

**ETUDE D'IMPACT DES DECHETS MINIERES DE LA MINE DE
NADOR SUR L'ENVIRONNEMENT (Nord-Est du Maroc).
IMPACT STUDY OF MINING WASTE OF THE NADOR MINE ON
THE ENVIRONMENT (North-Eastern of Morocco).**

Mohamed LAKRIM, Laila MESRAR, Omar EL AROUSSI, Abderrahim LAHRACH, Lahcen BEAABIDATE, Abdelkader GAROUANI, Ali CHAOUNI, Hassan TABYAOUI & Raouf JABRANE . Faculté des sciences et techniques de Fès, BP.2202, Route d'Imouzzer. mohlakrim@gmail.com // mohlakrim@yahoo.fr

RÉSUMÉ : Dans cette étude, on s'est intéressé à la caractérisation minéralogique et géochimique des sols, des sédiments, des débris de stériles miniers et les eaux échantillonnées de différents niveaux de la nappe. Ces analyses ont montré qu'il y a une grande portion de métaux lourds relargués et libérés dans le sol, les sédiments, les eaux souterraines et superficielles. Dans les échantillons liquides, le pH enregistré est parfois même inférieur à 3. Notamment, la carrière d'Axara (EL₂), les galeries d'Ouiksane (EL₆) et les cours d'eau dégagés des haldes à stériles de Sétolazar (EL₇), où le pH est respectivement de 2.27, de 2.17 et de 1.84. Les observations pétrographiques ont montré la présence des matériaux sulfatés. Les échantillons prélevés des zones d'oxydations, ont enregistré des teneurs importantes en métaux lourds, notamment en Fe et en S. L'existence des millions de tonnes des haldes à stériles et des terrils exposés directement aux différents agents climatiques conduisent à la pérennité du drainage minier acide (DMA) en absence des initiatives d'aménagements.

Mot clés : Métaux lourds, matériaux sulfatés, haldes à stériles, terrils, drainage minière acide.

ABSTRACT: In this study, we were interested in the mineralogical and geochemical characterization grounds, sediments, and the remains of mining deads and sampled water of various levels of the ground water. These analyses showed that there is a great portion of heavy metals salted out and released in the soil the sediments, the underground and the surface water. In the liquid samples, the recorded pH is sometimes even lower than 3. In particular, the Axara's career (EL₂), the Ouiksane's galleries (EL₆) and the drains flow from the waste rock piles of Sétolazar (EL₇), where the pH is respectively of 2.27, of 2.17 and of 1.84. The petrographic observations

showed the presence of sulphate materials. These taken samples of the oxidations' zones were recorded important contents of heavy metals, in particular Fe and in S. The existence of million tons of the dumps waste rock piles and spoil heaps exposed directly to the various climatic agents, which lead to the perennality of the acid mining drainage (AMD) in absence of the remedy initiatives.

Key words: Heavy metals, sulphate materials, dumps, spoil heaps, acid mining drainage.

INTRODUCTION

Les gisements de fer du Rif oriental sont situés sur la côte de la méditerranée, à l'Ouest-Sud-ouest de la ville de Nador. Les exploitations occupent une superficie de 36 Km² d'un terrain assez irrégulier, composé d'un ensemble de collines tranchant topographiquement sur les plaines avoisinantes, où l'altitude s'élève jusqu'à 696 m au Djebel Ouiksane.

Le secteur minier comprend quatre carrières principaux d'exploitation à savoir ; Ouiksane, Axara, Imnassen et Sétolazar (Fig. 1). Ces gisements ont été découverts en 1905 par le géologue espagnole A. DELL VALL. Leurs exploitations ont été amorcées à partir de 1914 par les sociétés Espagnoles, à savoir ; La Compagnie Espagnole des Mine de Rif (CEMR) et la Société Anonyme Minière de Sétolazar (SAMS). L'exploitation fût d'abord artisanale puis mécanisée vers 1930. Jusqu'en 1950, l'exploitation a concerné essentiellement la partie superficielle du gisement constitué d'Hématite rouge riche en fer (68%). En avril 1959, le Bureau de Recherches et Participations Minières (B.R.P.M), entre dans les mines du Rif avec une participation de 26,66 %. En 1967, le gouvernement marocain a repris les mines du Rif dont il confia l'exploitation à la Société d'Exploitation de Fer de Rif (SEFERIF).

La production de pellets de fer concerne la durée de démarrage de l'usine depuis 1973 et qui a cessé à la fin de 1978.

La mine à produit plus de 65 millions de tonne de fer, avec un volume de 1,5 million de m³/an de stériles de nature diverse au cours de différentes étapes d'extraction. L'existence des minéraux sulfurés (pyrite, pyrrhotine, chalcopryrite,...) exposés directement aux agents atmosphériques (eau, air) conduisent à des réactions d'oxydation chimique et microbiologique des résidus. Il y a alors production d'acide sulfurique (H₂SO₄) qui entraîne la diminution du pH dans le milieu. Ce processus engendre la formation du drainage minier acide (DMA). Ce phénomène favorise la lixiviation de

métaux toxiques en constituant une source importante de pollution. Il entraîne l'acidification des étangs et des cours d'eau, en compromettant la vie des plantes, des organismes vivant dans l'eau ou sur les rives. Les sols avoisinants deviennent plus chargés en certains métaux lourds qui sont relâchés et deviennent peut être biodisponibles dans la chaîne trophique, menaçant ainsi, la santé humaine, animale et végétative.

Le DMA constitue également un problème à long terme, car il peut persister dans l'environnement durant des décennies, voire des siècles jusqu'à l'épuisement des minéraux sulfurés. La problématique est d'autant plus accrue que le sens d'écoulement de la nappe phréatique converge vers l'Est et l'Est-Nord-est (Carlier P. 1971). En effet, dans ces zones, où se situent, la lagune de Nador et le prolongement de la nappe de Bou Arg. Cette étude a pour but d'analyser les nuisances majeures et l'évaluation des niveaux des contaminations environnementales de la zone par les éléments métalliques toxiques. Aussi, nos perspectives visent à cerner les comportements et les mécanismes d'évolution de la solution acide génératrice du DMA.

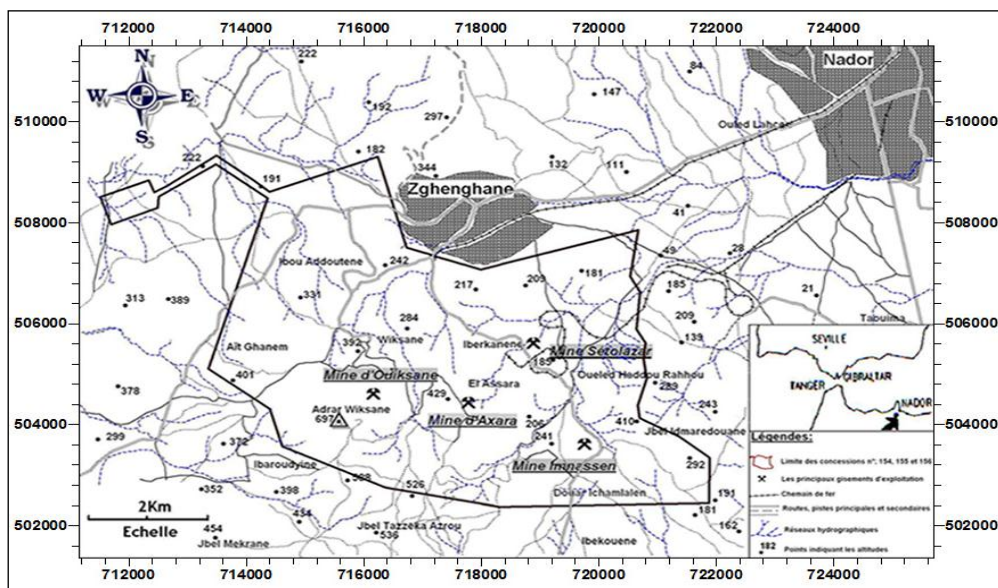


Fig. 1 : Limites des concessions d'exploitation des principaux gisements de la mine de Nador.

MATERIELS ET METHODES D'ANALYSES

Caractérisation des échantillons solides et liquides

Nous avons pris soin d'échantillonner sur une grande surface de la zone d'étude, près et loin des anciens points d'exploitations minières (Fig. II). Les missions d'échantillonnage ont été réalisées en période sèche entre 25 Juin et 03 Juillet 2007.

Les échantillons solides, ont été prélevés à partir du sol, des stériles dans les haldes et les terrils. De même, les liquides contenant de la matière dissoute et/ou en suspension ont été prélevés à partir des lacs d'eau, puits cours d'eau et galeries (Fig. 2).

Les échantillons solides et liquides sont respectivement conditionnés dans des sachets et des bouteilles en plastique et conservés à basse température avant leur analyse au laboratoire,

Les analyses géochimiques quantitatives des métaux lourds tels que l'As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn et S ont été réalisées par l'ICP au Centre National des Recherches Scientifiques et Techniques à Rabat (CNRST). Ces échantillons ont subi la dissolution par l'attaque triacide.

Les lames minces, ont été élaborées et préparées au laboratoire de géologie à la Faculté des sciences et techniques Fes-Saïss.

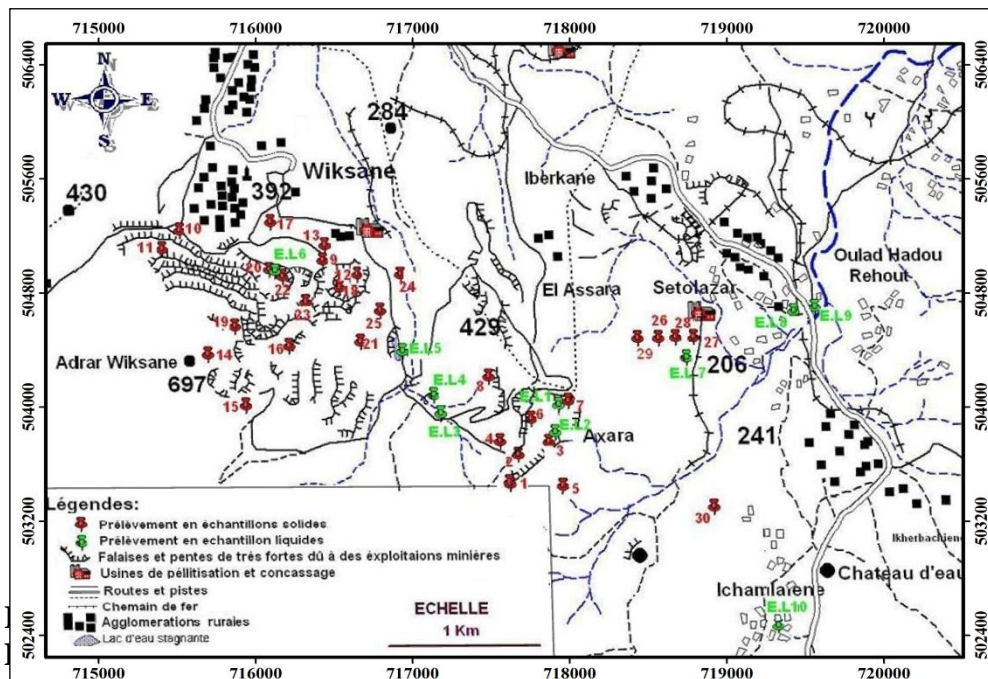


Fig. 2: Carte de localisation des échantillons liquides et solides dans la zone

L'ensemble des échantillons liquides ont fait l'objet des mesures d'acidité, de la conductivité électrique et de l'analyse géochimique quantitative (Tab. 1).

Tableau 1 : Les résultats d'analyses géochimiques quantitatives des échantillons liquides.

Echantillon Numéro	PH	Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$	Les concentrations des métaux lourds dans les échantillons en (mg/l)								
			As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn	S
E.L ₁	2,51	19900	≤ 0.00542	0,1	0,46	23,48	781,89	7,05	0,07	20,74	36498,52
E.L ₂	2,27	>>20000	0,02	0,19	2,11	17,43	1052,53	21,53	0,03	83,84	38943,52
E.L ₃	6,90	6700	≤ 0.00542	0,01	≤ 0.0005	0,233	1,26	0,02	0,04	0,0879	4858,93
E.L ₄	7,92	16080	≤ 0.00542	0,01	0,01	0,263	3,08	0,03	0,09	0,1279	9737,63
E.L ₅	8,44	1763	≤ 0.00542	0,01	≤ 0.0005	0,243	1,03	0,01	0,06	0,0679	930,5
E.L ₆	2,17	8530	0,05	0,32	0,64	256,76	3724,43	6,14	0,16	44,55	19970,1
E.L ₇	1,84	>>20000	1,21	0,98	17,05	986,39	28837,3	82,56	1,17	204,52	77825,43
E.L ₈	7,2	4900	≤ 0.00542	0,02	≤ 0.0005	0,38	206,46	0,07	0,08	0,57	4667,79
E.L ₉	7,55	4380	≤ 0.00542	0,01	≤ 0.0005	0,293	2,57	0,08	0,07	0,1679	1881,42
E.L ₁₀	7,48	1089	≤ 0.00542	0,01	0,01	0,243	1,89	0,04	0,05	0,3179	403,61
Normes Européennes	6 à 8	1250	0,05	0,005	0,05	0,05	0,3	0,05	0,05	0,1	250

D'ailleurs, il apparaît nécessaire de souligner les points à pH très faible notamment inférieur à 3. En premier lieu, on constate que les échantillons liquides EL₁ et EL₂, de la carrière d'Axara présentent respectivement un pH de 2,51 et 2,27. L'échantillon prélevé dans des galeries d'exploitations d'Ouiksane a un pH=2,17. De même, l'échantillon EL₇ prélevé de la source dégagé des haldes à stériles de Sétolazar a un pH acide de pH=1,84 encore plus acide. Par ailleurs, les autres échantillons ont un pH généralement supérieur à 6.

Une étude comparative des résultats des teneurs en métaux lourds et les normes européennes de la potabilité de l'eau comme témoigne la subsidence de la contamination très prononcée des trois sites miniers (Tab. I). L'acidité enregistrée dans le ruisseau qui dégagé des haldes à stériles de Sétolazar (EL₇), galerie de l'Ouiksane (EL₆), et la carrière d'Axara (EL₁ et

EL₂), est de pH compris entre 1,84 pour (EL₇) et 2,51 pour (EL₁). Nous déduisons que, dans le cas où les points d'eaux se juxtaposent les haldes à stériles et/ou les terrils, le pH est généralement inférieur à 3. De même, nous constatons que parallèlement à l'abaissement des pH, les échantillons E.L₁, E.L₂, E.L₆ et E.L₇ sont aussi excessivement chargés en éléments métalliques (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn et S).

D'ailleurs, les teneurs en métaux lourds de l'ensemble des liquides, montrent des anomalies positives très nettes par rapport aux normes européennes admissibles pour la potabilité des eaux (Fig. 3).

Les deux puits E.L₈ et E.L₉ sis à Sétolazar (Fig. II), quoiqu'ils présentent un pH, relativement neutre qui répond aux normes, mais ils restent excessivement chargés en ions (notamment en S, Fe, Cu, Zn et Pb). La conductivité électrique aussi, dépasse largement 1200µs/cm. Ces puits sont récemment abandonnés. En fait, ces puits ont subi une dilution des eaux torrentielles d'été, qui sont à l'origine de l'augmentation de leur pH. Par contre, malgré que les eaux du puits E.L₁₀ ne respectent pas les normes admissibles de la potabilité des eaux, ce puits demeure encore utilisable par la population locale, et approvisionne les Douars avoisinant en cette matière.

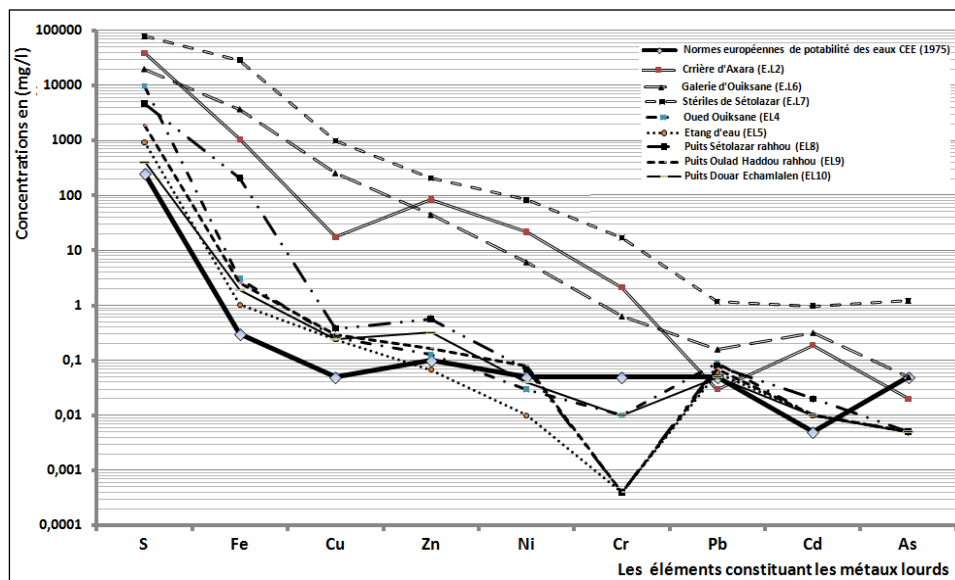


Fig. 3. Comparaison des teneurs en métaux lourds des eaux échantillonnées de la zone minière de Nador avec les normes européennes de la potabilité des eaux, CEE (1975).

Les prélèvements solides

Analyses géochimiques

La représentation graphique de la fonction, Rapport $[R = [X]_{\text{mesuré}}/[X]_{\text{témoin}}$ (avec $[X]$ est la teneur en un élément chimique X donné)], a montré une forte contamination en Fe, S, Cr, Ni et le Pb comparée à l'échantillon témoin (E.S₁₅). Ce dernier, a été prélevé d'un sol au sommet de Djebel Ouiksane. Cet échantillon est intact et non contaminé. La teneur en As et en Cu reste assez faible, bien qu'elle marque une contamination en Cu de 111,34ppm pour l'échantillon solide, ES₂₃ (Fig. 4).

A Ouiksane, le taux du fer varie de 34,91 ppm pour l'échantillon témoin (E.S₁₅) et de 14288,49 ppm pour (ES₁₆), le soufre aussi comprend des valeurs comprises entre 34,92 ppm pour le témoin (E.S₁₅) et 5807,37 ppm pour (ES₂₄). Les teneurs en métaux lourds tels que, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn et le Pb restent assez moyennes (Tab.2).

Les prélèvements solides d'Axara sont assez bien concentrés en éléments ferro-sulfatés, en Cr et en Ni. La teneur en fer est de 2,07% pour l'échantillon (E.S₅), tant que le taux du soufre arrive à 0,57% pour l'échantillon (E.S₆). Le Rapport $R = [X]_{\text{mesuré}}/[X]_{\text{témoin}}$, marque une légère contamination en Pb. Alors que les teneurs en As, Zn et Cu restent faible par rapport à la concentration du témoin (Fig. 4).

A Sétolazar, les prélèvements solides, renferment des teneurs en fer comprises entre 0,21% pour (E.S₂₆) et 0,8% pour (E.S₃₀). Le taux du soufre oscille entre 0,21% pour les échantillons (E.S₃₀) et de 0,49% pour (E.S₂₆) et E.S₂₈. D'ailleurs, les résultats d'analyses du rapport $R = [Echant (X)]/[Témoin (E.S_{15})]$ transposés dans le (Tab. III), montrent une forte contamination en Cr, Ni, Pb et As qui atteint 8,41ppm (Fig. IV). Les autres éléments rencontrés sont assez faible par rapport aux normes de l'échantillon témoin (E.S₁₅).

Tableau 2 : Analyse des échantillons solides, teneurs en métaux lourds dans les rejets miniers.

Lieu	Échantil	As (mg/l)	Cd (mg/l)	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	S (mg/l)
Rejets stériles d'Axara	E.S ₁	1,91	0,09	1,24	5,33	9432,67	0,57	1,2	2,53	2901,63
	E.S ₂	0,18	0,21	0,44	6,27	16061,66	0,18	6,94	3,59	900,22
	E.S ₃	1,89	0,08	2,03	19	6252,81	1,14	1,62	3,81	1665,59
	E.S ₄	1,15	0,03	4,42	3,9	2437,23	1,92	2,18	6,91	86,62
	E.S ₅	0,27	0,23	0,16	9,38	20745,62	0,42	1,47	5,41	1316,22
	E.S ₆	≤0.0054	0,07	0,15	2,36	5911,35	0,91	0,51	6,23	5787,38
	E.S ₇	2,01	0,07	6,46	16,09	6303,19	0,8	2,06	8,75	1295,57
	E.S ₈	0,16	0,13	0,55	19,85	14715,49	1,35	1,04	5,43	4433,19
	E.S ₉	3,04	0,09	1,48	18,08	5835,88	1,42	2,22	22,88	48,76
Rejets stériles d'Ouilksane	E.S ₁₀	3,35	0,07	0,95	7,5	7595,97	0,42	2,21	3,88	2511,38
	E.S ₁₁	0,15	0,04	1,85	1,83	3339,03	0,48	0,5	1,14	1859,65
	E.S ₁₂	1,97	0,15	0,23	44,4	10448,79	0,97	1,19	16,51	3576,74
	E.S ₁₃	2,11	0,05	1,42	13,85	5956,23	0,9	1,41	7	993,88
	E.S ₁₄	0,42	0,26	2,26	4,03	2771,47	1,55	42,46	52,04	70,79
	E.S ₁₅	1,31	0,11	≤0.0005	89,1	34,91	1,44	5,96	18,53	34,92
	E.S ₁₆	4,52	0,11	0,87	11,89	14288,49	0,64	5,54	16,45	172,48
	E.S ₁₇	0,14	0,03	1,16	3,13	1329,18	0,88	2,5	11,31	79,07
	E.S ₁₈	0,37	0,06	1,9	16,02	4258,13	0,5	0,73	12,37	1457,91
	E.S ₁₉	0,09	0,02	0,83	0,81	1078,84	0,45	1,07	6	48,66
	E.S ₂₀	0,27	0,19	0,08	5,4	10866,1	0,54	7,78	4,16	2046,52
	E.S ₂₁	0,18	0,04	0,12	36,9	3501,03	0,36	1,04	4,64	134,3
	E.S ₂₂	0,3	0,07	1,78	6,79	3197,16	3,7	0,3	6,13	3460,11
	E.S ₂₃	0,99	0,06	0,17	111,34	5365,24	0,57	1,24	6,54	4330,05
	E.S ₂₄	1,61	0,14	1,54	7,38	10207,85	0,84	2,63	8,98	5807,37
	E.S ₂₅	1,89	0,09	0,47	4,93	11099,25	0,46	0,88	8,33	99,65
Rejets stériles de Sétolazar	E.S ₂₆	0,12	0,05	2,21	27,42	2180,13	3,42	0,49	9,03	4850,67
	E.S ₂₇	0,16	0,07	1,47	6,69	2483,8	4,5	0,21	6,31	4377,7
	E.S ₂₈	0,48	0,11	2,26	11,06	4114,81	5,78	0,48	10,04	4929,46
	E.S ₂₉	3,5	0,08	0,37	8,9	6632,81	0,98	1,63	3,02	2467,75
	E.S ₃₀	8,41	0,1	0,43	2,15	8092,5	0,86	1,45	2,16	2103,62

Tableau 3 : Concentrations en métaux lourds des échantillons solides par rapport à l'échantillon témoin (E.S₁₅) dont le rapport ;

$$R = [X]_{\text{élément}}/[X]_{\text{témoin}}$$

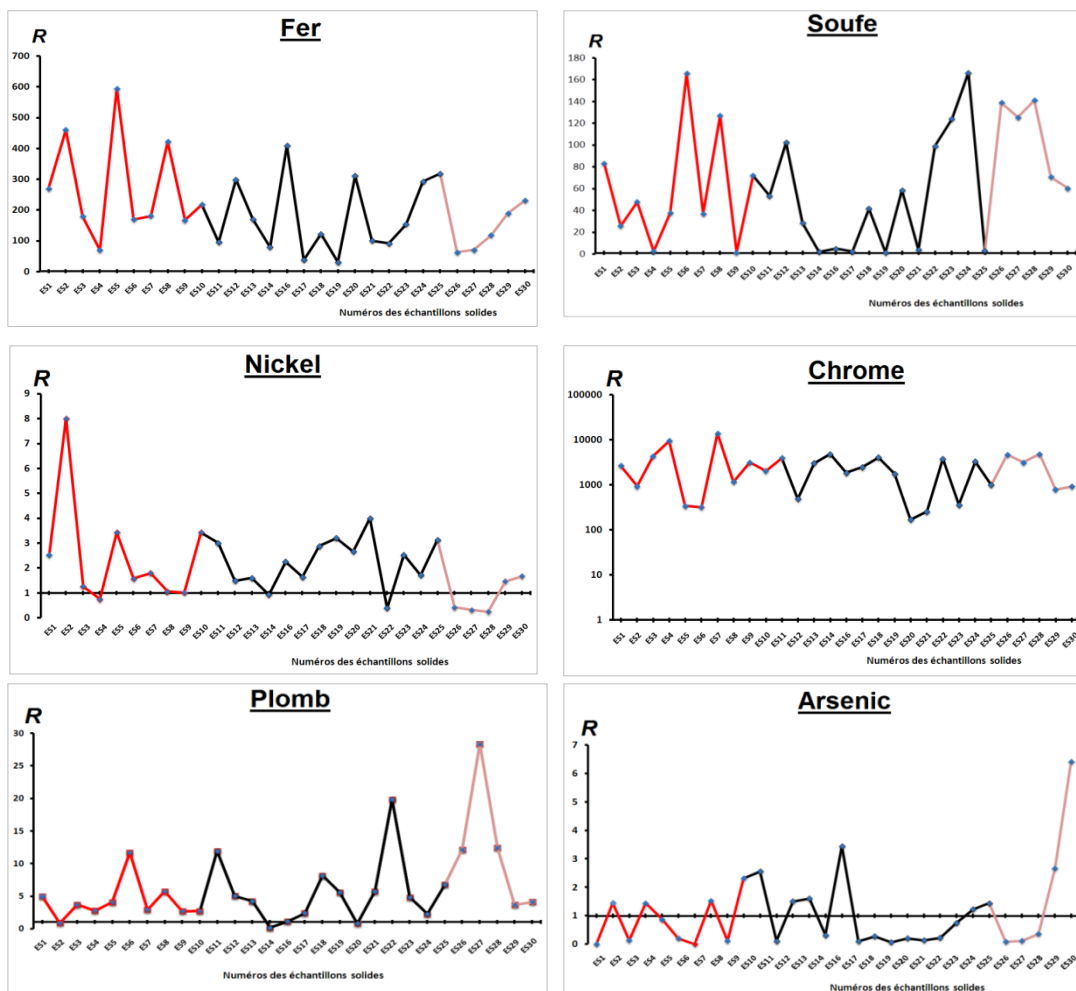
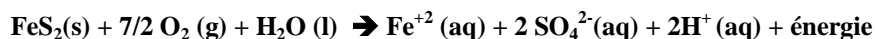
Sites	Rapport (R)	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn	S
Rejets stériles d'Axara	E.S ₁ /E.S ₁₅	1,46	0,82	2480	0,06	270,20	0,40	0,20	0,14	83,09
	E.S ₂ /E.S ₁₅	0,14	1,91	880	0,07	460,09	0,13	1,16	0,19	25,78
	E.S ₃ /E.S ₁₅	1,44	0,73	4060	0,21	179,11	0,79	0,27	0,21	47,70
	E.S ₄ /E.S ₁₅	0,88	0,27	8840	0,04	69,81	1,33	0,37	0,37	2,48
	E.S ₅ /E.S ₁₅	0,21	2,09	320	0,11	594,26	0,29	0,25	0,29	37,69
	E.S ₆ /E.S ₁₅	0,00	0,64	300	0,03	169,33	0,63	0,09	0,34	165,73
	E.S ₇ /E.S ₁₅	1,53	0,64	12920	0,18	180,56	0,56	0,35	0,47	37,10
	E.S ₈ /E.S ₁₅	0,12	1,18	1100	0,22	421,53	0,94	0,17	0,29	126,95
	E.S ₉ /E.S ₁₅	2,32	0,82	2960	0,20	167,17	0,99	0,37	1,23	1,40
Rejets stériles d'Ouiksane	E.S ₁₀ /E.S ₁₅	2,56	0,64	1900	0,08	217,59	0,29	0,37	0,21	71,92
	E.S ₁₁ /E.S ₁₅	0,11	0,36	3700	0,02	95,65	0,33	0,08	0,06	53,25
	E.S ₁₂ /E.S ₁₅	1,50	1,36	460	0,50	299,31	0,67	0,20	0,89	102,43
	E.S ₁₃ /E.S ₁₅	0,32	2,36	4520	0,05	79,39	1,08	7,12	2,81	2,03
	E.S ₁₄ /E.S ₁₅	3,45	1,00	1740	0,13	409,30	0,44	0,93	0,89	4,94
	E.S ₁₆ /E.S ₁₅	0,11	0,27	2320	0,04	38,07	0,61	0,42	0,61	2,26
	E.S ₁₇ /E.S ₁₅	0,28	0,55	3800	0,18	121,97	0,35	0,12	0,67	41,75
	E.S ₁₈ /E.S ₁₅	0,07	0,18	1660	0,01	30,90	0,31	0,18	0,32	1,39
	E.S ₁₉ /E.S ₁₅	0,21	1,73	160	0,06	311,26	0,38	1,31	0,22	58,61
	E.S ₂₀ /E.S ₁₅	0,14	0,36	240	0,41	100,29	0,25	0,17	0,25	3,85
	E.S ₂₁ /E.S ₁₅	0,76	0,55	340	1,25	153,69	0,40	0,21	0,35	124,00
	E.S ₂₂ /E.S ₁₅	0,76	0,55	340	1,25	153,69	0,40	0,21	0,35	124,00
	E.S ₂₃ /E.S ₁₅	1,23	1,27	3080	0,08	292,40	0,58	0,44	0,48	166,30
	E.S ₂₄ /E.S ₁₅	1,44	0,82	940	0,06	317,94	0,32	0,15	0,45	2,85
	E.S ₂₅ /E.S ₁₅	0,09	0,45	4420	0,31	62,45	2,38	0,08	0,49	138,91
Rejets stériles de Sétolazar	E.S ₂₆ /E.S ₁₅	0,12	0,64	2940	0,08	71,15	3,13	0,04	0,34	125,36
	E.S ₂₇ /E.S ₁₅	0,37	1,00	4520	0,12	117,87	4,01	0,08	0,54	141,16
	E.S ₂₈ /E.S ₁₅	2,67	0,73	740	0,10	190,00	0,68	0,27	0,16	70,67
	E.S ₂₉ /E.S ₁₅	6,42	0,91	860	0,02	231,81	0,60	0,24	0,12	60,24
	E.S ₃₀ /E.S ₁₅	1,46	0,82	2480	0,06	270,20	0,40	0,20	0,14	83,09

Analyses pétrographiques

Parallèlement aux analyses géochimiques, nous avons également réétudié nos échantillons sur le plan pétrographique. Les rejets stériles sont riches en oxydes, hydroxydes et en sulfures de fer. L'observation optique des lames minces (Fig. V), a montré une présence de divers sulfates de fer

de couleur jaunâtre, probablement la jarosite ($\text{KFe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), verdâtre, la copiapite ($\text{Fe}_2^+(\text{Fe}_3^+)_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_{20}$) et de blanc laiteux à brunâtre probablement, l'halotrichite, la starkyite, et la heulandite...etc. Tout en dessinant des auréoles autour des minéraux sombres d'origine métallique (pyrite, Chalcopryrite, pyrrhotite, oxydes de fer hydraté...).

Le processus d'acidification est lié particulièrement à l'existence de la pyrite qui est la plus prédominante. C'est justement, l'oxydation de ces derniers en présence d'eau, qui sont à l'origine de l'acidification du milieu et du relargage des métaux lourds selon la réaction suivante (Fig. V) :



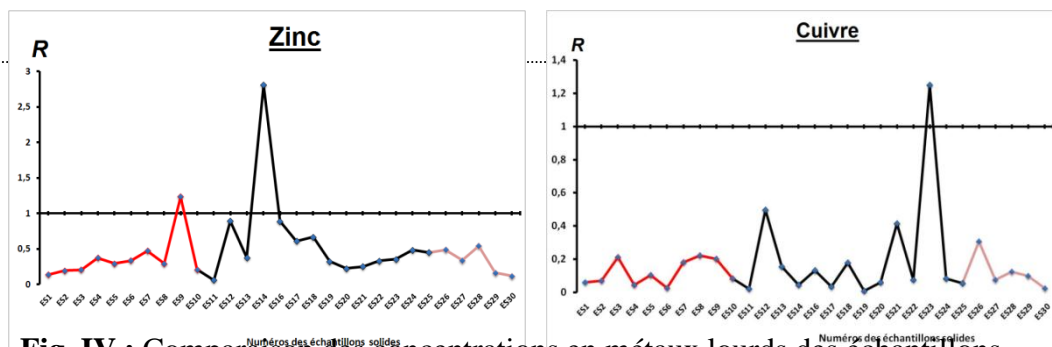


Fig. IV : Comparaison des concentrations en métaux lourds des échantillons solides par rapport à l'échantillon témoin dont le rapport est de ; $R = [X]_{\text{élément}}/[X]_{\text{témoin}}$ (des rejets stériles des carrières d'Axara en Rouge, de Ouiksanes en Noir, et de Sétolazar en Brun).

Par ailleurs, les sulfures de cuivre (la chalcopryrite), sont fréquents dans les rejets d'Ouiksane (l'échantillon E.S₂₄ renferme une concentration relativement importante de l'ordre de 111,34ppm). Les autres sulfures sont représentés par la pyrite et la galène surtout à Sétolazar.

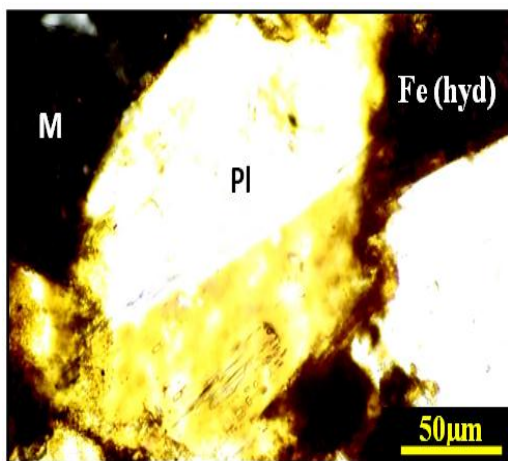


Fig. 5.a : Contamination des plagioclases par l'hydratation des oxydes et des sulfates (E.S12).

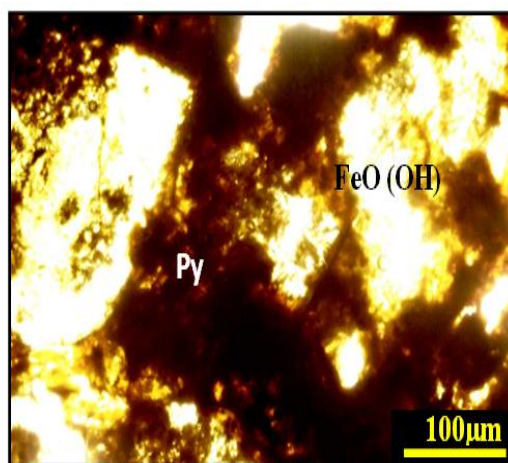


Fig. 5.b : Altération de la pyrite et génération des sulfures amorphes et du fer hydraté (E.S1).

Fig. 5: Les principaux phénomènes d'oxydation de la pyrite, altérations des oxydes, des hydroxydes, sulfures de fer et contamination de l'encaissant par la solution acide.

Les observations optiques montrent la présence des minéraux sombres, et des minéraux de couleur brunâtre à jaunâtre (Fig. V.B). Ce sont des sulfates de fer hydratés (Fig. V.A).

Au cours de la préparation des lames, au stade du rodage, une grande partie se dissout lors du contact de l'eau. Cette matière néoformée est rencontrée presque dans tous les échantillons sulfurés, ce sont les sulfates de fer hydratés et asséchés sur place par l'évapotranspiration. Ces sulfates de fer hydratés, se cristallisent en période chaude et se dissolvent en période humide. Le phénomène de DMA est alors pérenne.

Facteur d'enrichissement

Le facteur d'enrichissement est calculé en normalisant les teneurs des métaux par rapport à celles de l'aluminium, qui est considéré comme élément purement détritique et inerte (Zoller et al. 1974; Hakansan, 1980; P. Alvarez et al. 2003; Maanan et al. 2004 ; Ackermann, 1980; Chester, 2000), et par rapport aux teneurs dans NACS (North American Composite Shale, McLennan, (2000)). La formule utilisée est la suivante (salamons & Fôrstner, 1984; Sinex & Wrigts, 1988; Grant & Middleton, 1990): $EF = [Me/Al]_{\text{échantillon}}/[Me/Al]_{NASC}$

MCNASC: Al = 8.09 %, Fe = 3.5 %, Zn = 71, Co = 17, Cr = 83, Ni = 44, Mn = 600, Cu = 25, Cd = 0.09 et Pb = 17 ppm. La concentration en Al échantillonné, concerne les concentrations échantillonnées, issue des analyses des prélèvements (U3S2S) d'Ouiksane, (EM2) d'Axara et de (S3C1S) de Sétolazar (Jabrane, R. 1993).

Les résultats indiqués dans les diagrammes (Fig. VI) montrent un enrichissement important en métaux lourds dans les sites miniers, La contamination des sols est bien contrastée. L'enrichissement est marqué par le Fe, Cu et Cd (EF = 5,99 et 25,8) pour le site d'Axara.

Les éléments stériles meubles au niveau du site Ouiksane sont caractérisés par de fortes teneurs en Cd (F.E=2,5 et 10,1), Cu (E.F=1,7 et 9), Zn (F.E=3,4). L'enrichissement est un peu élevé pour le Fe et le Pb (Fig. II.B). La même chose pour les remblais du site de Sétolazar, l'enrichissement est important pour le Cu et le Cd (E.F=2 et 8) et un peu moyen pour le fer (Fig. 6).

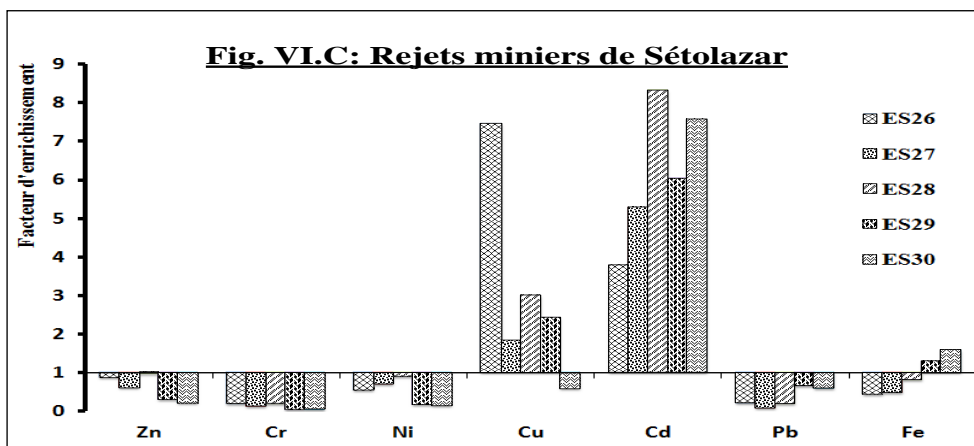
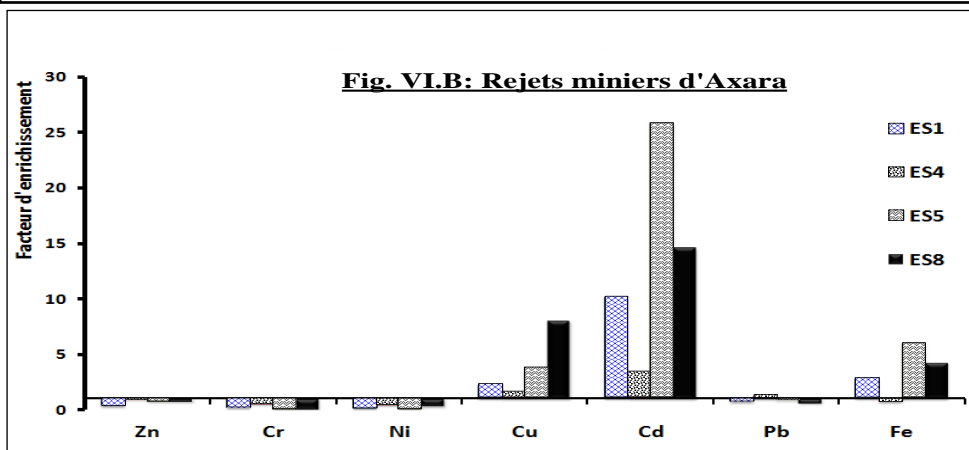
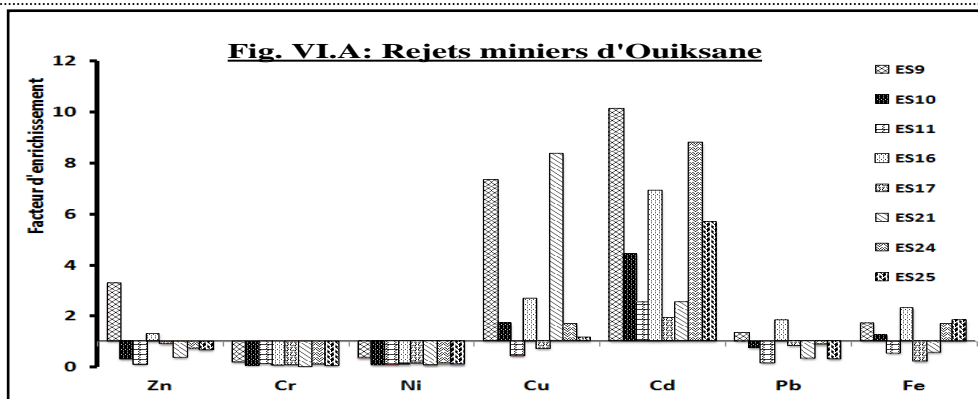


Fig. 6: Facteur d'enrichissement des trois sites miniers par rapport à la croûte supérieure.

De plus, ces éléments sont associés aux minéraux sulfurés, leurs abondances dépendent des réactions d'oxydation, d'hydratation, de dissolution, de relargage et de libération des métaux lourds (Fig. 5).

INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS

On retient que, les échantillons liquides révèlent une plus forte contamination en métaux lourds que dans les solides (Tab. I). Les teneurs élevées, sont enregistrées pour le fer et le soufre qui représentent la portion majoritaire. La teneur en soufre est maximale dans les liquides de Sétolazar (7,78%), aussi le fer peut atteindre (2,88%) dans le même échantillon (EL₇). Les teneurs en éléments traces métalliques tels que, le Cd, Cu, Cr, Ni, Zn, Pb et As varient proportionnellement aux variations du pH des eaux dans chaque site. En effet, les eaux rougeâtres à brunâtres (E.L₂), stockées dans la carrière d'Axara (Fig.7.a) et celles prélevées du ruisseau (E.L₇), dégagé des stériles miniers de Sétolazar (Fig. 7.b), sont à la fois très acide (pH=2,27 et pH = 1,84), et riches en métaux (Tab. 1).



Fig.7.a: Eaux acides de la carrière d'Axara



Fig.7.b: Liquides acides de Sétolazar

Fig.VII: Photos illustrant l'ampleur de la menace environnementale générée par le DMA.

La distribution spatiale des éléments en traces métalliques est très hétérogène. Elle dessine des zones bien contrastées à pH très faible où les foyers à risques environnementaux sont plus avancés (Stériles de Sétolazar,

Carrière d'Axara, Galerie d'Ouiksane). Parallèlement, le facteur d'enrichissement corrobore l'existence d'une contamination des sédiments et des sols avoisinant le site (Fig. VI). Toutefois, on assiste à une oxydation autocatalysée des minéraux sulfureux, facilitée par la présence d'importantes quantités de stériles miniers (plusieurs millions de tonnes), riches en sulfates de fer, particulièrement les terrils à faible granulométrie, par lesquels percolent les eaux météoriques (environ 400mm/an).

En outre, la présence des microorganismes fait tirer l'énergie nécessaire à la croissance des réactions d'oxydo-réductions métalliques. Les méthodes d'exploitations peuvent influencer sur la cinétique des réactions d'oxydation des minéraux Ferro-sulfatés.

Par ailleurs, l'existence du fer ferrique entraîne l'oxydation d'autres sulfures, en réactivant le relargage des métaux (As, Cu, Cr, Cd, Pb, Zn, Ni,...etc.) qui peuvent dépasser de plusieurs fois leurs teneurs dans le minerai initial. C'est le cas du Cr, de l'As, du Cd, du Cu et du S qui proviennent vraisemblablement de l'altération des stériles contenant de l'arsénopyrite, de la chalcopryrite, de la galène et de la sphalérite.

Durant la période sèche, les minéraux sulfatés qui se forment, sont favorisés sous l'effet d'évaporation d'eau. Ces minéraux de néoformation, font donc stocker les métaux. Par la suite, et étant solubles, ces minéraux perdent leurs contenus en métaux lourds, pendant la saison humide. Ce cycle, engendre des variations de concentrations en métaux dans le sol et dans la nappe phréatique.

Cette pollution est assurée par la formation des minéraux secondaires. Ils constituent des réserves temporaires de métaux et génèrent de l'acidité au cours du cycle. Ce phénomène, est perpétuel tant que les sulfures persistent. Donc, ce sont les réactions d'oxydations des sulfures qui sont à l'origine de la continuité du drainage minier acide.

Autrement dit, cette oxydation est probablement à l'origine de la destruction d'une grande partie de la biodiversité faunistique et floristique que la zone recèle. Aussi, les points d'eau naturelles, tel que, les puits et les sources sont soumis à une vraie menace de contamination par le DMA. D'ailleurs, les deux puits analysés (E.L₈) et (E.L₉) sis à douar Oulad Haddou Rahhou, sont définitivement abandonnés.

Les eaux de ces sites présentent non seulement le goût médiocre mais, nos analyses géochimiques ont montré que ces eaux ne répondent à aucune norme de potabilité. La population de ce douar s'approvisionne en eau potable issue des puits situés à douar Echamlalen (E.L₁₀) protégé par l'existence d'un réservoir carbonaté (les carbonates peuvent neutraliser le pouvoir acide et de minimiser l'impact du drainage minier acide).

CONCLUSION

Les rejets stériles des trois anciens sites d'exploitation minière, renferment d'importantes quantités de minéraux sulfurés (pyrite, chalcopryrite, galène, arsénopyrite,...etc.) disséminés suffisamment pour activer de plus graves problèmes environnementaux par le DMA. Les analyses géochimiques et minéralogiques indiquent la présence d'une oxydation des éléments ferro-sulfatés, autocatalysés. Ces conditions physico-chimiques particulières vont conduire à la solubilisation d'autres éléments métalliques (Pb, Ni, Zn, Cd, Cu,...) en présence des millions de terrils, exposés directement aux différents agents climatiques (percolation d'air et des eaux météoriques).

Les eaux des galeries d'Ouiksane, d'Axara et celles drainées au niveau des stériles de Sétolazar, sont particulièrement acides $PH \leq 3$ (Fig. 2, très chargées en métaux lourds. Ces eaux acides compromettent la vie aquatique et indirectement la vie terrestre. Les métaux peuvent inhiber aussi la croissance de plusieurs espèces, de se transférer vers les animaux et même vers l'homme par l'intermédiaire de la chaîne trophique (problèmes de bioaccumulations et de bioamplifications).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- B.R.P.M 1979 : Etat des travaux et programmes des recherches miniers. Mars 1979.
- B.R.P.M : Essais de valorisation minérale en laboratoire, SEFERIF. Novembre 1978.
- BRGM/RP-53246-FR (2004)– Rapport final 47 Document d'orientation sur les risques sanitaires liés aux carrières. Juillet 2004. p 46-48.
- Carlier, P. (1971).- Plaines du Gareb et du Bou Areg. In : Ressources en eau du Maroc : 1. domaines du Rif et du Maroc oriental. Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc, p 231, p 167-180.

- Fergusson, K.D, Erickson, P.M., Pre-Mine Prediction of Acid Mine Drainage. In: Dredged Material and Mine Tailings. Edited by Dr. Willem Salomons and Professor Dr. Ulrich Forstner. 1988.
- Galfati Ben Romdhane .I & Beji Sassi A. (2006) : Les rejets fins des laveries de minerai phosphaté dans le bassin de Gafsa-Metlaoui (Tunisie). Revue Méditerranéenne de l'environnement 1, Volume I, Numéro I. p 30-48.
- Hakkou, R., Benzaazoua. M et Bussiere B. (2006a). Minéralogie secondaire associée au drainage minier acide du site abandonné de Kettara. Communication orale au 1^{er} congrès international sur les Mines : Exploration, Exploitation et impact Environnemental (M3E). Bouznika 14 et 15 Avril 2006.
- Hakkou, R., Benzaazoua. M et Bussiere B. (2006b). Évaluation de la qualité des eaux de ruissellement dans la mine abandonnée de Kettara (Maroc). Communication orale au Congrès International sur le thème: Gestion Intégrée des Ressources en Eaux et Défis du Développement Durable (GIRE3D), Marrakech les 23, 24 et 25, 2006.
- Jabrane, R (1993) Etudes génétique de la minéralisation de fer de Nador (Maroc Nord Oriental) Thèse de Doctorat. Université libre de Bruxelles. p 129-148.
- Lakrim, M. (2007) : La pollution de l'environnement par le drainage minier acide, généré par les terrils de la mine de fer de Nador. Mémoire de 3^{ème} Cycle (DESA). Faculté des lettres et sciences humaine Fès-Saïss, Département de la Géographie. p 27-70.
- Mensouri, M. (1985): Rapport de Synthèses géologique et évaluation des réserves de la SEFFERIF (Nador) 1-09-1985. p 3-7 et p 44-55.
- MEND Report 1.20.1, December (2009): Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. Report prepared by: CANMET-Mining and Mineral Sciences Laboratories Smithers, British Columbia V0J 2N. Chapitre 7. p 4-14.