
	1000	100	10	1	0.1	0.01	0.001
très forte	Cl - S - Br						
forte			Ca - Na - Mg - Sr- Zn - (As-Sb) Mo - U				
moyenne				Mn- Cu - Hg - Pb - Sr - K - Ni - P - (Sb-As)			
faible et très faible						Fe - Al - Ti - Métaux précieux	

3. Hydrochimie des eaux souterraines :

Neuf (9) forages et deux (2) sources dans les deux nappes aquifères de la zone Nord numidique, ont été analysées, pour identifier les éléments majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻), le pH, le résidu sec, le titre hydrotimétrique, le Hg, le Cu, le Pb, le Zn et l’Arsenic.

La désignation des points de prélèvements est consignée dans la figure 20

Les analyses ont été effectuées aux laboratoires du Complexe Pétrochimique de Skikda et de Boumerdes (Alger).

Les procédés de dosages sont déduits des méthodes d’analyses standard. Les duretés totales et calciques des échantillons sont déterminées par complexométrie, par titrage avec l’acide éthylène-diamine-tétracétique (EDTA). Les chlorures sont déterminés par la méthode de Mohr (Rodier 1984) et les sulfates par lecture de l’absorbance à λ=420 nm pour une suspension obtenue par réaction des sulfates avec le chlorure de baryum. Le sodium et le potassium sont dosés par photométrie à émission de flamme (Rodier, 1984)

La détermination du mercure s’effectue en deux étapes. La première consiste à oxyder toutes les formes de mercure à l’état bivalent à l’aide d’une digestion acide en mercure élémentaire. Le mercure est extrait par barbotage d’air sec dans la solution. Le mélange gazeux est ensuite acheminé vers la cellule du spectrophotomètre d’absorption atomique sans flamme.

La concentration de l’échantillon est déterminée par comparaison entre les absorbances respectives de l’échantillon et les solutions étalons.

La plage d’étalonnage se situe entre 0,1 µg/L et 1,5 µg/L Hg. Le domaine d’application peut être étendu en effectuant des dilutions appropriées.

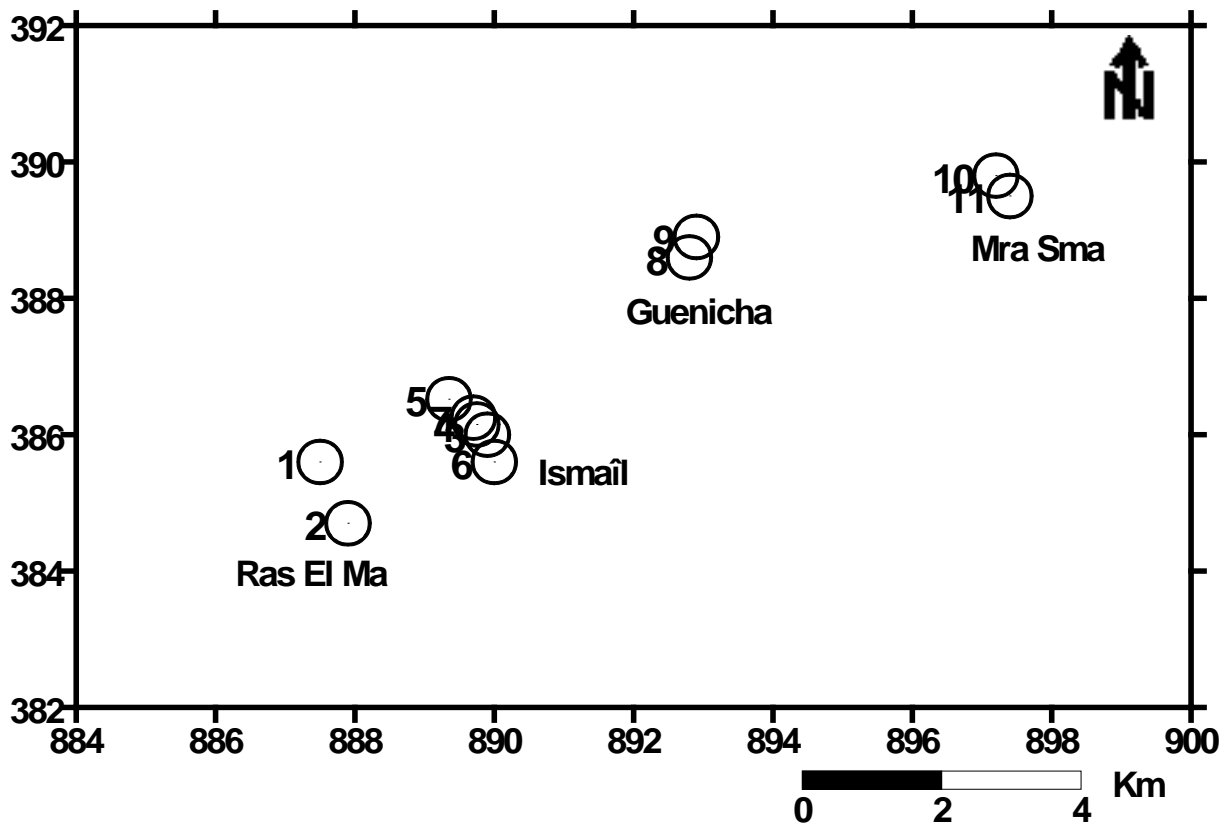


Fig. 20 : Désignation des points de prélèvements dans la zone mercurielle Nord numidique

3.1 Le Faciès chimique

L'erreur de la balance ionique calculée sur les résultats des analyses chimiques est satisfaisante ($< 5\%$). Le rapport cations sur anions est compris dans la limite acceptable $[0,95 - 1,05]$, ce qui a permis de vérifier la fiabilité des analyses et d'accepter les résultats. (Tableau 22).

La représentation des analyses sur le diagramme de Piper (Fig. 21) révèle trois faciès chimiques : le bicarbonaté calcique pour les points (1, 2, 5, 8, 9, 10 et 11), le sulfaté calcique (3, 4, 7) et le chloruré magnésien pour la source S.2. Le faciès chimique dominant le bicarbonaté calcique s'explique conformément au réservoir de du Paléocène éocène constitué de calcaires caverneux et fissurés et de grès calcaires du Paléocène.

Le faciès chloruré magnésien se retrouve dans les eaux ayant pour réservoirs les grès et argiles de l'Oligocène, les chlorures peuvent provenir entre autre de la dissolution des chlorures de sodium des alluvions salifères.

Le faciès sulfaté calcique s'explique par le lessivage des grès et des argiles prédominant dans les roches Oligocène, ce faciès provient en grande partie de la dissolution des sulfates de calcium contenus dans les inclusions évaporitiques et dans les alluvions.

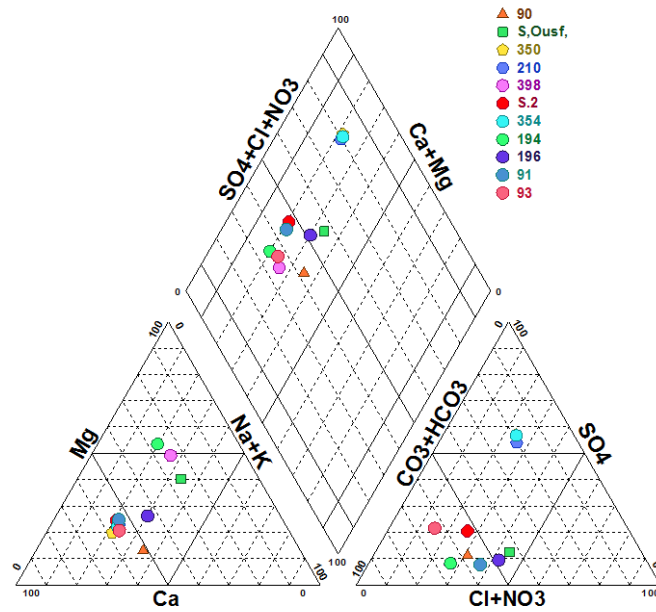


Fig. 21 : Représentation des analyses chimiques d’après le Diagramme de Piper

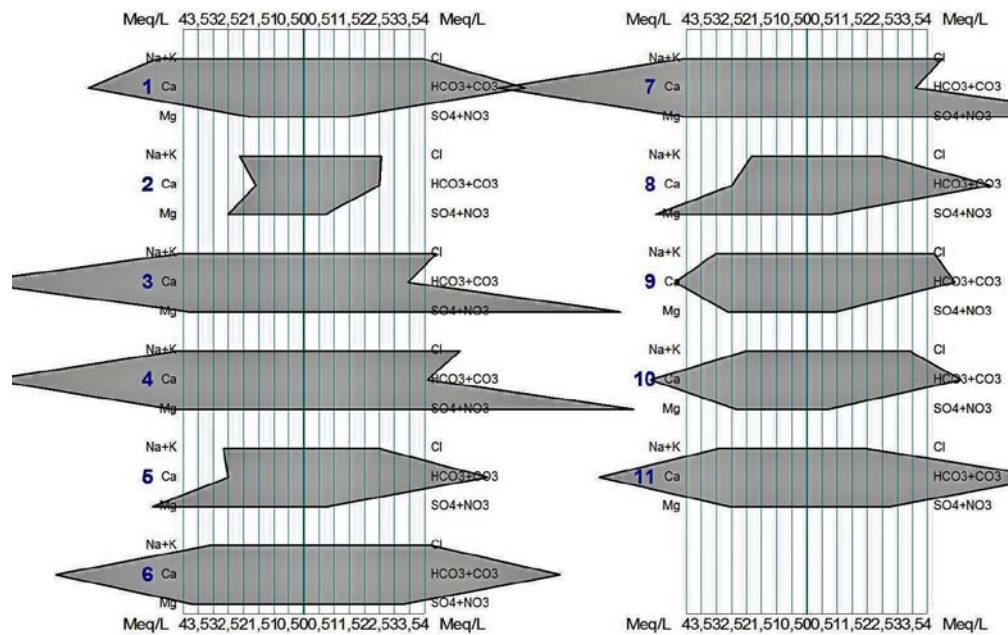


Fig. 22 : Représentation des analyses chimiques d’après le Diagramme de Stiff

3.2 Le résidu sec

Les valeurs du résidu sec représentant le résidu après évaporation de l'eau révèlent que les eaux analysées présentent des teneurs acceptables. La norme tolérée de 1500 mg/L n'est dépassée par aucun point analysé.

3.3 Le titre hydrotimétrique (TH)

D'après les normes de potabilité établies par l'O.M.S (Tableau 21), les forages présentant des eaux de dureté moyenne à assez douces sont situés dans le champ minier Ismail captant la nappe Oligocène.

Les points analysés représentant des eaux dures se trouvent dans les gisements de Ras El Ma et de Guenicha captant la nappe Paléocène Eocène.

Les forages correspondant aux eaux très dures sont localisés dans les gisements Ismail et Guenicha captant la nappe Palécène Eocène (Fig. 23).

Tableau 21 : Normes pour la dureté des eaux O.M.S (1972)
Water hardness norms O.M.S (1972)

TH (°F)	0-7	7-14	14-20	20-30	30-50	50°F et plus
Dureté de l'eau	Très douce	Douce	Moyennement douce	Assez Douce	Dure	Très dure
N° des Forages correspondants	/	/	/	2	1 - 5 - 8 - 9 - 10 - 11	3 - 4 - 6 - 7

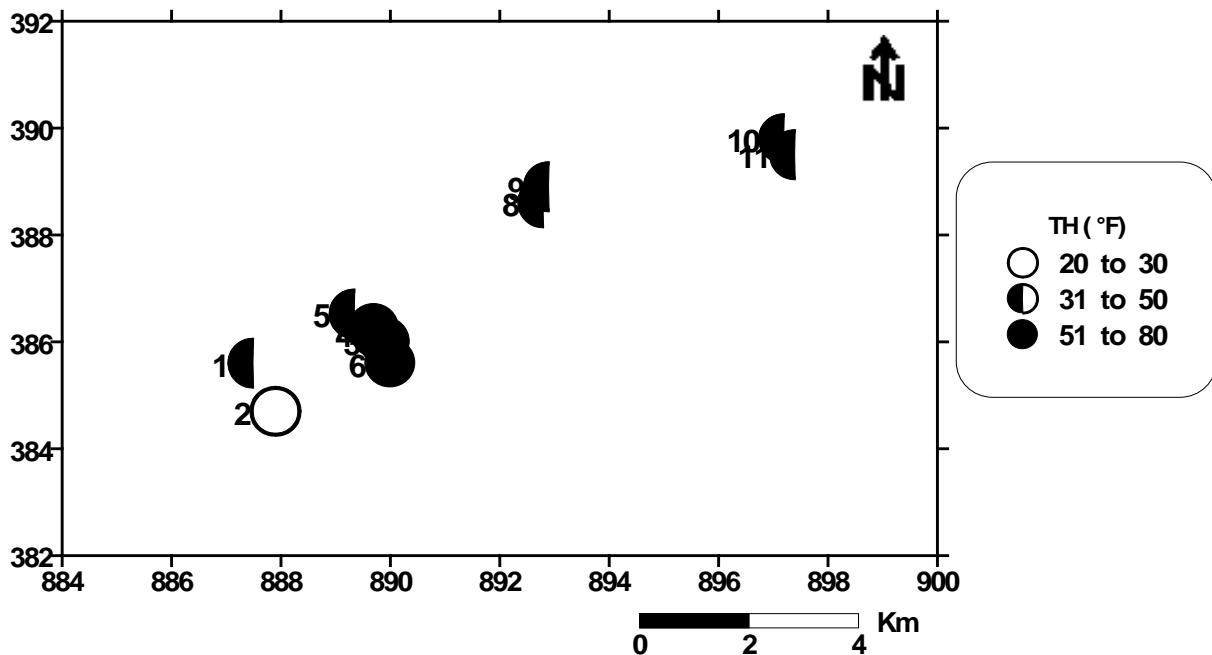


Fig. 23 : Carte du titre Hydrotimétrique de la zone mercurielle Nord Numidique (°F)

Tableau 22 : Résultats des analyses chimiques

N°	Gisement	Champ minier	Nappe	Désignation	PH	Résidu sec (mg/l)	TH (° F)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	
1	Ras El Ma	I S M A I J	e ¹⁻³	90	6.9	754	45	143	22	110	3.5	450	140	68	
2			S.1	7.8	900	21	32	30	45	5.4	152	90	35		
3	Ismail		σ _{α-2}	350	8.0	138	74	222	45	84	17	311	156	505	
4			σ _{α-2}	210	7.0	143	74	208	53	85	19	250	184	524	
5			σ _{α-2}	398	8.9	600	38	50	61	41	35	372	89	37	
6			e ¹⁻³	S.2	7.5	1110	60	165	46	68	5.7	518	53	158	
7			σ _{α-2}	354	7.5	576	62	120	79	67	10	297	78	104	
8	Guenicha		e ¹⁻³	194	7.0	590	38	50	61	41	3.5	372	89	37	
9			e ¹⁻³	196	7.0	594	35	88	32	68	3	298	150	45	
10	Mra Sma		Mra Sma	e ¹⁻³	91	7.8	620	38	104	29	46	1.6	311	120	34
11				e ¹⁻³	93	7.0	820	47	138	31	67	13	300	120	50

Désignation	Hg (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	As (mg/l)	Zn (mg/l)
90	0.007	0.003	0.007	0.003	0.07
S.1	0.008	0.008	0.008	0.008	0.08
350	0.08	0.002	0.06	0.02	0.01
210	0.08	0.002	0.06	0.02	0.01
398	0.004	0.002	0.004	0.02	0.04
S.2	0.08	0.002	0.06	0.02	0.01
354	0.08	0.002	0.08	0.02	0.08
194	0.006	0.20	0.03	0.02	0.06
196	0.006	0.30	0.03	0.03	0.06
91	0.006	0.02	0.02	0.02	0.20
93	0.001	0.02	0.02	0.02	0.20

4. Teneurs en micropolluants métalliques

Les résultats des analyses des micropolluants métalliques montrent des teneurs élevées en Hg et en Pb. Pour le Hg les valeurs excessivement élevées de l'ordre de 80 $\mu\text{g/L}$ sont localisées dans les forages 350, 210, 354 captant l'Oligocène ainsi que la source S.2. Il en est de même pour le Pb où les teneurs varient de 60 à 80 $\mu\text{g/L}$.

Ces valeurs sont très élevées conformément aux normes pour le Hg et le Pb qui sont respectivement de 1 $\mu\text{g/L}$ et de 50 $\mu\text{g/L}$.

Sur la totalité des points analysés, seul le forage 93 captant la nappe profonde Paléocène-Eocène présente la teneur minimale en Hg de 1 $\mu\text{g/L}$. (Fig. 24)

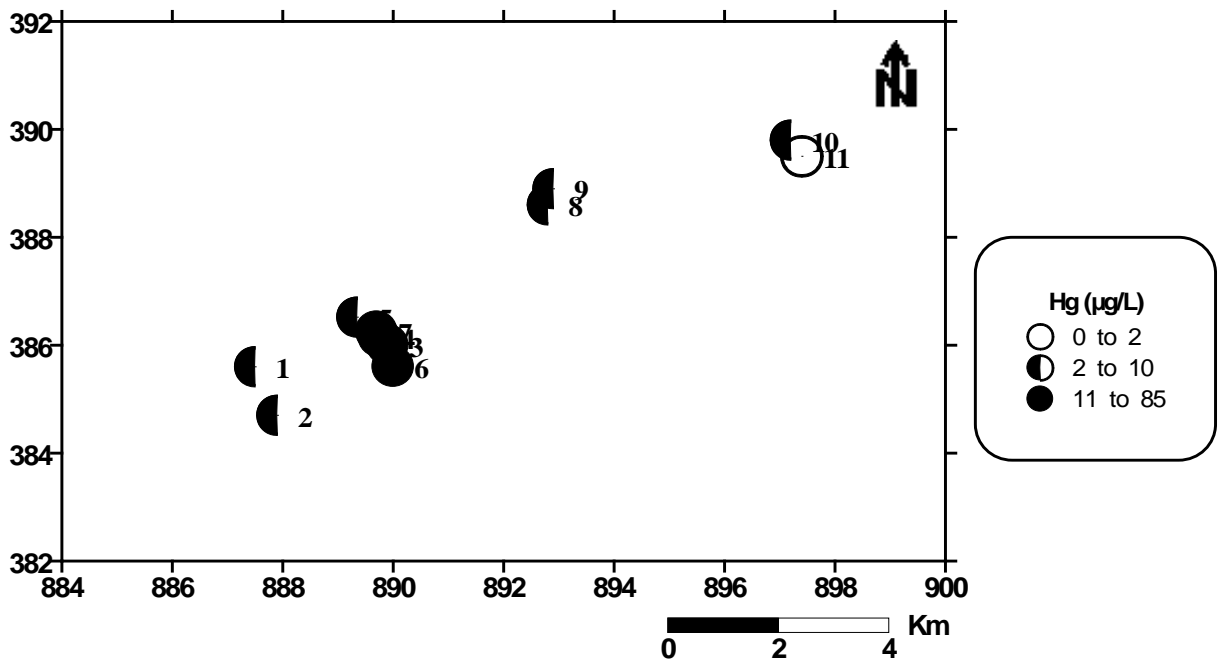


Fig. 24 : Carte de répartition du Hg dans les eaux souterraines de la zone de Azzaba

La contamination des eaux de la nappe Oligocène par le Hg et le Pb est donc largement supérieure à celle du Paléocène-Eocène, elle n'est donc pas due au lessivage des formations géologiques, sachant que le Hg et le Pb dans la région d'étude ont des coefficients de migration faibles à moyens et que les faciès présentant des Clarke élevés en Hg sont localisés dans la nappe Paléocène-Eocène. (Fig. 24, 25).

Les travaux effectués dans la région ont montré que l'usine de Hg présente une double pollution atmosphérique et hydrique, en effet une partie des teneurs en mercure résulte du recyclage par les pluies du Hg atmosphérique dégagé par l'usine et la grande partie provient des rejets hydriques de cette dernière.

L'usine de mercure dispose de deux lacs de décantations non aménagés où sont déversées les eaux de refroidissement du processus contaminées par le mercure. Lors des crues en périodes hivernales les eaux débordent les deux lacs et se déversent dans le réseau hydrographique et notamment dans le principal

Oued de la région (Oued Fendek) qui alimente la nappe phréatique Oligocène présentant un toit gréseux perméable.

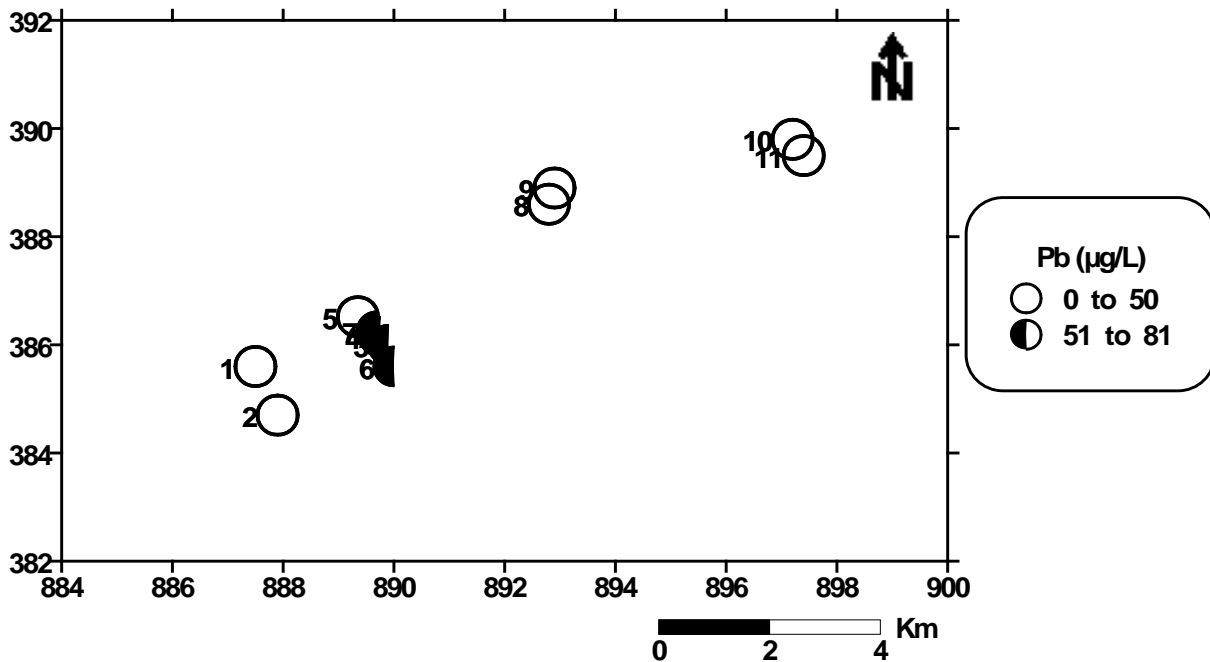


Fig. 25 : Carte de répartition du Pb dans les eaux souterraines de la zone de Azzaba

5. Application de l'A.C.P

5.1 Introduction

La statistique multidimensionnelle a pour objet la description simultanée des données volumineuses, fournissant ainsi des informations à des éléments d'interprétation qu'on ne peut obtenir par les traitements classiques.

L'analyse en composante principale (A.C.P.) permet une analyse des relations entre les nombreuses variables donnant ainsi des informations sur l'évolution du chimisme des eaux et la détermination des caractères dominants dans le milieu.

L'analyse en composantes principales est une méthode descriptive ayant pour objet la description des données contenues dans un tableau d'individus à caractères numériques (P caractères sont mesurés sur n individus).

Le schéma de l'A.C.P. est une méthode de réduction du nombre des caractères permettant une représentation géométrique des individus et des caractères.

Cette réduction ne sera possible que si les P caractères initiaux ne soient pas indépendants et ont des coefficients de corrélation non nuls.

L'A.C.P. est une méthode factorielle, car la réduction du nombre de caractères ne se fait pas sur une simple sélection de certains d'*entre eux*, mais par la construction de nouveaux caractères synthétiques obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen des facteurs.

C'est une méthode linéaire car il s'agit de combinaisons linéaires.

Partant d'un tableau de données sur lequel figurent en colonnes (P) variables et en lignes (n) échantillons, il est possible de représenter chaque échantillon par un point dans un espace à P dimensions (espace de variables).

Egalement chaque variable peut-être représentée dans un espace à n dimensions (espace des échantillons).

On obtient ainsi un nuage de points dont il est impossible de visualiser la structure.

Aussi faut-il avoir recours à une représentation dans un espace à dimensions réduites (deux en général) déterminé à partir des axes principaux du nuage.

Chaque axe factoriel et choisi de façon à décrire le maximum de variance du nuage de points.

L'association deux à deux de ces axes aux facteurs permet une représentation graphique plane de ce nuage.

Généralement le calcul se poursuit jusqu'au facteur qui exprime 90% au moins de la variance totale.

Pour conserver au maximum la forme du nuage, donc son inertie par rapport au centre de gravité, on centre la variable, c'est à dire *qu'on essaye de faire passer les axes principaux de projection par le centre de gravité*, il s'agit alors d'une A.C.P centré .

De plus, afin d'éliminer l'influence de la taille des variables dépendant des unités choisies, on considère comme variable dans l'A.C.P réduite le rapport de chaque valeur à son écart-type. L'A.C.P est alors dite centrée réduite.

En résumé cette méthode consiste à décrire le nuage formé par le tableau de données, de manière à mettre en relief les principaux facteurs responsables de la structure observer aussi bien par rapport aux variables qu'aux individus. L'A.C.P permettra de regrouper selon les mêmes facteurs les échantillons présentant des « **caractères d'origine ou d'évolution similaire** ».

5.2 Application de l'A.C.P

L'analyse à composante principale (A.C.P) a concerné les onze (11) individus analysés et 15 variables (pH, R.S, TH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Hg, Cu, Pb, Zn, As).

5.2.1 Matrice de corrélation

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TH	Hg	Cu	Pb	Zn	As
Ca ⁺⁺	1.00												
Mg ⁺⁺	0.250	1.00											
Na ⁺	0.296	0.308	1.00										
K ⁺	0.025	0.677	0.029	1.00									
HCO ₃ ⁻	0.560	0.090	0.074	0.276	1.00								
Cl ⁻	0.225	0.054	0.665	0.177	0.285	1.00							
SO ₄ ²⁻	0.460	0.141	0.540	0.422	0.420	0.699	1.00						
TH	0.239	0.349	0.629	0.361	0.065	0.715	0.921	1.00					
Hg	0.455	0.364	0.449	0.323	0.192	0.756	0.839	0.877	1.00				
Cu	0.489	0.026	0.241	0.358	0.003	0.053	0.365	0.381	0.371	1.00			
Pb	0.304	0.393	0.390	0.186	0.230	0.714	0.844	0.859	0.878	0.110	1.00		
Zn	0.428	0.392	0.289	0.131	0.024	0.168	0.165	0.199	0.170	0.534	0.399	1.00	
As	0.171	0.529	0.258	0.496	0.182	0.539	0.389	0.397	0.607	0.039	0.404	0.028	1.00

Tableau 23 : Matrice de corrélation

Le coefficient de corrélation des micropolluants le plus élevé est celui du Hg, Pb (0,878).

5.2.2 Diagonalisation

1ere ligne : Valeurs propres : Variances sur les axes principaux

2eme ligne : Contribution à la variance totale (Pourcentage expliqués par les axes principaux)

5.5819	2.4293	1.6441	1.2977	0.9400
39.5%	18.0%	12.6%	10.0%	7.2%

L'inertie cumulée du cercle de corrélation F1-F2 est de 57,5% traduisant ainsi le maximum de l'information, l'axe F1 (39,5%) regroupe les éléments responsables des faciès chimiques et met en évidence le Hg et le Pb qui sont bien corrélés et représentent les éléments de pollution.

La projection des individus dans le plan F1-F2 montre que l'axe F1 regroupe les éléments présentant le même faciès chimique et regroupe dans un nuage de points les individus présentant les teneurs élevées en Hg et en Pb (Fig. 26).

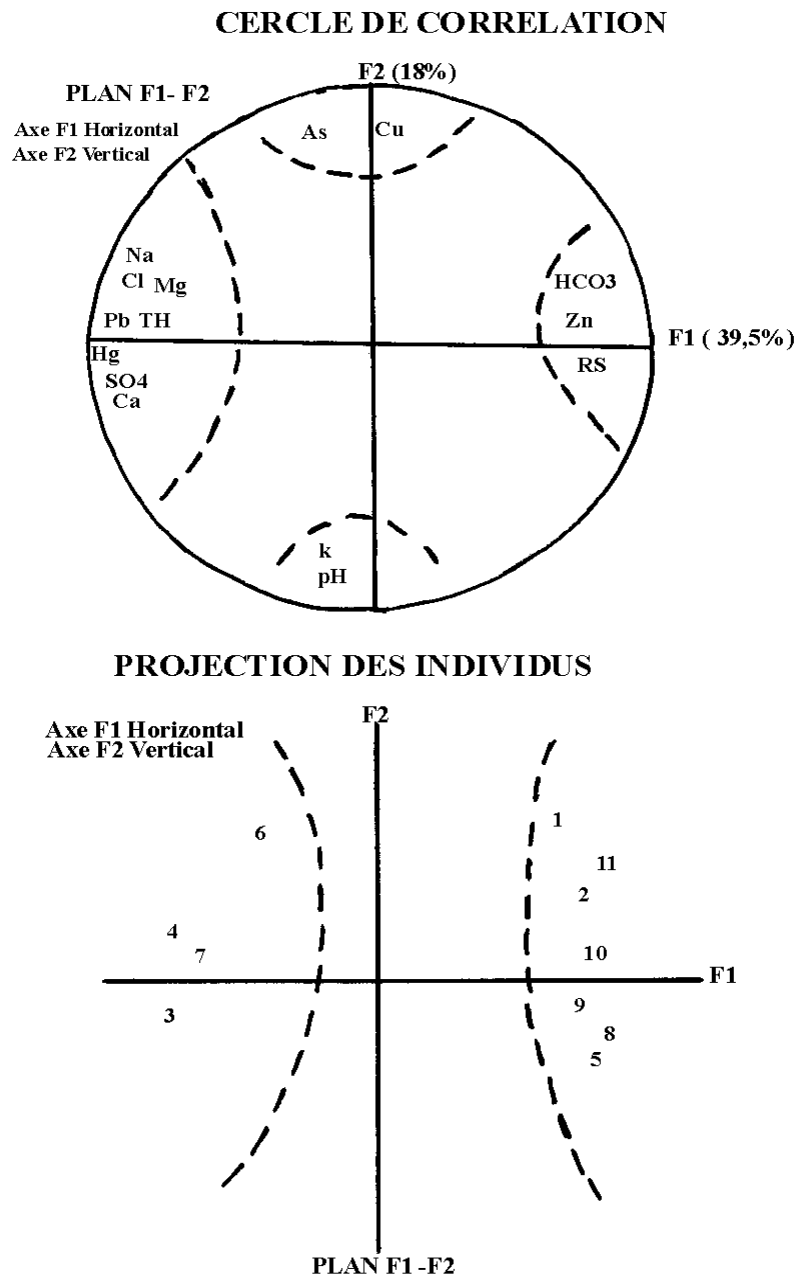


Fig. 26 : Cercle de corrélation et projection des Individus

6. Indice de saturation

Nous utilisons le logiciel PHREEQC, pour voir la spéciation en solution. PHREEQC est un programme écrit en C par David L. Parkhurst et C.A.J. Appelo ; il est diffusé par l'US geological survey. PHREEQC est utilisé pour simuler des réactions chimiques et du transfert dans des eaux naturelles et polluées.

Les premières versions remontent à 1980 (PHREEQE, Parkhurst *et al.*). Il est suivi et en constante amélioration. Aujourd'hui, il dispose d'une interface intuitive sous windows.

Les possibilités de PHREEQC permettent notamment :

- de calculer la spéciation des espèces chimiques dans une solution aqueuse ainsi que les indices de saturation des minéraux ;
- de simuler pour les gaz, les phases solides et aqueuses, à différentes températures, des réactions chimiques (précipitation, dissolution...) en batch ou avec du transport en 1D (convection, dispersion) ;
- de tenir compte de lois cinétiques dans certaines réactions ;
- de simuler des réactions de surface (adsorption et complexation) ; d'utiliser également certains isotopes : ^2H , ^{13}C , ^{18}O , ^{34}S et ^{87}Sr .

Le degré de saturation de l'eau peut être estimé par le calcul de l'indice de saturation, qui atteint la valeur zéro quand la solution est en équilibre avec une phase solide. Un indice de saturation positif indique une sursaturation et un indice négatif une sous saturation vis à vis des minéraux.

L'interprétation thermodynamique en utilisant la simulation de la concentration des ions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+), sous l'effet de l'évaporation isotherme ($25\text{ }^\circ\text{C}$), par le logiciel thermodynamique « PhreeqC » en termes d'équilibres sels/solution, montre que les eaux souterraines de la région sont sous saturées par rapport à la halite (NaCl), ce qui provoque la dissolution en entraînant un enrichissement des eaux en sodium et en chlorures.

Concernant le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite (CaSO_4), les eaux sont en équilibre dans la majeure partie des points analysés, sauf pour les points 5,6 et 11 présentant le faciès sulfaté calcique et où les eaux sont sursaturées, entraînant une précipitation sous forme de gypse et d'anhydrite. (Fig. 27).

Les eaux de la région sont en équilibre vis à vis de la calcite dans les gisements de Guenicha et MraSma, par contre dans les autres gisements les eaux sont sursaturées en calcite, surtout dans le gisement d'Ismail où les faciès des eaux sont sulfaté calcique et bicarbonaté calcique, entraînant ainsi une précipitation sous forme de calcite.

Les eaux de la région sont sursaturées en Aragonite et en dolomie dans tous les points analysés, entraînant ainsi la précipitation des éléments carbonatés sous forme d'aragonite et surtout sous forme de dolomie. (Fig. 28).

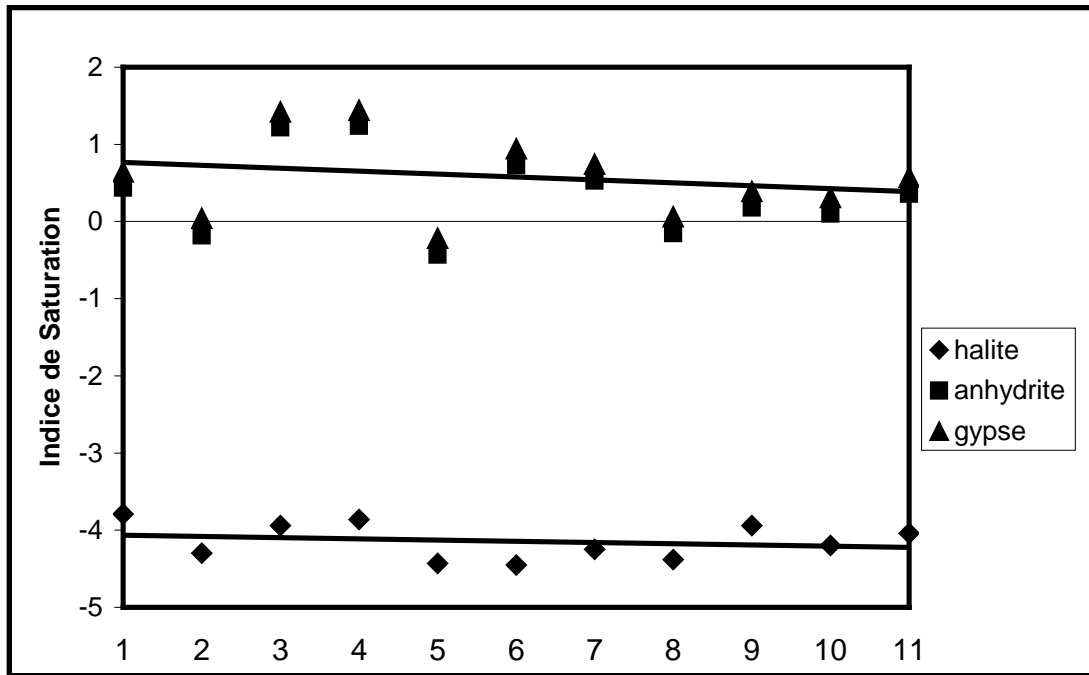


Fig. 27 : Etat des minéraux évaporitiques dans l'eau

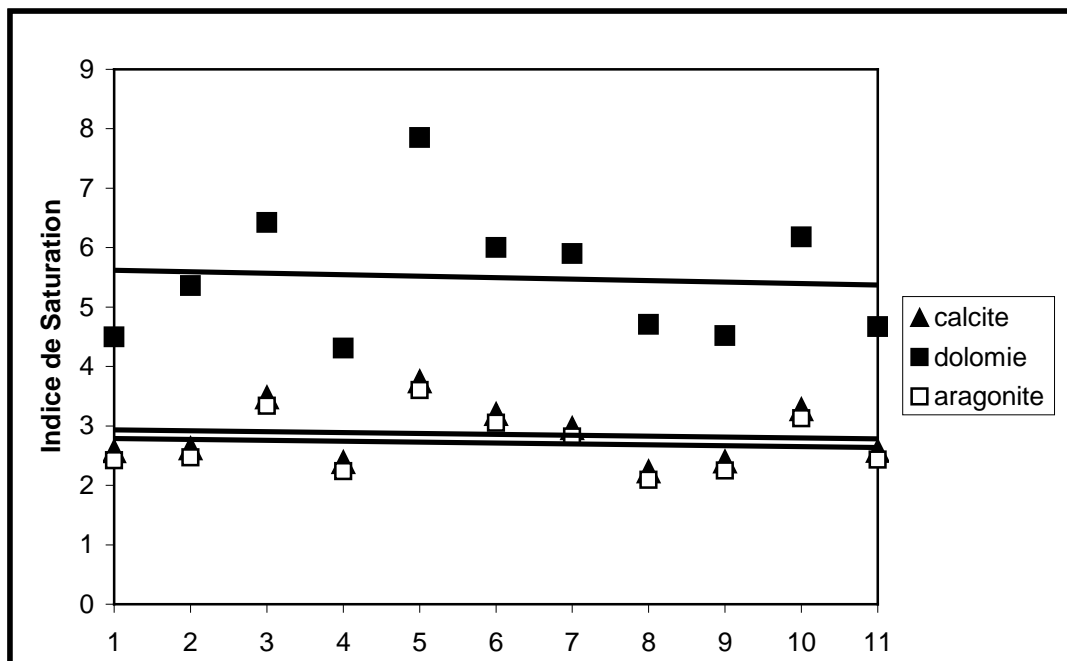


Fig. 28 : Etat des minéraux carbonatés dans l'eau

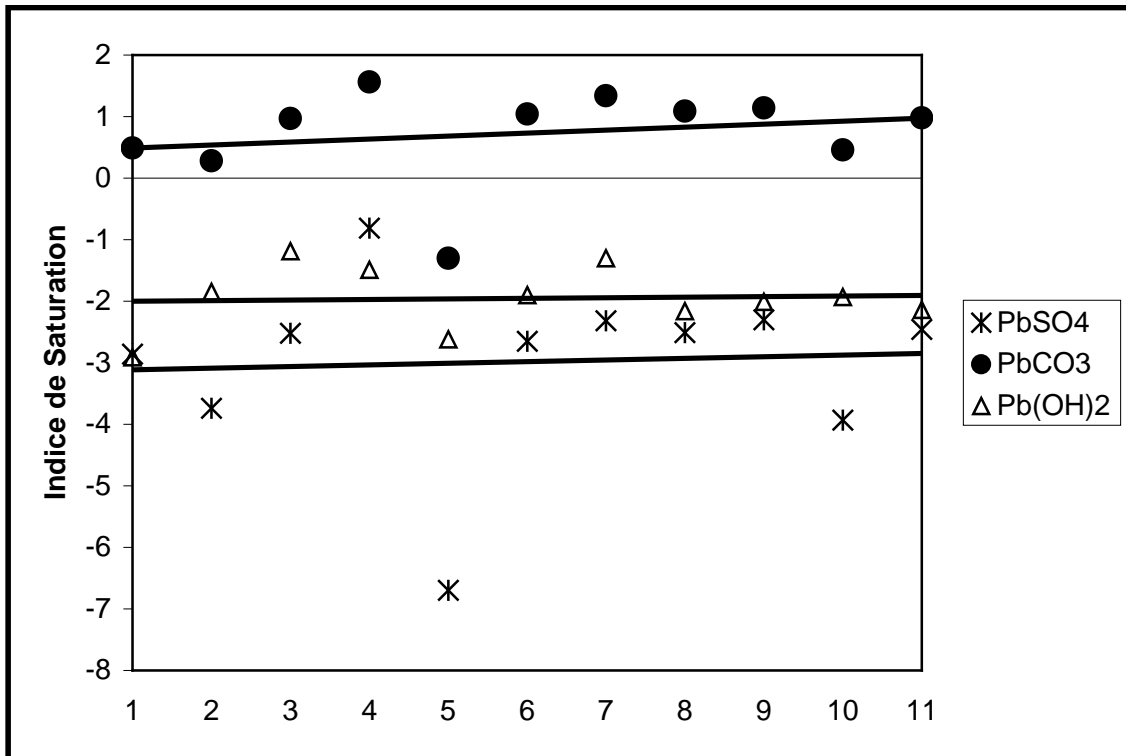


Fig. 29 : Etat des minéraux de Pb dans l'eau

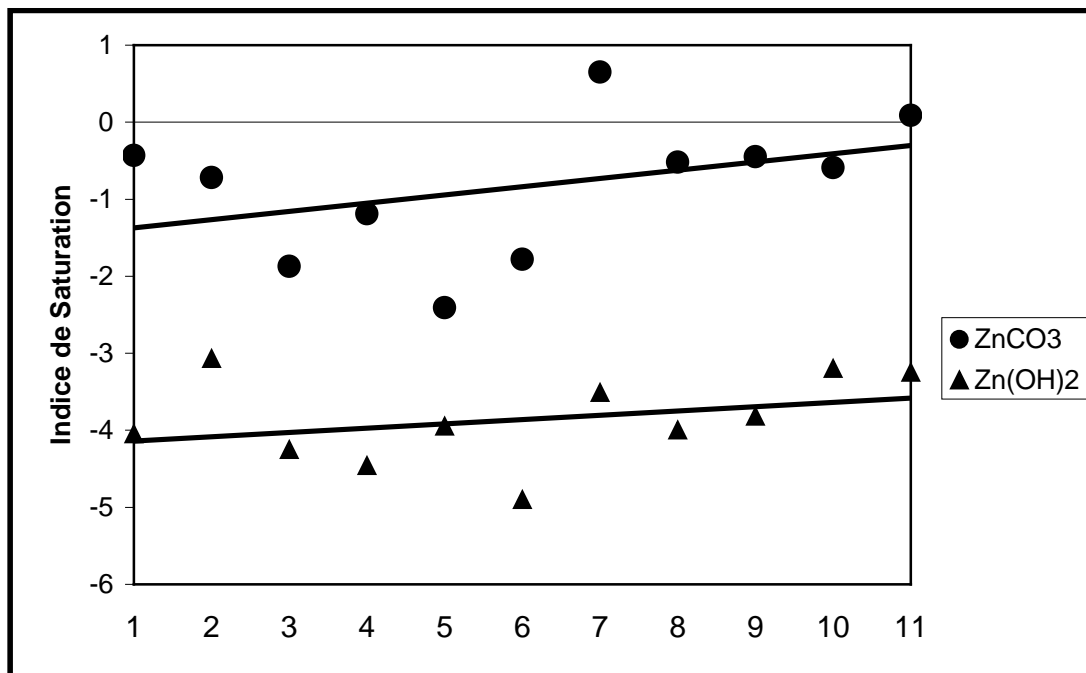


Fig. 30 : Etat des minéraux de Zn dans l'eau

Les eaux de la région sont sous saturées en Hydroxyde de Plomb $Pb(OH)_2$ et en sulfates de plomb $PbSO_4$, ce qui provoque une dissolution de ces minéraux dans les eaux entraînant un enrichissement en Pb.

Les eaux sont sursaturées vis à vis du bicarbonate de plomb $PbCO_3$, ce qui provoque dans la région carbonatée et dans les zones d'oxydation une précipitation sous forme de Cérusite ($PbCO_3$) (Fig. 29).

L'hydroxyde de Zinc $Zn(OH)_2$ se trouve en sous saturation, ce qui provoque une dissolution de $Zn(OH)_2$ et donc un enrichissement des eaux en Zn.

Le $Zn(CO_3)$ est en sursaturation, ce qui entraîne une précipitation sous forme de smithsonite $Zn(CO_3)$ dans les eaux présentant le faciès bicarbonatée.(Fig. 30).

7. CONCLUSION

Les eaux souterraines de la zone mercurielle Nord numidique présentent un faciès chimique dominant le bicarbonaté calcique en relation avec les roches réservoirs du Paléocène-Eocène.

Le mercure et le Plomb de la zone d'étude présentent respectivement des coefficients de migration faible à moyen de 0.15 et 0.11

La classification des éléments chimiques en fonction de leur coefficient de migration montre que le Hg, Cu, et Pb de la zone d'étude sont moins mobiles que les éléments chalcophiles Zn et (As-Sb).

Les teneurs élevées en Hg et en Pb dans les eaux analysées, jusqu'à (80 $\mu g/L$) ont été retrouvées dans la nappe Oligocène ; alors que dans la nappe Paléocène-Eocène elles sont relativement faibles.

La contamination des eaux de la nappe Oligocène par le Hg et le Pb est donc largement supérieure à celle du Paléocène-Eocène, elle n'est donc pas due au lessivage des formations géologique, sachant que le Hg et le Pb dans la région d'étude ont des coefficients de migration faibles à moyens et que les faciès présentant des Clarke élevés en Hg sont localisés dans la nappe Paléocène-Eocène.

Des travaux effectués dans la région ont montré que l'usine de mercure présente une double pollution atmosphérique et hydrique, en effet une partie des teneurs en mercure résulte du recyclage par les pluies du Hg atmosphérique dégagé par l'usine et la grande partie provient des rejets hydriques de cette dernière (Benhamza, 2005).

Les teneurs en Hg et en Pb retrouvées dans les eaux souterraines de la région sont très élevées et dépassent les normes admissibles, témoignant ainsi d'une contamination de la nappe phréatique Oligocène.

CONSEQUENCES DE L'EXPLOITATION DES GISEMENTS MERCURIELS SUR L'ENVIRONNEMENT

1. Introduction :

L'expansion et l'intensification des activités humaines sont à l'origine de l'accroissement et de la dispersion des polluants dans le milieu naturel. Cette dispersion peut s'effectuer dans l'atmosphère sous forme d'aérosol, de fumées,.... Susceptibles de sédimenter ou de retomber avec les précipitations atmosphériques (pluies acides) ; par infiltration à partir de stockage de déchets, d'épandage de fertilisants ou de pesticides en agriculture ; par ruissellement à partir des stockages, ou par les déversements directs dans les eaux de surfaces.

Toutes ces sources de pollutions constituent une menace pour l'environnement, et en particulier pour les ressources en eaux

Cette menace est d'autant plus grave que, si la pollution d'une rivière est relativement vite décelée (ses effets étant le plus souvent visibles), celle d'une eau souterraine est plus longue à déceler ; les durées nécessaires pour une dépollution sont également très différentes.

Après le tarissement de la source de pollution et la mise en œuvre des techniques d'assainissement, la qualité originelle de l'eau de surface est généralement retrouvée après un délai de l'ordre de quelques mois ; par contre réduire le niveau de pollution d'un aquifère nécessite des dizaines d'années, quand la situation n'est pas irréversible.

Le sol a longtemps été considéré comme une barrière géochimique efficace, arrêtant les polluants dans leur transfert vers les aquifères (Bize et al.1981. Bourg, 1984).

Ceci entretenait un sentiment de sécurité, or cette notion est de plus en plus mise en question et il devient nécessaire non seulement de protéger la ressource en « eau souterraine », mais aussi de surveiller toute détérioration de sa qualité.

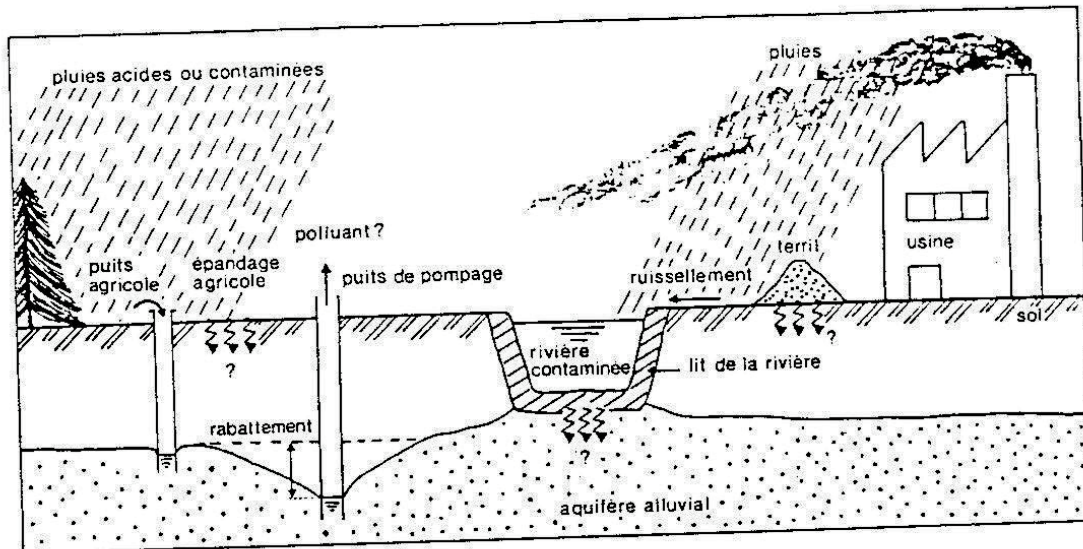


Fig. 31 : Diagramme des sources potentielles de pollution : le sol et le sous sol constituent-ils des barrières géochimique efficaces ?

2. Présentation de l'usine de mercure et mode d'extraction :

L'exploitation des gisements ISMAIL, M'RASMA I et II et GUENICHA situés à 6 Km de la ville de Azzaba wilaya de Skikda, qui ont servi de base à l'implantation du complexe mercuriel de Azzaba, dont les travaux ont été finalisés en 1971.

Le complexe mercuriel de Azzaba (CMA), qui a pour activité la production du mercure, utilise comme matière première du cinabre (HgS) et en consomme **65.000 tonnes/An**.

La production du mercure est de 20.000 potiches/An et une potiche pèse 34.5 Kg.

Les eaux industrielles utilisées pour cette production sont de l'ordre de 650 m³/j (utilisées en circuit fermé).

Concernant le procédé de fabrication, le minerai de cinabre (HgS) arrive par camions à la carrière, il est ensuite concassé avant de passer par les étapes suivantes :

- calcination du minerai dans le four à 800 °C, le mercure passe à l'état gazeux.
- Purification des gaz technologiques
- Concentration des vapeurs de mercure dans des colonnes de liquéfaction.

Après purification, le mercure est conditionné dans des potiches prêtes à l'emploi.

3. Pollution générées :

3.1 Pollution hydrique :

Le complexe ne dispose que de deux lacs de décantation (lacs naturels) non aménagés, d'un volume de 15.000 m³.

La capacité de traitement étant de 600 m³/j, le procédé de traitement consiste en la neutralisation décantation par le rajout de Na₂S.

A la sortie du processus, les eaux sont évacuées dans les deux lacs de décantation.

Lors des averses de pluies, les deux lacs débordent ; les eaux excédentaires sont rejetées dans l'oued Zebda, qui se déverse dans le confluent de l'oued Kébir, ce dernier se jetant directement en mer.

3.2 Pollution atmosphérique :

Le complexe de mercure de Azzaba génère une pollution atmosphérique dont nous ignorons l'ampleur. Les gaz rejetés sont :

- gaz à base d'azote
- gaz sulfurique
- gaz carbonique
- vapeurs de mercure
- vapeur d'eau

4. Evaluation des concentrations en mercure dans la région de Azzaba :

Afin de mettre en évidence l'impact de la pollution mercurielle sur l'environnement avoisinant l'usine de mercure, c'est-à-dire dans le bassin de l'Oued Kébir Ouest, une campagne de prélèvements et d'analyses a été effectuée dans la région.

4.1 Désignation des points de prélèvement :

Au total dix (10) points de prélèvements ont été effectués dans le réseau hydrographique de la région d'étude (Fig. 32).

Ces points ont été choisis dans l'Oued Zebda, Fendek, l'oued emchekel et l'oued kébir.

La désignation des ces points de prélèvements est comme suit :

- 1- lac de décantation N° 1
- 2- lac de décantation N° 2
- 3- oued zebda avant confluence avec les eaux excédentaires
- 4- oued fendek avant l'intersection avec l'oued zebda
- 5- oued fendek amont
- 6- oued fendek aval
- 7- oued emchekel
- 8- oued kébir (1 er point)
- 9- oued kébir (2 eme point)
- 10- source près de l'oued kébir (alimentant la population de Azzaba)

N.B : Les points de prélèvements sont disposés de façon à s'éloigner progressivement de la source de pollution (usine de mercure).

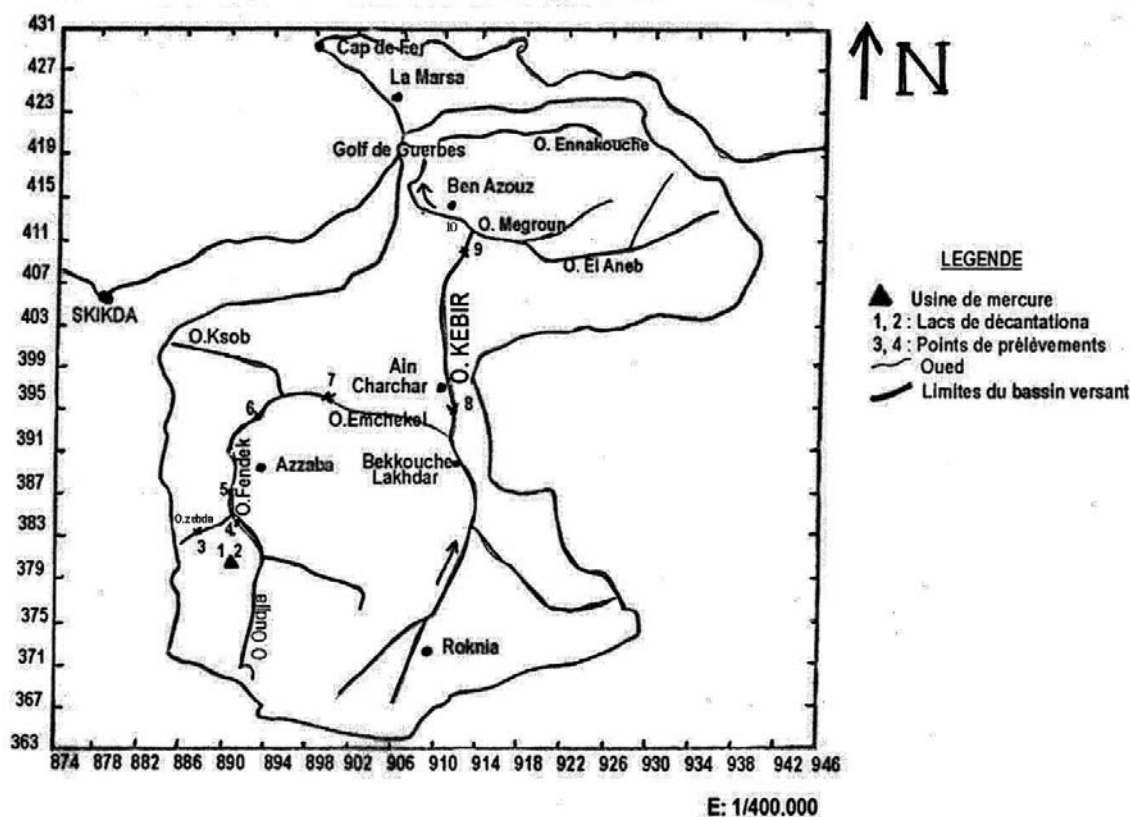


Fig. 32 : Désignation des points de prélèvements dans le réseau hydrographique

Durant cette campagne d'échantillonnage les éléments analysés sont : le Na, Ca, Mg, K, SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , Fer, Hg, pH, et la conductivité électrique (C.).

Nous signalons que le mercure a été analysé dans les sédiments à deux niveaux différents, dans une première tranche de 0 à 10 cm (HgS1) et dans une deuxième tranche de sédiments située entre 10 à 20 cm (HgS2).

L'interprétation des ces résultats d'analyses sera faite à l'aide de la méthode statistique analyse en composante principale (A.C.P).

Les statistiques élémentaires des paramètres analysés sont consignées dans le tableau 24.

	Na	Ca	Mg	K	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	Fe	Ph	C.	Hg	HgS1	HgS2
Min	27.9	37.5	4.96	6	34	0.33	0.04	0.20	7.3	369.5	0	0	0
Max	153	383.6	109.1	47.3	245.6	1.94	272.7	4040	8.3	2430	0.258	65.83	60.26
moy.	78.3	133.8	38.41	26.4	120.8	0.80	103.1	1208	7.9	1033	0.070	10.21	8.04
E-type	45	122.7	40.38	15.2	87.41	0.53	106.7	1876	0.3	777.4	0.097	21.97	18.80
Coeff. Var.	54.6	87.0	99.7	54.6	68.5	63.0	98.1	146.6	3.5	71.36	131.7	204.1	221.7

Tableau 24 : statistiques élémentaires des éléments dans les eaux de surfaces

Les résultats de ce tableau montrent que les éléments présentant une moyenne supérieure aux normes sont le mercure, le chlore le Fer et la conductivité électrique.

4.2 Matrice de corrélation :

	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Fe	pH	C.	Hg	HgS1	HgS2
Na ⁺	1.000												
Ca ⁺⁺	0.797	1.000											
Mg ⁺⁺	0.744	0.928	1.000										
K ⁺	-0.150	0.110	0.144	1.000									
SO ₄ ²⁻	0.905	0.676	0.519	0.238	1.000								
HCO ₃ ⁻	0.405	0.639	0.609	0.128	0.373	1.000							
Cl ⁻	0.910	0.724	0.643	0.130	0.964	0.388	1.000						
Fe	0.891	0.884	0.929	0.067	0.712	0.408	0.814	1.000					
Ph	0.267	0.546	0.578	0.093	0.172	0.602	0.252	0.354	1.000				
C.	0.835	0.973	0.959	0.019	0.676	0.680	0.740	0.911	0.624	1.000			
Hg	0.819	0.918	0.804	0.118	0.701	0.308	0.713	0.862	0.350	0.862	1.000		
HgS1	0.516	0.785	0.786	0.395	0.284	0.138	0.372	0.751	0.357	0.720	0.867	1.000	
HgS2	0.433	0.640	0.661	0.351	0.167	0.055	0.238	0.646	0.297	0.590	0.792	0.967	1.000

Tableau 25 : Matrice de corrélation

La matrice de corrélation met en évidence les éléments qui sont bien corrélés entre eux, à savoir :

SO₄²⁻-Na (0.905); Cl-Na (0.910); Fe-Na (0.891); Hg-Na (0.819); Mg-Ca (0.918); Fe-Mg (0.929); C.-Mg (0.959); Hg-Mg (0.804); Cl-SO₄ (0.964), Hg-Fe (0.862); Hg-C. (0.862) ; Hg-HgS1 (0.867); Hg-HgS2 (0.792); HgS1-HgS2 (0.967).

La contribution à la variance totale (%) exprimée par les axes principaux est : F1=62.8%, F2=16.0%, F3=10.9%, F4=5.4% et F5=2.5%.

4.3 Interprétation des résultats :

Le plan F1-F2 représentant 78.8% de l'inertie cumulée fait ressortir selon l'axe F1 (négativement) trois zones principales (Fig. 33)

La première regroupant le Na, Cl, HCO₃ et SO₄, la seconde zone regroupe la Ca, Mg, Fe, Hg et la conductivité ; quant à la troisième zone elle regroupe le HgS1 et le HgS2.

La première zone représente les éléments responsables du faciès chimique des eaux de surface, à savoir le sulfaté chloruré sodique et le sulfaté chloruré calcique.

La deuxième zone regroupe le Fer, le mercure et la conductivité avec le calcium et le magnésium.

La troisième regroupe le mercure dans les deux tranches de sédiments.

Donc pour le plan F1-F2 toute l'information est donnée par l'axe F1.

Le plan F1-F3 représentant 73.7% de l'inertie cumulée fait ressortir selon l'axe F1 le Ca, Mg et la conductivité, le HgS1 et le HgS2 ensembles et enfin le Hg et le fer ainsi que le faciès sulfaté et chloruré sodique.

Le plan F1-F4 (Fig. 34) représentant 68.2% de l'inertie cumulée fait ressortir le mercure dans les sédiments, le faciès chimique précité, ainsi que l'association Hg, Fe et la conductivité.

Le plan F1-F5 représentant 65.3% de l'inertie cumulée fait ressortir selon l'axe F1 l'association Hg, Fe, conductivité, ainsi que le faciès chimique des eaux de surfaces et l'association HgS1, HgS2.

La représentation des individus (Fig. 35) nous montre selon le plan F1-F2 que les individus se regroupent là aussi en trois groupes selon l'axe F1.

Le premier groupe est représenté par les points de prélèvements 1 et 2, le deuxième groupe est formé par les points 3 et 4 et le troisième groupe regroupe les points de prélèvement de 5 à 9.

Le premier groupe représente les deux lacs de décantations caractérisé par des teneurs importantes en mercure.

Le deuxième groupe quant à lui représente le point 3 de l'oued zebda avant la confluence avec les eaux excédentaires, et le point 4 de l'oued Fendek avant la confluence avec l'oued zebda.

Donc ces deux points sont sensés ne pas contenir du mercure provenant des eaux du processus.

Le troisième groupe regroupe les autres points respectivement situés dans l'oued Fendek et l'oued Kébir renferment aussi des valeurs importantes en mercure, mais de façon moindre par rapport aux deux lacs de décantations.

Le plan des individus F1-F3 est pratiquement identique au plan précédent.

Le point de prélèvement N° 10 représentant la source près de l'oued Kébir et alimentant la ville de Azzaba est individualisé tout seul dans les deux plans, à la limite du groupe 2 et du groupe 3.

Cette disposition à notre avis est en relation avec les teneurs en mercure en effet le groupe 3 contient des teneurs importantes en mercure, le groupe 2 n'est pas sensé contenir du mercure, mais les analyses ont montré que les deux points malgré situés en amont des eaux excédentaires contiennent du mercure. L'explication c'est que le mercure contenu dans les points de prélèvement 3 et 4 ne peut provenir que des retombées atmosphériques.

C'est pour cette raison que le point 10 représentant la source s'individualise tout seul en relation de la quantité de mercure très minime.

5. Conclusion :

Les résultats d'analyse ont révélés que les eaux superficielles sont contaminées par le mercure parfois en quantité importante.

La principale pollution causée par l'usine de mercure est essentiellement hydrique, du fait du débordement des eaux excédentaires des deux lacs de décantation du complexe de mercure de Azzaba dans l'oued Kébir.

Dans les eaux de l'embouchure (Guerbes), le mercure se trouve en trace en hiver et durant l'été la teneur enregistrée dépassait les $3\mu\text{g/l}$.

L'échantillonnage sur les sédiments nous a montré la contamination de ces derniers par le mercure, aussi bien pour la tranche de 0 à 10 cm que celle de 10 à 20 cm.

La pollution atmosphérique n'est pas à rejeter du moment que les points situés en amont de la source de pollution sont aussi contaminés par le mercure.

CERCLES DE CORRELATIONS

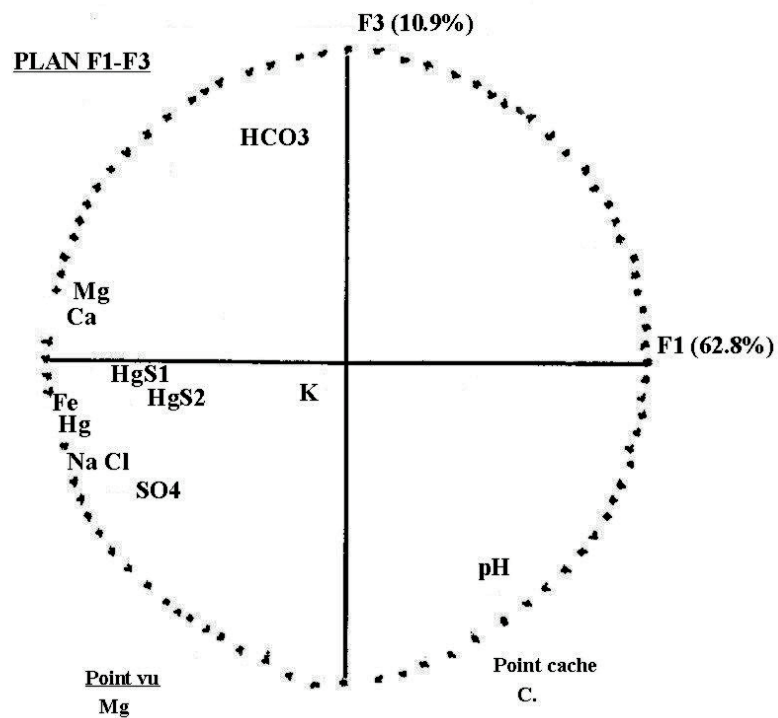
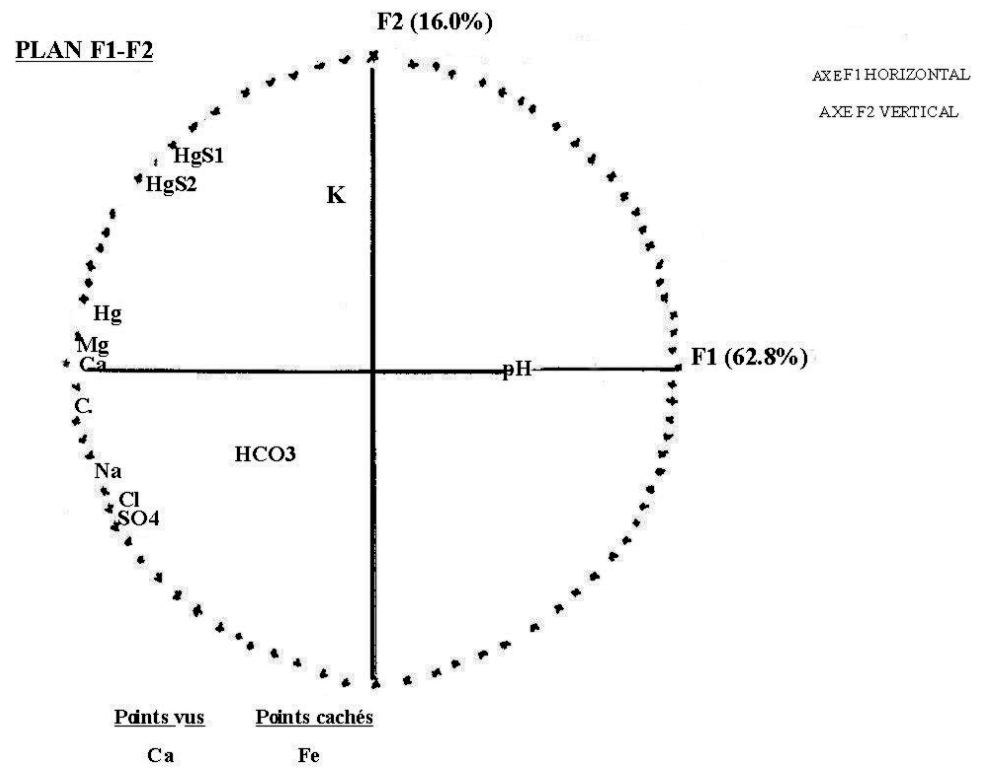


Fig. 33 : Cercles de corrélations

CERCLES DE CORRELATIONS

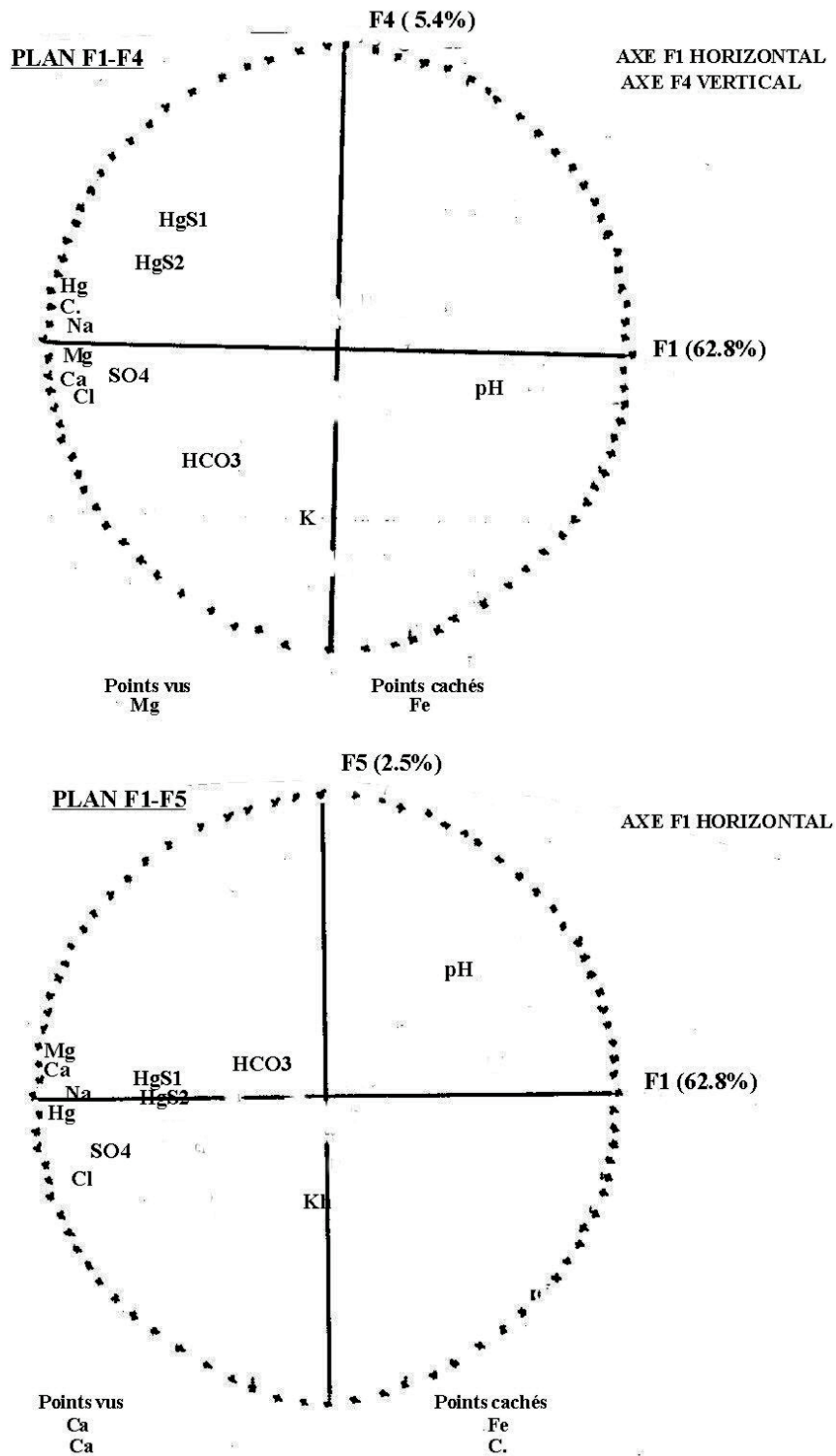


Fig. 34 : cercles de corrélations

REPRESENTATION DES INDIVIDUS

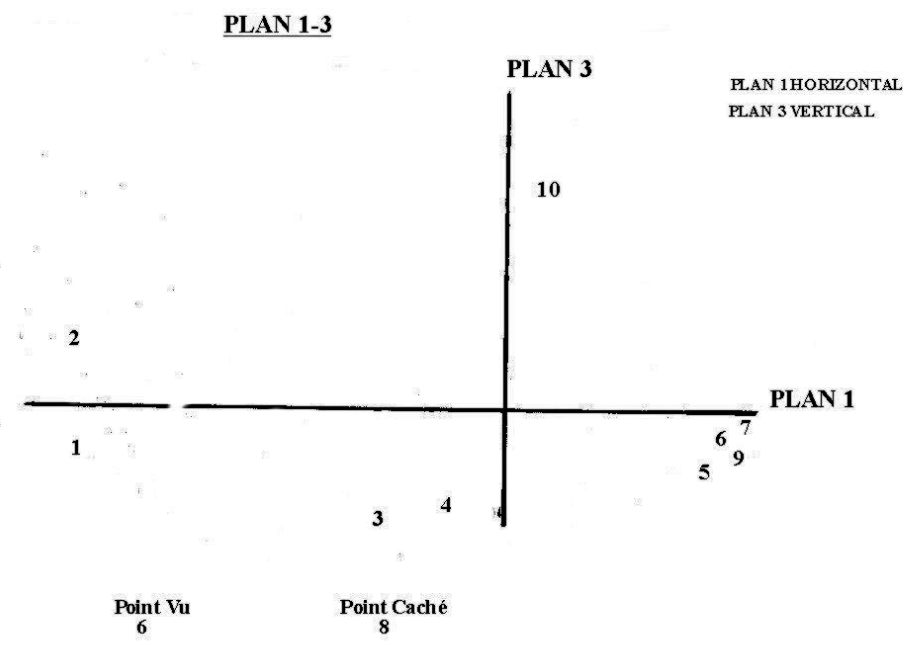
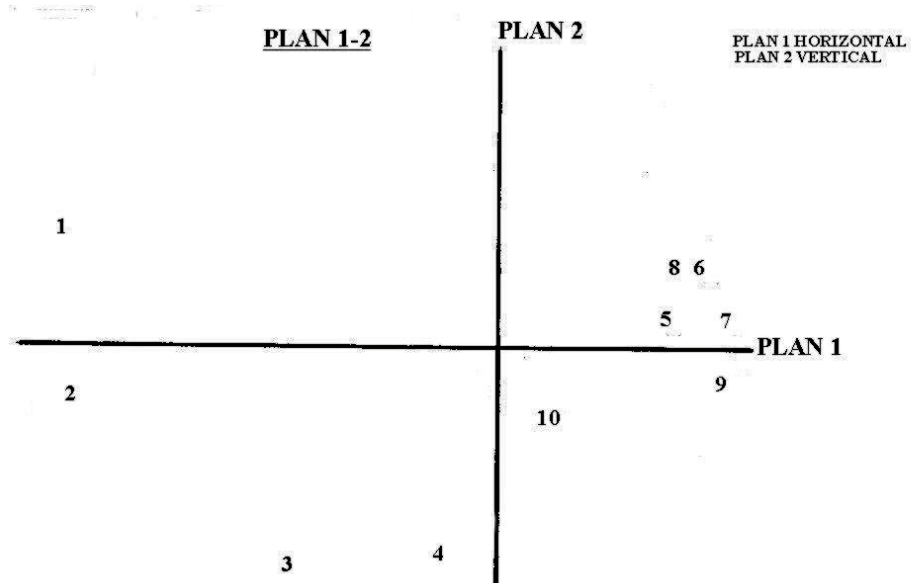


Fig. 35 : Représentation des Individus

6. Imprégnation de la population par le mercure inorganique

La concentration du mercure dans les urines semble être habituellement chez un sujet non exposé de l'ordre de 0.5 µg/L au maximum, bien que des valeurs nettement plus élevées aient été signalées, mais toujours inférieures à 25 µg/L (Buzina et al. 1989).

Un sujet normal excrète moins de 10 µg/J dans les urines et 10 µg dans les fèces (Langworth et al. 1992).

Le problème de la pollution par le mercure inorganique a fait l'objet de plusieurs études et publications dans le monde et en Algérie. La contamination par les vapeurs de mercure inorganique des travailleurs de l'usine de Azzaba est bien connue (Service de toxicologie du CHU Mustapha Alger, Service de Médecine du Travail du CHU de Annaba - Algérie) (Nezzal et al. 1994 ; Benhamza et al. 2006).

Le taux moyen de Hg urinaire inorganique chez les travailleurs de l'usine de mercure de Azzaba variait de 18 à 188 µg/G de créatinine en 1991 et de 8 à 886 µg/G en 1993. (Nezzal et al. 1996). Ces résultats témoignent d'une contamination mercurielle chez les travailleurs de l'usine, mais cette dernière n'a par contre à aucun moment été démontrée chez la population résidant autour de l'usine.

Pour vérifier cette contamination le projet de l'imprégnation mercurielle de la population résidant autour de l'usine de mercure a été décidé par les responsables du service médecine de travail du Centre Hospitalo-Universitaire d'Annaba.

Une démarche a été développée visant à vérifier l'hypothèse de cette contamination sur la population d'enfants scolarisés dans la région de Azzaba.

L'étude a porté sur un total de 88 travailleurs de l'usine, 354 enfants scolarisés dans la région de Azzaba, aux environs de l'usine de mercure (1 à 7 Km) et 124 enfants résidant dans la ville d'Annaba, à 80 Km de Azzaba, représentant une population témoin.

Pour le choix de l'âge des enfants scolarisés à Azzaba et Annaba concernés par cette étude, la moitié est en première année et l'autre moitié en sixième année primaire.

Le prélèvement consiste en un recueil des urines du matin au lever, dans un tube en verre, rempli au 2/3 pour éviter les bris au moment de la congélation. Le tube est remis la veille à l'élève qui le rapporte le lendemain matin.

Les échantillons sont codifiés, gardés dans un congélateur avant leur transport au laboratoire de toxicologie industrielle de Sider El-Hadjar (Annaba - Algérie) pour analyse, le délai entre le prélèvement et l'analyse n'a pas dépassé quinze jours.

L'analyse est faite selon la méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique (vapeur froide). Dans les échantillons biologiques, le mercure se trouve lié aux groupements thiols, le chlorure d'étain (SnCl₂) ajouté aux échantillons brise ce lien et réduit le mercure à l'état métallique. Les vapeurs

seront ensuite entraînées par un courant d'air jusqu'à une cellule placée dans le faisceau d'une lampe EDL de mercure. L'absorbance est proportionnelle à la concentration (Nixon et al. 1996).

La concentration de mercure dans les urines est corrigée par rapport à la créatinine urinaire.

La méthode d'analyse biologique est sensible au 1/100 µg/G de créatinine.

Les résultats des analyses sont consignés dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Hg urinaire inorganique en µg/G de créatinine chez les travailleurs de l'usine, les écoliers de Azzaba et d'Annaba.

Inorganic urinary Hg (µg.G⁻¹) of creatine within the plant workers and pupils of Azzaba and Annaba.

	Nombre	min	max	moy
travailleurs Azzaba	88	2	13924	650
Elèves Azzaba	354	0	17	2.49
Elèves Annaba	124	0	4	0.45

Les résultats des analyses montrent une moyenne élevée chez les travailleurs de l'usine de mercure (650 µg/G de créatinine), témoignant ainsi d'une forte imprégnation, le minimum est de 2 µg/G et le maximum de 13924 µg/G de créatinine.

La moyenne chez les enfants scolarisés d'Annaba est de 0,45 µg/G, avec un minimum de 0 et un maximum de 4 µg/G.

Les résultats chez les enfants scolarisés de Azzaba montrent que sur un total de 354 élèves, la moyenne en Hg urinaire inorganique est de 2,49 µg/G de créatinine, avec un minimum de 0 et un maximum de 17 µg/G.

Les symptômes de cette contamination mercurielle (Tableau 27) correspondants aux signes cliniques (tremblements, test à l'écriture, épreuve doigt nez), n'apparaissant d'habitude qu'à des taux de Hg supérieurs à 50 µg/G de créatinines inexistant chez les élèves d'Annaba, sont quand même marqués chez ceux de Azzaba et plus visibles chez les travailleurs de l'usine (O.M.S, 1980 ; Lauverys, 1992 ; Nezzal et al. ,1991).

Tableau 27 : Signes cliniques chez les travailleurs de l'usine, les écoliers d'Annaba et de Azzaba

Clinical signs within the plant workers and pupils of Annaba and Azzaba.

Signes Cliniques	Elèves Annaba (N = 124)	Elèves Azzaba (N = 354)	Travailleurs Usine (N = 88)
Tremblements	négatif	1.29 %	50 %
Test à l'écriture	négatif	0.41 %	50 %

7. Incidence directe sur la population de Azzaba :

Plusieurs cas d'avortement, de morts nés, de bébés prématurés et d'hypertrophie ont été recensés dans la ville de Azzaba et cela uniquement pour (06) six ans. (Tableau 28)

Divers cas	1989	1990	1992	1993	1994	1995
Avortements	160	192	160	144	102	
Morts nés	48	31	33	38	50	48
prématurés	30	37	12	15	15	15
hypotrophie	39	46	360	312	210	

Tableau 28 : Cas recensés sur la population de Azzaba

7. Conclusion

Les eaux souterraines de la zone mercurielle Nord Numidique présentent un faciès chimique dominant le bicarbonaté calcique en relation avec les roches réservoirs du Paléocène Eocène. Les faciès chloruré sodique et sulfaté calciques sont déduits de la composition des roches réservoirs de l'Oligocène.

Les eaux de la nappe profonde Paléocène Eocène sont des eaux dures à très dures.

Le calcul des coefficients de migration des éléments chimiques dans la zone Nord Numidique a montré que le mercure présente un coefficient de migration moyen (0.15) en fonction de la stabilité du Cinabre.

La classification des éléments en fonction de leur coefficient de migration montre que le Hg, Cu, et Pb de la région sont moins mobiles que les éléments chalcophiles Zn et (As-Sb).

Les roches calcaires et les grès carbonatés de la dorsale présentent des teneurs de fond en mercure très variables (0.9 à 1.5) ppm, par contre les grès et les argiles de l'Oligocène présentent des teneurs de 0.6 ppm.

Les teneurs élevées en Hg dans les eaux analysées, jusqu'à 80 µg /L sont retrouvées dans les puits captant l'Oligocène, alors que les eaux de la nappe Paléocène Eocène présentent des teneurs en Hg relativement faibles (< 7 µg/L).

La contamination de la nappe phréatique Oligocène n'est donc pas le résultat direct des formations présentant des faciès litho stratigraphiques à Clarke élevés en Hg.

Les teneurs en mercures retrouvées dans les eaux souterraines de la région sont très élevées et dépassent la norme de 1µg/L, témoignant ainsi d'une contamination de la nappe phréatique Oligocène.

L'imprégnation par le mercure inorganique des travailleurs de l'usine de Hg de Azzaba est indéniable. Chez les enfants scolarisés dans la région de Azzaba elle est faible mais constitue une réalité. Les teneurs en mercure urinaires chez ces enfants sont plus élevés, que chez ceux d'Annaba.

Les symptômes de cette contamination mercurielle, n'apparaissant d'habitude qu'à des taux de Hg inorganique supérieurs à 50 µg/G de créatinines inexistantes chez les écoliers d'Annaba, sont quand même visibles chez les élèves de Azzaba et plus marqués chez les travailleurs de l'usine de mercure.

Géochimie du mercure

1. Introduction

L'expansion et l'intensification des activités humaines sont à l'origine de l'accroissement et de la dispersion des polluants dans le milieu naturel. Cette dispersion peut s'effectuer dans l'atmosphère sous forme d'aérosols, de fumées, susceptibles de sédimenter ou de retomber avec les précipitations atmosphériques (pluies acides) ; par infiltration à partir de stockages de déchets, d'épandage de fertilisants ou de pesticides en agriculture ; par ruissellement à partir des stockages, ou par déversement direct dans les eaux de surface ; lors d'accidents au cours de manipulations.

Toutes ces sources de pollution constituent une menace pour l'environnement, et en particulier pour les ressources en eau. Cette menace est d'autant plus grave que, si la pollution d'une rivière est relativement vite décelée (ses effets étant le plus souvent visibles), celle d'une eau souterraine est plus longue à détecter.

Après le tarissement de la source de pollution et la mise en oeuvre des techniques d'assainissement, la qualité originelle de l'eau de surface est généralement retrouvée après un délai de l'ordre de quelques mois ; par contre, réduire le niveau de pollution d'un aquifère nécessite des dizaines d'années, quand la situation n'est pas irréversible.

Le sol a longtemps été considéré comme une barrière géochimique efficace, arrêtant les polluants dans leur transfert vers les aquifères. Ceci entretenait un sentiment de sécurité. Or cette notion est de plus en plus remise en question, et il devient nécessaire non seulement de protéger la ressource en « eau souterraine », mais aussi de surveiller toute détérioration de sa qualité.

Les différentes études menées pour mettre en évidence les modes de circulation des polluants d'un biotope à un autre à travers des sédiments, des sols ou des aquifères, ont eu recours à trois approches qui se sont avérées complémentaires :

à l'aide d'expérience sur le terrain, ou au laboratoire, ou à l'aide de méthodes physiques prenant en compte les interactions identifiées lors des expériences.

Notre étude est consacrée au cas d'un micropolluant métallique : le mercure. La notion de micropolluant est relativement complexe : elle exprime la toxicité en petites quantités (traces) d'un contaminant.

Il est plus courant de rencontrer dans la littérature le terme de « métaux lourds ». Nous le considérons cependant impropre non pas tant par sa dénomination que par l'emploi qu'il en est fait. Par définition les « métaux lourds » sont dans la classification de Mendeleïev, tous les métaux du groupe de transition allant du chrome au zinc, c'est à dire comprenant, outre ces deux éléments, le manganèse, le fer, le cobalt, le nickel et le cuivre. Or lorsque l'on lit les articles traitant de la

pollution due aux « métaux lourds », on constate très souvent qu'il est question entre autre du mercure, du cadmium, du plomb et même de l'arsenic...

C'est pourquoi nous préférons parler de « micropolluant métallique » ; ce terme beaucoup plus général éviterait certaines confusions.

La sensibilisation de l'opinion publique mondiale aux risques présentés par le mercure a été provoquée par les événements de Minamata au Japon en 1966.

Dans une population de pêcheurs se nourrissant essentiellement de poissons pêchés dans une baie fermée dans laquelle une usine chimique rejetait sans contrôle des dérivés mercuriels organiques, on avait enregistré 43 décès et de nombreux cas de malformations génétiques chez les nouveaux nés.

2. Rappels sur la géochimie du mercure

Le mercure, connu depuis l'antiquité est présent dans le milieu naturel: roches volcaniques, les combustibles fossiles, association avec certains minerais (blende et pyrite par exemple), le minerais de mercure (cinabre).

2.1 Propriétés physico-chimiques

Le mercure avec un poids atomique de 200.61 est le seul métal qui se trouve à l'état fluide à température ambiante, donc de présenter une tension de vapeur. De couleur métallique et avec une densité de 13.45 g/cm^3 , il se solidifie à la température -38.87°C , en cristallisant dans le système cubique. De tous les métaux, le mercure possède une grande pression de vapeur saturante, qui favorise son évaporation et la formation d'une atmosphère mercurifère.

Parmi tous les éléments chalcophiles, le mercure a le plus grand potentiel ionique (10.39), qui lui permet de passer à l'état atomique, c'est à dire réduit jusqu'à l'état métallique à partir des différents composés mercurifères

En plus des composés simples tels que nitrates, chlorures, sulfures et sulfates, le mercure forme une classe importante de composés métallo-organiques. Plusieurs composés organiques de mercure sont dissociés par des bactéries jusqu'à la formation de mercure élémentaire (Hg^0).

2.2 Origines du mercure

Des hypothèses très différentes sur l'origine du mercure sont avancées selon les auteurs. La présence, dans les régions étudiées, de roches magmatiques (ultra-basiques, basiques ou acides) et leur lien spatial éventuel avec la minéralisation mercurifère sont leurs principaux arguments. En leur absence, l'origine du mercure est reliée soit au métamorphisme, soit à des phénomènes

post-magmatiques (hydrothermaux), quand elle n'est pas supposée sédimentaire. Un résumé des différentes théories présentées par les auteurs est comme suit :

2.2.1 Origine magmatique

L'origine magmatique du mercure est avancée sur la base des analyses faites sur différentes roches magmatiques. Si des basses teneurs sont rencontrées dans les basaltes océaniques (30 ppb) et les enclaves d'éclogites des Kimberlites (pouvant renfermer les concentrations en mercure du manteau supérieur), dans les laves calco-alcalines des arcs insulaires, les teneurs sont plus élevées (100 ppb). Les formations mercurifères actuelles observées dans les îles Kouriles sont interprétées par G. Gorchkov (1967) comme étant le produit du dégazage du manteau supérieur, vu que les produits volcaniques dans ces îles sont des laves calco-alcalines du type arc insulaire.

« Cette évolution de la concentration en mercure laisse supposer dans certains cas la formation de chambres magmatiques enrichies en mercure » (Saukov et al., 1972).

F. Koutiev et al (1970) ont mis en évidence, dans les roches effusives, des globules de verre volcanique, remplies de mercure natif et d'inclusions gazeuses.

2.2.2 Origine sédimentaire

Pour la première fois cette hypothèse fut proposée par M. Mayer (1968). Il proposa que le mercure précipitait sous une forme soluble (Hg_2Cl_2), qui réagissant avec H_2S (provenant de la décomposition de la matière organique), se transformait en sulfure de mercure. Cette hypothèse fut beaucoup critiquée.

V.T. Sourgai et ses élèves proposèrent, pour ce mode de formation, une remobilisation du mercure contenu dans les roches par les eaux d'infiltration et hydrothermales (Saukov et al., 1972). Cette idée de remobilisation est aussi partagée par D. White, dans les régions volcaniques actives (White, Robertson, 1962 ; White, 1967).

2.2.3 Origine métamorphique

« Les données concernant le comportement du mercure lors des processus progressifs du métamorphisme, aussi bien régional que local, ne permettent pas de supposer une migration importante dans ces processus » (Saukov, Aydinian, Ozerova, 1972).

La question, c'est de connaître la possibilité d'une éventuelle remobilisation du mercure au cours du métamorphisme indépendamment de la nature de la roche initiale. Moiseyev (1971) proposa un modèle de remobilisation du mercure à

partir des roches, grâce au flux thermique causé par une intrusion en profondeur. « Le métamorphisme progressif des sédiments mésozoïques a expulsé les solutions minéralisées en mercure, qui ont migré dans les fractures des serpentinites et se trouvent exhalés à la surface ». C'est cette genèse qu'il proposa pour les gisements mercurifères Ouest californiens.

2.2.4 Origine téléthermale

En l'absence des roches magmatiques, certains gisements ont fait l'objet d'une interprétation téléthermale, où les facteurs essentiels contrôlant la minéralisation sont les failles régionales profondes limitant des structures régionales (type sillon), dont l'âge peut être antérieur à la minéralisation, mais qui ont été réactivées au cours des différentes périodes tectoniques ultérieures. Ces failles sont alors soit mantiques, soit en liaison avec des chambres magmatiques jusqu'aux structures locales. En Californie, K. Bostrom et D.E. Fisher (1969) ont montré que les élévations des teneurs en mercure par rapport au fond local dans les sédiments et au flux thermique tracent une faille profonde, à laquelle seraient associés les gisements mercurifères Californiens.

Le rôle important que joue ce type de failles dans les minéralisations mercurifères a été traité par (Saukov et al., 1972).

Dans ce cas, le mercure serait le produit de dégazage, soit du manteau supérieur, soit de masses magmatiques profondes. Son transport se ferait alors à l'état de vapeur Hg^0

3. Transport du mercure

Les complexes sulfurés alcalins ont longtemps été l'hypothèse la plus acceptable pour le transport du mercure dans les solutions. Ils ont fait l'objet de nombreuses expériences.

L'étude des sources hydrothermales actuelles dans les régions volcaniques montre que le mercure n'est pas toujours transporté sous cette forme. Les condensats des fumerolles des volcans actuels en activité, ainsi que les hydrothermes avec des concentrations élevées en mercure ($7 \cdot 10^{-5}$ - $1.3 \cdot 10^{-4}$ g/l), qui sont des solutions acides excluent la présence de complexes alcalins. Les résultats obtenus ont montré que la concentration de complexes sulfurés (HgS_2^-) est très faible et qu'ils ne peuvent être considérés comme forme de transport (mise en évidence de HCO_3 dans les inclusions de cinabre).

« Le caractère des altérations hydrothermales comme l'argilisation, l'alunitisation et la kaolinitisation, prouve le caractère acide (même s'il n'est pas très prononcé) des solutions minéralisantes ». (Saukov et al. 1972).

D'autres auteurs proposèrent un transport sous forme d'halogénures : Hg_2Cl_2 ou $(\text{Ca}, \text{Hg})\text{F}$ (Strunz, 1964 ; Helgeson, 1967 ; Sourgai, 1967 ; Moissejev, 1968 ; in Saukov et al., 1972).

Un transport colloïdal fut proposé par J.P. Pollock en 1944, et repris plus tard, surtout pour expliquer les formations actuelles de cinabre et métacinabre du volcan Mendeleev. « Les structures collomorphes du minerai ne démontrent pas nécessairement un transport sous cette forme, surtout que les solutions colloïdales sont connues pour leur faible mobilité » (Saukov et al., 1972).

Dans les travaux de M. Widmer et G. Schwarzenbach (1963), Barnes et al. (1967), il a été démontré que dans les solutions acides contenant de l' H_2S , le cinabre se dissout avec la formation principalement de complexes hydrosulfatés $\text{Hg}(\text{HS})_2(\text{H}_2\text{O})_2^0$; $\text{Hg}(\text{HS})\text{H}_2\text{O}^-$; $\text{Hg}(\text{HS})_4^{2-}$

Les travaux de I.L. Khodakovski et al. (1979) sur la variation de solubilité de HgS en fonction de la concentration dans les solutions de Na et de NaOH , montrent que de tous les anions complexes possibles dans les solutions, les ions $\text{HgS}_2(\text{H}_2\text{O})_2^{2-}$; $\text{HgS}(\text{HS})(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})^-$ ou $\text{Hg}(\text{HS})_2(\text{OH})_2^-$ doivent prédominer. Ces dernières années (1982), E.P. Efremova, V.A. Kouznetsov et N.D. Chikina montrèrent que l'ion HgS_2^{2-} prédomine où des $\text{pH} > 11.4$ et que dans la solution avec un pH peu acide ou proche de la neutralité l'ion prédominant est $\text{HgS}(\text{HS})^-$ ou $\text{HgS}(\text{HS})_2^-$ (pour une grande concentration en NaHS).

La forme gazeuse de transport du mercure est probablement aussi importante. L'enrichissement de la phase gazeuse par du mercure est mis en évidence dans les régions volcaniques actives actuelles, où se poursuit la formation d'une minéralisation de Hg, de Sb et As. Les différents arguments soutenant cette hypothèse sont :

1. la présence du mercure natif dans les globules de verre volcanique (Koutiev et al., 1970) ;
2. association du mercure à des cristaux de soufre exhaltif à sulfure Bank (White, Robertson, 1967) ;
3. inclusions de cinabre dans ces cristaux de soufre (White et al., 1967) ;
4. formation simultanée de S et HgS à la sortie des fumerolles (volcan Mendeleev) ;
5. formation de cristaux de cinabre dans les vides et pores des roches, dans des champs de solfatares ;
6. à une température $> 500^\circ\text{C}$, le mercure à l'état de vapeur diffuse même à travers le verre» (Khairtdinov, 1971) ;
7. la formation de vapeurs de Hg au dessus des gisements.

Nous pouvons donc supposer que les gaz contenant du mercure n'accompagnent pas uniquement les solutions minéralisantes mais représentent aussi une forme individuelle de transport en plus de la forme ionique complexe,

avec un pH peu acide ou proche de la neutralité. Probablement, c'est sous cette forme que se fait la migration du mercure des profondeurs de la terre.

Les processus hypergénèse conduisent à la décomposition de certains minéraux, qui se traduit par une migration relative de certains éléments tels que : Zn - As - Sb - Mo et partiellement Hg. D'autres éléments plus mobiles migrent pour enrichir les sols en Ca, Na, Mg, Cl et sulfates. Dans les limites des gisements concernés, les eaux atmosphériques sont faiblement acides (pH 5 - 5.5), avec un enrichissement en ions sulfates, Zn - Pb - Hg et Sb. Les éléments indicateurs extérieurs de ce milieu acide sont la présence de roches intensivement altérées en rouge lie-de-vin, et le lessivage des minerais mercurifères et polymétalliques.

L'estimation de la mobilité des éléments chimiques dans les différentes conditions superficielles a été réalisée par le calcul du coefficient de migration par l'eau.

4. Répartition du mercure dans l'environnement et le rôle de la géologie sédimentaire (J.P. Vernet et R.L. Thomas)

Ce paragraphe a pour but de faire *le point* sur nos connaissances sur le problème du mercure dans l'environnement, en présentant une revue synthétique de la bibliographie à notre disposition.

La découverte du processus de méthylation du mercure au sein des sédiments a changé la relation mercure environnement, en faisant apparaître le rôle primordial des sédiments dans le cycle géochimique de cet élément. C'est cet aspect du problème qui a particulièrement retenu l'attention des auteurs. Grâce à l'étude des sédiments, il est possible de déterminer les sources de la pollution et d'établir un bilan des quantités déversées.

Ces dernières années, l'attention des chercheurs s'est portée sur les effets du mercure et de ces composés sur l'environnement, du fait de l'apparition de nombreux cas d'empoisonnement par cet élément. Ces accidents sont dus aux rejets, intentionnels ou non, du mercure dans le milieu naturel par l'industrie ou l'agriculture. L'utilisation toujours plus intensive du mercure par notre société industrielle implique une sérieuse menace pour la santé et le bien être de l'homme.

4.1 Sources du mercure

Le mercure est introduit dans le milieu naturel à partir d'une grande variété de sources et suivant des mécanismes aussi nombreux que variés. On peut cependant distinguer deux grandes classes:

- le mercure naturel provenant de l'environnement géologique.
- le mercure industriel résultant de l'activité humaine.

- Le mercure naturel est un produit de l'altération des roches et des zones minéralisées, de la dégradation des sols et des émanations volcaniques. N'oublions pas que le mercure est volatil dans les conditions régnant sur le globe terrestre. Ce dernier va constituer le niveau de base d'une « pollution naturelle ». Du fait de ces origines, la teneur naturelle en mercure des sédiments, des eaux et des organismes d'une région sera très variable en fonction de l'environnement géologique.

- Le mercure résultant des activités humaines provient de domaines aussi divers que l'accélération des processus d'érosion, l'industrie minière et pétrolière, les rejets de l'industrie chimique, le dépôt ou, pire encore, l'incinération des ordures ménagères qui volatilise de grandes quantités de cet élément.

4.1.1 Mercure naturel

La concentration moyenne de mercure dans les roches est généralement basse, elle est de l'ordre de 50 ppb (1). Les roches ignées ultra-basiques ou alcalines semblent avoir la plus forte teneur en mercure; par contre, les teneurs des roches métamorphiques sont particulièrement faibles alors que les roches sédimentaires montrent une concentration extrêmement variable (tableau). Parmi les sédiments, les plus fortes valeurs en mercure sont atteintes dans les schistes riches en matières organiques alors que les plus faibles se trouvent dans les roches carbonatées, les grès grossiers et les évaporites (à quelques exceptions près). Les bitumes et les asphaltes présentent un grand enrichissement en Hg (Tableau 30).

La concentration en mercure des charbons est très variable puisqu'elle fluctue de 10 à 8530 ppb selon Jonasson et Boyle [1971].

Les teneurs en mercure des sols sont basses, généralement comprises entre 20 et 150 ppb, mais elles peuvent être considérablement augmentées par minéralisation.

Les concentrations moyennes du mercure dans l'air et l'eau, faisant l'objet du tableau 29, ont été rassemblées par Jonasson et Boyle [1971].

Description	Intervalle	moyenne
A. Eaux (ppb)		
Eau de pluie.....	0,05 - 0,48	0,2

Eau des mines de charbon (bassin du Donnet, URSS).....	1 - 10	
Eaux des rivières et des lacs.....	0,01 - 0,1	0,03
Eaux des rivières au voisinage des gisements de mercure.....	0,5 - 1 0,03 - 5,0	0,2
Océans et mers.....		
Sources d'eaux chaudes et certaines eaux minéralisées.....	0,01 - 2,5 0,01 - 0,10	0,10 0,05
Eaux des nappes phréatiques.....		
Eaux des nappes phréatiques et des eaux des mines au voisinage des gisements de sulfures métalliques.....	1 - 1000 0,1 - 1230	
Eaux des champs pétroliers et eaux salines.....	2 - 10	
B. Air (ng/m³)		
Atmosphère.....	30 - 1600	
Air au dessus des gisements de mercure.....	100 - 9600	
Exhalations volcaniques.....		

Tableau 29 Teneur en mercure des eaux et de l'air
(En ppb et en nanogramme : ng = 10⁻⁹ grammes par mètre cube)

En ce qui concerne les teneurs en mercure dans l'atmosphère, les hautes valeurs sont enregistrées dans les zones industrielles, alors que les valeurs basses sont au dessus des océans (0.5). L'air au dessus des gisements de mercure est très variable.

Tableau 30 : Teneur en mercure des roches, sédimentaires meubles, sols et dépôts

glaciaires en (ppb).

Description	Intervalle	Moyenne
A. <u>Roches ignées</u>		
Roches ultrabasiqes (dunites, kimberlite, etc.).....	7 - 250	168
Roches basiques intrusives ((gabbros).....	5 - 84	28
extrusives (basaltes, etc.).....	5 - 40	20
Roches intermédiaires		
intrusives (diorites, etc.).....	13 - 64	38
extrusives (andésites, etc.).....	20 - 200	66
Roches acides		
Intrusives (granite, syénite, granodiorite, etc.	7 - 200	62
extrusives (rhyolite, trachyte, etc.	2 - 200	62
Roches riches en alcalis (néphéline, syénite, phonolite, etc.)	40 - 1400	450
(origine des données: massifs de Khibina et de Loverzo	en U.R.S.S.	
B. <u>Roches métamorphiques</u>		
Quartzites, etc.	10 - 100	53
Amphibolites.....	30 - 90	50
Cornéenne.....	35 - 400	225
Schistes cristallins.....	10 - 1000	100
Gneiss.....	25 - 100	50
Marbre, dolomie, etc.	10 - 100	50
C. <u>Roches sédimentaires et sédiments meubles</u>		
Sédiments récents des rivières et ruisseaux.....	10 - 700	73
Sédiments récents des lacs.....	10 - 700	73
Sédiments récents des océans.....	<10 - 200	100
Grès, arkose, conglomérats, etc.	10 - 300	55
Schistes, marnes.....	5 - 300	67
Schistes calcaires, schistes bitumineux, etc.	100 - 3250	437
Calcaire, dolomie, etc.	<10 - 220	40
Evaporites, gypse, anhydrite.....	<10 - 60	25
halite, sylvine, etc.	20 - 200	30
D. <u>Sols et dépôts glaciaires</u>		
Sols courants.....	20 - 150	70
Moraines, argiles, sable, etc.	20 - 100	50
Sols, moraines, etc., au voisinage des dépôts de mercure, de sulfures, etc.	25000	
Remarque: 1 ppb (part par billion) correspond à 0,001 ppm, soit 1 nanogramme/kg		

4.1.2 Mercure d'origine industrielle

La consommation mondiale totale de mercure a été estimée à environ 9090 tonnes en 1968 (D'Itri, 1971). On a calculé le taux annuel d'augmentation de la consommation mondiale en mercure et cela sur la période de 10 ans se terminant en 1968. Ce taux est de 0,7 %. A ces chiffres, nous devons ajouter l'émission dans l'atmosphère de mercure volatilisé lors de la combustion de combustibles fossiles et l'on a estimé cette part incontrôlable de la pollution de notre environnement à 630 tonnes.

En 1968, les USA ont utilisé 2590 tonnes de Hg, soit environ 30% de la consommation mondiale. Les principales utilisations font l'objet du tableau 31.

Industries	Consommation (tonne)	Pourcentage
1. Appareils électriques	681	26,0
2. Instruments de contrôle industriels	275	10,6
3. Usage général en laboratoire	69	2,6
4. Electrolyse de la saumure.	591	23,1
5. Manufacture de peintures.	365	14,4
6. Agriculture	118	4,6
7. Laboratoire dentaire	106	4,1
8. Catalyses	66	2,5
9. Industrie du papier	15	0,6
10. Pharmacie et cosmétique	14	0,5
11. Amalgamation	9	0,3
12. Divers	285	11,0

Tableau 31 : Principales utilisation du mercure

1. Industrie de l'appareillage électrique:

C'est surtout pour la fabrication des batteries que le mercure est utilisé ; elles ont une teneur en mercure de l'ordre de 8 % (Wood, 1972). Après utilisation, les batteries usées sont jetées à la poubelle et, soit lentement par altération dans un dépôt d'ordure, soit rapidement par incinération, le mercure est volatilisé et pollue l'atmosphère. Ajoutons que ces industries électriques utilisent aussi le mercure dans la fabrication de lampes ou tubes électriques, dans les contacteurs, etc.

2. Les industries d'instruments de contrôle:

En 1968, aux USA, environ 11 % de la consommation servait à ces industries diverses de pompes, relais, interrupteurs, etc.

3. Utilisation diverse dans les laboratoires:

Toujours selon les données américaines de 1968, ces divers types d'utilisation ont consommés 2,6 %. Ce sont d'une part des appareils spéciaux et courants tels que les pompes à diffusion, les baromètres, les manomètres, thermomètres. Dans ce type sont classés tous les laboratoires d'hôpitaux où les pertes les plus importantes sont celles de sels de mercure utilisés lors des préparations histologiques.

4. Industrie chimique:

L'utilisation d'une cathode de mercure pour l'électrolyse de la saumure et la production du chlore et de la soude caustique représente 23 % de la consommation des USA en 1968, soit environ 700 tonnes par an. Dans ce chiffre D'Itri [1971] a fait la part des pertes de mercure dans le milieu naturel en prenant une valeur moyenne de perte par tonne de chlore produit et il a abouti à un perte annuelle dans l'environnement de 450 tonnes en 1968. Sur la base de calcul similaires Cooke et Beitel [1971] admettent une perte de 90 tonnes par année au Canada.

La plus grande partie du mercure perdu par ces industries qui utilisent l'électrolyse pour fabriquer du chlore et de la soude caustique est introduit dans notre environnement par les eaux. Ce qui a un effet prononcé sur la faune et la flore notamment la teneur en mercure des poissons est particulièrement élevée, comme cela a pu être démontré par Bligh [1971] pour les eaux polluées du Canada ; les poissons de toutes les régions du Canada où est implantée une industrie d'électrolyse de la saumure, ont une teneur en mercure de 0,5 ppm (mg/kg) ce qui est le maximum autorisé pour la consommation par les normes en Amérique du Nord.

5. L'industrie de la peinture:

En 1968, ces industries ont utilisé 14 % de la consommation annuelle des USA. Ce sont principalement des composés organo-mercuriels qui sont employés comme bactéricides et fongicides pour préserver les peintures, comme algicides dans les peintures marines (antifouling).

6. Agriculture:

Aux USA l'agriculture ne représente que 4,6 % de la consommation annuelle, en 1968 de mercure.

Quoique quantitativement les utilisations agricoles soient relativement faibles, elles sont dangereuses car le mercure et ses composés parviennent directement à notre environnement. Ce sont principalement des fongicides pour traiter les semences, les arbres et leur feuillage.

7. Laboratoires dentaires:

Toujours durant cette année 1968, 4,1 % de la consommation totale du mercure aux USA ont été utilisés dans la préparation dentaire. En Suède, Hanson [1971] estime que la consommation annuelle est de l'ordre de 15 à 20 tonnes. Le mercure est l'un des amalgames avec l'argent, l'étain et le cuivre. Une grande partie de cet amalgame est rejetée dans les égouts et contribue à la pollution de l'environnement.

8. *Catalyse:*

La même proportion, soit 4,1 % de la consommation annuelle des USA, a servi à la préparation des sels pour la catalyse, en particulier pour la fabrication de produits du genre des chlorures de vinyle.

9. Industrie du papier:

Qui fabriquent le papier, comme bactéricide pour empêcher le développement des micro-organismes dans les pâtes de fibres de bois. En effet, ces bactéries produisent des décolorations et des zones de faiblesses dans le produit fini.

Aux USA, la part de la consommation 1968 pour cet usage est seulement de 0,6 % mais dans les décennies précédentes l'utilisation du mercure dans l'industrie fut beaucoup plus élevée. Relevons aussi qu'une partie du mercure contenu dans la pâte de papier provient du traitement à la soude caustique qui, renferme environ 5 ppm de mercure à la suite de l'électrolyse que nous avons déjà décrite [Flewelling, 1971]. Malheureusement, notre société de consommation brûle les papiers usagers et volatilise dans le milieu naturel un tonnage élevé de mercure. La récupération des papiers est l'un des remèdes possibles, mais un papier ne peut actuellement être réutilisé que deux fois d'où une destruction inévitable à terme.

10. L'industrie pharmaceutique et des cosmétiques:

Les composés de mercure utilisés dans ces industries le sont pour la plupart des antiseptiques, par exemple, le mercurochrome, ou pour la conservation des cosmétiques, des savons, etc. La part de la consommation annuelle des USA durant l'année 1968 ne fait que 0,5 %, mais tout ce mercure est directement rejeté dans le milieu naturel.

11. Amalgamation:

L'amalgamation est un des procédés d'extraction de l'or de ses minerais. Cela représente 0,35 % de la consommation américaine en 1968. L'ennui de ce procédé réside dans le fait qu'une fois l'amalgame d'or achevé on recueille l'or par volatilisation du mercure en procédant par chauffage, et la récupération est souvent défectueuse. Il faut 32,2 grammes de mercure par once d'or, soit par 28,35 g. [Wise, 1966].

L'amalgamation du sodium dans l'électrolyse de la saumure a déjà été décrite.

12. *Divers:*

On estime à plus de 3000 ces différents usages [Hanson, 1971], et aux USA ils ont représenté 11 % de la consommation en 1968.

Il est donc impossible de les citer en détail ; cependant les principaux usages sont : la conservation des bois, le tannage des cuirs, la photographie, ect. On a estimé que la quantité de mercure volatilisé lors de la fonte des minerais était de l'ordre de 3000 à 18000 tonnes [D'Itri, 1971] ; ce calcul est basé sur une teneur moyenne du minerai de 3 à 20 ppm de mercure.

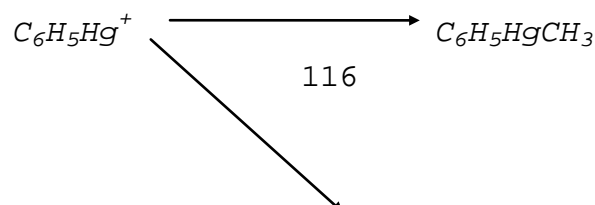
Cette rapide revue des principales sources de pollution au mercure montre des rejets directs et indirects dans notre environnement, mais il ne fait aucun doute que la teneur de cet élément par notre milieu naturel a augmenté fortement durant la dernière décennie.

Ainsi l'on constate la pollution rapide du milieu aquatique due principalement selon Jonasson [1970] à l'accélération de l'érosion, aux haldes de mines et aux dépôts de débris d'origine urbaine et industrielle. Une chose reste cependant bien certaine : les rejets de mercure dans l'environnement augmentent en fonction de l'accroissement de la consommation mondiale et tôt ou tard ce mercure parvient dans le milieu naturel.

4.2 Cycle géochimique du mercure

La figure 36 donne la conception des auteurs sur le cycle géochimique de cet élément en tenant compte des sources de pollution dues aux activités humaines [Jonasson et Boyle, 1971]

La seule différence qui existe entre le mercure résultant de l'activité humaine et le mercure d'origine naturelle réside dans la forme chimique sous laquelle il se présente, mais à terme, le mercure provenant de ces deux sources participera de la même façon au cycle géochimique.



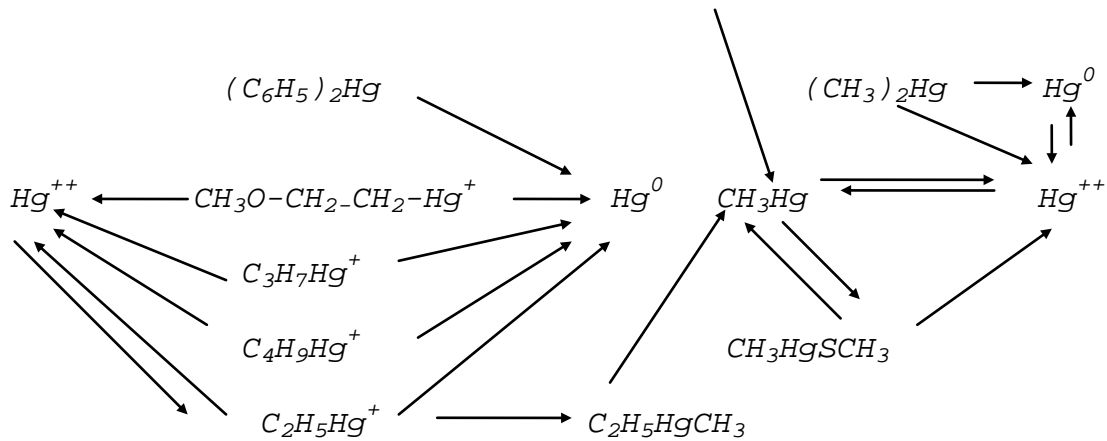


Fig.36: Cycle géochimique du mercure

Le mercure naturel vient de l'altération des roches contenant cet élément. Dans la plupart des cas, il se trouve sous la forme de cinabre, de métacinabre, de mercure natif, pyrite, stibine, réalgar, soufre natif et de carbonate [Jonasson et Boyle, 1971].

On peut le trouver aussi associé à des sulfures métalliques avec des concentrations de 10 - 30 parts par million (ppm).

Lors de l'altération météorique, le mercure entre dans la composition des sols, dans les sédiments des rivières et des lacs. Etant généralement sous la forme de cinabre ou de mercure natif, il est relativement stable et ne s'oxyde que lentement durant la phase de l'altération ; il arrive donc sous la forme de fines particules dans les sols et les sédiments.

Une oxydation lente apparaîtra selon les conditions de pH et de Eh des sédiments. Au point de vue chimique, le mercure résultant des processus d'altération se présente sous les trois formes suivantes:

Hg^0 mercure élémentaire

Hg^{++} ion mercurique

Hg_2^{++} ion mercureux

La forme Hg^0 est relativement soluble (6×10^{-5} g/l) dans les conditions naturelles. La solubilité des formes ioniques est très variable en fonction des anions à disposition, du pH et du Eh du milieu. Le mercure en milieu aqueux se rencontre aussi sous les formes suivantes: sulfate, nitrate, hydroxyde, chlorure, une grande variété de complexe ammoniacaux, organiques et des chélates organiques [Jonasson et Boyle, 1971].

La précipitation du mercure dans le milieu aqueux est obtenue par l'adsorption sur de fines particules inorganiques (colloïdes de fer et de Mn,

minéraux argileux et des sulfures) et par adsorption et / ou chélation avec des constituants chimiques [Jonasson et Boyle, 1971].

Les principales formes de mercure résultant de l'activité industrielle parvenant en milieu aqueux sont selon Jernalov [1969]:

1. Mercure métallique Hg^0électrolyse, instruments, laboratoires, hôpitaux, dentistes.
2. Mercure inorganique divalent Hg^{++}électrolyses
3. Phényl-mercure $\text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}^+$peintures, papiers
4. Méthyl-mercure CH_3Hg^+agriculture, chlorure de vinyle (ex. pollution de la baie de Minamata au Japon)
5. Alkoxy-alky-mercure $\text{CH}_3\text{O-CH}_2\text{-Hg}^+$agriculture

Dans les conditions normales de potentiel redox des ruisseaux et rivières, le mercure natif (Hg) s'oxyde lentement et prend la forme ionique de Hg^{++} qui est nécessaire pour la méthylation aérobie. Par contre le mercure peut être méthylié directement par les bactéries anaérobies. La transformation en phényl-mercure et méthyl-mercure est une importante étape du cycle de mercure dans le milieu aquatique. **Relevons l'importance de la conversion en mercure métallique divalent car c'est sous cette forme que le mercure peut être absorbé par les particules organiques ou inorganiques, transporté par les courants et sédiments.**

Si le mercure des sédiments se trouve principalement sous la forme divalente, il est prêt à être méthylié et à être transformé dans la chaîne alimentaire.

Le diméthyl-mercure est très volatil et suivant les conditions de pH du milieu une partie s'échappe du milieu aquatique pour rejoindre l'atmosphère où, par photolyse, il est transformé en mercure natif et retombera sur la terre avec les précipitations atmosphériques.

De cette manière, le mercure introduit dans un environnement aquatique peut être dispersé géographiquement par la voie des airs et réintroduit dans le cycle par la pédosphère.

Le mercure est l'un des éléments les plus mobiles de notre environnement. On peut considérer ces différents cycles comme un mouvement général du mercure vers l'océan et ces sédiments. Il en résulte une pollution des zones côtières, de ses poissons, comme c'est actuellement le cas en Suède, et des teneurs en mercure de certains poissons comme les thons, les espadons et les cétaqués [Bligh, 1971].

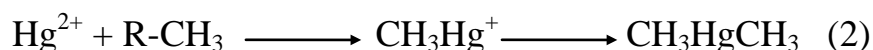
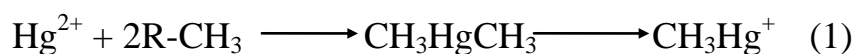
Le mécanisme le plus important est la méthylation du mercure qui fait passer cet élément du sédiment à la biosphère.

5. Méthylation du mercure

Jusqu'à très récemment, il était admis que le mercure métallique introduit dans l'environnement se stockait dans les sédiments sans effets gênants. C'est la découverte de Jensen et Jernalov [1967,1968 et 1969] **démontrant que l'activité microbienne pouvait transformer le mercure métallique du sédiment en ses formes organiques hautement toxiques de mono- et diméthyl-mercure, composés organiques du mercure qui entrent d'une part directement dans la chaîne alimentaire et, d'autre part, sont très volatils.** Il en résulte que, dès cette découverte, le problème de la pollution par le mercure a pris une nouvelle dimension et l'étude des sédiments une importance considérable.

Jernalov [1968] effectua une série d'expériences en aquarium avec des sédiments à teneurs contrôlées en Hg et des poissons. Il arrive aux conclusions suivantes:

1. Que le mercure soit dans la nature sous sa forme élémentaire, sous celle d'ions Hg divalent, de phényl-mercure ou d'alkoxy-alkyl-mercure, il peut toujours être transformé en méthyl-mercure ;
2. La méthylation du mercure dans les sédiments peut se faire tant dans les conditions aérobiques qu'anaérobiques ;
3. La méthylation est le résultat d'une action microbienne ;
4. La méthylation microbienne du mercure peut produire soit le mono-, soit le diméthyl-mercure selon le schéma suivant:



La formation de l'un ou de l'autre dépend du pH. Dans un milieu acide on aura un mono alors qu'en conditions alcalines ce sera du diméthyl-mercure. Ce dernier est très volatil et plus ou moins rapidement il va quitter le milieu aquatique et gagner l'atmosphère. Jernalov [1970] explique de cette façon que les poissons d'un milieu alcalin contiennent moins de méthyl-mercure que ceux d'un milieu acide.

5. La teneur en mercure des poissons ne peut pas directement être comparée aux teneurs de l'eau ou des sédiments [Jernalov, 1970, et Wood, communication orale]. Il a été suggéré par Jernalov [1970] et démontré par Wood [1972] que ce qui contrôle la présence du méthyl-mercure dans la chaîne alimentaire, c'est l'activité microbienne dans le sédiment. La grande solubilité du méthyl-mercure fait qu'il abandonne immédiatement le sédiment pour gagner le milieu aquatique libre, la chaîne alimentaire ou l'atmosphère.

6. Le mercure lié au sédiment ne peut être totalement et rapidement transformé en méthyl-mercure. Jernalov [1969] admet qu'il faut une période de 10 à 100 ans.

7. Sur la base de ces expériences. Jernalov [1969] estime que la teneur en méthyl-mercure des poissons augmente dramatiquement quand la teneur en mercure du sédiment varie de 1 à 10 ppm.

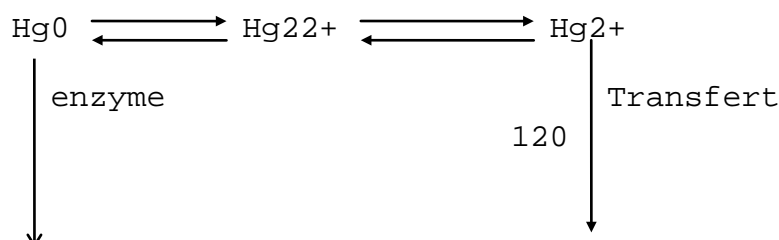
8. Le mercure des sulfures ne peut être méthylé par l'activité bactérienne s'il n'y a pas auparavant une étape d'oxydation.

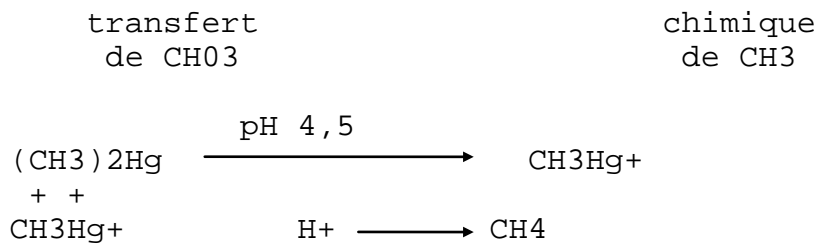
5.1 La méthylation chimique

Wood et ses collaborateurs [1968, 1971 et 1972] ont étudié une voie chimique de transformation du mercure en méthyl-mercure. Pour cela ils ont utilisé comme (donneur) la vitamine B₁₂ qui cède son groupe méthyl. Cette méthyl-cobalamine se retrouve pratiquement dans tous les sédiments, aussi bien en milieu aérobie qu'en milieu anaérobie. Il y'a donc une relation entre la teneur en B₁₂ du sédiment et sa population bactérienne et l'on peut donc dire [Wood, 1972] que la méthylation est une fonction de la densité microbienne du sédiment.

5.2 La méthylation enzymatique

Dans les conditions anaérobies Hg²⁺ se réduit en Hg⁰ et suivant sa concentration en di- ou mono-méthyl-mercure, suivant le schéma général suivant proposé par Wood.





Deux importants facteurs de notre environnement résultent de ces études:

1. N'importe quelle bactérie capable d'effectuer la synthèse de la méthylcobalamine (vitamine B₁₂) pourra méthyler l'ion mercurique (Hg²⁺) dans les conditions aérobiques et le mercure élémentaire dans les conditions anaérobiques. L'ion mercurieux (Hg₂²⁺) n'est jamais méthylé.

2. La quantité de méthyl-mercure libérée du sédiment est une fonction directe de sa teneur en vitamine B₁₂ et de ce fait une fonction de sa population de bactéries et de leur activité.

5.3 Méthylation et eutrophisation des lacs

La productivité d'un lac augmente en fonction des apports de fertilisants et corollairement sa biomasse et son eutrophisation croissent. De ce fait la matière organique résultant de la mort des organismes est plus abondante dans les sédiments, ce qui a pour effet d'accroître l'activité bactérienne et par conséquent la méthylation du mercure. Ainsi l'accentuation de l'eutrophisation va agir jusque dans la teneur en Hg du poisson de nos lacs. Selon Wood une teneur de 0,3 ppm de Hg dans les sédiments d'un lac dont l'eutrophisation est avancée donne dans la chaîne alimentaire une teneur de 0,5 ppm dans les poissons. Ainsi la teneur en Hg du sédiment est une valeur indispensable, mais l'abondance de la faune bactérienne est tout aussi importante.

La leçon que l'on doit tirer de ce qui vient d'être exposé est que non seulement il faut éliminer les rejets de mercure dans le milieu aquatique, mais parallèlement réduire au minimum et contrôler l'eutrophisation de l'écosystème, surtout si celui-ci a précédemment été pollué par le mercure et ses composés.

Il devient évident que la détermination des teneurs en mercure des sédiments et des poissons dans les lacs doit être entreprise immédiatement. De même qu'il serait judicieux de développer un modèle pour pouvoir prédire l'évolution et l'eutrophisation d'un lac et cela sur la base de données comme les données de mercure par exemple.

Aussi pour conclure on tient à citer ces lignes de Wood [1972] : «...il est vrai que l'augmentation des rejets de composés de carbone, d'azote et de phosphore dans les eaux a accru leur activité bactérienne. Lorsque ces micro-

organismes sont en présence de mercure ils peuvent par désintoxication, régénérer leur propre environnement aux dépens du nôtre. L'avenir des micro-organismes semble important. Pour nous, il est temps de prendre conscience de ce problème avant que la situation soit irrémédiable.»

6. Rôle des sédiments

Tout ce qui vient d'être dit montre que le sédiment joue un rôle clé dans le cycle du mercure dans l'environnement. Ce rôle peut se résumer comme suit:

1. Les fines particules organiques et inorganiques du sédiment encore en suspension servent de sites d'adsorption pour les ions mercuriques divalents. De cette façon le mercure est transporté, dispersé et déposé avec des sédiments.

2. Les sédiments du fond enrichis en mercure, renferment plus ou moins de matières organiques suivant le degré d'eutrophisation du lac. Ces sédiments sont donc un excellent milieu de culture de bactéries aérobiques ou anaérobiques. C'est le siège de la méthylation du mercure.

Malheureusement très peu de travaux ont été effectués sur les sédiments et ceux qui existent ont été faits par des chimistes

6.1 Teneur en mercure des sédiments

Les résultats récoltés faisant l'objet du tableau N° 24 montrent que les teneurs en mercure deviennent très variables et que la teneur augmente au voisinage de la source.

Les valeurs élevées n'ont été trouvées qu'au voisinage immédiat des sources industrielles de pollution et plus on s'éloigne de ces zones plus la dispersion et la dilution dans le système aquatique fait décroître ces concentrations. Il est non seulement possible, mais particulièrement indiqué d'utiliser les déterminations dans les sédiments comme méthode de recherche des sources de pollution [Vernet et Thomas, 1972a].

Lorsqu'une industrie polluante cesse ses décharges dans le milieu aquatique, les sédiments contaminés restent encore longtemps une source de pollution pour l'environnement. La dispersion se fait selon deux modes de transport:

1. Les transports de type physique se font en fonction des crues, de la variation de vitesse et d'énergie de l'agent de transport, de la fluctuation du niveau des eaux et des conditions météorologiques.

2. Les transports de type physico-chimiques sont liés à la transformation des composés de mercure en ions Hg bivalent qui est adsorbé par les particules fines et transporté dans les rivières avec les matières en suspension.

Ce deuxième type de transport semble être le plus important mécanisme de dispersion du mercure. Une étude très récente sur une rivière de Nouvelle-Ecosse, au Canada, a montré que les sédiments en suspension contenaient de 10 à 30 fois plus de mercure que les sédiments du fond [Cranston et Buckley, 1972].

Les valeurs sont les suivantes : 0,12 à 1,06 ppm pour les sédiments du fond et 2,04 à 34,40 ppm pour les matières en suspension. Les auteurs en ont conclu que le mercure parvient à la rivière sous forme soluble, que rapidement les ions sont adsorbés par les particules en suspension et que seul le solde entre en contact avec les sédiments du fond.

6.2 Association sédiments mercure

Malheureusement on n'a pas jusqu'à maintenant de méthodes pour déterminer et localiser sans erreur possible sous quelle forme se trouve le mercure dans le sédiment.

L'association du mercure avec les fines particules est bien connue et a déjà été décrite.

Jonasson [1970] a suggéré que le mercure était fixé dans les sédiments de la façon suivante:

1. Par absorption cationique ou adsorption par co-précipitation à la surface des oxydes de fer ;
2. Adsorption irréversible du mercure à la surface des sulfures;
3. Entre pH 3 et 6, formation d'un complexe stable d'humate et de mercure sous forme ionique ;
4. Liaison par covalence avec des composés sulfo-organométalliques ;
5. Adsorption par les minéraux argileux.

7. Décontamination des zones polluées par le mercure

Un certain nombre de mesures peuvent être prises pour rompre le cycle géochimique du mercure et accélérer ainsi la régénération du milieu aquatique [Jernalov, 1969, 1970]:

1. Elimination des sédiments par dragage,
2. Changement du pH,
3. Précipitation sous forme de sulfures,
4. Couverture du sédiment par un matériau inerte.
5. Réduction de l'activité bactérienne afin de diminuer la vitesse de méthylation.

7.1 Dragage :

Cette méthode est actuellement l'objet de recherche tant au point de vue technique qu'économique. L'utilisation de sédiments dragués et l'impact du

dragage sur l'environnement lacustre doivent être parfaitement connus avant que cette solution « remède » puisse être utilisé.

7.2 pH :

La création de solutions alcalines dans le milieu lacustre va favoriser la formation de méthyl-mercure qui est particulièrement volatil et dont une partie gagnera l'atmosphère alors qu'une autre restera dans la biomasse en se transformant en monométhyl-mercure. C'est donc une méthode de dispersion puisque le mercure accumulé dans une zone restreinte va être éparpillé sur la totalité du globe. Il est certain que la restauration du système lacustre prendra plus de temps que le cas précédent.

7.3 Précipitation sous forme de sulfures :

L'amélioration du milieu lacustre par cette méthode est pratiquement impossible du fait qu'il est nécessaire de rendre artificiellement la milieu réducteur ce qui détruirait la qualité de l'eau, donc son usage. Car même dans les conditions fortement réductrices, le mercure lié aux matières organiques peut toujours être méthylé par les bactéries.

7.4 Couverture par un matériau inerte :

C'est une variante de l'accroissement de la sédimentation. Une telle technique a de nombreux désavantages par rapport au processus normal de la sédimentation:

a) Une telle couverture ne peut être maintenue dans des conditions d'eau peu profondes telles qu'une rivière ou un lac où les sédiments sont exposés, continuellement ou périodiquement, à des turbulences ou une érosion considérable.

b) Une couverture de sédiments va rapidement créer dans leur masse des conditions réductrices. Or si les sédiments sont riches en matières organiques, il se produira des concentrations de gaz d' H_2S ou de CH_4 qui amèneront des ruptures locales de la couverture.

7.5 Réduction de l'activité bactérienne:

Procédé déjà discuté lorsque nous avons établi la relation d'interdépendance entre l'activité bactérienne et l'eutrophisation du milieu lacustre

8. Les grandes lignes de la question des empoisonnements par le

mercure :

Il n'est pas possible dans ce paragraphe de donner d'abondants détails sur la toxicologie des composés du mercure. Cependant il est nécessaire de rappeler les points principaux.

8.1 Caractéristique des empoisonnements par le méthyl-mercure

Le méthyl-mercure est un composé non polaire qui peut franchir les barrières sang cerveau et sang placenta. Ce composé de Hg a un temps de demi-vie de 70 jours dans le corps humain.

L'intoxication par le méthyl-mercure peut, suivant la dose absorbée, causer des lésions cérébrales et même la mort. Les premiers symptômes peuvent apparaître plus de trois mois après la contamination. Les symptômes de l'empoisonnement par le méthyl-mercure sont maintenant bien connus (Minamata Disease):

1. Fatigue excessive,
2. Maux de tête,
3. Sentiment général de faiblesse,
4. Incapacité de se concentrer,
5. Amnésie,
6. Engourdissement et picotements de la bouche, de la langue, des lèvres, des mains, des doigts, des pieds et des orteils),
7. Ataxie comprenant une maladresse générale (difficultés d'expression, allure mal assurée, perte de la coordination des mouvements et des changements dans les réflexes).

Dans les cas d'atteinte grave, on constate une diminution du champ visuel puis finalement une vision en tunnel, la perte de la parole des troubles de l'ouïe, de brusques changements émotifs caractérisés par des colères ou des dépressions, une perte progressive du contrôle musculaire pouvant atteindre la paralysée et finalement amener la mort de l'individu.

Les enfants nés de mères qui ont été exposées à la contamination par le méthyl-mercure présentent des retards dans leur développement mental et des troubles cérébraux allant même jusqu'aux convulsions. Dans la plupart des cas connus la mère n'avait jamais présenté le moindre symptôme d'intoxication par le méthyl-mercure (Harada 1968).

L'intoxication peut se faire fœtus peut se faire durant une période de 3 à 4 ans après que la mère ait été « empoisonnée » (Bakulina 1968).

8.2 Epidémie d'empoisonnement par le mercure :

En 1949, une fabrique d'engrais, la Shin-Nihon Chisso Hiryo Compagny, commence à produire du chlorure de vinyl et de l'acétaldéhyde par le moyen da

la transformation catalytique de l'acétylène. Le mercure rejeté dans les canalisations est déversé directement dans la mer de Shiranni. En 1950, on change et l'on déverse alors dans la rivière de Minamata ou les effets du méthyl-mercure commencent à se faire sentir et graduellement le taux de mercure monte dans les poissons et les mollusques de cette baie. Comme la population environnante tire une part importante de sa nourriture de la mer, un grand nombre de personnes commencent à être empoisonnées.

Dès 1953 on observe des cas toujours plus nombreux d'une maladie qui affecte le système nerveux central. Vers 1956, cela prend des allures d'épidémie et les chercheurs de l'université de Kumamoto établissent, au début de 1957, la relation entre la consommation de poissons pêchés dans la baie et la maladie. On décrète alors l'interdiction de consommer les produits de la baie de minamata. La cause de cette maladie le méthyl-mercure, est finalement découverte en 1959.

Depuis 1953, 126 cas d'empoisonnement sont décrétés comprenant 19 enfants atteints de déficiences congénitales par leurs mères ayant consommé des poissons contaminés et 46 cas de décès de personnes adultes sont enregistrés. Durant l'année 1965, une épidémie comparable à celle de minamata apparaît à Niigata (Japon). Il en résulte 26 cas d'empoisonnement et 5 décès.

En 1956, plus de 100 personnes firent hospitalisées à Mosoul en Iraq après avoir consommé des semences de froment traitées avec du Granosan. Il y eut 14 décès.

En 1960, le cas se répète avec les fermiers du centre de l'Iraq et 221 patients sont reçus à l'hôpital de Bagdad. Il y eut un nombre de décès indéterminé, mais 22 corps purent cependant être examinés et leurs organes renfermaient une forte teneur de mercure.

Au Guatemala en 1965, 45 cas d'empoisonnement par des composés organo-mercuriels sont enregistrés avec 20 décès (Ordonez et al. 1966).

Finalement en Iraq une nouvelle épidémie apparaît au printemps 1972 faisant apparemment plusieurs centaines de victimes.

8.3 Conclusion

Dans une certaine mesure, il est vrai que le problème du mercure n'est pas, jusqu'à maintenant, une atteinte directe à la santé des hommes. Si les cas d'empoisonnement sont souvent dramatiques, ils se soldent par un nombre restreint de décès.

Les changements que doivent apporter à leur mode de vie les populations riveraines des zones contaminées sont maintenant bien connus en Suède et en Amérique du Nord. Dans certaines de ces régions, la pêche commerciale est interdite et si la pêche sportive est admise, on recommande cependant de ne pas consommer le poisson capturé.

Dans le domaine minier, si l'exploitation des ressources naturelles en mercure est aussi une accélération du processus d'érosion. L'incidence la plus grave

réside dans le fait que le mercure extrait va augmenter le tonnage de cet élément dans le cycle géochimique d'où il ne peut plus être éliminé.

Le seul mécanisme actuellement connu pour décontaminer une région est un mécanisme de dispersion. Mécanisme qui ne résoud le problème qu'à l'échelle locale puisque le mercure ainsi dispersé va contribuer à la pollution générale de notre monde.

L'accroissement continu de l'utilisation industrielle du mercure a pour conséquence une exploitation toujours plus intense des ressources minières et une élévation graduelle de la quantité de cet élément dans l'environnement. Nous pensons que les rejets désastreux de mercure dans les milieux confinés tels que les lacs et les oueds pourront être totalement éliminés avec le temps. Par contre, l'accroissement général et insidieux de cet élément dans l'environnement à l'échelle mondiale va continuer et constitue un risque inconnu pour l'avenir.

CONCLUSION GENERALE

Les gisements de mercure de la région de Azzaba occupent une position géologique déterminée et peuvent être regroupés en champs miniers. Le champ minier d'Ismail regroupant les trois gisements de Ras-El-Ma, Ismaïl et Guénicha, ayants pour horizon porteur de la minéralisation des conglomérats-brèches calcaires, datées de l'Hyprésien-Lutétien, chevauché par les alternances de siltites et grès du Lutétien-Priabonien, qui forment la couverture de la minéralisation.

Le champ minier de Mra-Sma, qui regroupe les gisements de Mra-Sma I, Mra-Sma II et Koudiat-Sma et a pour horizon porteur les pseudo-brèches calcaires du Campanien et les grès du Néocomien, chevauchés par les schistes du Paléozoïque.

La série numidienne, commune à ces deux champs miniers, forme la couverture des « nappes ».

Les données climatiques étudiées ont permis de conférer de Azzaba un climat sub-tropical méditerranéen caractérisé par une saison humide longue s'étalant du mois d'Octobre jusqu'à la fin d'Avril et par une autre saison sèche courte qui va de Mai à Septembre.

La région de Azzaba reçoit en moyenne une précipitation annuelle de 740,4 mm/an avec une température moyenne annuelle de 18.5 C°

Le déficit agricole dans la région correspondant à 401,9 mm représente 54.28 % des précipitations.

L'évapotranspiration réelle est de l'ordre de **495,6** mm représentant 66.93 % des précipitations.

La combinaison des deux méthodes de résistivité et de Gamma naturelle, a permis de bien différencier les grès des argiles, car les couches de grès sont caractérisées par une résistivité relativement grande de l'ordre de 50-150 Ohm.m (en fonction de leur porosité et la qualité des eaux qu'ils contiennent), et une faible intensité des rayons Gamma naturels et vis versa pour les argiles.

On note une très bonne corrélation entre la méthode Gama ray et de résistivité, cette dernière nous a permis de déterminer les épaisseurs des couches des différentes formations avec précision.

La polarisation spontanée (PS) nous a indiqué sur les couches poreuses (potentiel négatif).

Le gamma ray est utilisé pour repérer les argiles quand la P.S ne donne rien.

On note la complémentarité des différentes méthodes utilisées.

Nous remarquons sur les log composites élaborés la bonne corrélation des informations obtenues par les différents enregistrements et les données de forages.

Les différentes méthodes ont permis d'établir pour les formations décelées une fourchette de variation de la résistivité électrique et de la radioactivité.

L'analyse qualitative des diagraphies nous a permis d'estimer la variation des différents paramètres physiques des formations traversées par les forages.

Du point de vue hydrogéologique les deux horizons pouvant présenter un intérêt d'ordre aquifère sont représentés par les grès de l'Oligocène et les calcaires fissurés du Paléocène -Eocène.

La région d'étude est caractérisée par deux complexes aquifères ayant des charges piézométriques très proches : le complexe aquifère des dépôts de l'Oligocène et celui du Paléocène-Eocène.

Ces deux complexes sont séparés par les roches imperméables du Paléozoïque et du Lutétien-Priabonien.

Sur les terrains avoisinants, situés au Nord Est, on trouve un autre horizon aquifère dans les alluvions récents.

Les essais de pompages réalisés pour estimer les paramètres de capacité et de filtration des dépôts de l'Oligocène et du Paléocène - Eocène ont montré que pour la nappe Oligocène, d'après les données des pompages isolés les coefficients de transmissivité varient dans de larges limites. Les valeurs maximales varient entre 11,7 et 8,9 m²/j et la valeur minimale est de 3,6 m²/j.

Sur le plan hydrodynamique le complexe aquifère des dépôts du Paléocène-Eocène constitué par les roches fissurées et karstiques, représente un système hétérogène avec une (double porosité), c'est à dire un milieu irrégulier fissuré avec deux systèmes (et plus) de fissures différemment remplies ; le réseau dense de micro fissures et de micro cavernes.

Les coefficients de transmissivité d'eau calculés d'après les données de pompage et de rétablissement coïncident pratiquement. Les valeurs varient dans les limites de 6,3 à 7,0 m²/j (données de pompage) et de 4,6 à 6,6 m²/j (données de rétablissement).

Contrairement aux coefficients de transmissivité les paramètres de capacité sont caractérisés par une dispersion importante des valeurs, ce qui est typique pour les couches à forte fissuration. Les coefficients de diffusivité varient de 5,6.10³ à 3,2.10⁵ m²/j (données de rabattement).

Les coefficients d'emménagement varient de 1,2.10⁻³ à 4,2.10⁻⁵ et de 0,7.10⁻³ à 3,5.10⁻⁴ respectivement pour les données de pompage et de rétablissement.

Les eaux souterraines de la zone mercurielle Nord Numidique présentent un faciès chimique dominant le bicarbonaté calcique en relation avec les roches réservoirs du Paléocène Eocène. Les faciès chloruré sodique et sulfaté calciques sont déduits de la composition des roches réservoirs de l'Oligocène.

Les eaux de la nappe profonde Paléocène Eocène sont des eaux dures à très dures.

Le calcul des coefficients de migration des éléments chimiques dans la zone Nord Numidique a montré que le mercure présente un coefficient de migration moyen (0.15) en fonction de la stabilité du Cinabre.

La classification des éléments en fonction de leur coefficient de migration montre que le Hg, Cu, et Pb de la région sont moins mobiles que les éléments chalcophiles Zn et (As-Sb).

Les roches calcaires et les grès carbonatés de la dorsale présentent des teneurs de fond en mercure très variables (0.9 à 1.5) ppm, par contre les grès et les argiles de l'Oligocène présentent des teneurs de 0.6 ppm.

Les teneurs élevées en Hg dans les eaux analysées, jusqu'à 80 µg /L sont retrouvées dans les puits captant l'Oligocène, alors que les eaux de la nappe Paléocène Eocène présentent des teneurs en Hg relativement faibles (< 7 µg/L).

La contamination de la nappe phréatique Oligocène n'est donc pas le résultat direct des formations présentant des faciès litho stratigraphiques à Clarke élevés en Hg.

Les teneurs en mercures retrouvées dans les eaux souterraines de la région sont très élevées et dépassent la norme de 1µg/L, témoignant ainsi d'une contamination de la nappe phréatique Oligocène.

L'interprétation thermodynamique en utilisant la simulation de la concentration des ions majeurs sous l'effet de l'évaporation isotherme (25 °C), par le logiciel thermodynamique « PhreeqC » en termes d'équilibres sels/solution a montré que les eaux de la région sont sous saturées par rapport à la halite, ce qui provoque la dissolution en entraînant un enrichissement des eaux en sodium et en chlorures.

Concernant le gypse et l'anhydrite, les eaux sont en équilibre dans la majeure partie des points analysés, sauf pour les points présentant le faciès sulfaté calcique et où les eaux sont sursaturées, entraînant une précipitation sous forme de gypse et d'anhydrite.

Les eaux de la région sont en équilibre vis à vis de la calcite dans les gisements de Guenicha et MraSma, par contre dans les autres gisements les eaux sont sursaturées en calcite, surtout dans le gisement d'Ismail où les faciès des eaux sont sulfaté calcique et bicarbonatés calcique, entraînant ainsi une précipitation sous forme de calcite.

Les eaux de la région sont sursaturées en Aragonite et en dolomie dans tous les points analysés, entraînant ainsi la précipitation des éléments carbonatés sous forme d'aragonite et surtout sous forme de dolomie.

Les résultats d'analyse ont révélés que les eaux superficielles sont contaminées par le mercure parfois en quantité importante.

La principale pollution causée par l'usine de mercure est essentiellement hydrique, du fait du débordement des eaux excédentaires des deux lacs de décantation du complexe de mercure de Azzaba dans le réseau hydrographique.

La pollution atmosphérique n'est pas à rejeter du moment que les points situés en amont de la source de pollution sont aussi contaminés par le mercure.

L'imprégnation par le mercure inorganique des travailleurs de l'usine de Hg de Azzaba est indéniable. Chez les enfants scolarisés dans la région de

Conclusion générale

Azzaba elle est faible mais constitue une réalité. Les teneurs en mercure urinaires chez ces enfants sont plus élevées, que chez ceux d'Annaba.

Les symptômes de cette contamination mercurielle, n'apparaissant d'habitude qu'à des taux de Hg inorganique supérieurs à 50 µg/G de créatinines inexistantes chez les écoliers d'Annaba, sont quand même visibles chez les élèves de Azzaba et plus marqués chez les travailleurs de l'usine de mercure.

L'Incidence directe sur la population de Azzaba Plusieurs a montré cas d'avortement, de morts nés, de bébés prématurés et d'hypertrophie ont été recensés dans la ville de Azzaba.

Input file: C:\Documents and Settings\User\Mes
documents\MICROPOLLUANTS.pqi
Output file: C:\Documents and Settings\User\Mes
documents\MICROPOLLUANTS.pqo
Database file: C:\Program Files\USGS\Phreeqc Interactive 2.8\phreeqc.dat

Reading data base.

SOLUTION_MASTER_SPECIES
SOLUTION_SPECIES
PHASES
EXCHANGE_MASTER_SPECIES
EXCHANGE_SPECIES
SURFACE_MASTER_SPECIES
SURFACE_SPECIES
RATES
END

Reading input data for simulation 1.

DATABASE C:\Program Files\USGS\Phreeqc Interactive 2.8\phreeqc.dat
SOLUTION_SPREAD

	Ca	Mg	Na	K	C(4)	Cl	S(6)	pH	Pb	Cu
Zn	143	22	110	3.5	450	140	68	6.9	0.007	0.003
0.07	32	30	45	5.4	152	90	35	7.8	0.008	0.008
0.08	222	45	84	17	311	156	505	8	0.06	0.002
0.01	208	53	85	19	250	184	524	7	0.06	0.002
0.01	50	61	41	35	372	89	37	8.9	0.004	0.002
0.04	165	46	68	5.7	518	53	158	7.5	0.06	0.002
0.01	120	79	67	10	297	78	104	7.5	0.08	0.002
0.08	50	61	41	3.5	372	89	37	7	0.03	0.20
0.06	88	32	68	3	298	150	45	7	0.03	0.30
0.06	104	29	46	1.6	311	120	34	7.8	0.02	0.02
0.20	138	31	67	13	300	120	50	7	0.02	0.02
0.20										

Beginning of initial solution calculations.

Initial solution 1.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	4.500e-001	4.500e-001
Ca	1.430e-001	1.430e-001
Cl	1.400e-001	1.400e-001
Cu	3.000e-006	3.000e-006
K	3.500e-003	3.500e-003
Mg	2.200e-002	2.200e-002
Na	1.100e-001	1.100e-001
Pb	7.000e-006	7.000e-006
S(6)	6.800e-002	6.800e-002
Zn	7.000e-005	7.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	6.900
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.986
Ionic strength	=	5.296e-001
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	3.975e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	4.500e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-2.298e-001
Percent error, $100 \cdot (\text{Cat} - \text{An}) / (\text{Cat} + \text{An})$	=	-27.20
Iterations	=	11
Total H	=	1.114047e+002
Total O	=	5.707312e+001

-----Distribution of species-----

Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma
H+	1.651e-007	1.259e-007	-6.782	-6.900	-0.118
OH-	1.248e-007	7.840e-008	-6.904	-7.106	-0.202
H2O	5.551e+001	9.859e-001	1.744	-0.006	0.000
C(4)	4.500e-001				
HCO3-	3.147e-001	2.168e-001	-0.502	-0.664	-0.162
CaHCO3+	6.114e-002	4.212e-002	-1.214	-1.375	-0.162
CO2	5.510e-002	6.225e-002	-1.259	-1.206	0.053
MgHCO3+	8.861e-003	6.514e-003	-2.053	-2.186	-0.134
NaHCO3	7.537e-003	8.515e-003	-2.123	-2.070	0.053
CaCO3	1.829e-003	2.066e-003	-2.738	-2.685	0.053
CO3-2	3.586e-004	8.077e-005	-3.445	-4.093	-0.647
MgCO3	1.752e-004	1.979e-004	-3.757	-3.704	0.053
NaCO3-	1.429e-004	1.050e-004	-3.845	-3.979	-0.134
Zn(CO3)2-2	4.336e-005	1.267e-005	-4.363	-4.897	-0.534
ZnHCO3+	1.690e-005	1.243e-005	-4.772	-4.906	-0.134
ZnCO3	6.494e-006	7.336e-006	-5.188	-5.135	0.053
PbCO3	3.528e-006	3.986e-006	-5.452	-5.399	0.053
Pb(CO3)2-2	2.768e-006	8.087e-007	-5.558	-6.092	-0.534
PbHCO3+	6.652e-007	4.891e-007	-6.177	-6.311	-0.134

Ca		1.430e-001				
	CaHCO ₃ ⁺	6.114e-002	4.212e-002	-1.214	-1.375	-0.162
	Ca ⁺²	5.899e-002	1.523e-002	-1.229	-1.817	-0.588
	CaSO ₄	2.104e-002	2.377e-002	-1.677	-1.624	0.053
	CaCO ₃	1.829e-003	2.066e-003	-2.738	-2.685	0.053
	CaOH ⁺	2.692e-008	1.979e-008	-7.570	-7.704	-0.134
	CaHSO ₄ ⁺	2.384e-008	1.753e-008	-7.623	-7.756	-0.134
Cl		1.400e-001				
	Cl ⁻	1.400e-001	8.958e-002	-0.854	-1.048	-0.194
	ZnCl ⁺	1.493e-007	1.098e-007	-6.826	-6.960	-0.134
	PbCl ⁺	1.378e-008	1.013e-008	-7.861	-7.995	-0.134
	ZnCl ₂	9.114e-009	1.030e-008	-8.040	-7.987	0.053
	ZnCl ₃ ⁻	1.408e-009	1.035e-009	-8.852	-8.985	-0.134
	PbCl ₂	1.273e-009	1.438e-009	-8.895	-8.842	0.053
	ZnCl ₄ ⁻²	1.590e-010	4.646e-011	-9.798	-10.333	-0.534
	PbCl ₃ ⁻	1.392e-010	1.023e-010	-9.856	-9.990	-0.134
	PbCl ₄ ⁻²	1.502e-011	4.387e-012	-10.823	-11.358	-0.534
Cu(1)		3.936e-008				
	Cu ⁺	3.936e-008	2.307e-008	-7.405	-7.637	-0.232
Cu(2)		2.961e-006				
	Cu ⁺²	1.787e-006	4.395e-007	-5.748	-6.357	-0.609
	CuSO ₄	6.214e-007	7.020e-007	-6.207	-6.154	0.053
	Cu(OH) ₂	4.986e-007	5.632e-007	-6.302	-6.249	0.053
	CuOH ⁺	5.326e-008	3.442e-008	-7.274	-7.463	-0.190
	Cu(OH) ₃ ⁻	3.615e-013	2.658e-013	-12.442	-12.575	-0.134
	Cu(OH) ₄ ⁻²	1.422e-018	4.153e-019	-17.847	-18.382	-0.534
H(0)		1.986e-025				
	H ₂	9.932e-026	1.122e-025	-25.003	-24.950	0.053
K		3.500e-003				
	K ⁺	3.340e-003	2.137e-003	-2.476	-2.670	-0.194
	KSO ₄ ⁻	1.598e-004	1.175e-004	-3.796	-3.930	-0.134
	KOH	5.138e-011	5.804e-011	-10.289	-10.236	0.053
Mg		2.200e-002				
	MgHCO ₃ ⁺	8.861e-003	6.514e-003	-2.053	-2.186	-0.134
	Mg ⁺²	8.796e-003	2.568e-003	-2.056	-2.590	-0.535
	MgSO ₄	4.168e-003	4.708e-003	-2.380	-2.327	0.053
	MgCO ₃	1.752e-004	1.979e-004	-3.757	-3.704	0.053
	MgOH ⁺	9.931e-008	7.301e-008	-7.003	-7.137	-0.134
Na		1.100e-001				
	Na ⁺	9.860e-002	6.983e-002	-1.006	-1.156	-0.150
	NaHCO ₃	7.537e-003	8.515e-003	-2.123	-2.070	0.053
	NaSO ₄ ⁻	3.724e-003	2.738e-003	-2.429	-2.563	-0.134
	NaCO ₃ ⁻	1.429e-004	1.050e-004	-3.845	-3.979	-0.134
	NaOH	3.199e-009	3.613e-009	-8.495	-8.442	0.053
O(0)		0.000e+000				
	O ₂	0.000e+000	0.000e+000	-42.545	-42.492	0.053
Pb		7.000e-006				
	PbCO ₃	3.528e-006	3.986e-006	-5.452	-5.399	0.053
	Pb(CO ₃) ₂ ⁻²	2.768e-006	8.087e-007	-5.558	-6.092	-0.534
	PbHCO ₃ ⁺	6.652e-007	4.891e-007	-6.177	-6.311	-0.134
	PbCl ⁺	1.378e-008	1.013e-008	-7.861	-7.995	-0.134
	PbSO ₄	1.106e-008	1.249e-008	-7.956	-7.903	0.053
	Pb ⁺²	9.721e-009	2.840e-009	-8.012	-8.547	-0.534
	Pb(SO ₄) ₂ ⁻²	1.755e-009	5.128e-010	-8.756	-9.290	-0.534
	PbCl ₂	1.273e-009	1.438e-009	-8.895	-8.842	0.053
	PbOH ⁺	5.898e-010	4.336e-010	-9.229	-9.363	-0.134
	PbCl ₃ ⁻	1.392e-010	1.023e-010	-9.856	-9.990	-0.134

	PbCl4-2	1.502e-011	4.387e-012	-10.823	-11.358	-0.534
	Pb(OH)2	1.170e-012	1.321e-012	-11.932	-11.879	0.053
	Pb2OH+3	4.394e-016	2.757e-017	-15.357	-16.560	-1.202
	Pb(OH)3-	1.616e-016	1.188e-016	-15.792	-15.925	-0.134
	Pb(OH)4-2	7.296e-021	2.131e-021	-20.137	-20.671	-0.534
S(6)		6.800e-002				
	SO4-2	3.891e-002	7.822e-003	-1.410	-2.107	-0.697
	CaSO4	2.104e-002	2.377e-002	-1.677	-1.624	0.053
	MgSO4	4.168e-003	4.708e-003	-2.380	-2.327	0.053
	NaSO4-	3.724e-003	2.738e-003	-2.429	-2.563	-0.134
	KSO4-	1.598e-004	1.175e-004	-3.796	-3.930	-0.134
	ZnSO4	7.389e-007	8.347e-007	-6.131	-6.078	0.053
	CuSO4	6.214e-007	7.020e-007	-6.207	-6.154	0.053
	Zn(SO4)2-2	1.817e-007	5.307e-008	-6.741	-7.275	-0.534
	HSO4-	1.302e-007	9.574e-008	-6.885	-7.019	-0.134
	CaHSO4+	2.384e-008	1.753e-008	-7.623	-7.756	-0.134
	PbSO4	1.106e-008	1.249e-008	-7.956	-7.903	0.053
	Pb(SO4)2-2	1.755e-009	5.128e-010	-8.756	-9.290	-0.534
Zn		7.000e-005				
	Zn(CO3)2-2	4.336e-005	1.267e-005	-4.363	-4.897	-0.534
	ZnHCO3+	1.690e-005	1.243e-005	-4.772	-4.906	-0.134
	ZnCO3	6.494e-006	7.336e-006	-5.188	-5.135	0.053
	Zn+2	2.156e-006	4.552e-007	-5.666	-6.342	-0.676
	ZnSO4	7.389e-007	8.347e-007	-6.131	-6.078	0.053
	Zn(SO4)2-2	1.817e-007	5.307e-008	-6.741	-7.275	-0.534
	ZnCl+	1.493e-007	1.098e-007	-6.826	-6.960	-0.134
	ZnCl2	9.114e-009	1.030e-008	-8.040	-7.987	0.053
	ZnOH+	5.317e-009	3.909e-009	-8.274	-8.408	-0.134
	ZnCl3-	1.408e-009	1.035e-009	-8.852	-8.985	-0.134
	Zn(OH)2	3.111e-010	3.515e-010	-9.507	-9.454	0.053
	ZnCl4-2	1.590e-010	4.646e-011	-9.798	-10.333	-0.534
	Zn(OH)3-	1.184e-014	8.704e-015	-13.927	-14.060	-0.134
	Zn(OH)4-2	3.698e-020	1.080e-020	-19.432	-19.966	-0.534

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-2.86	-10.65	-7.79	PbSO4
Anhydrite	0.44	-3.92	-4.36	CaSO4
Aragonite	2.43	-5.91	-8.34	CaCO3
Calcite	2.57	-5.91	-8.48	CaCO3
Cerrusite	0.49	-12.64	-13.13	PbCO3
CO2(g)	0.26	-17.89	-18.15	CO2
Dolomite	4.50	-12.59	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	0.64	-3.94	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-21.80	-21.80	0.00	H2
H2O(g)	-1.52	-0.01	1.51	H2O
Halite	-3.79	-2.20	1.58	NaCl
O2(g)	-39.53	43.59	83.12	O2
Pb(OH)2	-2.91	5.24	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-0.43	-10.43	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-4.05	7.45	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 2.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	1.520e-001	1.520e-001
Ca	3.200e-002	3.200e-002
Cl	9.000e-002	9.000e-002
Cu	8.000e-006	8.000e-006
K	5.400e-003	5.400e-003
Mg	3.000e-002	3.000e-002
Na	4.500e-002	4.500e-002
Pb	8.000e-006	8.000e-006
S(6)	3.500e-002	3.500e-002
Zn	8.000e-005	8.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	7.800
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.994
Ionic strength	=	2.490e-001
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	1.536e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	1.520e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-1.390e-001
Percent error, $100 * (\text{Cat} - \text{An}) / (\text{Cat} + \text{An})$	=	-35.67
Iterations	=	11
Total H	=	1.111566e+002
Total O	=	5.609908e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-3.74	-11.53	-7.79	PbSO4
Anhydrite	-0.18	-4.54	-4.36	CaSO4
Aragonite	2.47	-5.86	-8.34	CaCO3
Calcite	2.62	-5.86	-8.48	CaCO3
Cerrusite	0.28	-12.85	-13.13	PbCO3
CO2(g)	-1.01	-19.16	-18.15	CO2
Dolomite	5.36	-11.73	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	0.04	-4.54	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.60	-23.60	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.30	-2.71	1.58	NaCl
O2(g)	-35.93	47.19	83.12	O2
Pb(OH)2	-1.85	6.30	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-0.72	-10.72	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-3.07	8.43	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 3.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	3.110e-001	3.110e-001
Ca	2.220e-001	2.220e-001
Cl	1.560e-001	1.560e-001
Cu	2.000e-006	2.000e-006
K	1.700e-002	1.700e-002
Mg	4.500e-002	4.500e-002
Na	8.400e-002	8.400e-002
Pb	6.000e-005	6.000e-005
S(6)	5.050e-001	5.050e-001
Zn	1.000e-005	1.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	8.000
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.981
Ionic strength	=	1.105e+000
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	3.279e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	3.110e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-8.587e-001
Percent error, $100 \cdot (\text{Cat} - \text{An}) / (\text{Cat} + \text{An})$	=	-62.46
Iterations	=	11
Total H	=	1.113011e+002
Total O	=	5.845649e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-2.52	-10.31	-7.79	PbSO4
Anhydrite	1.22	-3.14	-4.36	CaSO4
Aragonite	3.34	-5.00	-8.34	CaCO3
Calcite	3.48	-5.00	-8.48	CaCO3
Cerrusite	0.97	-12.16	-13.13	PbCO3
CO2(g)	-0.98	-19.13	-18.15	CO2
Dolomite	6.42	-10.67	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	1.42	-3.16	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.00	-24.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.52	-0.01	1.51	H2O
Halite	-3.94	-2.36	1.58	NaCl
O2(g)	-35.14	47.98	83.12	O2
Pb(OH)2	-1.19	6.96	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-1.87	-11.87	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-4.25	7.25	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 4.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	2.500e-001	2.500e-001
Ca	2.080e-001	2.080e-001
Cl	1.840e-001	1.840e-001
Cu	2.000e-006	2.000e-006
K	1.900e-002	1.900e-002
Mg	5.300e-002	5.300e-002
Na	8.500e-002	8.500e-002
Pb	6.000e-005	6.000e-005
S(6)	5.240e-001	5.240e-001
Zn	1.000e-005	1.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	7.000
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.981
Ionic strength	=	1.102e+000
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	2.303e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	2.500e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-8.362e-001
Percent error, $100 * (\text{Cat} - \text{An}) / (\text{Cat} + \text{An})$	=	-61.63
Iterations	=	15
Total H	=	1.112394e+002
Total O	=	5.833088e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-0.81	-8.60	-7.79	PbSO4
Anhydrite	1.24	-3.13	-4.36	CaSO4
Aragonite	2.24	-6.09	-8.34	CaCO3
Calcite	2.39	-6.09	-8.48	CaCO3
Cerrusite	1.56	-11.57	-13.13	PbCO3
CO2(g)	-0.09	-18.24	-18.15	CO2
Dolomite	4.31	-12.78	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	1.44	-3.14	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-22.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.52	-0.01	1.51	H2O
Halite	-3.86	-2.28	1.58	NaCl
O2(g)	-39.14	43.98	83.12	O2
Pb(OH)2	-1.49	6.66	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-1.19	-11.19	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-4.46	7.04	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 5.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	3.720e-001	3.720e-001
Ca	5.000e-002	5.000e-002
Cl	8.900e-002	8.900e-002
Cu	2.000e-006	2.000e-006
K	3.500e-002	3.500e-002
Mg	6.100e-002	6.100e-002
Na	4.100e-002	4.100e-002
Pb	4.000e-006	4.000e-006
S(6)	3.700e-002	3.700e-002
Zn	4.000e-005	4.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	8.900
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.990
Ionic strength	=	3.784e-001
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	4.585e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	3.720e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-3.234e-001
Percent error, $100 * (Cat - An) / (Cat + An)$	=	-53.82
Iterations	=	10
Total H	=	1.112970e+002
Total O	=	5.676977e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-6.70	-14.49	-7.79	PbSO4
Anhydrite	-0.43	-4.79	-4.36	CaSO4
Aragonite	3.60	-4.73	-8.34	CaCO3
Calcite	3.75	-4.73	-8.48	CaCO3
Cerrusite	-1.30	-14.43	-13.13	PbCO3
CO2(g)	-1.81	-19.96	-18.15	CO2
Dolomite	7.85	-9.24	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	-0.22	-4.80	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-25.80	-25.80	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.43	-2.85	1.58	NaCl
O2(g)	-31.53	51.59	83.12	O2
Pb(OH)2	-2.62	5.53	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-2.41	-12.41	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-3.95	7.55	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 6.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	5.180e-001	5.180e-001
Ca	1.650e-001	1.650e-001
Cl	5.300e-002	5.300e-002
Cu	2.000e-006	2.000e-006
K	5.700e-003	5.700e-003
Mg	4.600e-002	4.600e-002
Na	6.800e-002	6.800e-002
Pb	6.000e-005	6.000e-005
S(6)	1.580e-001	1.580e-001
Zn	1.000e-005	1.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	7.500
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.985
Ionic strength	=	6.307e-001
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	5.123e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	5.180e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-3.854e-001
Percent error, $100 * (Cat - An) / (Cat + An)$	=	-41.29
Iterations	=	11
Total H	=	1.115021e+002
Total O	=	5.767520e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-2.65	-10.44	-7.79	PbSO4
Anhydrite	0.73	-3.63	-4.36	CaSO4
Aragonite	3.05	-5.28	-8.34	CaCO3
Calcite	3.20	-5.28	-8.48	CaCO3
Cerrusite	1.04	-12.09	-13.13	PbCO3
CO2(g)	-0.24	-18.39	-18.15	CO2
Dolomite	6.00	-11.09	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	0.94	-3.64	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.00	-23.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.52	-0.01	1.51	H2O
Halite	-4.45	-2.87	1.58	NaCl
O2(g)	-37.13	45.99	83.12	O2
Pb(OH)2	-1.86	6.29	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-1.78	-11.78	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-4.90	6.60	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 7.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	2.970e-001	2.970e-001
Ca	1.200e-001	1.200e-001
Cl	7.800e-002	7.800e-002
Cu	2.000e-006	2.000e-006
K	1.000e-002	1.000e-002
Mg	7.900e-002	7.900e-002
Na	6.700e-002	6.700e-002
Pb	8.000e-005	8.000e-005
S(6)	1.040e-001	1.040e-001
Zn	8.000e-005	8.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	7.500
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.989
Ionic strength	=	4.896e-001
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	2.952e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	2.970e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-1.059e-001
Percent error, $100 * (Cat - An) / (Cat + An)$	=	-15.05
Iterations	=	10
Total H	=	1.112920e+002
Total O	=	5.680360e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-2.32	-10.11	-7.79	PbSO4
Anhydrite	0.53	-3.83	-4.36	CaSO4
Aragonite	2.82	-5.52	-8.34	CaCO3
Calcite	2.96	-5.52	-8.48	CaCO3
Cerrusite	1.34	-11.79	-13.13	PbCO3
CO2(g)	-0.50	-18.65	-18.15	CO2
Dolomite	5.90	-11.19	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	0.74	-3.84	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.00	-23.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.25	-2.67	1.58	NaCl
O2(g)	-37.13	45.99	83.12	O2
Pb(OH)2	-1.30	6.85	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-0.65	-10.65	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-3.51	7.99	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 8.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	3.720e-001	3.720e-001
Ca	5.000e-002	5.000e-002
Cl	8.900e-002	8.900e-002
Cu	2.000e-004	2.000e-004
K	3.500e-003	3.500e-003
Mg	6.100e-002	6.100e-002
Na	4.100e-002	4.100e-002
Pb	3.000e-005	3.000e-005
S(6)	3.700e-002	3.700e-002
Zn	6.000e-005	6.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	7.000
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.990
Ionic strength	=	3.693e-001
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	3.329e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	3.720e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-2.288e-001
Percent error, $100 * (\text{Cat} - \text{An}) / (\text{Cat} + \text{An})$	=	-38.29
Iterations	=	12
Total H	=	1.113412e+002
Total O	=	5.672905e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-2.51	-10.30	-7.79	PbSO4
Anhydrite	-0.15	-4.52	-4.36	CaSO4
Aragonite	2.09	-6.25	-8.34	CaCO3
Calcite	2.23	-6.25	-8.48	CaCO3
Cerrusite	1.09	-12.04	-13.13	PbCO3
CO2(g)	0.12	-18.03	-18.15	CO2
Dolomite	4.71	-12.38	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	0.06	-4.52	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-22.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.38	-2.80	1.58	NaCl
O2(g)	-39.13	43.99	83.12	O2
Pb(OH)2	-2.16	5.99	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-0.52	-10.52	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-4.00	7.50	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 9.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	2.980e-001	2.980e-001
Ca	8.800e-002	8.800e-002
Cl	1.500e-001	1.500e-001
Cu	3.000e-004	3.000e-004
K	3.000e-003	3.000e-003
Mg	3.200e-002	3.200e-002
Na	6.800e-002	6.800e-002
Pb	3.000e-005	3.000e-005
S(6)	4.500e-002	4.500e-002
Zn	6.000e-005	6.000e-005

-----Description of solution-----

pH	=	7.000
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.990
Ionic strength	=	4.068e-001
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	2.685e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	2.980e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-1.967e-001
Percent error, $100 * (\text{Cat} - \text{An}) / (\text{Cat} + \text{An})$	=	-30.46
Iterations	=	12
Total H	=	1.112769e+002
Total O	=	5.654870e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-2.30	-10.09	-7.79	PbSO4
Anhydrite	0.18	-4.18	-4.36	CaSO4
Aragonite	2.25	-6.08	-8.34	CaCO3
Calcite	2.40	-6.08	-8.48	CaCO3
Cerrusite	1.14	-11.99	-13.13	PbCO3
CO2(g)	0.01	-18.14	-18.15	CO2
Dolomite	4.52	-12.57	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	0.39	-4.19	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-22.00	-22.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-3.94	-2.35	1.58	NaCl
O2(g)	-39.13	43.99	83.12	O2
Pb(OH)2	-2.01	6.14	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-0.45	-10.45	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-3.82	7.68	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 10.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	3.110e-001	3.110e-001
Ca	1.040e-001	1.040e-001
Cl	1.200e-001	1.200e-001
Cu	2.000e-005	2.000e-005
K	1.600e-003	1.600e-003
Mg	2.900e-002	2.900e-002
Na	4.600e-002	4.600e-002
Pb	2.000e-005	2.000e-005
S(6)	3.400e-002	3.400e-002
Zn	2.000e-004	2.000e-004

-----Description of solution-----

pH	=	7.800
pe	=	4.000
Activity of water	=	0.990
Ionic strength	=	3.876e-001
Mass of water (kg)	=	1.000e+000
Total alkalinity (eq/kg)	=	3.197e-001
Total CO2 (mol/kg)	=	3.110e-001
Temperature (deg C)	=	25.000
Electrical balance (eq)	=	-1.936e-001
Percent error, $100 \cdot (\text{Cat} - \text{An}) / (\text{Cat} + \text{An})$	=	-31.51
Iterations	=	12
Total H	=	1.113037e+002
Total O	=	5.656968e+001

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-3.93	-11.72	-7.79	PbSO4
Anhydrite	0.10	-4.26	-4.36	CaSO4
Aragonite	3.13	-5.20	-8.34	CaCO3
Calcite	3.28	-5.20	-8.48	CaCO3
Cerrusite	0.46	-12.67	-13.13	PbCO3
CO2(g)	-0.75	-18.90	-18.15	CO2
Dolomite	6.18	-10.91	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	0.31	-4.27	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.60	-23.60	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.20	-2.62	1.58	NaCl
O2(g)	-35.93	47.19	83.12	O2
Pb(OH)2	-1.93	6.22	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	-0.59	-10.59	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-3.20	8.30	11.50	Zn(OH)2

Initial solution 11.

-----Solution composition-----

Elements	Molality	Moles
C(4)	3.000e-001	3.000e-001
Ca	1.380e-001	1.380e-001
Cl	1.200e-001	1.200e-001
Cu	2.000e-005	2.000e-005
K	1.300e-002	1.300e-002
Mg	3.100e-002	3.100e-002
Na	6.700e-002	6.700e-002
Pb	2.000e-005	2.000e-005
S(6)	5.000e-002	5.000e-002
Zn	2.000e-004	2.000e-004

-----Saturation indices-----

Phase	SI	log IAP	log KT	
Anglesite	-2.46	-10.25	-7.79	PbSO4
Anhydrite	0.36	-4.00	-4.36	CaSO4
Aragonite	2.43	-5.90	-8.34	CaCO3
Calcite	2.58	-5.90	-8.48	CaCO3
Cerrusite	0.98	-12.15	-13.13	PbCO3
CO2(g)	-0.02	-18.17	-18.15	CO2
Dolomite	4.67	-12.42	-17.09	CaMg(CO3)2
Gypsum	0.57	-4.01	-4.58	CaSO4·2H2O
H2(g)	-22.00	-22.00	0.00	H2
H2O(g)	-1.51	-0.00	1.51	H2O
Halite	-4.04	-2.46	1.58	NaCl
O2(g)	-39.13	43.99	83.12	O2
Pb(OH)2	-2.14	6.01	8.15	Pb(OH)2
Smithsonite	0.09	-9.91	-10.00	ZnCO3
Zn(OH)2(e)	-3.25	8.25	11.50	Zn(OH)2

End of simulation.

Reading input data for simulation 2.

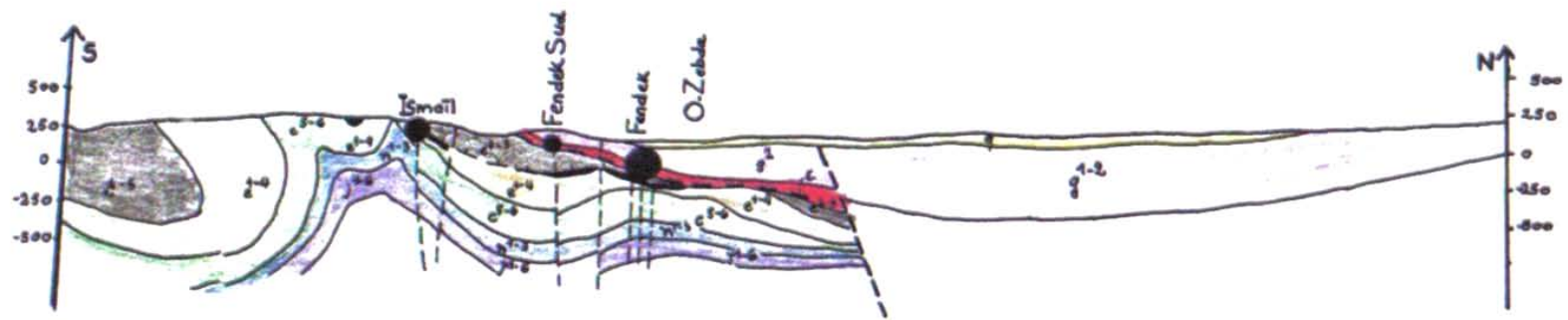
End of run.

distribution interannuelle des précipitations mensuelles (mm)												
Station: Azzaba						Période 1984-1985 / 2003-2004						

mois	Sep	Oct	Nov	Dec	jan	Fev	Mar	Avr	Mai	juin	Juillet	Aout
année												
84-85	26,90	147,80	3,60	280,40	128,80	66,30	159,80	38,30	34,80	0,00	0,00	1,20
85-86	44,70	14,90	40,00	35,00	146,60	56,80	90,30	33,50	1,30	7,40	1,30	0,00
86-87	22,60	83,40	122,60	175,60	106,60	264,80	101,80	40,40	60,50	0,00	0,00	0,00
87-88	0,00	38,70	85,70	24,30	75,70	76,30	65,00	7,80	18,80	29,30	0,00	0,00
88-89	44,90	0,00	32,60	190,70	46,10	60,90	50,00	71,20	1,40	2,30	0,00	0,00
89-90	9,90	74,60	52,90	53,10	143,00	0,00	30,80	49,30	26,10	27,90	0,00	26,20
90-91	0,00	42,30	149,00	302,60	92,50	80,70	68,60	24,50	0,00	0,00	0,00	0,00
91-92	44,10	139,20	43,90	1,30	87,60	73,10	62,60	156,30	19,60	8,40	1,30	0,30
92-93	0,00	12,30	50,90	190,60	76,50	62,60	66,40	4,50	25,30	0,00	0,00	0,00
93-94	19,20	61,10	14,60	117,30	94,00	105,30	0,00	52,40	26,60	0,00	0,00	0,00
94-95	6,90	83,80	26,80	136,20	269,40	7,90	94,80	7,20	0,00	2,30	0,00	0,40
95-96	39,40	2,20	78,80	78,10	70,70	226,10	85,40	31,40	11,50	0,00	0,00	1,70
96-97	37,30	6,10	13,60	96,40	64,80	25,70	18,70	19,80	0,30	0,00	4,90	6,70
97-98	15,70	95,30	200,10	149,20	72,30	119,70	94,00	57,20	100,40	5,30	0,00	2,10
98-99	41,10	26,60	172,20	85,40	115,40	60,70	61,40	40,70	0,00	5,80	0,00	0,40
99-00	2,70	22,50	79,30	124,50	68,30	16,90	8,40	6,00	86,90	3,10	0,00	2,30
00-01	0,00	47,60	27,30	84,60	170,20	101,20	17,40	44,60	11,90	0,00	0,00	0,00
01.02	41,40	9,80	48,50	70,40	32,50	80,90	6,30	28,20	1,60	0,00	2,90	16,90
02.03	7,00	26,40	197,80	168,80	190,50	131,70	26,30	76,80	10,60	0,00	0,00	0,00
03.04	65,20	21,40	27,40	170,80	111,20	12,90	39,90	57,00	35,00	40,50	0,00	0,00

température mensuelle (C°)
Station: Azzaba
Période: 1984-85 / 2003-04

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout
Année												
84-85	22,3	19,75	17,8	13,85	12,05	13,15	12,55	15,85	17,55	21,15	24,85	24,25
85-86	23	21	17,25	13,85	11,95	13,5	12,95	17,3	18,65	21,1	22,6	25,4
86-87	24,4	22,22	16,75	14,45	12,5	12,76	13,1	17,25	18,35	20,75	22,5	26,1
87-88	23,9	23,1	16,9	14	13,5	12,85	13,75	16,05	18,6	21,45	24,75	26,05
88-89	23,15	21,25	17,25	14,6	13,15	12,7	14,8	15,95	18,85	21,35	24,85	25,85
89-90	24,6	21	17,35	14,3	12,2	13,65	14,65	15,7	18,25	21,6	24,65	25,1
90-91	25	21,35	16,5	12,15	12,3	13	14,85	14,6	17,3	21,55	24,3	24,8
91-92	24,15	20,05	16,3	13,1	11,7	11,6	14,4	14,55	16,75	20,65	23,4	20,05
92-93	23,6	20,3	16,4	13,75	11,45	11,45	13,1	15,45	18,45	20,95	23,35	25,1
93-94	24,5	21,05	17,2	13,85	12,2	12,25	13,4	15	19,35	21,45	24,6	26,95
94-95	24,5	21	18,05	15,1	12,75	14	13,65	14,45	19,75	21,4	24,65	27,6
95-96	22,55	19,8	17,6	15,85	14,1	12,55	14	15,3	19,15	21,35	24,35	25,65
96-97	32	20,2	17,45	15,25	15	11,95	13,95	15,9	19,1	22,35	24,3	26,05
97-98	24,95	20,65	16,45	13,85	13,85	13,35	13,85	16,3	19,2	20,95	24,5	26,05
98-99	22,73	18,88	16,05	14,02	14,16	13,07	15,69	16,78	20,05	21,93	23,38	25,13
99-00	23,6	21,86	16,49	14,75	12,48	14,38	15,47	17,58	19,32	21,28	24,04	24,55
00-01	22,73	19,83	17,58	15,54	15,03	14,17	17,94	16,63	18,74	22,15	23,53	24,33
01-02	22,44	21,86	16,78	13,87	13,29	14,24	16,05	16,85	19,03	21,79	23,02	23,46
02-03	22,15	20,19	17,72	15,54	13,95	13,29	15,47	17,22	18,95	23,46	25,35	26,14
03-04	22,73	20,99	17,29	14,38	14,02	14,2	14,6	16,13	17,79	20,7	22,95	24,4



D'après BENHAMZA Moussa (1996)

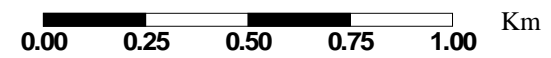


Fig. 5 : Coupe géologique de la zone mercurielle Nord numidique

Références bibliographiques

Aydinian et al., 1969. Sur la volatilité du mercure et de ses composés. (En russe). *Geokhim.*, n° 9, p. 1148-1152.

Barnes H.L., 1979. Solubilities of ore minerals, *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd Edition. 404-460.

Benhamza M., 1996. Etude hydrogéologique de la zone mercurielle de Fendek (Azzaba) - Conséquences de l'exploitation des gisements mercuriels sur l'environnement. Thèse de magister de l'université de Annaba, Algérie. 174 p.

Benhamza M., 2005. Application de l'Analyse en Composante Principale à l'évolution de la pollution mercurielle dans la région de Azzaba (1999, 2000, 2001). 1^{er} Colloque Euro Méditerranéen en Biologie Végétale et Environnement, les 28, 29 et 30 Novembre 2005, Université Badji-Mokhtar-Annaba (Algérie). 7 p.

Benhamza M., 2005. Qualité des eaux souterraines du district mercuriel de la zone mercurielle Nord Numidique (Azzaba), N E Algérie. Séminaire National sur l'Industrie Minérale et l'Environnement. SNIME 2005, Annaba les 6 et 7 Décembre 2005. 6 p.

Benhamza M., Kherici N., Nezzal A., 2006. Hydrochimie des eaux souterraines de la zone mercurielle Nord Numidique (Azzaba), Nord Est Algérie : Evaluation de la contamination mercurielle sur la population. The third International conference on the « Water Resources in the Mediterranean Basin » Tripoli Lebanon 1-3 November 2006. 5 p.

Benhamza Moussa, Kherici Nacer, Piccard-Bonnaud Françoise
« Hydrochemistry of groundwater in the North numidian mercuriel zone (Azzaba), North East Algeria: Effect of mercury contamination of population ». On Line Journal of Earth Sciences (1), Medwell Journal: p 51-57, January 2007.

Bikmееv R., 1970. Rapport sur l'étude géochimique, (Rapport E.R.E.M, inédit).

Benhamza Moussa
« Hydrochemistry of groundwater in the mercurial zone of Azzaba North East Algéria: Contamination of population by mercury. »
Capacity Building in Environment-related Issues in Geomining and Coastal Zone Management, organised by TWAS and FORGEA INTERNATIONAL at Iglesias- Monteponi, Italy from 26 February to 9 March 2007.

- Behra P., 1987. Etude du comportement d'un micropolluant métallique - le mercure - au cours de sa migration à travers un milieu poreux saturé : Identification expérimentale des mécanismes d'échanges et modélisation des phénomènes.
- Bligh E.G., 1971. Mercury levels in canadian fish. Symp. "Mercury in man's environment" R. Soc. Can p.73.
- Bostrom K., Fischer D.E., 1969. Distribution of mercury in East pacific sediments. *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, v. 33, n° 6, p. 743-745.
- Bouarroudj M.T., 1986. Les minéralisations à Hg, Pb, Zn, Cu, Ba de la zone Nord Numidique du Nord de l'Algérie orientale – Métallogénie et recherche de guides de prospection. Thèse de Docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, ParisVI. 242p.
- Buzina R, Subotica, J Vukusic, J Sapunar, K Antonic, 1989. Effects of Industrial Pollution on Seafood Content and Dietary Total and Methyl Mercury: The Science of Total Environement, 78p, 45-57.
- Castany G., 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Paris, 233p.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2004. Détermination du mercure : Méthode par spectrophotométrie d'absorption atomique, formation de vapeur. MA. 200-Hg 1.0, Ministère de l'Environnement du Québec, 17 p.
- Chapelier D., 1987. Diagraphies appliquées à l'hydrogéologie. Lavoisier, Paris.
- Charlot G., 1978. Dosages Absorptiométriques des éléments minéraux. Masson, Paris New york Barcelone Milan. 443p.
- Cooke N.E., 1971. Some aspects of other sources to the environment. Proc. Symp. "Mercury in man's environment". R. Soc. Can. P.53.
- Cranston R.E., Buckley D.E., 1972. Mercury pathways in a river and estuary. *Environ. Sci. Technol.*, U.S.A , 6 n° 3, p. 274.
- Deleau P., 1983. Etude géologique des régions de Jemmapes, Hammam Meskoutine et du col des oliviers. Thèse Sc. Paris. Pibli. Serv. Carte géol. Algérie, (2), Bull. N° 14, Texte et atlas, Alger.

Denon A., 1988. Le gisement d'Ismaïl (Azzaba) et l'indice de Bou Ghezlane (Cap de Fer): Deux concentrations mercurifères encaissées dans l'orogène alpin du Nord-Est Algérien.

Detay M., 1993. Le forage d'eau Réalisation, Entretien, Réhabilitation

D'Itri F.M., 1971. The environmental mercury problem. Inst. Water Res., Mich. State Univ, techn. Rep., n° 12.

Efremova E.P., 1982. Solubilité du cinabre . les solutions hydrosulfurées à haute temperature. (En russe).Geokhim., n° 1, p.56-63.

Flewelling F.J., 1971. Loss of mercury to the environmental from chlor-alkali plants. Proc. Symp. "Mercury in man's environmental". R. Soc. Can. p.34.

Hanson A., 1971. Man made source of mercury. Proc. Symp. "Mercury in man's environmental". R. Soc. Can. P. 22.

Harada Y., 1971. Congenital (or foetal) Minamata Disease. In "Minamata Disease, study group of Minamata Disease", Kumamoto univ., Jap., p. 93.

Jensen S., Jerneloev A., 1967. Microorganisms capable of methylating mercury. 1. Nordforsk Biocindenformation. n° 10.

Jensen S., Jerneloev A., 1968. Microorganisms capable of methylating mercury. 2. Nordforsk Biocindenformation. n° 14.

Jensen S., Jerneloev A., 1969. Biological methylation of mercury in aquatic organisms. Nature, G.B. 223, p. 753-754.

Jerneloev A., 1969. Conversion of mercury compound. In "ckemical fallout". Ed. Miller and Borg. Publ. Charles C. Thomas, Springfield, Illinois.

Jerneloev A., 1970. Adress to the conference on mercury in the environment. Ann. Arbor, Michigan, sept.

Jerneloev A., 1971. Release of methyl mercury from sediments with layers containing inorganic mercury at different depths. Limnol. Oceanogr., U.S.A ,15, n° 6, p.958-960.

Jonasson I.R., 1970. Mercury in the natural environment: a review of recent works. Geol. Surv. Can. P. 39.

Jonasson I.R., Boyle R.W., 1971. Geochemistry of mercury. Proc. Symp. "Mercury in man's environmental". R. Soc. Can., p. 5.

Khairtadinov I.A., 1971. Sur la question des auréoles gazeuses de mercure. (En russe). Geokhim., n° 6, p. 668-681.

Khodakovski I.L., 1975. Rôle des complexes sulfurés dans le transport du mercure par les solutions hydrothermales. (En russe). Geokhhim., n° 3, p.363-369.

Koutiev F., 1970. Le mercure natif dans le verre volcanique de la Caldera de Khangar (Kamchatka). Dokl. Akad. Nauk. S.S.S.R., n°4, p 913-917.

Kouznetsov V.A., 1973. Stabilité du cinabre dans les solutions à haute température. (En russe). Geokhim., n° 5, p. 654-663.

Langworth S, Almkvist O, Soderman E, Wikstrom B-O, 1992. Effects of occupational exposure to mercury vapour on the central nervous system: British Journal of Industrial Medicine, 49p, 545 – 555.

Lauverys R., 1992. Toxicologie industrielle et intoxication professionnelle. Ed. Masson.

Levebvre J., 1980. Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles. Masson, Paris, 251 p.

Menakov A., Titov J., Zamaledinov., Menakov G., 1977. Rapport Géologie, Facteurs de localisation des gisements et estimation prévisionnelle de la zone mercurielle Nord Numidique. (Synthèse des données géologo-géophysique concernant les travaux exécutés pendant la période 1966-76). PREMIERE PARTIE - GEOLOGIE

Menakov A. et al. (1977). Synthèse des données géologiques et géophysiques dans la zone Nord numidique. (Rapport E.R.E.M. , inédit).

Mezghache H., 1989. Cartographie automatique et interprétation géostatistique d'une campagne de prospection géochimique sur sol – Application à la zone mercurielle Nord Numidique (Algérie). Thèse de Docteur de l'INPL. 178 p.

Minimata Disease, 1968. Study group of minimata Disease. Kumamoto univ., Jap. 338p.

Moiseyev A.N., 1971. A non magmatic source for mercury ore deposits. *Econ. Geol.*, 66, n° 4 ? 591-601.

Nezzal A.M., Gueroui S., Tourab Dj., 1994. L'intoxication chronique au mercure dans la région de Annaba. 3eme Conférence Panafricaine de Santé au travail, Le Caire du 7 au 11 décembre 1994.

Nezzal AM., Nezzal AZ., Gueroui S., Khène M., Ghorab S., Bachtarzi T., 1996. Pollution par le mercure et effets sur la santé des travailleurs et de la population environnante, 10ème JNMT Alger les 7, 8 et 9 Mai 1996.

Nezzal AM, Tourab Dj, Gueroui S, Nezzal AZ, 1991. : Manifestations Neuropsychiques observées au cours de l'intoxication chronique au mercure inorganique : 7ème JNMT Oran 1991.

Nixon D.E., Mussman G.V., Moyer T.P, 1996. Inorganic, organic, and total mercury in blood and urine: cold vapour analysis with automated flow injection sample delivery. *Journal of analytical toxicology*, 20 (1), pp. 17-22.

Note technique DNEMT n° 8, 1996. Représentation graphique des résultats d'analyses eau minérale. Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales, Bureau de Recherche Géologique et Minière.

Ozerova N.A, 1972. Composition isotopique du soufre de quelques gisements de la province mercurifère de la méditerranée occidentale. (En russe). In précis géochimique de quelques éléments. Edit. Nauka., Moscou, p. 275-309.

OMS, 1972. : Normes internationales applicables à l'eau de boisson, Genève.

OMS, 1980. : Exposition aux métaux lourds : Limites Recommandations d'exposition professionnelle ; Rapport d'un groupe de l'OMS.

Raoult J.F., 1974. Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord du Constantinois, Algérie). Thèse Sc., Paris. Mem. Soc. Géol. Fr. p.1-163.

Rodier J., 1984. L'analyse de l'eau ; eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 7eme édition, Ed. Dunod, Paris.

Saukov A.A., 1972. Précis de géochimie du mercure (en russe). Edit. Nauka., Moscou.

Saukov A.A., Aidinayan N., 1940. A propos de l'oxydation du cinabre (en russe). Travaux de l'institut des sciences géologiques, Acad. Des Sci. De l'U.R.S.S.

Schoeller H., 1962. Les eaux souterraines, hydrologie dynamique et chimique, Recherche, Exploitation et Evaluation des Ressources, Edition Masson et C^{ie}, Paris 579 p.

Telliard W.A., 2002. Engineering and Analysis Division (4303) U.S Environmental Protection Agency. Method 1631, Revision C: Mercury in water by oxidation, Purge and trap, and Cold Vapour Atomic fluorescence Spectrometry.

Thomas R.L., 1972. The distribution of mercury in the sediments of lake Ontario. Can. J. Earth Sci. , 9 n° 6, pp. 636-651.

Thomas R.L., Kemp A.L.W, Lewis C.F.M ,1972. The surface sediments of lake Huron. Rapp. du C.C.I.W, Burlington, Ontario, Canada.

Toubal A., 1984. Contribution à l'étude des minéralisations antimonifères du Nord –Est algérien : une province métallogénique hétérochrone. Thèse Doct. 3^e cycle, U.M.M.C. /Paris VI.

Vernet J.P., 1972. Levels of mercury in the sediments of some Swiss lakes including Lke Geneva. Eclogue geol. Helv. , 65, n° 2.

Vernet J.P., Thomas R.L., 1972. The occurrence and didtribution of mercury in the sediment of the petit Lake (Western Lake Geneva). Eclogue geol. Helv., 65, n° 2.

Vila J.M., 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse Sc. de la Terre, U.P.M.C. / Paris VI.

Vila J.M., Hernandez et Velde D., 1974. Sur la présence d'un filon de roche lamproïdique (trachytes potassiques à olivines) recoupant le flysch du type Guerrouch entre Azzaba et Hammam Meskoutine, dans l'Est Constantinois (Algérie). C.R. Acad. Sc. Paris t. 178, 2589-2591.

White D.E., 1967. Mercury and base-metal deposits with associated thermal and mineral waters. In geochemistry of hydrothermal ore deposits. 1 st edition by H.L. BARNES, New York, p. 575-631.

White D.E., 1974. Diverse origins of hydrothermal ore fluids. *Econ. Geol.* N) 69, p. 954-973.

Wise E.M., 1966. Gold and gold compounds. *Kirk-Othmer Encyclop. Chem. Technol.*, 2 nd Ed., J. Wiley et Sons, Intersci. New York, p. 683.

Wood J.M, 1972. Environmental pollution by mercury. *Adv. Environment. Sci Technol.*, vol. 2, ed. Metcalf R.L. et Pitts J.N. Wiley Intersci.

Wood J.M, Kennedy F.S., Rosen C.G, 1968. Synthesis of methyl-mercury compounds by extracts of a methanogenic bacterium. *Nature*, G.B. 220, 12 oct. pp. 173-174.

Wood J.M., Penley M.W., Desimone R.E., 1971. Mechanisms for methylation of mercury in the environment.