

Université Cadi Ayyad

Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech



Département des Sciences de la Terre



Laboratoire des Géorressources
Unité associée au CNRST
(URAC42)

Groupe « MANAGEM »



AGM (Akka Gold Mining) - Oumjrane

Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Master Sciences et Techniques

Eau et Environnement



Dénoyages miniers et hydrochimies élémentaire et isotopique des eaux souterraines de la région d'Oumjrane

(Bassin du Maider, Anti-Atlas oriental du Maroc)

Par : Yassine Ait Brahim

Sous la direction de :

A. AIT LEMKADEME

A. BENKADDOUR

Soutenu le 29 juin 2012 devant la commission d'examen composée de :

A. BACHNOU

D. CHAFIKI

A. AIT LEMKADEME

A. BENKADDOUR

2011/2012

Remerciements

Je ne pourrais commencer ce rapport sans présenter mes remerciements les plus sincères à mes encadrants :

- *Mr. **Ait Lemkademe Anasse**, Hydrogéologue et Géochimiste à MANAGEM. Grâce à lui j'ai eu l'opportunité de bénéficier de ce stage de fin d'étude. Je le remercie de m'avoir accompagné sur le terrain et de mettre à ma disposition l'ensemble des données nécessaires à ce travail. Merci d'avoir fait preuve d'une grande patience à mon égard et de n'épargner aucun effort pour le bon déroulement de mon stage.*
- *Mr. **Benkaddour Abdelfattah**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech. Auprès de lui, j'ai reçu une aide constante, éclairée et stimulante. Ses conseils riches d'enseignements et ses encouragements ont été pour moi d'un grand apport. Je le remercie pour sa disponibilité, ses critiques, ses propositions d'amélioration et son précieux suivi du mémoire.*

*Je suis très sensible à la présence des membres du jury, mes professeurs **Chafiki Driss** et **Bachnou Ali**. Je tiens à les remercier d'avoir accepté, sans aucune réserve, d'évaluer ce travail et de me faire part de leurs remarques.*

*Je voudrais également adresser ma gratitude à Mr. **Agoussine M'bark**. Merci pour le temps précieux qu'il m'a consacré et de m'avoir fait part de son grand savoir.*

Mes gratitudes vont aussi à tous les personnels de la mine et à mes chers amis que j'ai rencontrés à Oumjrane. Grâce à eux j'ai passé mon séjour dans les meilleures conditions. Merci de m'avoir accueilli et d'avoir fait de mon stage un moment profitable.

Des remerciements particuliers sont adressés à ma famille et à mes collègues. Merci de m'avoir encouragé et apporté un grand support moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Merci pour leur bonne humeur et leur esprit sans cesse positif et optimiste.

Enfin je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à la réalisation de ce mémoire, et dont les noms ne figurent pas dans ce document. Que toutes ces personnes trouvent ici l'expression de ma profonde estime et gratitude.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé - Abstract

Introduction 1

Présentation du projet minier « Oumjrane » 2

I. Cadre général

1. Cadre géographique et administratif 3
2. Cadre géologique 4
 - a. Cadre lithostratigraphique 7
 - b. Caractéristiques des principaux gîtes filoniens 10
3. Hydro-climatologie 11
 - a. Climat 11
 - b. Hydrologie 13
4. Hydrogéologie 15
 - a. Les nappes alluvionnaires 15
 - b. Les nappes des terrains anciens 16

II. Dénoyages miniers à Oumjrane

1. Evolution du niveau piézométrique à Oumjrane 17
2. Suivi du dénoyage d'Afilou n'Khou et Bounhass 21
 - a. Forages d'eau 21
 - b. Evolution du rabattement 21
 - c. Suivi du débit de pompage 23
3. Plan de dénoyage du chantier « Oumjrane – Nord » 24

III. Caractérisation hydro-chimique des eaux souterraines d'Oumjrane

1. Inventaire des points d'eau et échantillonnage 30
2. Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines 36
 - a. Paramètres physico-chimiques 36

b. Les éléments chimiques majeurs.....	40
c. Les éléments chimiques en trace	40
3. Identification des faciès chimiques	41
4. Analyse en composantes principales	46
IV. Origine de la minéralisation des eaux souterraines d'Oumjrane	
1. Corrélations ioniques	49
2. Indices de saturation	52
V. Comportement hydrogéochimique des eaux de rejet de la mine de Bounhass	
1. Evolution du pH et de la conductivité	55
2. Evolution géochimique.....	57
3. Indices de saturation et quantification des dépôts.....	58
VI. Apport de l'hydrochimie isotopique	
1. Généralités	60
2. Relation $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$	63
3. Localisation des aires de recharge	67
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	73
Annexes.....	74

Liste des figures :

	Pages
Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude	3
Figure 2 : Douars et emprise des douars dans la zone du projet	4
Figure 3 : Localisation du domaine étudié dans un schéma géologique	5
Figure 4 : Zone étudiée ; a : Image Landsat 7 ; b : Schéma structural	6
Figure 5 : Coupe synthétique de la couverture paléozoïque de l'Anti Atlas oriental	8
Figure 6 : Géologie locale	9
Figure 7 : Précipitations mensuelles des principales stations de la zone d'étude	11
Figure 8 : Températures mensuelles des principales stations de la zone d'étude	12
Figure 9 : Carte schématique du bassin du Maider	13
Figure 10 : Réseau hydrographique au voisinage du secteur minier Oumjrane	14
Figure 11 - a : Localisation des points d'eau servant au suivi de la piézométrie à Oumjrane.	18
Figure 11 - b : Localisation des points d'eau servant au suivi de la piézométrie à Oumjrane	19
Figure 12 : Evolution du niveau piézométrique à Oumjrane	20
Figure 13 : Evolution du rabattement à Afilou n'Khou	22
Figure 14 : Evolution du rabattement à Bounhass	22
Figure 15 : Evolution des débits de pompage à Bounhass	23
Figure 16 : Conduites rouillées et corrodées à Bounhass	24
Figure 17 : Géologie de surface à Oumjrane –Nord	24
Figure 18 : Situation d'Oumjrane-Nord par rapport aux filons d'Oumjrane	25
Figure 19 : Coupe géologique passant par le sondage OMN6	27
Figure 20 : Coupe géologique passant par le sondage OMN3	28
Figure 21 : Coupe géologique passant par le sondage OMN4	28
Figure 22 : Plan de dénoyage d'Oumjrane-Nord	29
Figure 23 : Localisation des points d'eau échantillonnés pour des analyses chimiques	34
Figure 23 - a : Minéralisation globale des eaux : conductivités électriques (mS/cm)	38
Figure 23 - b : Minéralisation globale des eaux : conductivités électriques (mS/cm)	39
Figure 24 : Faciès chimiques des eaux par secteur géographique	41
Figure 25 : Faciès chimiques de la nappe profonde d'Oumjrane	42
Figure 26 : Chimie des eaux de la nappe profonde. A : Amerdoul, Takhourt et secteurs miniers B : Tismoumine	43
Figure 27 : Faciès chimique de la nappe alluvionnaire d'Oumjrane	44

Figure 28 : Chimie des eaux de la nappe alluvionnaire. A : Secteur Oumjrane B : Tagourt, Takcha et Tifekhssite	45
Figure 29 : Diagramme de composantes principales (variables)	47
Figure 30 : Diagramme des composantes principales (individus)	48
Figure 31 : Relation conductivité / Cl	49
Figure 32 : Relation conductivité/ SO ₄	49
Figure 33 : Relation Na / Cl. a : nappe alluvionnaire b : nappe profonde	50
Figure 34 : Relation Ca / SO ₄	51
Figure 35 : Rapport Sr/Ca des eaux souterraines d'Oumjrane	52
Figure 36 : Indices de saturation des eaux souterraines d'Oumjrane	53
Figure 37 : Schéma de la séguia de Bounhass	54
Figure 38 : Puits implanté dans le lit d'oued Taghbalt	54
Figure 39 : Evolution du pH et de la conductivité de l'eau dans la Séguia	55
Figure 40 : Buse d'eau n°1 à Bounhass	55
Figure 41 : Sédiments déposés par l'eau de rejet de Bounhass dans le lit d'oued Taghbalt	56
Figure 42 : Faciès chimique des eaux de rejet de la mine de Bounhass	57
Figure 43 : Evolution amont - aval de la chimie des eaux de rejet de Bounhass	58
Figure 44 : Indices de saturation des eaux de rejet de Bounhass	59
Figure 45 : Modalités du comportement isotopique des eaux naturelles	61
Figure 46 : Localisation des points d'eau échantillonnés pour des analyses isotopiques	63
Figure 47 : Relation ² H/ ¹⁸ O des eaux souterraines d'Oumjrane	64
Figure 48 : Relation éléments chimiques / teneurs isotopiques en ¹⁸ O	66
Figure 49 : Gradient altitude et composition isotopique en oxygène-18	68
Figure 50 : Localisation de l'aire de recharge de la nappe alluvionnaire d'Oumjrane	68
Figure 51 : Principales failles du Mairer	69
Figure 52 : Carte géologique simplifiée du Haut et Moyen Drâa	71

Liste des tableaux :

	Page
Tableau 1 : Douars et secteurs / sous douars dans la zone du projet	3
Tableau 2 : Vitesse moyenne mensuelle du vent dans la station d'Alnif	12
Tableau 3 : Evaporation moyenne mensuelle dans la station d'Alnif	12
Tableau 4 : Les principaux oueds de la zone d'étude	14
Tableau 5 : Points d'eau servant au suivi de la piézométrie à Oumjrane	17
Tableau 6 : Caractéristiques des forages d'eau de Bounhass et d'Afilou n'Khou	21
Tableau 7 : Coordonnées des forages d'eau prévus pour le dénoyage d'Oumjrane-Nord	29
Tableau 8 : Points d'eau de l'aire de l'étude par douar	30
Tableau 9 : Points d'alimentation en eau potable dans la zone étudiée	32
Tableau 10 : Points d'eau à proximité des sites miniers	33
Tableau 11 : Points d'eau représentant chaque douar	33
Tableau 12 : Résultats des analyses physico-chimiques des points d'eau échantillonnés	35
Tableau 13 : Matrice de corrélation entre les variables de l'ACP	47
Tableau 14 : Mesures de la conductivité des eaux dans oued Taghbalt	56

Résumé

L'alimentation en eaux potables dans la région d'Oumjrane (appartenant à l'Anti-Atlas oriental du Maroc) s'effectue à partir des puits captant l'aquifère alluvionnaire ou profond.

L'activité minière a montré que les formations ordoviciennes présentent des venues d'eau importantes. Cependant, le suivi de la piézométrie entre Janvier 2011 et Juin 2012 a mis en évidence un rabattement global dans la région.

Les eaux souterraines présentent, naturellement, des minéralisations élevées. L'analyse hydrochimique a montré que l'origine des fortes concentrations en sels observées dans les eaux de la région est liée à la dissolution des évaporites et au processus de dédolomitisation. D'autre part, les eaux de rejet de la mine de Bounhass ont montré une élévation du pH et une baisse de la minéralisation de l'amont vers l'aval, suite à la volatilisation et à la déposition des sédiments qui ont été quantifiés de 386 à 495 tonnes par an.

L'approche isotopique a indiqué une alimentation locale de la nappe alluvionnaire, à partir de Jbel Saghro, et une recharge profonde de la nappe primaire provenant du Haut Atlas.

Abstract

The drinking water supply in the area of Oumjrane (part of the eastern Anti-Atlas of Morocco) is carried from wells capturing the alluvial or the deep aquifer.

Mining activity showed that the Ordovician rocks have significant water inflows. However, the monitoring of the hydraulic head between January 2011 and June 2012 showed an overall drawdown in the region.

Groundwater resources present a naturally high mineralization. The hydrochemical analysis showed that the origin of high salt concentrations observed in the waters of the region is related to the dissolution of evaporites and dedolomitisation process. On the other hand, the wastewater from the mine of Bounhass showed an increasing pH and a decreasing mineralization from the upstream to the downstream, due to volatilization and deposition of sediments that have been quantified for about 386 to 495 tons per year.

The isotopic approach showed a local supply of alluvial groundwater, from Jbel Saghro and a deep recharge of the primary aquifer, coming from the High Atlas.

Introduction

La région d'Oumjrane, faisant objet de cette étude, appartient au bassin du Maider situé dans la zone orientale de l'Anti-Atlas du Maroc. Elle est connue par ses importantes potentialités minières suite à l'abondance des filons minéralisés.

Cette région est caractérisée par un climat aride à présaharien, des températures élevées et des faibles précipitations. Dans ces conditions, les ruissellements de surface sont rares, ainsi l'alimentation en eaux potables de la population s'effectue à partir des puits captant selon les cas l'aquifère superficiel alluvionnaire ou l'aquifère primaire profond.

Les forts pompages et l'activité minière ont montré que les ressources en eau souterraine sont particulièrement abondantes. Néanmoins, ces eaux présentent, naturellement, des minéralisations élevées dans la majorité des puits, ainsi qu'un comportement corrosif qui se manifeste au niveau des conduites hydrauliques. D'où la nécessité d'une étude consacrée à l'origine des eaux souterraines dans la région et aux mécanismes de leur minéralisation.

Le présent rapport rentre dans le cadre du projet de fin d'études du Master Sciences et Techniques « Eau et Environnement » à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech. Il a été effectué au sein de l'AGM-Oumjrane (Akka Gold Mining), filiale du groupe minier Managem. Il a pour objectif de répondre aux principales questions liées aux eaux souterraines de la région d'Oumjrane.

Après avoir présenté le contexte général de la région étudiée, nous aborderons en premier lieu le suivi du dénoyage minier et des rabattements aux alentours des deux mines actives dans la région (Bounhass et Afilou n'Khou), et nous essaierons de proposer un plan de dénoyage du nouveau chantier Oumjrane-Nord.

La deuxième et la plus importante partie de ce travail est dédiée à l'étude hydro-chimique et isotopique des eaux souterraines de la région. Cette partie a pour but de comprendre l'origine de la salinité des eaux et leur comportement géochimique. Ceci à travers la quantification des divers paramètres physico-chimiques, l'identification des faciès chimiques, l'analyse statistique des données, la vérification des corrélations ioniques, le calcul des indices de saturation... Par ailleurs, l'outil isotopique (^{18}O et ^2H) est utilisé afin de comprendre les conditions d'alimentation des nappes d'eau de la région et de localiser les aires potentielles de leur recharge.

Présentation du projet minier « Oumjrane »



Le projet minier d'Oumjrane se situe à environ 14 km de Nkob suivant la route reliant Ouarzazate-Agadir-Tazarine (fig.3). Il est encaissé dans les formations ordoviciennes profondément fracturées lors de l'orogénèse hercynienne. De point de vue lithologique, ces formations sont de nature gréseuse et gréso-pélique.

L'ensemble des filons minéralisés peut-être subdivisé géographiquement en deux grands ensembles :

- Groupe Oumjrane-Bounhass : c'est le groupe le plus proche au village d'Oumjrane à 3,5 km et le plus promoteur. Il peut être considéré comme le mieux reconnu par les travaux de recherche antérieurs et il renferme les principales ressources délimitées. Ce groupe est composé de trois principaux filons : Bounhass, Oumjrane-Nord et Afilou n'Khou.
- Groupe de Boukerzia : Il se situe plus au NE du premier groupe à 12 km avec les principaux filons : Rich Merzoug, Boukerzia, Filon Nord et Filon Est. Le potentiel est moyen.

De point de vue minéralogique, le minerai d'Oumjrane est formé de la chalcopryrite et la pyrite. La blende et la galène sont rarement présentes. La gangue est formée essentiellement d'Ankérite, plus ou moins de quartz et de barytine tardive. Les minéraux de cuivre ne sont pas argentifères.

I. Cadre général

1. Cadre géographique et administratif

La région d'Oumjrane fait partie de l'Anti-Atlas oriental. Elle renferme quatre principaux sites miniers : Bounhass, Afilou n'Khou, Rich Merzoug et Boukerzia.

Le projet est situé au Sud-Est du douar Ait Saadane à environ 30 km de piste non goudronnée sur le territoire de la commune de Hsia relevant du cercle d'Alnif dans la province de Tinghir.



Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

L'espace où se situe le projet consiste en la vallée de l'Oued Taghbalt que longent quatre douars principaux, à savoir Oumjrane, Tifekhssite, Takcha et Tismoumine. Ce dernier se situe à l'extérieur de la vallée, à 7 km à vol d'oiseau au Sud de Bounhass.

Tableau 1 : Douars et secteurs / sous douars dans la zone du projet (Beniakhi, 2011)

Douar	Secteur
Takcha	Amerdou
	Imine Tagourt
	Tagourt
	Takcha
Tifekhssite	Tagounite
	Tifekhssite
	Imine Titrite
Oumjrane	Oumjrane aval
	Oumjrane amont
	Takhourt
Tismoumine	Tismoumine

Le sous douar Amerdou est une extension du douar Takcha. Des affinités directes les associent. Il s'agit de fermes nouvellement implantées dans le reg nord du douar principal sur la base des pompages. Les secteurs de Tagourt et Imin'Tagourt remplissent l'espace situé entre le village principal de Takcha et l'extension d'Amerdou.

Le secteur de Takhourt représente pour le village d'Oumjrane exactement ce que représente Amerdou pour le village de Takcha. Il se situe à 5 km à vol d'oiseau au Sud d'Oumjrane. La différence est que Takhourt, au contraire d'Amerdou, n'abrite pas d'habitations.

Pour le douar Tifekhssite, se situant dans la vallée, sur la rive droite de Taghbalt, les secteurs Tagounite et Imine Titrite sont des zones purement agricoles localisées respectivement en amont rive gauche et en aval rive droite.

La carte qui suit présente la situation géographique des agglomérations existant dans la zone du projet et l'emprise des douars :

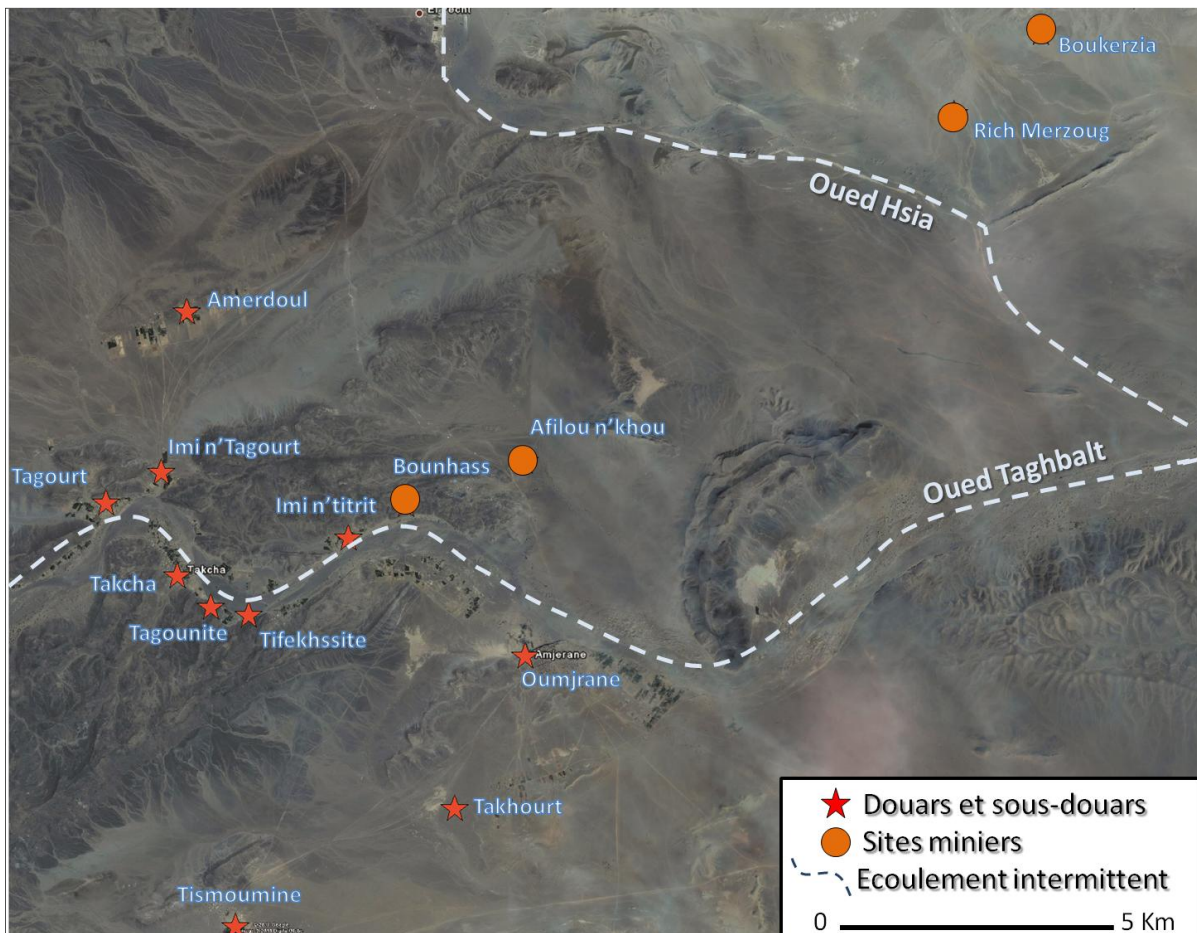
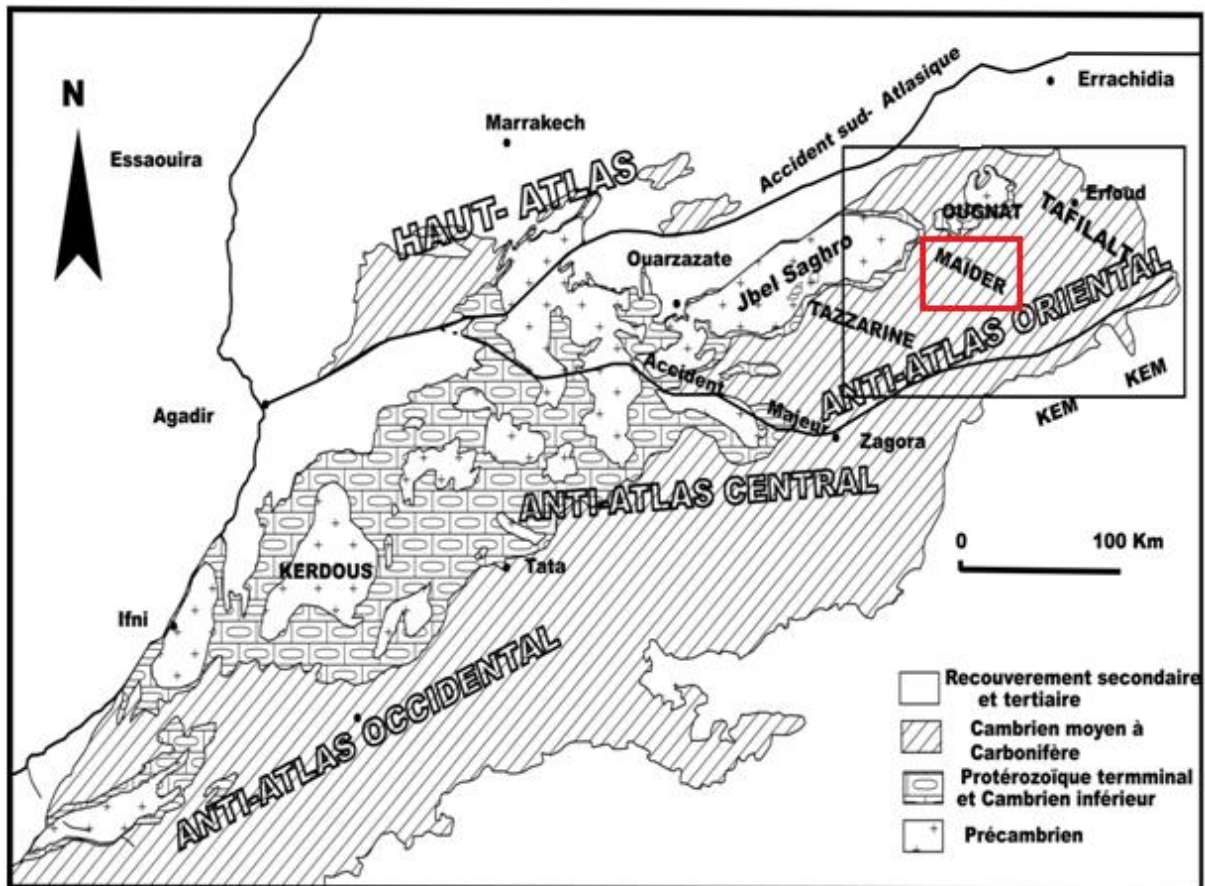


Figure 2 : Douars et emprise des douars dans la zone du projet

2. Cadre géologique

L'aire de l'étude fait partie du domaine de l'Anti-Atlas, les formations géologiques qui le constituent sont d'âges variés allant du Précambrien jusqu'au Quaternaire. Les horizons précambriens y affleurent en faveur de multiples massifs et boutonnières constitués essentiellement de terrains granitisés, magmatisés et métamorphisés. Sur ces termes, repose en discordance angulaire une couverture sédimentaire paléozoïque, elle-même recouverte de terrains mésozoïques, cénozoïques puis quaternaires.



Secteur d'étude

Figure 3 : Localisation du domaine étudié dans un schéma géologique (In Baïdier, 2007).

Le secteur d'étude est situé dans la partie Est de l'Anti-Atlas. Il est limité à l'Est par la Hamada de Guir, au Sud par celle de Kem Kem, à l'Ouest par la cuvette du Tazzarine et s'ennoe au Nord sous les bassins créacés et tertiaires d'Errachidia-Boudenib et d'Ouarzazate.

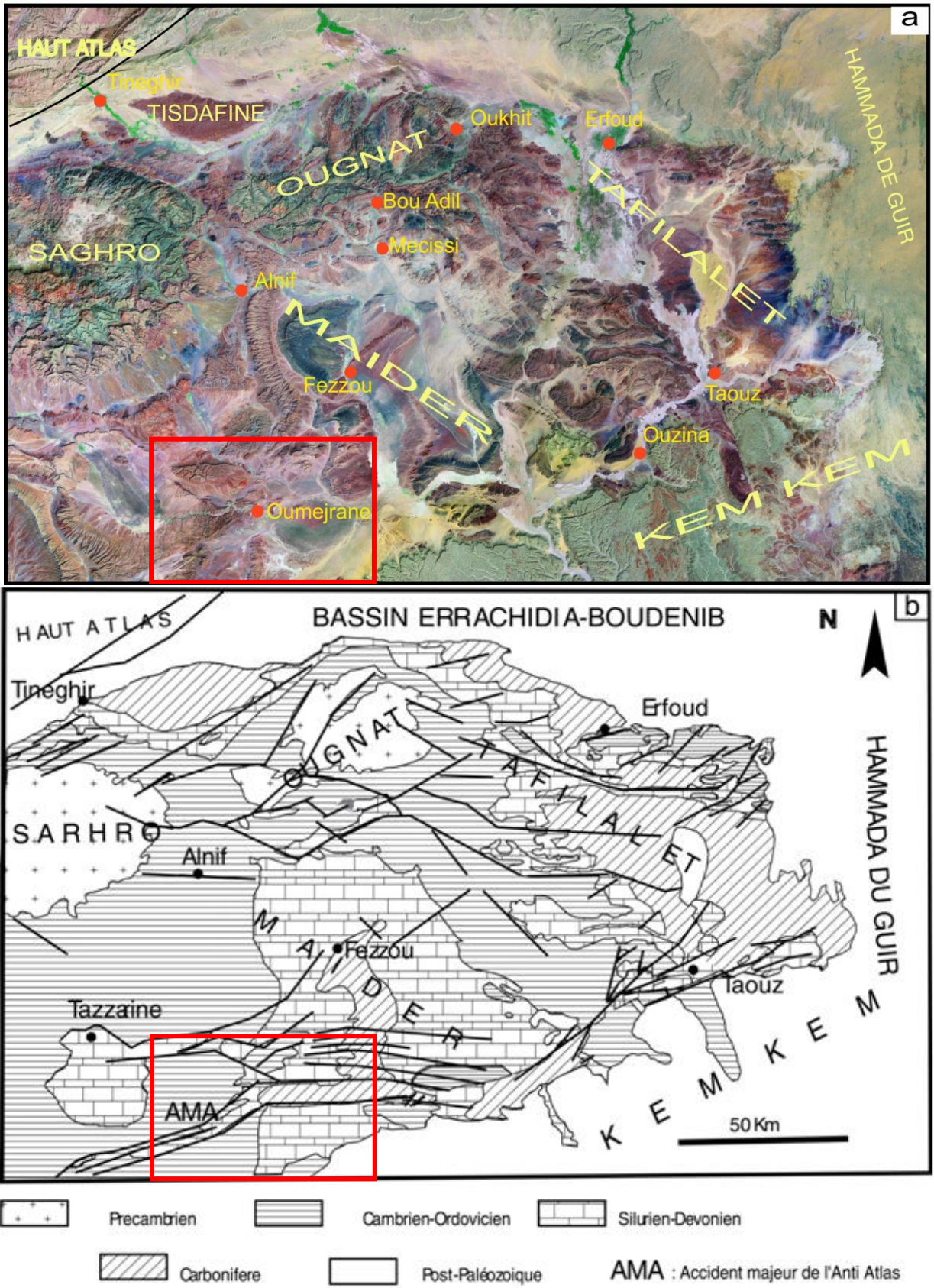


Figure 4 : Zone étudiée ; a : Image Landsat 7 ; b : Schéma structural (Baïdder, 2007)

a. Cadre lithostratigraphique

Le distinct filonien se localise à 90 km à l'ENE de Zagora, dans les formations subtabulaires paléozoïques affectées par l'orogénèse hercynienne : plis et failles.

Les formations ordoviciennes :

Elles représentent le principal encaissant des filons cuprifères, elles sont subdivisées en quatre groupes bien distincts qui sont de bas en haut :

- Schistes de Feijas externes, qui n'affleurent pas dans la région d'Oumjrane.
- Grès du 1^{er} Bani (grès quartzitiques).
- Grès de Ktaoua composé de formations argilo-gréseuses.
- Grès du 2^{ème} Bani (Popov et Belkasmi, 1983).

Les deux derniers groupes encaissent les filons cuprifères d'Oumjrane - Boukerzia, dont les colonnes minéralisées se localisent dans les grès du 2^{ème} Bani.

- Les grès du 1^{er} Bani :

Dans la région minière n'affleure que la partie supérieure des grès quartzitiques avec 2 niveaux d'oolithes. Ces grès représentent un encaissant à priori favorable aux ouvertures filoniennes ; dans les secteurs des principaux filons minéralisés, ils sont à une profondeur dépassant 250 m.

- Les grès de Ktaoua :

Caractérisé par une puissante sédimentation à dominance argileuse avec quelques passages de grès. La partie médiane est plus gréseuse et relativement plus favorable à la fracturation, tandis que la plupart des structures filoniennes se ferment dans les pélites (qui occupent d'importantes superficies à Boukerzia, et constituent les parties profondes d'Oumjrane).

- Les grès du 2^{ème} Bani :

Ils sont l'encaissant principal des filons minéralisés (Bounhass, Rich Merzoug ...). Ils reposent par l'intermédiaire d'un conglomérat sur une surface d'érosion. La formation est puissante d'environ 80 à 120m et se compose de :

- Grès inférieurs
- Pélites intermédiaires
- Grès supérieurs

La formation gréseuse du 2^{ème} Bani, favorable au développement des fractures est très érodée et de faible puissance dans la zone des filons, ce qui limite leur extension. Elle est pré-semée dans des grabens locaux (Afilou n'Khou par exemple) ou encaisse des filons non affleurant.

Le silurien :

Il est puissant de 100 à 150 m environ, recouvre les grès du 2^{ème} Bani, mais les affleurements sont rares et constitués d'argilites compactes avec pyrite abondante et graptolites. Son importance réside dans le fait qu'il constitue un « écran » imperméable au toit des structures filoniennes, et qu'il participe dans les caisses filoniennes au mur et au toit des filons (typique à Bounhass par exemple).

Le dévonien :

Il est pélitique à la base, carbonaté vers le sommet et affleure largement en dehors des secteurs d'extension des filons qui pratiquement ne le recoupent pas.

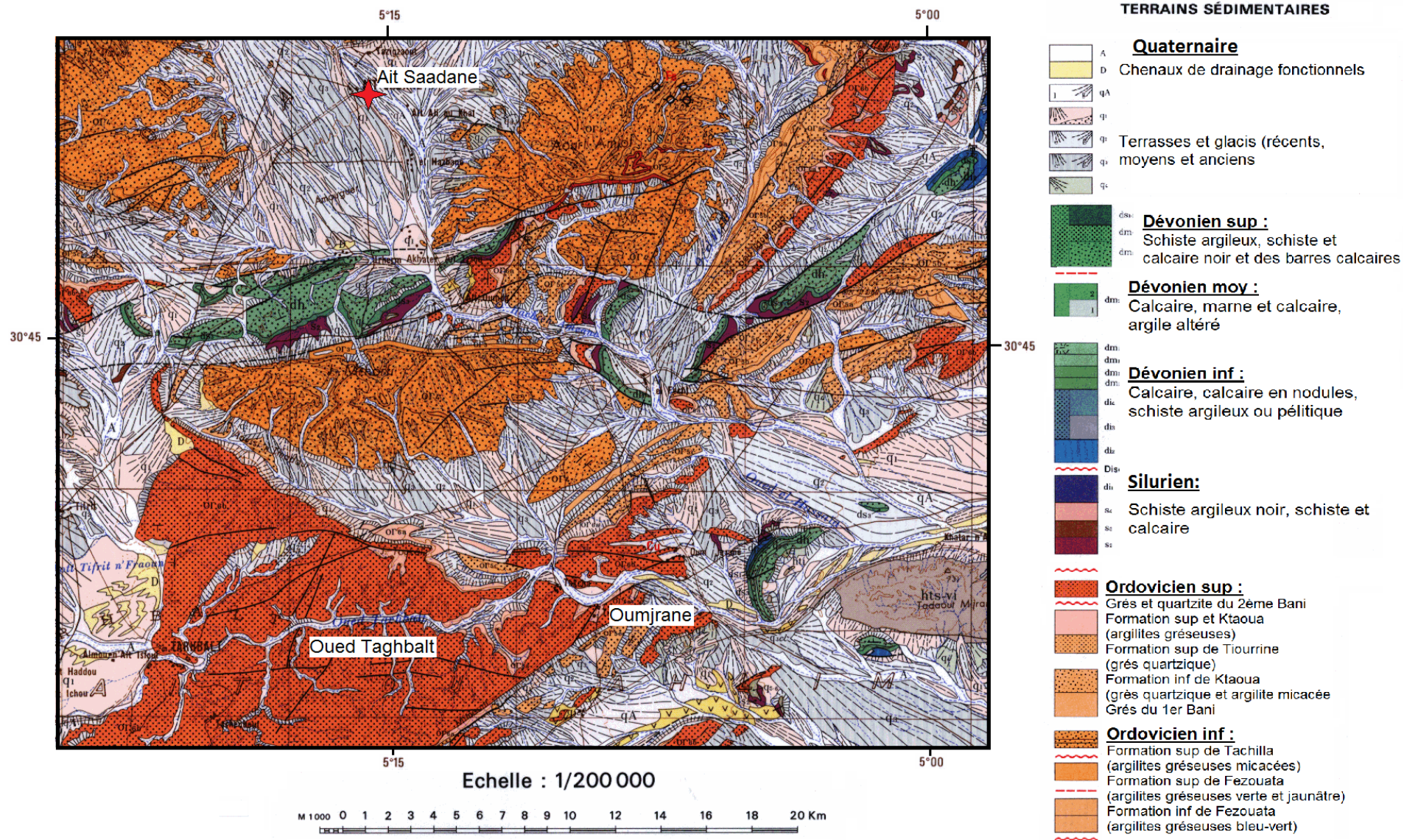


Figure 6 : Géologie locale (Extraite de la carte géologique Todra M'aidir 1 / 200 000)

b. Caractéristiques des principaux gîtes filoniens

Filon de Bounhass

Le massif de Bounhass représente une structure anticlinale d'axe presque E-W dont le flanc nord est affecté par flexures et évolue en synclinal. La structure est fortement tectonisée et recoupée par des failles dont les principales sont longitudinales de direction N80°E à N110°E. Elle est constituée de faisceaux de grès et argilites du 2^{ème} Bani.

La présence d'eau à Bounhass est un facteur connu. D'après l'étude de Ch. Boissavy (1979), le réservoir filonien de Bou N'hass renfermerait de l'ordre de 1 million de m³ d'eau, le réseau des failles représentant un drain important. Les eaux sont chlorées et sulfatées.

Filon d'Afilou n'Khou

Le filon non affleurant d'Afilou n'Khou se situe à environ 2 km 400 m au NE de Bounhass et fait partie du réseau filonien d'Oumjrane. Il est encaissé dans une faille à rejet relativement important de 60 à 100 m. Le filon est encaissé dans les grès et les argilites du 2^{ème} Bani puissants de 60 à 70 m. Une partie du toit du filon est constituée des schistes siluriens.

Le filon est dans une zone de broyage avec schistes siluriens gonflables et mylonitisés sous une nappe d'eau probablement importante (le reg est dans l'emplacement de croisement de failles régionales draineuses d'eau).

Filon de Rich Merzoug

Rich Merzoug est une petite voute anticlinale constituée de grès du 2^{ème} Bani, orientée N60-65° à flanc Sud redressé. Deux failles longitudinales N65-70° distantes de 300 m abaissent le flanc nord et encaissent deux filons de quartz, ankérite et chalcopryrite (filon principal et filon Nord). Les roches encaissantes sont représentées par les grès et les argiles gréseuses.

Les conditions hydrogéologiques sont peu connues mais le niveau hydrostatique est à faible profondeur et la faille principale est aquifère. Une venue d'eau probablement importante, au minimum de l'ordre de celle de Bounhass, est à prévoir dans les travaux miniers.

Filon de Boukerzia

Il s'agit du plus méridional filon parmi le réseau filonien de direction NE qui affecte le flanc SE du horst anticlinal à large rayon de courbure de Boukerzia dans l'axe duquel affleurent les grés du 1^{er} Bani. Le filon est encaissé dans de grès quartzitiques et des pélites gréseuses. La faille encaissant le filon est aquifère. Une importante venue d'eau avait été constatée dans les travaux miniers qui ont été arrêté au niveau -130m dans la zone sulfurée à cause des venues supérieures à 120 m³/h (Popov et Belkasmi, 1983).

3. Hydro-climatologie

a. Climat

La zone d'étude appartient au bassin hydraulique du Maider caractérisé par un climat aride à présaharien. Il se caractérise par une manifeste irrégularité inter et intra annuelle. Les précipitations décroissent généralement depuis l'Anti-Atlas en direction du Sud (www.water.gov.ma).

▪ Précipitations

Dans le bassin du Maider, les précipitations enregistrées sont très faibles. Les moyennes interannuelles pour une longue période d'observation qui s'étale de 1982 à 2007 sont de 93 mm à Tazarine et de 86 mm à Alnif.

La répartition saisonnière des pluies montre que celles-ci ont plutôt lieu en automne et au printemps, avec une prédominance des précipitations automnales.

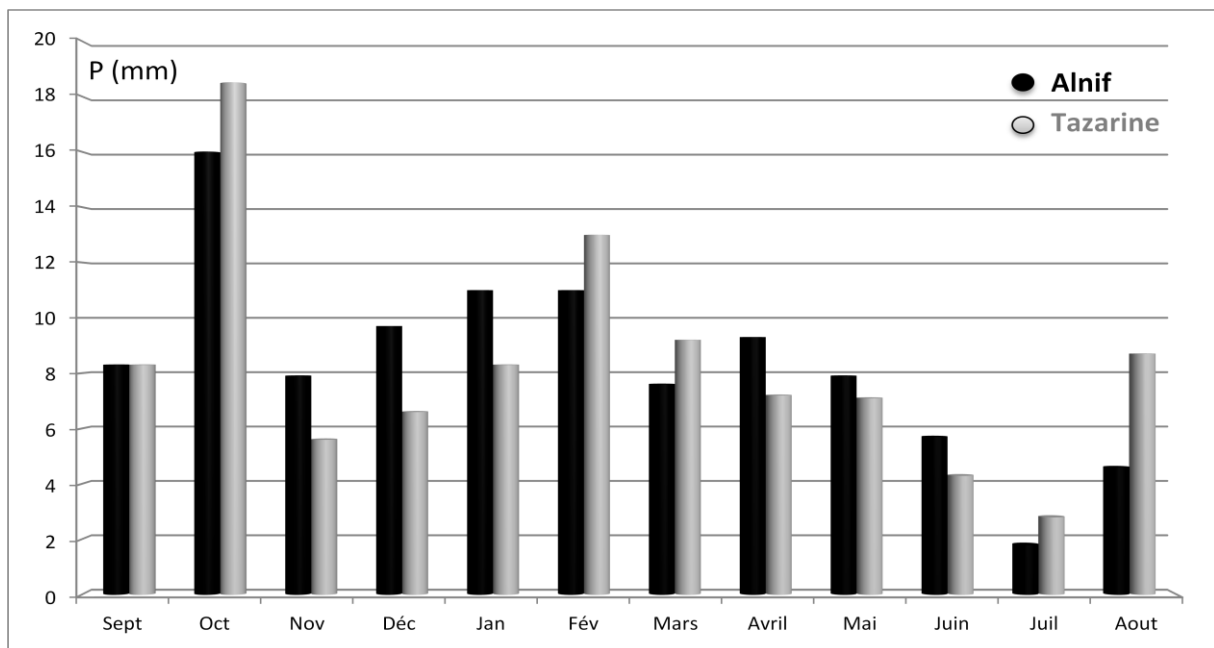


Figure 7 : Précipitations mensuelles des principales stations de la zone d'étude (Beniakhi, 2011)

▪ Températures

Les températures moyennes mensuelles enregistrées au niveau des stations d'Alnif et Tazarine du bassin versant du Maider sont présentées dans la figure ci-dessous.

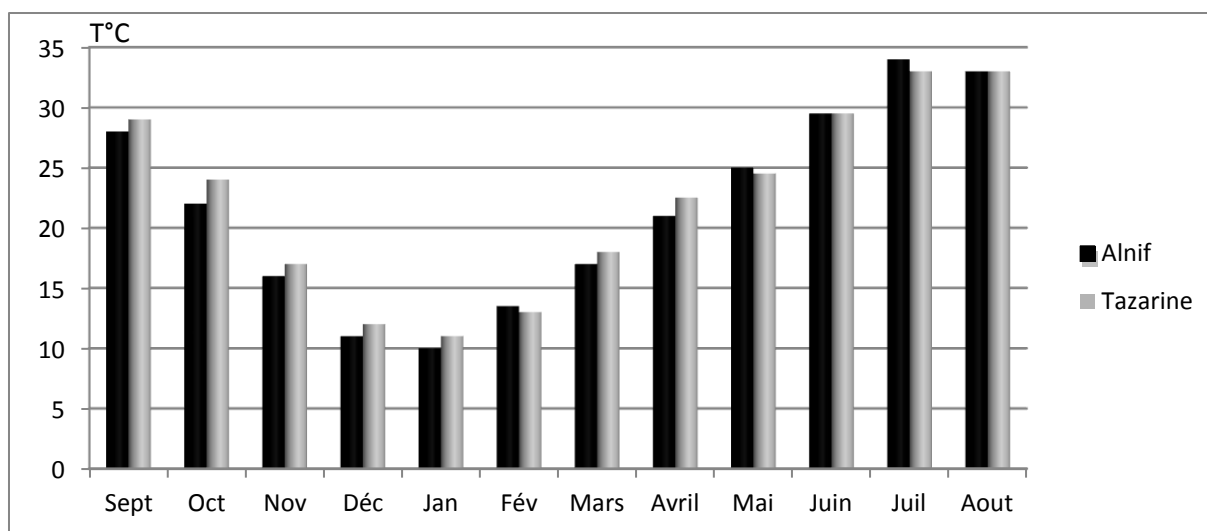


Figure 8 : Températures mensuelles des principales stations de la zone d'étude (Beniakhi, 2011)

L'analyse de ces données montre que pendant l'été, les températures moyennes dans la région varient entre 29°C et 34°C. La période la plus chaude s'étale sur quatre mois (Juin-Septembre), la température moyenne est d'environ 32°C. L'hiver est froid, la température moyenne minimale atteint 10°C.

▪ *Vents*

Les données disponibles dans la station d'Alnif concernant la vitesse moyenne mensuelle du vent sont récapitulées dans le tableau ci-après :

Tableau 2 : Vitesse moyenne mensuelle du vent dans la station d'Alnif (m/s)

Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy
Alnif	2,807	2,155	1,777	1,427	1,516	1,962	2,524	3,143	3,337	3,217	2,990	2,871	2,480

D'après ces données, la vitesse du vent dans la région est faible avec une moyenne de 2,5 m/s.

▪ *Evaporation*

L'évaporation influe beaucoup sur l'état hydrique du sol et sur les franges superficielles des eaux souterraines. Elle dépend essentiellement de la température, de l'humidité et de la vitesse du vent. La région, comme le montrent les valeurs présentées dans le tableau qui suit, est caractérisée par une très forte évaporation.

Tableau 3 : Evaporation moyenne mensuelle dans la station d'Alnif (mm)

Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
Alnif	371	254	148	99	116	140	237	315	391	484	542	489	3553

Ces données montrent également que l'évaporation des mois de Juin, Juillet et Aout est très élevée alors que le minimum est atteint au cours des mois de Décembre ou Janvier.

b. Hydrologie

Le bassin du Maider est constitué par le versant sud du Jbel Saghro drainé par les oueds Taghbalt, Hsia, Fezzou et Mcissi. L'ensemble de ces oueds convergent vers la Daya de Maider qui est drainée ensuite par l'oued Maider vers le Ghris.

Situé dans l'anti atlas oriental, le bassin du Maider est limité au Nord par le Jbel Saghro et l'Ougnat, au Sud par la Hammada de Kem-Kem, à l'Est par le bassin Ghris-Ziz et à l'Ouest par le Jbel Bani Oriental. La superficie de ce bassin est de 7.156 km² dont 60% en zone de montagne. Le réseau hydrographique se caractérise par sa densité et par sa fragmentation. L'écoulement des eaux superficielles est sporadique et le ruissellement des eaux pluviales est souvent anarchique (Combe et al., 1977).

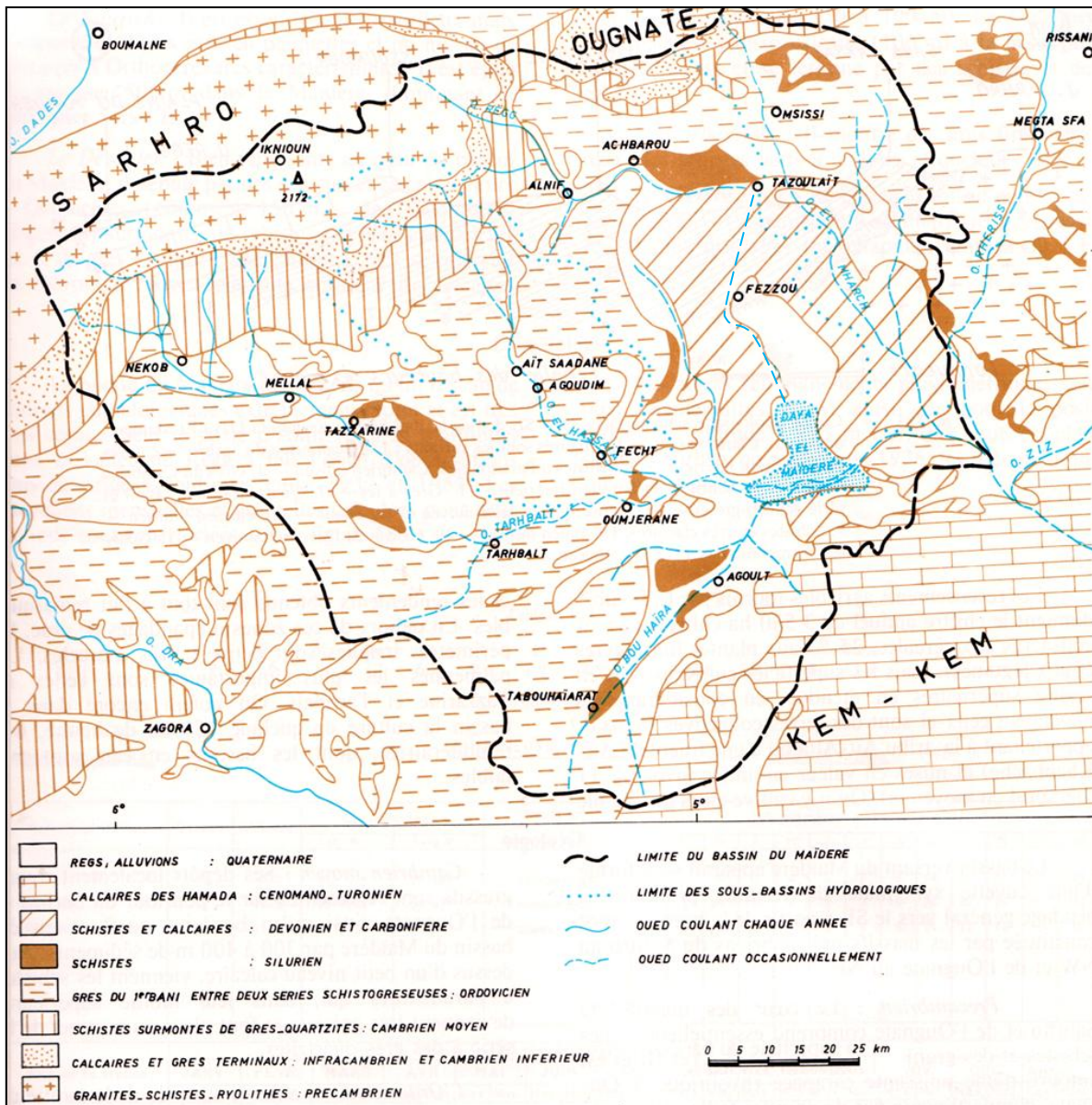


Figure 9 : Carte schématique du bassin du Maider (Combe et al., 1977)

Tableau 4 : Les principaux oueds de la zone d'étude (www.water.gov.ma)

Oued	Surface BV (Km ²)	Apport d'eau (Mm ³ /an)
Taghbalt	3274	16
Hsia	1395	7
Fezzou	1962	10
Mcissi	525	3
Total	7156	36

Le plus important affluent de l'oued Maider est l'oued Taghbalt. Situé à l'ouest du bassin de Maider, le bassin versant de l'oued Taghbalt s'étale sur une superficie de 3.274 km². Les apports moyens actualisés de l'oued Taghbalt sont de 16 Mm³/an sur des apports globaux de 36 Mm³/an à l'échelle du Maider.

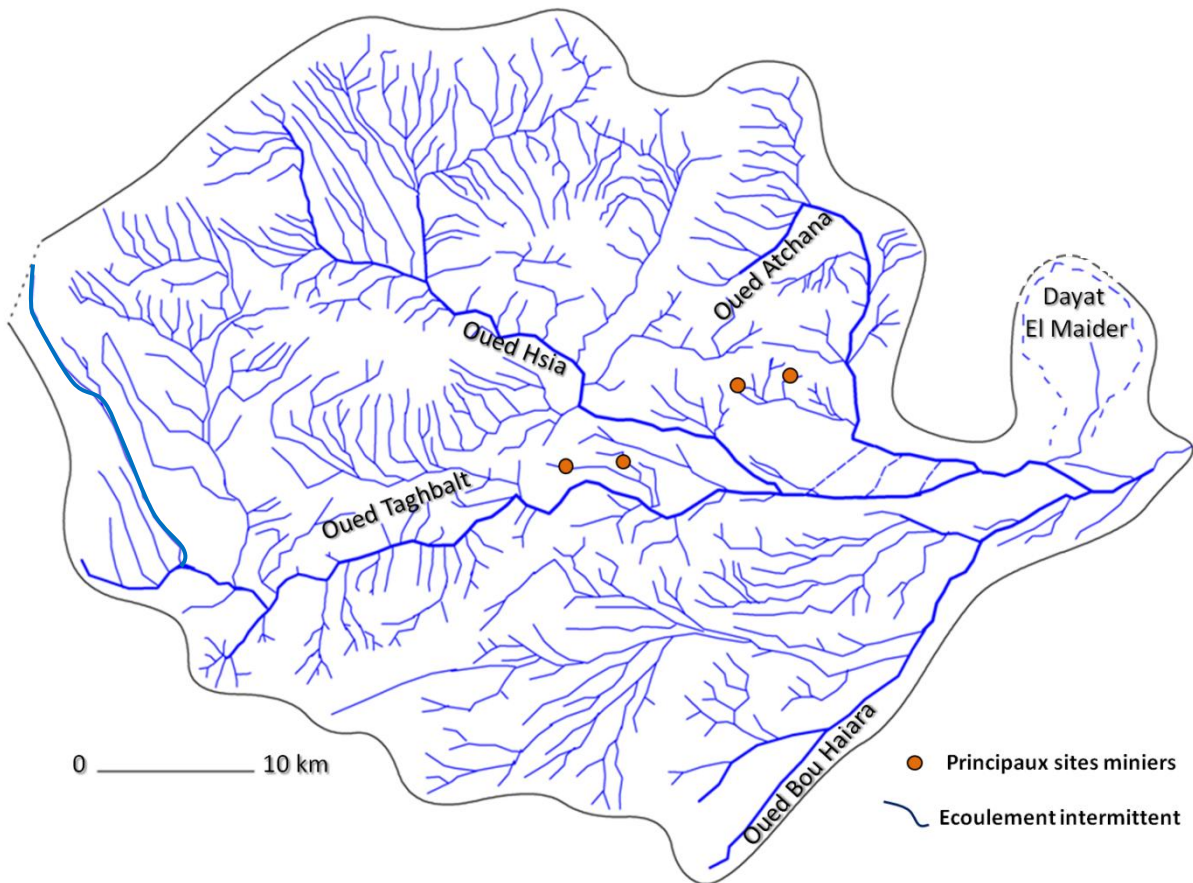


Figure 10 : Réseau hydrographique au voisinage du secteur minier Oumjrane

Dans la zone du projet, aucun écoulement de surface n'est observé. Seules des crues sporadiques doivent traverser l'oued Taghbalt périodiquement. On note en moyenne 2 à 3 crues par an (2 en automne : septembre surtout, 1 au printemps : mars), mais elles ne durent le plus souvent que quelques heures et n'atteignent pas toute la Dayat El Maider et permettent la recharge saisonnière des cuvettes alluvionnaires dans les vallées en amont de Fezzou, d'Ait Saadane ou d'Oumjrane.

4. Hydrogéologie

L'hydrogéologie du bassin du Maider est très mal connue dans l'ensemble. L'étude hydrogéologique s'est limitée en premier lieu à l'étude des sous-écoulements des principaux oueds et aux nappes phréatiques qu'ils alimentent dans les terrains du Quaternaire récent et qui se relaient pratiquement les unes les autres sans discontinuité le long des vallées.

En second lieu, des eaux souterraines profondes se manifestent spontanément dans des rares contextes (débordements et déorgements en particulier) mais surtout dans des zones de prospection minière mettant à jour des débits importants. Des manifestations carbo-gazeuses sont souvent associées à ces contextes. Les origines de ces eaux ainsi que leurs réservoirs et leurs circuits sont très peu connus. Les réseaux de failles régionales (N60 et NE) et les filons pourraient y jouer un rôle ainsi que la proximité du contact majeur avec le Haut Atlas.

La différenciation des nappes d'eaux souterraines dans la région étudiée s'est basée sur la nature litho-stratigraphique des formations aquifères et leurs profondeurs. On distingue deux grandes catégories : les nappes alluvionnaires et les nappes profondes des terrains anciens : précambrien et primaire (Combe et al., 1977).

Localement, on distingue les sous-écoulements d'Oued Taghbalt et les venues profondes à Bounhass, Boukerzia et probablement à Tismoumine et Amerdoul.

a. Les nappes alluvionnaires

Ces aquifères phréatiques se rencontrent principalement le long des vallées des principaux oueds. Elles sont constituées de dépôts alluviaux très hétérogènes (sables, graviers, limons ...) du Quaternaire et très localement du Tertiaire-Quaternaire.

La nappe alluvionnaire est caractérisée par une faible étendue et par la relation directe avec les fluctuations des facteurs climatiques. Lors des années de sécheresse, on assiste à l'assèchement des puits et au tarissement des Khettaras (Beniakhi, 2011). Les alluvions reposent sur des formations du socle constitué par des schistes. Leur épaisseur varie entre 7 et 50 mètres. L'alimentation est liée aux cours d'eau (oued Taghbalt), mais d'éventuelles drainances verticales ou abouchements latéraux ne sont pas à exclure.

Faute de réalisation d'une carte piézométrique, à cause des forts pompages que connaît la zone de l'étude, les sens d'écoulement des eaux de la nappe alluvionnaire sont déduits des observations du réseau hydrographique de surface : les sous écoulements dans les alluvions s'étendent le long de l'oued de Taghbalt, ils se font dans les formations plio-quaternaires très hétérogènes dont la direction est celle de l'oued.

b. Les nappes des terrains anciens

Plusieurs formations sont susceptibles d'intérêt dans le bassin du Maider, mais si un certain nombre d'interventions ont été envisagées, à Alnif et Tazzarine-Taghbalt notamment, aucune réalisation n'a jamais été entreprise. Aucun travail hydrogéologique d'ensemble n'a encore été fait dans ce bassin et l'inventaire des sources issues du précambrien et du primaire n'est toujours pas disponible. Pourtant, des travaux miniers récents ont rencontré des venues d'eau importantes, artésiennes, de l'ordovicien, ce qui encourage à entreprendre des recherches dans ce secteur si défavorisé.

Cependant, c'est l'Ordovicien supérieur qui a jusqu'à présent apporté les plus grandes surprises. Des travaux miniers ont en effet mis en évidence des forts débits dans les grès du sommet de la série (équivalents des grès du deuxième Bani) du secteur d'Oumjrane dans la basse vallée de l'oued Taghbalt. Ces grès supérieurs ont une puissance de l'ordre de 100 m et comportent des intercalations de schistes peu épaisses : le secteur est assez tectonisé et les failles contiennent les minéralisations. Des puits de mine profonds ont rencontré systématiquement des venues d'eau importantes, surtout à Oumjrane. De l'avis des mineurs, les venues d'eau sont liées aux fractures qui constituent des drains naturels. Ces formations pourraient par conséquent être intéressantes en de nombreux secteurs du bassin où elles affleurent largement et sont facilement accessibles par des puits ou de courts sondages à implanter dans des zones de fractures (Combe et al., 1977).

II. Dénoyages miniers à Oumjrane

Le pompage de l'eau est nécessaire dans toutes les exploitations souterraines, donc afin de garder la mine en service, il est important d'épuiser les eaux d'infiltration.

Dans le présent chapitre, nous essaierons de décrire en bref les résultats des différents travaux liés aux pompages (le suivi du rabattement dans la zone de l'étude ainsi que le suivi des dénoyages miniers à Afilou n'Khou et à Bounhass), puis nous proposerons le plan de dénoyage du nouveau chantier minier « Oumjrane-Nord ».

1. Evolution du niveau piézométrique à Oumjrane

Le suivi de l'évolution de la piézométrie à Oumjrane s'est basé sur les résultats de deux campagnes piézométriques réalisées en deux périodes (Janvier 2011 et Juin 2012) et qui ont concerné 16 points d'eau appartenant à différents secteurs d'Oumjrane.

Tableau 5 : Points d'eau servant au suivi de la piézométrie à Oumjrane

Points d'eau	Secteur	X (km)	Y (km)	Z (m)	Niveau piézométrique (m)	
					Jan-2011	Juin-2012
OJ09	Oumjrane amont	525588	406730	720	711,1	708,6
OJ12	Oumjrane amont	526293	406604	422	415,7	Puits sec
OJ12'	Oumjrane amont	-	-	715	-	696,6
OJ32	Oumjrane amont	526734	405382	720	703,9	699
OJ53	Oumjrane aval	527994	405176	720	-	713,2
OJ80	Oumjrane aval	529468	404780	719	-	710,2
OJ116	Oumjrane aval	531680	404592	720	712	713,1
OJ117	Oumjrane aval	527129	406660	723	716,4	691,3
OJT40	Takhourt	528172	402770	750	-	731,4
OJT51	Takhourt	527427	402439	751	737,9	733,4
AM12	Amerdoul	521701	409952	737	711,8	711,4
TAG37	Tagourt	521157	406584	729	716,4	712
TAG38	Tagourt	520555	405555	729	723	716,4
TIF37	Tifekhssite	524589	406295	720	710,7	692,2
TIF01	Tifekhssite	523515	405338	715	710,2	701
TIS06	Tismoumine	522898	400190	753	747,9	747,8

Les points d'eau OJ12', OJT40, OJ80 et OJ53 ne peuvent servir à la comparaison à cause d'un manque de données relatives à l'ancien niveau piézométrique.

A l'exception du point OJ116 qui a dévoilé une élévation du niveau d'eau de l'ordre de 1,1 mètre, les résultats ont montré une baisse du niveau piézométrique dans l'ensemble des points d'eau étudiés. Cette baisse est soulignée dans les points TIF37 et OJ117 (-18,5 et -25,1 mètres respectivement) et le point OJ12 qui est actuellement sec, alors qu'elle est moins importante au niveau des points TIS06 et AM12 (-0,1 et -0,4 mètres respectivement).

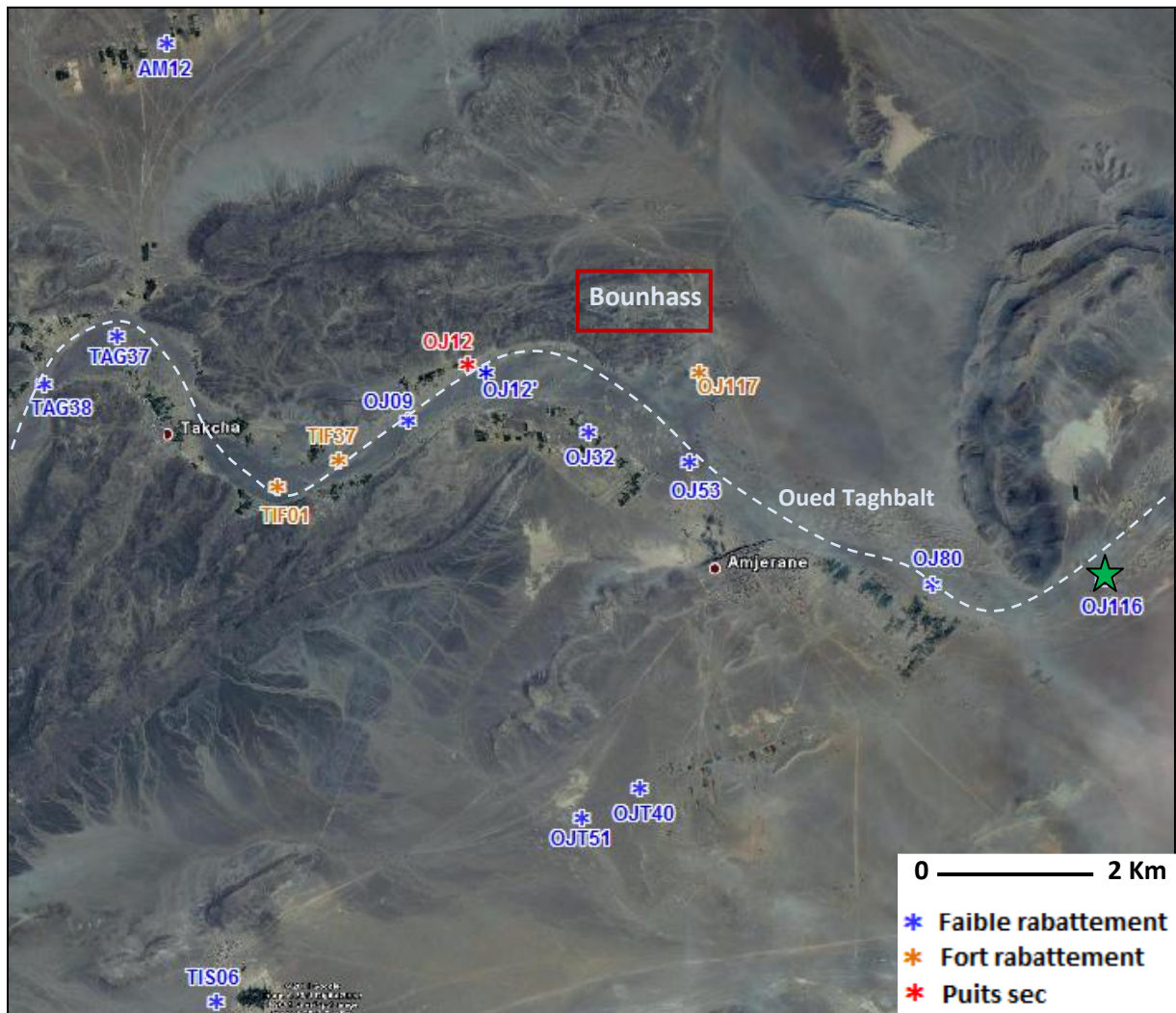


Figure 11 - a : Localisation des points d'eau servant au suivi de la piézométrie à Oumjrane

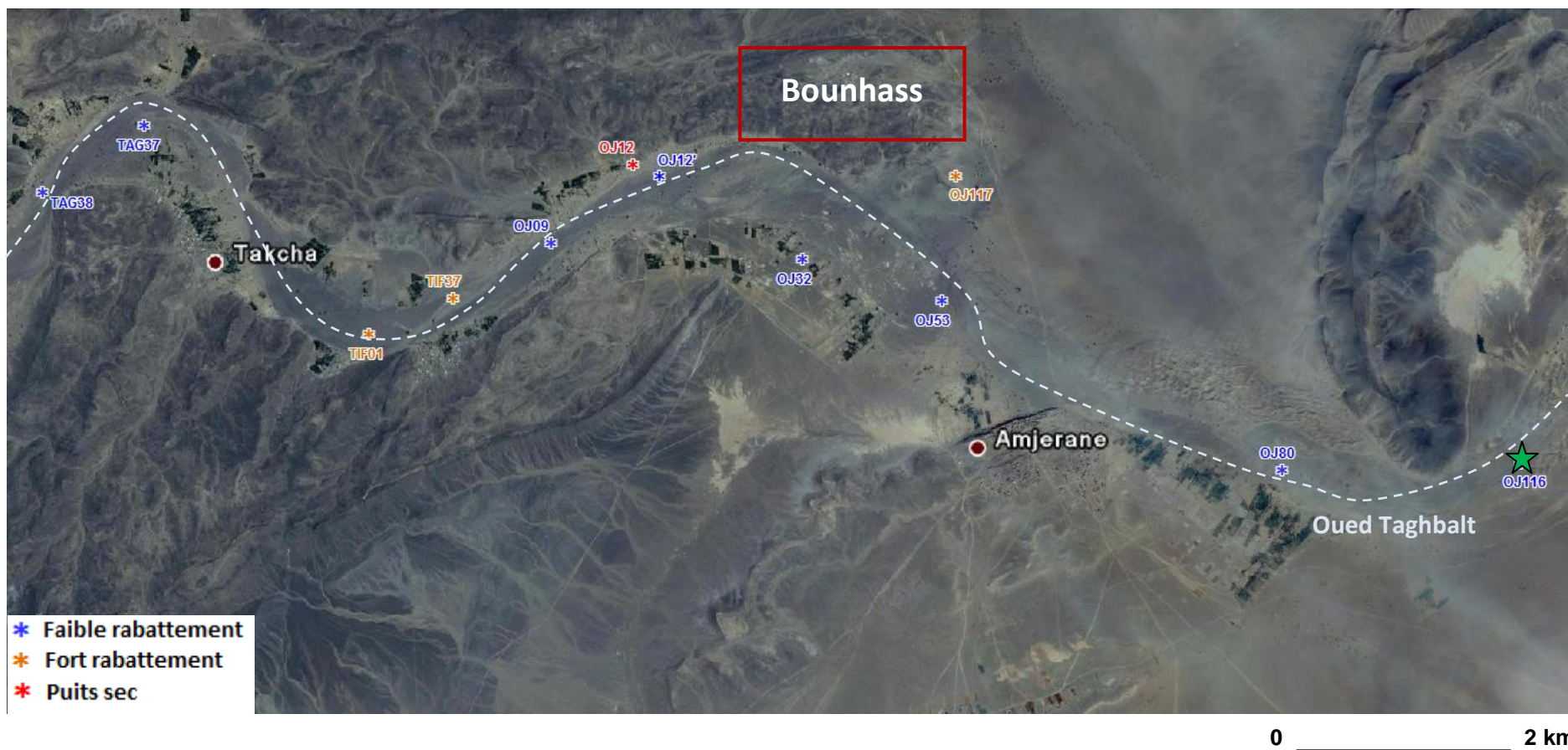


Figure 11 - b : Localisation des points d'eau servant au suivi de la piézométrie à Oumjrane

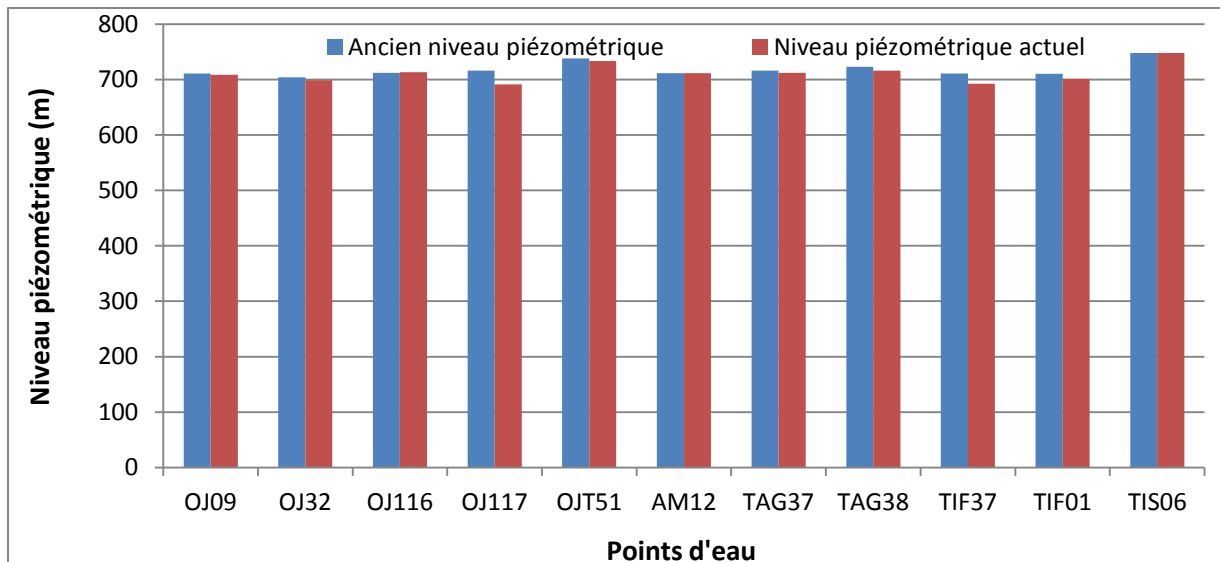


Figure 12 : Evolution du niveau piézométrique à Oumjrane

La baisse globale du niveau d'eau dans la région d'Oumjrane, peut être expliquée par deux principales raisons :

- Les fortes exploitations des eaux souterraines par les habitants de la région, principalement dans la vallée d'oued Taghbalt, pour des raisons d'alimentation en eau potable ou pour l'irrigation (87 puits équipés à Takcha, 19 à Tifekhssite, 143 à Oumjrane et 5 à Tismoumine).
- Les pompages de la mine de Bounhass, avec un débit total moyen d'environ 70 l/s.

L'effet de la saisonnalité n'est pas à négliger : la première campagne a été réalisée en Janvier 2011, période des hautes eaux, alors que la deuxième a eu lieu en Mai 2012, période n'ayant pratiquement connue aucune précipitation.

- Les points d'eau AM12 et TIS06 sont situés en amont de la vallée d'oued Taghbalt, donc à une distance importante de la mine de Bounhass et des zones habitées ou exploitées pour l'irrigation ; ils sont donc les moins influencés par les forts pompages de la région.
- D'autre part, le puits OJ116 (situé en aval, dans le lit d'Oued Taghbalt), bien qu'il soit également éloigné des zones de pompage, il est probablement alimenté par les eaux de dénoyage qui proviennent de la mine de Bounhass et qui sont jetées dans l'oued. Ceci explique l'élévation relative au niveau piézométrique dans ce puits.
- La baisse du niveau d'eau dans les points TIF37, OJ12 et OJ117 est due à deux effets combinés : la faible distance par rapport à la mine Bounhass et des zones de captage des eaux qui sont concentrés à proximité de ces puits ; ils sont donc les plus touchés par les pompages, ceci explique l'importante chute du niveau piézométrique dans ces puits.

2. Suivi du dénoyage d'Afilou n'Khou et Bounhass

a. Forages d'eau

Six forages d'eau ont été implantés dans le site Bounhass (SH1, SH2, SH3, SH4, SH5 et SH7), tous au sud du filon principal, et quatre forages dans le site d'Afilou n'khou (SHAF1, SHAF2, SHAF3 et SH6) en vue de leur mise en service pour le dénoyage des deux mines (annexes n.1 et n.2 p.74)

A Bounhass, on note que le forage SH2 fut stérile sur 200 mètres. Il a capté les séries schisteuses de la formation Ktaoua au cœur de l'anticlinal bordant au sud de l'enclave de Bounhass. Le dénoyage de Bounhass se fait actuellement au niveau de SH1, SH4 et SH7, alors que le dénoyage d'Afilou n'Khou se fait à partir du forage SHAF1.

Tableau 6 : Caractéristiques des forages d'eau de Bounhass et d'Afilou n'Khou

Site minier	CODE	Profondeur	Diamètre	Remarque
Bounhass	SH1	89 m	8,5"	Equipé
	SH2	200 m	8,5"	Stérile
	SH3	117 m	8,5"	Non équipé
	SH4	121 m	12"	Equipé
	SH5	150 m	8,5"	Equipé
	SH7	173 m	12"	Equipé
Afilou n'Khou	SH6	185 m	12"	Non équipé
	SHAF1	120 m	17"	Equipé
	SHAF2	130 m	17"	Non équipé
	SHAF3	113 m	12"	Non équipé

Un suivi journalier est entrepris touchant le niveau d'eau et un suivi hebdomadaire concerne les débits du pompage.

b. Evolution du rabattement

A Afilou n'khou, l'évolution journalière du niveau d'eau montre une baisse continue. Le niveau piézométrique actuel s'établit à environ 654,5 mètres, soit 8,5 mètres en dessous du niveau -50 mètres où s'effectue l'exploitation du minerai actuellement.

Par contre, à Bounhass, l'évolution du rabattement se traduit par un rythme irrégulier expliqué par l'arrêt et le démarrage des pompes en raison des différents travaux effectués au niveau des forages (changements, pannes, approfondissement...). Cependant, l'évolution globale montre une tendance nette vers la baisse du niveau piézométrique qui s'établit à environ 624 mètres, soit à environ 24 mètres en dessous du niveau -80 mètres où s'effectue l'exploitation du minerai actuellement.

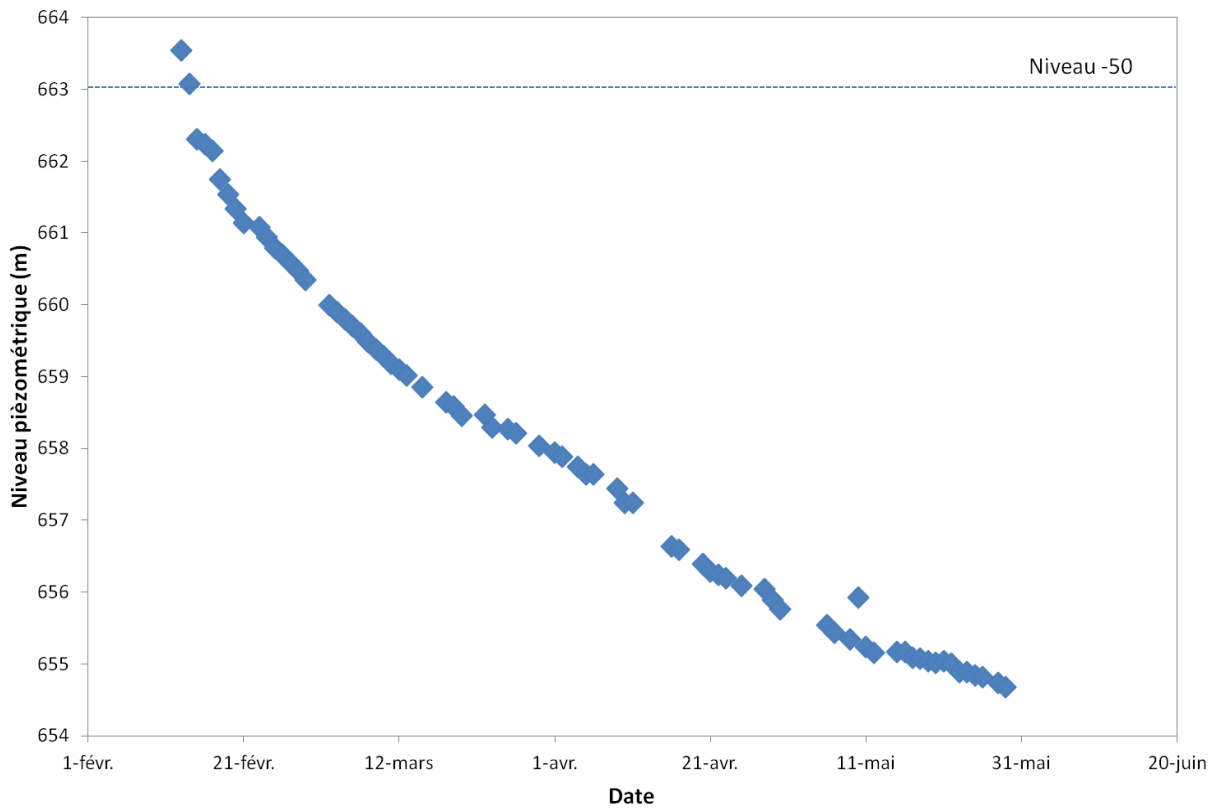


Figure 13 : Evolution du rabattement à Afilou n'Khou

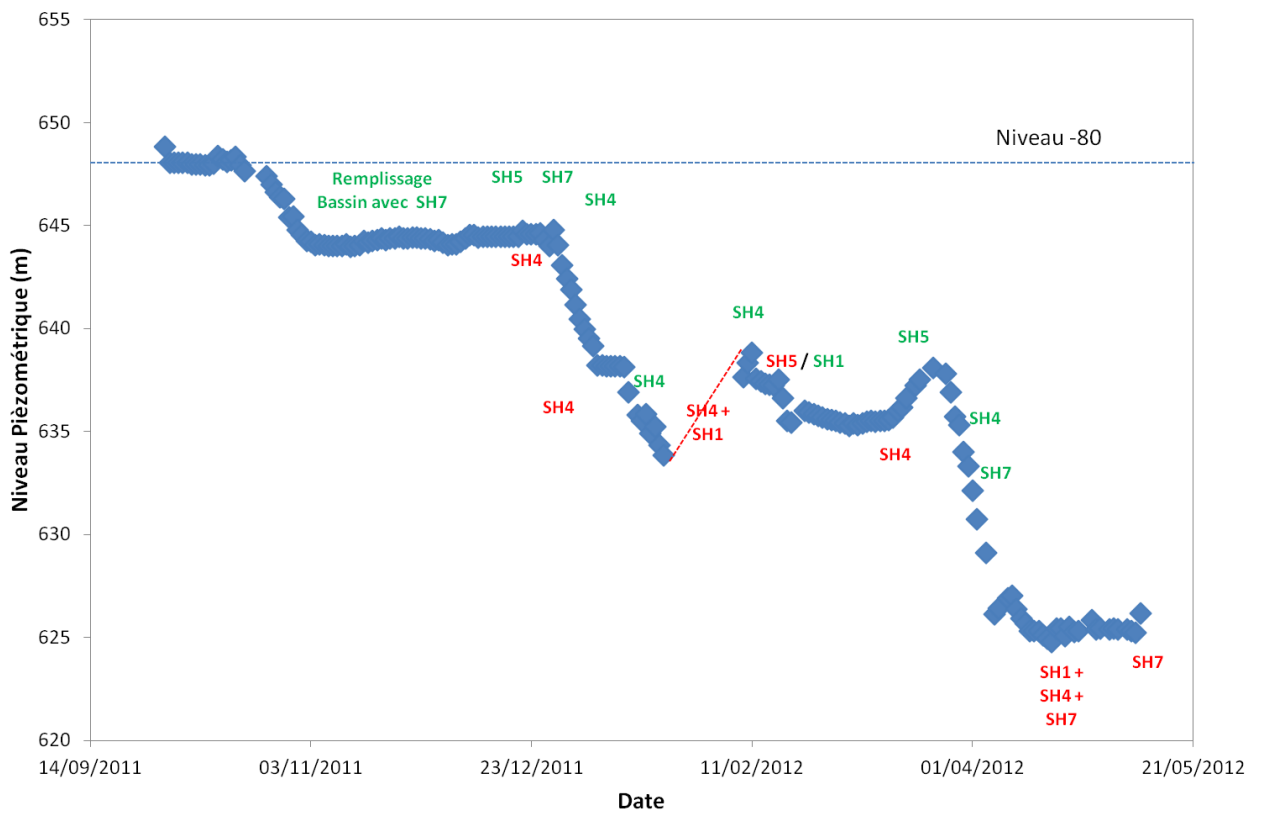


Figure 14 : Evolution du rabattement à Bounhass

c. Suivi du débit de pompage

A Afilou n'Khou, le débit de pompage est de l'ordre de 30 l/s et ne montre pas des variations significatives. A Bounhass, dans le forage SH1, le débit de pompage ne montre pas d'importantes fluctuations : il varie entre 15 et 22 l/s, alors que la variabilité est plus importante au niveau des forages SH4 et SH7 pour lesquels les débits varient respectivement entre 17 à 31 l/s et 15 à 30 l/s.

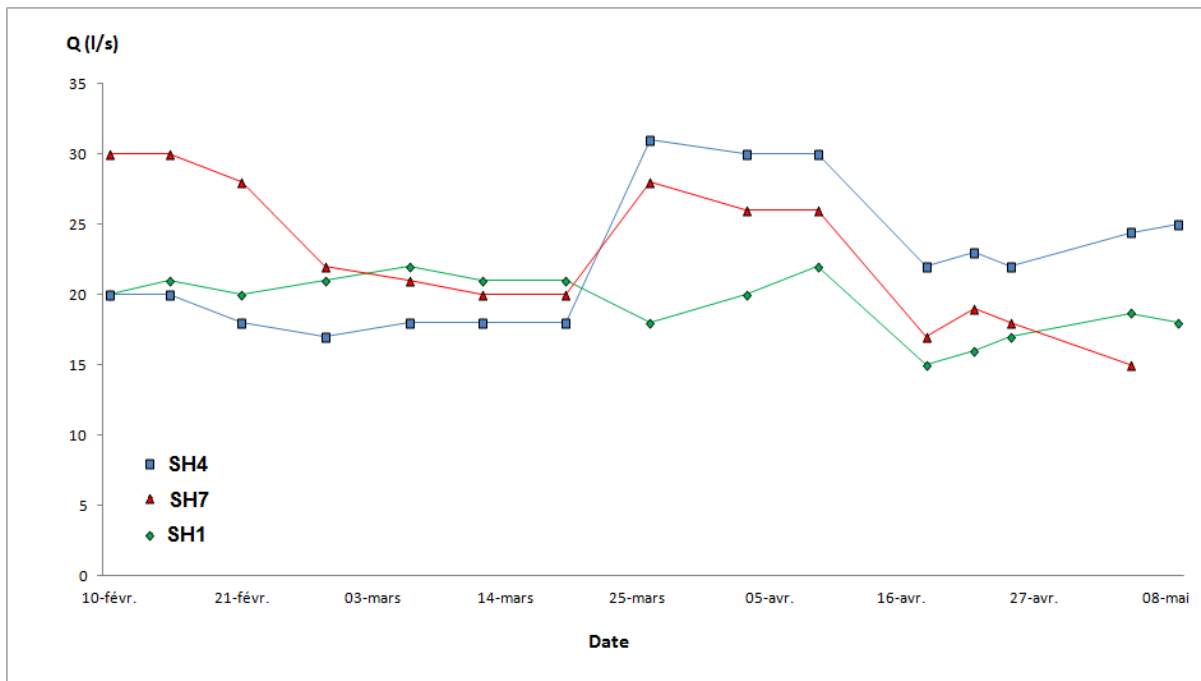


Figure 15 : Evolution des débits de pompage à Bounhass

Les fluctuations des débits sont essentiellement expliquées par les importantes fuites d'eau au niveau des conduites hydrauliques qui sont souvent corrodées suite à l'acidité de l'eau et les fortes teneurs qu'ils présentent en gaz corrosifs.

La présence de H_2S et l'acidité de l'eau se traduit au niveau des pompes hydrauliques par la rouille et la corrosion des conduites (qui sont de nature métallique et corrodable lorsqu'elles sont mouillées). Ceci augmente les fuites d'eau et se traduit pas la baisse du débit et la remontée de l'eau, ce qui cause un problème pendant l'exploitation.

A Bounhass, on change les tiges des pompes dès qu'on s'aperçoit qu'il y'a une remontée du niveau d'eau et que le débit d'eau pompée est faible ; alors qu'il existe des solutions simples qui permettent d'augmenter la durée de vie des tiges, telles que l'utilisation des tiges galvanisées. Le recours à ces solutions n'a pas encore été entamé à Bounhass car elles ne sont pas réalisables économiquement.



Figure 16 : Conduites rouillées et corrodées à Bounhass

3. Plan de dénoyage du chantier « Oumjrane – Nord »

Le filon d'Oumjrane-Nord est situé à 600 m environ au Nord de Bounhass à une direction N120 à N130.

Géologie du site

La lithologie dominante à Oumjrane-Nord est composée par des grès et des schistes d'âge Ordovicien. On note aussi la présence d'un recouvrement d'âge récent quaternaire ou plio-quaternaire, composé essentiellement de sables et de reg. Le filon visé pour l'exploitation s'étend sur une direction générale WNW-ESE sur une longueur qui dépasse 500 m.

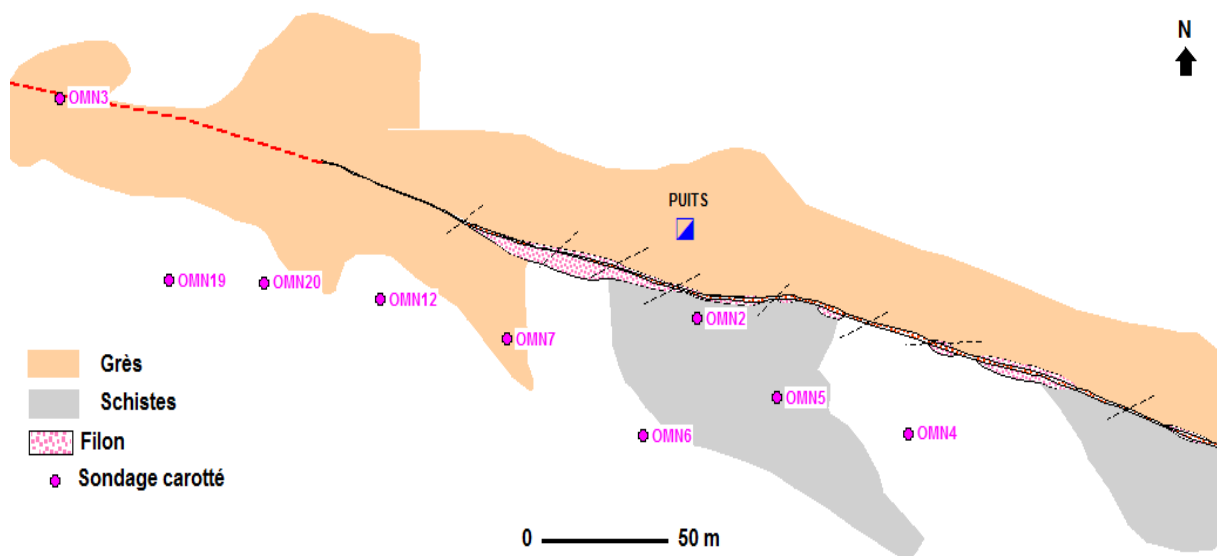


Figure 17 : Géologie de surface à Oumjrane –Nord (source : AGM-Oumjrane)

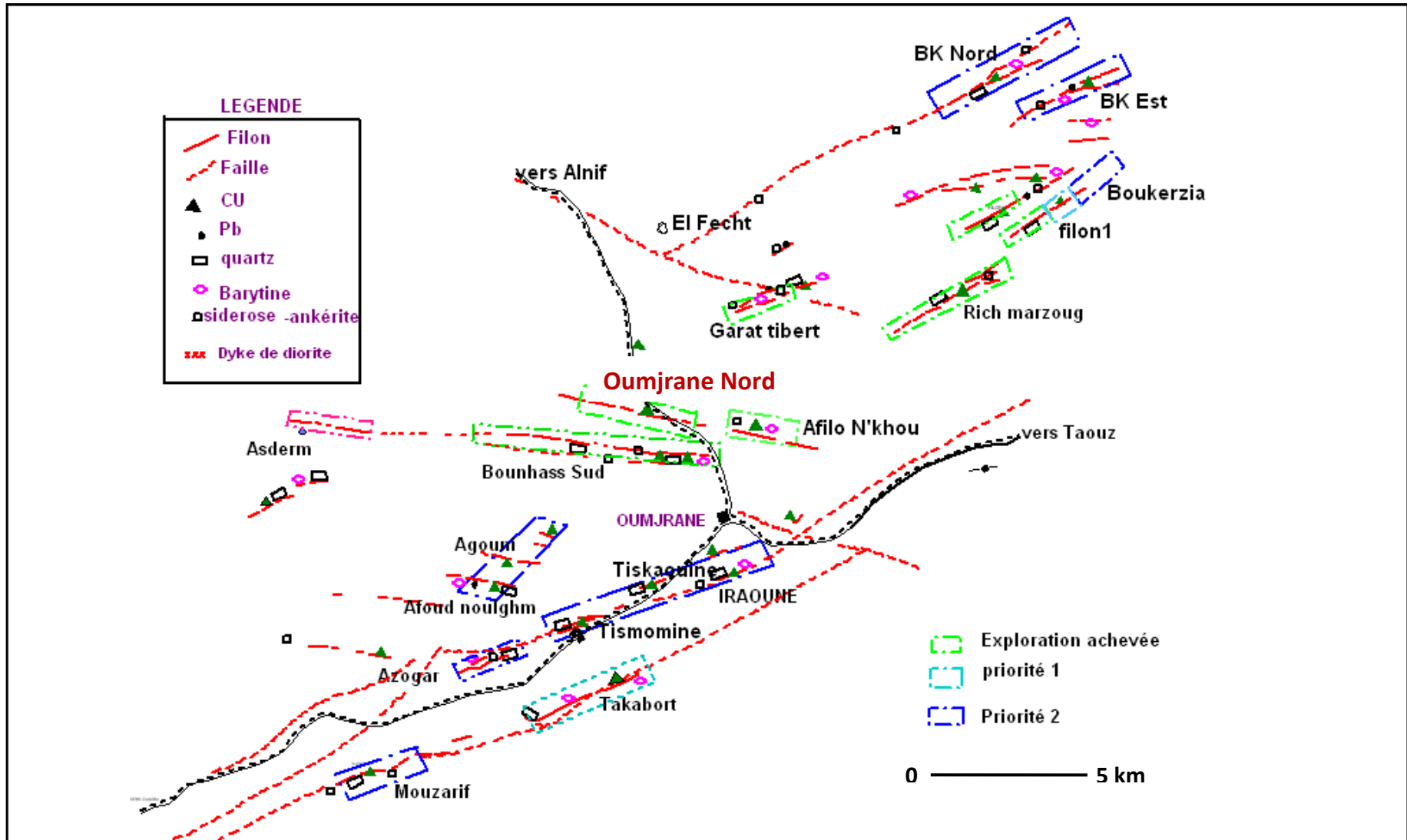


Figure 18 : Situation d'Oumjrane-Nord par rapport aux filons d'Oumjrane (source : AGM-Oumjrane)

La lithostratigraphie d'Oumjrane-Nord est analysée grâce aux résultats des campagnes de sondages miniers (9 sondages carottés ont été effectués au sud du filon principal).

La structure générale du site minier Oumjrane-Nord est constituée de la succession lithologique suivante du bas en haut :

- Des niveaux schisteux et gréseux qui se présentent en alternance :
 - Schistes inférieurs
 - Grès inférieurs
 - Deuxièmes schistes intermédiaires
 - Grès intermédiaires
 - Premiers schistes intermédiaires
 - Grès terminaux
- Des niveaux constitués de formations récentes peu épaisses comportant des alluvions, des galets et des sables.

Emplacement des forages d'eau

Pour choisir l'emplacement optimum des forages d'eau qui serviront au dénoyage du chantier Oumjrane-Nord, une attention particulière a été donnée aux paramètres suivants :

- L'écoulement des eaux souterraines : venant principalement de l'ouest (déduit par analogie aux autres filons minéralisés de la région : la structure filonienne présente à la fois la minéralisation, les manifestations carbo-gazeuses et les principales venues d'eau souterraine) ;
- La distance entre le filon et les forages d'eau envisagés : les forages d'eau doivent être implantés à une distance proche du filon, de telle façon à ce que le pompage crée un cône de rabattement qui va dénoyer le filon au maximum possible ;
- Le pendage du filon : déduit à partir des coupes géologiques, pour éviter un éventuel croisement entre le forage d'eau implanté et la structure minéralisée.

Dans notre cas, les forages d'eau seront tous proposés au sud du filon principal, parce que c'est là où les sondages miniers ont été effectués et on en a donc des informations concernant la succession lithostratigraphique.

Pour que les forages présentent des venues d'eau importantes, il est recommandé de les implanter dans des endroits qui présentent des niveaux gréseux aquifères à des profondeurs élevées. D'un autre côté, pour qu'ils puissent atteindre une grande profondeur, il est

recommandé de les implanter dans des zones qui présentent des niveaux schisteux épais car ceux-ci sont les plus faciles dans la foration.

Finalement, en tenant compte de l'ensemble des paramètres précités, trois forages d'eau ont été choisis de la façon suivante :

Le premier forage F1, sera implanté au commencement de l'activité minière à Oumjrane-Nord de telle façon à avoir une distance minimale avec le puits hérité de l'ancienne activité minière ; parce que c'est là où l'exploitation va recommencer. Son emplacement a été choisi grâce à la coupe géologique passant par le sondage carotté OMN6 : le forage est prévu être distant de 20 mètres de la structure filonienne et de 42 mètres du puits de l'exploitation.

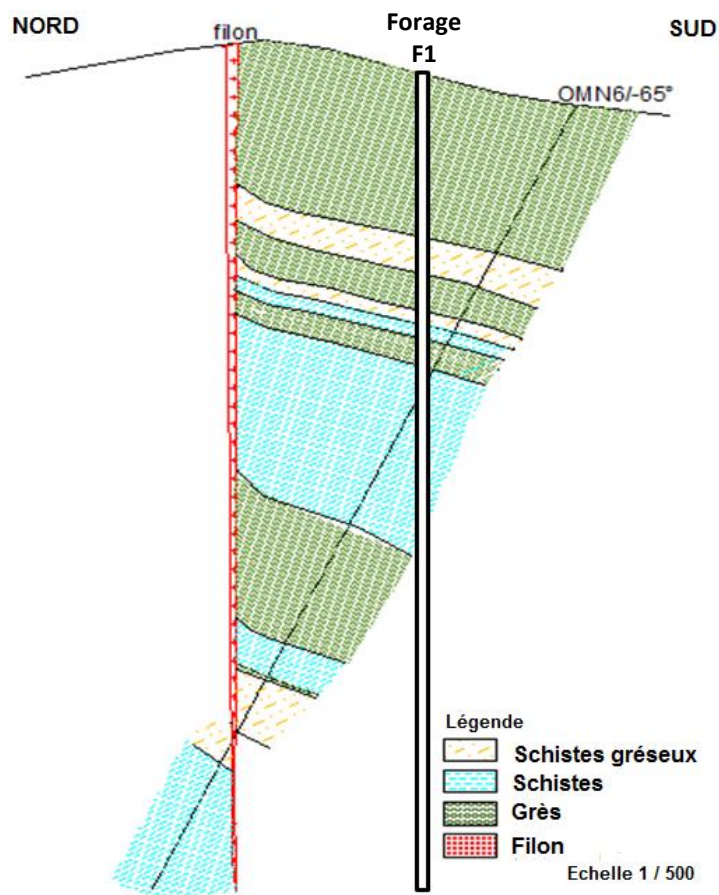


Figure 19 : Coupe géologique passant par le sondage OMN6

Le deuxième forage, F2, sera implanté à l'Ouest du premier forage F1, de telle façon à bloquer les importantes venues d'eau souterraines qui pourraient atteindre le principal puits d'exploitation et dénoyer la partie ouest du filon. L'emplacement choisi pour le forage F2 s'est basé sur la coupe géologique du sondage OMN3.

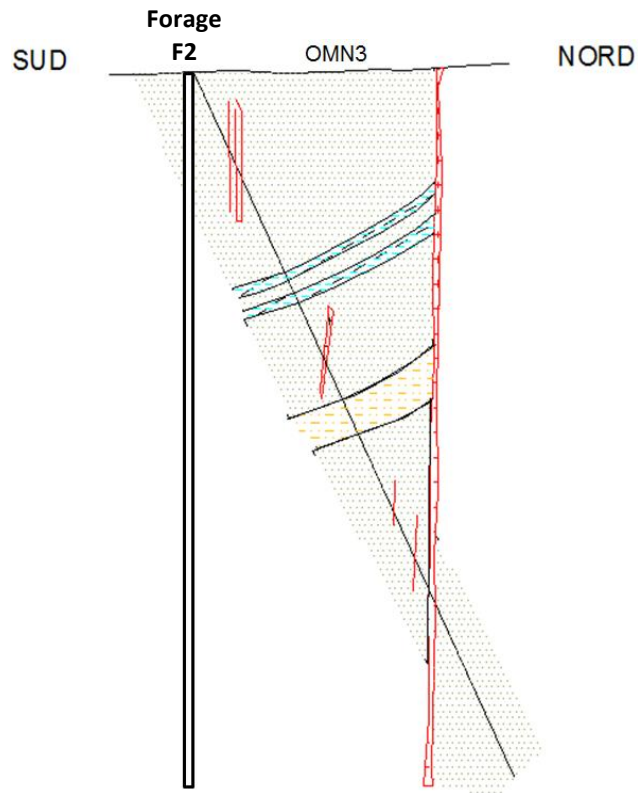


Figure 20 : Coupe géologique passant par le sondage OMN3

Le dernier forage, F3, sera implanté à l'Est du forage F1. Il servira au dénoyage de la partie Est du filon. Son emplacement s'est basé sur la coupe géologique passant par le sondage OMN4.

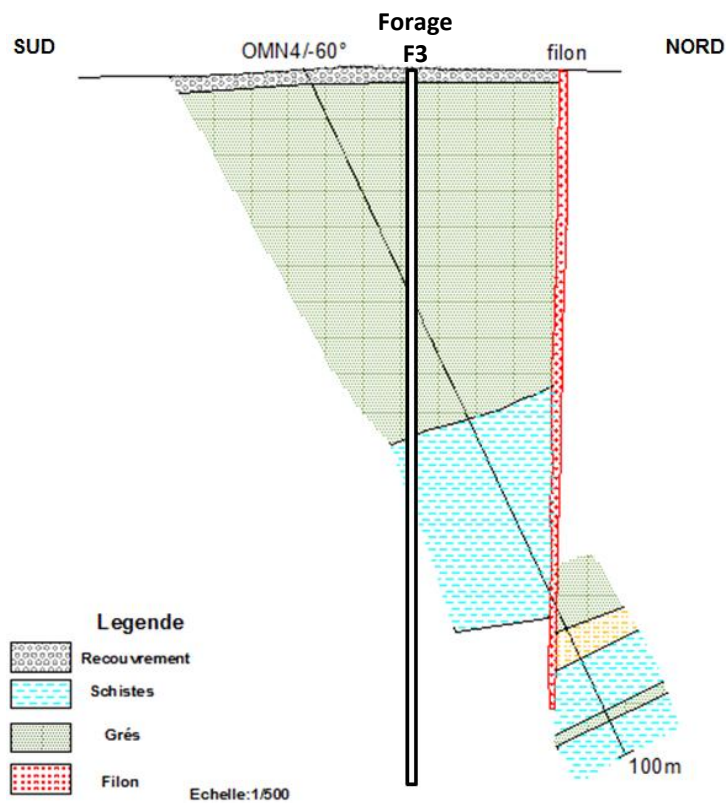


Figure 21 : Coupe géologique passant par le sondage OMN4

Tableau 7 : Coordonnées des forages d'eau prévus pour le dénoyage d'Oumjrane-Nord

Forages proposés	X (m)	Y (m)
F1	524 659	408 467
F2	524 415	408 476
F3	524 770	408 453

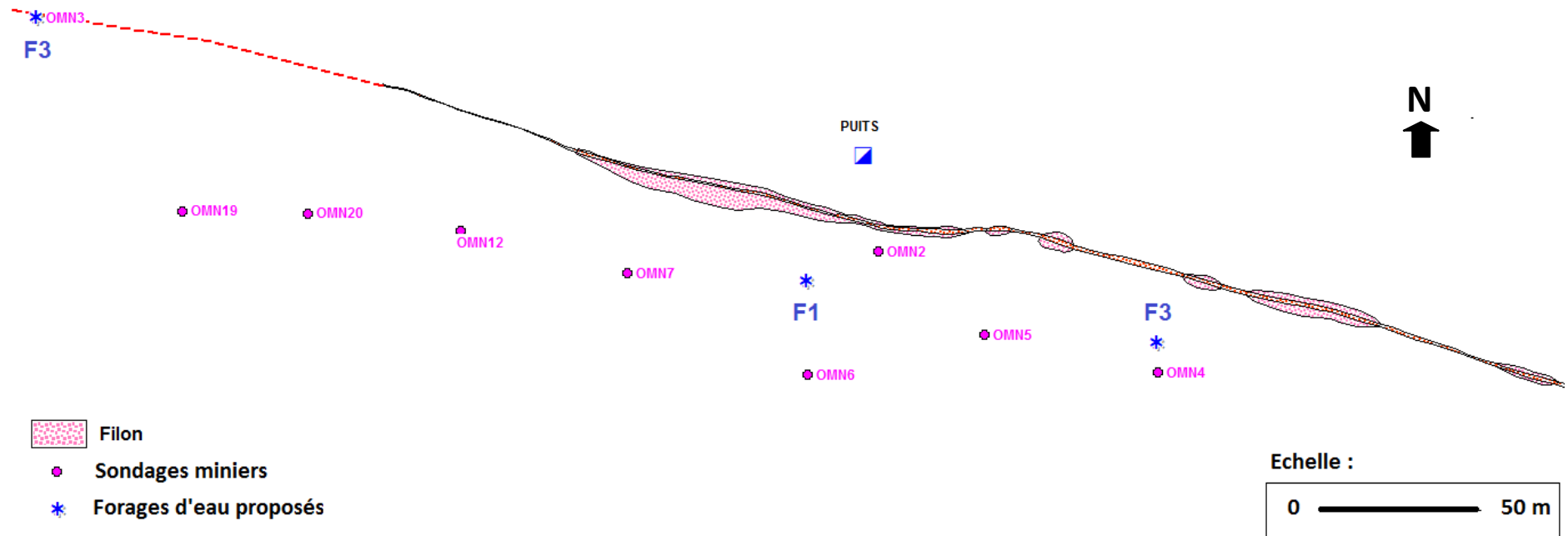


Figure 22 : Plan de dénoyage d'Oumjrane-Nord

III. Caractérisation hydro-chimique des eaux souterraines d'Oumjrane

Le recours à l'hydrochimie pour lever les indéterminations sur les relations entre les différentes composantes d'un système aquifère est souvent salvateur. Dans ce chapitre, nous traiterons dans un premier temps l'hydrochimie sous un angle de caractérisation descriptive de la géochimie des eaux souterraines, puis nous essaierons de répondre aux questions de l'origine de la minéralisation des eaux souterraines dans le prochain chapitre.

1. Inventaire des points d'eau et échantillonnage

A l'image du découpage territorial net par douar, l'appartenance des puits à un douar déterminé est nette et reconnue à l'unité près. Les points d'eau ont été répartis par douar et secteur sur cette base.

Tableau 8 : Points d'eau de l'aire de l'étude par douar

Douar	Nombre de points d'eau	Secteur	Nombre de points d'eau	équipés	non équipés
Takcha	103	Amerdoul	25	18	7
		Imine Tagourt	4	3	1
		Tagourt	40	36	4
		Takcha	35	30	5
Tifekhssite	44	Tagounite	3	2	1
		Tifekhsite	31	10	21
		Imine Titrite	10	7	3
Oumjrane	177	Oumjrane Aval	67	46	21
		Oumjrane Amont	53	42	11
		Takhourt	57	55	2
Tismoumine	16	Tismoumine	16	5	11
Sites miniers	9	Bounhass	6	3	3
		Rich Merzoug	3	0	3
		Boukerzia	2	0	2
		Afilou n'Khou	4	1	3
Total			350	255	94

Takcha

Ce douar compte 103 points d'eau, dont 40 au niveau de Tagourt, 35 à Takcha, 25 à Amerdoul et 4 à Imine Tagourt.

Amerdoul : Sur les 25 puits existants, 18 sont équipés de motopompes électriques ou thermiques. La profondeur totale de ces ouvrages varie généralement entre 19 et 41 m. Ils captent principalement les formations gréseuses de l'Ordovicien et les intercalations schisto-calcaires de la formation de Ktaoua. Ils sont tous utilisés pour l'irrigation.

Imine Tagourt : Sur les 4 puits existants dans ce secteur, trois sont équipés et captent les alluvions. Leurs profondeurs totales varient entre 10 et 27 m. Ces puits sont tous destinés pour l'irrigation.

Tagourt : Ce secteur est à dominance de puits qui sont situés principalement le long de l'Oued Taghbalt. Sur les 40 points d'eau existants, 38 sont utilisés pour l'irrigation et 2 pour l'AEP du douar Takcha. La profondeur totale varie entre 8 et 40 m.

Takcha : Les 35 puits existants dans ce secteur sont destinés pour l'irrigation. Leurs profondeurs totales varient entre 9 et 40 m. Ils captent les alluvions.

Tifekhssite

On y dénombre 44 puits captant les alluvions de l'oued Taghbalt. Ils sont répartis par secteur comme suit :

Tagounite : 3 puits destinés à l'irrigation dont 2 équipés. Leurs profondeurs totales varient entre 15 et 27 m ;

Tifekhssite : 31 puits dont 12 puits forés. Leurs profondeurs totales varient entre 9 et 90 m. Sur l'ensemble de ces points d'eau, 3 puits sont destinés à l'AEP du douar Tifekhssite, les autres sont à vocation agricole ;

Imine Titrite : 10 puits dont 8 sont forés et destinés tous à l'irrigation. La profondeur totale varie entre 18 et 50 m.

Oumjrane

Le douar Oumjrane comporte le plus grand nombre de points d'eau (133 puits, 43 puits forés et 1 forage). La répartition géographique de ces ouvrages par secteur se présente comme suit :

Oumjrane amont : Sur les 54 puits existants, 11 sont non équipés. La profondeur totale varie entre 14 et 44 m. 53 puits sont destinés à l'irrigation et 1 à l'AEP ;

Oumjrane aval : comporte 48 puits, 17 puits forés et 1 forage. La profondeur totale varie entre 15 et 40 m. 36 points d'eau sont utilisés pour l'irrigation ;

Takhourte : Le nombre de points d'eau dans ce secteur est égal à 57 dont 41 puits et 16 puits forés. Ils captent les grès quartzitiques et les schisto-calcaires de l'Ordovicien. La profondeur totale varie entre 15 et 70 m. Ils sont tous destinés à l'irrigation.

Tismoumine

On compte 16 points d'eau dont 12 puits abandonnés. Ces ouvrages captent les formations gréseuses et schisto-calcaires de l'Ordovicien. La profondeur totale varie entre 7 et 80 m. Le puits foré TIS14 est exploité pour l'AEP de la population du douar Tismoumine.

De manière générale, les points existants dans l'ensemble des douars enquêtés sont à dominance de puits (82%), suivis de puits forés (18%) ; 69% de ces points d'eau sont à vocation agricole, leurs profondeurs totales varient entre 8 et 90 m.

Une démarche multicritère a été adoptée lors de l'échantillonnage pour la sélection des points d'eau parmi l'ensemble des points inventoriés de la région. Ces critères sont considérés de manière hiérarchisée comme suit :

Usage des points d'eau :

La priorité est donnée aux points d'eau destinés à l'alimentation en eau potable. Ils ont été tous intégrés dans l'échantillonnage :

Tableau 9 : Points d'alimentation en eau potable dans la zone étudiée

Code	Douars	Type
TAG37	Takcha	Puits
TAG38	Takcha	Puits
TIF01	Tifekhsite	Puits
TIF05	Tifekhsite	Puits foré
OJ53	Oumjrane	Puits
OJ116	Oumjrane	Puits
OjA	Oumjrane	Puits
OjB	Oumjrane	Puits

Situation par rapport aux sites miniers :

Il est logique de caractériser prioritairement les points d'eau géographiquement proches des mines, donc plus susceptible de recevoir un quelconque impact pouvant être occasionné par l'activité minière :

Tableau 10 : Points d'eau à proximité des sites miniers

Code	Type	Secteur	Utilisation
OJ06	Puits	Oumjrane	Irrigation
OJ09	Puits	Oumjrane	Irrigation
OJ10	Puits	Oumjrane	Irrigation
OJ11	Puits	Oumjrane	Irrigation
OJ12	Puits	Oumjrane	Irrigation
OJ13	Puits	Oumjrane	Irrigation
Bn	Puits	Bounhass	Dénoyage
SH7	Forage	Bounhass	Dénoyage
AK	Forage	Afilou n'Khou	Dénoyage
BO01	Puits	Boukerzia	Autre
RM01	Puits	Rich Merzoug	Autre
RM02	Puits	Rich Merzoug	Autre

Représentation des différents douars :

Ce critère de stratification a été introduit pour s'assurer que l'échantillon tiré sur la base de sondage tient compte de tous les douars du secteur et de manière relativement équitable.

Tableau 11 : Points d'eau représentant chaque douar

Code	Douars	Type
AM14	Takcha	Puits
TAK09	Takcha	Puits
TIS13	Tismoumine	Source
OJT36	Oumjrane	Puits

Couverture géographique :

Après avoir satisfait tous les critères mentionnés, une phase d'équilibrage a été introduite en vue de s'assurer l'homogénéité de la couverture spatiale du secteur étudié.

Les analyses chimiques ont finalement concerné 48 points d'eau représentatifs des eaux souterraines de la région (annexe n.3 p.75 - 76).

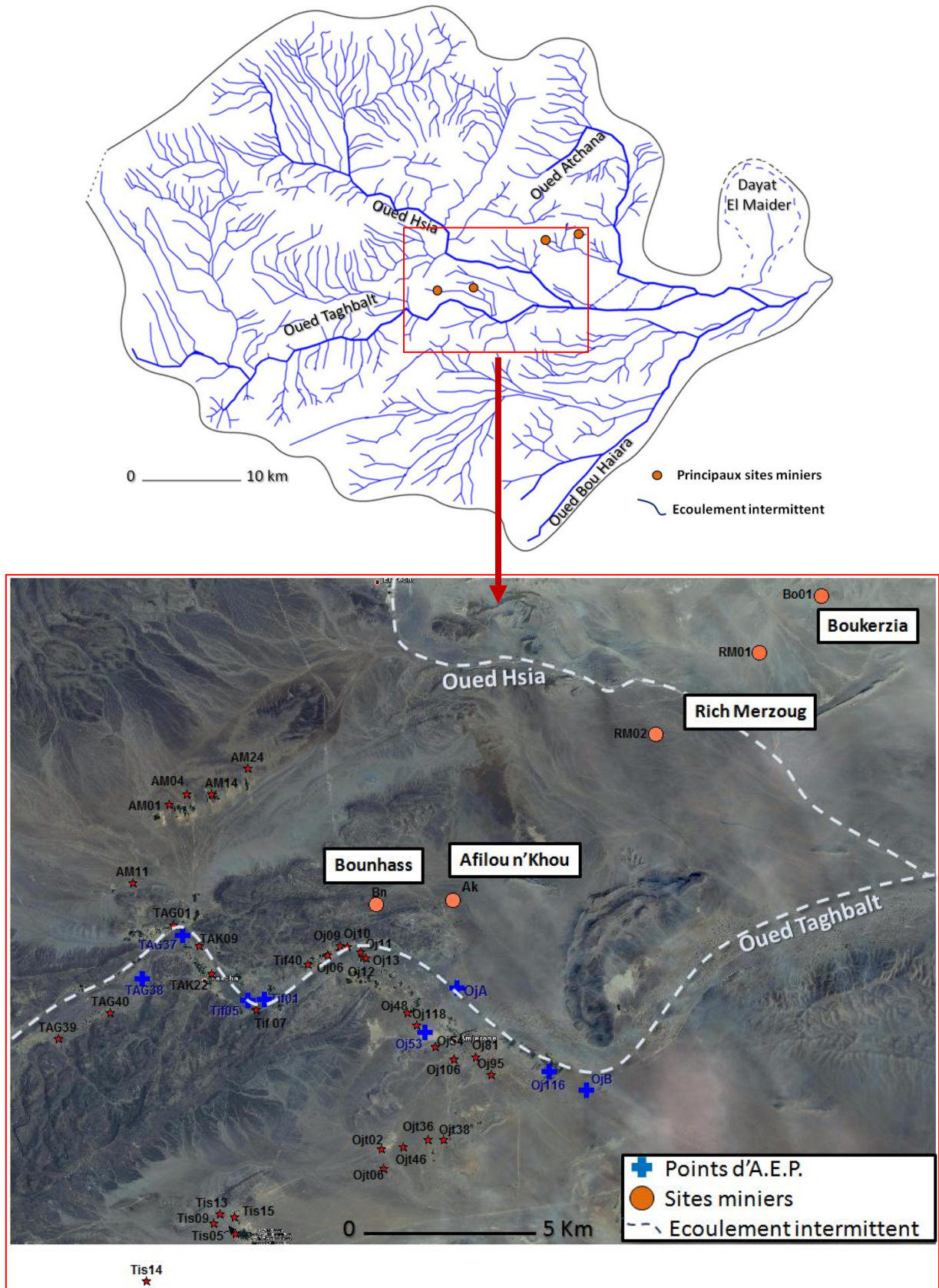


Figure 23 : Localisation des points d'eau échantillonnés pour des analyses chimiques

Le tableau qui suit présente les plages et les variances des éléments analysés :

Tableau 12 : Résultats des analyses physico-chimiques des points d'eau échantillonnés

		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Paramètres physico-chimiques	<i>T°</i>	17,00	37,20	24,65	3,17
	<i>pH</i>	5,81	8,58	7,08	0,81
	<i>Cond (µS/cm)</i>	437,00	10000,00	2416,60	1658,56
	<i>OD (mg/l)</i>	1,30	7,12	4,62	1,35
	<i>Turbidité (ntu)</i>	1,35	194,00	20,99	34,05
	<i>MES (mg/l)</i>	5,00	704,00	30,95	108,56
	<i>DCO (mg/l)</i>	10,00	33,80	11,83	4,64
Eléments majeurs	<i>Cl (ppm)</i>	26,30	2765,80	343,42	431,56
	<i>SO4 (ppm)</i>	40,90	1349,00	364,15	309,01
	<i>HCO3 (ppm)</i>	160,60	1525,00	563,53	342,30
	<i>Ca (ppm)</i>	16,70	737,53	168,38	123,68
	<i>K (ppm)</i>	2,08	48,08	12,95	10,41
	<i>Mg (ppm)</i>	8,65	451,51	87,52	73,05
	<i>Na (ppm)</i>	54,73	1023,05	287,08	217,03
Eléments en trace	<i>NO3 (ppm)</i>	0,00	291,67	26,11	45,71
	<i>B (ppm)</i>	0,00	0,27	0,06	0,06
	<i>Ba (ppm)</i>	0,00	0,07	0,01	0,01
	<i>Be (ppm)</i>	0,00	0,00	0,00	0,00
	<i>Bi (ppm)</i>	0,02	0,09	0,04	0,02
	<i>Cd (ppm)</i>	0,00	0,03	0,01	0,01
	<i>Cr (ppm)</i>	0,00	0,05	0,02	0,01
	<i>Li (ppm)</i>	0,04	0,59	0,17	0,16
	<i>P (ppm)</i>	0,01	0,11	0,02	0,02
	<i>Se (ppm)</i>	0,03	0,07	0,04	0,01
	<i>Si (ppm)</i>	3,18	11,43	6,22	1,54
	<i>Sn (ppm)</i>	0,01	0,03	0,01	0,01
	<i>Sr (ppm)</i>	0,13	3,01	0,99	0,65
	<i>Ti (ppm)</i>	0,00	0,01	0,01	0,00
	<i>V (ppm)</i>	0,00	0,01	0,01	0,00
	<i>Fe (ppm)</i>	0,02	6,35	0,22	0,97
	<i>Cu (ppm)</i>	0,00	0,05	0,02	0,01
	<i>As (ppm)</i>	0,01	0,04	0,01	0,01
	<i>Pb (ppm)</i>	0,01	0,06	0,05	0,01
	<i>Zn (ppm)</i>	0,00	0,23	0,05	0,03
	<i>Ni (ppm)</i>	0,02	0,43	0,06	0,06
	<i>Mn (ppm)</i>	0,00	2,23	0,24	0,42
	<i>Co (ppm)</i>	0,01	0,10	0,09	0,03
	<i>NO2 (ppm)</i>	0,01	0,12	0,02	0,02
	<i>NH4 (ppm)</i>	0,02	2,71	0,11	0,39
	<i>PO4 (ppm)</i>	0,02	0,38	0,10	0,07
<i>F (ppm)</i>	0,35	1,71	0,74	0,30	

2. Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines

a. Paramètres physico-chimiques

▪ Température

La température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques ; toute variation brusque de ce paramètre entraîne une perturbation dans l'équilibre de l'écosystème aquatique.

Dans l'aire de l'étude, la température de l'eau ne montre pas de grandes variations et à l'exception du point d'eau prélevé à Afilou n'Khou (37,2°C), les températures s'inscrivent dans l'intervalle [17 – 30,7°C].

▪ pH

Ce paramètre influence la plupart des mécanismes chimiques et biologiques dans les eaux. Habituellement, les valeurs du pH se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles. Au niveau de la zone étudiée, les valeurs du pH ne montrent pas des variations notables, avec un minimum de 5,81 au niveau du forage SH7 et un maximum de 8,58 au puits Oj116.

▪ Matières en suspension

Les valeurs de ce paramètre dans les eaux étudiées sont très variables, 35/48 points d'eau présentent une valeur inférieure au seuil mesurable de 5 mg/l. Cependant, les points d'eau AM24 ; AM14 et AM04 présentent les valeurs les plus élevées de 207, 704 et 237,5 mg/l respectivement.

▪ Salure globale des eaux

Sur la base des mesures réalisées, il apparaît que la salure des eaux varie entre 0,44 et 10 mS/cm en termes de conductivité électrique. La conductivité électrique des eaux est inférieure à 2 mS/cm dans 20 sur 48 points d'eau. Elle est située entre 2 et 5 mS/cm dans 24 sur 48 points d'eau alors qu'elle est supérieure à 5 mS/cm dans 3 sur 48 points d'eau. La salure maximale de 10 mS/cm concerne le point Tis05. La gamme des conductivités est centrée, statistiquement, autour d'une valeur moyenne de 2,42 mS/cm.

Spatialement, dans le cas des sous écoulements alluviaux, le gradient amont aval n'est pas clairement exprimé en dépit d'une tendance très sommaire si l'on compare l'amont de la vallée à son aval extrême (fig.23).

En fait, dans la vallée de l'oued Taghbalt, la plage des conductivités modérées, inférieures à 4 mS/cm, est entrecoupée par les trois anomalies suivantes :

- Rive gauche en face du douar Tifekhssite : 4,7 mS/cm dans le puits Tif01 ;
- Rive droite du douar Takcha : 4,8 mS/cm dans le puits Tak22 ;
- Rive droite sur la partie aval d'Oumjrane : 5,7 mS/cm dans le puits Oj106 ;

En ce qui concerne les eaux souterraines à l'extérieur de la vallée du Taghbalt :

- Dans le secteur d'Amerdoul Takcha, la plage des conductivités montre une faible variation allant de 2,1 mS/cm (AM24) à 3,2 mS/cm (AM01).
- Dans le secteur de Takhourte, au sud d'Oumjrane, la conductivité des eaux est modérée. Elle est inférieure à 3 mS/cm dans tous les points de ce secteur.
- Dans le secteur Tismoumine, la partie amont au piémont du Jbel Taghbalt se caractérise par des faibles conductivités (0,9 mS/cm dans Tis14). Par contre, dans la palmeraie du village, la minéralisation des eaux s'accroît rapidement pour atteindre une valeur maximale de 10 mS/cm dans le point d'eau Tis05.
- Dans tous les secteurs miniers la conductivité des eaux est également modérée, se présentant comme suit :
 - A Bounhass, elle est de l'ordre de 2,5 mS/cm dans les points Bn et SH7 ;
 - A Afilou n'Khou, elle est de l'ordre 2,4 mS/cm ;
 - A Rich Merzoug, elle varie de 2,3 à 3,6 mS/cm dans les points RM02 et RM01 ;
 - A Boukerzia, elle est de l'ordre de 1,8 mS/cm ;

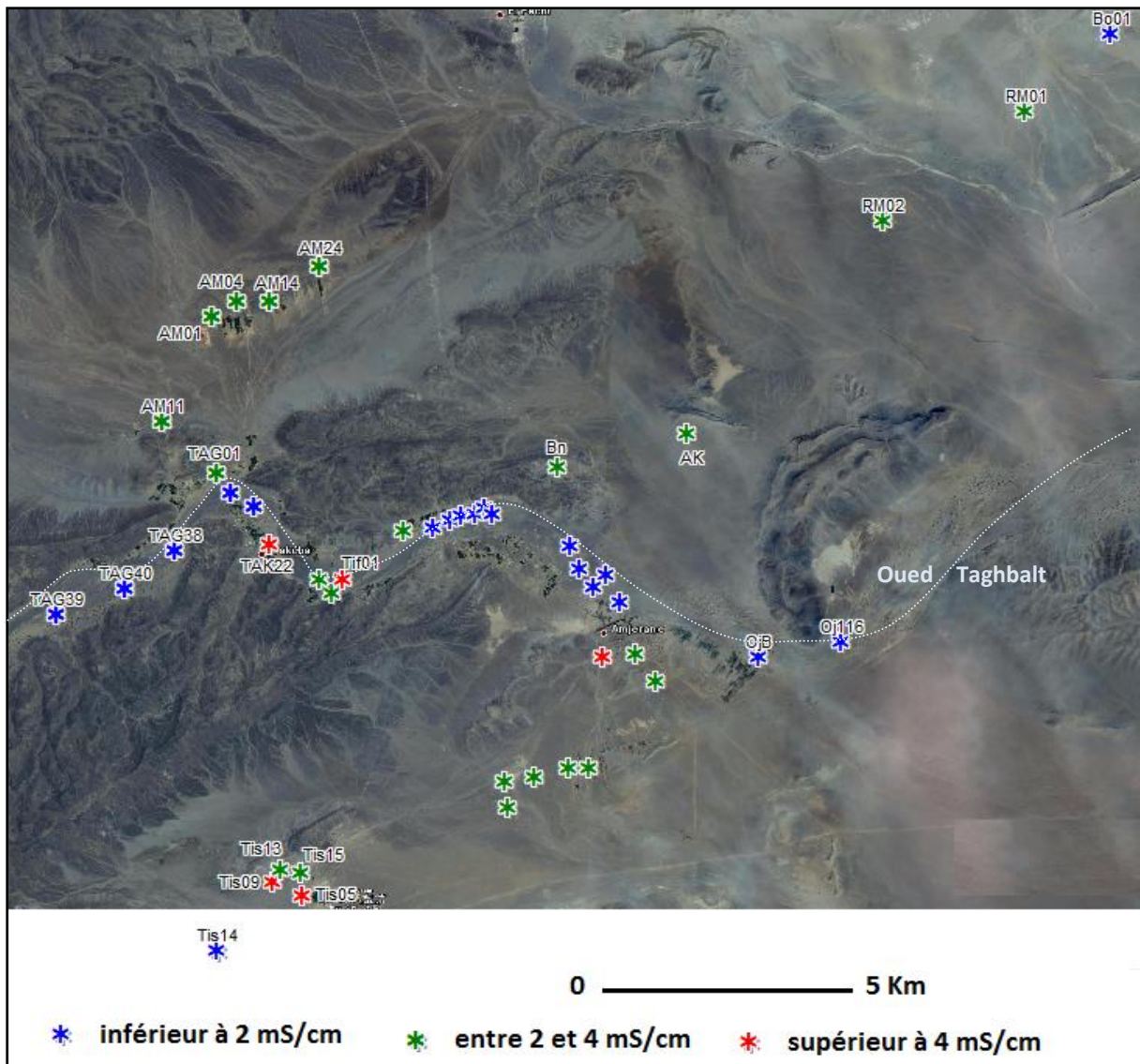


Figure 23 - a : Minéralisation globale des eaux : conductivités électriques (mS/cm)

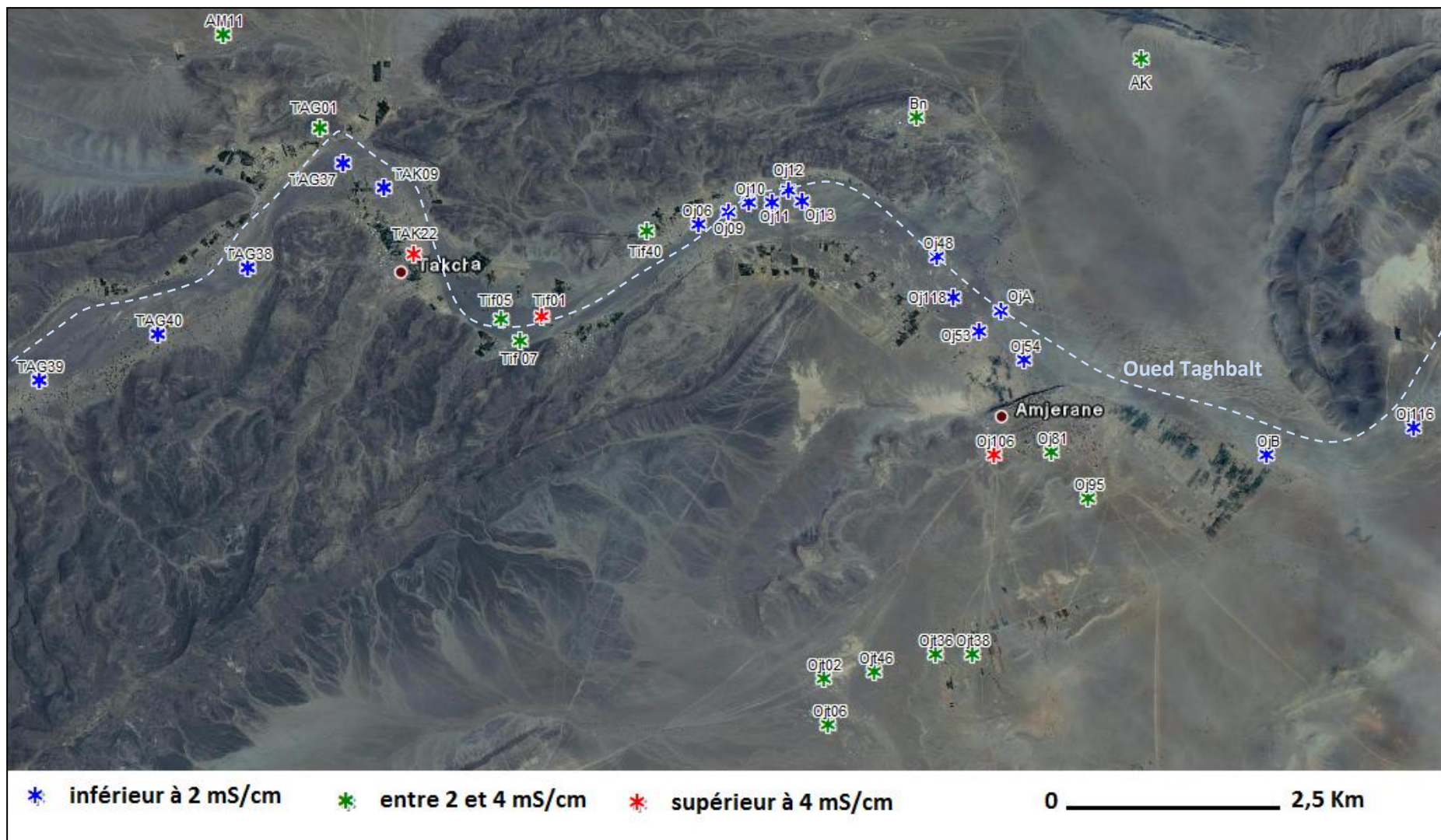


Figure 23 - b : Minéralisation globale des eaux : conductivités électriques (mS/cm)

b. Les éléments chimiques majeurs

Pour s'assurer de la qualité des analyses chimiques, la balance ionique a été calculée pour l'ensemble des points d'eau analysés. Les points d'eau RM02, Bo01 et Oj54 ont montré des valeurs excessives, par conséquent l'interprétation de leurs analyses ne sera pas prise en considération.

Les cations les plus abondants dans les eaux souterraines de la zone sont le sodium et le calcium, leurs teneurs oscillent respectivement entre 54,73 à 1023 mg/l et 16,7 à 737,5 mg/l.

En effet, 39 sur 48 des points d'eau présentent des teneurs en calcium supérieures à 60mg/l. Les teneurs en magnésium quant à elles varient de 8,65 à 451,5 mg/l et celles en potassium sont généralement faibles oscillant entre 2 et 48 mg/l.

Par ordre d'abondance croissante, on pourrait classer les cations potassium < magnésium < calcium < sodium pour presque la totalité des eaux.

Les ions Fe et Mn sont également présents dans la région avec des concentrations variant respectivement de 0,01 à 6,35 mg/l et de 0 à 2,33 mg/l.

D'autre part, les anions les plus abondants sont les chlorures, les bicarbonates et les sulfates. Les teneurs en bicarbonates varient de 160 mg/l au point Oj116 à 1525 mg/l au point Ojt38.

Les teneurs en sulfates sont très variables et oscillent entre 41 mg/l au point d'eau Oj116 à 1349 mg/l au point d'eau TAK22.

De même pour les chlorures, les valeurs mesurées dans les eaux étudiées sont très variables avec un minimum de 26,3 mg/l (Oj116) et un maximum de 2766 mg/l (Tis05).

Les eaux de la région présentent également des teneurs relativement faibles en composés azotés, la concentration en nitrates varie de 0 à 291,67 mg/l et celle de l'ammonium oscille entre 0,02 et 2,71 mg/l. Toutefois les points d'eau TAK22, Tif07, Tif01, Oj106, Tis15 et Tis05 montrent des teneurs assez élevées en nitrates.

c. Les éléments chimiques en trace

1 sur 4 des eaux souterraines étudiées présentent des teneurs assez importantes en cadmium et en sélénium, avec des concentrations allant respectivement de 3 à 30,8 µg/l et de 34 à 65 µg/l dans ces points.

De plus, les points d'eau Bn (puits minier de Bounhass, eau d'exhaure) et SH7 (forage d'eau à Bounhass) et Ak (puits minier à Afilou n'Khou, eau d'exhaure) présentent des teneurs importantes en Nickel qui sont respectivement de 170, 430 et 131 $\mu\text{g/l}$.

Le point TAK22 montre une teneur en Plomb de 60 $\mu\text{g/l}$.

3. Identification des faciès chimiques

Le diagramme triangulaire de Piper permet de statuer sur le faciès chimique des eaux selon une classification en quatre familles : chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne, chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique, bi/carbonatée sodique et potassique et bi/carbonatée calcique et magnésienne.

Tous les faciès chimiques sont présents dans les eaux souterraines de la zone étudiée. Le diagramme qui suit projette de manière synthétique les points d'eau selon le secteur d'appartenance.

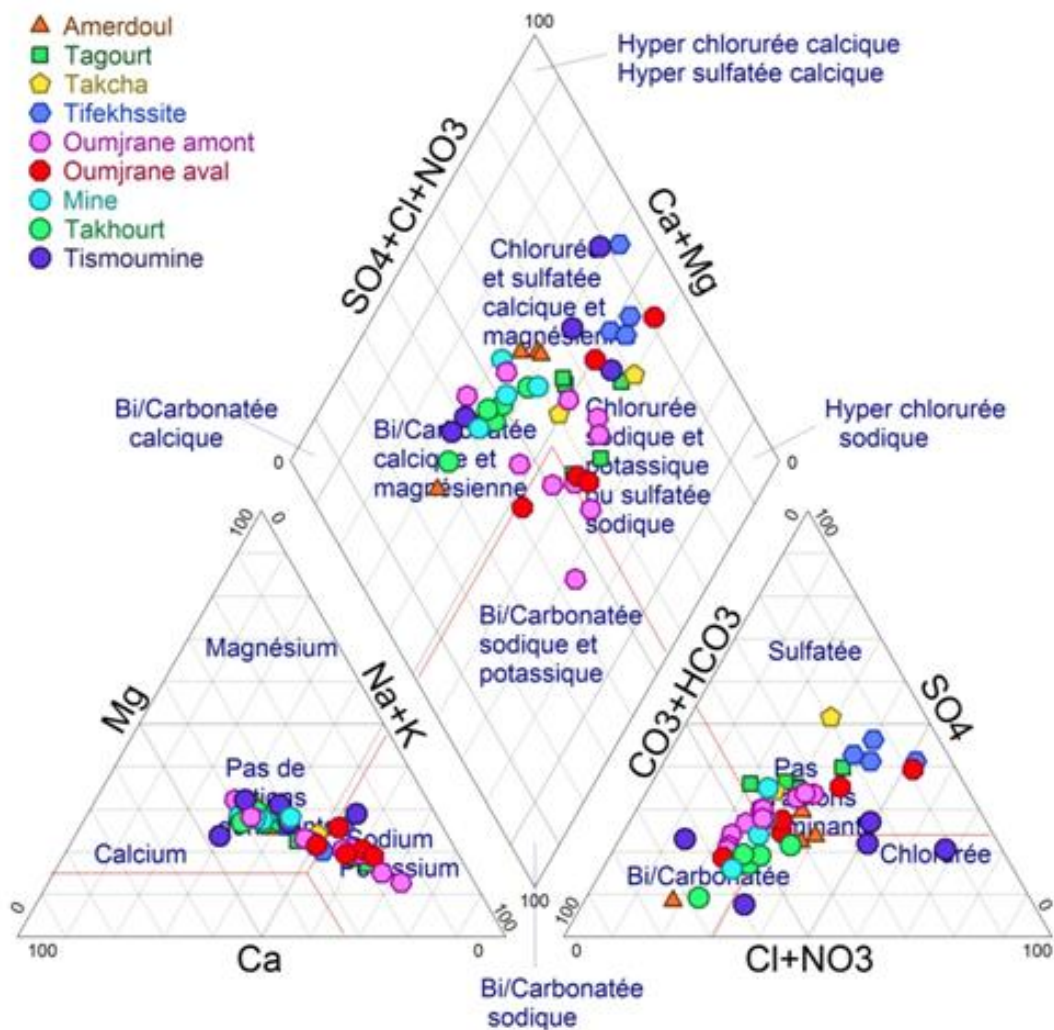


Figure 24 : Faciès chimiques des eaux par secteur géographique

A quelques exceptions près, les faciès chimiques des eaux ressortent de manière assez claire pour chacun des contextes géographiques / hydrogéologiques de la zone du projet, à l'exception des secteurs de Tismoumine et Oumjrane-amont.

Nappe profonde :

- Bounhass et Rich Merzoug : Faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien ;
- Afilou n'khoul et Takhourt : Eaux plutôt bicarbonatées calciques et magnésiennes ;
- Amerdoul : AM14, AM04 et AM01 : Faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien ;
AM24 et AM11 : Faciès plutôt bicarbonaté calcique et magnésien ;
- Tismoumine : Les eaux du secteur de Tismoumine sont hétérogènes de point de vue faciès chimique, elles relèvent, selon les points d'eau, des familles : chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne (Tis15 et Tis05), chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique (Tis09), et bicarbonatée calcique et magnésienne (Tis13 et Tis14).

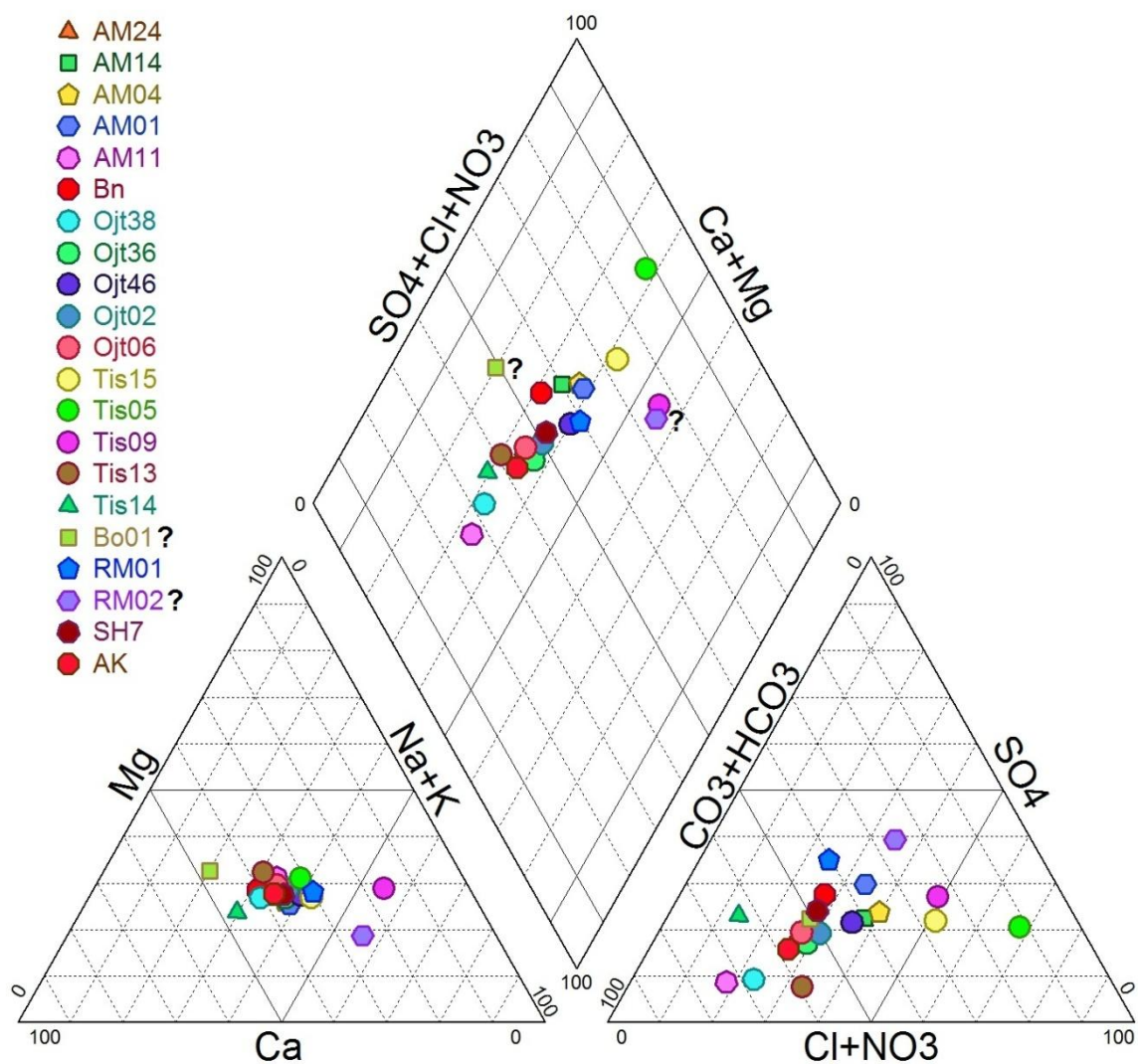


Figure 25 : Faciès chimiques de la nappe profonde d'Oumjrane

La disparité des faciès chimiques est confirmée par l'alignement sur le diagramme Shoeller-Berkaloff :

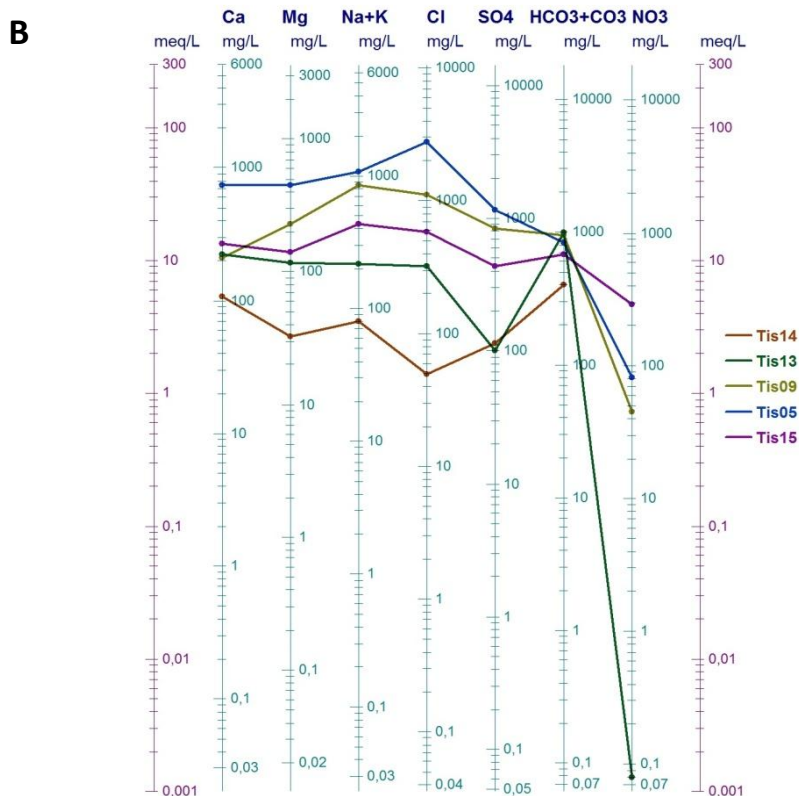
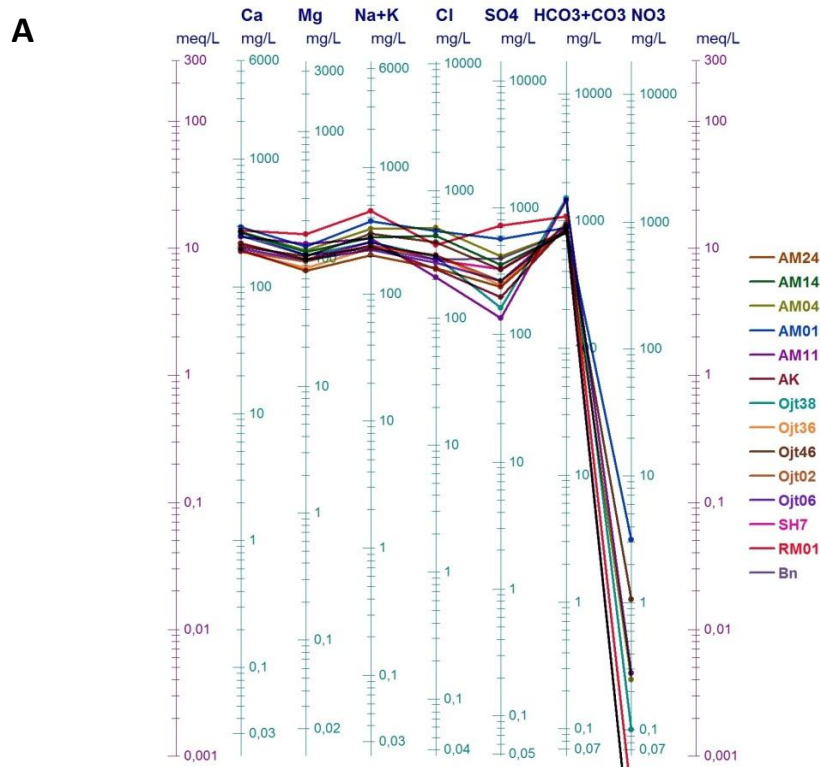


Figure 26 : Chimie des eaux de la nappe profonde. A : Amerdou, Takhourt et secteurs miniers
 B : Tismoumine

Nappe alluvionnaire :

- Tagourt, Takcha, Oumjrane aval et Tifekhssite : Eaux dominées par le faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique.
- Oumjrane amont : Eaux très hétérogènes : 6 points sur 10 présentent un faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique, 2 points (Oj13 et Oj53) sont dominés par le faciès bicarbonaté calcique et magnésien, 1 point (Oj118) montre un faciès bicarbonaté sodique et potassique et 1 point (OjA) présente un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

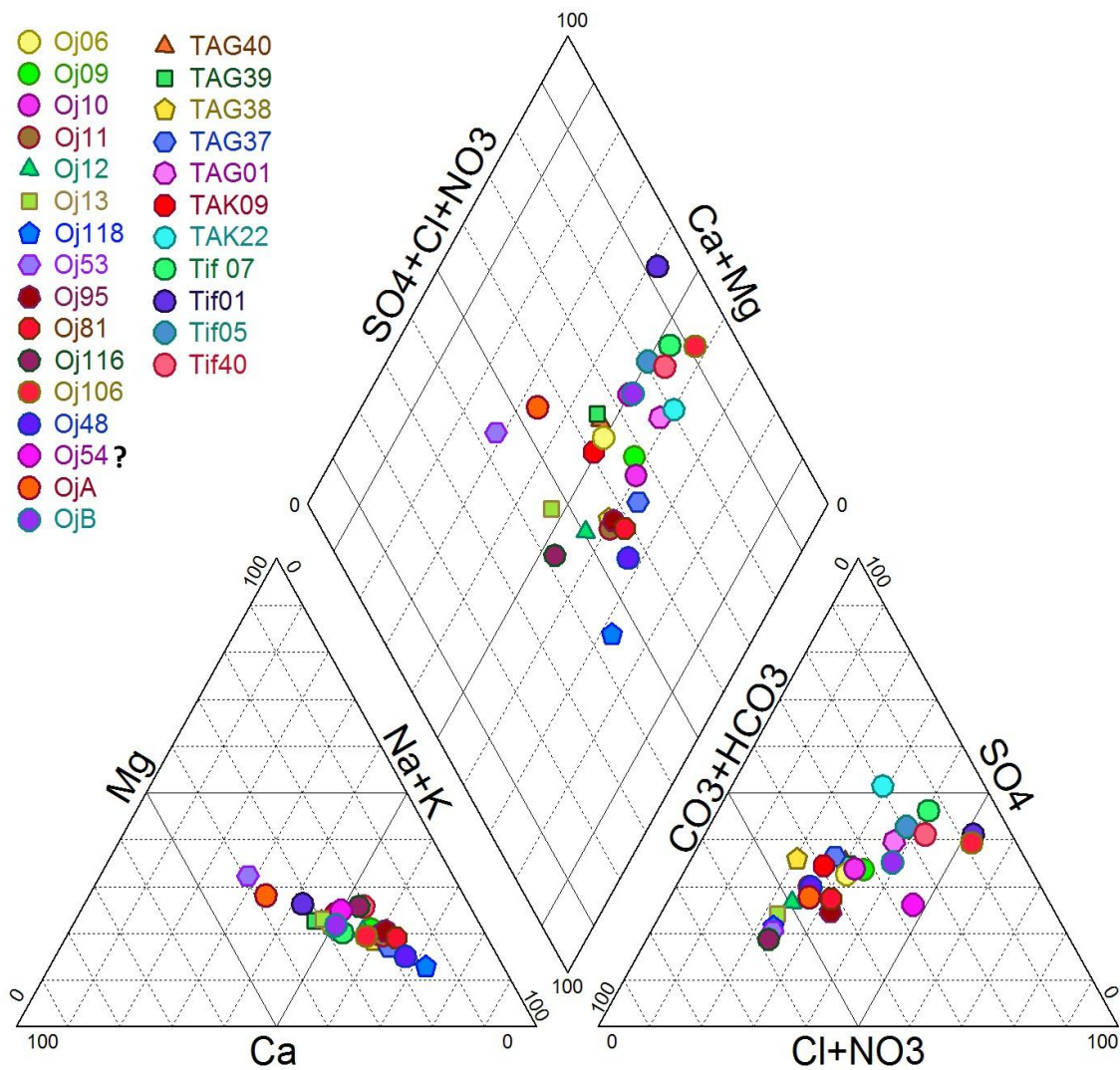


Figure 27 : Faciès chimique de la nappe alluvionnaire d'Oumjrane

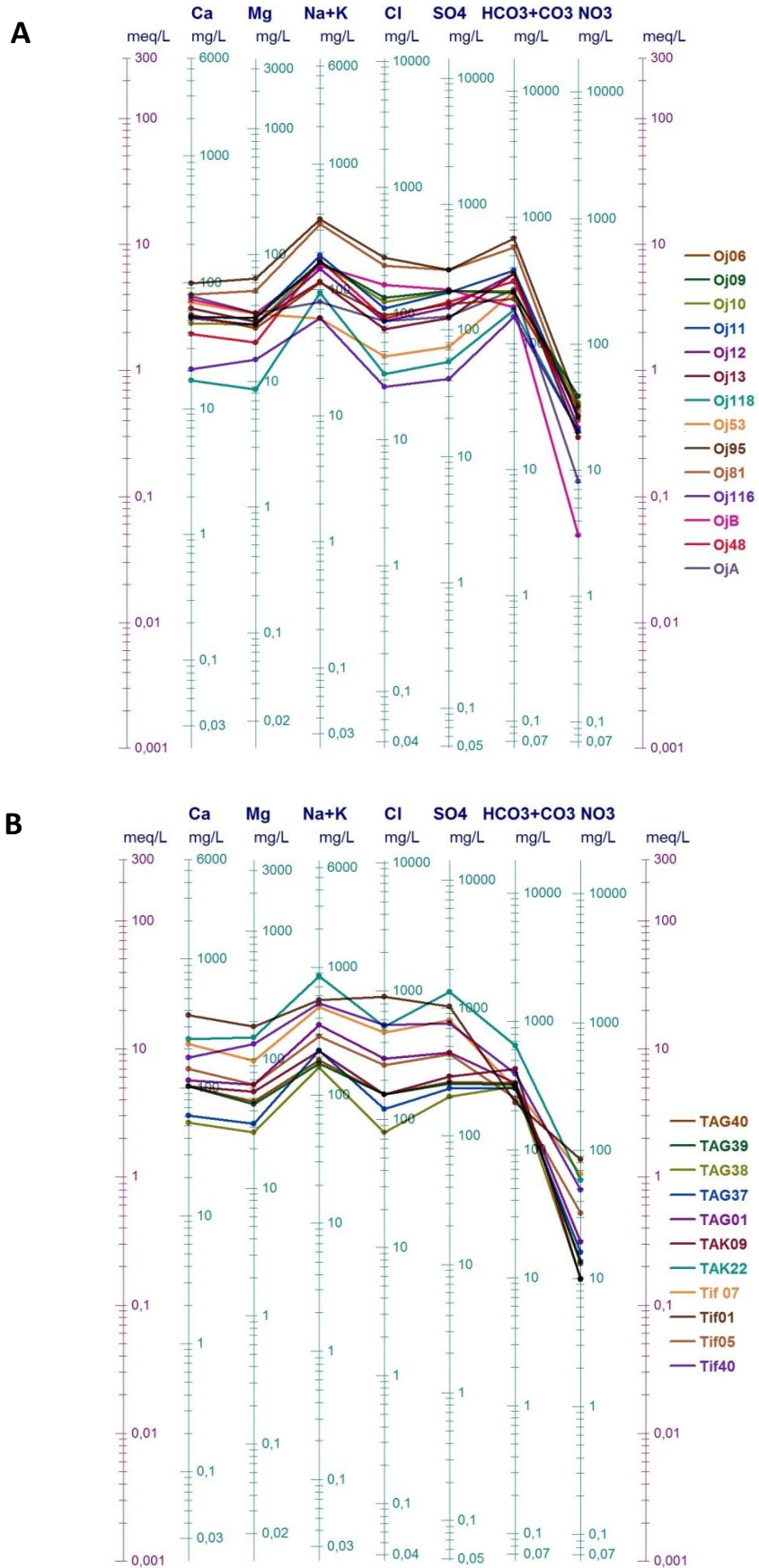


Figure 28 : Chimie des eaux de la nappe alluvionnaire. A : Secteur d'Oumjrane
 B : Tagourt, Takcha et Tifekhssite

4. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales ou ACP, est usuellement pratiquée en hydrochimie dans le cadre d'analyses poussées visant à distinguer des familles d'eau différentes en complément d'autres outils d'analyse hydro-chimique. Dans notre cas, nous y faisons recours pour un objectif purement descriptif, afin de renforcer la caractérisation hydro-chimique.

L'analyse en composantes principales est une méthode essentiellement exploratrice qui permet de traduire, en graphiques, l'information essentielle dans une base de données quelconque. Cette base de données est constituée de variables quantitatives disposées en colonnes qui ont été mesurées sur des individus disposés en deux lignes. Dans notre cas, la conductivité et les éléments chimiques majeurs constituent les variables alors que les points d'eau constituent les individus.

Le grand intérêt de l'ACP réside dans le fait qu'elle prend en compte toutes les variables entrées simultanément et que l'interprétation des résultats se limite le plus souvent à l'interprétation des premières composantes. Des cercles de corrélations permettent de schématiser les liens existant entre les différentes variables étudiées. De même, des projections des individus sur les plans formés par les premières composantes principales permettent de visualiser la répartition des différents individus (points d'eau échantillonnés), ce qui donne une idée sur leur ressemblance vis-à-vis des variables mesurées.

La contribution à la variabilité totale par les deux premiers axes issus de l'ACP réalisée sur les valeurs de 10 paramètres (conductivité, pH, Cl, Mg, Ca, Na, SO₄, K, Sr et HCO₃) pour tous les échantillons est de 89,76% dont 69,69% pour le premier axe, 20,07% pour le deuxième axe.

L'axe 1 est essentiellement caractérisé dans le sens positif par 8 paramètres fortement corrélés entre eux : conductivité, Cl, Mg, Ca, Na, SO₄, K et Sr ; cet axe définit un gradient croissant des valeurs de ces paramètres du côté gauche de l'axe vers son côté droit. L'axe 2 est caractérisé par un gradient croissant dans le sens positif des valeurs du pH ; dans le sens négatif ce sont les bicarbonates.

Tableau 13 : Matrice de corrélation entre les variables de l'ACP

	pH	Cond $\mu\text{S}/\text{cm}$	Ca	K	Mg	Na	Sr	Cl	SO ₄	HCO ₃
pH	1	-0,28	-0,48	-0,61	-0,38	-0,08	-0,18	-0,17	-0,05	-0,77
Cond $\mu\text{S}/\text{cm}$	-0,28	1	0,91	0,71	0,97	0,93	0,90	0,95	0,85	0,38
Ca	-0,48	0,91	1	0,77	0,95	0,73	0,80	0,88	0,67	0,54
K	-0,61	0,71	0,77	1	0,80	0,52	0,53	0,67	0,37	0,76
Mg	-0,38	0,97	0,95	0,80	1	0,84	0,85	0,95	0,74	0,47
Na	-0,08	0,93	0,73	0,52	0,84	1	0,90	0,85	0,94	0,20
Sr	-0,18	0,90	0,80	0,53	0,85	0,90	1	0,80	0,92	0,27
Cl	-0,17	0,95	0,88	0,67	0,95	0,85	0,80	1	0,74	0,24
SO ₄	-0,05	0,85	0,67	0,37	0,74	0,94	0,92	0,74	1	0,07
HCO ₃	-0,77	0,38	0,54	0,76	0,47	0,20	0,27	0,24	0,07	1

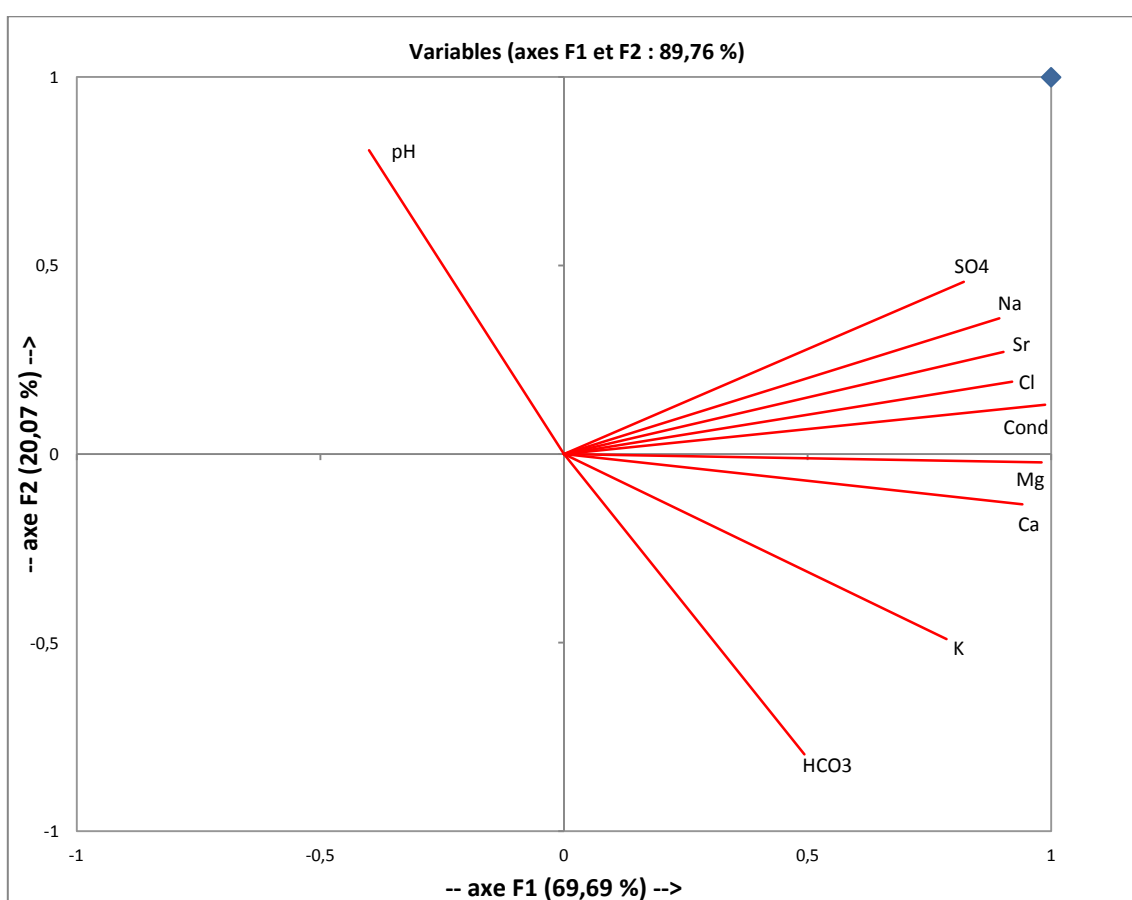


Figure 29 : Diagramme de composantes principales (variables, axes F1 et F2 : 89,76%)

La projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 montre une certaine dispersion des échantillons, cependant trois grands groupes se sont individualisés (fig.30).

- Groupe A : situé du côté négatif de l'axe F1 ; il est constitué par les échantillons les moins minéralisés (ils présentent les valeurs les plus faibles de conductivité et des autres éléments analysés). Il s'agit de tous les points échantillonnés à Oumjrane amont

et à Oumjrane aval (excepté le point Oj106), tous les points prélevés à Tagourt et les points Tis14 (Tismoumine) et Tak09 (Takcha).

A l'exception du point d'eau Tis14 provenant du secteur Tismoumine, l'ensemble des points de ce groupe proviennent de la vallée de Taghbalt (nappe alluvionnaire).

- Groupe B : c'est le petit groupe situé du côté positif de l'axe F2, il est constitué par les échantillons Tif01 Tif07 et Tif40 (de Tifekhssite), TAK22 (de Takcha) et Oj106 (d'Oumjrane aval). Ils correspondent tous à des eaux alcalines prélevées dans la vallée de Taghbalt (nappe alluvionnaire), plus minéralisées et plus riches en sodium et en chlorures que celles du premier groupe.
- Groupe C : situé au côté négatif de l'axe F2 : L'ensemble des échantillons provient des puits qui pompent les formations schisto-gréseuses de l'Ordovicien, ils sont tous situés loin de la vallée. Notons aussi que le point RM01 (Rich Merzoug) s'apparente à ce groupe bien que géographiquement éloigné.

Ces eaux présentent toutes un pH légèrement inférieur à 7 et des teneurs élevées en Ca, Mg, K et HCO₃.

On note que le point Tis05 ne s'apparente à aucun des 3 groupes cités ci-dessus. Il présente les conductivités et les teneurs les plus élevées en éléments chimiques considérés.

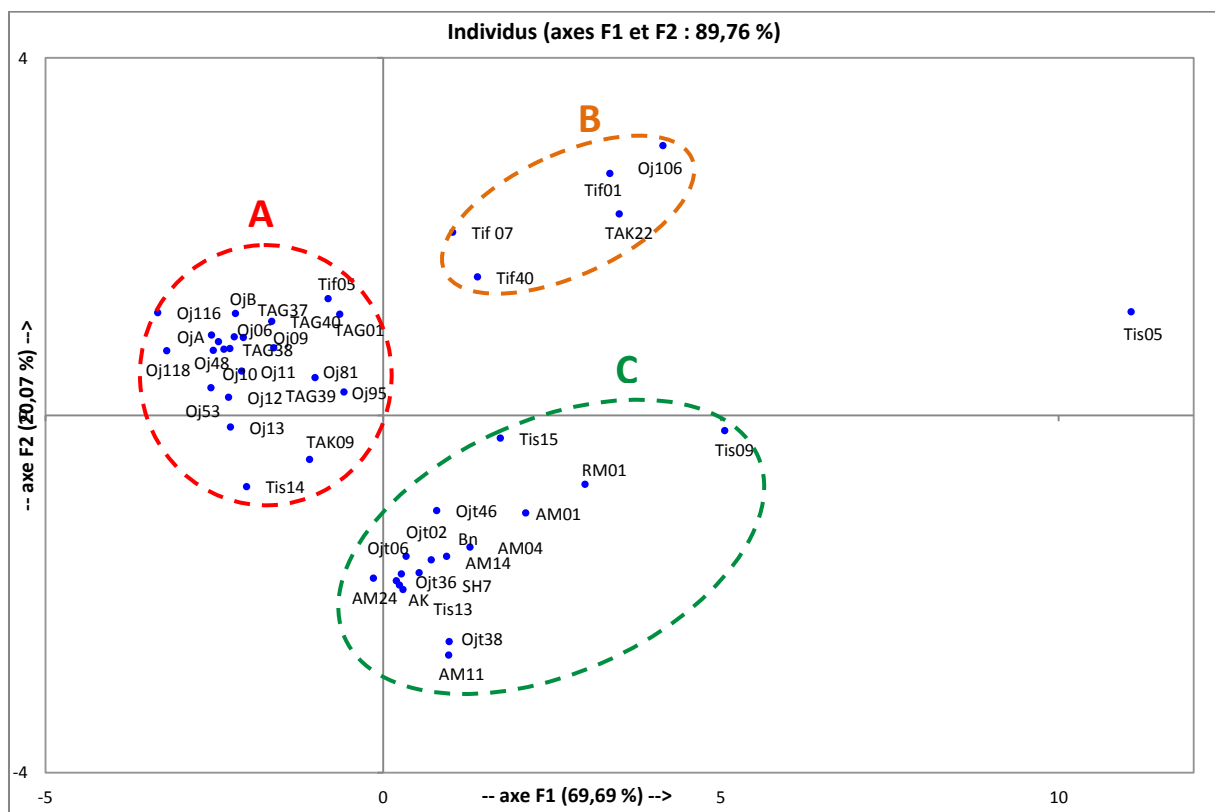


Figure 30 : Diagramme des composantes principales (individus, axes F1 et F2 : 89,76%)

IV. Origine de la minéralisation des eaux souterraines d'Oumjrane

L'origine des sels dissous dans les eaux souterraines est généralement liée aux minéraux contenus dans les roches encaissantes du réservoir et des formations traversées. Ainsi, la richesse des eaux en éléments Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées de sels et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre, les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- sont liés à la dissolution des carbonates.

1. Corrélations ioniques

Dans notre cas, l'alignement entre les points et la bonne corrélation entre les chlorures et la conductivité d'une part et entre les sulfates et la conductivité d'autre part (fig. 31 et 32) suggèrent l'existence d'une dissolution de minéraux contenant les deux éléments : probablement des minéraux évaporitiques chlorurés et sulfatés.

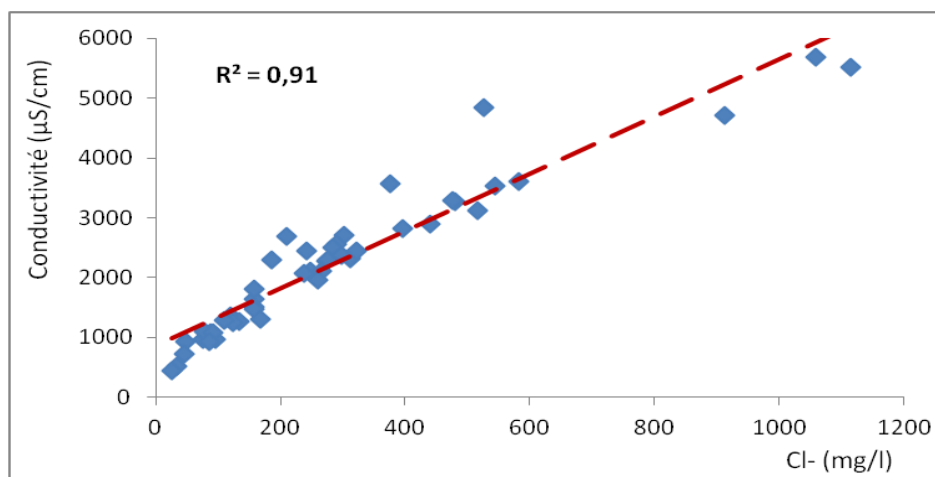


Figure 31 : Relation conductivité / Cl

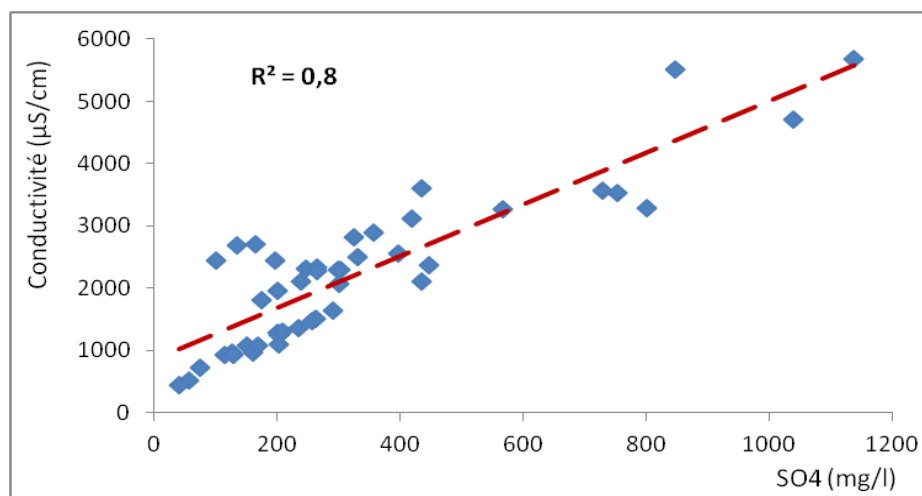


Figure 32 : Relation conductivité / SO₄

D'autre part, le sodium et les chlorures (fig.33) présentent un coefficient de détermination élevé et l'alignement des points suivant la droite de corrélation montre que le Na^+ est majoritairement lié aux Cl^- . Ceci implique la même origine des deux éléments chimiques qui est la dissolution de la Halite. Cette relation se confirme par l'existence du faciès chloruré sodique.

Cependant, quelques points présentent un excès de sodium, d'autres un excès des chlorures. L'importance de l'excès de l'un ou de l'autre élément détermine la dominance du faciès de cet élément sur l'autre.

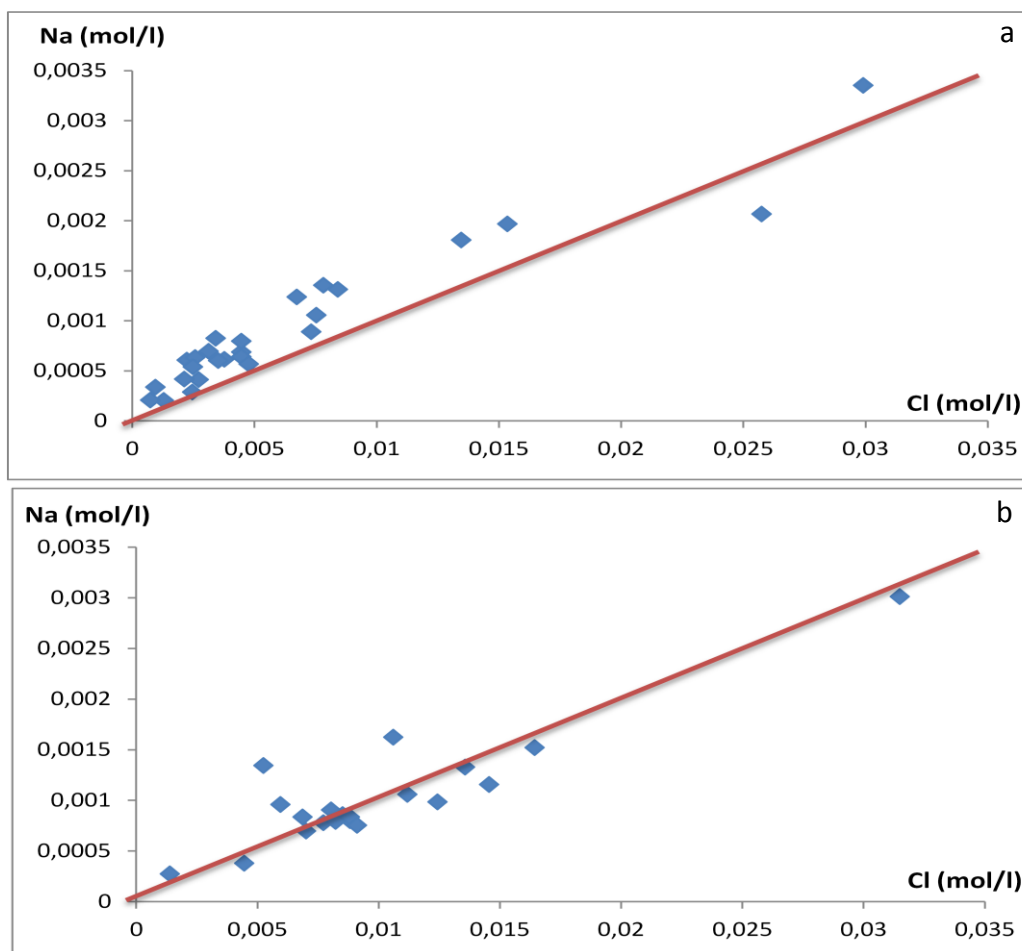


Figure 33 : Relation Na / Cl a : nappe alluvionnaire b : nappe profonde

Par ailleurs, la figure 34 montre que les teneurs en sulfates et en calcium ne montrent ni alignement ni coefficient de corrélation significatif pour une grande partie des points d'eau étudiés. Ce résultat n'exclut pas les évaporites sulfatées (gypse) comme origine des deux éléments considérés (que nous démontrerons par la suite), mais indique l'existence d'une autre origine qui a provoqué l'excès en calcium par rapport à la droite de la dissolution du gypse dans plusieurs points et l'excès en sulfates en d'autres points moins nombreux.

L'excès en calcium est être attribué à la dissolution des roches carbonatées, alors que l'excès en sulfates est attribué à l'oxydation des minéraux sulfurés ou à l'oxydation du sulfure d'hydrogène (H₂S), gaz abondant dans les eaux souterraines de la région.

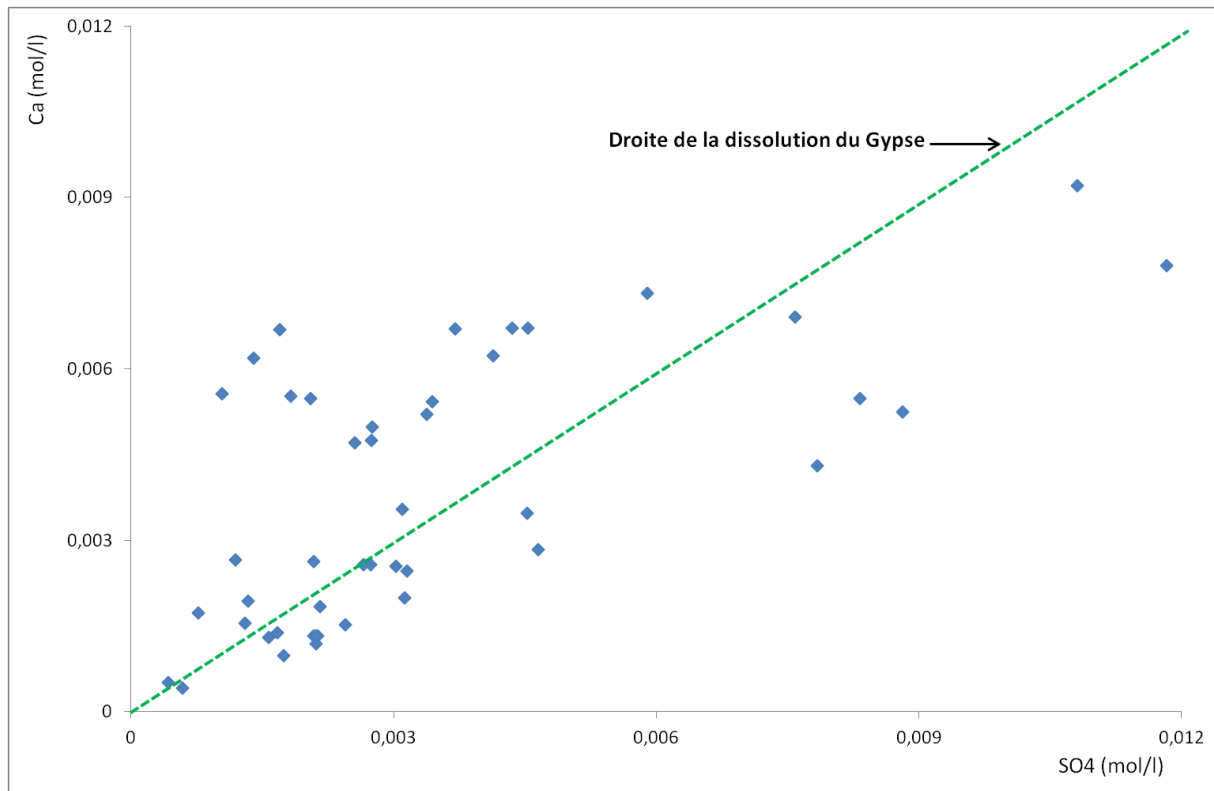


Figure 34 : Relation Ca / SO₄

Pour répondre à la question de l'origine des sulfates, nous avons eu recours au rapport Sr/Ca.

Le strontium (Sr⁺²) est un élément trace lié aux évaporites. Il forme ainsi un bon marqueur de leur présence. Le strontium permet de distinguer les sulfates provenant de l'oxydation des sulfures (teneurs faibles) de ceux issus de la dissolution des évaporites (teneurs élevées).

Le rapport ionique (en concentration molaire) Sr²⁺/Ca²⁺ est caractéristique d'une origine évaporitique, s'il est supérieur à 1 ‰ (In Brins, 2011).

Nous remarquons que les valeurs du rapport dans les eaux étudiées sont élevées et dépassent dans tous les cas 1 ‰ (fig.35) ; il varie de 1,25 ‰ au point d'eau AM14 et atteint un maximum de 5,76 ‰ au point d'eau Oj54. Ceci indique d'une part que les sulfates dans les eaux étudiées proviennent majoritairement de la dissolution des évaporites sulfatés (gypse) et confirme ainsi l'origine évaporitique de la minéralisation des eaux d'une autre part.

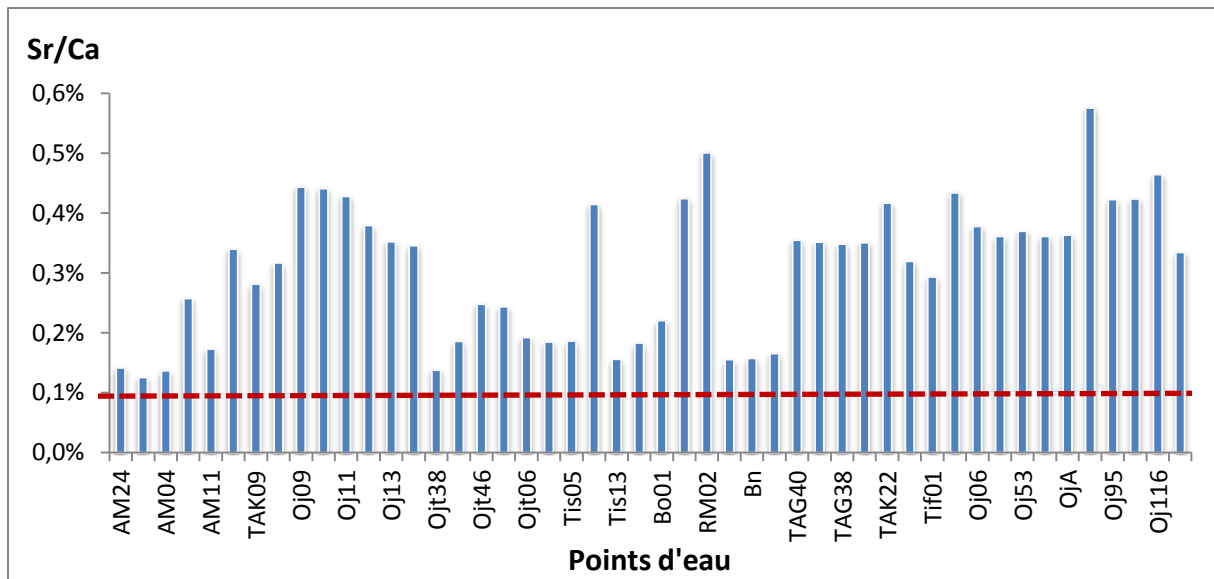


Figure 35 : Rapport Sr/Ca des eaux souterraines d'Oumjrane

L'ensemble des résultats plaide en faveur d'une chimie de l'eau contrôlée par les processus de dissolution des évaporites chlorurées notamment la halite (NaCl) et gypsifères ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et CaSO_4).

2. Indices de saturation

L'examen des paramètres thermodynamiques renseigne sur l'état de saturation de la solution vis-à-vis de chaque minéral. L'équilibre des eaux avec la matrice est souvent exprimé par l'indice de saturation :

$$Is = \text{Log} (\text{PAI}/Ks)$$

Où (PAI) est le produit d'activité des ions concernés, et Ks le produit de solubilité du minéral considéré.

La valeur ($Is = 0$) indique un état d'équilibre entre l'eau et le minéral (saturation). Une valeur négative signifie une sous-saturation et une positive la sursaturation. Quand une solution est sous-saturée à l'égard d'un minéral, cela signifie que le minéral a tendance à la dissolution.

Le programme PhreeqC, utilisé pour le calcul des indices de saturation à partir des activités ioniques, a conduit aux données rapportées dans le tableau de l'annexe n.4 p.77.

La figure 36 montre la situation des indices de saturation des eaux échantillonnées, vis-à-vis des minéraux carbonatés et sulfatés, par rapport à la droite de l'équilibre $IS=0$.

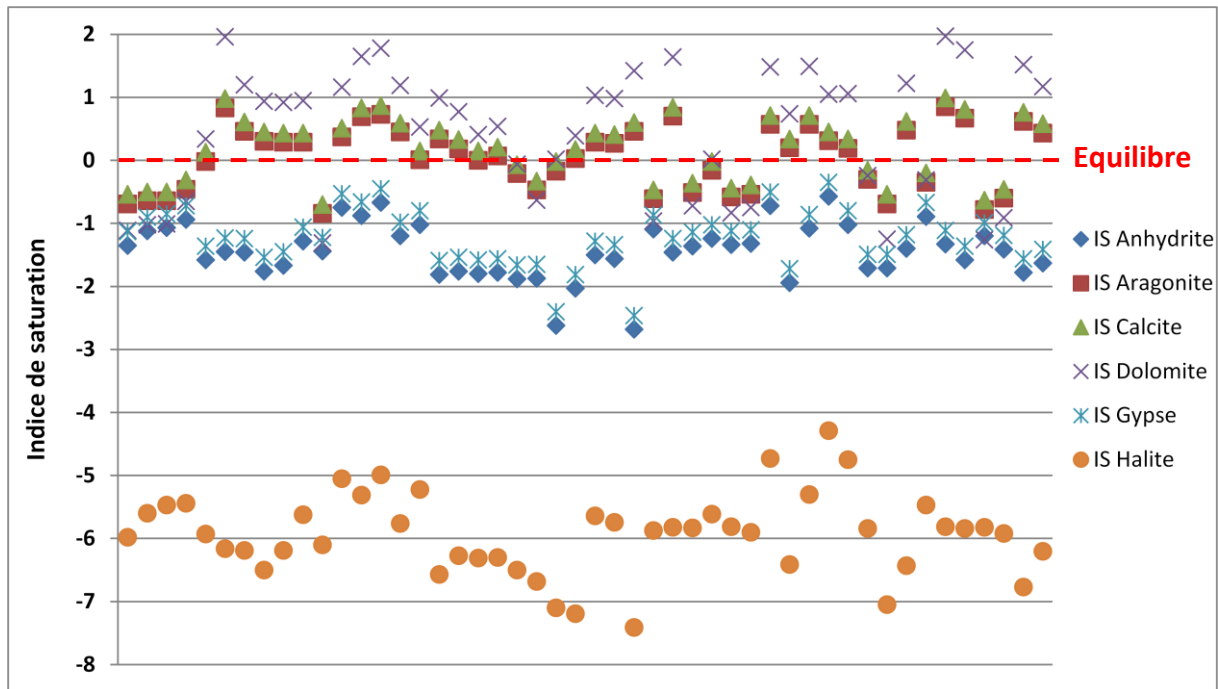
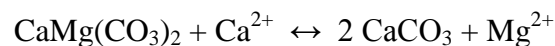


Figure 36 : Indices de saturation des eaux souterraines d'Oumjrane

Vis-à-vis des minéraux carbonatés (calcite, dolomite et aragonite), les eaux souterraines du secteur Oumjrane sont en majorité équilibrées à légèrement sursaturées. Elles sont sous saturées en minéraux évaporitiques (gypse et en anhydrite) pour l'ensemble des points étudiés et présentent les indices de saturation les plus faibles par rapport à la halite.

Les eaux d'Oumjrane ont donc une tendance à déposer des sédiments carbonatés. La solubilisation des minéraux évaporitiques gypsifères et chlorurés semble marquer la chimie de l'eau de la région.

La dissolution du gypse augmente en conséquence la concentration du calcium et par là même le rapport Ca/Mg. Ce rapport une fois supérieure à 0,5 provoque thermodynamiquement la dédolomitisation qui semble aussi marquer la chimie de l'eau de la région. Ce processus serait provoqué par la dissolution irréversible des sulfates, accompagnée de la dissolution de la dolomite et la précipitation de la calcite, selon le mécanisme suivant:



En conclusion, l'interprétation géochimique de l'eau de la région d'étude a permis de mettre en évidence trois principales réactions qui caractérisent son évolution chimique. Il s'agit d'une forte dissolution des chlorures notamment la halite (NaCl), le gypse (CaSO₄-2H₂O) et l'anhydrite (CaSO₄), et d'une dédolomitisation.

V. Comportement hydrogéochimique des eaux de rejet de la mine de Bounhass

Lorsqu'elles sont pompées, les eaux de rejet de la mine de Bounhass sont canalisées vers oued Taghbalt à travers un canal à ciel ouvert (Séguia) d'environ 3,1 km.

Ces eaux vont ensuite contribuer à la recharge des puits implantés dans le lit d'oued Taghbalt.

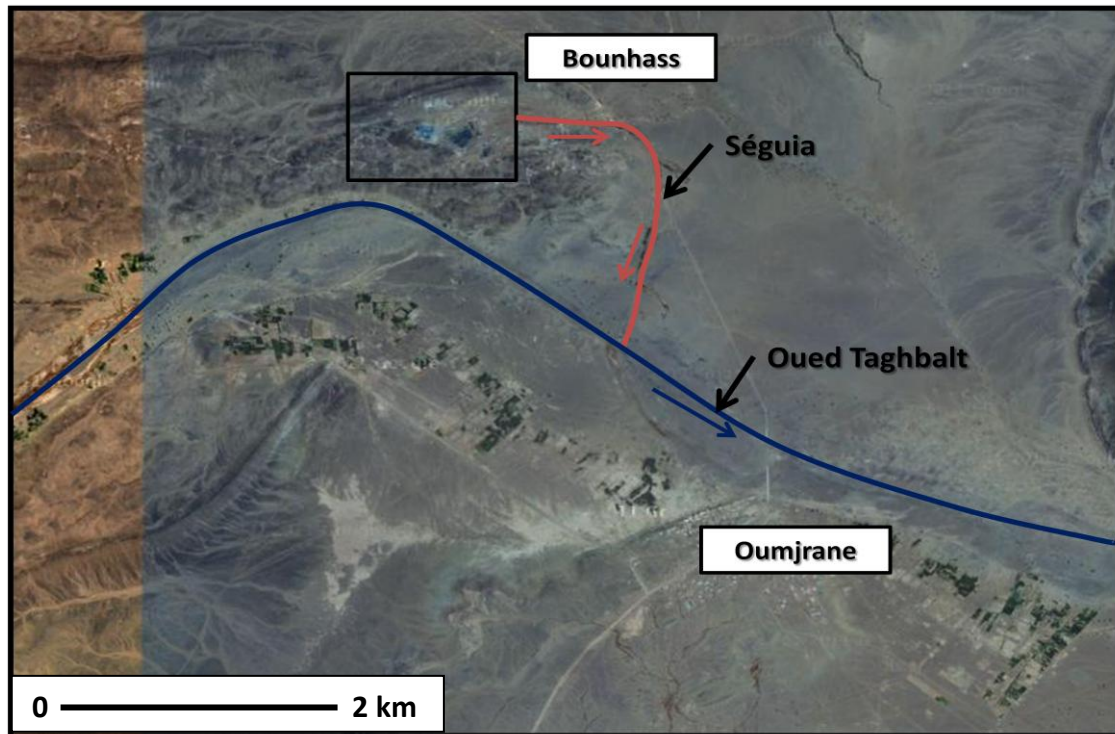


Figure 37 : Schéma de la séguia de Bounhass



Figure 38 : Puits implanté dans le lit d'oued Taghbalt

Pour connaître le comportement des eaux de rejet après leur sortie de la mine, nous avons effectué des mesures du pH et de la conductivité le long de la séguia, ainsi que des analyses qui ont eu lieu en juin 2012 et qui ont concerné les eaux en amont (dans la mine) et en aval.

1. Evolution du pH et de la conductivité

L'évolution du pH a montré une augmentation continue tout au long de la Séguia suite au dégazage de l'eau lors de son contact avec l'air (fig.39). Par conséquent, l'eau est devenue neutre après avoir parcourue une distance de 300 mètres. On a remarqué que la remontée du pH devient plus significative au niveau des buses, parce que c'est là où la turbulence de l'eau est forte et son contact avec l'air est favorisé.

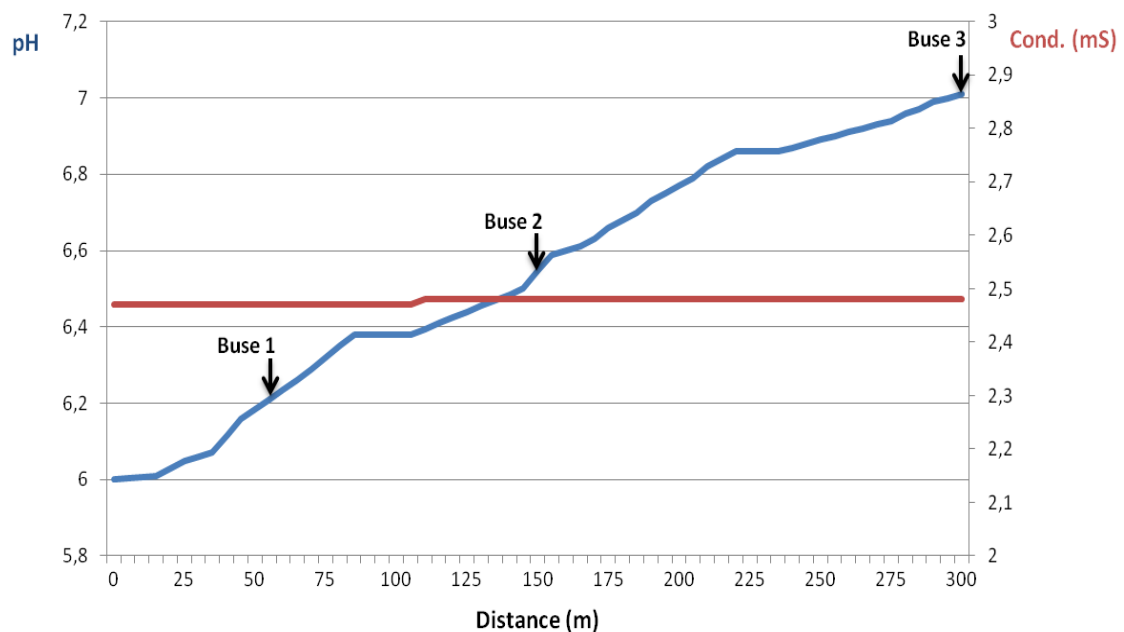


Figure 39 : Evolution du pH et de la conductivité de l'eau dans la Séguia



Figure 40 : Buse d'eau n°1 à Bounhass

L'augmentation de la turbulence à travers l'installation des buses s'est montrée comme une solution économique permettant d'éviter que les eaux soient acides à leur sortie de la mine.

D'un autre côté, la conductivité est restée presque constante, témoignant ainsi que l'évaporation et la déposition des sédiments n'ont pas encore un grand effet sur la minéralisation ; car pendant cette étape nous avons effectué les mesures uniquement dans une faible longueur de la Séguia : 300 mètres.

Dans une deuxième étape, nous avons suivi l'évolution de la conductivité de l'eau dans oued Taghbalt jusqu'au point où l'écoulement s'est arrêté suite à son infiltration qui est favorisée au niveau de la cuvette alluvionnaire d'Oumjrane (Tab.14).

Tableau 14 : Mesures de la conductivité des eaux dans oued Taghbalt

Mesures	Cond. (mS/cm)
20	2,32
21	2,22
22	2,21
23	2,17
24	2,14

On a constaté que les valeurs de la conductivité sont décroissantes suite à la déposition des sédiments qui est favorisée par la faible vitesse de l'écoulement suite à la faible pente dans la plaine d'oued Taghbalt.

D'autre part, la mesure de la minéralisation de l'eau, entre le point du commencement n°1 et le point de l'arrêt de l'écoulement n°24, a révélé que la minéralisation est passée de 1248 à 1098 mg/l. Autrement, l'eau s'est déchargée de 0,15g/l depuis sa sortie de la mine jusqu'à Oued Taghblat.

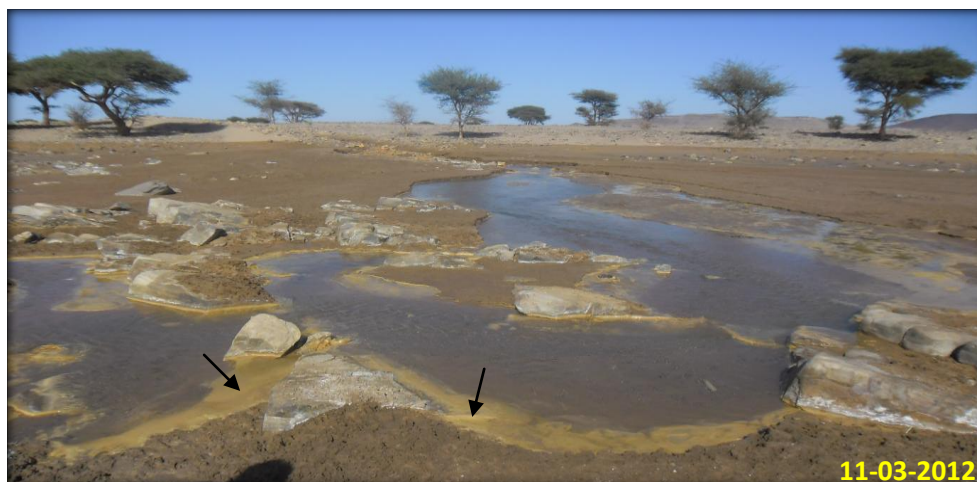


Figure 41 : Sédiments déposés par l'eau de rejet de Bounhass dans le lit d'oued Taghbalt

2. Evolution géochimique

Le suivi de l'évolution géochimique des eaux de rejet de Bounhass a montré que l'eau garde le même faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien entre l'amont et l'aval de la mine. On note quand même, sur le diagramme de Piper, une légère variation liée principalement au calcium (fig.42).

Les analyses chimiques ont montré une importante baisse des teneurs en calcium, de l'ordre de 86 mg/l. Cette valeur témoigne de la déposition de sédiments de nature carbonatée.

D'autre part, nous avons noté une augmentation des teneurs en bicarbonates (33,1 mg/l) et en sulfates (17,4 mg/l) de l'amont vers l'aval.

L'enrichissement en bicarbonates est lié à l'augmentation du pH suite au dégazage du CO_2 , alors que l'augmentation des teneurs en sulfates est attribuée au sulfure d'hydrogène (H_2S), gaz abondant dans les eaux souterraines de la région : lorsqu'elle est en contact avec l'air, l'eau cherche son équilibre avec l'atmosphère ; par conséquent, une partie du sulfure d'hydrogène aura tendance à se volatiliser et l'autre partie va s'oxyder en sulfates.

Dans la mine, l'odeur désagréable des eaux est due à ses fortes teneurs en H_2S .

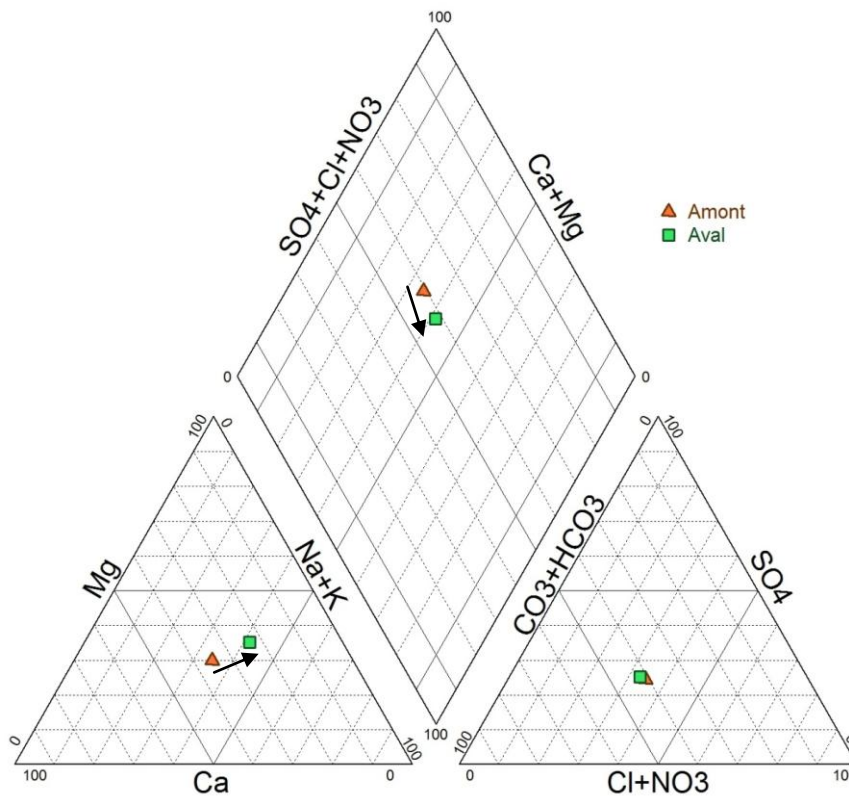


Figure 42 : Faciès chimique des eaux de rejet de la mine de Bounhass

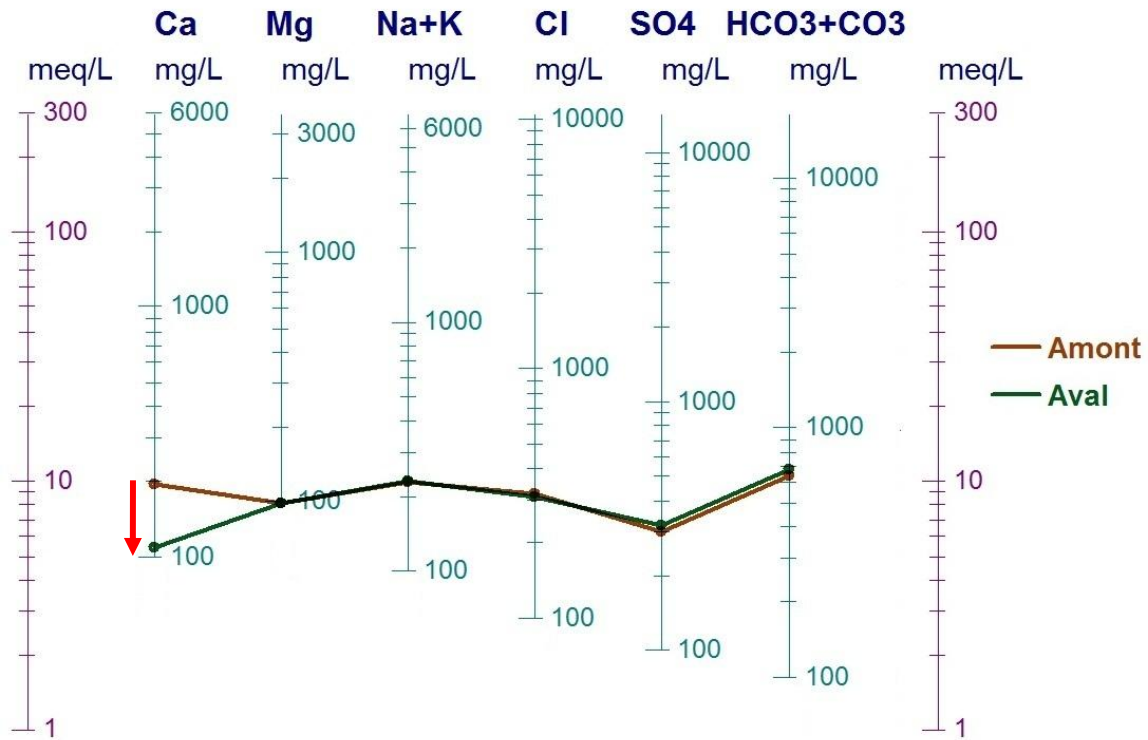


Figure 43 : Evolution amont - aval de la chimie des eaux de rejet de Bounhass

3. Indices de saturation et quantification des dépôts

Le calcul des indices de saturation (annexe n.5 p.78) a révélé que les eaux en amont sont équilibrées vis-à-vis de la calcite CaCO_3 , la calcédoine et la silice amorphe SiO_2 et sursaturées vis-à-vis de la goethite $\text{FeO}(\text{OH})$ et l'hématite Fe_2O_3 . Ces résultats indiquent que les eaux de l'amont ont tendance à précipiter de la silice et des minéraux ferreux. Ces sédiments sont d'ailleurs visibles au niveau de la mine en couleur ocre.

Par ailleurs, les eaux de l'aval sont équilibrées vis-à-vis de la Barite BaSO_4 , la calcédoine, la silice amorphe (SiO_2), l'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$, l'aragonite et la calcite, légèrement sursaturées vis-à-vis de la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ et surstaturées vis-à-vis de la goethite et l'hématite.

Les eaux à l'aval ont donc une tendance à déposer des sédiments carbonatés (calcite et dolomite) qui atteignent facilement leur équilibre, car la formation de ces minéraux est contrôlée par les réactions d'acide/base dont l'équilibre chimique est instantané. Il est à noter que ces minéraux, de couleur jaunâtre, sont abondants à l'aval de la mine.

D'un autre côté, la formation de la goethite et de l'hématite est contrôlée par des processus et des réactions d'oxydo-réduction dont les équilibres chimiques sont rarement atteints dans la

nature. Ceci explique pourquoi les indices de saturation de ces deux minéraux sont toujours élevés en aval (fig.44).

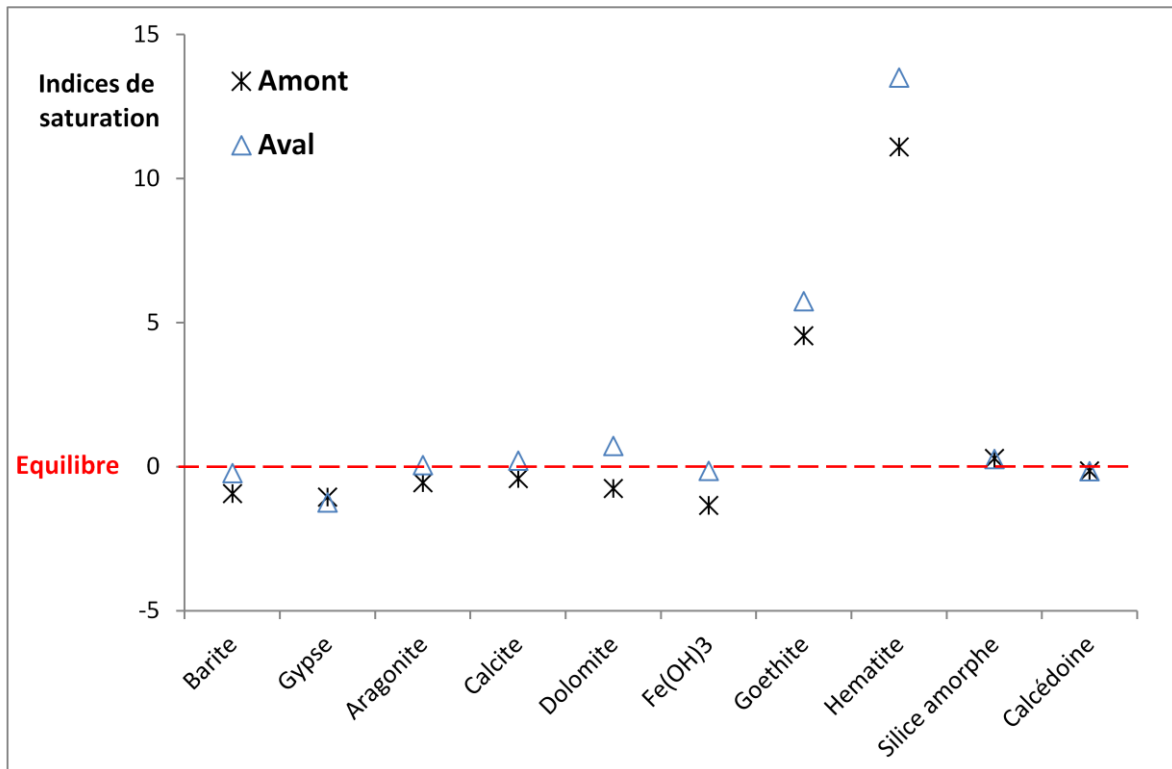


Figure 44 : Indices de saturation des eaux de rejet de Bounhass

Pour estimer la quantité des sédiments déposés par les eaux de la mine, nous avons calculé dans un premier temps la quantité des sédiments déposés pour 1 litre d'eau à partir des analyses chimiques des deux eaux en question (annexe n.6 p.79) ; le calcul a donné une valeur de l'ordre de 224,2 mg/l.

Connaissant le débit moyen total de pompage dans la mine est de l'ordre 70 l/s, la quantité de sédiments déposés par jour a été donc estimée de 1356 kilogrammes, soit 495 tonnes de sédiments déposés par an.

Une deuxième approche, pour la quantification des dépôts a consisté au calcul de la différence de la minéralisation entre l'eau de l'amont et de l'aval de la mine. Cette valeur est de l'ordre de 175 mg/l. Soit une quantité de sédiments déposés qui est de l'ordre 1,06 tonne par jour soit 386 tonnes par an.

La différence entre les deux quantités calculées est liée à la volatilisation des gaz et à la surestimation liée au calcul des carbonates qui a réagi avec le calcium et le magnésium.

VI. Apport de l'hydrochimie isotopique

Le principal objectif de ce travail vise essentiellement une meilleure connaissance du fonctionnement hydrogéologique dans la région d'étude dont notamment les problèmes d'origine des eaux et leur mode de recharge.

La précédente étude hydrochimique a été focalisée principalement sur les questions de l'origine de la minéralisation et les principaux mécanismes réactionnels plausibles responsables de la composition chimique de l'eau. Dans ce chapitre, nous utiliserons une approche isotopique, basée sur le traçage du milieu par les isotopes molécule d'eau.

1. Généralités

Le deutérium (^2H) et l'oxygène-18 (^{18}O) sont deux isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène, faisant partie intégrante de la molécule d'eau, d'où l'intérêt de leur utilisation comme traceurs intrinsèques naturels des eaux souterraines de la région.

Les concentrations isotopiques sont exprimés en teneurs « δ » par comparaison avec un étalon de référence pour lequel \mathbf{R} est supposé connu :

Où : \mathbf{R} est le rapport (abondance en isotope rare / abondance en isotope banal). Dans notre cas : $\mathbf{R} = ^2\text{H}/^1\text{H}, ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}, ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Ainsi, δ s'écrit :

$$\delta = \frac{\mathbf{R} \text{ échantillon} - \mathbf{R} \text{ étalon}}{\mathbf{R} \text{ étalon}}$$

Une valeur positive de δ traduit un enrichissement en isotopes lourds de l'échantillon par rapport à la référence, et inversement. Dans la nature, les variations isotopiques de la plupart des éléments sont faibles. Il est donc commode de simplifier la lecture des unités δ . Dans ce but, on exprime les teneurs isotopiques en parts pour mille (‰).

$$\delta = [(\mathbf{R} \text{ échantillon} - \mathbf{R} \text{ étalon}) / \mathbf{R} \text{ étalon}] \times 1000$$

Un standard a une composition isotopique dans l'échelle δ égale à 0 ‰. L'étalon employé est le νSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) : c'est une eau réputée représenter la composition isotopique moyenne des eaux océaniques. C'est à la fois une référence naturelle et logique, compte tenu de la masse océanique (environ 98% de l'hydrosphère). Cet étalon est adopté pour les mesures des teneurs $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des eaux. (Benkaddour, 1993).

Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ dans les eaux naturelles

Précipitations

Les précipitations résultent de la condensation lors du refroidissement des masses d'air humide. Autrement, c'est le passage de la phase vapeur saturée à la phase condensée (liquide ou solide). Ce passage est une réaction thermodépendante qui se fait à l'équilibre. En conséquence le deutérium et l'oxygène-18 ont le même comportement, et de ce fait leurs teneurs sont linéairement corrélés suivant la relation :

$$\delta^2\text{H} = 8.\delta^{18}\text{O} + d$$

La constante **d** dite « excès en deutérium » est une caractéristique de l'origine de la phase de la vapeur qui a condensé. Elle est dans la plupart des cas voisine de 10 ‰, en particulier pour les stations soumises à l'influence des perturbations océaniques (*In* Benkaddour, 1993). Cependant, elle peut varier sous l'effet de continentalité. Ainsi d est de l'ordre de 22 ‰ pour les stations de la Méditerranée orientale, et peut descendre jusqu'à 6 ‰ pour les stations continentales de l'Amérique du nord.

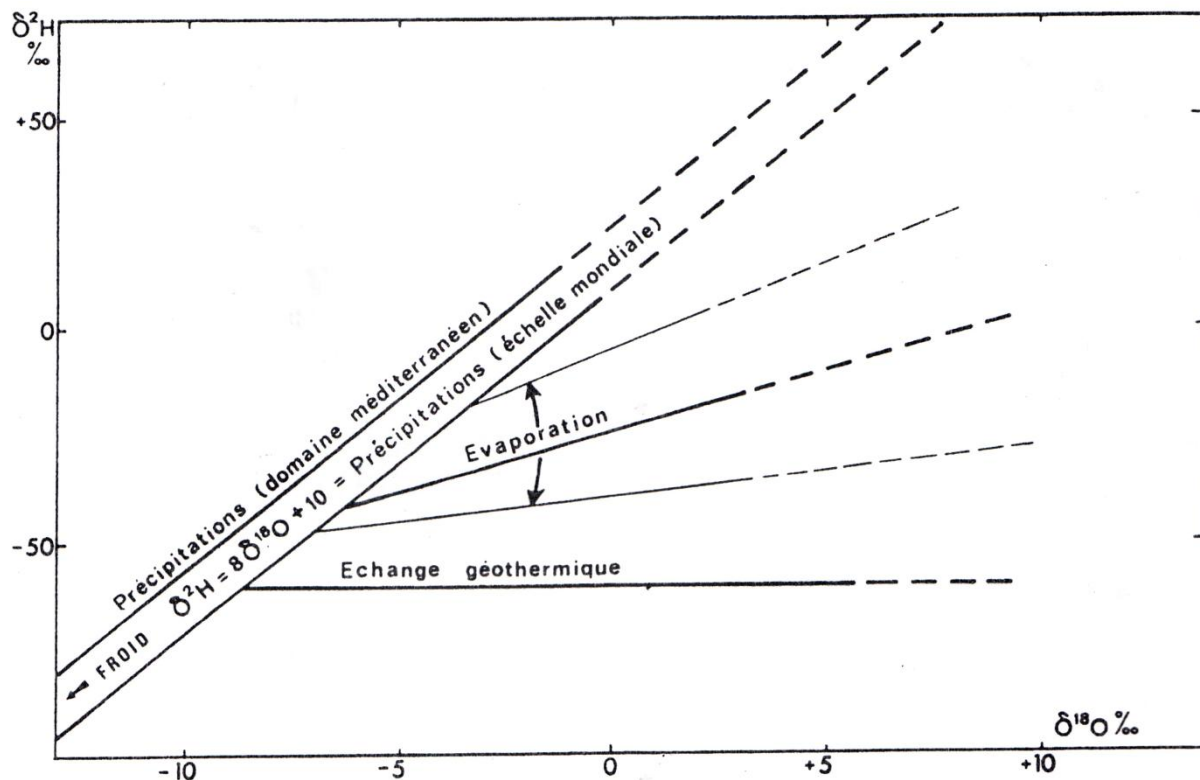


Figure 45 : Modalités du comportement isotopique des eaux naturelles (Fontes, 1976)

Evaporation

Contrairement à la condensation, l'évaporation est un phénomène qui se produit hors équilibre, puisqu'il intervient en atmosphère désaturée (humidité relative inférieure à 100%). Les molécules d'eau les plus légères sont préférentiellement affectées par l'évaporation. Ainsi, une eau soumise à l'évaporation s'enrichit de plus en plus en isotopes lourds.

L'enrichissement des teneurs en isotopes lourds varie d'un système évaporative à l'autre. Pour un climat donné, les eaux évaporées définissent dans le diagramme $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$ la droite d'équation suivante :

$$\delta^2\text{H} = a \cdot \delta^{18}\text{O} + d'$$

Où la valeur **a** est généralement comprise entre 3 et 5, alors que **d'** est généralement inférieure à 10 ‰ (In Benkaddour, 1993). De ce fait, les droites représentatives de l'évaporation s'inscrivent toujours sous la droite des eaux météoriques.

Echange géothermique

On doit envisager la possibilité que les eaux météoriques infiltrées très profondément et portées à des températures élevées puissent échanger l'oxygène 18 de la molécule d'eau avec celui des roches constituant le réservoir. Dans ce cas, les points d'eau représentés sur le diagramme $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ ne se situent plus sur la droite des eaux météoriques mais en dessous puisqu'il y a eu enrichissement en ^{18}O au contact de la roche dont les teneurs sont fortes sans que les teneurs en ^2H n'en soient affectées, le réservoir étant pratiquement dépourvu en minéraux hydrogénés.

Cet échange n'est effectif qu'à partir d'une température élevée et dépend aussi de la nature de la roche encaissante, de son état d'altération et des paramètres hydrauliques commandant le temps de séjour de l'eau (BRGM, 1996).

2. Relation $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$

Les analyses isotopiques en Oxygène-18 et en Deutérium ont concerné cinq points d'eau relevant de l'aquifère profond: Afilou n'Khou, Eau d'exhaure à Bounhass (Niveau -80 m), SH4 (forage à Bounhass), Rich Merzoug et Iraoun ainsi qu'un point d'eau représentant de la nappe alluvionnaire, prélevé à Takcha (fig.46).

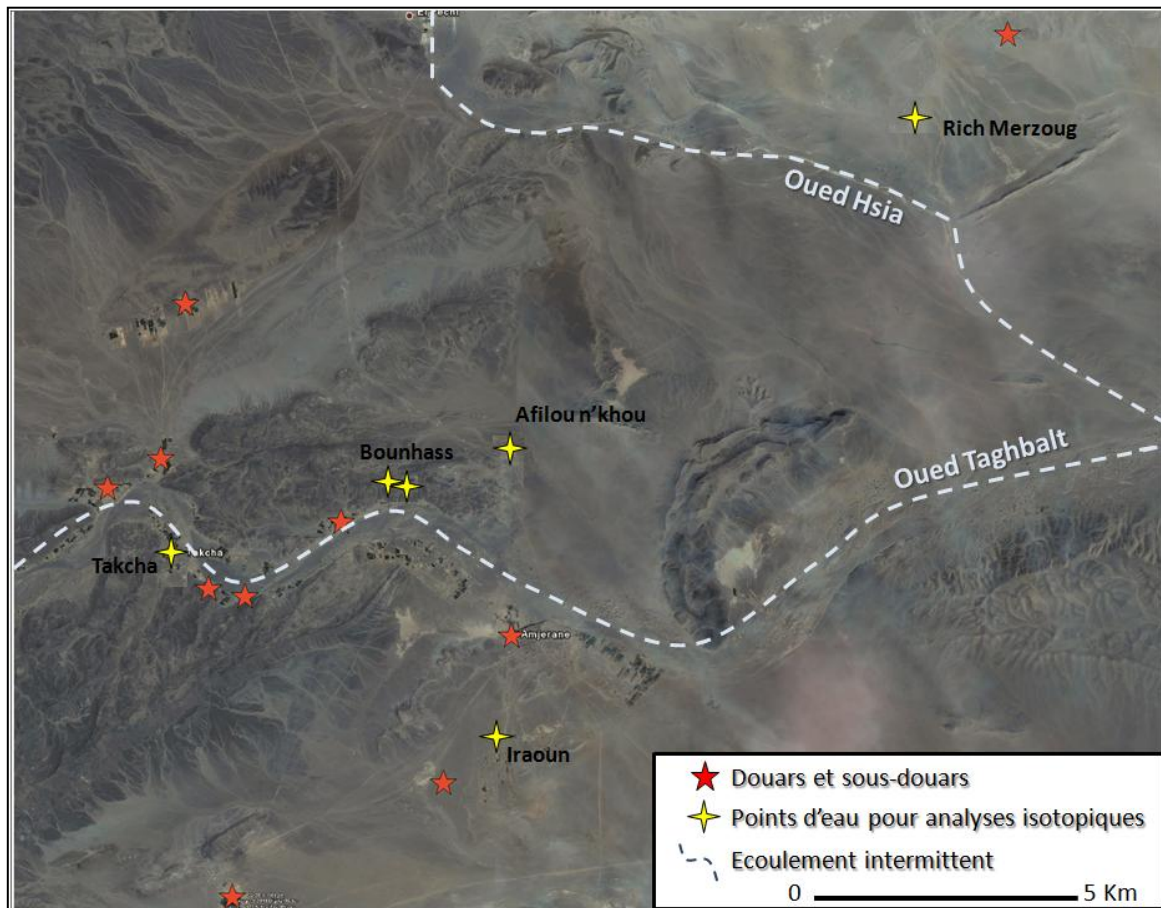


Figure 46 : Localisation des points d'eau échantillonnés pour des analyses isotopiques

En termes des teneurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, on a pu répartir les eaux grossièrement en trois groupes (fig.47) correspondant à des compositions pauvres et riches en isotopes stables, permettant de distinguer nettement trois types d'eau d'origine et d'évolution différentes :

- Les points d'eau de Bounhass, Iraoun et Afilou n'khou présentent un peu près les mêmes teneurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ avec les moyennes suivantes :

$$\delta^{18}\text{O} = -9,6 \text{ ‰} \text{ et } \delta^2\text{H} = -68,05 \text{ ‰}.$$

- Le point d'eau prélevé à Rich Merzoug, éloigné géographiquement d'environ 12 km des points d'eau composant le premier groupe et bien qu'il relève du même aquifère, il présente des teneurs isotopiques différentes : $\delta^{18}\text{O} = -8,77 \text{ ‰}$ et $\delta^2\text{H} = -62,8 \text{ ‰}$.

- Le point d'eau prélevé du lit de l'oued Taghbalt, à Takcha, présente les teneurs isotopiques les plus élevées : $\delta^{18}\text{O} = -7,14 \text{ ‰}$ et $\delta^2\text{H} = -46,5 \text{ ‰}$. Ces valeurs mettent en évidence une nette différenciation entre la nappe profonde et la nappe alluvionnaire.

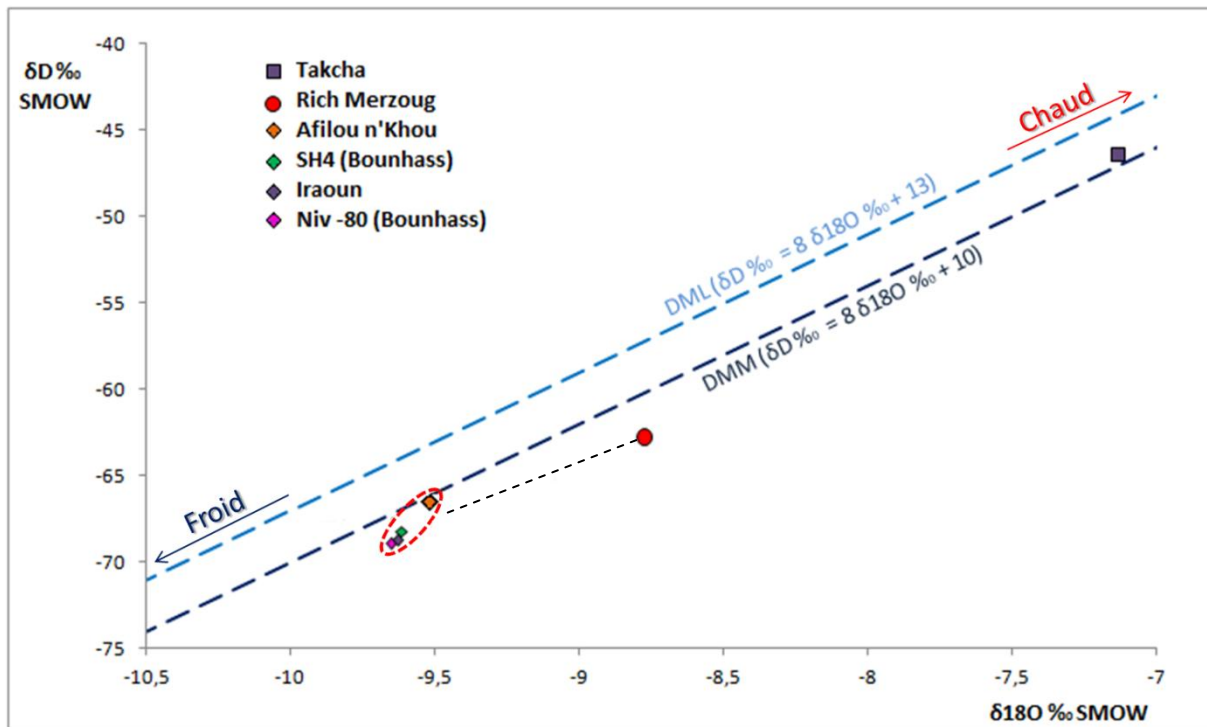


Figure 47 : Relation $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ des eaux souterraines d'Oumjrane

Faciès alluvionnaire

Dans le diagramme $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$, le point d'eau issu de la nappe alluvionnaire se montre assez distingué des autres points. Il est situé sur de la droite météorique mondiale (DMM : $\delta^2\text{H} = (8 \delta^{18}\text{O} + 10) \text{ ‰ SMOW}$) et légèrement en dessous de la droite météorique locale (DML : $\delta^2\text{H} = (8 \delta^{18}\text{O} + 13) \text{ ‰ SMOW}$).

La position de ce point sur le diagramme $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ suggère que les masses d'air humide responsables de la recharge de la nappe quaternaire ont une température élevée et par conséquent des altitudes de recharge relativement basses. Par ailleurs, les teneurs isotopiques ($\delta^{18}\text{O} = -7,14 \text{ ‰}$ et $\delta^2\text{H} = -46,5 \text{ ‰}$) étant proches de celles trouvés dans la nappe quaternaire de Tafilalet ($\delta^{18}\text{O}_{\text{moy}} = -6,7 \text{ ‰}$ et $\delta^2\text{H}_{\text{moy}} = -48 \text{ ‰}$: Ammary, 2007), suggèrent que les eaux de la nappe quaternaire d'Oumjrane auraient probablement des teneurs proches en tritium thermonucléaire et en radiocarbone que Tafilalet (^3H : 9 à 20 UT, ^{14}C : 94,9 à 107,6 pmc), attestant ainsi d'une recharge d'âge récent.

Faciès primaire

En termes de leurs teneurs isotopiques, les points d'eau représentatifs de la nappe profonde du secteur Oumjrane (Bounhass, Iraoun et Afilou n'Khou) constituent grossièrement un seul groupe. Les teneurs isotopiques du point d'eau de Rich Merzoug sont relativement éloignées de ce groupe pour des raisons que nous essaierons d'expliquer par la suite.

L'ensemble des points d'eau est situé en dessous de la DML et à l'exception d'Afilou n'Khou, ils sont tous légèrement situés en dessous de la DMM. Leur position sur le diagramme $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ indique que la recharge de la nappe primaire s'est faite dans des conditions climatiques froides ou probablement dans des hautes altitudes.

Pour expliquer l'écartement des points d'eau relatifs à Bounhass, Iraoun et Afilou n'Khou, nous sommes confrontés à trois hypothèses :

- Ces eaux ont subi un léger échange géothermique avec la roche dans des conditions de température et de profondeur élevées, ce qui a abouti à un léger enrichissement en Oxygène-18 qui est en moyenne de l'ordre de +0,45 ‰.
- Il s'agit d'un enrichissement en Deutérium et en Oxygène-18 suite à une légère évaporation.
- Les eaux ont subi les deux effets : évaporation et échange géothermique.

Dans les deux derniers cas, on ne possède d'aucune droite d'évaporation et on ne peut donc avoir une idée sur la quantité d'enrichissement isotopique.

D'autre part, l'enrichissement en teneurs isotopiques au point Rich Merzoug est expliqué par l'effet de l'évaporation. Cette théorie a été confortée par les analyses chimiques qui montrent que l'eau de Rich Merzoug présente la conductivité et les concentrations les plus élevées. En laissant admettre cette hypothèse, la droite de l'évaporation aurait l'équation suivante : $\delta^2\text{H} = (5,3 \delta^{18}\text{O} - 72) \text{‰ SMOW}$ (fig.48).

D'un autre côté, l'évaporation des eaux de Rich Merzoug est probablement favorisée par l'abondance des failles dans le secteur en question. Sachant que les eaux étudiées présentent des importantes manifestations carbo-gazeuses, le contact eau/atmosphère aboutira donc à l'augmentation de leur pH suite à leur dégazage. Ceci est encore une hypothèse qui a été mise en évidence par le rapport pH/ $\delta^2\text{H}$.

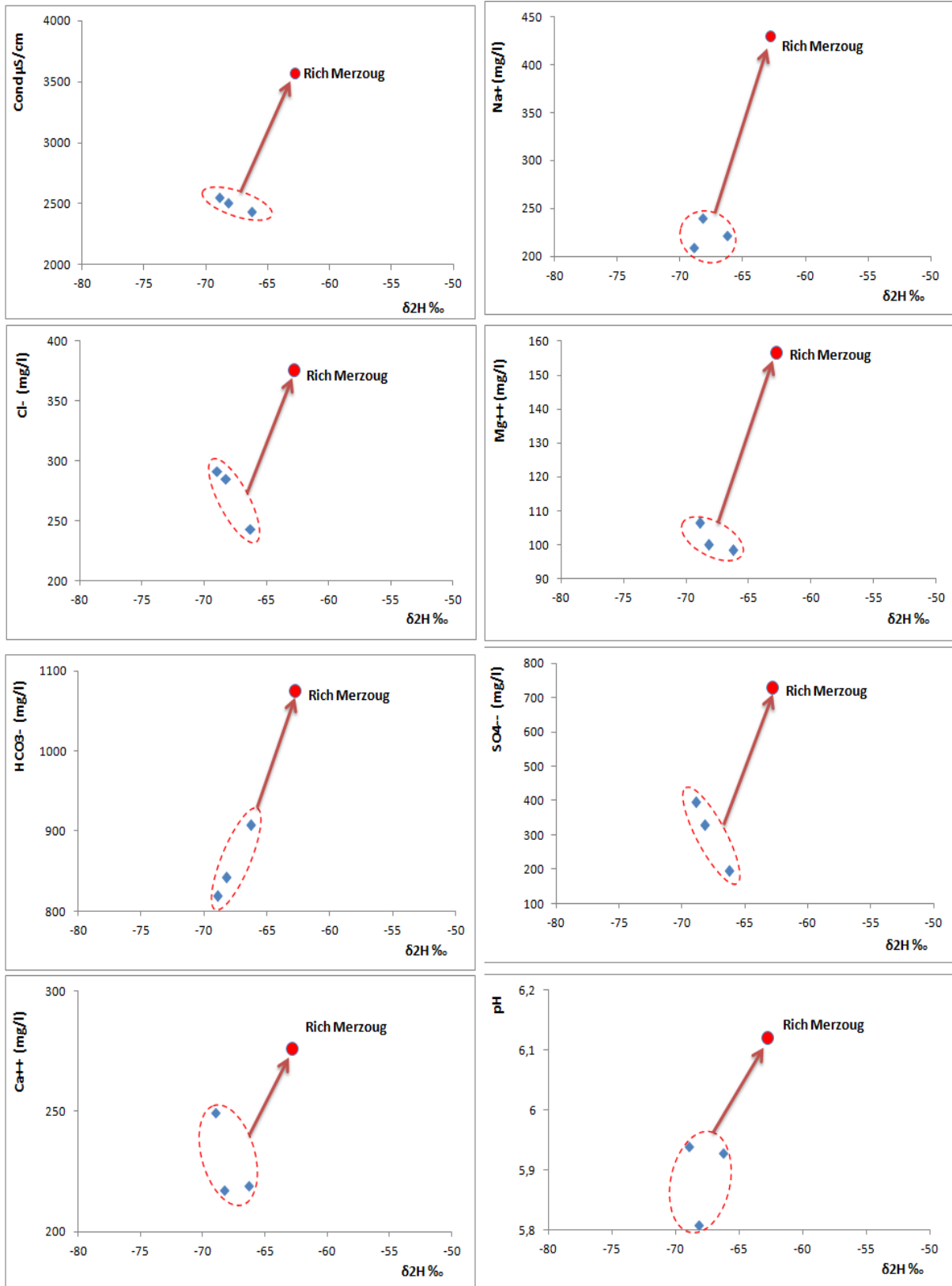


Figure 48 : Relation éléments chimiques / teneurs isotopiques en ^{18}O

3. Localisation des aires de recharge

Dans le but de déterminer l'altitude de la recharge des deux aquifères en question, on est amenés à projeter les teneurs $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations d'origine sur l'équation du gradient « altitude et composition isotopique en oxygène-18 » (fig. 49) ; afin de préciser ces teneurs, on est confrontés à deux hypothèses :

- Les masses d'eau d'air humide proviennent uniquement d'une origine Atlantique. Dans ce cas, on se base sur la droite météorologique mondiale :
 - o Les masses d'air humide qui ont alimenté la nappe quaternaire auraient les teneurs isotopiques suivantes : $\delta^{18}\text{O} = -7,14\text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = -46,5\text{‰}$. L'aire de recharge aurait donc une altitude de l'ordre de **1830 m**.
 - o Les teneurs isotopiques des masses d'air humide qui ont alimenté la nappe profonde seraient de l'ordre de $\delta^{18}\text{O} = -9,6 \text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = -67,5\text{‰}$, si on admet qu'elles ont subi uniquement un échange géothermique, dans ce cas l'altitude de recharge serait de l'ordre de **2460 m**. Pour les autres cas (effet de l'évaporation ou les deux effets combinés), les teneurs isotopiques originales seraient inférieures aux valeurs précédentes (car les eaux avant leur évaporation ont des teneurs isotopiques moins élevées) et l'altitude de recharge serait donc **supérieure à 2460 m**.
- Les masses d'air humide proviennent de deux origines : Atlantique et Méditerranéenne (Ouda, 2005). Dans ce cas, on utilise la droite météorologique locale :
 - o En laissant admettre cette hypothèse, les masses d'air humide qui ont alimenté la nappe quaternaire d'Oumjrane auraient subi un fractionnement isotopique suite à une légère évaporation. Dans notre cas, on ne dispose d'aucun autre point appartenant au même contexte hydrogéologique que Takcha, donc il n'est pas possible de préciser les teneurs isotopiques originales. Tout de même, il est évident que l'aire de recharge correspondrait à des reliefs ayant des altitudes supérieures à celles admises dans la première hypothèse (1830 mètres).
 - o En admettant que les eaux de la nappe profonde d'Oumjrane ont subi un échange géothermique, les teneurs isotopiques originales seraient les suivantes : $\delta^{18}\text{O} = -10,15 \text{‰}$ et $\delta^2\text{H} = -67,5\text{‰}$. Soit une altitude de recharge égale 2600 m pour le cas de l'échange géothermique et supérieure à 2600 m pour les autres cas (pour les mêmes raisons expliquées précédemment).

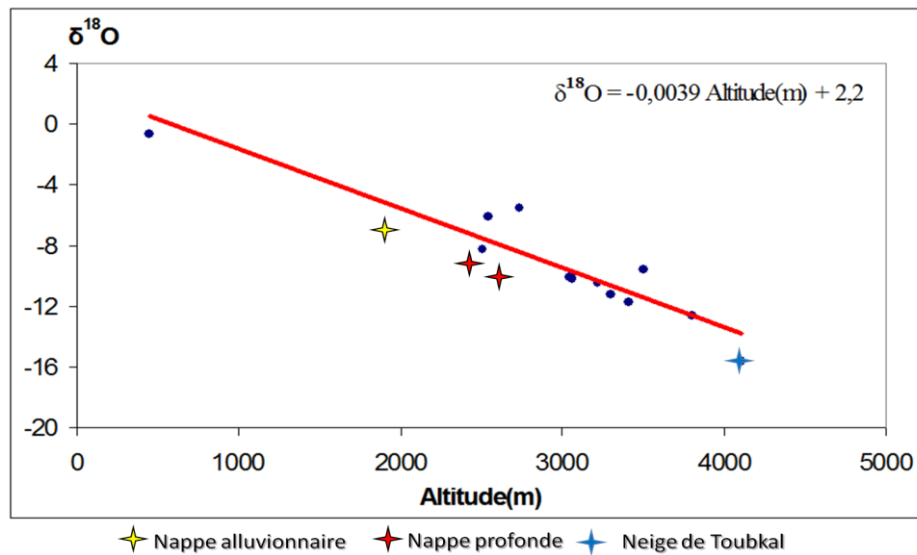


Figure 49 : Gradient altitude et composition isotopique en oxygène-18 (Benkaddour, communication personnelle)

La localisation de l'aire de recharge de la nappe quaternaire a été effectuée sur la base d'une carte topographique, en suivant les collecteurs appartenant au bassin hydrographique de Taghbalt et qui drainent les ruissellements ayant les altitudes équivalentes ou supérieures à 1830 mètres. Ces altitudes ont donc été retrouvées à environ 50 km au Nord-Est de la zone d'étude, elles correspondent au massif granitique du Jbel Saghro (fig.50).

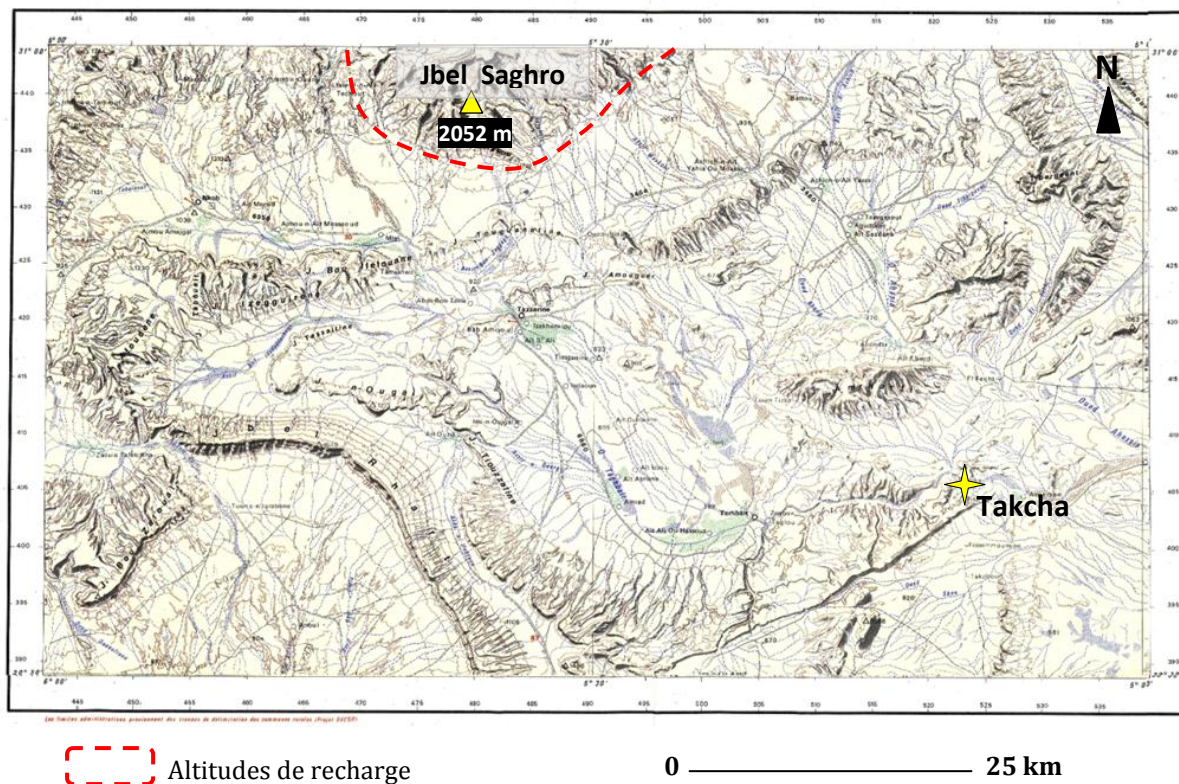


Figure 50 : Localisation de l'aire de recharge de la nappe alluvionnaire d'Oumjrane

Les faibles teneurs isotopiques trouvés dans les eaux de la nappe profonde d'Oumjrane suggèrent que la recharge de l'aquifère s'est effectuée dans des conditions climatiques froides. La recharge serait effectuée soit à partir de hauts reliefs ou pendant des périodes climatiques froides et humides. Cette dernière hypothèse est éliminée vu les fortes productivités de cette aquifère.

Donc, pour localiser les reliefs élevés où la recharge de l'aquifère profond d'Oumjrane s'est effectuée, il fallait mettre l'accent sur les principales failles profondes de la région qui draineraient l'eau jusqu'au secteur étudié :

Plusieurs réseaux de failles sont reconnus dans l'Anti-Atlas sur 600 Km de chaîne, mais on peut cependant noter une abondance particulière de ces failles dans la cuvette du Maider avec une direction générale WSW-ENE (Michard, 1989). Il s'agit du couloir de fracturation le plus marqué à l'Anti-Atlas oriental, allant de Zagora à M'fis (fig.51). Ce trait majeur de l'Anti-Atlas est le graben de Zagora (70 km de long et 1 à 5 km de large).

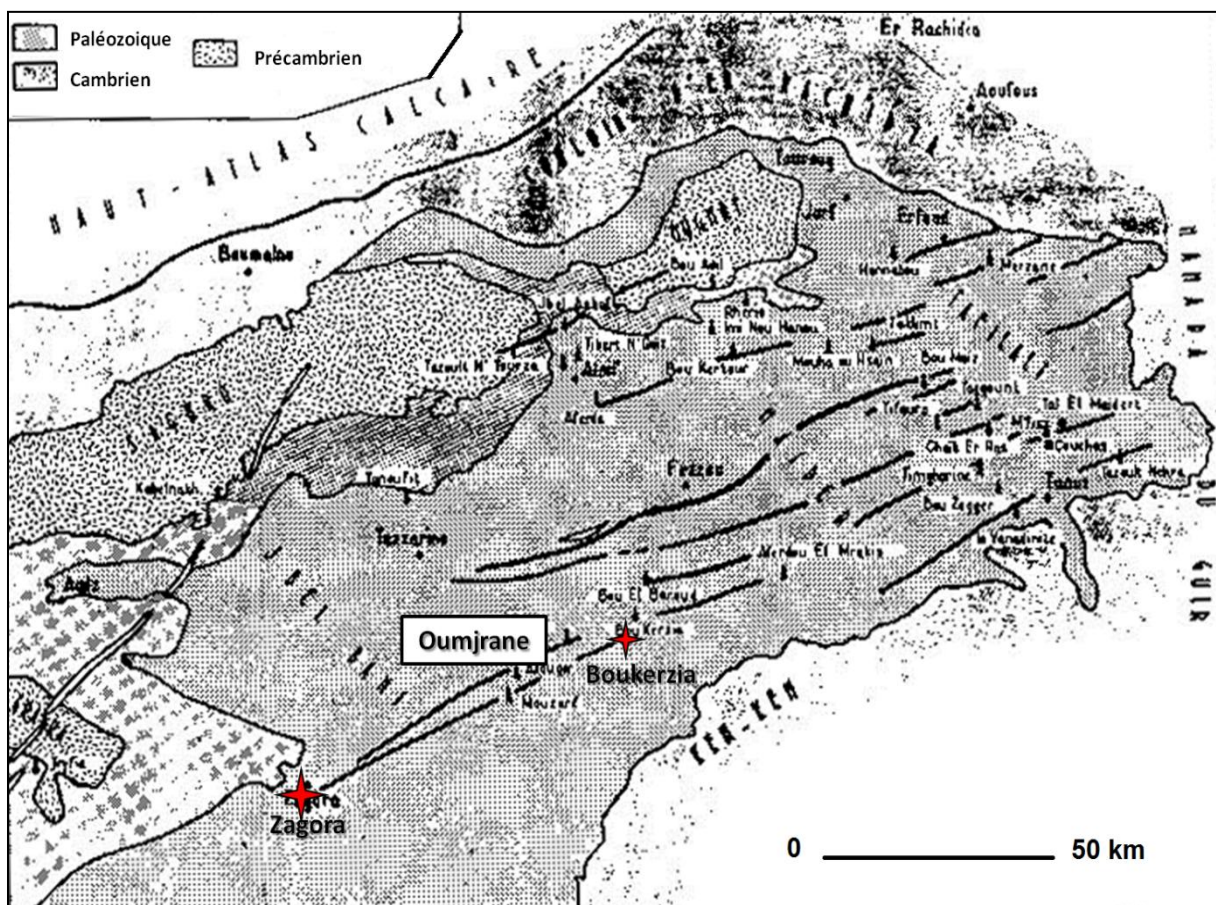


Figure 51 : Principales failles du Maider (Michard, 1989)

Pour expliquer l'origine des eaux, nous sommes confrontés à une hypothèse qui stipule que les eaux qui ont alimenté l'aquifère fissuré d'Oumjrane proviennent du bassin versant du haut et du moyen Drâa, qui est lui-même alimenté par les hauts reliefs du Haut Atlas. Une fois infiltrés, les ruissellements souterrains d'oued Drâa vont être déviés vers le bassin du Maider suivant les grandes failles du graben de Zagora.

Cette hypothèse est confortée d'une part par la signature isotopique de la neige du Haut Atlas ($\delta^{18}\text{O} = -10,3 \text{ ‰}$ et $\delta^2\text{H} = -70 \text{ ‰}$: Cappy, 2006) qui est presque identique à celle qu'on a déduit pour l'alimentation de la nappe profonde ($\delta^{18}\text{O} = -10,15 \text{ ‰}$ et $\delta^2\text{H} = -67,5 \text{ ‰}$) et d'autre part par l'abondance, dans le Haut Atlas, des minéraux évaporitiques (fig.52) qui sont présents naturellement dans les différentes formations géologiques (Trias, Crétacé, Eocène et Mio-Pliocène) et dont la dissolution a marqué la géochimie des eaux étudiées.

On note également une ressemblance entre les processus géochimiques affectant les eaux souterraines du Haut Atlas et de la nappe profonde d'Oumjrane, tels que l'effet de dédolomitisation associé à la dissolution de gypse ou l'abondance du CO_2 gaz remontant le long de fractures des roches précambriennes.

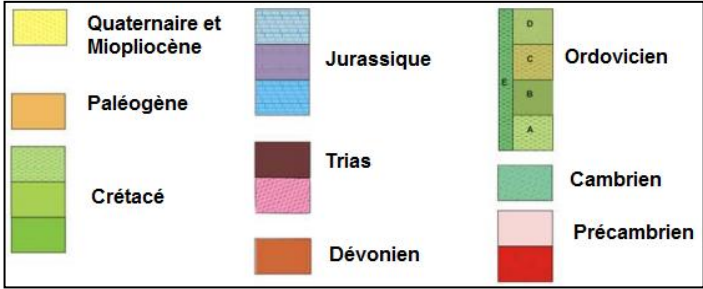
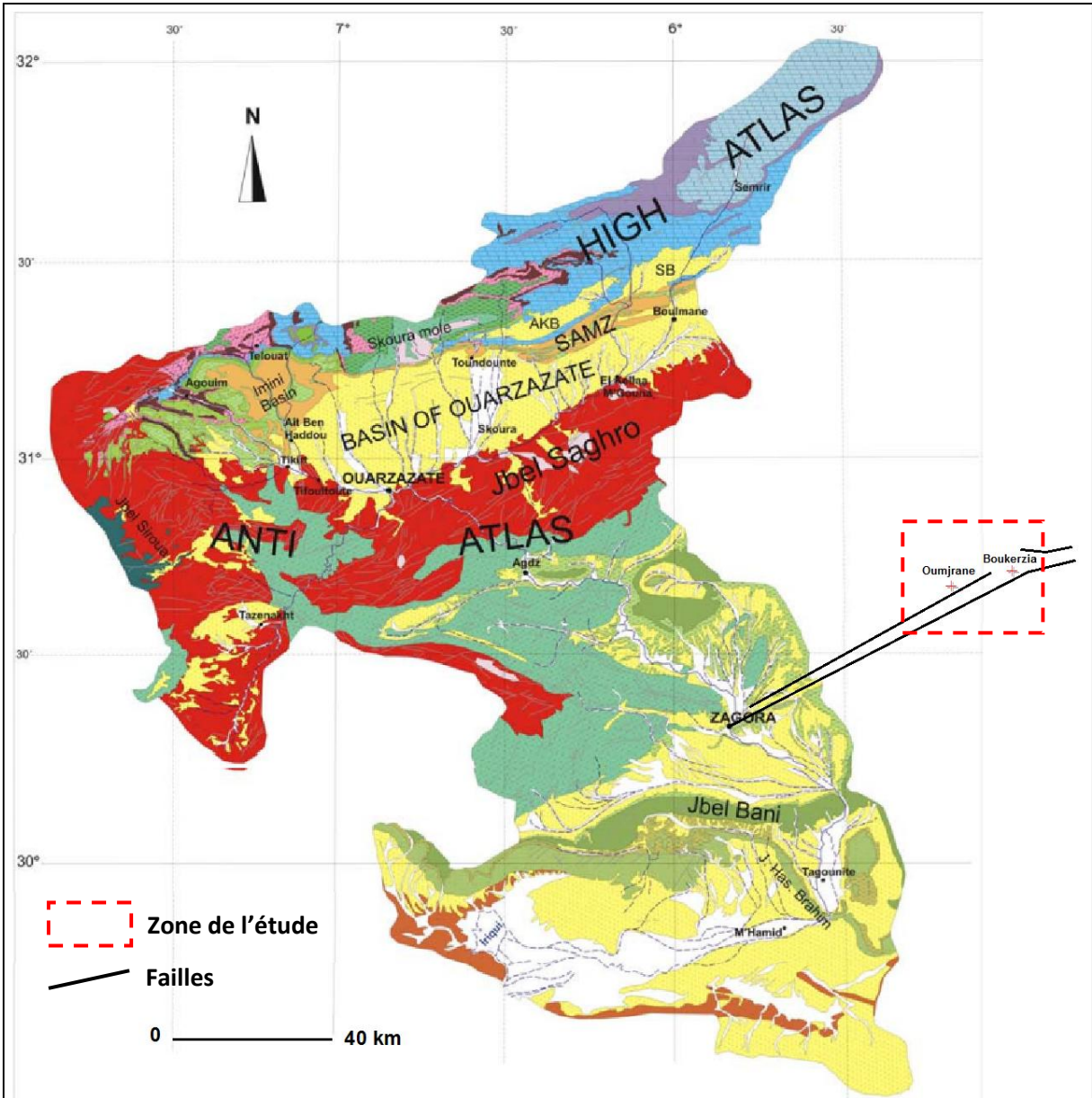


Figure 52 : Carte géologique simplifiée du Haut et Moyen Drâa (Cappy, 2006 : modifiée)

Conclusion générale

Le suivi de la piézométrie des nappes de la région ainsi que le pompage des principales mines actives (Bounhass et Afilou n'Khou) ont mis en évidence un rabattement global dans l'ensemble des points d'eau suite aux forts pompages liés à la consommation humaine, à l'irrigation et aux dénoyages miniers.

Nous avons essayé à travers une approche conjuguée des techniques de géochimie et d'hydrologie isotopique de comprendre l'origine des eaux et leurs modalités de recharge d'une part et, d'autre part, les processus physico-chimiques contrôlant la minéralisation des eaux dans la région.

L'analyse géochimique a montré l'existence des différents faciès chimiques dans les eaux souterraines et a permis de cerner les principales réactions responsables de la composition chimique de l'eau. L'interprétation des analyses chimiques montre que l'origine des fortes concentrations en sels observées dans les eaux souterraines de la région d'Oumjrane est due notamment à la dissolution des évaporites des formations aquifères et au processus de dédolomitisation ; phénomènes liés principalement à la nature minéralogique des réservoirs et des formations traversées.

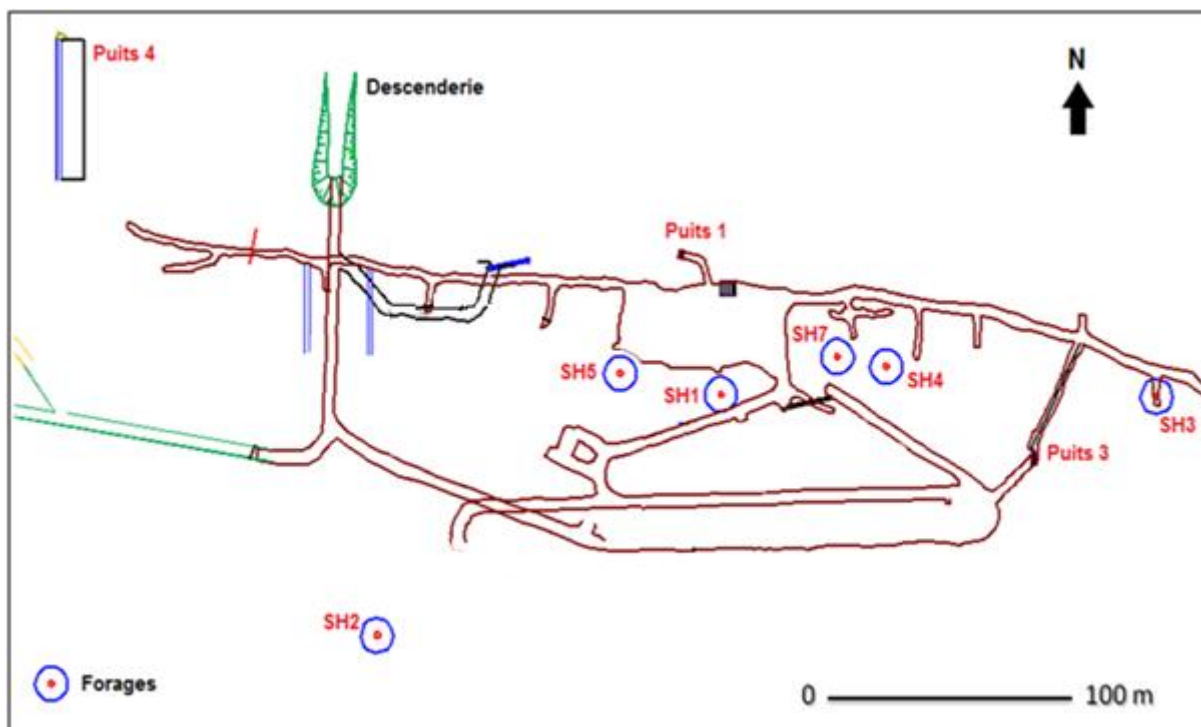
Une partie de l'étude a concerné l'évolution hydrogéochimique des eaux pompées dans la mine de Bounhass. Les eaux ont montré une élévation du pH et une baisse de la minéralisation de l'amont vers l'aval de la mine, suite à la combinaison des deux phénomènes de volatilisation et de déposition des sédiments qui sont principalement de nature carbonatée. Les dépôts ont été estimés de 386 à 495 tonnes par an.

L'analyse isotopique a confirmé en premier lieu la différenciation entre la nappe alluvionnaire et la nappe profonde d'Oumjrane. Par ailleurs, il a mis en évidence d'une part, la recharge actuelle des principaux aquifères et d'autre part, les différents mécanismes supplémentaires contrôlant la composition de l'eau. Il s'agit notamment d'une légère reprise évaporatoire d'un pôle riche en ^{18}O et en éléments chimiques (Rich Merzoug), et de la combinaison de différentes hypothèses concernant l'enrichissement en ^2H et en ^{18}O (échange géothermique, évaporation ou les deux), qui ont indiqué une alimentation locale de la nappe alluvionnaire (Jbel Saghro) et une recharge profonde de la nappe primaire d'Oumjrane provenant des reliefs du Haut Atlas.

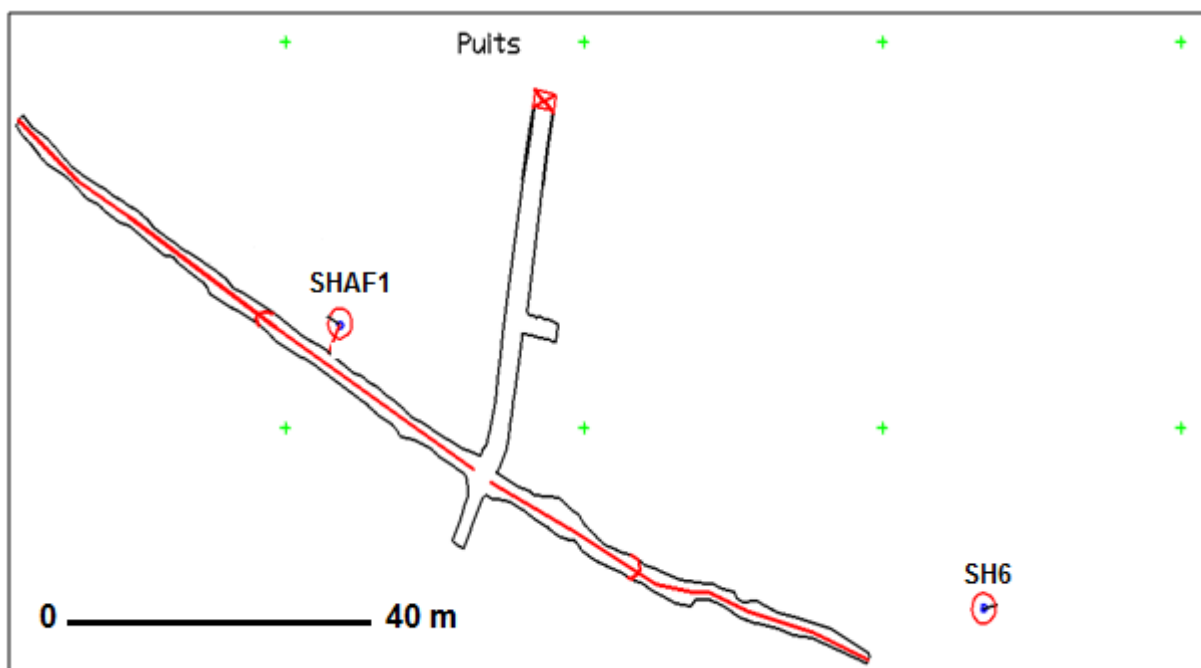
Références bibliographiques

- Ammary B., (2007) - Etude géochimique et isotopique des principaux aquifères du bassin Crétacé d'Errachidia et de la plaine de Tafilalet, Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Mohamed V – Agdal - Faculté des Sciences, Rabat, 134 p..
- Baidder L., (2007) - Structuration de la bordure septentrionale du Craton Ouest Africain du Cambrien à l'actuel : Cas de l'Anti Atlas oriental du Maroc, Thèse, Univ. Hassan II – Ain Chock – Faculté des Sciences, Casablanca, 209 p..
- Beniakhi R., (2011) - Etude d'impact sur l'environnement du projet de développement cuprifère d'Oumjrane, OBE., pp. 10-27.
- Benkaddour A., (1993) - Changements hydrologiques et climatiques dans le Moyen-Atlas Marocain ; chronologie, minéralogie, géochimie isotopique et élémentaire des sédiments lacustres de Tigalmamine, Thèse, Univ. Paris Sud, 157 p..
- Boissavy. Ch., (1979) - Etude structurale et métallogénique des filons cuprifères du Maider occidental - Anti Atlas Marocain, Thèse du 3^{ème} cycle, Univ. Paris VI, 318 p..
- BRGM, (1996) - Les techniques isotopiques : application aux eaux minérales, Note technique n°7, Ministre de l'économie des finances et de l'industrie, Division nationale des eaux minérales et thermales, France, 17 p..
- Brins N., (2011) - Classification statistique et hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya. (W) De Biskra-Algérie, Courrier du savoir, pp. 41-46.
- Cappy S., (2006) - Hydrogeological characterization of the Upper Drâa Catchment : Morocco, Thèse, Univ. Bonn, 216 p..
- Fontes J.Ch., (1976) - Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : quelques aspects, Thèse d'état, Paris VI, 208 p..
- Michard A.G., (1989) - Sédiments témoins de la Transgression mésozoïque dans le Tafilalet et le Maïder ; conséquences sur la métallogénie des gisements filoniens à Pb-Zn (Cu) de l'Anti-Atlas marocain, Chron. Rech. Min. N°495, pp. 51-60.
- Combe M., Ruhard J.P., & Yacoub M., (1977) - Présentation du bassin du Maider. In : Ressources eau du Maroc : Domaine atlasique et sud-atlasique, Notes et mémoires du service géologique du Maroc, N°231 pp. 416-429.
- Ouda B., El Hamdaoui A. and Ibn Majah M., (2005) - Isotopic composition of precipitation at three Moroccan stations influenced by oceanic and Mediterranean air masses. In : Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate, IAEA-TECDOC-1453, pp. 125-140.
- Popov A. et Belkasmi A., (1983) - Les gisements de cuivre d'Oumjrane–Boukerzia : Synthèse géologique et évaluation des réserves, BRPM, pp. 21-34.
- Portail du département de l'eau au Maroc : www.water.gov.ma

Annexes



Annexe 1 : Plan simplifié de Bounhass (source : AGM – Oumjrane)



Annexe 2 : Plan simplifié d'Afilou n'Khou (source : AGM – Oumjrane)

Annexe 3 : Liste des points d'eau échantillonnés pour des analyses chimiques

Code	Douars	T°	pH	Cond µs/cm	OD mg/l	DCO mg/l	Turbidité (NTU)	MES (mg/l)
AM24	Amerdoule	26,7	5,91	2100	6	<10,0	64	207
AM14	Amerdoule	26,4	5,89	2890	3,86	<10,0	194	704
AM04	Amerdoule	25,8	5,9	3120	3,25	<10,0	65	237,5
AM01	Amerdoule	25	6,04	3270	3,32	<10,0	7,39	<5,0
AM11	Amerdoule	25	6,29	2690	3,7	19,3	10,3	<5,0
TAG40	Tagourt	24,4	8,09	1505	4,4	<10,0	2,25	<5,0
TAG39	Tagourt	24,9	7,71	1465	4,34	<10,0	2,37	<5,0
TAG38	Tagourt	26,1	7,81	1096	5,43	<10,0	2,41	<5,0
TAG37	Tagourt	25	7,78	1366	5,3	<10,0	1,97	<5,0
TAG01	Tagourt	24,6	7,55	2380	5,47	<10,0	13	<5,0
TAK09	Takcha	25	6,3	1649	4,53	<10,0	4,19	<5,0
TAK22	Takcha	23,1	7,19	4840	2,77	<10,0	6,8	<5,0
Tif 07	Tifekhsite	21,4	7,8	3280	5,51	<10,0	5,73	<5,0
Tif01	Tifekhsite	22	7,78	4720	6,2	<10,0	2,88	<5,0
Tif05	Tifekhsite	24,1	7,74	2100	5,44	<10,0	2,36	<5,0
Tif40	Tifekhsite	24,3	7,1	3540	5,3	<10,0	12,1	<5,0
Oj06	Oumjrane amont	23,4	7,95	961	4,5	<10,0	2,35	<5,0
Oj09	Oumjrane amont	24,5	7,79	1273	5,6	<10,0	2,43	<5,0
Oj10	Oumjrane amont	22,7	7,64	1244	5,05	14,5	1,35	<5,0
Oj11	Oumjrane amont	26	7,5	1292	4,15	14,5	2,47	<5,0
Oj12	Oumjrane amont	26,8	7,23	1081	3,5	14,5	2,1	<5,0
Oj13	Oumjrane amont	26	6,88	968	6,25	28,9	1,99	<5,0
Oj118	Oumjrane amont	26,7	7,96	521	5,06	<10,0	4,76	<5,0
Oj53	Oumjrane amont	22,8	7,44	732	4,2	<10,0	2,54	<5,0
Oj95	Oumjrane aval	25,3	7,29	2300	5,43	<10,0	3,56	10
Oj81	Oumjrane aval	23,8	7,41	2070	5,25	<10,0	2,63	<5,0
Oj116	Oumjrane aval	20,8	8,58	437	3,2	<10,0	1,81	<5,0

Code	Douars	T°	pH	Cond µs/cm	OD mg/l	DCO mg/l	Turbidité (NTU)	MES (mg/l)
Bn	zone minière	27,8	5,94	2560	3,24	<10,0	7,59	<5,0
Ojt38	Takhourt	21,8	6,96	2700	1,3	14,4	35,8	6
Ojt36	Takhourt	24,6	6,06	2320	3,76	14,4	79	36
Ojt46	Takhourt	26,4	6,46	2820	5,58	<10,0	22,2	<5,0
Ojt02	Takhourt	25,9	6,03	2340	4,15	<10,0	55,6	8,5
Ojt06	Takhourt	26,8	6,03	2280	3,02	<10,0	50,2	9,5
Oj106	Oumjrane aval	23,7	7,57	5680	6,3	14,5	4,09	<5,0
Oj48	Oumjrane amont	24,1	7,82	1085	5,94	<10,0	14,4	<5,0
Tis15	Tismoumine	22,1	7,21	3600	6,5	33,8	1,79	<5,0
Tis05	Tismoumine	22,6	6,61	10000	4,03	<10,0	10,6	<5,0
Tis09	Tismoumine	22,3	6,88	5510	4,24	<10,0	2,66	<5,0
Tis13	Tismoumine	26,8	6,18	2450	5,52	<10,0	54,4	41,5
Tis14	Tismoumine	28,7	6,38	921	2,3	<10,0	19,4	5,5
Bo01	Boukerzia	26,2	7,22	1811	2,16	<10,0	5,44	<5,0
RM01	Riche Merzoug	26	6,12	3570	1,6	<10,0	51,8	22
RM02	Riche Merzoug	18,9	8,12	2300	4,8	<10,0	4,78	<5,0
Oj54	Oumjrane aval	18	8,02	1961	5,4	<10,0	33,9	16
SH7	Bounhass	30,7	5,81	2510	5,44	<10,0	65	<5,0
Ak	Afilou n'khoul	37,2	5,93	2440	6,32	<10,0	59,2	7
OjA	Oumjrane	17	8,01	937	6,22	<10,0	1,93	<5,0
OjB	Oumjrane	22,9	8,02	1312	7,12	14,4	3,18	<5,0

Annexe 4 : Indices de saturation des eaux souterraines d'Oumjrane

Nom	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypse	Halite
AM24	-1,35	-0,69	-0,54	-1,11	-1,13	-5,98
AM14	-1,12	-0,64	-0,5	-1,02	-0,9	-5,6
AM04	-1,07	-0,64	-0,5	-1,01	-0,85	-5,47
AM01	-0,94	-0,46	-0,31	-0,65	-0,72	-5,44
AM11	-1,58	-0,02	0,13	0,34	-1,36	-5,93
TAG40	-1,45	0,83	0,98	1,96	-1,23	-6,16
TAG39	-1,46	0,46	0,61	1,2	-1,24	-6,19
TAG38	-1,76	0,3	0,45	0,94	-1,54	-6,5
TAG37	-1,67	0,29	0,43	0,92	-1,45	-6,19
TAG01	-1,28	0,29	0,43	0,95	-1,06	-5,62
TAK09	-1,44	-0,84	-0,7	-1,31	-1,22	-6,1
TAK22	-0,75	0,37	0,51	1,16	-0,53	-5,05
Tif07	-0,88	0,69	0,83	1,65	-0,66	-5,31
Tif01	-0,67	0,73	0,87	1,78	-0,45	-4,99
Tif05	-1,2	0,45	0,59	1,19	-0,98	-5,76
Tif40	-1,02	0,01	0,15	0,53	-0,8	-5,22
Oj06	-1,81	0,34	0,48	0,99	-1,59	-6,57
Oj09	-1,76	0,18	0,33	0,77	-1,54	-6,27
Oj10	-1,8	0	0,15	0,41	-1,58	-6,31
Oj11	-1,78	0,07	0,21	0,54	-1,56	-6,3
Oj12	-1,88	-0,21	-0,07	-0,06	-1,66	-6,5
Oj13	-1,87	-0,47	-0,33	-0,63	-1,65	-6,68
Oj118	-2,62	-0,17	-0,02	0,02	-2,4	-7,1
Oj53	-2,03	0,03	0,17	0,39	-1,81	-7,19
Oj95	-1,5	0,29	0,43	1,03	-1,28	-5,64
Oj81	-1,56	0,27	0,41	0,98	-1,34	-5,74
Oj116	-2,68	0,46	0,6	1,42	-2,46	-7,41
Bn	-1,09	-0,61	-0,47	-0,96	-0,87	-5,87
Ojt38	-1,46	0,7	0,84	1,64	-1,24	-5,82
Ojt36	-1,36	-0,51	-0,36	-0,72	-1,14	-5,83
Ojt46	-1,24	-0,16	-0,02	0,02	-1,02	-5,61
Ojt02	-1,34	-0,58	-0,44	-0,83	-1,12	-5,81
Ojt06	-1,32	-0,54	-0,39	-0,75	-1,1	-5,9
Oj106	-0,72	0,57	0,71	1,48	-0,5	-4,73
Oj48	-1,94	0,2	0,34	0,74	-1,72	-6,41
Tis15	-1,08	0,57	0,71	1,49	-0,86	-5,3
Tis05	-0,57	0,31	0,45	1,05	-0,35	-4,29
Tis09	-1,02	0,19	0,34	1,06	-0,8	-4,75
Tis13	-1,71	-0,3	-0,16	-0,24	-1,49	-5,84
Tis14	-1,71	-0,69	-0,54	-1,25	-1,49	-7,05
Bo01	-1,4	0,48	0,62	1,22	-1,18	-6,43
RM01	-0,89	-0,35	-0,2	-0,31	-0,67	-5,47
RM02	-1,33	0,85	0,99	1,97	-1,11	-5,81
Oj54	-1,58	0,67	0,81	1,75	-1,36	-5,84
SH7	-1,2	-0,78	-0,63	-1,26	-0,99	-5,82
AK	-1,41	-0,6	-0,46	-0,91	-1,19	-5,92
OjA	-1,78	0,62	0,76	1,52	-1,56	-6,77
OjB	-1,63	0,43	0,58	1,17	-1,41	-6,2

Annexe 5 : Indices de saturation des eaux de rejet de la mine de Bounhass

Phase	Amont	Aval	Formule chimique
Anhydrite	-1,27	-1,46	CaSO ₄
Barite	-0,93	-0,22	BaSO ₄
Celestite	-1,7	-1,91	SrSO ₄
Aragonite	-0,55	0,06	CaCO ₃
Calcite	-0,41	0,21	CaCO ₃
Dolomite	-0,76	0,72	CaMg(CO ₃) ₂
Fe(OH) ₃ (a)	-1,34	-0,15	Fe(OH) ₃
Goethite	4,55	5,74	FeOOH
Hematite	11,1	13,5	Fe ₂ O ₃
Si amorphe	0,29	0,26	SiO ₂
Chalcedony	-0,14	-0,16	SiO ₂
Chrysotile	-11,24	-6,24	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
CO ₂ (g)	-0,26	-1,08	CO ₂
Gypsum	-1,05	-1,24	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Halite	-5,83	-5,83	NaCl
Hausmannite	-20,74	-17,31	Mn ₃ O ₄
Hydroxyapatite	-8,58	-6,53	Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH
Jarosite-K	-7,71	-6,51	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
Manganite	-8,54	-7,12	MnOOH
Melanterite	-6,48	-7,74	FeSO ₄ ·7H ₂ O
Pyrochroite	-8,5	-7,92	Mn(OH) ₂
Pyrolusite	-14,48	-12,22	MnO ₂
Rhodochrosite	-0,58	-0,81	MnCO ₃
Sepiolite	-7,94	-4,65	Mg ₂ Si ₃ O ₇ ·5OH·3H ₂ O
Sepiolite(d)	-10,84	-7,55	Mg ₂ Si ₃ O ₇ ·5OH·3H ₂ O
Siderite	-1,06	-1,51	FeCO ₃
SiO ₂ (a)	-0,98	-1	SiO ₂
Smithsonite	-4,32	-3,41	ZnCO ₃
Strontianite	-2,32	-1,73	SrCO ₃
Talc	-7,82	-2,87	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Vivianite	-9,04	-11,36	Fe ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O
Willemite	-10,84	-7,41	Zn ₂ SiO ₄
Witherite	-5,6	-4,08	BaCO ₃
Zn(OH) ₂ (e)	-7,41	-5,68	Zn(OH) ₂

Annexe 6 : Analyses chimiques des eaux de rejet de la mine de Bounhass

Paramètres	Amont	Aval	Différence
pH	6,1	6,9	-
Conductivité (µS/cm)	2160	1910	250
Ca (mg/l)	196	109	-87
K (mg/l)	20	21	1
Na (mg/l)	206	211	5
HCO ₃ (mg/l)	643	676	33
Cl (mg/l)	317	310	-7
SO ₄ (mg/l)	304	321	17
Mg (mg/l)	100	100	0
B (mg/l)	0,1	0,1	0
Ba (mg/l)	0	0	0
Be (mg/l)	0	0	0
Fe (mg/l)	0,3	0	-0,3
Li (mg/l)	0,3	0,3	0
Mn (mg/l)	0,6	0,1	-0,5
P (mg/l)	0	0	0
Si (mg/l)	12	11,5	-0,5
Sr (mg/l)	0,8	0,5	-0,4
Zn (mg/l)	0	0	0
CO ₃ (calculé)	-	-	129,4