



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

LABORATOIRE STRUCTURES ET TRANSFERTS EN MILIEU SEDIMENTAIRE

THESE

présentée

A L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Pour l'obtention du Diplôme de Thèse

Spécialité : Géosciences et Environnement

par

El Houssaine BERDOUZI

**ETUDE DE LA DISPERSION DES POLLUANTS MINERAUX
AUTOUR DE LA MINE DE BOU-AZZER
(ANTI - ATLAS CENTRAL, MAROC)**

Soutenue le 7 Octobre 1999 devant la Commission d'Examen

Jury

MM.	J. C. SAMAMA , Professeur, E.N.S.G Nancy	- Président, Rapporteur
	F. TOLLON , Directeur de recherche, CNRS Toulouse	- Rapporteur
	B. HAGUENAUER , Professeur, Université Nancy I	- Examineur
	I. AKALAY , Directeur de la Recherche chargé de l'Environnement, REMINEX groupe O.N.A	- Examineur

AVANT-PROPOS

Au terme de ces quatre années de recherche, il m'est agréable d'exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué et participé à l'élaboration de ce mémoire. Aussi, je tiens à remercier sincèrement :

M. J.C. SAMAMA, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy et Directeur du Centre d'Enseignement Supérieur en Exploration et Valorisation des Ressources Minérales. Envoyé par le Ministère de l'Energie et des Mines du Maroc, M. J.C. SAMAMA se transforma pour moi en patron : tant sur le plan de l'enseignement que sur celui de la recherche, c'est en 1995, qu'il me proposa l'analyse du problème mine de Bou-Azzer environnement, problème qu'il connaît si bien. Il a été pour moi le « maître » éclairé qui, d'un mot, d'un conseil, savait me faire sortir d'une impasse et donnait une orientation nouvelle à mes travaux . Son aide et sa sympathie me furent précieuses en toutes circonstances. Je le remercie d'avoir bien voulu, malgré toutes les charges qu'il assume, s'occuper de moi comme il l'a fait.

Mlle. A. BEN KHADRA ex Directeur des mines, a qui j'ai eu fréquemment recours et qui a pu surmonter de grosses difficultés d'ordre administratives auxquelles je me suis heurté pendant les deux dernières années de recherche. Elle n'a pas hésité à me consacrer une part importante de son temps. Qu'il me soit permis de lui exprimer toute ma gratitude.

M. A. SMIDI, Délégué Régional du Ministère de l'Energie et des Mines de Ouarzazate, qui a accepté de m'aider avec une amabilité et une gentillesse qui m'ont profondément touché. Grâce à ses encouragements, j'ai persévéré dans une voie qui m'apparaissait quelques fois sans issue. Je lui adresse mes remerciements les plus chaleureux et mon hommage le plus sincère.

M. A. GHAZALI, chef du Service Régional des Mines de Ouarzazate, il fut un chef très apprécié et je suis heureux de lui exprimer, l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

Le sujet de ce travail a été défini en collaboration avec la direction générale de la compagnie de Tifnout Tighanime (C.T.T), filiale de l'O.N.A qui m'a facilité la tâche tant sur les moyens qu'elle a toujours mis à ma disposition que par l'intérêt qu'elle a constamment prêté à mon travail. Que tous les responsables de la direction de l'O.N.A, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude, notamment :

M. A. ABARRO, Directeur Général ONA, Pôle Mines, qui a accepté l'étude du problème environnemental de la mine de Bou-Azzer.

M. M. LAZAAR, Directeur Général C.T.T, par l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de mon travail et par ses encouragements et son soutien actif, est pour beaucoup dans l'aboutissement de ce travail.

M. A. ABRAK, Directeur des Affaires Administratives et des Ressources Humaines, par ses connaissances bien approfondies des problèmes environnementaux de la mine de Bou-Azzer, il a bien voulu suivre de très près mon travail malgré ses charges professionnelles. Je lui exprime ma reconnaissance, en soulignant que j'ai profité de son expérience et de ses conseils.

M. I. AKALAY, Directeur de la recherche chargé de l'environnement, REMINEX groupe O.N.A. Ses connaissances étendues et sa grande expérience m'ont été fortes utiles et très appréciées. Je suis redevable au laboratoire qu'il dirige et qui a réalisé de nombreuses analyses d'échantillons. Toute ma reconnaissance est acquise au personnel du laboratoire de REMINEX pour leur concours efficace.

Sur un autre plan, c'est à M. M. CHERRAT, Directeur de la CTT, son aimable collaboration, ses conseils, sa gentillesse ont été l'atout fondamental des recherches sur l'environnement de la mine de Bou-Azzer.

M. K. GUERGUACHI, ingénieur à la Direction des Affaires Administratives et des Ressources Humaines, je le remercie pour ses conseils, ses encouragements, ainsi que pour les formalités administratives dont il s'est chargé en dépit d'un emploi du temps très lourd.

M. K. ANOUAR, responsable environnement à REMINEX, qui a bien voulu suivre et accepter la tâche ingrate de vérifier la rédaction de mon manuscrit, me faisant profiter de ses profondes connaissances des problèmes environnementaux. Qui il soit remercié profondément.

Qu'il me soit permis d'associer dans un même élan de sympathie toute l'équipe du laboratoire de Bou-Azzer et en leur tête M. H. SEBBAR. Par sa gentillesse, m'aida dans la réalisation de mes campagnes sur le terrain, qu'ira l'expression de ma gratitude.

M. G. VALENCE, responsable du laboratoire Structure et Transfert en Milieu Sédimentaire à l'E.N.S.G de Nancy, à qui je dois beaucoup. Qu'il veuille bien trouver ici, avec mes remerciements, l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

Avec M. G. BELGY, responsable du laboratoire analyses minérales au Centre de Pédologie et Biologique (CRNS) de Nancy, j'ai eu de très fréquentes discussions scientifiques dont j'ai souvent tiré le meilleur profil. Pour des concours divers, je remercie les chercheurs, ingénieurs, techniciens et le personnel administratif du C.P.B de Nancy.

Je tiens aussi à témoigner ma sympathie aux personnels du Centre d'Enseignement Supérieur en Exploration et Valorisation des Ressources Minérales qui m'ont toujours assuré de leur aide et crée une ambiance agréable tout au long de ces années d'études en particulier : Mlle B. PILLON et Mme E. CLAUDINE.

Je dois beaucoup, par ailleurs, à M. A. KHANA, ingénieur pédologue à l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate qui m'a fait bénéficier de ses profondes connaissances en pédologie. Il m'a rendu de grand service pour l'accomplissement de ce travail.

Je ne saurais oublier l'amabilité de l'accueil que je reçus à la direction de l'Hydraulique de Ouarzazate, à l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate, au Centre de Mise en Valeur Agricole de Taznakht et de Foum-Zguid, auprès des autorités locales de Taznakht et de Foum-Zguid. Que tous les responsables et le personnel de ces divers services soient remerciés infiniment.

Je remercie tous les amis qui m'ont encouragé en réalisant ce travail, ils sont nombreux mais tous se reconnaîtront.

A la mémoire de mes parents que dieu les bénisse, qui ont tant fait pour moi, et qui ont toujours souhaité vivre ma réussite. Nul ne peut effacer de mon coeur et ma mémoire le moindre de leurs gestes et paroles.

Il me reste à exprimer mon affectueuse reconnaissance à ma femme, qui en m'encourageant, m'a apporté un concours permanent. J'aimerais dire plus intimement à mes enfants que je voudrais citer ici, Hicham, Meryam, Assma, Ikram et ma petite bien aimée Iman qui ont du supporter mon absence pendant toutes ces années d'études que leur soutien m'est précieux et que ce travail leur appartient.

Nancy, le 25/Juin 1999

Résumé

Ce travail s'inscrit dans les préoccupations actuelles de la pollution de l'environnement par différents facteurs qu'ils soient liquides ou solides. Les gisements de cobalt de Bou-Azzer (Anti -Atlas central- Maroc) dans lesquels l'arsenic est un élément majeur du minerai, répondent par excellence à ces formes de pollution. En effet, les exploitations anciennes et les exploitations actuelles ont engendré une décharge minière dont on compte aujourd'hui plus de 1 166 843 t de haldes de mines (rejets fins arséniés inférieurs à 100 µm). La quantité d'As disséminée dans les haldes de mines s'élève actuellement à 25 214 t. Ces haldes, présentent une dissolution lente et un risque de pollution des eaux d'inhibition et de percolation à travers les stocks accumulés sous forme de digues dans le sous bassin versant de Bou-Azzer qui constitue le berceau des principales crues de l'oued Alougoum.

L'importance de certains processus atmosphériques par les conditions climatiques propres à la région, la nature lithologique des terrains et la violence du ruissellement, jouent un rôle déterminant dans la dispersion de l'As et éléments associés autour de la mine. Les flux migratoires d'As vers la vallée de l'oued Alougoum, à partir de la mine actuelle sont de l'ordre de 39 kg As/an dont 97 % d'As sous forme soluble (< 0,45 µm). En différents secteurs stratégiques de la vallée de l'oued Alougoum, la contamination par l'As des écosystèmes a été bien caractérisée en intensité et en extension: les sédiments ordinaires contiennent jusqu'à 750 mg As/kg, les produits de haldes de mines entraînés par ruissellement, recèlent des teneurs moyennes qui se situent dans une gamme de 200 à 2 860 mg As/kg.

S'agissant des sols agricoles, trois démarches qui sont à la fois analogiques et pédologiques ont été testées et ont fait la preuve de leur efficacité. Elles ont permis de discriminer héritage naturel et ce qui résulte de contamination d'origine anthropique. De fortes teneurs en As d'origine minière ont été détectées dans les horizons labourés (0 - 25 cm) des sols cultivés de la vallée de l'oued Alougoum. Ces sols, présentent une contamination par l'As de 2 à 4 fois le seuil de toxicité admis. Cette pollution influente dans un grand rayon d'action (45 km), se traduit par des teneurs moyennes qui varient de 100 à 225 mg As/kg de terre. Sur la période 1930 - 1998, l'accroissement en As dans les terres cultivées s'élève à 1,73 mg As/kg de terre et par an soit 3,89 kg As/ha/an.

La pollution du couvert végétal semble aussi avoir une intensité et une extension considérable qui pourrait susciter des craintes importantes. Les teneurs moyennes sont de 12 mg As/kg M.S (luzerne) et 6,73 mg As/kg M.S (arboriculture fruitière). La cause principale de l'augmentation rapide de la contamination du milieu naturel au cours de ce siècle est la rupture des cycles écologiques par les activités minières anciennes qui n'ont pas pris en compte le devenir des rejets arséniés de la mine.

Au bassin versant de l'oued Alougoum, à côté des risques liés aux exploitations minières de cobalt, il existe deux sources de l'arsenic pouvant créer des dégâts environnementaux, à savoir : les structures précambriennes de la boutonnière de Bou-Azzer constituées notamment des serpentines contenant 20 à 360 g As/t et les sédiments de l'oued Alougoum très pollués sur de grandes distances. Ces sédiments témoignent d'un passif environnemental qui pose en effet, de sérieux problèmes difficiles à résoudre actuellement et les améliorations en ce sens sont très difficiles à mettre en œuvre.

Dans la situation actuelle, au niveau du centre minier de Bou-Azzer en amont du barrage de Tizgui, il est possible de réduire fortement les flux d'As par des mesures simples à mettre en œuvre (construction d'un bassin de décantation avec neutralisation et fixation de l'As juste en aval des digues opérationnelles, renforcement des barrages de filtration existants, aménagement des tranchées perpendiculaires aux vents dominants (SW - NE) ou des brises vents pour freiner le mouvement des particules fines sous forme de poussières riches en arsenic et provenant des haldes de mines.

Pour le futur environnemental, il est néanmoins indispensable de prévoir la gestion et la remise en état des sites miniers après fermeture, d'élaborer un schéma directeur d'une véritable politique ayant pour objectif d'assurer une surveillance opérationnelle des rejets miniers pour limiter les émissions dans les écosystèmes.

Un schéma général de dispersion et de la contamination par l'As le long de la vallée de l'oued Alougoum a été élaboré. Sur ce schéma apparaissent les sources majeures de la pollution et les liens de cause à effet de la pollution (voies de transport, accumulation, voies de l'intoxication et la cible). Il s'agit d'un modèle qui pourrait être utilisé comme technique d'investigation dans d'autres mines présentant un risque de pollution. Mais pour chaque recherche, il est indispensable de construire un schéma spécial et de bien spécifier la cible. L'utilisation de ce schéma permet de préciser la direction de la recherche et de concentrer les efforts sur l'évaluation de la pollution et de la vulnérabilité de la cible.

Mots clés : Bou-Azzer - Arsenic (As) - décharge minière - haldes de mines - pollution - dispersion - ruissellement - vallée de l'oued Alougoum - contamination - anthropique - écosystèmes - bassin versant de l'oued Alougoum - serpentines.

SOMMAIRE

Avant-propos.....	1
Résumé.....	3
Sommaire.....	4
Introduction générale.....	10

PREMIERE PARTIE

Généralités

CHAPITRE I : ANALYSE DU PROBLEME MINE ENVIRONNEMENT

I.1. L'importance du problème mine-environnement.....	15
I.2. Le contexte international.....	15
I.2.1. Les problèmes de responsabilité et de fiscalité spécifique.....	16
I.2.2. Les normes de rejets/stockage	16
I.2.3. Les technologies appropriées.....	16
I.3. Le contexte national.....	17
I.4. Dimension des exploitations.....	18
I.5. Effets socio-économiques.....	18
I.6. Conclusion.....	20

CHAPITRE II : L'ENVIRONNEMENT ET ECOLOGIE DES SITES

Introduction.....	21
II.1. Sources de pollution de l'eau et des sols.....	21
II.2. Présentation de la problématique de l'eau.....	21
II.2.1. Les flux de pollution des eaux par source.....	22
II.2.2. Les polluants de l'eau.....	22
II.3. Présentation de la problématique des sols.....	22
II.3.1. Source de pollution des sols.....	23
II.3.2. Les principaux types de polluants des sols.....	23
II.3.2.1. Les polluants inorganiques (éléments en traces).....	23
II.3.2.2. Les polluants organiques.....	25
II.4. Conclusion.....	27

DEUXIEME PARTIE

Présentation de la zone étudiée, définition du type de climat, éléments hydrologiques et hydrogéologiques

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Introduction.....	29
I.1. Cadre géographique et administratif.....	29
I.2. Réseau routier.....	29
I.3. Population.....	29
I.4. Le milieu naturel.....	31
I.5. Réseau hydrographique.....	31

I.5.1.	Bassin versant de l'Oued Alougoum.....	31
I.5.2.	Sous bassin versant de Bou-Azzer.....	33
I.6.	La couverture végétale.....	33
I.7.	Pédologie.....	33
I.8.	Les techniques culturales.....	33
I.9.	Les systèmes de production agricole.....	35
I.10.	L'occupation du sol.....	36
I.10.1	Les céréalicultures.....	36
I.10.2.	Cultures fourragères.....	37
I.10.3.	Cultures maraîchères.....	37
I.10.4.	Culture spéciale.....	37
I.10.5.	L'arboriculture fruitière.....	37
I.11.	Données sur les parcours.....	38
I.12.	Le système de production animale.....	38
I.13.	Conclusion.....	40

CHAPITRE II : DEFINITION DU TYPE DE CLIMAT

Introduction.....	41
II.1. Climatologie.....	41
II.1.1. Pluviométrie.....	41
II.1.1.1. Pluviométrie annuelle.....	41
II.1.1.2. Pluviométrie mensuelle.....	43
II.1.2. Température de l'air.....	45
II.1.3. Estimation de l'évaporation potentielle.....	45
II.2. Degré d'aridité.....	48
II.3. Conclusion.....	55

CHAPITRE III : ELEMENTS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

Introduction.....	56
III.1. Eléments hydrologiques.....	56
III.1.1. Lamé d'eau moyenne.....	56
III.1.2. Estimation du coefficient de ruissellement.....	56
III.1.3. Bilan hydrologique du sous bassin versant de Bou-Azzer.....	59
III.1.4. Les particularités du régime de l'oued Alougoum.....	61
III.1.4.1. Les apports annuels.....	61
III.1.4.2. Les apports solides.....	61
III.2. Eléments hydrogéologiques.....	61
III.2.1. Bassin versant de l'oued Alougoum.....	61
III.2.1.1. Caractéristiques aquifères des terrains.....	62
III.2.2. Sous bassin versant de Bou-Azzer.....	64
III.2.2.1. Caractéristiques aquifères des terrains.....	64
III.2.3. Les ressources en eau.....	66
III.2.3.1. Nappes superficielles.....	66
III.2.3.2. Nappes profondes.....	66
III.3. Conclusion.....	67

TROISIEME PARTIE

Recensement et analyse critique des données existantes sur la mine de Bou-Azzer

CHAPITRE I : REGION DE BOU-AZZER DANS SON CONTEXTE MINIER

Introduction.....	69
-------------------	----

I.1.	District minier de Bou-Azzer.....	69
I.2.	Histoire de l'activité minière.....	71
I.3.	Cadre géologique.....	71
I.3.1.	Boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa.....	71
I.4.	Minéralisation de cobalt.....	74
I.5.	Les niveaux de production.....	75
I.6.	Méthode de traitement.....	75
I.6.1.	Laverie gravimétrique.....	75
I.6.2.	Usine hydrométallurgique.....	75
I.7.	Conclusion.....	77

CHAPITRE II : DIAGNOSTIC MINE DE BOU-AZZER ENVIRONNEMENT

Introduction.....	78
II.1. Estimation des rejets annuels.....	78
II.1.1. Stériles de mines.....	78
II.1.2. Haldes de mines.....	78
II.1.2.1. rejets laverie gravimétrique.....	78
II.1.2.2. Rejets usine hydrométallurgique.....	78
II.2. Flux de polluants par sources.....	79
II.3. Bilan global des rejets miniers.....	79
II.4. Composition chimique des rejets miniers.....	79
II.4.1. Méthodologie de prélèvement.....	79
II.4.2. Préparation des échantillons.....	81
II.4.3. Résultats analytiques.....	81
II.5. Composition minéralogique.....	81
II.5.1. Les haldes de mines.....	81
II.6. Estimation du risque potentiel des haldes de mines.....	82
II.6.1. Essais de mise en solution des haldes de mines.....	86
II.6.1.1. Mode opératoire.....	86
II.6.1.2. Dosage de l'arsenic et métaux lourds.....	86
II.6.1.3. Résultats et discussions.....	87
II.7. Bilan quantitatif de polluants disséminés dans les rejets miniers.....	89
II.7.1. Les stériles de mines.....	89
II.7.2. Les rejets Hancock.....	89
II.7.3. Les haldes de mines.....	89
II.9. Conclusion.....	90

QUATRIEME PARTIE

Analyse des formes de dispersions potentielles des polluants dans les zones d'utilisation de l'eau

CHAPITRE I : ANALYSE DES EAUX USEES DE LA MINE

Introduction.....	92
I.1. Niveau de contamination des eaux usées de la mine.....	92
I.1.1. Prélèvements réalisés.....	92
I.1.2. Méthodologie de prélèvement.....	92
I.1.3. Résultats et discussions.....	92
I.2. Bilan quantitatif annuel de polluants à la sortie des digues.....	93
I.3. Conclusion.....	99

CHAPITRE II : ANALYSE DES EAUX DE SURFACE A LA SORTIE DU BARRAGE DE TIZGUI

Introduction.....	100
-------------------	-----

II.1.	Niveau de contamination des eaux à la sortie du barrage.....	100
II.1.1.	Méthodologie de prélèvement.....	100
II.1.2.	Interprétation des résultats.....	100
II.2.	Etude des transferts de polluants à partir des haldes de mines.....	102
II.2.1.	Bilan quantitatif annuel de transfert de polluants vers l'oued Alougoum à partir du barrage de Tizgui.....	102
II.3.	Conclusion.....	106

CHAPITRE III : GEOCHIMIE DES SEDIMENTS DE L'OUED ALOUGOUM

Introduction.....		107
III.1.	Niveaux de contamination des sédiments	107
III.1.1.	Prélèvements réalisés.....	107
III.1.2.	Méthodologie de prélèvement.....	107
III.1.3.	Préparation des échantillons.....	107
III.1.4.	Résultats analytiques.....	107
III.1.5.	Interprétation des résultats.....	110
III.2.	L'impact des phénomènes naturels sur le milieu étudié.....	110
III.2.1.	La nature lithologique des terrains.....	110
III.2.2.	Les mécanismes morphogénétiques.....	114
III.2.2.1.	Les processus initiaux.....	114
	a/ Les actions mécaniques.....	115
	b/ Les actions physico-chimiques.....	116
III.2.2.2.	Les modalités particulières de l'action des eaux de ruissellement.....	117
III.2.2.3.	L'importance propre du vent dans le District minier de Bou-Azzer.....	118
III.3.	Conclusion.....	119

CHAPITRE IV : ANALYSE DES EAUX DE SURFACE DESTINEES A L'IRRIGATION

Introduction.....		120
IV.1.	Niveau de contamination des eaux d'irrigation.....	120
IV.1.1.	Prélèvements réalisés.....	120
IV.1.2.	Méthodologie de prélèvement.....	120
IV.1.3.	Résultats et discussions.....	122
IV.2.	Principaux rapports ioniques des eaux de surface destinées à l'irrigation.	125
IV.3.	Confrontation des résultats aux normes.....	125
IV.4.	Degré de pollution des eaux d'irrigation.....	126
IV.5.	L'origine de l'enrichissement des eaux d'irrigation en polluants minéraux.....	126
IV.6.	Conclusion.....	132

CHAPITRE V : ANALYSE DES EAUX SOUTERRAINES DESTINEES A LA CONSOMMATION HUMAINE

Introduction		134
V.1.	Prélèvements réalisés.....	134
V.2.	Méthodologie de prélèvement.....	134
V.3.	Résultats d'analyses chimiques.....	136
V.4.	Interprétation des résultats.....	136
V.4.1.	Formes et teneurs en arsenic des eaux phréatiques	136
V.4.2.	Formes et teneurs en sélénium des eaux phréatiques	137
V.4.3.	Formes et teneurs en plomb des eaux phréatiques.....	138
V.5.	Confrontation des résultats aux normes.....	138
V.6.	Degré de pollution des eaux souterraines.....	139
V.7.	Conclusion.....	142

CINQUIEME PARTIE

Analyse des sols et des végétaux

CHAPITRE I : ETUDE PEDOLOGIQUE

Introduction.....	144
I.1. Description des méthodes d'investigation.....	144
I.1.1. Démarche de comparaison verticale ponctuelle.....	144
I.1.2. Démarche de comparaison latérale.....	145
I.1.3. L'approche typologique.....	145
I.2. Prélèvements réalisés.....	145
I.3. Description des profils à l'état humide.....	145
I.4. Méthode d'échantillonnage.....	145
I.5. Préparation des échantillons.....	145
I.6. Minéralisation des terres à l'eau régale.....	147
I.7. Dosage de l'As et métaux en solution.....	147
I.8. Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle.....	147
I.9. Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison latérale.....	152
I.10. Recherche des contaminations par l'approche typologique.....	152
I.10.1. Notion de seuil d'investigation.....	152
I.10.2. Analyse des relations entre variables de la terre et fer total.....	152
I.10.2.1. Relation arsenic et fer.....	152
I.10.2.2. Relation cobalt et fer.....	152
I.10.2.3. Relation nickel et fer.....	154
I.10.2.4. Relation chrome et fer.....	154
I.10.2.5. Relation plomb et fer.....	154
I.10.2.6. Relation cuivre et fer.....	154
I.10.2.7. Relation baryum et fer.....	154
I.10.2.8. Relation zinc et fer.....	157
I.10.2.9. Relation cadmium et fer.....	157
I.11. conclusion.....	158

CHAPITRE II : ANALYSE DES SOLS AGRICOLES

Introduction.....	160
II.1. Situation géographiques des sites de prélèvements.....	160
II.2. Méthode d'échantillonnage des sols.....	160
II.3. Préparation des échantillons.....	160
II.4. Réglementation sur les éléments en traces dans les sols.....	162
II.5. Analyse granulométrique.....	163
II.5.1. Matériel et méthode.....	163
II.5.2. Résultats d'analyses granulométriques.....	164
II.5.2.1. Classification des sols agricoles selon leur texture.....	164
II.6. Analyse du carbone total et l'azote.....	166
II.6.1. Matériel et méthode.....	166
II.7. Analyse du carbone organique.....	166
II.7.1. Matériel et méthode.....	166
II.8. La matière organique.....	166
II.9. Interprétation des résultats.....	168
II.9.1. Sols cultivés exposés.....	168
II.10. Teneurs en éléments traces dans les sols.....	168
II.10.1. Teneurs en As dans les sols cultivés exposés.....	168
II.10.2. Teneurs en As dans les sols cultivés témoins.....	168
II.10.3. Teneurs en As des sols vierges.....	170

II.11.	Valeurs corrigées pour les sols cultivés.....	170
II.12.	Confrontation des valeurs mesurées aux valeurs corrigées.....	170
II.12.1.	Sols cultivés exposés.....	171
II.12.2.	Sols cultivés témoins.....	171
II.13.	Degré de pollution des sols agricoles.....	172
II.14.	Transfert de l'As vers les sols cultivés à partir de la mine de Bou-Azzer.....	173
II.15.	Conclusion.....	174

CHAPITRE III : ANALYSE DES VEGETAUX

Introduction.....	176
III.1. Prélèvements des échantillons.....	176
III.2. Méthodologie préparatoire à l'analyse de l'arsenic et métaux lourds	176
III.2.1. Protocole d'attaque acide sous énergie micro ondes.....	176
III.3. Analyse des éléments en traces.....	177
III.3.1. Description et principe de fonctionnement de l'ICP-AES JY 238 Ultrace.....	177
III.4. Réglementation sur les éléments en traces dans les végétaux.....	178
III.5. Résultats des analyses chimiques et discussions.....	179
III.5.1. Concentrations en As, Co et Ni dans les cultures fourragères.....	179
III.5.1.1. La luzerne.....	179
III.5.2. Concentrations en As, Co et Ni dans l'arboriculture fruitière	180
III.5.2.1. Le palmier dattier.....	180
III.5.2.2. Le grenadier.....	180
III.5.2.3. La vigne.....	180
III.5.2.4. Le figuier.....	180
III.5.2.5. L'amandier.....	180
III.5.2.6. L'olivier.....	186
III.5.3. Concentration en Se et Pb dans la luzerne et l'arboriculture fruitière.....	186
III.5.3.1. Concentration en Se.....	186
III.5.3.2. Concentration en Pb.....	186
III.6. Transferts sols plantes via les racines.....	186
III.7. Devenir et risque pour la santé humaine.....	190
III.8. Conclusion.....	191

CONCLUSION GENERALE..... 192

ANNEXE I. Pluviométrie et température aux postes de Foug-Zguid, Zagora et Taznakht.....	205
--	-----

ANNEXE II. Bilans globaux des rejets miniers et polluants minéraux stockés dans le périmètre de la mine.....	214
---	-----

ANNEXE III. Niveaux de concentration en arsenic et éléments associés dans les eaux usées, les eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui, les eaux d'irrigation et dans les eaux phréatiques.....	224
--	-----

ANNEXE IV. Description des profils pédologiques à l'état humide, teneurs en polluants minéraux dans les sols et végétaux.....	231
--	-----

ANNEXE V. Les normes : eaux de surface, eaux d'irrigation, eaux souterraines, sols agricoles et végétaux.....	269
--	-----

Liste des figures.....	281
------------------------	-----

Liste des tableaux.....	286
-------------------------	-----

Références bibliographiques	291
--	-----

INTRODUCTION GENERALE

Le problème de la pollution par l'arsenic et métaux lourds d'origine anthropique (exploitations minières) a une grande importance dans la région de Bou-Azzer, Anti-Atlas central, Maroc (Fig 1). En effet, dans le District minier de Bou-Azzer, la compagnie de Tifnout Tighanimine (C.T.T) et le Cobalt métallurgique de Bou-Azzer (C.M.B.A), filiales de l'O.N.A, exploitent des minerais où des arséniures de cobalt, fer et nickel sont présents sous formes majoritaires ou marginales.

Depuis 1930, le volume annuel des haldes de mines (rejets arséniés fins inférieurs à 100 μm , générés par les unités de traitement de cobalt, d'argent et l'usine hydrométallurgique C.M.B.A) ne cessent d'augmenter, et aujourd'hui, ce sont près de 80 000 tonnes de haldes qui sont produites chaque année, soit 1,7 tonnes/habitant/an par rapport à la population installée en aval de la mine.

Les anciennes exploitations et les exploitations actuelles ont permis la mise en place d'une décharge minière, estimée à 1 166 843 tonnes de haldes de mines, dont on compte aujourd'hui plus de 25 000 t d'arsenic. Elles sont stockées sous forme de digues dans le périmètre de la mine et plus particulièrement dans le sous bassin versant de Bou-Azzer, qui constitue le berceau des principales crues de l'oued Alougoum. Ces haldes arséniées sont soumises en permanence aux actions destructrices de la nature car elles offrent des conditions idéales à toutes formes de dégradation et d'altération qui se traduisent par les traits suivants :

- les vents, par leur puissance augmentent le pouvoir évaporant de l'atmosphère et activent le transport des particules fines qui menacent les terrains de culture, les agglomérations et les infrastructures d'irrigation ;

- les précipitations, par leur caractère orageux, donnent naissance à des crues brutales de forte intensité qui contribuent aux transferts des haldes hors du sous bassin versant de Bou-Azzer ;

- les eaux d'infiltrations et l'oxygène qu'elles tiennent en solution, libèrent des eaux chargées en espèces dissoutes polluantes et toxiques. Ces eaux polluantes et les particules fines chargées en espèces minérales, présentent un risque potentiel de pollution permanent pour l'environnement biologique, physiographique et social.

Il s'agit à l'évidence d'un problème sérieux auquel nous devons faire face de manière plus rigoureuse à l'avenir pour éloigner toutes les menaces qui pèsent en premier lieu sur la vallée de l'oued Alougoum, située en aval de la mine. Cette vallée qui abrite une population estimée à plus de 47 000 personnes, recèle d'importantes potentialités en matières agricoles, évaluées à 1 870 hectares dont 1 480 ha sont irrigués par l'oued Alougoum.

Depuis une dizaine d'années, les habitants de la vallée de l'oued Alougoum, ne cessent de protester contre la pollution de leurs terres agricoles causée par les exploitations de cobalt de Bou-Azzer. Ces habitants, prétendent que leurs terroirs agricoles sont si sévèrement touchés par les activités minières de Bou-Azzer, que très peu de végétation a pu y survivre, que les eaux de surface et les eaux souterraines sont contaminées.

En réalité, le milieu naturel, les exploitations anciennes et actuelles de Bou-Azzer, contribuent à une pollution en arsenic et éléments associés, mais, ni l'origine exacte de cette pollution, ni son mécanisme de dispersion, ni sa forme exacte ne sont réellement connus à ce jour. Devant cette situation préoccupante et dans l'optique d'y remédier, nous avons réalisé dans un premier temps un diagnostic de contamination, fondé sur des campagnes de prélèvements :

- ♦ des eaux usées de la mine ;
- ♦ des sédiments ordinaires de l'oued Alougoum ;
- ♦ des sédiments issus des haldes de mines, détectés au fil de l'oued Alougoum ;
- ♦ des eaux de surface utilisées pour l'irrigation ;

- ◆ des eaux souterraines destinées à la consommation humaine ;
- ◆ des sols cultivés et des végétaux.

Il s'agit donc d'une étude d'impact qui repose sur des investigations approfondies qui impliquent en particulier, des moyens analytiques indispensables à l'évaluation quantitative des impacts, sur des observations effectuées lors de visites de sites et sur les informations recueillies sur place.

Le but fixé est tout d'abord, identifier les sources potentielles de pollution, le vecteur et la cible. Ensuite, exploiter les données climatologiques, géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques du bassin versant de l'oued Alougoum, en vue de comprendre les mécanismes et les formes de dispersions des polluants minéraux, à partir du District minier de Bou-Azzer. Ceci, nous permettra d'en tirer les conséquences qui s'imposent et d'envisager des mesures techniques nécessaires pour atteindre un objectif de réduction d'une éventuelle contamination des écosystèmes par l'arsenic et métaux lourds d'origine minière.

C'est dans ce contexte qui m'a été confié le présent travail, qui s'organise autour de 5 parties :

La première partie est consacrée aux généralités, avec dans le premier chapitre l'analyse du problème mine-environnement. Le deuxième chapitre traite l'environnement et écologie des sites dans le but d'en faire ressortir les problématiques de l'eau et des sols.

La deuxième partie nous amène à analyser le bassin versant de l'oued Alougoum. Dans le premier chapitre, on présentera la vallée de l'oued Alougoum, soumise aux risques potentiels de contamination par l'arsenic et métaux lourds. On étudiera en particulier, les potentialités agricoles, les zones de cultures potentiellement menacées et la population qui en vit. A travers le deuxième chapitre, nous allons tenter de définir le type de climat qui règne dans la région et son rôle dans la dispersion des polluants minéraux autour de la mine de Bou-Azzer. Le troisième chapitre, porte sur une étude hydrologique et hydrogéologique pour définir d'une part, le volume ruisselé annuellement dans le sous bassin versant de Bou-Azzer et qui commande les transferts de polluants hors du sous bassin ; d'autre part, examiner les caractéristiques aquifères des terrains porteurs des haldes de mines pour estimer l'impact de ces rejets arséniés sur les eaux phréatiques.

La troisième partie, concerne le recensement et l'analyse critique des données existantes sur la mine de Bou-Azzer, avec dans le chapitre I, la description de la région de Bou-Azzer dans son contexte minier et dans le chapitre II, le diagnostic mine de Bou-Azzer environnement. Ce diagnostic a pour objectif, la mise en évidence d'un bilan global des rejets miniers et d'un bilan quantitatif de polluants minéraux disséminés dans ces rejets. Ce diagnostic, fera également l'objet de tests de mise en solution des haldes de mines.

La quatrième partie, débouche sur l'analyse des dispersions potentielles de polluants minéraux dans les zones d'utilisation de l'eau. Cette partie contient 5 chapitres. Le premier est réservé à l'analyse des teneurs en arsenic et éléments associés dans les eaux usées générées par les digues opérationnelles. Dans le deuxième chapitre, on examine les concentrations en arsenic et métaux lourds dans les eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui. Le chapitre III, traite la géochimie des sédiments ordinaires et les sédiments issus des haldes de mines, collectés le long de l'oued Alougoum. On y examine plus particulièrement, les mécanismes morphogénitiques qui caractérisent le District minier de Bou-Azzer et qui jouent un rôle capital dans le transfert des polluants minéraux hors de la boutonnière de Bou-Azzer.

Comme exemple de conséquence de pollution, on analyse les teneurs et les formes de dispersions potentielles des polluants dans les eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (chapitre IV) et dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine (chapitre V).

En fin dans la cinquième partie, on examine les sols agricoles dans le bassin versant de l'oued Alougoum, avec un premier chapitre consacré à l'étude pédologique des sols cultivés. Dans le chapitre II, on étudie le niveau de contamination par l'arsenic et éléments associés des sols cultivés et le chapitre III, porte sur l'analyse des végétaux. Il convient de signaler que des échantillons témoins des eaux, des sols et des végétaux, situés hors d'impact et censés être intacts de contamination ont été étudiés à titre de comparaison.

Dans la conclusion générale, on retrace les principaux résultats obtenus, ensuite nous allons suggérer, en fonction du diagnostic réalisé et des principes de bases présentés, quels pourraient être les mesures préventives à prendre pour réduire les effets des exploitations de cobalt de Bou-Azzer sur l'environnement.

Les objectifs principaux de ce projet sont :

☞ recueillir un corps de données dynamiques sur le milieu étudié, suffisant pour le choix de techniques permettant d'atteindre un objectif de réduction de la pollution d'origine minière sur le milieu environnant ;

☞ fournir un outil adéquat avec l'objectif, l'établissement d'une méthodologie applicable aux autres mines situées en milieu aride. En effet, ce projet pourrait être utilisé comme technique d'investigation dans d'autres mines présentant un risque de pollution, et pourrait servir de cadre méthodologique d'approche des environnements miniers complexes et pourrait ainsi être transposé à d'autres sites pollués au Maroc.

L'articulation avec d'autres projets, s'intéressant à des domaines voisins, travaillant éventuellement à des échelles et avec des techniques différentes, devra se faire dans une optique de complémentarité optimale, en vue d'élaborer des modèles plus globaux. En particulier une certaine normalisation des procédures de récoltes des données sera nécessaire dans la mesure du possible (a fortiori si le projet doit envisager une extension à l'échelle régionale ou nationale).

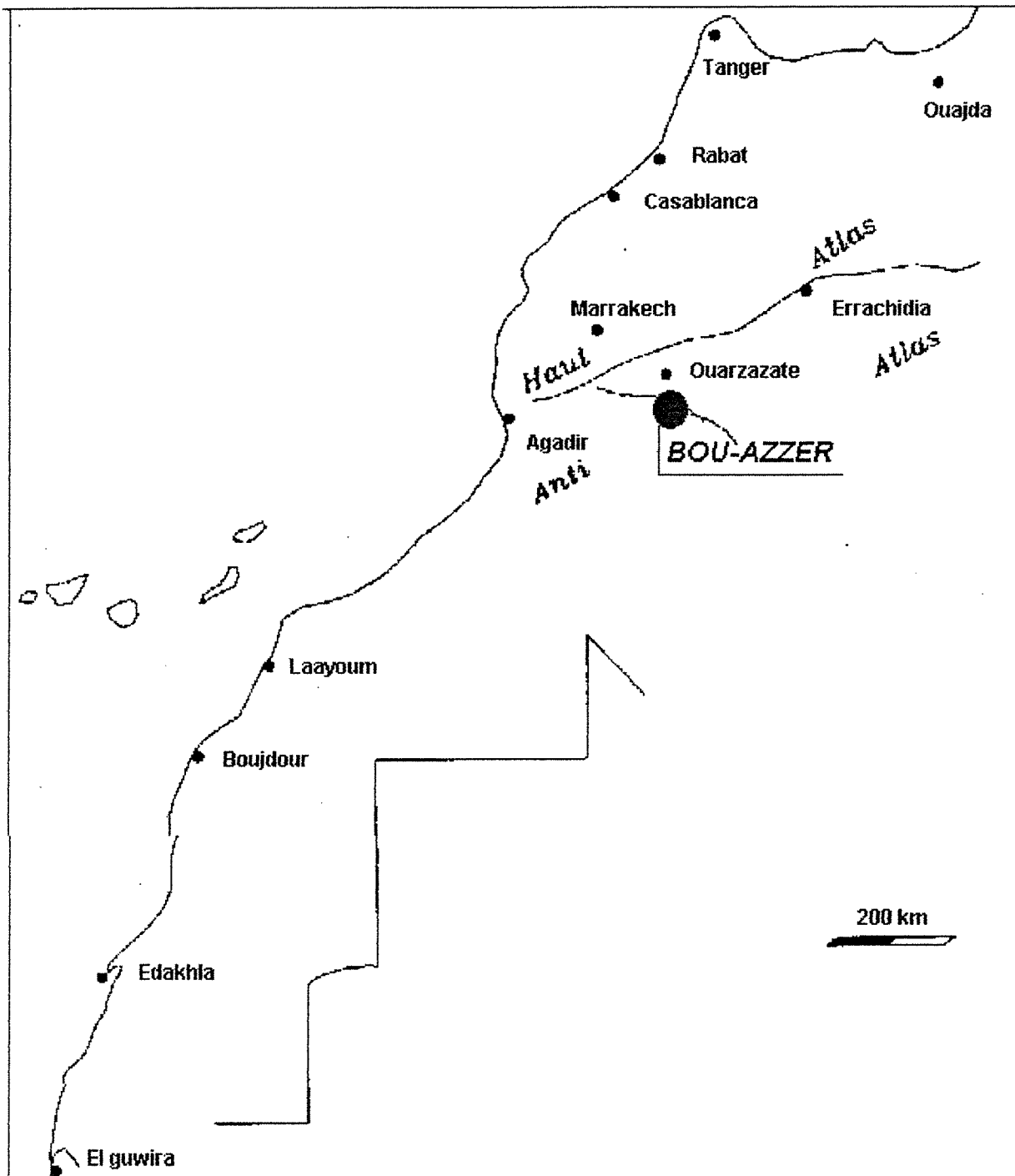


Fig 1. Localisation de la zone étudiée.

PREMIERE PARTIE



GENERALITES

CHAPITRE I : ANALYSE DU PROBLEME MINE ENVIRONNEMENT
CHAPITRE II : L'ENVIRONNEMENT ET ECOLOGIE DES SITES

CHAPITRE I

ANALYSE DU PROBLEME MINE ENVIRONNEMENT

1.1. L'IMPORTANCE DU PROBLEME MINE-ENVIRONNEMENT

Depuis maintenant plusieurs années, l'environnement est devenu un enjeu politique majeur. La question de la transformation de l'environnement par la civilisation moderne est évoquée actuellement à tous les niveaux. Les scientifiques, les ingénieurs et de nombreux responsables oeuvrent pour limiter les agressions de l'homme contre la nature et éloigner les menaces qui pèsent sur notre planète.

Le secteur minier n'échappe pas à cette problématique ; les conséquences avérées et potentielles liées à l'activité minière sur l'environnement (eaux acides de mines, pollution des écosystèmes, affaissements et glissements de terrains...) posent en effet, de sérieux problèmes difficiles à résoudre actuellement.

Généralement, on ne peut pas exploiter une entreprise minière sans causer des dommages irréparables à l'environnement ; le fait de localiser, d'explorer, d'exploiter, de traiter et d'utiliser des ressources minérales, a de nombreux effets sur l'environnement parmi lesquels on compte les suivants : perturbation des terrains et des organismes qui y vivent, érosion, pollution de l'eau, du sol, de l'air et production des déchets.

La mine qu'elle soit souterraine ou à ciel ouvert, par ses infrastructures souterraines, ses installations de traitement, agresse à quelques exceptions près l'environnement biologique, physiographique et social. Elle menace les écosystèmes, modifie irréversiblement le milieu (topographie, circulation des eaux souterraines) et contribue d'une façon directe ou indirecte à la dégradation du milieu végétal, animal et hydrogéologique. Ainsi, l'environnement minier, revêt une importance particulière, qui implique à la fois une maîtrise de l'environnement et une amélioration des technologies industrielles vers moins d'impacts négatifs sur le milieu environnant.

Il est néanmoins indispensable pour chaque pays et pour chaque entreprise minière, soucieux de préserver l'environnement, d'intégrer le développement de la mine dans son environnement, que le problème soit national ou transfrontalier. Ceci implique à la fois une bonne connaissance de l'environnement, un constat (audit) de l'activité minière passée et présente, une vision des développements miniers probables, de façon à élaborer le schéma directeur d'une véritable politique adaptée aux caractéristiques industrielles et environnementales du pays mais aussi compatible avec certains héritages historiques comme la petite mine artisanale.

Les rejets miniers sont des produits nuisibles pour l'environnement. De ce fait, toute entreprise minière, quelle que soit sa taille (petite ou grande), doit se doter d'une politique de gestion à court, moyen et long terme de ces déchets. Dans certains pays industrialisés, le coût des mesures environnementales d'une mine est souvent important (autour de 1,5 à 2 % de la valeur de la production et même dans certains cas récents 5 à 6 %). Ceci incite parfois les exploitants miniers soit à envisager l'augmentation des teneurs de coupures et réduire ainsi la valeur totale produite par un gisement, soit à réduire les dépenses consacrées à la recherche et de limiter le renouvellement des réserves, et donc la durabilité de la mine.

1.2. LE CONTEXTE INTERNATIONAL

A l'échelle internationale, trois grands types de problèmes liés à l'environnement minier sont particulièrement délicats :

1. les problèmes de responsabilité et de fiscalité spécifique ;
2. les normes de rejets / stockage ;
3. les technologies appropriées.

1.2.1. Les problèmes de responsabilité et de fiscalité spécifique

Avant l'exploitation d'un gisement et même durant la phase d'exploration, toute entreprise minière, doit s'orienter vers des investigations approfondies conduisant à la mise à jour d'un constat (audit) environnemental pour dégager certaines responsabilités. Les problèmes de responsabilité et de fiscalité spécifique à l'environnement se retrouvent dans presque tous les pays. En général, la responsabilité d'une entreprise minière est bien engagée dans les opérations minières qu'elle conduit mais qu'en est-il des dégâts provoqués par les exploitations antérieures ? faut-il faire endosser le passif environnemental au nouvel opérateur risque de le décourager a priori d'investir, et ne pas le faire créer des situations difficiles à arbitrer. Parallèlement, si toutes les réglementations prévoient des provisions financières bloquées pour assurer la remise en état des sites miniers après fermeture, le montant, mais aussi la mise en place de ces fonds et leur gestion et encore plus leur position fiscale (déduction ou non des bénéfiques), alors que l'on ignore a priori s'ils seront nécessaires ou non à la fermeture, posent des problèmes mal résolus actuellement.

1.2.2. Les normes de rejets / stockage

Les normes de rejet-stockage, posent de sérieux problèmes dans certains pays ne disposant pas d'une réglementation environnementale. De même, les normes admises actuellement dans certains pays industrialisés varient très sensiblement d'une législation à l'autre et témoignent ainsi d'une connaissance encore très imparfaite des cycles des éléments dans les paysages naturels et leurs effets instantanés ou cumulatifs (exemple des rayonnements ionisants et des radio - éléments).

Tout pays soucieux de se doter d'une réglementation moderne et pertinente, doit fixer des normes qui lui sont propre, en fonction de certains critères géologiques, climatiques, hydrogéologiques, hydrologiques). Pour les teneurs en éléments dissous dans l'eau, transports particuliers de mines et laveries ; il ne s'agit pas d'imposer des normes « Zéro » mais des normes qui ménagent les effets à long terme, en particulier les effets cumulatifs dans les sols et la biosphère.

La mise à jour ou la préparation des normes doit toujours s'accompagner de la mise en place d'une structure indépendante de contrôle ayant toutes les aptitudes à l'échantillonnage et les capacités technologiques à la mesure sur le terrain et à l'analyse en laboratoire. C'est ce qui existe dans les pays industrialisés mais est souvent peu opérationnel dans certains pays en développement.

1.2.3. Les technologies appropriées.

Les technologies industrielles appropriées à l'environnement font l'objet de très nombreuses recherches très pointues. Par exemple aux USA, le traitement des eaux acides de mines (drainage des terrils ou exhaure) se fait non plus par un traitement chimique mais par une **fixation organo-chimique** (végétation, micro-organismes) dans des grands bassins aménagés (wetlands) où est favorisés l'implantation des végétaux et micro-organismes les plus efficaces à la neutralisation des eaux et à la fixation des polluants métalliques. De même et parallèlement, les recherches sur la conservation des espèces menacées et leur réintroduction ultérieure (protection de la biodiversité) progressent rapidement et commencent à porter leurs fruits (conservation des collections végétales spécialisées).

Pour les sols contaminés par des substances potentiellement toxiques, à des doses plus ou moins fortes, de nombreuses techniques de réhabilitation sont en cours de développement. **L'incinération ou la désorption thermique** par exemple sont des procédés rapides. Cette technique est souvent appropriée aux cas d'urgence, cependant, elle présente plusieurs inconvénients, comme

leur coût élevé, la perte des qualités biologiques du sol par stérilisation et l'émission potentielle de polluants, notamment des dioxines. Alternativement, l'épandage de détergent ou d'autres tensio-actifs à la surface du sol a pour objectif, en solubilisant le polluant, de le déplacer hors de la zone contaminée. Toutefois, ce déplacement est susceptible de favoriser la diffusion des polluants dans les écosystèmes.

Les méthodes biologiques plus douces, efficaces et moins onéreuses sont actuellement en plein développement. Leur fonctionnement repose sur l'utilisation des capacités naturelles des organismes vivants à extraire et à dégrader les polluants. Dans les bioréacteurs, par exemple, les eaux polluées du sol sont épurées par des micro-organismes comme les bactéries et les champignons activés par des engrais. Les biotertes fonctionnent sur le même principe d'activation microbienne ; la terre polluée est excavée, assemblée sous forme de tertre, puis traitée avec des engrais.

Enfin, les plantes peuvent contribuer à dépolluer le sol : c'est la **phyto-réhabilitation** ou **phyto-remédiation**. Cette technique est en plein essor, notamment grâce à sa simplicité de mise en oeuvre analogue aux cultures agricoles. Ici, la dépollution est basée sur deux phénomènes, selon la nature du polluant. D'une part, certaines espèces assimilent préférentiellement les métaux lourds puis les stockent, contribuant ainsi à extraire ces polluants du sol. Cette technique permet non seulement de dépolluer le sol mais aussi de produire un véritable minerai recyclable après récolte et incinération des plantes. D'autre part, les plantes activent fortement la biomasse microbienne en injectant en permanence des exsudats organiques, tels que des sucres et des acides aminés dans la zone des racines, c'est à dire la « rhzosphère ». Ainsi, les micro-organismes du sol, bien nourris par la plante, dégradent les polluants organiques comme les pesticides ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques. (Eric Lichtfouse, Laboratoire sol et environnement, Ecole nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires (Ensaia) Vandoeuvre - les - Nancy.

Les trois problèmes que nous venons d'explicitier sont largement débattus sur la scène internationale aujourd'hui, et existent dans la majorité des pays.

1.3. LE CONTEXTE NATIONAL

Le Maroc est doté d'une infrastructure minière et para-minière importante. Grâce à son cadre géologique varié, qui va du Précambrien ancien au Quaternaire récent ; son sous sol recèle d'importants gisements de phosphates (premier exportateur mondial), des gisements d'argent, d'or, de cuivre, de plomb, de zinc, de manganèse, de cobalt, des roches ornementales, sans oublier les substances utiles (barytine, mica, feldspath, fer oligiste...). Ces ressources minérales qui constituent le patrimoine minier du pays sont exploitées et traitées suivant des procédés souvent différents.

En plus des problèmes généraux rencontrés dans le contexte international, il existe au Maroc des problèmes beaucoup plus spécifiques. La mine qu'elle soit souterraine ou à ciel ouvert, affecte avec ses infrastructures des surfaces parfois importantes. La plupart des gisements sont situés dans des zones reculées, parfois difficile d'accès et toute exploitation, par la perturbation du milieu (végétal, animal, hydrologique...) peut avoir un impact sensible vis à vis de l'environnement à très court terme mais aussi à long terme. Certains problèmes majeurs (gaz carbonique issu de la combustion, pollution de l'eau, du sol, de l'air), résultent beaucoup plus des industries dérivées de la mine (fonderies, transformation, usages) que de la mine elle-même.

L'activité minière au Maroc, malgré quelques actions entreprises visant à protéger l'environnement ; agresse à quelques exceptions près l'environnement biologique, physiographique et social. Elle contribue d'une façon directe ou indirecte à la dégradation du milieu écologique. La perturbation du milieu (végétal, animal, hydrologique) est sensible à très court terme aussi bien qu'à long terme. En fait, deux problèmes sérieux en partie conjugués se présentent : le maintien de la biodiversité et la protection des sols.

Depuis quelques années, le Maroc présente une biodiversité assez riche, du fait du caractère endémique de très nombreuses espèces ; les perturbations parfois localisées ont souvent entraîné des conséquences néfastes et irréversibles.

La protection des sols relève d'une autre problématique. En milieu aride ou semi-aride, la rupture de l'équilibre naturel est accentuée. Cette rupture est imputable surtout à des situations climatiques extrêmes (sécheresses prolongées, pluies agressives et vents chargés). Les sols des régions arides sont extrêmement vulnérables à l'érosion qui commence par des ravines profondes pour finir avec la destruction totale du manteau superficiel. Ce déséquilibre provoque de plus un suralluvionnement des vallées et des oasis et leur asphyxie plus ou moins profonde. Ces processus qui se répercutent sur les récoltes et les rendements sont quasiment irréversibles et peuvent devenir catastrophique à l'échelle d'une ou deux générations.

Pour les exploitations minières, il s'agit en premier lieu d'assurer une surveillance opérationnelle à long terme et à différentes échelles du changement écologique, étayé par une analyse des processus dynamiques qui façonnent ces écosystèmes. En second lieu, évaluer l'impact de la mine sur l'environnement ; les travaux miniers peuvent à eux seuls provoquer localement des effets convergents, mais il s'agit là d'effets qu'il est possible de contrôler localement dès lors que l'ouverture des mines a été précédée d'une étude complète d'impact d'environnement, que les travaux sont conduits avec une technologie adaptée et que les sites sont bien surveillés après leur fermeture.

De par leur fréquence et l'absence de technicité, les petites mines artisanales par exemple de plomb, barytine, fer oligiste, zinc, mica et feldspath... sont à ce titre beaucoup plus dangereuses que les mines industrielles.

Pour les exploitations de taille industrielle, il s'agit d'empêcher la dissémination des éléments polluants qui menacent les écosystèmes, d'autant plus que ces écosystèmes sont fragiles et que la gravité des risques de dégradation qu'ils courent sont intenses. En raison à la fois de la toxicité de certains éléments et des pertes engendrées par les procédés de valorisation, les responsables doivent établir des véritables monitoring des sites avoisinants la mine et de définir certains objectifs environnementaux dans le cadre d'un développement minier, là où le milieu écologique est à un point critique. En ce qui concerne l'environnement végétal, les nouveaux projets doivent s'appuyer sur un audit d'environnement particulièrement soigné avant même toute étude d'impact. Les mines abandonnées ou fermées par épuisement des réserves ou par non- rentabilité, présentent des problèmes d'environnement car aucune action de réhabilitation n'a été prise, et là c'est un problème aussi extrêmement difficile à résoudre.

1.4. DIMENSION DES EXPLOITATIONS

Le Maroc possède une gamme très large d'activité minière, petite mine artisanale (avec ou sans mécanisation partielle), à la mine moyenne industrielle (souvent peu soucieuse de l'environnement et jouissant parallèlement d'une capacité technique et financière limitée) jusqu'aux grands projets. Dans chaque cas, la sensibilité aux problèmes d'environnement, les capacités techniques et financières, l'esprit de dialogue sont très variables alors que les risques environnementaux sont souvent convergents, et le degré de respect des réglementations et lui aussi extrêmement variable.

1.5. EFFETS SOCIO-ECONOMIQUES

En terme de développement, la recherche d'une valeur ajoutée maximum des produits miniers est bien entendu un objectif primordial, qu'il s'agisse de métaux de base, de métaux précieux, roches ornementales ou de substances utiles. C'est en effet un apport non seulement sur le plan de la

valeur de la production mais aussi sur la création d'emplois pour les besoins de l'opération minière et les activités suscitées dans d'autres domaines de l'économie par l'apport de produits miniers.

La mine a un effet multiplicateur relativement plus élevé que la plupart des opérations à grande échelle. Cet effet multiplicateur a une incidence très positive pour l'économie en général parce qu'elle encourage le développement régional, la création de petites industries locales. La plupart des activités d'extractions minières s'effectuent dans des régions relativement éloignées des centres urbains et contribuent donc utilement au développement régional.

La grande mine mécanisée est à l'autre extrémité de l'échelle un modèle de développement non sans danger sociologique. Elle crée lors de son ouverture, des transformations radicales du milieu social essentiellement rural ; certes, un développement social et industriel harmonieux est possible mais les risques de mauvaise intégration de la mine sont importants et les échecs sont assez nombreux. Plus grave est l'impact d'une fermeture car le retour à une économie rurale est alors en générale impossible. Seule la mine moyenne mécanisée est en général à l'abri des impacts sociologiques très négatifs.

1.6. CONCLUSION

Dans ce premier chapitre consacré à l'analyse du problème mine-environnement, nous espérons avoir touché quelques problèmes particuliers liés à l'environnement et qui existent dans tous les pays. Le problème de responsabilité et de fiscalité spécifique, le problème des normes et les technologies appropriées font actuellement l'objet d'un débat à l'échelle internationale pour améliorer la situation actuelle et préserver l'avenir.

En matière de technologies appropriées, certaines agences spécialisées dans le domaine de l'environnement, et à travers des programmes de recherche ont permis la mise au point de certaines techniques permettant l'élimination des polluants et micro-polluants qui menacent les écosystèmes. Les méthodes biologiques, la biolixiviation, les plantes sont des techniques nouvelles moins onéreuses et de grande efficacité utilisées dans certains pays industrialisés. De même, les membranes poreuses (micro filtration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse) sont des outils de la séparation dont l'emploi dans l'industrie de l'environnement plus particulièrement dans le traitement des eaux, est relativement récent.

Au Maroc, on trouve plusieurs mines abandonnées ou fermées par épuisement des réserves ou par non rentabilité. Ces anciennes mines possèdent à tout le moins un certain potentiel de contamination des écosystèmes. Pour les mines exploitables, les rejets miniers posent de sérieux problèmes en raison à la fois de leur nature et de leur quantité. Ces rejets contiennent souvent des éléments nocifs pour la santé humaine et pour l'environnement. Ainsi, les entreprises minières doivent intégrer le coût des rejets en tant qu'éléments à part entière de leur chaîne de production.

L'environnement est devenu actuellement un facteur influent dans le bilan économique d'un projet industriel. Il conditionne la croissance car il se positionne progressivement au centre du nouveau système industriel. Il est difficile de pouvoir chiffrer toutes les conséquences de la pollution, pour qu'elles puissent être intégrées par l'industriel dans le calcul économique, mais une chose est sûre, les coûts de traitement industriel des rejets sont directement identifiables. Ces coûts élevés, incitent à accroître les recherches sur les possibilités de valorisation et sur les technologies de transformation des effluents.

Il est évident que le développement de la mine ne pourra se faire que par un respect accru de l'environnement aussi bien pour les anciennes exploitations que pour les mines actuellement en opération. De ce fait, les exploitants miniers doivent d'une part, assurer un confinement convenable des rejets générés par l'activité minière pour limiter les émissions dans les écosystèmes ; d'autre part, prévoir une gestion à long terme des sites miniers après la fermeture de la mine.

CHAPITRE II

L'ENVIRONNEMENT ET ECOLOGIE DES SITES

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on retrace les problématiques de l'eau et des sols. Il ne semble pas nécessaire de les décrire longuement, mais d'en rappeler seulement la nature des polluants et les flux de pollution par source. En effet, le milieu naturel subit en permanence une série de contraintes liées notamment aux activités humaines. L'eau et les sols qui sont des ressources principales de l'homme, trouvent des sources de contamination diffuses et non diffuses (effluents industriels) susceptibles de modifier leur propriété et leur composition chimique.

II.1. SOURCES DE POLLUTION DE L'EAU ET DES SOLS

La dégradation de l'environnement est due à deux grandes catégories de pollution que l'on peut classer comme suit :

→ Pollutions naturelles, comportant des anomalies géochimiques, radioactives et biologiques liées aux gisements miniers, et qui peuvent accroître les teneurs en éléments traces dans les eaux et les sols.

→ Pollutions technogènes, liées à l'action de l'homme et qui peuvent être :

- industrielles (mines, usines, déchets, énergies) ;
- agricoles (engrais, élevage, drainage, irrigation) ;
- urbaine (eaux usées).

Ces sources de pollution génèrent des polluants bien spécifiques sous formes moléculaires ou ioniques (métalliques ou organiques) véhiculés dans le milieu aquatique et terrestre et dont certains sont dangereux.

II.2. PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE DE L'EAU

L'eau est une ressource physique unique. A ce titre, c'est aussi une ressource naturelle renouvelable avec ce que son utilisation suppose d'enjeux et de conflits liés à son utilisation (énergétique, agricole, industrielle, domestique, de loisirs, etc ...). C'est une ressource renouvelable car elle participe à un cycle. L'évaporation par l'énergie solaire, les précipitations et l'écoulement en surface et sous terre constituent les étapes de ce cycle.

La problématique de l'eau est un problème de quantité et de qualité. C'est à dire de ressource et de pollution. Du point de vue de la ressource, on distinguera d'un côté les eaux de surface qui ont un taux de renouvellement très rapide, et de l'autre, les eaux souterraines qui s'écoulent beaucoup plus lentement. Un déversement dans les eaux de surface ne produira qu'une pollution limitée dans le temps. Par contre, les eaux souterraines peuvent faire l'objet de pollution beaucoup plus lente à disparaître.

La qualité des cours d'eau peut être dégradée par des prélèvements d'eau exagérés ou par des rejets mal épurés. Or au delà du respect de l'environnement, la protection des milieux aquatiques constitue aussi une garantie pour assurer la pérennité des ressources en eaux potabilisables.

II.2.1 Les flux de pollution des eaux par source

- les rejets domestiques
- les rejets industriels
- les rejets agricoles et agro-alimentaires

II.2.2. Les polluants de l'eau

- les matières en suspension
- les matières organiques (DBO)
- les produits azotés
- les produits phosphorés
- les métaux
- les toxiques

Les matières toxiques sont constituées de micro-polluants minéraux (métaux lourds : chrome, cadmium, nickel, plomb, arsenic ...), ainsi que de substances telles que les cyanures ou des molécules organiques présentant une action d'inhibition des mécanismes biologiques.

Les métaux et métalloïdes peuvent être classés en quatre groupes :

1. les éléments à forte toxicité, le cadmium et le mercure ;
2. les éléments relativement toxiques, comme l'arsenic et le plomb ;
3. les éléments assez toxiques mais non cancérogènes par voie orale, le nickel, le chrome IV et le cuivre ;
4. les métaux relativement peu toxiques à long terme, le chrome III et le zinc.

L'une des difficultés rencontrées pour apprécier la toxicité d'un produit tient au choix de l'espèce vivante prise en référence. En effet, certaines substances sont reconnues comme étant très toxiques pour certains organismes et inoffensives pour d'autres. Au niveau international, et plus particulièrement au niveau européen, la politique mise en oeuvre pour limiter ou réduire la pollution toxique est axée sur une liste de substances prioritaires sélectionnées sur la base de critères de toxicité, de persistance et d'accumulation dans les organismes. Elles sont majoritairement connues pour être dangereuses pour l'homme, et dans certains cas, des effets néfastes pour d'autres espèces ont été observés. La CEE, prévoit que des normes de rejets quantifiés en concentrations et en charges soient appliquées pour chacune des substances prioritaires listées au niveau des sites de production.

II.3. PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE DES SOLS

Le sol a été considéré pendant longtemps comme un milieu inerte et clos dans lequel il était possible d'enfouir toutes sortes de déchets toxiques ou non sans encourir de conséquences pour les organismes vivants. C'est faux, car c'est l'un des rouages essentiels du bon fonctionnement de la vie sur terre. Il contient des milliers d'organismes vivants : vers, bactéries, champignons, algues etc, qui assurent le recyclage des résidus organiques, un maillon essentiel de l'équilibre de notre planète.

L'humus de la terre, formé par la lente décomposition de ces résidus organiques, joue de nombreux rôles vitaux, par exemple en emmagasinant des réserves d'eau et de nutriments pour les plantes, ou en stabilisant les grains minéraux avec une « colle » organique. En conséquence, la dégradation de l'humus, par exemple lors de l'usage abusif de pesticides et d'engrais, conduit inéluctablement à l'appauvrissement du sol et à l'érosion rapide des grains minéraux.

Le sol n'est certainement pas un milieu clos. La totalité du carbone organique terrestre a transité par cette interface entre l'atmosphère, le sous-sol et les rivières à un moment ou à un autre des temps géologiques. Sa capacité de dépollution est très limitée. Ainsi, tout polluant entrant dans le sol est susceptible d'être stocké, transformé souvent en produit plus toxique puis transféré vers l'atmosphère par érosion éolienne, vers les plantes par assimilation et vers l'eau des rivières et des nappes phréatiques. Il est clair que l'accumulation de produits toxiques dans le sol présente un risque à plus ou moins long terme pour tous les organismes vivants.

La pollution des sols est inertielle : enfouie, cachée, c'est un lègue empoisonné qui ressort à l'occasion, de nouvelles utilisation du site, ou des conséquences fortuites (émanations atmosphériques, contamination des eaux). Elle peut être influente dans un grand rayon d'action par le biais des cours d'eau, des vents ou d'autres phénomènes naturels. La complexité de la gestion des sites pollués, réside dans la variété des substances contenues dont la mémoire est souvent perdue avec la cessation d'activité, et dont le seul indice visible en certains cas être la friche industrielle persistant dans le paysage. Cela fait naître des incertitudes sur le respect des normes qui rendent l'application de la réglementation délicate. De plus la localisation et l'identification des polluants peut s'avérer malaisée, et rendre les opérations de traitement et de réhabilitation délicates et par conséquent influencer considérablement les coûts de gestion de tels sites.

II.3.1 Sources de pollution des sols

Elles sont nombreuses et variées. Toutes les activités humaines sont des sources potentielles de pollution organiques et minérales : les transports, la consommation de produits non-recyclables, les pratiques agricoles et les industries. La cause profonde de l'augmentation rapide de la pollution du milieu naturel au cours du dernier siècle est la rupture des cycles écologiques par les activités économiques qui n'ont notamment pas pris en compte le devenir des déchets.

Un polluant est une substance présentant des effets toxiques vis-à-vis des organismes vivants. On peut distinguer les polluants **naturels** des polluants **anthropiques** dont l'origine est liée à l'activité humaine. Par exemple, les substances toxiques émises par les volcans, par les feux de végétation naturels ou par les remontées de pétrole à travers les failles de la croûte terrestre, ont une origine strictement naturelle. Par contre, l'industrialisation et l'urbanisation ont provoqué l'introduction de polluants variés dans les sols urbaines, agricoles et forestiers.

Dans plusieurs domaines d'activité, l'utilisation croissante de substances radioactives, organiques ou minérales, s'est traduite par des accidents ayant entraîné la diffusion à doses élevées de ces polluants dans les écosystèmes. Les moteurs à combustion produisent de nombreux éléments toxiques, mutagènes et cancérigènes comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont introduits dans l'atmosphère puis transférés vers les sols, les eaux et les êtres vivants. Une grande partie des pesticides utilisés pour les cultures agricoles ou potagères est constituée de polluants organiques persistants (POP) susceptibles de diffuser et de demeurer pendant des dizaines d'années dans les milieux biologiques. Nous sommes donc en présence de trois grandes classes chimiques de substances toxiques : les métaux lourds, les radionucléides peu ou pas dégradables et les polluants organiques, susceptibles d'être dégradés du fait de leur squelette carboné.

II.3.2. Les principaux types de polluants des sols

Tous les polluants des sols sont des produits qui compromettent à la sécurité et le bien être de l'homme.

II.3.2.1. Les polluants inorganiques (éléments traces)

Sources : Tableau de bord de l'environnement : sol-Dechets, D.R.AE., 1988.

Grand Larous Universel.

Soils and the environment, Alan Wild, Cambridge University Press, 1993.

Encyclopédie de l'Ecologie - Le présent en question, R. Dumont, Larousse, 1977.

Les éléments en traces sont des métaux ou métalloïdes qui sont naturellement présents dans le sol, mais qui peuvent aussi être exogènes.

Ils sont notamment apportés par :

- les engrais,
- les amendements,
- les pesticides,
- les déchets,
- les retombées de polluants atmosphériques.

Certains de ces éléments sont indispensables en faibles quantités, mais tous sont dangereux au delà d'un certain seuil. Les principaux éléments traces potentiellement **toxiques pour l'homme** sont le cadmium, le mercure, le plomb et l'arsenic. Le nickel, le cuivre, le zinc, le chrome et le sélénium sont **toxiques pour les végétaux**. Les éléments traces présents dans le sol peuvent être fixés (notamment par absorption, adsorption ou précipitation) ou solubilisés. La solubilisation leur permet d'être adsorbés par les plantes ou de migrer vers les eaux souterraines.

Les éléments traces se trouvent sous forme de métal ou de sel métallique oxydé ou réduit. Ils sont plus ou moins dangereux suivant leur forme chimique. Ces éléments présentent un danger de contamination de la chaîne alimentaire, avec accumulation le long de celle-ci. Ils peuvent avoir sur l'homme et les animaux des effets toxiques, cancérigènes, tératogènes ou mutagènes. Les plus préoccupants sont :

- le cadmium (Cd) provoquant des maladies osseuses et rénales ;
- le mercure (Hg) touchant le système nerveux ;
- le plomb (Pb) provoquant anémie et lésions nerveuses ;
- l'arsenic (As) est toxique pour les poumons, les intestins, provoque des lésions de la peau et d'hyper kératose, épaissement de la couche cornée pouvant devenir cancéreux ;
- le chrome (Cr) est toxique pour le tube gastro-intestinal, viennent ensuite le Ni, Cu, Zn et Se toxiques pour les végétaux.

↳ Les cyanures

Les cyanures sont des sels d'acide cyanhydrique (HCN). La solubilité et la toxicité des cyanures est très variable en fonction de leur composition chimique.

↳ Les nitrates

Les nitrates (NO_3^-) proviennent entre autres des engrais. Ils s'adsorbent difficilement dans le sol et restent donc en solution jusqu'à ce qu'ils soient dénitrifiés, absorbés par les plantes ou entraînés vers les eaux souterraines ou de surface, où ils favorisent l'eutrophisation. L'ingestion des nitrates peut être toxique et cancérigène.

↳ Les sels de sodium

Une quantité excessive de sel dans un sol réduit sa fertilité et peut dans certains cas le rendre totalement stérile. La salinisation résulte de deux phénomènes souvent simultanés qui se produisent dans les zones irriguées :

- pénétration trop faible de l'eau d'irrigation dans le sol, d'où un dépôt de sel dans les couches superficielles ;

- une retombée de la nappe phréatique avec prélèvements de sel dans les couches profondes lorsque le drainage est mauvais.

II.3.2.2. Les polluants organiques

Source : Encyclopedia Universalis, Pesticides et lutte biologique.

Grand Larousse Universel.

Encyclopedia Universalis, Pollution.

Microbial dégradation of Organic compounds, D.T.Gibson, The University of Texas at Austin.

↳ Les pesticides

Les pesticides sont des substances toxiques utilisées pour lutter contre des êtres vivants nuisibles à l'homme. Les principaux types de pesticides sont les fongicides (contre les champignons), les insecticides (contre les insectes) et les herbicides (contre les mauvaises herbes). On peut séparer les pesticides en plusieurs familles dont celle des hydrocarbures organochlorés (aldrine, chlordane, hexachlorocyclohexane) et celle des composés organophosphorés (malathion...).

Dans le sol, les pesticides subissent des dégradations chimiques et microbiologiques sous l'action des bactéries et des champignons. Des réactions chimiques abiotiques peuvent aussi les transformer lorsqu'ils ne sont pas décomposés ou volatilisés dans l'atmosphère. Les pesticides peuvent être dissous dans les solutions du sol et entraînés petit à petit vers les nappes phréatiques, malgré leur fixation plus ou moins forte sur les constituants du sol par adsorption.

La durée de vie des pesticides est très variable. Ainsi, les composés organophosphorés ont une vie courte, et certains hydrocarbures chlorés par exemple sont très persistants, ce qui en fait des poisons cumulatifs, c'est-à-dire des substances provoquant une toxicité chronique insidieuse. D'une façon générale, les pesticides sont caractérisés à la fois par une toxicité aiguë et par une toxicité chronique, celle-ci peut être évaluée en déterminant des doses létales (DL). Par exemple, la DL 50 d'une substance pour le rat, est le nombre de milligramme de substance par kilogramme d'animal qui tue 50 % d'une population de rats en une durée et un nombre d'application à préciser (une seule application pour la toxicité aiguë, plusieurs pour la toxicité chronique).

Les hydrocarbures organochlorés ont la propriété de pouvoir s'accumuler dans les organismes. Les principaux dangers présentés par les pesticides sont, outre leur manque de sélectivité, la contamination des aliments (avec accumulation le long de la chaîne alimentaire) et celle des nappes phréatiques. En plus de leur caractère toxique, dû à la présence d'éléments traces, certains organochlorés possèdent des propriétés tératogènes et cancérogènes.

↳ Les hydrocarbures

Les hydrocarbures les plus dangereux font partie des composés aromatiques et des hydrocarbures chlorés. Le benzène et le toluène sont deux composés aromatiques très utilisés engendrant une pollution. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques tels que le naphtalène ont des effets cancérogènes. Les composés aromatiques sont toxiques et parfois cancérogènes, donc mutagènes.

Le sol assure très difficilement la dégradation biologique de ce type de produit. Les hydrocarbures chlorés comprennent entre autres les pesticides organochlorés, les chlorobenzènes et les polychlorobiphényles (PCB). Le PCB, dont la molécule est très persistante, présente un risque important de contamination de la chaîne alimentaire. Sa décomposition à chaud peut donner naissance à des furannes et à des dioxines très toxiques.

↳ Les organismes pathogènes

Source : Encyclopédie de l'Ecologie - Le présent en question, R. Dumont, Larousse, 1977.

La pollution des organismes pathogènes d'origine animale se produit lorsque l'autoépuration d'un sol ne peut plus se faire, c'est-à-dire lorsque les mécanismes naturels sont saturés. C'est par exemple le cas dans certaines prairies utilisées de façon presque ininterrompue. Certaines maladies des animaux peuvent alors être transmises à l'homme pour l'intermédiaire du sol :

- le charbon
- le tétanos
- le botulisme
- la brucellose
- la fièvre aphteuse

↳ Les radionucléides

Source : Tableau de bord de l'environnement : Sol-Déchets, D.R.AE., 1988.
Soils and the environment, Alan Wild, Cambridge University Press, 1993.
Encyclopedia Universalis, Radioéléments et rayonnements ionisants.

Les radionucléides sont des nucléides radioactifs capables de se transformer spontanément en un autre nucléide, avec éventuellement émission de particules chargées, de rayons X ou de rayons gamma. Les radionucléides dégagés dans l'atmosphère par les explosions atomiques, les centrales nucléaires et thermiques et l'activité volcanique finissent par se déposer à la surface de la terre et être incorporés au sol par la pluie ou les végétaux qu'ils ont contaminés.

Les radionucléides sont peu mobiles dans le sol et ont donc tendance à s'accumuler. Ils ont des durées de vie très variables (de quelques jours pour l'iode à quelques années pour le césium). Ils possèdent également la propriété de s'accumuler le long de la chaîne alimentaire. L'émission de rayonnement ionisant par les radionucléides, présente un danger pour les êtres vivants (ces rayonnements agissent comme des poisons cumulatifs). La contamination par les radionucléides peut être interne ou externe (par voie digestive ou cutanée).

II.4. CONCLUSION

L'aspect environnemental doit devenir une préoccupation constante de l'ensemble des citoyens, ainsi que des différents services publics et entreprises privées dont les activités ont des incidences négatives sur l'environnement.

La sensibilisation de la population et des opérateurs économiques est la clé de voûte de la sauvegarde des richesses naturelles, de la protection de l'environnement et de l'équilibre écologique. En effet, l'industrialisation sans cesse grandissante, l'exploitation effrénée des richesses naturelles ainsi que la sururbanisation sont autant de menaces qui continuent à libérer des polluants organiques, inorganiques qui pèsent de plus en plus sur l'écosystème. Aussi, des actions de sauvegarde de l'environnement et de sensibilisation des populations s'avèrent nécessaires pour lutter contre toute détérioration de notre environnement. Intégrer la dimension environnementale dans les stratégies de développement s'impose désormais comme une nécessité impérieuse.

L'inquiétude sur l'avenir de l'eau et des sols est souvent forte. Il est vrai que la dégradation de la qualité des eaux et des sols agricoles est due en premier lieu aux activités humaines. Les divers polluants qui les menacent ne cessent de susciter l'attention des scientifiques, des ingénieurs et tous les responsables soucieux de préserver l'environnement.

Les mutations industrielles, le développement économique, l'accroissement des populations ont une incidence très forte sur notre milieu terrestre et peuvent conduire à des bouleversements aux conséquences graves qu'il est urgent de comprendre, de prévoir et d'éviter.

Ce projet qui s'inscrit dans le cadre de la « dissémination des polluants minéraux autour d'un site minier en milieu aride » poursuit le même objectif : identifier les divers polluants qui pèsent sur un milieu aride qui sont générés par des exploitations minières, comprendre leur comportement, leurs formes de dispersions, en tenant compte de certains mécanismes morphogénétiques qui caractérisent ce milieu. Le but fixé, est de pouvoir tirer les conséquences et aider à la prise des décisions, permettant d'éloigner toute les menaces qui pèsent sur ce milieu.

DEUXIEME PARTIE

PRESENTATION DE LA ZONE ETUDIEE, DEFINITION DU TYPE DE CLIMAT, ELEMENTS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE ETUDIEE

CHAPITRE II : DEFINITION DU TYPE DE CLIMAT

CHAPITRE III : ELEMENTS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

CHAPITRE I

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

INTRODUCTION

Le bassin versant de l'oued Alougoum est une zone de refuge pour les hommes et les animaux, mais les sécheresses, la désertification, ont des conséquences sur son peuplement, son agriculture et son élevage. Au travers d'une région bien déterminée, les potentialités agricoles, le système de production animale, les zones de cultures potentiellement menacées par les effluents générés par les exploitations de cobalt de Bou-Azzer et la population qui en vit, sont examinés dans ce chapitre.

1.1. CADRE GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIF

La zone étudiée (Fig 2), comprend la boutonnière de Bou-Azzer qui loge les gisements de cobalt du District minier de Bou-Azzer, depuis Méchoui à l'Ouest jusqu'aux filons d'Ait Ahmane à l'Est. Vers le Sud, elle comprend la vallée de l'oued Alougoum, depuis Zaouit Sidi Blal jusqu'à la localité de Foum-Zguid. Cette zone est couverte en grande partie par le bassin versant de l'oued Alougoum. Ce bassin est situé dans l'Anti-Atlas central et fait partie du sous ensemble de Foum-Zguid, ensemble du Bas Drâa (Bani).

Administrativement, le bassin versant de l'oued Alougoum, comprend trois sous ensembles coiffés par trois provinces : le sous ensemble de Taznakht qui relève de la province de Ouarzazate et qui loge le gisement de Méchoui à l'Ouest jusqu'à Tamdrost à l'Est, le douar Tasstift constitue sa limite Sud ; le sous ensemble de Foum-Zguid qui regroupe les douars Foum-Eloued, Alougoum et la localité de Foum-Zguid et qui fait partie de la province de Tata ; enfin le sous ensemble de Zagora dont fait partie les gîtes et gisements situés entre d'Aghbar et les filons d'Ait Ahmane et qui relève de la province de Zagora.

1.2. RESEAU ROUTIER

Les secteurs étudiés sont desservis à partir de la localité de Taznakht, par la route secondaire N° 510 ; celle ci se ramifie à 25 km de Taznakht par deux chemins tertiaires, le premier relie la mine de Bleida à l'Est et les mines de Bou-Azzer à l'Ouest, le second (CT N° 6 810), relie plusieurs localités entre Taznakht et Foum-Zguid

1.3. POPULATION

La vallée de l'oued Alougoum, située en aval de la mine Bou-Azzer, constitue un véritable niche écologique et une zone de refuge pour une population estimée à 47 000 personnes (Recensement 1994, tableau 1). Cette vallée, est un exemple remarquable tant par la qualité de ses paysages, par sa faune et sa flore, que par la diversité des ses activités humaines. Ce patrimoine est aujourd'hui menacé par les effets des sécheresses, de la pression toujours plus forte des actions anthropiques sur le milieu et par le phénomène de la désertification. Ce phénomène est considéré aujourd'hui comme un des plus graves problèmes écologiques de la région.

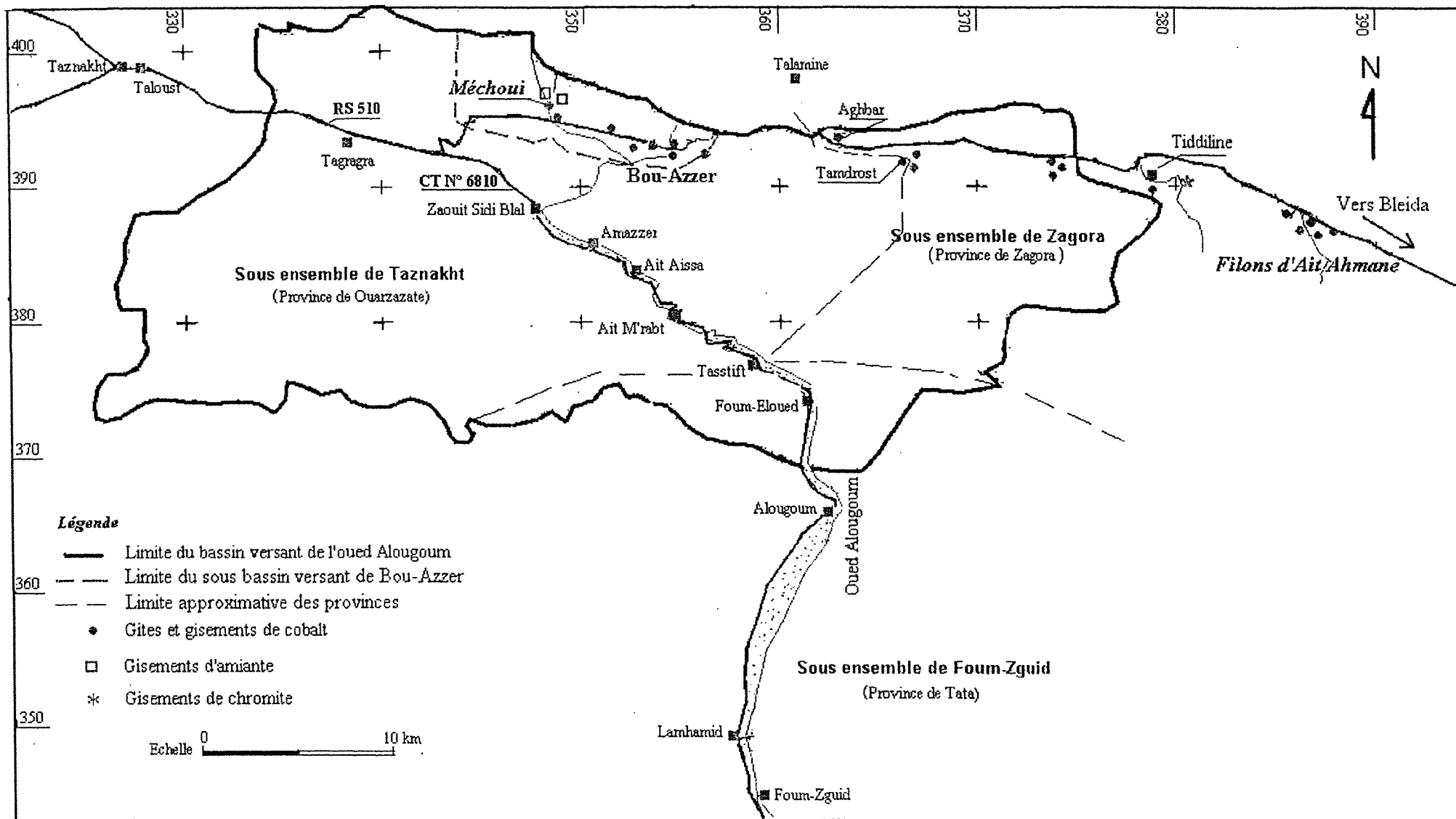


Fig 2 : Localisation de la zone étudiée : bassin versant de l'oued Alougoum.

Périmètres	Nombre d'habitants
Zaouit Sidi Blal	725
Amazzer	495
Ait M'rabt	225
Ait Aissa	281
Tasstift	585
Foum Eloued	689
Alougoum	1 403
Lamhamid + Foum-Zguid	42 900
Total	47 303

Tableau 1. Population installée le long de la vallée de l'oued Alougoum (recensement 1994), source : autorités locales de Taznakht et de Foum-Zguid.

1.4. LE MILIEU NATUREL

Le bassin hydrographique de l'oued Alougoum, constitue avec d'autres bassins de l'Anti-Atlas, un grand ensemble morphoclimatique où prédominent les actions mécaniques. La roche s'y présente à nue, soumise directement aux agents atmosphériques qui la sculptent, mettant en lumière les moindres différences lithologiques.

La structure se lit très bien dans le paysage, le relief y est généralement heurté, âpre, intensément buriné. Le matériel géologique apparaît à nu, les roches plus dures apparaissent sous la forme de corniches et de replats structuraux dont les dimensions peuvent descendre jusqu'au décimètre. Le sol végétal est complètement absent ou à peine discernable sauf dans quelques oasis et vallées où l'irrigation est possible. Il s'agit d'une région, où par suite de l'insuffisance des ressources en eau, la couverture végétale et les sols sont très réduits pour assurer une protection efficace de la roche contre l'érosion.

L'invasion de la zone par des dunes sahariennes, le rôle croissant dû à l'action des eaux de ruissellement, l'action déterminante des eaux courantes (crués), les sécheresses parfois prolongées, provoquent des dégâts assez importants : modification de l'écoulement des cours d'eau, assèchement des sols.

1.5. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

1.5.1. Bassin versant de l'oued Alougoum

Le bassin versant de l'oued Alougoum d'une superficie de 1 080 km² (Fig 3), draine une partie des eaux de l'Anti-Atlas central vers le Sud. L'oued Alougoum possède de nombreux d'affluants dont les principaux sont : Assif n'Talkhert, Assif Tagragra et Assif Bounou constitués eux même de beaucoup d'autres sous affluants. Ces oueds sont dans la plupart du temps à sec sauf en périodes pluvieuses, où l'on peut voir quelques petits écoulements superficiels.

L'oued Alougoum est caractérisé par des fortes pentes notamment, au niveau de la boutonnière de Bou-Azzer, ce qui permet un drainage parfait des eaux de pluie. Sur une longueur de talweg principal de 45 km entre la côte maximale du bassin versant (1 588 m) au niveau de Bou-Azzer et la côte de l'exutoire au niveau du village Alougoum (810 m), la pente moyenne est de 2 %. Au niveau du douar Foum-Eloued, il se forme une très puissante terrasse alluviale constituée de cailloux, graviers et sables. Au delà du village Alougoum, le lit de l'oued Alougoum, possède une largeur de plus de 200 m.

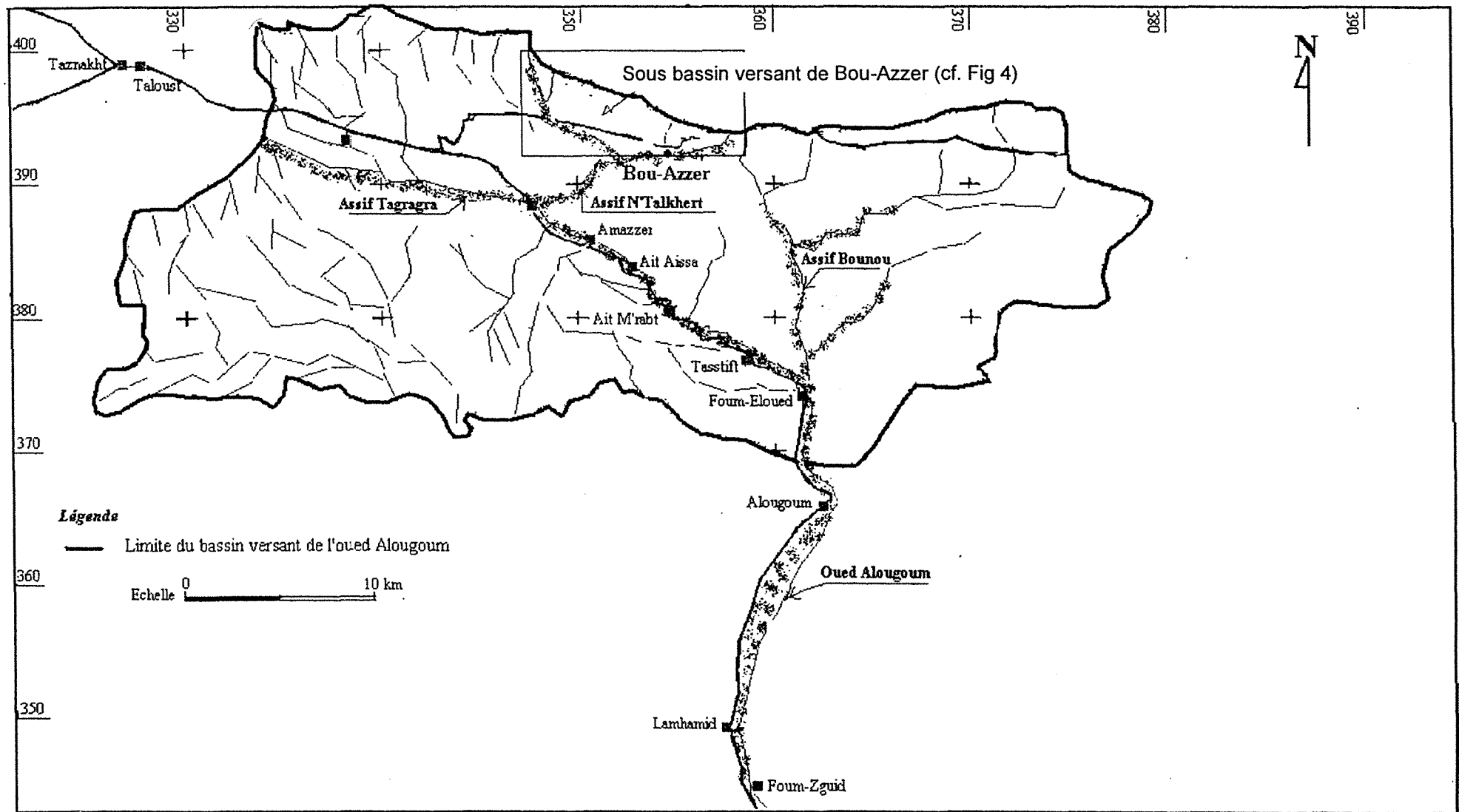


Fig 3 : Bassin versant de l'oued Alougoum : réseau hydrographique.

1.5.2. Sous bassin versant de Bou-Azzer

Le sous bassin versant de Bou-Azzer (Fig 4), a une superficie d'environ 41 km². Il est drainé dans sa totalité par deux oueds. Le plus important descend du Jbel Bou-Isguer (1 528 m), le deuxième vient du Nord Est et draine le site minier de Bou-Azzer. Ces deux oueds se rejoignent dans la retenue du barrage de Tizgui.

La pente moyenne entre la côte maximale (1 588 m) du sous bassin et la côte au niveau du barrage de Tizgui (1 234 m) est de l'ordre de 9 %. En raison à la fois de cette pente et de la violence du ruissellement, tous les produits érodés sont transférés vers la vallée de l'oued Alougoum par l'Assif n'Talkherte, via le barrage de Tizgui. En aval du barrage, la pente moyenne de l'Assif n'Talkherte jusqu'à son confluent avec l'oued Alougoum est encore forte (2,6 %).

Il convient de signaler que le sous bassin versant de Bou-Azzer regroupe toutes les infrastructures minières de Bou-Azzer en particulier, les unités de traitement de cobalt, d'argent et l'usine hydrométallurgique mise en service début 1996 et conçue pour la revalorisation des anciennes haldes de mines. De même tous les résidus de ces unités de traitement sont stockés sous forme de digues dans ce sous bassin qui constitue le berceau des principales crues de l'oued Alougoum.

1.6. LA COUVERTURE VEGETALE

Dans le bassin versant de l'oued Alougoum, les couches végétales sont très peu épaisses, sauf dans le fond de la vallée, où les dépôts limoneux supportent de petites palmeraies implantées sur des terres arables très peu développées. Le taux de couverture végétale varie de 5 à 10 %, ce qui ne permet pas d'assurer une protection efficace des sols contre l'érosion.

La végétation spontanée se limite à quelques plants épineux, bien qu'en hiver, il s'y forme des maigres herbages dans les creux de la vallée. On y trouve des gommiers épineux, des tamaris et des plants à chameaux du sahara.

En général, le caractère aride du climat, dû au pouvoir évaporant de l'air élevé, à l'alternance d'épisodes pluvieux courts et à des sécheresses prolongées ne permet pas à la végétation de rattraper le pas sur l'érosion.

1.7. PEDOLOGIE

Une étude pédologique a été menée dans le bassin versant de l'oued Alougoum et en dehors du bassin. Elle a pour but, d'évaluer le degré de contamination des sols cultivés, de bien distinguer la part de ce qui est contamination d'origine humaine (exploitations minières) et de ce qui résulte simplement d'une pollution d'origine naturelle.

Cette étude, porte sur 15 sites maintenus à des fins agricoles et a été réalisée durant les mois de Mai et Juin 1998. Elle montre l'existence d'un seul type de sol peu évolué d'apport alluvial, texture moyenne sans aucun facteur limitant, classe agronomique I. Il s'agit des sols des périmètres traditionnels cultivés depuis longtemps.

1.8. LES TECHNIQUES CULTURALES

Dans toute la vallée de l'oued Alougoum, les techniques culturales sont traditionnelles. Les labours sont effectués à l'araire ou la sape et rarement le tracteur. La fertilisation chimique est très peu utilisée, les agriculteurs se limitent à l'épandage du fumier et des engrais minéraux souvent en faible quantité ; le 14.28.14 comme engrais de fond (2 à 3 quintaux/ha), l'urée 46% en azote ou

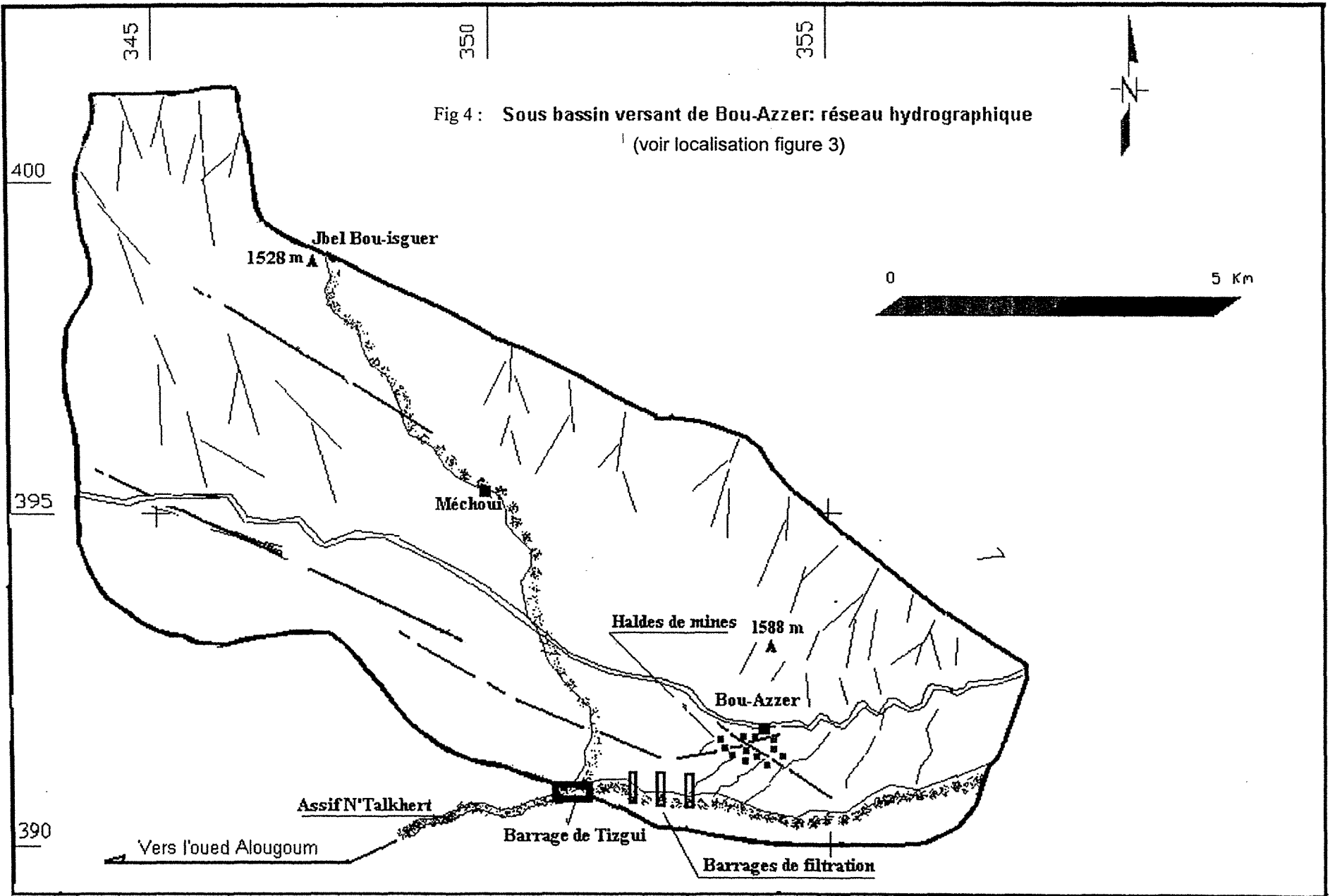


Fig 4 : Sous bassin versant de Bou-Azzer: réseau hydrographique
 (voir localisation figure 3)

ammonitrate 33,5 % (1 à 1,5 Qx/ha). Les agriculteurs procèdent à une pré-irrigation du sol avant les labours. L'installation de la luzerne et du henné demande des travaux du sol importants.

Pour le henné, le passage par le stade des pépinières est indispensable pour assurer la multiplication des plants. Aussi, il faut presque 8 à 10 m² de pépinière pour planter 1 hectare. Les agriculteurs prennent des plants soit de leurs récoltes, soit ils s'en approvisionnent de la vallée du Drâa (Zagora).

Pour l'entretien des cultures, le désherbage pour les céréales est uniquement pratiqué pour assurer une meilleure récolte. Tous les soins sont concentrés sur les cultures de henné particulièrement, le traitement contre les pucerons qui attaquent le feuillage. Concernant l'irrigation, les agriculteurs effectuent 5 irrigations pour les céréales, 20 pour la luzerne et plus de 30 pour le henné. Les récoltes sont effectuées à la faucille ; la luzerne offre 5 à 6 coupes par an, le henné en offre 3.

En général, les techniques culturales utilisées par les agriculteurs restent traditionnelles et font rarement recours aux facteurs d'amélioration de la production telles que les semences sélectionnées, engrais et les produits phytosanitaires. Cela est dû principalement à la faiblesse des revenus des agriculteurs.

1.9. LES SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLE

Les ressources en eau très faibles, sécheresses parfois prolongées, actions mécaniques et hydriques accentuées ; telles sont les conditions naturelles défavorables qui constituent une contrainte majeure à l'activité agricole dans le bassin versant de l'oued Alougoum.

Cette activité reste concentrer dans la vallée et concerne des espaces restreints et très localisés. Environ 99 % des surfaces utiles agricoles sont melkisées et les exploitations sont généralement de très petites tailles et ne dépassent guère 400 m². L'agriculture constitue l'activité économique de base pour plus de 90 % de la population. Elle est caractérisée par l'association des productions végétales et animales. Ces deux productions sont intimement liées et se complètent dans la plupart des exploitations.

Le système de culture est caractérisé par la pratique d'une agriculture en étage et par la prédominance de la céréaliculture, notamment, aux villages de Tasstift, Alougoum et Foum-Zguid. Celle ci est suivie par l'arboriculture fruitière et plus particulièrement, le palmier dattier et les cultures fourragères représentées essentiellement par la luzerne. On trouve également le henné, culture dite spéciale qui occupe des superficies réduites, mais, procurant tout de même des revenus substantiels aux producteurs .

Les terres collectives se situent à la périphérie des douars. Elles servent de parcours aux animaux, néanmoins, les communes rurales d'Alougoum, de Foum-Zguid et celle de Ouisselssat, rétrocèdent les terres collectives aux agriculteurs possédant les moyens techniques et financiers pour les cultiver. Les terres habous sont très peu fréquentes et ne représentent même pas 1 % de la superficie totale. La surface utile agricole (S.U.A) dans les périmètres étudiés est donnée par le tableau 2.

Périmètres	S.U.A. irriguée	S.U.A. bour
Zaouit Sidi Blal	30	-
Amazzer	25	-
Ait Aissa	20	-
Ait M'rabt	25	-
Tasstift	75	-
Foum Eloued + Alougoum	435	160
Lamhamid + Foum-Zguid	870	230
Total	1 480	390

Tableau 2. Surface utile agricole (S.U.A) en hectare dans la vallée de l'oued Alougoum (Source : CMV de Taznakht et de Foum-Zguid).

I.10. L'OCCUPATION DU SOL

Dans la vallée de l'oued Alougoum, aucune culture n'est possible sans irrigation. Toutes les cultures sont concentrées autour des points d'eau. Les différentes spéculations pratiquées sont :

I.10.1 Les céréalicultures

Les céréales occupent une place importante dans l'assolement, toutefois, leur importance, ainsi que les superficies d'une année à l'autre ne cessent de se dégrader à cause des conditions climatiques très accentuées. Les céréales portent sur l'orge, le blé dur et tendre, le maïs est cultivé enderobé dans les parcelles irriguées généralement par les groupes motopompes. Les céréalicultures couvrent une superficie d'environ 1 603 hectares (cf, tableau 3).

La production connaît les mêmes tendances que les superficies ; cela est dû à la dégradation de la structure des sols qui se répercutent sur les récoltes et les rendements.

Les rendements sont généralement trop faibles par manque de facteurs d'amélioration de la production (cf, tableau 4).

Périmètres	S.U.A	Céréale	luzerne
Zaouit Sidi Blal	30	20	10
Amazzer	25	20	5
Ait Aissa	20	15	5
Ait M'rabt	25	20	5
Tasstift + Talat	75	60	15
Foum-Eloued + Alougoum	595	550	45
Lamhamid + Foum-Zguid	1100	913	187
Total	1 870	1 603	267

Tableau 3. Surfaces occupées par les céréalicultures et les cultures fourragères dans la vallée de l'oued Alougoum (Source : CMV de Taznakht et de Foum-Zguid).

Spéculation	Unité	1980/1981	1995/1996
Blé dur	Quintaux /ha	12	-
Blé tendre	Quintaux /ha	14	30
Orge	Quintaux /ha	12	26
Maïs	Quintaux /ha	15	18
Luzerne	Quintaux /ha	400	116,5
Henné	Quintaux /ha	18	18,75
Palmier dattier	kg/Pied	28	40

Tableau 4. Rendement des différentes spéculations des surfaces utiles agricoles irriguées pour les campagnes 1980/1981 et 1995/1996 (Source : CMV de Taznakht et de Foum-Zguid).

1.10.2 Cultures fourragères

Elles sont constituées essentiellement de la luzerne. C'est la seule culture fourragère pratiquée dans toute la zone. Elle est localisée là où l'eau est assurée pendant toute l'année et occupe une surface d'environ 267 hectares. Cette culture a connu une régression importante de 71 % au niveau des rendements en passant de **400** quintaux par hectare en 1980/1981 à **116,5** quintaux par hectare en 1995/1996 (cf, tableau 4).

1.10.3. Cultures maraîchères

Elles sont pratiquées notamment sur de très faibles superficies, peu diversifiées et sont constituées de pommes de terre, fèves, carottes, navets, oignons pour l'autoconsommation.

1.10.4. Culture spéciale

Il s'agit du henné, on le trouve notamment dans les villages d'Alougoum, Lamhamid et Foum-Zguid, où d'assez grandes superficies lui sont réservées. Depuis quelques années, les agriculteurs entretenaient soigneusement la culture du henné et lui assuraient l'eau d'irrigation à toutes les périodes de l'année. Aujourd'hui, on constate une régression progressive de cette culture due en particulier aux problèmes d'écoulement et à la baisse des prix

1.10.5. L'arboriculture fruitière

L'arboriculture fruitière est pratiquée en fonction de la disponibilité en eau d'irrigation. Les effectifs des principales espèces qui existent dans la région sont récapitulées dans le tableau 5.

Périmètres	Palmier dattier	Amandier
Zaouit Sidi Blal	6 000	1 500
Amazzer	5 000	1 000
Ait Aissa	4 000	500
Ait M'rabt	6 000	-
Tasstift	10 000	2 000
Foum-Eloued	15 000	2 200
Alougoum	15 000	-
Commune rurale de Foum-Zguid	59 388	4 650
Total	120 388	11 850

Tableau 5. Arboriculture fruitière (nombre de pieds productifs :1995/1996) dans la vallée de l'oued Alougoum (Source : CMV, Taznakht et de Foum-Zguid).

Le système de culture pratiqué dans toute la zone se caractérise par la domination du palmier dattier qui se développe le long de la vallée et qui constitue la principale spéculation arboriculture et la principale source de revenu des agriculteurs. Cependant, cet arbre est menacé par une maladie cryptogamique appelée le bayoud qui avait déjà détruit une grande partie des palmeraies dans le Sud marocain. Le palmier dattier, présente de nombreuses variétés des dattes qui diffèrent tant au point de vue qualité que précocité et que valeur alimentaire ou commerciale.

Les principales espèces sont :

- le Bittole : il produit des dattes d'assez bonne qualité et représente près de 10 % du nombre total du palmier ;
- le Jihel : aussi d'assez bonne qualité, mais celui ci demeure sensible à la maladie de bayoud, il représente également 10 % de l'effectif total ;
- le Sair : c'est un mélange de qualité médiocre qui résiste à la maladie de bayoud et qui représente près de 50 % du nombre total de palmier dans la zone ;
- le Libas ou le bousthami : de qualité meilleure que celle du Sair. Il résiste à la maladie du bayoud et représente près de 15 % du nombre total des palmiers.

Malheureusement, la plupart de ces variétés sont attaquées par le bayoud. Il s'agit d'une moisissure qui provoque l'asphyxie de l'arbre et entraîne la destruction de celui ci . La consommation des dattes est importante, ce qui situe la valeur de primauté du palmier dattier dans l'économie de l'agriculteur dans cette zone. En plus de son utilité alimentaire, le palmier sert à d'autres fins ; le tronc de l'arbre est utilisé dans les charpentes des maisons, des petits ponts et pour la menuiserie. Les palmiers peuvent tout aussi bien servir à faire des haies de protecteur, que des nattes de cordes, des récipients et même des objets décoratifs. **Le bétail profite des dattes tombées et de farine faite avec les noyaux écrasés.**

1.11. DONNEES SUR LES PARCOURS

Les parcours en aval du District minier de Bou-Azzer sont assez importants. Cependant, leur production fourragère reste très faible par rapport aux autres parcours de montagnes, de plaines ou de plateaux . La pluviométrie moyenne annuelle ne dépasse guère 100 mm. Ceci se répercute sur la végétation et le milieu écologique en général. Ce sont des parcours que l'on peut dénommer présahariens et qui sont caractérisés par une végétation très dominée par *Acacia radiana*, *Atryplex Hlimus* et autres espèces épineuses. Les zones d'épandage de crues sont généralement riches en espèces désirables, telles que *Sisola vermiculata* et autres légumineuses . Ce sont les caprins et les camelins qui utilisent principalement ces parcours, cependant, en bonne année, on assiste à la transhumance des ovins à partir du mois de Mars jusqu'à la fin du printemps.

1.12. LE SYSTEME DE PRODUCTION ANIMALE

Dans la vallée d'Alougoum, l'élevage constitue une activité limitée. Toutefois, il contribue à l'autosuffisance alimentaire et à l'amélioration des revenus des agriculteurs. Depuis peu de temps, l'élevage a constitué une activité privilégiée de la population. Les éleveurs étaient tous des nomades, ils remontaient au Nord jusqu'aux parcours de Taznakht et redescendent vers le Jbel Saghro. Actuellement, l'élevage transhumant n'existe presque plus dans la région. Il a été remplacé par l'élevage sédentaire associé à la production végétale. Cette situation résulte d'un certains nombre de problème, dont en particulier, la succession de plusieurs années de sécheresses prolongées, qui ont frappé la région ces dernières années. Ces sécheresses ont provoqué la disparition des points d'eau au niveau des parcours. Ainsi, la plupart des agriculteurs ont abandonné l'élevage des parcours au

au niveau des parcours. Ainsi, la plupart des agriculteurs ont abandonné l'élevage des parcours au profit d'un petit troupeau des ovins et des bovins dont le nombre varie selon les moyens financiers de l'agriculteur.

La régression de l'élevage transhumant se traduit également par le développement de l'irrigation par des groupes motopompes dans les palmeraies d'une part, d'autre part par l'exhaude rurale de plusieurs jeunes qui migrent vers les villes du pays pour la recherche d'un emploi plus stable, bénéfique et plus rentable. Selon l'enquête effectuée au centre de mise en valeur (C.M.V) de Taznakht et de Foum-Zguid, la répartition des troupeaux dans la zone étudiée est récapitulée dans le tableau 6.

Périmètres	Bovins	Ovins	Caprins
Zaouit Sidi Blal	30	200	3 800
Amazzer	-	50	400
Ait Aissa	10	50	400
Ait M'rabt	10	40	350
Tasstift	15	50	650
Foum-Eloued + Alougoum	300	1 200	1 500
Commune rurale de Foum-Zguid	455	5 400	2 900
Total	820	6 990	10 000

Tableau 6. Répartition des troupeaux dans la vallée de l'oued Alougoum (1995/1996) , source : CMV de Taznakht et de Foum-Zguid.

1.13. CONCLUSION

La vallée de l'oued Alougoum est une zone de refuge. Sur le plan humain en premier lieu, puisqu'elle abrite plus de 47 000 personnes, ensuite sur le plan agricole, car on y trouve des potentialités en terres cultivable non négligeables évaluées à 1 870 hectares dont 1 480 ha irrigués et plus de 400 hectares en bour. Ces espaces agricoles, jouent un rôle vital à divers niveaux de l'économie de la population.

Le système de culture en usage est caractérisé par l'association des productions végétales et animales. Celles-ci sont intimement liées et se complètent dans la majorité des exploitations. Les cultures portent sur les céréales (principalement l'orge) pour l'alimentation de la famille et du chaptel, la luzerne pour les besoins du bétail, le henné comme culture de rente et quelques maraîchères et arboriculture pour l'autoconsommation.

Le palmier dattier constitue la principale espèce arboriculture de la vallée. Cependant, cette espèce est menacée par le bayoud qui avait déjà détruit un grand nombre de pieds productifs. Les niveaux de production ainsi que les rendements des différentes cultures sont faibles en raison notamment, de la faiblesse des ressources en eau, des techniques culturales traditionnelles, d'une fertilisation chimique très peu utilisée et des revenus faibles de la population.

En plus de ces contraintes majeures, la vallée de l'oued Alougoum est soumise comme nous le verrons au cours de cette étude aux risques potentiels de pollution en arsenic, cobalt et nickel, provenant d'une part, des exploitations actuelles et anciennes de Bou-Azzer et des roches en places (serpentes) d'autre part.

Cette pollution pourrait être influente dans un rayon d'action par le biais des eaux de ruissellement et pourrait ainsi présenter un risque de contamination des écosystèmes, et par là, un risque potentiel pour la santé humaine à travers la chaîne alimentaire.

Il y a lieu de retenir que les zones de cultures potentiellement menacées sont estimées à **1 870** hectares et la population qui en vit dépasse **47 000** personnes.

CHAPITRE II

DEFINITION DU TYPE DE CLIMAT

INTRODUCTION

Le bassin versant de l'oued Alougoum, se place dans une position géographique qui le met à l'ombre des pluies. C'est le moins arrosé des bassins versant de l'Anti-Atlas. Avec une pluviométrie moyenne qui ne dépasse pas 100 mm/an, des températures de l'air plus accentuées, des déficits de saturation élevés qui se répercutent sur les récoltes et les rendements, des ressources en eau faibles, de la pression anthropique sur un milieu montagnard aride ; telles sont les contraintes majeures au développement économique de la zone.

Au travers d'une région réputée par des sécheresses prolongées, le rôle des déficits pluviométriques répétés, le degré d'aridité, la définition du type de climat et son rôle dans la dispersion des polluants minéraux, générés par l'activité minière de cobalt de Bou-Azzer seront traités dans ce chapitre.

II.1. CLIMATOLOGIE

II.1.1. Pluviométrie

II.1.1.1. Pluviométrie annuelle

L'évaluation des paramètres climatiques dans le bassin versant de l'oued Alougoum, a été particulièrement difficile, à cause du manque de données pluviométriques et climatiques. Il n'existe aucun poste météorologique, ni de station hydrologique dans ce bassin ; cela veut dire que pour pouvoir caractériser le climat de la zone étudiée, il fallait exploiter des données appropriées relatives à d'autres postes très proches ou situés dans le même contexte naturel.

L'analyse de l'évolution pluviositaire doit donc être complétée nécessairement par la consultation des relevés des postes périphériques. Il s'agit en particulier, du poste de Taznakht situé à 26 kilomètres au NW du centre du bassin, du poste de Foum-Zguid situé à 40 km au Sud et celui de Zagora à 100 km à l'Est.

Les moyennes annuelles sont de : 87 mm à Foum-Zguid pour la période 1936-1964 (cf, annexe 1, tableau 7) ; 66 mm à Zagora, 1931-1995 (cf, annexe 1, tableau 8) et 125 mm à Taznakht, 1974-1996 (cf, annexe 1, tableau 9).

La figure 5, correspond à la carte des précipitations de la zone étudiée. Ces précipitations décroissent du Nord vers le Sud et de l'Ouest vers l'Est. Le bassin versant de Taznakht est nettement mieux arrosé que le bassin versant de l'oued Alougoum. Les parties les plus élevées de l'Anti-Atlas entre Taznakht et Bou-Azzer, reçoivent en moyenne 85 à 120 mm de pluie annuelle.

La figure 6, illustre l'évolution de la pluviométrie annuelle dans le bassin versant de l'oued Alougoum pour la période 1936 - 1995. Les pluies annuelles ont été calculées par interpolation aux distances entre le centre du bassin et les postes de Zagora, Foum-Zguid et Assaka. Les principaux traits caractéristiques de la fluctuation pluviométrique, se résument comme suit :

1. 1936-1954 : durant cette période de 19 ans, la moyenne pluviométrique est estimée à 66 mm. Il s'agit d' une série d'années sèches ayant entraîné des effets défavorables sur l'alimentation en eau et la production agricole.

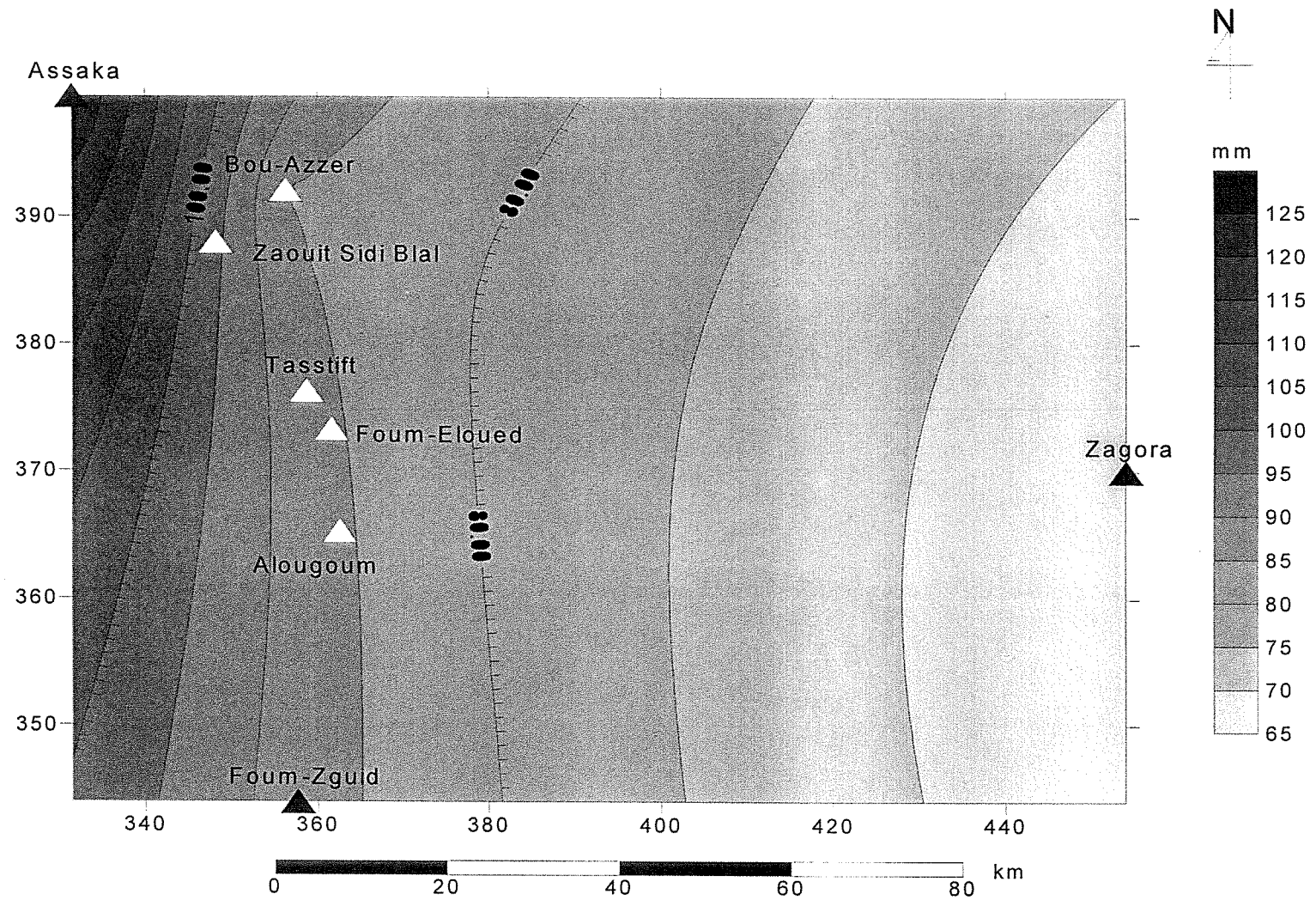


Fig 5. Carte des précipitations de la zone étudiée: périodes d'observation, Zagora (1931-1995), Assaka (1974-1996), Foug-Zguid (1936-1994).

2. 1954/1955, 1955/1956 et 1979/1980 : ce sont des années humides qui ont connu une pluviométrie annuelle exceptionnelle, respectivement de 334 mm, 224 mm et 209 mm, jamais enregistrée dans le bassin depuis ces dates. C'est au mois de Novembre 1954 que des pluies diluviennes de l'ordre de 302 mm ont touché le bassin versant de l'oued Alougoum.

3. 1981-1984 et 1985-1987 : il s'agit de deux périodes de sécheresses très accentuées, avec des moyennes annuelles évaluées respectivement à 34 mm et 32 mm.

D'importants renseignements qualitatifs sur l'évolution du climat au cours du siècle actuel ont été obtenus en interrogeant la population locale et en particulier les personnes âgées. Les informations obtenues, concernent surtout les périodes de sécheresses qui ont laissé plus de trace dans la mémoire des gens que les années pluvieuses. Les précisions chronologiques, peuvent souvent être améliorées par des questions concernant les durées de tarissement des sols pendant lesquelles, l'oued Alougoum est resté sans écoulement.

Par manque de données plus fiables et plus représentatives, on peut se contenter des valeurs moyennes annuelles de 83 mm pour l'ensemble du bassin versant de l'oued Alougoum et 84 mm pour le sous bassin versant de Bou-Azzer.

II.1.1.2. Pluviométrie mensuelle

Dans le tableau 10, annexe 1, sont représentées les pluies moyennes mensuelles. L'examen de la figure 7, montre que les précipitations pour la période 1975-1995, conservent une relative régularité. Elles se produisent à certains moments de l'année, les mêmes d'une année à l'autre, bref, elles suivent un régime : maxima et minima s'y placent aux mêmes périodes de l'année. La saison des pluies se place toujours d'Octobre à Décembre inclus. Ces mois reçoivent en moyenne 14,38 mm/an et contribuent pour 50 % du total annuel. En contre partie, les mois secs, Mai à Août, ne bénéficient que de 1,61 mm en moyenne par an.

Le régime des pluies, présente donc deux saisons humides :

- l'automne qui contribue pour 50 % de la pluie annuelle ;
- l'hiver qui participe pour 27 % de la pluie annuelle ;
- le printemps moins humide 11% ;
- l'été 12 %.

Si les moyennes pluviométriques mensuelles paraissent relativement faibles, le bassin versant de l'oued Alougoum, connaît parfois des crues à caractère violent qui se trouvent amplifier par la raideur des pentes et l'absence du couvert végétal. Ces crues se produisent surtout pendant les mois secs et sont déclenchées par des averses étalées sur quelques heures moyennant des débits de crue qui peuvent dépasser 100 m³/s.

Dans un tel type de climat, les moyennes mensuelles ont bien peu de signification, car on peut trouver des mois pluvieux sans précipitations et des mois où les averses viennent gonfler les moyennes mensuelles. Les alternances de ces divers types de périodes sont souvent compliquées et ne semblent pas obéir, après des observations de longues durées, à une loi statistique. Les averses gonflent donc les moyennes pluviométriques sans profiter à la végétation, tandis que la sécheresse prolongée limite la densité de la couverture végétale en éliminant toutes les plantes vivaces qui ne peuvent les supporter.

En d'autre terme, ce régime ne profite pas aux plantes. Il ne permet pas le développement d'une couverture végétale fermée, car l'eau des pluies n'est pas à la portée des racines.

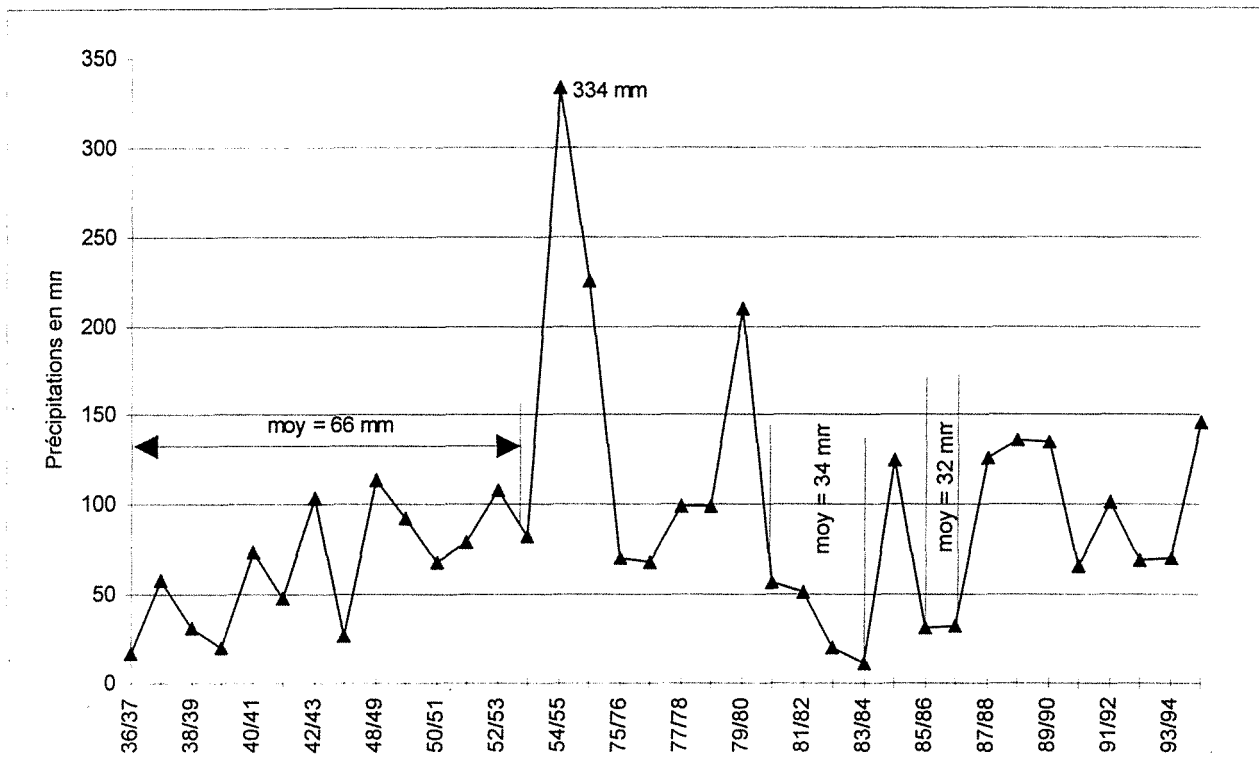


Fig 6. Chronique des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1936-1995).

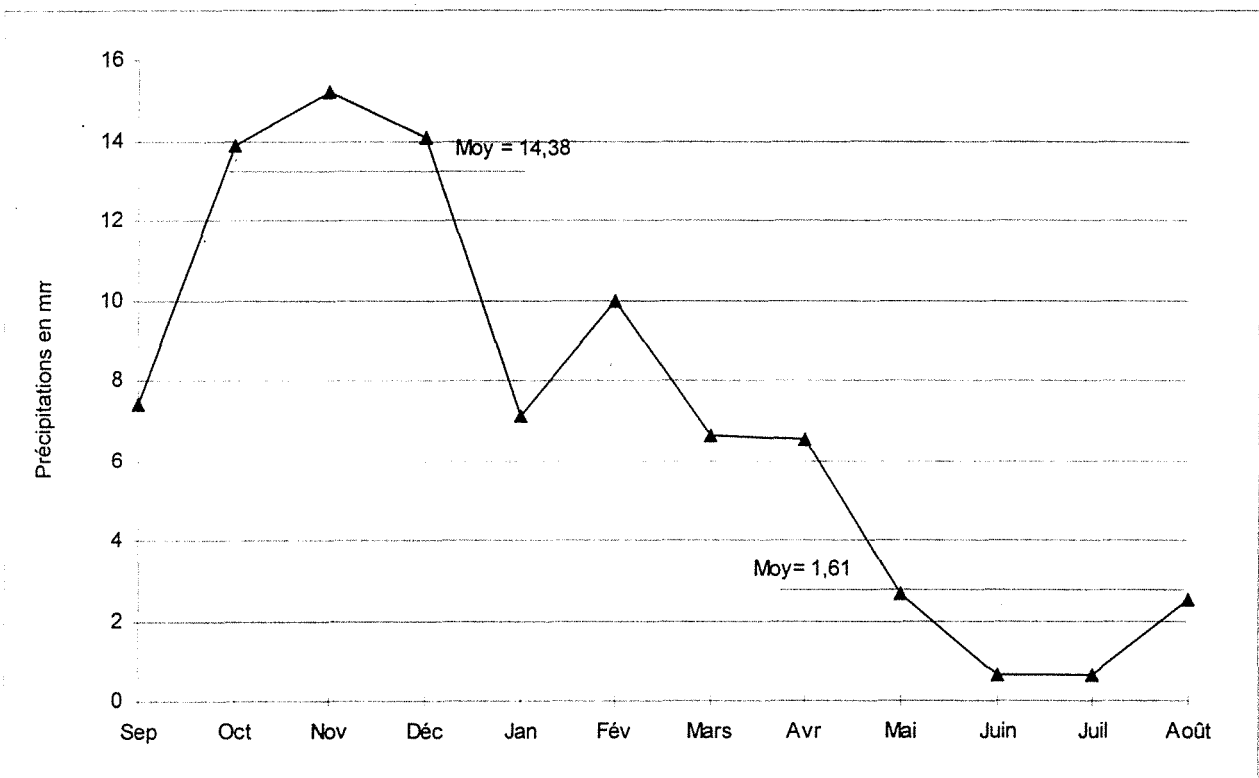


Fig 7. Evolution des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1975-1995).

Elle ne pénètre pas dans le sol à cause des influences lithologiques particulières, qui empêchent une alimentation correcte en eau des plantes et qui favorisent le ruissellement et l'érosion.

La dernière averse enregistrée au poste de Taznakht et qui a touché le bassin versant de l'oued Alougoum, date du 23 et 24 Août 1997, avec une pluviométrie exceptionnelle élevée à 40 mm étalée sur 2 heures. Elle a fait des dégâts importants pour le chemin tertiaire N° 6 810 reliant plusieurs localités entre Taznakht et Foum-Zguid.

Ces averses, peuvent participer aux transferts des haldes de mines (rejets fins inférieurs à 100 µm) hors du sous bassin versant de Bou-Azzer. En effet, l'effondrement de l'ancienne digue des sulfures de Bleida, dont on observe encore aujourd'hui des traces sur plus de 40 km, le long de l'oued Alougoum est du à une forte averse survenue en 1984/1995. En général, ces averses, provoquent des modifications profondes du milieu écologique et des comportements nouveaux dans l'utilisation des ressources naturelles dans la vallée de l'oued Alougoum.

II.1.2. Température de l'air

Les températures de l'air ont été estimées à partir des postes voisins exploités pour la pluviométrie. La température moyenne mensuelle dans le bassin versant de l'oued Alougoum, a été calculée comme étant égale à la moyenne pondérée des températures moyennes mensuelles aux postes de Zagora (cf, tableau 11, annexe 1), Foum-Zguid (cf, tableau 12, annexe 1) et Assaka (cf, tableau 13, Annexe 1).

La figure 8, illustre l'évolution des températures moyennes mensuelles maximales et minimales absolues dans le bassin versant de l'oued Alougoum pour la période 1975-1995. On observe des valeurs de températures très élevées : Juin, Max (38°C), Min (17,8 °C) ; Juillet, Max (41,6 °C), Min (20,8 °C) ; Août, Max (40,9 °C), Min (21°C). En effet, même aux mois pluvieux de l'année (Octobre, Novembre et Décembre), les températures sont très prononcées : 30,7 °C (Octobre) ; 25,5 °C (Novembre) ; 21,6 °C (Décembre).

La figure 9, met en relief l'évolution des températures moyennes mensuelles pour la période 1975-1995. Les mois les plus chauds, se placent aux mêmes périodes de l'année. C'est aux mois de Juillet et Août que les températures moyennes deviennent plus élevées, avec des valeurs qui dépassent 30 °C.

Dans les figures 10 et 11, où sont représentés respectivement les diagrammes ombothermiques du bassin versant de l'oued Alougoum et du sous bassin versant de Bou-Azzer, on constate que seuls les mois de Novembre et Décembre sont humides, alors que le reste de l'année est sec. Ceci montre bien l'aridité prononcée du milieu, qui se manifeste par des sécheresses prolongées et parfois durables. En réalité, il n'y a pas de mois humides, mais seulement des jours humides, ceux où se produisent des précipitations importantes.

La végétation ne dispose que de l'apport fugitif des rares jours de pluie, dont une bonne partie est d'ailleurs dilapidée par ruissellement et évaporation immédiate. La couverture végétale est réfugiée dans la vallée, les petits oasis et aucune culture n'est possible sans irrigation. L'eau qui s'infiltré dans le sol ne donne pas même des nappes temporaires mais seulement une humidité temporaire, vite éliminée par l'évaporation dans le sol même.

II.1.3. Estimation de l'évaporation potentielle

Faute de trouver des données relatives à l'évaporation potentielle pour le bassin étudié, nous avons exploité les données des postes de Zagora et Taznakht. Pour le poste de Taznakht, les éléments ont été recueillis dans la note relative à l'étude de mise en valeur et équipement des périmètres de Tikhirt et de Taghdoute (1971). Concernant le poste de Zagora, on dispose des

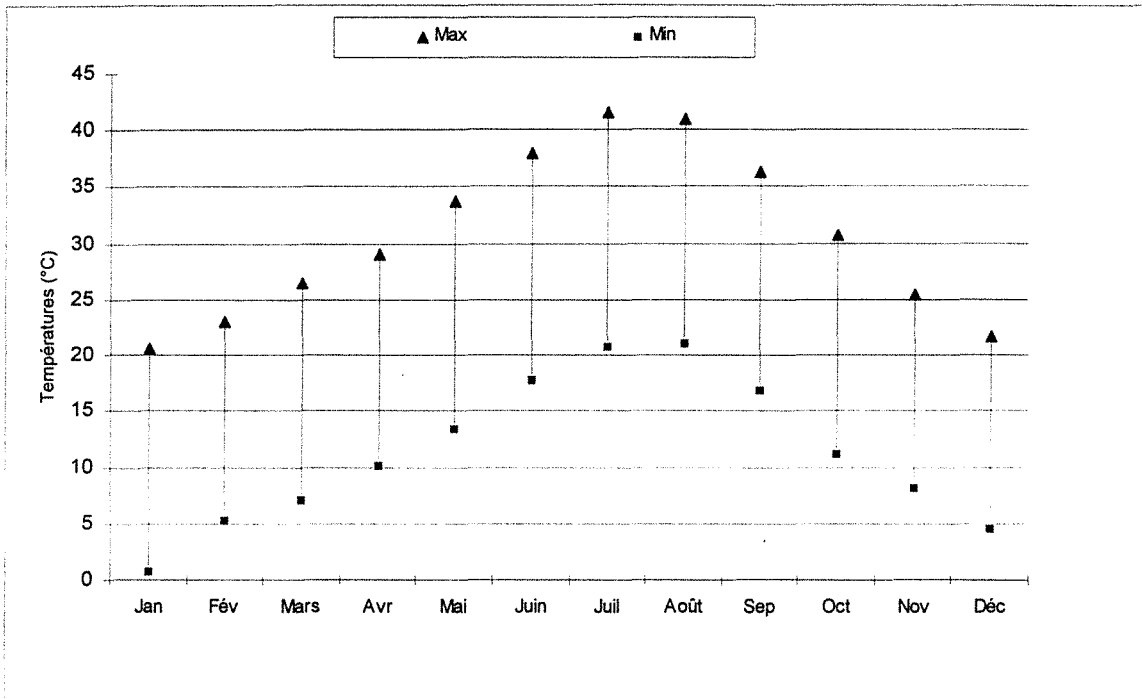


Fig 8. Evolution des températures moyennes maximales et minimales absolues mensuelles dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1975-1995).

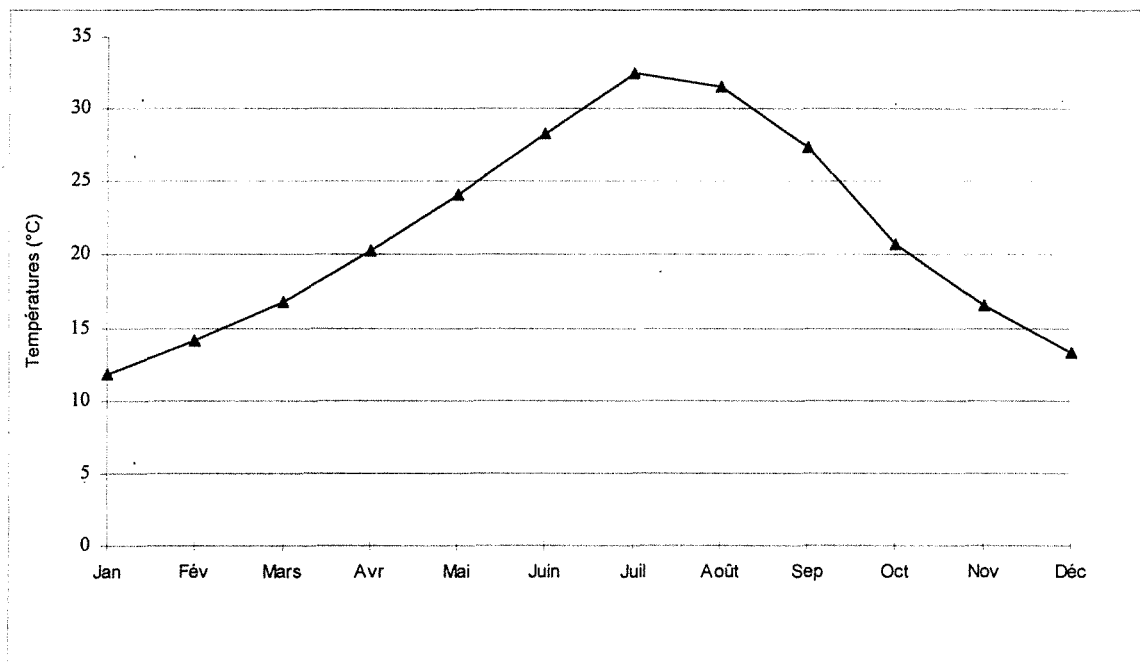


Fig 9. Evolution des températures moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1975-1995).

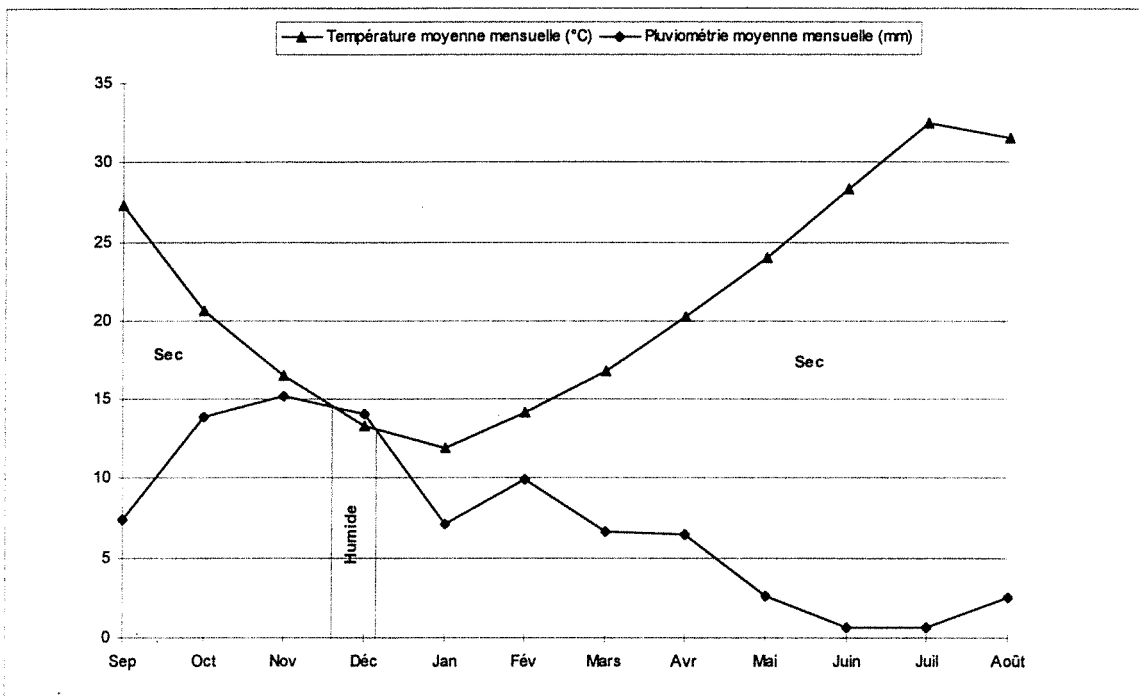


Fig 10. Diagramme ombothermique (Goussen) du bassin versant de l'oued Alougoum (1975-1995).

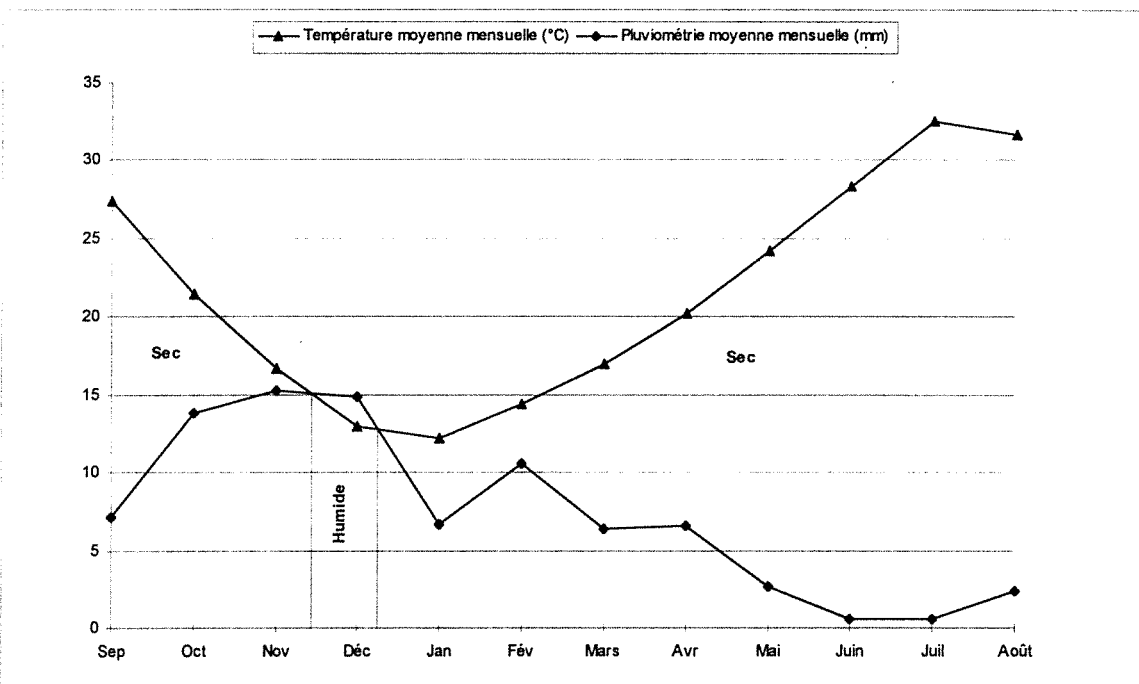


Fig 11. Diagramme ombothermique (Goussen) du sous bassin versant de Bou-Azzer (1975-1995).

données relatives à l'évaporation potentielle pour la période 1984-1994. La valeur probable de l'évaporation potentielle annuelle moyenne calculée proportionnellement aux distances entre le centre du bassin et les postes météorologiques précités est estimée à **4 620 mm/an** et le déficit annuel moyen est de **4 531 mm/an**.

Dans le sous bassin versant de Bou-Azzer, l'évaporation potentielle moyenne annuelle est de **4 665 mm** et le déficit annuel moyen s'élève à **4 576 mm**.

II.2. DEGRE D'ARIDITE

Le degré d'aridité dans le bassin étudié, peut être défini à l'aide des formules préconisées par E. de MARTONNE (1935) ; C.W. THORNTHWAITE (1948) et R. CAPOT REY (1951).

- formule de E. de MARTONNE (1935)

Cette formule est fondée sur les précipitations et la température. Elle est désignée par son auteur sous le nom d'indice d'aridité alors qu'il s'agit, en fait, d'un indice d'humidité croissant avec l'humidité et diminuant avec l'aridité.

$$\frac{P}{T + 10} \text{ pour l'année ou } \frac{12 p}{t + 10} \text{ pour un mois déterminé}$$

Où : T est la moyenne annuelle des températures ;
t est la moyenne mensuelle des températures ;
P le total pluviométrique annuel ;
p le total pluviométrique mensuel.

La formule peut se calculer aussi bien pour les moyennes annuelles que pour un mois déterminé ou même un trimestre ou toute autre période. On peut introduire un élément saisonnier dans le calcul de l'indice en faisant la moyenne arithmétique entre l'indice annuel et celui du mois le plus sec.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{P}{T + 10} + \frac{12p}{t + 10} \right)$$

- formule de C.W. THORNTHWAITE (1948)

Cette formule est fondée sur les précipitations et l'évaporation. C.W. THORNTHWAITE, a introduit dans sa formule la notion d'évapotranspiration, englobant toutes les formes de pertes d'humidité s'exerçant sur le sol (évaporation physique, consommation biologique). Il a mis au point une méthode de calcul empirique de l'évapotranspiration potentielle, c'est-à-dire de la quantité d'humidité qui serait dissipée sous tel ou tel climat. Pour l'année, on fait la somme des valeurs mensuelles de :

l'évaporation potentielle	E		$\frac{S - 0,6 D}{E}$	X 100
des divers déficits mensuels	D	et on calcule		
des divers surplus mensuels	S			

qui est l'indice d'humidité annuel.

- formule de R. CAPOT- REY (1951)

Cette formule s'appuie également sur les précipitations et l'évaporation. R.CAPOT - REY a préconisé cette formule en faisant intervenir l'écart entre le rapport précipitation - évaporation annuelle et celui du mois le plus humide :

$$\frac{1}{2} \left(\frac{100 P}{E} + \frac{12p}{e} \right)$$

p = précipitation du mois le plus humide

e = évaporation du mois le plus humide

Les valeurs de degré d'aridité annuel et de l'indice d'humidité annuel dans le bassin versant de l'oued Alougoum et dans le sous bassin versant de Bou-Azzer, obtenues par les trois formules précédentes sont représentées dans le tableau 14.

	Bassin versant de l'oued Alougoum	Sous bassin versant de Bou-Azzer
Degré d'aridité (E. de Martonne ,1935)	2,64	2,62
Indice d'humidité (C.W. Thornthwaite, 1948)	-59	-59
Indice d'humidité (R. Capot Rey, 1951)	1,26	1,26

Tableau 14. Degré d'aridité et indice d'humidité annuel dans le bassin versant de l'oued Alougoum et le sous bassin versant de Bou-Azzer (1975-1995).

Indices	semi-aride	Aride	hyperaride
E. de Martonne (1935)	10	5	
C.W. Thornthwaite (1948)	- 20	- 40	- 57
R. Capot-Rey (1951)	?	5	0,3
H. Gaussen (1952)	100	290	350

Tableau 15. Limites climatiques des subdivisions des régions sèches , d'après F. Joly (1957)

Le tableau 15, représente les limites climatiques des subdivisions des régions sèches, d'après F. Joly (157). La confrontation des tableaux 14 et 15, montre que le bassin versant de l'oued Alougoum est placé dans une région sèche, sous un climat hyperaride.

En examinant les figures 12 et 13, on constate que ce bassin, se place dans une position géographique très semblable aux bassins de Zagora et de Foum-Zguid. Ces trois bassins bénéficient d'un régime des pluies similaires. Par contre, le bassin versant de Taznakht est situé dans un contexte géographique bien particulier à climat aride.

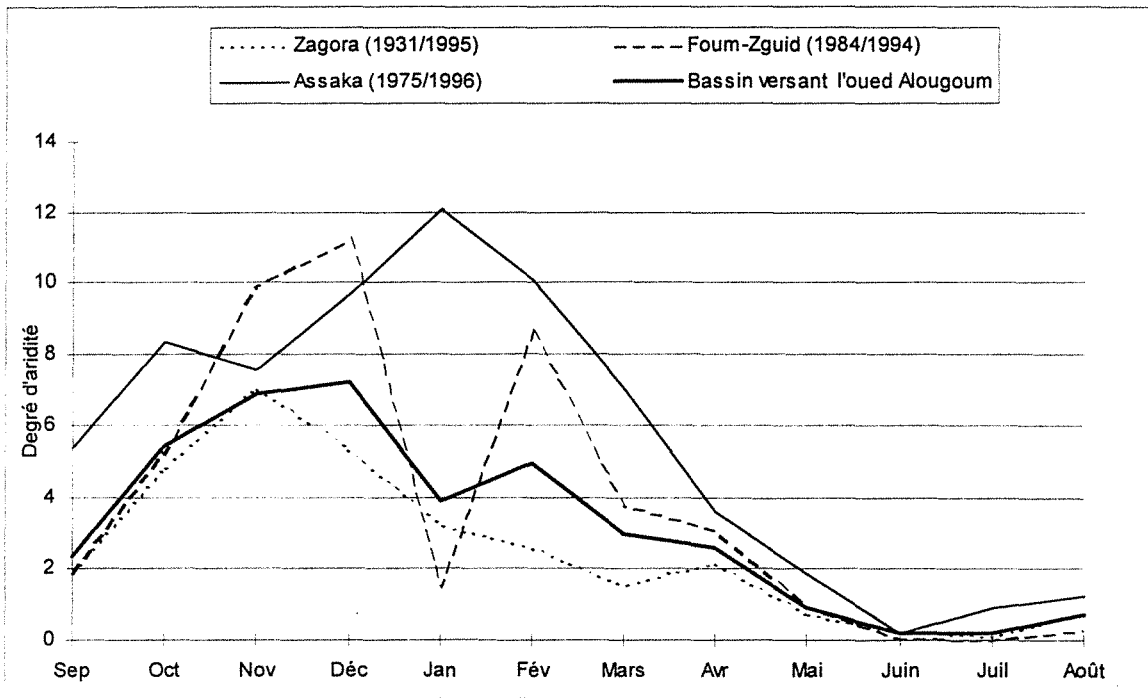


Fig 12. Comparaison de degré d'aridité mensuel du bassin versant de l'oued Alougoum à celui des bassins versant de Zagora, Foum-Zguid et Taznakht.

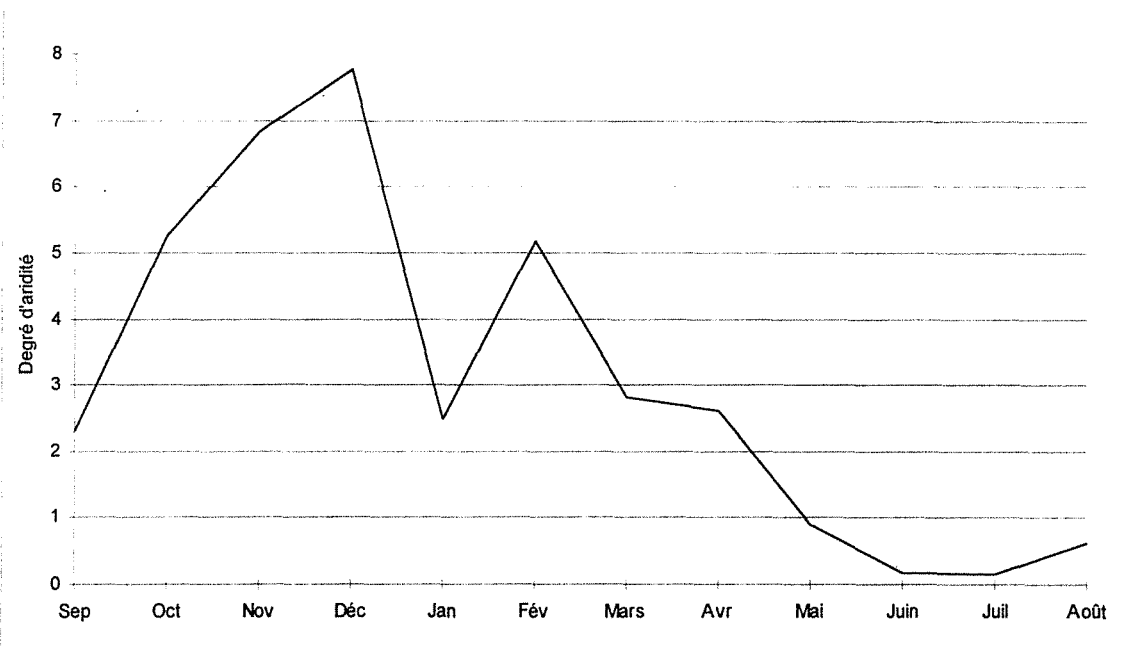


Fig 13. Evolution du degré d'aridité mensuel dans le sous bassin versant de Bou-Azzer (1975-1995).

La faiblesse de l'indice d'humidité, se traduit donc par une faible humidité relative (rapport entre l'humidité absolue et la pression de vapeur d'eau qui serait nécessaire pour saturer l'atmosphère à la même température). Ceci s'explique par des déficits de saturation élevés (différence entre l'humidité relative et la saturation, soit 100 %), donc par une forte évaporation (l'intensité de l'évaporation est proportionnelle au déficit de saturation, toutes choses égales d'ailleurs).

La figure 14, donne à titre d'exemple les variations de l'évaporation potentielle moyenne mensuelle en fonction de la température moyenne mensuelle dans le bassin versant de l'oued Alougoum. L'allure de la courbe, montre clairement l'influence du stockage de la chaleur dans les couches du sol. En effet, pour une même température moyenne mensuelle, l'évaporation est nettement plus faible en Avril qu'en Octobre. On observe des valeurs maximales aux mois de Juillet (552 mm) et Août (595 mm), contre un déficit moyen mensuel respectivement de 551 mm et 592 mm. Même aux mois pluvieux de l'année, l'évaporation potentielle moyenne mensuelle est très élevée et atteint des valeurs de 453 mm (Octobre), 253 mm (Novembre) et 169 mm (Décembre).

Dans la vallée de l'oued Alougoum, ce fait a une grande importance hydrologique. En effet, en l'absence de réalimentation soit par l'eau des couches plus profondes, soit par l'eau des précipitations, l'évaporation provoque la diminution progressive de l'humidité dans les couches superficielles des sols et enfin leur assèchement à peu près total. Par conséquent, les eaux chargées en éléments polluants, provenant des exploitations de cobalt de Bou-Azzer qui s'infiltrent dans le sol mais qui restent près de la surface, les eaux superficielles sont soumises à une intense et rapide évaporation qui les fait rapidement disparaître. En particulier, le sol, reste peu de temps humide. Il sèche très rapidement même après les grosses averses. Ainsi, les polluants minéraux, susceptibles d'être véhiculés par les eaux de ruissellement, à partir du District minier de Bou-Azzer, auront tendance à s'accumuler dans les horizons de surface des sols.

Les eaux qui s'étalent sur des sols ayant une texture limoneuse ou limono-sableuse n'alimentent pas les nappes. L'eau ne mouille le matériel qu'à quelques mètres de profondeur durant la crue, toujours courte, et remonte en surface ensuite sous l'effet de l'évaporation. De telles conditions sont généralement propices à la précipitation des sels dissous. Au contraire, les eaux chargées qui s'infiltrent dans les sols à prédominance de cailloux et de sables, ont le temps de s'infiltrer et alimentent les nappes (l'étude pédologique des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum, sera traitée un peu plus loin et permettra d'apprécier l'évolution des teneurs en éléments traces dans les couches du sol).

Au niveau du sous bassin versant de Bou-Azzer, ces fortes évaporations ont pour conséquences les faits suivants : d'une part, elles tendent à diminuer l'humidité des couches superficielles des digues et provoquent corrélativement un mouvement ascendant de l'eau éventuellement emmagasinée dans les couches sous-jacentes, ainsi appelées à réapprovisionner la couche superficielle et à alimenter l'évaporation ; d'autre part, elles augmentent le pouvoir évaporant de l'air et déclenchent ainsi, des vents violents susceptibles de déplacer des quantités considérables de rejets arséniés fins hors du sous bassin. Ce phénomène est fonction de degré de sécheresse et devrait être maximum en été et au printemps. .

Dans les tableaux 16 et 17, sont résumés tous les paramètres climatiques du bassin versant de l'oued Alougoum et du sous bassin versant de Bou-Azzer. Ces paramètres estimés à partir des postes météorologiques limitrophes à la zone étudiée concernent :

- les températures moyennes mensuelles ;
- les précipitations moyennes mensuelles ;
- le degré d'aridité mensuel ;
- l'indice d'humidité annuel ;
- l'évaporation moyenne mensuelle ;
- le déficit moyen mensuel.

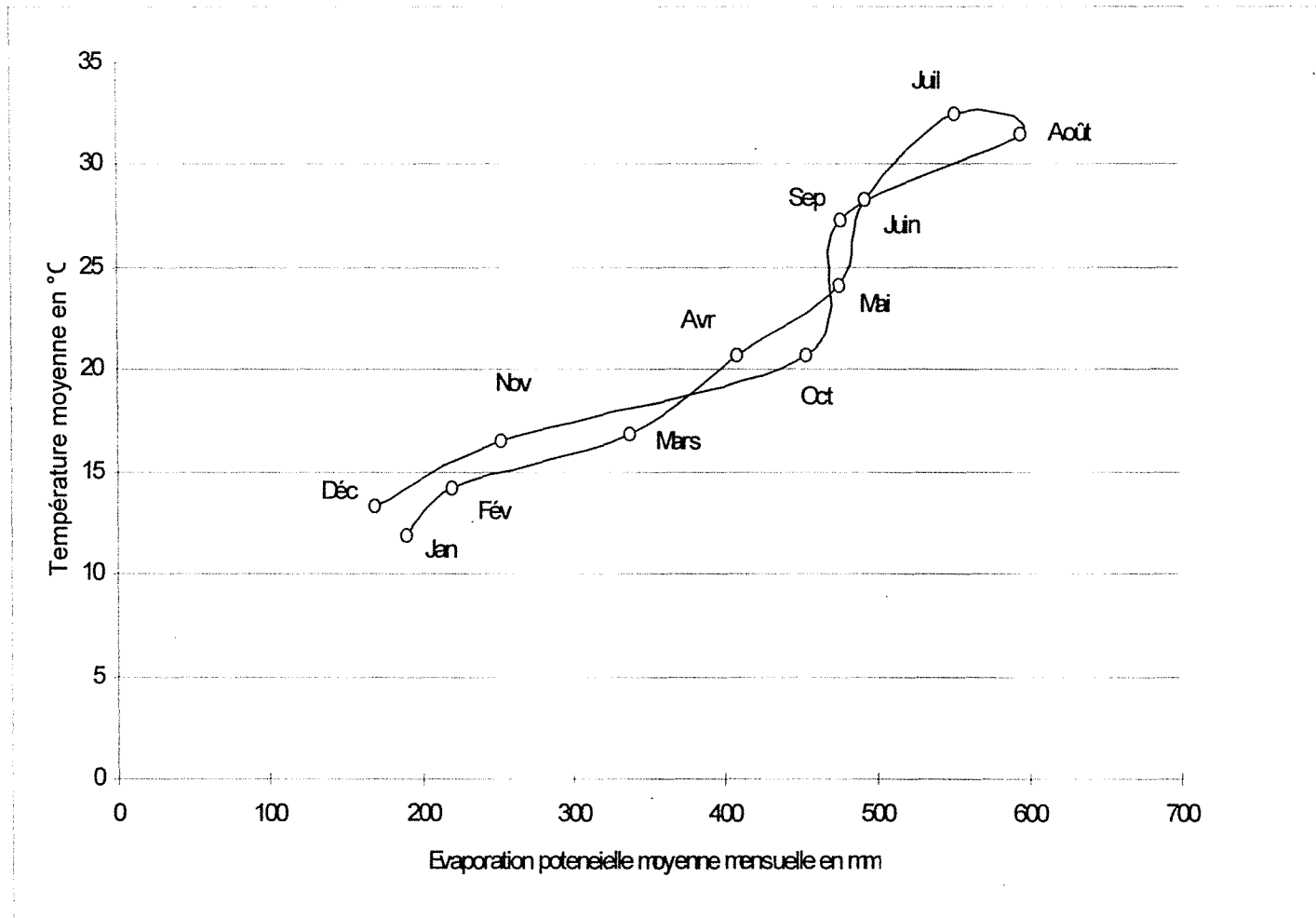


Fig 14. Evaporation potentielle moyenne mensuelle en fonction de la température moyenne mensuelle de l'air dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1984-1994).

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Année	
Températures (1964-1995)	Max	20,6	23,1	26,5	29,1	33,7	38	51,6	40,9	36,2	30,7	25,5	21,6	31,44
	Min	0,78	5,25	7,1	10,1	13,4	17,8	20,8	21	16,8	11,2	8,09	4,46	11,39
	Moyenne	11,87	14,15	16,8	20,27	24,06	28,33	32,45	31,5	27,3	20,69	16,54	13,36	21,44
Précipitations moyennes (1931-1995)	7,12	9,96	6,62	6,52	2,66	0,63	0,64	2,52	7,4	13,89	15,19	14,06	83	
Degré d'aridité (E. de MARTONNE, 1935)	3,9	4,94	2,96	2,58	0,93	0,19	0,2	0,72	2,38	5,43	6,87	7,22	2,64	
Indice d'humidité (THORNTHWAITE, 1948))	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-59	
Indice d'humidité (R. CAPOT REY, 1951)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,26	
Evaporation potentielle moyenne (1984 -1994)	189	220	338	408	475	492	552	595	476	453	253	169	4 620	
Déficit mensuel moyen (1984-1994)	182	210	331	401	472	491	551	592	469	439	238	155	4 531	

Tableau 16. Paramètres climatiques du bassin versant de l'oued Alougoum.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Année	
Températures (1964-1995)	Max	20,8	23,4	26,7	29,2	33,9	38,1	41,8	41	36,3	30,8	25,6	21,7	30,77
	Min	3,12	5,19	7,18	10,1	13,4	18	20,9	21,1	16,9	11,2	7,99	4,32	11,61
	Moyenne	12,25	14,4	17	20,26	24,2	28,33	32,5	31,68	27,41	21,5	16,68	13	21,6
Précipitations moyennes (1931-1995)	6,66	10,55	6,35	6,61	2,64	0,6	0,57	2,38	7,19	13,8	15,22	14,9	85	
Degré d'aridité (E. de MARTONNE, 1935)	2,48	5,18	2,82	2,62	0,9	0,19	0,16	0,61	2,3	5,25	6,84	7,77	2,62	
Indice d'humidité (THORNTHWAITE, 1948))	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-59	
Indice d'humidité (R. CAPOT REY, 1951)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,26	
Evaporation potentielle moyenne (1984 -1994)	192	223	340	412	479	496	556	601	481	459	256	170	4 665	
Déficit mensuel moyen (1984 -1994)	185	212	334	405	476	495	555	599	474	445	241	155	4 576	

Tableau 17. Paramètres climatiques du sous bassin versant de Bou-Azzer.

II.3. CONCLUSION

A partir de cette analyse climatologique, nous pouvons conclure que le bassin versant de l'oued Alougoum est caractérisé par les traits suivants :

Des variations brusques et importantes de températures avec une période chaude de 6 mois, présentant des moyennes mensuelles de maxima supérieures à 30 °C. Ces températures provoquent des pertes excessives d'eau par évaporation des eaux superficielles et transpiration des végétaux.

Une période pluvieuse répartie sur 3 mois (Octobre, Novembre et Décembre), et dont la moyenne mensuelle pour les deux dernières décennies ne dépasse guère 15 mm.

Trois années pluvieuses : 1954/1955, 1955/1956 et 1979/1980, pendant lesquelles des valeurs extrêmes respectivement de 334 mm, 224 mm et 209 mm ont été enregistrées. Ces pluies torrentielles, peuvent participer aux transferts des rejets arséniés hors du sous bassin versant de Bou-Azzer.

Des périodes de sécheresses prolongées : 1981-1984 et 1985-1987, pendant lesquelles les moyennes annuelles sont respectivement de 34 mm et 32 mm pour un bassin qui s'étend sur plus de 1 080 km².

Des averses à caractère violent qui se produisent pendant les mois secs et qui déclenchent un énorme ruissellement qui balaie les débris disponibles notamment, au niveau du sous bassin versant de Bou-Azzer qui constitue le berceau des principales crues de l'oued Alougoum. Le caractère brutal de ces averses, provoquent des profondes modifications du milieu ; en causant des dommages graves et durables à la capacité des sols à se maintenir, avec toutes les conséquences funestes qu'on imagine pour la flore et la faune qui en dépendent.

Un indice d'humidité très faible qui se traduit par des déficits de saturation élevés, donc par un pouvoir évaporant de l'air important. Ce pouvoir évaporant, diminue l'humidité des couches superficielles des sols et déclenche parfois des vents violents qui contribuent largement au transport des fines de haldes de mines riches en arsenic et métaux lourds. De ces résultats, on peut en tirer deux importantes informations :

1. la dissémination potentielle des polluants minéraux par le vent sous forme de poussières est fonction du degré de sécheresse et devrait être maximum en **été** et au **printemps**, où l'évaporation potentielle moyenne atteint des valeurs extrêmes respectivement de 1 638 et 1 387 mm/an.
2. la dissémination potentielle des polluants minéraux par l'eau à partir du District minier de Bou-Azzer est fonction de la pluviométrie et devrait donc être maximum en **automne** qui contribue pour plus de 50 % de la pluie annuelle.

CHAPITRE III

ELEMENTS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

INTRODUCTION

Le souci d'intégrer les données hydrologiques et hydrogéologiques de la zone étudiée, nous amène à estimer le coefficient de ruissellement et d'infiltration dans le sous bassin versant de Bou-Azzer. En tenant compte des valeurs moyennes pluviométriques disponibles, nous allons tenter de définir les apports annuels et d'établir un bilan global hydrologique de l'ensemble de la boutonnière, dont fait partie le sous bassin versant de Bou-Azzer. L'objectif fixé, est d'une part, chiffrer approximativement le volume de ruissellement qui commande les transferts des polluants minéraux, sous forme soluble ou particulaire hors du sous bassin versant ; d'autre part, connaître un ordre de grandeur des infiltrations au niveau de ce sous bassin, pour évaluer l'impact des rejets arséniés sur les eaux souterraines.

III.1. ELEMENTS HYDROLOGIQUES

III.1.1. *Lame d'eau moyenne*

Les données hygrométriques du bassin versant de l'oued Alougoum étant inexistantes. Il est par conséquent impossible de définir le volume de toutes les crues qui surviennent au cours d'une année, cependant, on peut évaluer la lame d'eau moyenne dans ce bassin versant en se référant aux données pluviométriques enregistrées aux postes de Zagora et d'Assaka (Taznakht). La hauteur moyenne théorique des précipitations est d'environ 77mm/an (cf, tableau 18).

III.1.2. *Estimation du coefficient de ruissellement*

Il n'existe pas de station de jaugeage à enregistrement continu à la pointe du sous bassin versant de Bou-Azzer, ni dans le bassin versant de l'oued Alougoum.

Dans le rapport de la mission hydrogéologique sur le moyen d'alimenter en eau l'agglomération de Bou-Azzer, A. ROBAUX (1939), fixe un coefficient de ruissellement de l'ordre de 6 % pour la totalité de la boutonnière de Bou-Azzer et un coefficient d'infiltration de 4% (cf, tableau 19).

J. CHAMAYOU, 1964 pour les affluants du Drâa moyen, admet un coefficient de ruissellement de 10 %.

Condition d'établissement d'un bilan dans le sous bassin versant de Bou-Azzer

Les précipitations alimentent dans le sol deux circuits d'écoulement des eaux.

- un circuit rapide (ruissellement - écoulement de surface)
- un circuit lent dans les aquifères (infiltration efficace, écoulement souterrain, émergence et cours d'eau), qui joue le rôle de régulateur.

Bassin versant	Période de référence	Précipitations moyennes annuelles (mm)	Superficie en km ²	Volume apporté annuellement en milliers de m ³
Zagora	(1931-1995)	66	10 732 (a)	708 312 (d)
Assaka	(1974-1996)	125	2 225 (b)	278 125 (e)
Bassin de l'Oued Alougoum		83	1 080 (c)	89 640 (f)
Boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa		89	705	62 745
Sous bassin versant de Bou-Azzer		84	41	3 444
Total			(a)+ (b) + (c) = 14 037	(d) + (e) + (f) = 1 076 077

Hauteur moyenne théorique des précipitations :
 $1\,076\,077 / 14\,037 = 76,66$

Tableau 18. Lamé d'eau moyenne dans les bassins versant de l'oued Alougoum, Zagora et Assaka

	Coefficient d'infiltration %	Débit spécifique l/s/km ²
Totalité de la boutonnière	4	0,06
<hr/>		
Bassin de Tachdamt (Bou-Azzer)	5	0,08
<hr/>		
Tiddiline, A. Assemblée extrémité amont Ouest	7	0,11
<hr/>		
Ait Ahman, A. Assemblée cours amont Ouest	3	0,05
<hr/>		
Ait Abdallah, A. Assemblée cours amont Est	4	0,07
<hr/>		
Bleida (O. El gloa)	4	0,06
<hr/>		
Oued Oulad Mrah	2	0,03

Tableau 19. Coefficients d'infiltration et débits spécifiques dans la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa, d'après ROBAUX, 1939 ; G. TUILLE, 1953.

Le débit de l'écoulement global dans les cours d'eau, Q, à la sortie du sous bassin est la somme des débits de l'écoulement de surface Q_r et de l'écoulement souterrain Q_w.

$$Q = Q_r + Q_w$$

Dans le sous bassin versant de Bou-Azzer, on considère que le débit des eaux souterraines peut-être assimilé au débit moyen des émergences (collecté par les cours d'eau de l'unité considérée). La réserve en eau souterraine représente le volume d'eau de gravité emmagasiné dans un aquifère à un instant donné. Cette réserve varie en même temps que la fluctuation du niveau piézométrique. Le débit disponible dans l'aquifère est égal au débit global annuel moyen de l'écoulement souterrain, pondéré de la variation moyenne inter-annuelle de la réserve. Les ressources en eau globales sont égales au débit d'écoulement global des cours d'eau Q pondéré par la variation de réserve des eaux souterraines.

$$\text{Ressources en eaux globales} = Q = Q_r + Q_w \pm dw$$

Les ressources en eau souterraines globales sont égales au débit de l'écoulement souterrain annuel moyen, c'est-à-dire au débit des émergences. Les prélèvements sur la réserve assurent la régularisation des débits d'exploitation, c'est la réserve utilisable. Les variations inter-annuelles des données hydrologiques (débit d'écoulement global annuel moyen, module spécifique moyen d'écoulement annuel, débit de l'écoulement souterrain, variation de la réserve annuelle des eaux souterraines) sont basées dans une étude régionale d'ensemble, sur des moyennes inter-annuelles rapportées à une période de référence qui doit être au moins de dix ans.

Dans un bassin où existe un écoulement pérenne à l'exutoire, le ruissellement est égal à l'écoulement total visible diminué de l'écoulement de base ou ruissellement retardé, déduit de l'étude des hydrogrammes. L'infiltration est égale à la somme du débit de base, du débit de fuite inféro-flux des alluvions de la rivière drainante et des prélèvements.

Dans le sous bassin versant de Bou-Azzer, aucun oued, ni ravin n'étant pérenne. Le ruissellement est égal à l'écoulement total, c'est à dire qu'il peut être assimilé au débit de crue.

L'infiltration peut être assimilée à la somme du débit de fuite (inféro-flux) et du prélèvement (émergence et prélèvement sur puits à l'intérieur du sous bassin).

Le bilan global proposé pour le sous bassin versant de Bou-Azzer, s'écrit alors :

Eau reçue = Eau cédée

- eau reçue = précipitation (volume d'eau apporté annuellement en m³), (les apports souterrains des bassins latéraux sont négligeables)
- eau cédée = évaporation
- + ruissellement - assimilé à l'écoulement total
- + débit de fuite - assimilé aux infiltrations
- + prélèvements

Les ressources en eaux sont très faibles. Le puits de Figuier foncé sur un contact rhyolites granitisées - serpentines, situé à 3 km au Nord Ouest du centre minier de Bou-Azzer ne fournit que quelques m³/h. Les exhaures miniers : Puits III, sur un contact diorites quartziques - serpentines, a fourni en 1997, 73 060 m³/an ; le filon 2 avait fourni en 1990, environ 18 000 m³.

La consommation en eau de la laverie de cobalt est de l'ordre de 105 000 m³/an, celle de l'usine C.M.B.A est d'environ 78 000 m³/an. Environ 45 % de la consommation globale de ces deux unités de traitement de cobalt, provient actuellement du puits de Taloust. Celui-ci a fourni en 1997 environ 245 065 m³ (la mine de Bou-Azzer est alimentée par pompage sur inféro-flux de l'oued Azguermerzi à Taznakht (plaine de Zenaga). Si on considère en moyenne, 91 000 m³ d'eau, prélevées annuellement dans le sous bassin de Bou-Azzer et si les apports souterrains des autres bassins limitrophes sont négligeables ; le débit spécifique ramené au km² sera égale 0,07 l/s/km² et le coefficient d'infiltration sera de l'ordre de 3 %.

III.1.3. Bilan hydrologique du sous bassin versant de Bou-Azzer

Les données hydrologiques concernant le sous bassin versant de Bou-Azzer sont condensées dans le tableau 20, où figurent :

- la superficie (estimée par planimétrie) ;
- hauteur des précipitations moyennes (calculée proportionnelle aux distances entre le centre minier de Bou-Azzer et les postes de Zagora, Fom-Zguid et Assaka (Taznakht) ;
- le coefficient d'infiltration ou infiltration efficace (% des précipitations correspondant au volume des prélèvements) ;
- le débit spécifique (volume des prélèvements ramené au km²) ;
- l'évaporation est déduite des données précédentes.

Validité des essais de Bilan

De ce qui vient d'être exposé, il ressort qu'il ne peut être effectué, même par bassins fractionnés, de bilans exacts, en tenant compte de mesures (précipitation, prélèvement, valeur de la variation de réserve) relatives à une période déterminée.

Dans le cadre d'une estimation de la valeur des ressources eau dans le sous bassin versant de Bou-Azzer, on a donc seulement cherché à réaliser un bilan global en tenant compte des valeurs moyennes disponibles pour définir un ordre de grandeur de volume du ruissellement qui transite annuellement par le barrage de Tizgui. Les apports annuels dans le sous bassin considéré sont estimés à 3,4 Mm³. Les infiltrations s'élèvent à 103 000 m³ et le volume ruisselé est évalué à 241 000 m³/an. Ce volume de ruissellement, pourrait être chargé en espèces dissoutes et polluantes, à partir des haldes de mines et véhiculées en aval, le long de la vallée de l'oued Alougoum.

	Sous bassin versant de Bou-Azzer	District minier de Bou-Azzer	Totalité de la boutonnière
Superficie (km ²)	41	230	705
Pluviométrie moyenne annuelle (mm)	84	85	89
Apport annuel en milliers de m ³	3 444	19 550	62 745
Evaporation (%)	90	87	90
Débit spécifique (l/s/km ²)	0,07	0,08 *	0,06 *
Coefficient d'infiltration (%)	3	5 *	4 *
Infiltration en milliers de m ³ /an	103	977	2 510
Evaporation en milliers de m ³ /an	3 100	17 008	56 470
Ruissellement en milliers de m ³ /an	241	1 565	3 765

Tableau 20. Bilan Global hydrologique de l'ensemble de la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa. (*) valeurs estimées par ROBAUX, 1939 ; G. TUILLE, 1953.

III.1.4. Les particularités du régime de l'oued Alougoum

Le régime de l'oued Alougoum est caractérisé fondamentalement par la discontinuité de l'écoulement. Cette discontinuité se manifeste aussi bien dans le temps que dans l'espace.

Dans le temps, cette discontinuité résulte de la combinaison de l'absence régulière d'alimentation phréatique et de la faiblesse des précipitations. L'oued est alimenté par le ruissellement, éminemment discontinu. La région montagneuse constitue le berceau des crues de l'oued. Ces crues se produisent presque tous les ans au printemps, quelquefois à la fin de l'hiver et en été. Cette « crue annuelle », se décompose en réalité en une série de pulsation correspondant aux périodes d'averses plus violentes dans la boutonnière de Bou-Azzer. Ces pulsations durent quelques heures parfois quelques jours chacune. Parfois, l'écoulement se maintient avec des oscillations pendant deux ou trois semaines. D'autres fois, on note des crues de deux, trois, quatre jours, voire une semaine, séparées par des maigres très accusées. Les débits totaux annuels varient énormément, beaucoup plus que les précipitations, puisque la manière dont l'eau tombe joue autant, sinon plus que le montant de la chute.

Dans l'espace, les particularités de l'écoulement de l'oued Alougoum apparaissent surtout dans toute la zone couvrant le bassin versant. La crue se forme toujours en montagne, mais, suivant son volume et sa rapidité, elle gagne la région de Foum-Zguid plus ou moins éloignée du piémont, pouvant même atteindre parfois le Draâ. Du fait de son alimentation par les averses, les crues de l'oued ne sont pas soutenues. Elles correspondent à un effet de chasse d'eau, alimenté par un certain volume d'eau ruisselé et s'arrêtent dès que ce ruissellement cesse.

III.1.4.1. Les apports annuels

S'agissant d'une étude d'épandage des crues, les ressources en eau ne sont examinées ici que d'une façon indicative. L'hypothèse principale consiste à admettre que l'apport annuel peut être égal à la somme des apports des crues qui surviennent au cours d'une année moyenne.

L'analyse des pluies annuelles maximales enregistrées dans les postes de Taznakht, Foum-Zguid et Zagora au cours de ce siècle, montre qu'il existe 1 à 2 crues principales. On a relevé lors des enquêtes auprès des populations que la durée de ces courtes et violentes crues est de l'ordre de 15 à 20 heures. Il s'agit évidemment des crues de très faibles pointes produites par des averses tombées sur de petites parties de la superficie totale du bassin versant. Cependant, on peut assister à des averses violentes avec des débits importants. En effet, d'après le service de l'équipement de Ouarzazate, la dernière averse qui date du 23 et 24 Août 1997 ayant déclenchée une pluviométrie exceptionnelle élevée à 40 mm, étalée sur 2 heures, a un débit de pointe de 100 m³.

III.1.4.2. Les apports solides

Au cours de la dernière crue survenue le mois d'Août 1997, il n'a pas été possible de prélever des échantillons d'eau pour déterminer la concentration des matériaux en suspension. La prospection sur place des matériaux formant les terrasses alluviales nous a permis d'avoir une idée sur le processus d'érosion et de transport solide. L'examen des terrasses situées au droit des sites implantés le long de la vallée de l'oued Alougoum, montre une prédominance des graviers, de gros blocs et des sables. Les argiles et d'autres matériaux fins, ont été plus particulièrement observés en grandes quantités, au niveau des douars Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait Aissa, Ait M'rabt et Tasstift. Ces matériaux fins sont constitués essentiellement d'anciennes haldes de mines entraînées par ruissellement.

III.2. ELEMENTS HYDROGEOLOGIQUES

III.2.1. Bassin versant de l'oued Alougoum

La figure 15, représente la carte lithologique du bassin versant de l'oued Alougoum. Celui-ci reçoit en moyenne 90 Mm³ d'eau/an. La nature lithologique des terrains amplifiés par la rigidité des pentes (2 à 3 %), le taux d'évaporation estimé à 90 % et le coefficient d'infiltration très faible ne laissent augurer que de faibles ressources en eau.

Dans la boutonnière de Bou-Azzer, les roches d'âge Précambrien II inférieur (serpentines, diorites quartzites), les roches d'âge Précambrien III (rhyolites, andesites et conglomérats), ont en général de bonnes caractéristiques hydrogéologiques (fracturations plus poussées et surtout souvent altération bien développée). Ces formations affleurent peu à l'Ouest, alors qu'elles couvrent de grandes étendues à l'Est. Les ressources en eau sont plus abondantes à l'Ouest qu'à l'Est. En aval de la boutonnière, ce sont les terrains d'âge Adoudounien et Paléozoïque inférieur (Géorgien, Acadien et Ordovicien) qui couvrent une grande partie du bassin.

III.2.1.1. Caractéristiques aquifères des terrains

Les orthogneiss, les granites d'âge PI et les roches ophiolitiques d'âge PII inférieur (serpentines, diorites quartziques), sont altérés en surface, surtout dans quelques zones dépressées, mais par contre, très peu altérés dans les zones en relief. Dans les creux, ces formations sont parfois surmontées d'arènes perméables de faibles épaisseurs. Ainsi, les infiltrations pourraient être infimes et ne présentent pas très probablement un risque majeur de contamination des eaux souterraines. En revanche, dans les zones en relief, où ces formations sont affectées par de nombreux accidents d'origine profonde ; il existe des circulations en réseaux susceptibles de drainer les eaux chargées en polluants minéraux.

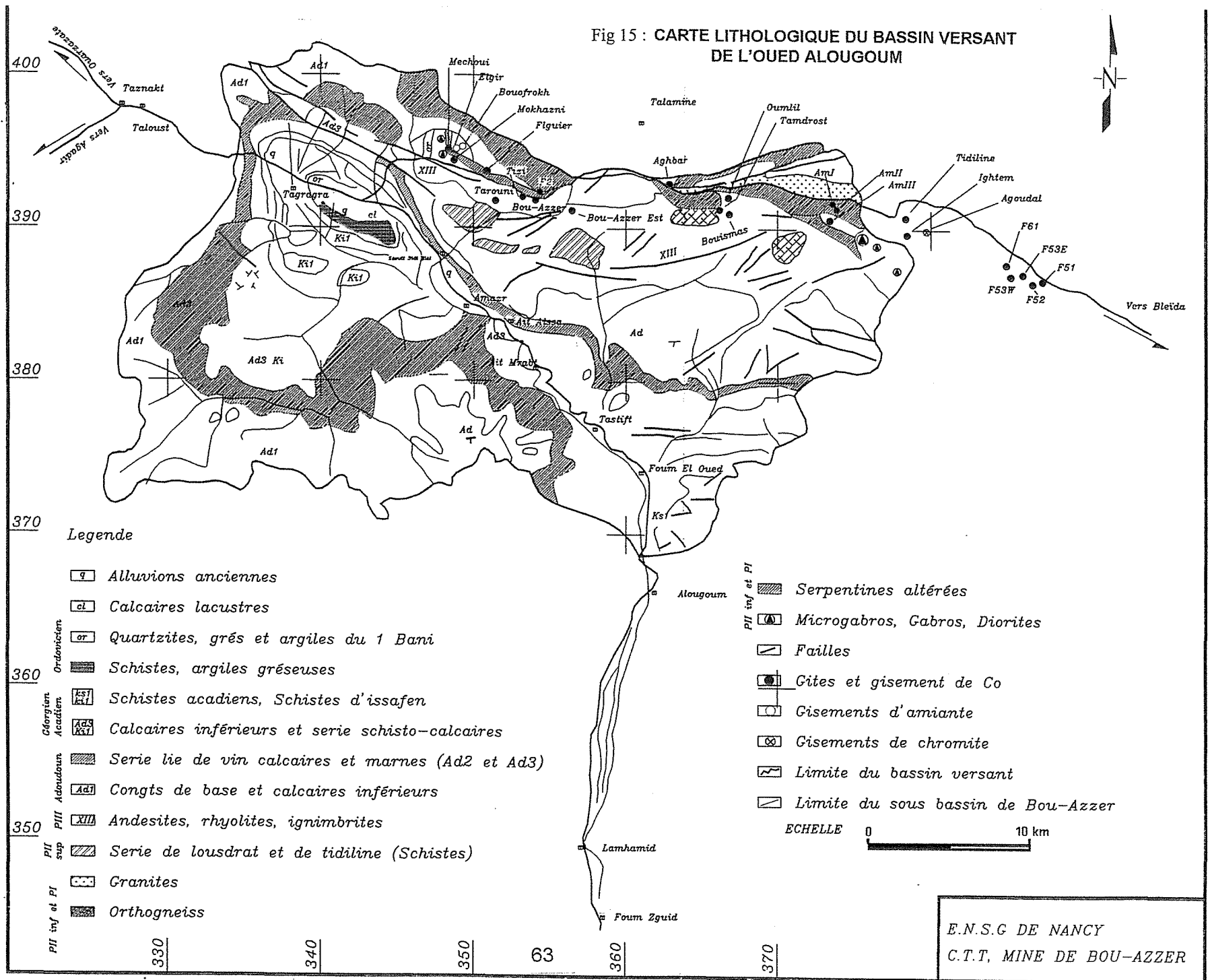
Les schistes du Précambrien II supérieur sont généralement très peu altérés. Ils sont imperméables dans leur masse. Exceptionnellement, des sources de débit infime résultent de l'intercalation d'un niveau de roches fracturées. Les zones d'altération de ces schistes n'existent que lorsqu'ils ont été affectés par une ancienne surface les tranchant et recouvert par des sols anciens. Des puits à faibles débits peuvent alors être positifs.

Les roches éruptives d'âge PIII ou Infracambrien inférieur, constituées essentiellement de rhyolites, ignimbrites, andesites et dacites sont imperméables dans leur massif. Mais, comme elles sont affectées par des déformations cassantes, elles présentent des nappes en réseaux. En principe, toutes les émergences issues de ces formations se situent sur des failles. Dans la boutonnière de Bou-Azzer, on trouve des émergences de faible débit, en contact de deux natures différentes de roches éruptives (rhyolites et tufs cinétiques). Les sources sont relativement nombreuses dans les formations du PIII, mais toujours avec des faibles débits.

En fait, les petits oueds drainant les réseaux de fissures, sont exploités par les puits situés dans les thalweg, au niveau d'un secteur de roches peu fissurées ou faillées. Les débits spécifiques de ces ouvrages sont faibles. Ces roches éruptives, présentent un intérêt certain pour la vallée de l'oued Alougoum. En effet, les massifs de PIII situés au Sud de Bou-Azzer centre sont drainés par Assif N'Talkhert, puis par l'oued Alougoum, où les alluvions servent de réservoirs supplémentaires dans lesquels les pompages ont d'assez bons rendements. C'est le cas par exemple, des puits servant à l'eau potable dans les villages de Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait M'rabt et Tasstift.

Les conglomérats de base, les calcaires inférieurs, les calcaires et marnes (série lie de vin) d'âge Adoudounien sont beaucoup développés dans le bassin versant de l'oued Alougoum. Ils sont généralement peu épais et possèdent une perméabilité de fissure en relation avec les effets tectoniques locaux. Ils alimentent souvent de petites émergences et peuvent aussi fonctionner parfois comme un drain de la zone altérée.

Fig 15 : CARTE LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED ALOUGOUM



E.N.S.G DE NANCY
C.T.T. MINE DE BOU-AZZER

Les calcaires du Géorgien, les schistes et les quartzites de l'Acadien et l'Ordovicien, malgré leur faible perméabilité, peuvent cependant, emmagasiner d'appréciables quantités d'eau liées aux circulations de type karstique.

Les quartzites sont souvent tectonisées, fracturées. Elles possèdent une perméabilité de fissure et malgré la raideur générale des pentes, elles constituent un puissant réservoir souterrain. Les dolérites qui injectent souvent les quartzites jouent un grand rôle dans l'hydrogéologie de ces massifs. En effet, les émergences qui ne sont pas localisées à la périphérie des quartzites, se trouvent aux contacts quartzites-dolérites. On note des puits dans les dolérites altérées en contact des quartzites.

III.2.2. Sous bassin versant de Bou-Azzer

La figure 16, illustre la carte lithologique du sous bassin versant de Bou-Azzer. Ce sous bassin, regroupe des terrains allant du Précambrien ancien au Paléozoïque inférieur. La série lie de vin, calcaires et marnes de l'Infracambrien supérieur, la série schisto-calcaire du Géorgien couvrent la partie Nord du sous bassin. Les rhyolites, andésites, ignimbrites et conglomérats du Précambrien III sont beaucoup plus développés dans ce sous bassin versant.

III.2.2.1. Caractéristiques aquifères des terrains.

- Précambrien I

Les gneiss, granites, amphibolites et schistes : ces formations affleurent selon deux plages. Elles sont beaucoup importantes au Sud de Bou-Azzer centre et présentent des zones de fractures et d'altérations développées. Des infiltrations notables, peuvent se produire à travers les fractures et les fissures. Ainsi, des nappes en réseaux plus ou moins continues, peuvent être localisées dans les axes drainants.

- Précambrien II inférieur

Les serpentines : affleurent dans la zone axiale, le long d'une grande fracture traversant le sous bassin. Peu fracturées, ces roches ne peuvent présenter que des nappes discontinues en réseaux. Les diorites quartziques : massives et imperméables, elles présentent une fracturation le long des accidents sur lesquels peuvent exister des petits points d'eau.

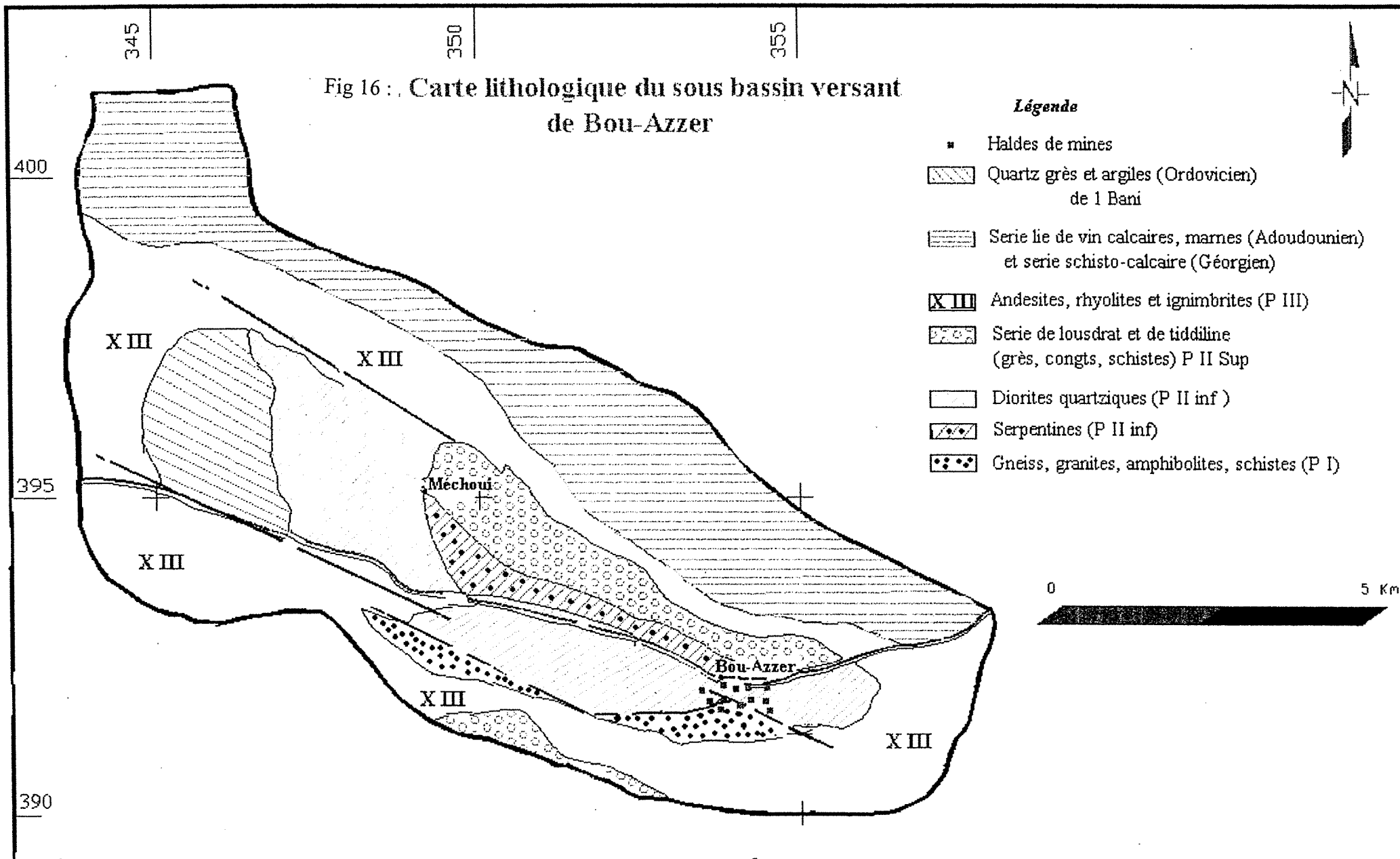
- Précambrien II supérieur

Les conglomérats du Précambrien II supérieur ont un comportement hydraulique très voisin de celui des roches éruptives (rhyolites, andésites et ignimbrites). Ils sont imperméables dans leur massif, mais, s'ils sont affectés par des fractures, ils peuvent présenter des nappes en réseaux.

- Précambrien III

Les andésites, rhyolites et ignimbrites sont peu perméables (nappes discontinues en réseau lâche). Ils nourrissent très peu de points d'eau.

- L'Infracambrien supérieur (Adoudounien) et les formations géorgiennes : Ces formations peuvent constituer un réservoir d'eau avec des points de drainage bien localisés. Au dessus de la série schisteuse « lie de vin », il n'existe pratiquement qu'une alternance de bancs de calcaires, marnes ou de grès quartzeux et de schistes avec drainage continu et diffus par des petits oueds sans points d'émergence bien localisés.



- L'Ordovicien

L'Ordovicien est représenté ici essentiellement, par des grès et des quartzites. Ces formations sont aquifères, cependant, le réseau du système de fissure est très lâche.

III.2.3. Les ressources en eau

III.2.3.1. Nappes superficielles

Dans le bassin versant de l'oued Alougoum, la pauvreté des ressources aquifères est frappante. Elles se réduisent à quelques écoulements dans les terrasses du quaternaire et les arènes granitiques, qui se vident par des sources à faibles débits. Ces sources sont détectables par les petits oasis ou par les petites palmeraies qui sont ainsi créées. Tout au long de la vallée, entaillée dans les roches dures, se créent des petits écoulements liés aux oueds temporaires descendant de l'Anti-Atlas central. Ces écoulements apparaissent sous forme de sources dans les alluvions et sont exploités par la population pour l'eau potable et pour l'irrigation.

La part très importante de l'évaporation et la faiblesse des infiltrations, ne laissent présager que de très faibles ressources en eaux. Ces ressources apparaissent surtout en période pluvieuses et sont exploitées par des saguias en terre ou par des systèmes de pompage traditionnels. Plus récemment, le pompage moderne a fait son apparition dans quelques sites, notamment aux villages d'Alougoum, Foum-Zguid et contribue d'une façon plus efficace à l'exploitation de la nappe.

Dans la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa, on compte plus de 40 sources. Ces sources de faible débit (2 à 3 l/s) sont liées à des fractures. Les eaux qui circulent dans les fractures, fissures ou failles, ne peuvent guère attaquer les calcaires indurés et silicifiés. Cette circulation de type karstique, se trouve dans les quartzites acadiens sur le flanc Nord de la boutonnière de Bou-Azzer, mais avec des débits insignifiants.

III.2.3.2. Nappes profondes

Le long de la vallée de l'oued Alougoum, la proportion des roches imperméables ne permet pas l'existence des ressources profondes importantes. Les calcaires du Géorgien, les quartzites de l'Acadien et de l'Ordovicien, malgré leur faible perméabilité peuvent cependant, emmagasiner d'appréciable quantité d'eau.

Dans la boutonnière de Bou-Azzer, quelques roches semi perméables ou imperméables, cheminent les eaux par des fractures et fissuration. Cette circulation, donne lieu à des emmagasinelements souterrains profonds sous forme de nappes en réseaux qui ont leur exutoire sous forme d'émergence ou de fracture. Selon J. CHAMAYOU, Juin 1964 (excursion géologique et hydrogéologique dans le bassin du Drâa), les formations dans lesquelles on peut déceler des nappes assez importantes sont stratigraphiquement les suivantes :

- les calcaires inférieurs de l'Infracambrien, là où leur puissance est importante ;
- les calcaires supérieurs du Géorgien dont la puissance varie de 200 à 250 m ;
- les quartzites acadiens ;
- les grès et quartzites du Bani.

En général , les eaux souterraines dans le bassin versant de l'oued Alougoum sont faibles. Les eaux superficielles s'écoulent rapidement lors des rares crues, les eaux des nappes liées aux sous écoulements ont des débits très faibles. Les ressources profondes bien que peu connues ne peuvent laisser présager des débits importants comparables à ceux du Lias ou du Crétacé - Eocène du bassin de Ouarzazate et du Dadès.

III.3. CONCLUSION

Le bassin versant de l'oued Alougoum, comprend la boutonnière de Bou-Azzer, où d'importants gisements de cobalt, d'argent et de chromite faisaient l'objet d'une exploitation intensive depuis plus d'un demi siècle. L'étude hydrologique et hydrogéologique que nous avons menée dans ce bassin versant, nous permettent de conclure les faits suivants :

Sur le plan hydrologique : les ressources en eau sont caractérisées à la fois par leur rareté et leur irrégularité. Toute en négligeant les apports des averses, les apports moyens interannuels dans le bassin versant de l'oued Alougoum et le sous bassin versant de Bou-Azzer, calculés sur la période 1975-1995, s'élèvent respectivement à 90 Mm³ et 3,4 Mm³.

Le volume ruisselé annuellement dans le sous bassin versant de Bou-Azzer, où se trouvent stocker les haldes de mines riches en arsenic et métaux lourds, s'élève à 241 000 m³. Il s'agit d'un ordre de grandeur moyen du volume d'eau qui transite par le barrage de Tizgui et qui est recueilli en aval par l'oued Alougoum.

Sur le plan hydrogéologique : le District minier de Bou-Azzer est composé des formations géologiques d'âge PI, des roches ophiolitiques d'âge PII inférieur et des roches éruptives attribuées au Précambrien III. Ces formations sont généralement imperméables dans leur massif, cependant, elles présentent parfois des altérations en surface (zones dépressées). Dans les zones en reliefs, ces terrains sont affectés par des accidents tectoniques, à travers lesquels les circulations peuvent contaminer les eaux souterraines exploitées par les agglomérations implantées le long de la boutonnière de Bou-Azzer.

Les infiltrations des polluants minéraux à travers les couches profondes sont fonction des caractéristiques hydrogéologiques des terrains, du taux d'humidité des sols et devraient être maximum aux mois de Novembre et Décembre.

Le long de la vallée, les eaux d'infiltration ne donnent généralement qu'une humidité temporaire. Cette humidité est vite éliminée par l'évaporation dans le sol même. Il n'y a rien ici qui ressemble au régime réalisé dans les régions humides avec l'entraînement en profondeur, jusqu'à la nappe phréatique ; des produits dissous et leur évacuation par les sources.

D'une façon générale, la ressource la plus vitale qui est à la base de toute activité économique dans la vallée de l'oued Alougoum est l'eau. Le développement économique et social de cette zone, passe en premier lieu, par une meilleure préservation de l'eau contre les divers polluants qui peuvent être entraînés par ruissellement, à partir du sous bassin versant de Bou-Azzer, une meilleure gestion et une mobilisation optimale de cette ressource en tenant compte des contrastes liés aux systèmes existants.

Une autre marge de progrès possible est constituée par :

- un recyclage total des eaux usées de la mine au niveau du centre minier de Bou-Azzer ;
- la mise en place au niveau des rejets miniers des barrières étanches, permettant d'empêcher la diffusion des polluants minéraux dans le réseau hydrographique de l'oued Alougoum ;
- une meilleure utilisation de l'eau par la population résidant dans la vallée, allant dans le sens de son économie et sa meilleure valorisation par l'amélioration des systèmes de production agricoles pratiqués.

TROISIEME PARTIE

RECENCEMENT ET ANALYSE CRITIQUE DES DONNEES EXISTANTES SUR LA MINE DE BOU-AZZER

CHAPITRE I : REGION DE BOU-AZZER DANS SON CONTEXTE MINIER
CHAPITRE II : DIAGNOSTIC MINE DE BOU-AZZER ENVIRONNEMENT

CHAPITRE I

REGION DE BOU-AZZER DANS SON CONTEXTE MINIER

INTRODUCTION

La boutonnière de Bou-Azzer, recèle d'importantes potentialités minières en cobalt faisant l'objet d'exploitation depuis 68 ans. Il s'agit d'un patrimoine minier qui continue à jouer un rôle primordial tant sur le plan social que sur le plan économique régional. Le public minier tout entier s'est intéressé à cette contrée perdue du Maroc méridional, désertique, rude par son climat hyperaride, mais belle d'une beauté âpre, riche de promesses et de réalités.

1.1. DISTRICT MINIER DE BOU-AZZER

Le District minier de Bou-Azzer est connu par ses gisements de cobalt qui forment un district métallogénique d'une grande homogénéité. Ces gisements se succèdent sur une longueur de plus de 50 km. Ils sont dans l'axe de la boutonnière, où ils sont localisés sur les bords ou à proximité immédiate d'une large bande de serpentines précambriennes, faisant partie du complexe ophiolitique (Fig 17).

Sur l'ensemble de ces gisements, seuls 5 sont actuellement en activité, alors que les autres sont abandonnés par épuisement des réserves. Ceux qui sont en activité sont de l'Ouest en Est : Méchoui, puits III (Bou-Azzer centre), Bou-Azzer Est, Aghbar et Tamdrost.

Les plus importants gisements de cobalt ayant connu une intense activité minière (Filons 7, 5 et 2) sont localisés sur des grands accidents orientés SW-NE et obliques par rapport à la base des serpentines. D'autres gisements ont été découverts dans la boutonnière ; il s'agit en particulier des gisements d'amiante, du manganèse d'argent et de la chromite.

Les gisements d'amiante ont été exploités entre 1941 et 1951. Ils sont constitués de chrysolite encaissée dans les serpentines précambriennes de Bouofrokh et d'Elgir. Ces deux gisements étaient la zone principale d'exploitation, où la minéralisation suit des grandes fractures orientées dans l'axe du massif de serpentine. La rentabilité de cette exploitation n'était justifiée que durant la période guerre et d'immédiat après guerre ; M. Clavel et M. Leblanc (géologie du Maroc, n° 229, 1970).

Les gisements de manganèse sont encaissés dans les rhyolites de la formation de Ouarzazate (Précambrien III ou Infracambrien inférieur). Ces rhyolites recèlent de nombreux filons de petites tailles avec des réserves très faibles qui n'ont actuellement aucun intérêt économique.

Pour la minéralisation d'argent, des réserves exploitables ont été découvertes à Bou-Azzer centre (Puits III). Les filons d'argent sont intimement liés au minerai de cobalt et l'exploitation a débuté en 1988. Concernant la chromite, plusieurs gîtes rentables ont été mis en évidence dans le secteur d'Agoudal, où l'exploitation a démarré en 1986.

Le District minier de Bou-Azzer contient également des indices d'or, cependant, le problème de l'importance et de la localisation d'un gîte exploitable dans les gisements de cobalt et de nickel est loin d'être actuellement résolu. Il fera peut être dans les années à venir l'objet d'un programme de recherche (communication verbale des responsables de la mine).

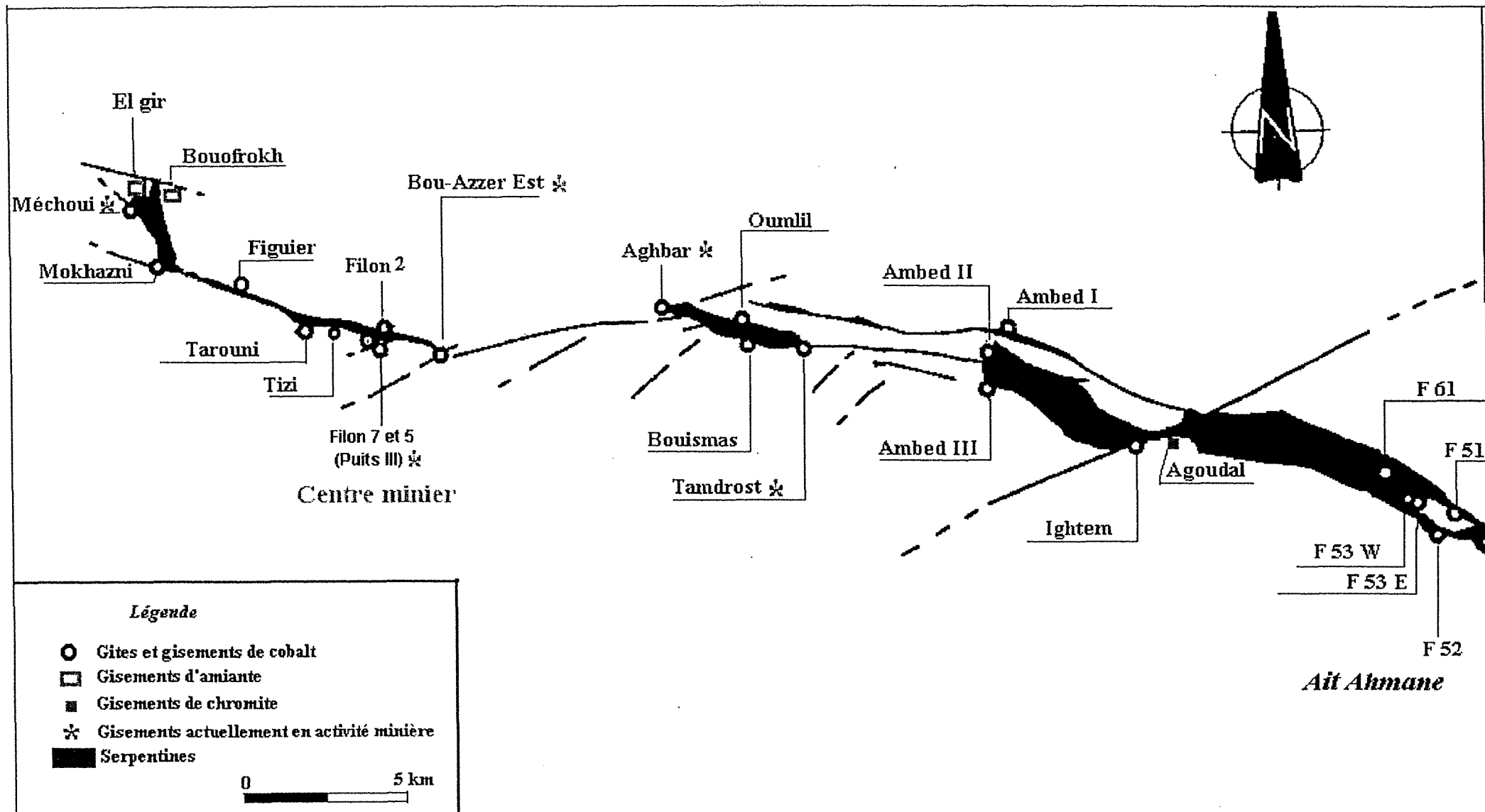


Fig 17 District minier de Bou-Azzer: Localisation des gites et gisements de cobalt, d'amiante et de chromite

1.2. HISTOIRE DE L'ACTIVITE MINIERE

La découverte des gisements de cobalt de Bou-Azzer, remonte à l'année 1928 grâce à une enquête sur l'origine de poudre d'érythrine (arséniat de cobalt) vendue dans les souks de Marrakech, et utilisée comme raticide et insecticide (M. Leblanc, 1975).

En 1933, le District minier de Bou-Azzer est confié à la société Minière de Bou-Azzer et du Grâa (S.M.A.G) qui a commencé l'exploitation des filons 7, 5, 2 et le gisement d'Ighem. Les gisements d'Aghbar, Ambed et Tamdrost furent à l'époque l'objet de travaux miniers de recherche. De 1933 à 1950, la production fût assurée pour les trois quarts par simple scheidage avec des récupérations de l'ordre de 50 %.

Après une période d'arrêt de 1940 à 1943 (seconde guerre mondiale), l'exploitation a repris dans les filons 7 et 5 (Bou-Azzer centre) et le gisement d'Aghbar. En 1956, des travaux miniers ont été entrepris sur le gisement d'Ighem. En Septembre 1967, l'exploitation du filon 7 fût arrêté, de même que les réserves connues d'Aghbar doivent être épuisées en Mars 1970.

De 1969 à 1971, des recherches intensives ont été menées par une équipe de géologues soviétiques (mission technoexport) qui utilisait de nouvelles techniques de recherches (géochimie, géophysique, cartographie, sondage). Ces recherches ont permis de démontrer l'existence de nouveaux gisements à Bou-Azzer Est et à Tamdrost. Ces deux gisements ont été mis en exploitation respectivement, en 1971 et en 1974 par la compagnie de Tifnout Tighanimine (C.T.T) filiale de l'O.N.A, qui a pris le relais de la recherche et l'exploitation des gisements de cobalt dans le District minier de Bou-Azzer.

Depuis 1971, la C.T.T a engagé d'importants investissements pour la recherche de nouveaux gisements. Diverses techniques de prospection ont été utilisées, ce qui a abouti à la découverte d'un ensemble de gisements de petites et moyennes tailles : Tarouni (1976) ; Oumlil centre (1977) ; Bouismas (1982) ; Méchoui (1987) ; Ait Ahmane : Filon 53 (1990) ; tout en poursuivant l'exploitation et la recherche des expansions des anciens grands gisements.

1.3. CADRE GEOLOGIQUE

1.3.1. Boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa

Il s'agit d'une double boutonnière, la boutonnière de Bou-Azzer à l'Ouest qui loge le District minier de Bou-Azzer et celle d'Elgrâa la plus étendue à l'Est qui comprend l'ancien gisement de cuivre de Bleida. Les deux boutonnières sont soudées l'une à l'autre et sont appelées communément, boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa. Cette boutonnière est jalonnée par l'accident majeur de l'Anti-Atlas d'âge Précambrien et de direction NW-SE. Elle est composée d'un socle Précambrien d'âge Protérozoïque, surmonté en discordance majeure par une couverture infracambrienne et cambrienne (Fig 18).

L'ordre stratigraphique défini par M. Leblanc (1975), comporte du bas en haut, les formations suivantes :

- Précambrien I : Il est représenté par des gneiss, amphibolites, migmatites dioritiques et de leucogranites. L'ensemble forme un bloc emballé tectoniquement dans l'orogénèse éburnéenne datée à 2000 Ma (R. Charlot, 1978), sous le complexe ophiolitique en position renversée.
- Précambrien II inférieur : il comprend le complexe ophiolitique de Bou-Azzer Elgrâa et l'unité de Tachdamt- Bleida.

→ Le complexe ophiolitique, où prédomine les roches acides (diorites quartziques, keratophyres), comporte essentiellement, du bas en haut :

- * péridotites résiduelles (dunites, harzburgites) serpentinisées ;
- * cumulats ultrabasiques ou ultramafiques (wehrlites, clinopyroxénolites) ;
- * cumulats basiques (gabbros rubanés, microgabbros et dykes de diabases ;
- * massifs de diorites quartziques ;
- * ensemble effusif composé de diabases, spilites et de keratophyres ;
- * ensemble volcano-sédimentaire schisteux avec des grauwackes, tufs, silstones, calcaires et oligistoschistes.

Ce complexe ophiolitique de la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa, a été interprété par M. Leblanc, 1975, 1981 ; M. Leblanc et Lancelot, 1980 ; Boudinier et al 1984, comme un fragment de croûte océanique Précambrien en distension. Ce fragment a son origine dans une ride médio-océanique ou dans un bassin marginal d'arrière-arc ayant obducté vers le Sud sur le bord Nord du craton Ouest africain, dont l'unité de Tachdamt-Bleida constitue le faciès de plate forme continentale. L'obduction des ophiolitites s'est produite au cours de la phase tectonique majeure panafricaine (B1), datée à 685 Ma (Clauer ; 1974, 1976).

Les études récentes entamées par saquaque et al (1989), proposent une nouvelle subdivision du Précambrien II inférieur. Selon ces auteurs, la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa comporte 3 domaines différents : un mélange d'accrétion au Sud ; un complexe ophiolitique démembré au centre ; un bassin d'avant-arc au Nord. Ces trois domaines résultent d'une collision avec le bord Nord du craton Ouest africain, accompagnée d'une subduction vers le Nord.

→ L'unité de Tachdamt-Bleida est constituée de calcaires à stromatolites, grès, quartzites et de schistes, avec intercalation de coulées de diabases et de gabbros.

- Précambrien II supérieur : il comporte principalement des dépôts détritiques (mollasses, grauwackes, silstones et grès). Les grauwackes représentent les produits de démantèlement des structures (B1). Les formations du Précambrien II supérieur sont affectées par la phase tectonique ultime de serrage (B2). Cette phase est caractérisée par des plis droits à schistosité de fracture, ainsi que des décrochements senestres, orientés N 60 et leur conjugués dextres de direction N 170, avec une direction de compression maximum N 30.

- Infra-cambrien inférieur (Précambrien III) : appelé série de Ouarzazate, le Précambrien III repose en discordance majeure sur les terrains du Précambrien I et II. Il s'agit d'une série volcanique et volcano-détritique qui comporte des laves, tufs, ignimbrites, rhyolites, dacites, des coulées andésitiques et des dépôts détritiques. Ces formations postérieures à 600 Ma sont concordantes sous l'Adoudounien (Infra-cambrien supérieur).

- Infra-cambrien supérieur (Adoudounien) : il repose sur l'Infra-cambrien inférieur sans discontinuité majeure. Les formations adoudouniennes atteignent jusqu'à 1000 m d'épaisseur à Bou-Azzer. Elles comprennent du bas vers le haut (M. Leblanc, 1975) : grès conglomérats de base (0,5 à 15 m) ; dolomies inférieures (100 m) avec intercalation de coulées trachy-andésitiques issues du volcan du Jbel Boho situé au Sud de la boutonnière ; série lie de vin (150 à 200 m) composée de grès roses avec intercalation de psammites bruns-rouges ; dolomies supérieures (150 à 200 m) ; psammites et grès roses terminaux (120 à 200 m) .

Les terrains adoudouniens sont concordants aux terrains paléozoïques caractérisés par l'apparition des premiers trilobites. Les terrains Infra-cambrien et paléozoïques sont affectés par l'orogénèse hercynienne qui se traduit par des structures plissées disharmoniques, dans les niveaux sédimentaires adoudouniens et géorgiens. Cette orogénèse se traduit également par des structures

Carte géologique de la boutonnière de Bou-Azzer El Graara (d'après Leblanc, 1975)

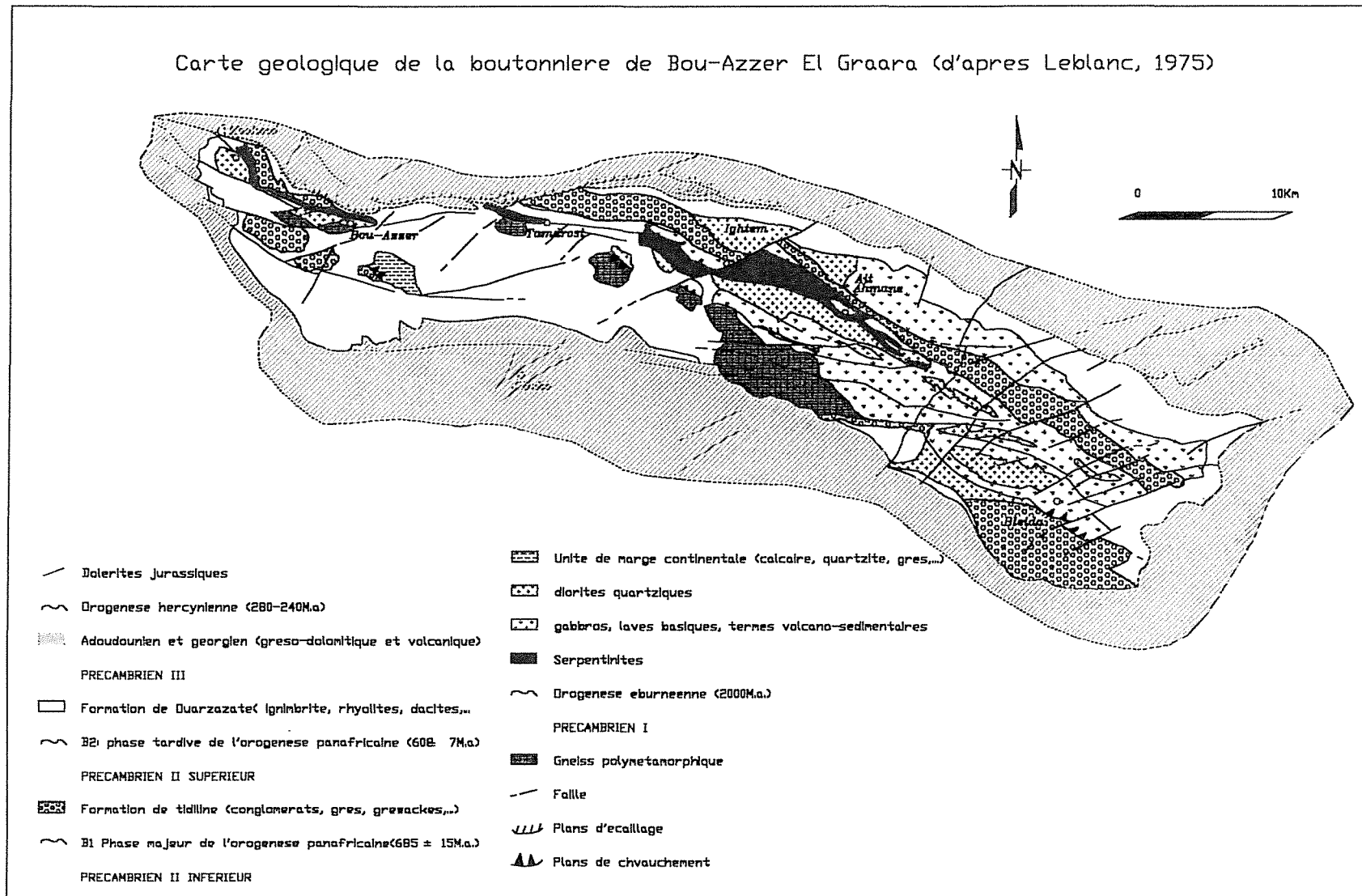


Fig 18 : Carte géologique de la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa

cassantes dans les formations du Précambrien III qui se superposent aux anciens accidents de la phase ultime (B2).

Une autre manifestation magmatique visible à l'échelle de Bou-Azzer et qui se prolonge vers le Sud-Ouest, est représentée par un dyke de dolérite d'âge Jurassique. Ce dyke recoupe l'ensemble des terrains antérieurs et les structures hercyniennes. Il est décalé au cours des mouvements atlasiques par des accidents se superposant à d'anciennes structures précambriennes. D'après G. Choubet (1952), ces mouvements ont provoqué un exhaussement général de la chaîne anti-atlasique.

1.4. MINÉRALISATION DE COBALT

Le minerai exploité dans le District minier de Bou-Azzer est composé essentiellement d'arséniures de cobalt, nickel et fer associés à des sulfoarséniures de Co, Fe, Ni, des sulfures de cuivre, de l'or et de la molybdénite.

Les trois métaux : cobalt, nickel et fer se remplacent l'un l'autre dans leurs arséniures. La teneur en arsenic est d'autre part variable, car la skutterudite (Co, Ni) As₃ et la smaltine (Co, Ni) As₂ ont la même forme cristallographique. La proportion de triarséniure est très importante dans les filons de Bou-Azzer et la teneur en As de concentré titrant 10 à 12 % Co + Ni varie de 50 à 60 % .

Les serpentines constituent la source du cobalt et du nickel (en moyenne 160 g Co/t et 420 g Ni/t). L'étude menée par M. Leblanc, 1975, montre que les serpentines comprennent des niveaux riches en sulfures contenant en abondance du Cu, Ni, Co et As. L'origine de l'arsenic est jusqu'à présent discutable, mais au niveau du District minier de Bou-Azzer, seules les serpentines sont porteuses de l'arsenic avec des teneurs moyennes de 20 à 300 g/t (M. Leblanc, 1975).

Les arséniures de cobalt, nickel et fer sont repartis dans presque toute la gangue quartzo-carbonatée. Les arséniures de fer semblent abondants au sommet des gisements et peut être à la base. Les arséniures de cobalt forment le gros du minerai et les arséniures de nickel sont localisés sur le bord Sud selon des colonnes subverticales étroites et mal définies. Le cuivre se trouve un peu partout dans la gangue sous forme de sulfures.

La gangue est constituée essentiellement de quartz et de calcite, auxquels sont associés un peu de dolomite, du chlorite, de talc et de minéraux reliques des serpentines (chlorite, magnétite) (M. Leblanc, 1975). Le nickel n'est jamais exploité pour lui-même malgré qu'il se trouve en fortes teneurs dans certains gisements. L'or, dont les teneurs sont très irrégulières d'un gisement à l'autre et récupéré comme sous-produit en cours du traitement du minerai de cobalt. Pour le molybdène et l'argent qui sont très localement abondants dans certains gisements, ont des teneurs et une localisation trop irrégulière ; le gisement d'argent du filon 7, renferme des réserves rentables et a été de ce fait, exploité en 1988.

Les arséniures et sulfoarséniures de Co, Ni et Fe les plus fréquents dans les gisements de cobalt de Bou-Azzer sont consignés dans le tableau 21. Pour les oxydés et selon le même auteur, on trouve :

- l'érythrine (arséniate de cobalt) ;
- annabergite (arséniate de nickel) ;
- arséniates divers complexes ;
- oxydes noirs cobaltifères.

Minerai	Formule chimique
Skuttérudite	CoAs ₃
Smaltine	(Co, Ni) As ₂
Safflorite	CoAs ₂
Glaucodot	(Co,Fe)AsS
Löllingite	FeAs ₂
Mispickel	FeAsS
Rammelsbergite	NiAs ₂
Nickélite	NiAs
Gersdorffite	NiAsS

Tableau 21. Principaux arséniures et sulfoarséniures de Co, Ni et Fer dans les gisements de cobalt de Bou-Azzer (M. Leblanc, 1975).

1.5. LES NIVEAUX DE PRODUCTION

Le District minier de Bou-Azzer a produit depuis 1930, 2 340 000 t de minerai tout venant à 1,22 % Co. Il a également produit plus de 5 000 t de nickel métal, 5 000 t d'amiante, 3 500 t de chromite et 200 000 t tout venant à 300 g Ag/t. La teneur de coupure de cobalt qui était de 1 %, est aujourd'hui de 0,6 %.

1.6. METHODE DE TRAITEMENT

1.6.1. Laverie gravimétrique

Au début de l'exploitation des gisements de cobalt, le minerai a longtemps été trié à la main et les résidus de scheidage sont traités à sec dans une laverie pneumatique. En 1958, après la mise en place d'une canalisation amenant de l'eau à Assaka, à partir de l'oued Azguermerzi près de Taznakht, la laverie actuelle de cobalt dont la capacité de traitement est de 70 000 t/an est mise en service.

Le minerai tout venant, après concassage, il suit un cycle de traitement sur Hancock jig, spirales de Humphrey et tables à secousses pour aboutir enfin à un concentré de cobalt titrant 10 à 12 % Co avec une récupération d'environ 92 %. Le minerai marchant est expédié par camions sur Agadir (296 km de la mine de Bou-Azzer), et contient également 2 à 2,5 % Ni, 7 à 7,5 % Fe, 1,5 à 2 % S, 5 à 6 % SiO₂, 58 à 60 % As, 1 200 à 1 250 g Ag/t et 11 à 12 g Au/t.

1.6.2. Usine hydrométallurgique

L'usine C.M.B.A (Cobalt métallurgique Bou-Azzer), a démarré en 1996. Le procédé de retraitement mis au point par le groupe O.N.A a pour objectif, la valorisation par lixiviation des anciennes haldes de cobalt du site de Bou-Azzer estimées à plus de 1 166 000 t, titrant 0,4 % cobalt. Après l'oxydation des haldes par arrosage, la valorisation comprend différents procédés de traitement hydrométallurgique :

- le prétraitement (mélange des haldes avec de l'eau) ;
- la lixiviation qui consiste à attaquer la pulpe par l'acide sulfurique concentré à 98 %. La mise en solution se fait dans 2 réacteurs avec un pH de 1,5 ;

- la clarification ou filtration qui se fait sur des filtres à bandes fonctionnants sous vide, le filtrat sera recyclé dans les réacteurs de lixiviation, tandis que le gâteau sera lavé. Les eaux de lavage sont recyclées et utilisées dans la lixiviation ;
- la purification (précipitation des arsénates de fer) : elle permet l'élimination des arsénates de fer par l'ajout du calcaire (pH = 4,5) et des sulfates de fer.

Le produit obtenu passe à travers un filtre presse, et subi une nouvelle lixiviation, puis une précipitation pour récupérer les traces du cobalt. Le filtrat sera ensuite précipité sous forme d'hydroxyde de cobalt par l'ajout de la chaux à raison de 10 kg/tonne tout venant.

D'autres réactifs sont consommés au niveau de cette unité hydrométallurgique. Il s'agit de : H_2SO_4 (340 kg/ TTV) ; FeSO_4 (40 kg/TTV) ; NaClO_3 (8 kg/TTV) ; CaCO_3 (67 kg/TTV) et NaCl (0,16 kg/TTV).

1. 7. CONCLUSION

Le District minier de Bou-Azzer, par ses gisements de cobalt, d'argent et de chromite, joue un rôle capital dans le développement socio-économique régional. En terme d'impact social, la mine de Bou-Azzer offre un grand nombre d'emplois qualifiés, et un nombre beaucoup plus conséquent d'emplois non qualifiés ou d'emplois de tâcherons.

En terme économique, la mine a créé des emplois pour les besoins de l'opération minière et les activités suscitées dans d'autres domaines de l'économie par l'apport de produits miniers. Ces effets multiplicateurs de la mine de Bou-Azzer ont une incidence très positive sur l'économie en général parce qu'elle a encouragé le développement régional. En revanche, cet impact positif ne doit pas avoir des répercussions négatives sur le milieu environnant, déjà accablé par des situations climatiques extrêmes (sécheresses prolongées, pluies agressives, vents chargés...) et à l'action incontrôlée de l'homme.

Les gisements de cobalt de Bou-Azzer se localisent généralement au contact des serpentines et parfois au sein des diorites quartziques qui affleurent en surface sur des grandes étendues. Ces structures d'âge Précambrien II inférieur et plus particulièrement les serpentines, renferment des anomalies en As, Co, Cu, Ni Les teneurs moyennes en arsenic dans les magnétites (principal minéral porteur de l'arsenic est de l'ordre de 300 g/t (M. Leblanc, 1975). Ces anomalies géochimiques d'origine naturelles, peuvent être aussi une source potentielle de pollution de l'environnement.

Les gros gisements de cobalt (Filons 7, 5 et 2), possédant quelques centaines de mètres en extension latérale et verticale, ont fait l'objet d'une exploitation intensive entre 1933 et 1950. A cette époque, la production se fait par un simple scheidage, avec une récupération de 50 %. De ce fait, il serait possible qu'une grande partie des rejets miniers très riches en arsenic et métaux lourds a été libérée dans le réseau hydrographique de l'oued Alougoum.

En outre, cette époque glorieuse de Bou-Azzer, coïncide avec certaines années pluvieuses qui ont connu des pluies torrentielles, jamais enregistrées durant ce siècle. Il s'agit des années 1954/1955 et 1955/1956, pendant lesquelles, les rejets miniers seraient certainement introduits dans la vallée de l'oued Alougoum.

CHAPITRE II

DIAGNOSTIC MINE DE BOU-AZZER ENVIRONNEMENT

INTRODUCTION

Sous ce chapitre, thème par thème, nous présenterons le résultat de nos observations et informations. Nous ne prétendons pas être exhaustifs mais ce constat a pu être enrichi et approfondi au cours des différentes phases réalisées. Ce diagnostic est basé sur les données analytiques, les visites sur le terrain et sur les informations recueillies sur un problème particulier ; il semble donner une image réaliste des problèmes actuels des exploitations minières de Bou-Azzer vis-à-vis de l'environnement.

Dans un premier temps, nous allons tenter de mettre en évidence les sources potentielles de pollution et de dresser un bilan quantitatif des rejets miniers dispersés tout au long de la boutonnière de Bou-Azzer.

A partir de ce bilan et des analyses chimiques effectuées sur les différents types de rejets, nous présenterons un bilan global de polluants minéraux disséminés dans ces rejets. Partant du principe que les stériles de mines bien qu'ils soient le résultat d'une activité minière doivent être associés à la notion « concentrations naturelles », nous allons décrire plus particulièrement les haldes de mines issues des différents procédés de traitement, d'autant plus que leur granulométrie (inférieure à 100 µm) et la quantité de polluants qu'elles recèlent, présentent un risque potentiel pour les eaux, les sols, les végétaux et pour la santé humaine.

II.1. ESTIMATION DES REJETS ANNUELS

II.1.1 Stériles de mines

Les stériles de mine découlent des travaux préparatoires, de recherches et travaux d'abattage. Les exploitations actuelles : Méchoui, Puits III, Bou-Azzer Est, Aghbar et Tamdrost génèrent annuellement plus de 16 400 tonnes de rejets stockés aux alentours immédiats des gisements.

II.1.2. Halles de mines

II.1.2.1. Rejets laverie gravimétrique

La laverie cobalt opérationnelle depuis 1956, traite actuellement, 60 000 à 70 000 t/an de tout venant titrant 0,6 à 1 % Co. Le concentré produit varie de 5 000 à 5 500 t/an, avec un rendement poids de 3,38 %, un rendement métal de 90 % et une récupération de l'ordre de 90 à 96 %. Cette laverie permet d'écouler annuellement vers la digue n° VIII (opérationnelle) 25 000 t de rejets fins riches en arsenic et métaux lourds. Elle génère également 32 800 t/an de rejets Hancock, dont une grande partie est utilisée dans le remblayage des tailles.

II.1.2.2. Rejets usine hydrométallurgique

L'usine hydrométallurgique démarrée en 1996, est conçue pour la revalorisation des anciennes halles de cobalt de la laverie gravimétrique qui titrent 0,4 % cobalt. Elle traite annuellement 60 000 à 70 000 t et produit 2 000 à 2 300 t de concentré contenant 10 à 11 % cobalt. Cette usine génère deux types de rejets :

☛ des résidus appelés rejets C.M.B.A, estimés à 60 000 t/an. Ces rejets fins sont riches en arsenic, métaux lourds et réactifs régulateurs de pH. Ils sont écoulés vers la digue dite C.M.B.A.

☛ des rejets très fins estimés à 9 800 t/an, très riches en arsenic et autres polluants. Ce sont des arséniates de fer qui résultent du procédé de la purification. Ces rejets sont stockés au voisinage immédiat de l'usine hydrométallurgique.

En total, les exploitations minières de cobalt implantées le long de la boutonnière de Bou-Azzer, permettent de générer annuellement plus de 130 000 t de rejets, dont environ 80 000 t de rejets fins, contenant de solides minéraux finement divisés en suspension généralement dans l'eau et qui contiennent aussi certains réactifs qui sont utilisés notamment, par le procédé de lixiviation.

II.2. FLUX DE POLLUANTS PAR SOURCE

La caractérisation des sources potentielles de pollution, a tout d'abord nécessité l'inventaire des exploitations anciennes et actuelles. Cela a commencé par la consultation des archives minières pour retrouver les traces d'activités. En suite, des visites sur le terrain ont été effectuées pour évaluer in situ le tonnage et la superficie occupée. Les sources potentielles de pollution sont classées en trois catégories :

1. les stériles de mines, ayant une dimension pouvant aller jusqu'à 50 cm. Ils couvrent une surface d'environ 9 hectares et sont évalués à **997 395 t** (cf, tableau 22, annexe 2).

2. les rejets Hancock : dont la granulométrie se situe entre 2 et 5 mm, ils proviennent de la laverie gravimétrique et sont estimés à **123 079 t** (cf, tableau 23, annexe 2). Ils sont stockés à proximité des exploitations minières et couvrent une superficie d'environ 2,5 hectares.

3. les haldes de mines : ce sont des particules fines généralement inférieures à 100 µm, générées par la laverie gravimétrique, la laverie d'argent, l'ancienne usine pilote de Bleida et l'usine hydrométallurgique C.M.B.A. Elles sont évaluées à **1 166 843 t** (cf, tableau 24, annexe 2) et occupent une superficie d'environ 15 hectares dans le sous bassin versant de Bou-Azzer.

II.3. BILAN GLOBAL DES REJETS MINIERS

Le tableau 25, correspond au bilan quantitatif des rejets minières stockés dans le District minier de Bou-Azzer. Ce bilan montre que l'activité minière entreprise depuis 1930, le long de la boutonnière de Bou-Azzer, a engendré la mise en place d'une décharge minière totalisant environ **2 287 317 t** de rejets arséniés. Les haldes de mines, représentent 51 % de l'ensemble des rejets produits, les stériles de mines 44 % et les rejets Hancock 5 % (Fig 19).

II.4. COMPOSITION CHIMIQUE DES REJETS MINIERS

Une campagne d'échantillonnage de roche en place a été effectuée. Elle couvre le District minier de Bou-Azzer, depuis le gisement de Méchoui à l'Ouest jusqu'aux filons d'Ait Ahmane à l'Est. Ces prélèvements ont pour objectif, l'identification des polluants présents sur chaque site et l'établissement d'un bilan global de polluants minéraux disséminés dans les rejets minières.

II.4.1. Méthodologie de prélèvement

Dans le but d'acquérir une information la plus riche et la plus représentative, nous avons récolté au niveau de chaque site, 50 échantillons d'un poids moyen de 1 kg pour chaque échantillon, ce qui fait un total de 50 kg. L'ensemble est mélangé, homogénéisé, puis quarté jusqu'à l'obtention de 5 lots de 1 kg chacun.

Nature des rejets	Tonnage
Stériles de mines	997 395
Digues cobalt	944 225
Digue CMBA	35 400
Digue argent	151 283
Digue cuivre	30 303
Arséniate de fer	5 632
Rejets Hancock	123 079
Total général	2 287 317

Tableau 25. Bilan quantitatif des rejets miniers stockés à l'intérieur du District minier de Bou-Azzer.

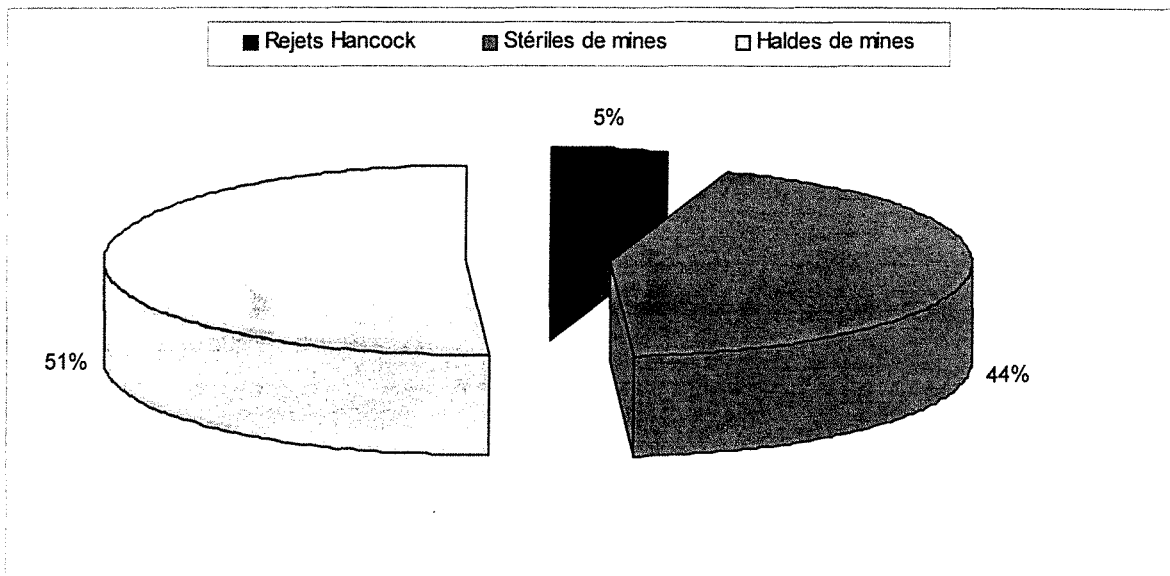


Fig 19. Répartition des flux de polluants par nature des rejets

II.4.2. Préparation des échantillons

La préparation des échantillons a été faite au laboratoire de Bou-Azzer. Les échantillons d'un poids moyen 1 kg chacun ont été concassés, lavés à l'eau puis séchés à 40 °C, avant de subir un broyage les ramenant à une granulométrie inférieure à 80 µm. Après le broyage, chaque échantillon a été homogénéisé, quarté de nouveau (diviseur à lame) jusqu'à l'obtention de 100 g de produit pour analyser l'arsenic et les métaux lourds et 100 g gardé comme témoin.

Les 4 échantillons ont été analysés séparément et la valeur retenue pour déterminer la quantité en chaque élément disséminée dans chaque type de rejet sera la valeur moyenne (arithmétique) des résultats.

II.4.3. Résultats analytiques

Les analyses chimiques sont effectuées par le laboratoire de REMINEX. Les espèces chimiques contenues dans les rejets de la mine de Bou-Azzer sont regroupées dans les tableaux 26 à 28, annexe 2.

- les stériles de mines, titrent en moyenne : 0,07 à 2,93 % As, 49 à 1 425 ppm Ni, 0,03 à 0,56 % Co, 41 à 1 066 ppm Zn et 30 à 810 ppm Cu.

- les rejets Hancock, présentent les teneurs moyennes suivantes : 0,01 à 0,76 % As ; 0,07 à 0,2 % Co ; 335 à 520 ppm Ni ; 13 à 53 ppm Pb ; 0,07 à 0,1% Mo ; 74 à 925 ppm Zn et 202 à 1 041 ppm Cu.

- les haldes de mines, titrent : 0,14 à 7,90 % As ; 176 à 3 374 ppm Ni ; 20 à 77,5 ppm Pb ; 0 à 1ppm Cd ; 0,01 à 0,14 % Cr ; 0,030 à 0,43 % Co ; 0,03 à 0,12 % Mo ; 71 à 530 ppm Zn et 372 à 3 000 ppm Cu.

II.5. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

II.5.1. Les haldes de mines

Le tableau 29 ci-dessous, met en relief les différentes espèces minéralogiques contenues dans les haldes de mines. La présence de la calcite dont on connaît pas les teneurs, pourrait minimiser le risque d'eaux acides générées par l'altération des sulfures, notamment, au niveau des anciennes haldes de l'usine pilote de Bleida qui contiennent beaucoup de pyrite. Il convient de signaler que les minéraux de sélénium ont été détectés récemment dans les gisements de cobalt de Bou-Azzer.

Sulfures et Arséniures	Oxydes et Hydroxydes	Carbonates	Silicates	Eléments
Saflorite	Magnétite	Sphéro-cobaltine	Quartz	Or
Pyrite	Rutile	Dolomite	argile	Graphite
Skuttérodite	Hématite	Calcite	Mica	-
Smaltine	Goethite	-	Feldspath	-
Chalcopyrite	Erythrine	-	Pyroxène	-
Orpiment	Branérite	-	-	-
Mispickel	Hétérogénite	-	-	-

Tableau 29. Composition minéralogique des haldes de mines (source : laboratoire de Bou-Azzer).

II.6. ESTIMATION DU RISQUE POTENTIEL DES HALDES DE MINES

Les haldes de mines sont constituées par d'anciens et actuels rejets de laveries cobalt, argent et rejets usine C.M.B.A. Ces rejets contiennent de l'arsenic et métaux lourds et présentent de ce fait, un risque notable pour l'environnement. En effet, les dispersions potentielles des particules fines chargées en polluants et micro-polluants soit par l'eau de surface, soit par le vent, peuvent avoir à la fois un effet de colmatage et un effet de pollution chimique par les éléments transportés par ces particules. De même, l'oxydation de ces haldes par voie bactérienne ou par des réactions purement chimiques, peut se traduire par la libération des eaux contaminées.

La figure 20, illustre la répartition et le positionnement des haldes dans le sous bassin versant de Bou-Azzer. Le secteur de Bou-Azzer centre, constitue le siège de tous ces résidus qui se sont accumulés au cours du temps, formant ainsi, des digues réparties en surface suivant le processus de traitement. Ces digues couvrent en surface 15 ha et se sont bâties sur des terrains d'âge, allant du Précambrien ancien (P1) au Précambrien II inférieur (cf. Fig 21).

Le souci d'intégrer les données géologiques et structurales des terrains porteurs des digues, nous a amené d'une part, à faire une description qualitative et quantitative de chacune de ces digues et à soulever les risques potentiels que représentent ces rejets vis-à-vis du milieu environnant d'autre part.

En général, les terrains sont affectés par de nombreux accidents tectoniques. Ces accidents se manifestent préférentiellement selon la direction N 20 à N 50. Ils constituent des voies privilégiées à l'infiltration des eaux chargées susceptibles de polluer les eaux souterraines.

Le tableau 30, met en relief la nature lithologique des terrains à Bou-Azzer centre.

Les digues N° I et N° II, forment le plus gros lot des rejets arséniés (626 000 t). Ils titrent : 2,46 % As, 659 ppm Ni, 66 % Pb, 0,35 % Co, 1 % Cd, 0,14 % Cr, 0, 10 % Mo, 155 ppm Zn et 520 ppm Cu. Ces rejets, font actuellement l'objet d'un recyclage à raison de 60 000 à 70 000 t/an par le procédé de lixiviation. Après avoir été labourées, ces haldes subissent un arrosage intensif pour augmenter la cinétique d'oxydation. Il s'agit des rejets stockés sur des gneiss, amphibolites, granites, diorites quartziques (digue I), gneiss (digue II), qui présentent des zones de fractures et

Fig 20 : Localisation des haldes de mines issues des unités de traitement de cobalt et d'argent.

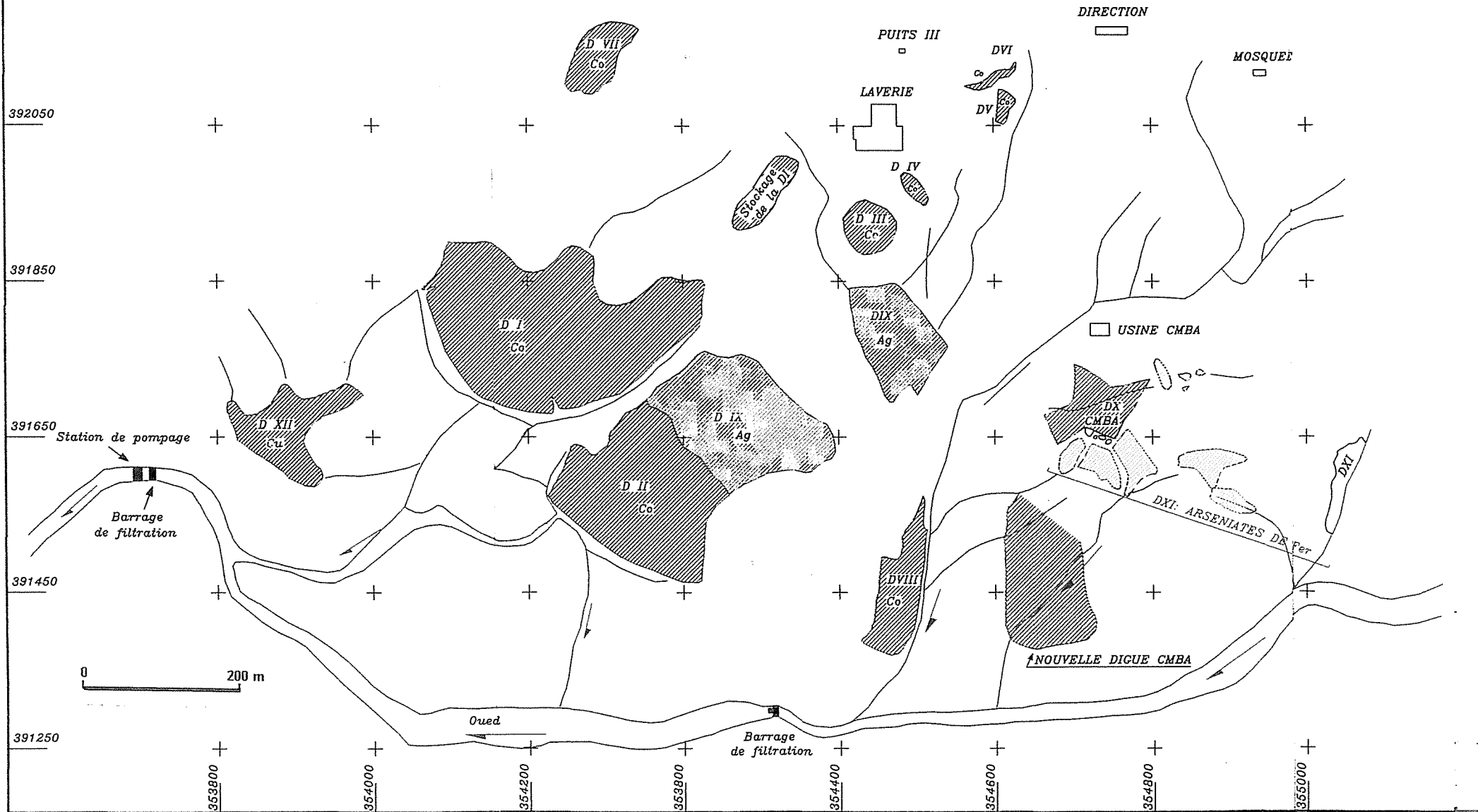
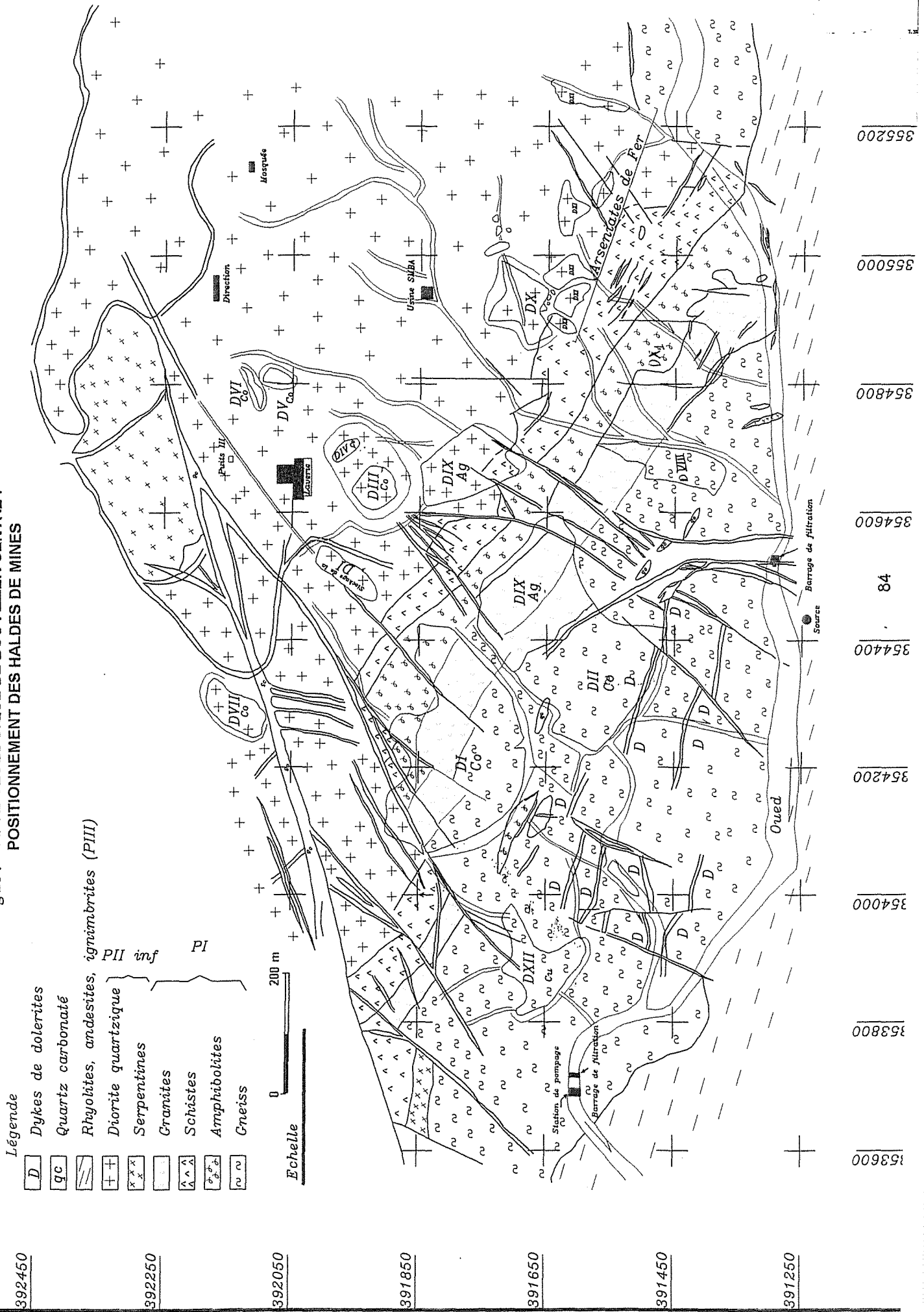


Fig 21 : CARTE GEOLOGIQUE DE BOU-AZZER CENTRE :
POSITIONNEMENT DES HALDES DE MINES



N° de la digue	Type de rejets	Nature lithologique des terrains
I	Co	Gneiss, amphibolites, granites, diorites quartziques
II	Co	Gneiss
III	Co	Diorites quartziques
IV	Co	Diorites quartziques
V	Co	Diorites quartziques
VI	Co	Diorites quartziques
VII	Co	Diorites quartziques
VIII	Co	Gneiss, granites
IX	Ag	Granites, diorites quartziques, schistes
X	Rejets C.M.B.A	Granites, diorites quartziques, schistes
XI	Arséniates de fer	Diorites quartziques
XII	Cu	Gneiss

Tableau 30. Nature lithologique des terrains porteurs des haldes de mines

d'altérations peu développées. La présence de l'eau et des impuretés favorisent l'oxydation et par conséquent, la libération des polluants et micro-polluants pouvant être entraînés en profondeur ou véhiculés par les eaux de ruissellement.

Les digues N° III, IV, V, VI, VII, totalisent 292 400 tonnes et forment des tas secs ou légèrement humides riches en arsenic. Elles sont bâties sur des diorites quartziques généralement massives et imperméables. Ces roches sont très peu altérées en surface et présentant parfois des fracturations localisées, le long des accidents sur lesquels peuvent exister des circulations en réseaux. Ces rejets ne semblent pas avoir d'effets induits directs importants sur les eaux souterraines. Toutefois, il faut être particulièrement vigilant sur des effets possibles sur les eaux de surface. La pollution physique liée à la charge en particules fines provoquées par des manifestations éoliennes pourrait perturber à l'évidence le milieu environnant.

La digue N° VIII est aujourd'hui opérationnelle, elle reçoit les pulpes de la laverie de cobalt. En Mars 1997, elle est constituée de 25 950 tonnes de produits fins chargés en arsenic et autres polluants en suspension dans l'eau. Ces résidus titrent en moyenne : 1,65 % As, 563 ppm Ni, 44 ppm Pb, 0,06 % Cr, 0,27 % Co, 0,11 % Mo, 230 ppm Zn et 388 ppm Cu. La digue est construite sur des gneiss et des granites surmontés d'arènes perméables.

La digue N° IX est composée des rejets de la laverie d'argent (151 283 t). Elle est construite sur des diorites quartziques et des schistes. Ces rejets finement divisés, contiennent en moyenne 2 % d'As, 0,05 % Cr, 0,26 % Co, 793 ppm Ni, 30,5 ppm Pb, 1 ppm Cd, 0,15 % Mo, 730 ppm Zn et 477,5 ppm Cu. Ils pourraient contenir également du mercure et certainement du cyanure, car ce sont des rejets qui résultent du procédé de traitement du minerai d'argent par cyanuration.

La nouvelle digue N° X a été aménagée pour recevoir les rejets découlant de la revalorisation des haldes des digues N° I et II. Elle totalise 35 400 t de rejets sous forme de pulpe composée de particules fines associées à des réactifs régulateur du pH, des réactifs utilisés pour l'élimination des arséniates de fer (calcite et sulfate de fer) et des réactifs ayant permis la précipitation des hydroxydes de cobalt et plus particulièrement, la chaux. Ces rejets, présentent des teneurs moyennes de 0,72 % As, 296 ppm Ni, 15 ppm Pb, 0,11 % Cr, 0,10 % Co, 0,12 % Mo, 95 ppm Zn et 372 ppm Cu. Ils sont stockés sur des diorites quartziques, amphibolites, granites et gneiss généralement altérés. Ces rejets pourraient avoir un impact négatif sur l'environnement, en raison des eaux usées agressives (pH faible) et des effets induits directs de certains réactifs pouvant favoriser la solubilisation de l'arsenic et les métaux lourds.

La digue N° XI, représente les rejets ultimes de l'usine C.M.B.A. Ce sont des arséniates de fer très riches en arsenic, libérés à l'état humide sous forme de particules très fines, et qui titrent en moyenne 7,9 % As, 209 ppm Ni, 41 ppm Pb, 1 % Cd, 0,02 % Cr, 1,18 % Co, 0,09 % Mo, 150 ppm Zn et 1 239 ppm Cu. En Mars 1997, ces rejets sont estimés à 5 632 t. Ils sont stockés sur des diorites quartziques et présentent des conditions idéales à toutes formes de dégradation et d'altération ; d'abord par le vent qui favorise le transport des fines, ensuite l'effet d'oxydation susceptible de générer des polluants sous formes soluble, plus mobiles et plus toxiques.

La digue N° XII, n'est autre que les anciennes haldes de cuivre de l'usine pilote de Bleida. Ces haldes évaluées à 30 303 t sont stockées sur des gneiss faiblement altérés. Elles contiennent de la pyrite, chalcopryrite et autres sulfures des gisements de cuivre de Bleida et contiennent en moyenne : 0,14 % As, 179 ppm Ni, 21 ppm Pb, 0,01 % Cr, 0,03 % Co, 0,03 % Mo, 72 ppm Zn et 3 000 ppm Cu. La présence des sulfures, peut donner naissance au développement des eaux acides pouvant dissoudre l'arsenic et métaux lourds dans le système fluvial du sous bassin versant de Bou-Azzer.

II.6.1. Essais de mise en solution des haldes de mines

Ces essais sont très utiles pour pronostiquer et évaluer la stabilité et l'impact de ces produits sur le milieu environnant. Ils portent sur deux échantillons représentatifs des arséniates de fer (digue XI) et sur quatre échantillons représentatifs des digues CMBA (N° X), Co (N° VIII), Ag (N° IX) et Cu (N° XII).

Les tests ont été réalisés dans un premier temps sur un échantillon porphyrisé (inférieur à 40 µm) et un échantillon brute (inférieur à 100 µm) des arséniates de fer. Puis ultérieurement sur les autres échantillons représentatifs des autres digues, dont la granulométrie est également inférieure à 100 µm. Le temps de contact avec l'eau déminéralisée pour les arséniates de fer est de 2 semaines, 4 et 6 semaines (échantillon porphyrisé), 6 semaines (échantillon brute) et 5 semaines pour les autres échantillons.

II.6.1.1. Mode opératoire

Les échantillons de 100 g chacun ont été séchés à 40 °C jusqu'à poids constant dans une étuve, puis des aliquotes de 100 mg chacune pour chaque échantillon ont été prélevées selon la méthode des quartiers (Afnor, 1991) et introduites séparément, avec 100 ml d'eau déminéralisée dans des flacons de polyéthylène.

Ces échantillons ont été placés dans un agitateur en va et vient . Ce dispositif consiste à stimuler les échantillons pour augmenter la cinétique du lessivage. L'agitateur est réglé suivant la norme française 100 tr/mn, avec une amplitude de 20 mm.

Après écoulement du temps fixé pour chaque échantillon, on a prélevé 30 ml de produit dans chaque flacon qui sera filtré (microfibre de verre). Les filtrats sont ensuite acidifiés pour stabiliser les produits avant d'être analysés au laboratoire de pédologie biologique de Nancy (CNRS).

II.6.1.2. Dosage de l'arsenic et métaux lourds

Dans chaque série de minéralisation, un blanc d'attaque et un échantillon de référence ont été inclus. La concentration en arsenic et métaux en solution a été déterminée par spectrométrie d'absorption atomique (AAS) en flamme.

II.6.1.3. Résultats et discussions

Les résultats d'analyses chimiques sont consignés dans le tableau 31.

Arséniates de fer								
N° échan	Durée d'agitation (semaines)		As	Co	Ni	Pb	Cu	Zn
1	2	µg/l	2 628,5	1 987,3	226,3	-	595,3	608,5
2	4	µg/l	3 599,9	1 744,1	312,7	1,5	629,7	1 124,3
3	6	µg/l	4 679,3	1 867,4	216	1,53	679,7	1 116,7
4 (brute)	6	µg/l	2 743,8	1 621,4	179,8	3,2	496,8	1 723,7

Rejets cobalts								
digue CMBA	5	µg/l	10 340	5,2		-	2,2	2,7
digue Co	5	µg/l	6 308,6	56	10,2	-	6,6	58,9
digue Ag	5	µg/l	1 546,8	11,34	-	-	0,38	50,2
digue Cu	5	µg/l	174,5	12,4	-	-	8,3	31,3

Tableau 31. Résultats chimiques des tests de lixiviation des haldes de mines.

La figure 22, représente l'évolution de la solubilité des haldes de mines en fonction du temps. On constate que l'échantillon porphyrisé des arséniates de fer, après 6 semaines de contact avec l'eau déminéralisée n'a pas atteint l'équilibre de dissolution.

En effet, l'arsenic possède l'efficacité potentielle la plus élevée que celles du Co et Ni, avec une teneur d'environ 4 679 µg As/l. Par conséquent, les arséniates de fer sont instables et leur solubilité est fonction de la granulométrie comme le montre les analyses de l'échantillon brute (2 743 µg As/l).

Les rejets constituant la digue C.M.B.A (N° X) et la digue Co (N° VIII), après 5 semaines de contact avec l'eau déminéralisée, libèrent de l'arsenic dans le milieu aqueux, avec des teneurs respectivement de 10 340 µg As/l et 6 308,6 µg As/l. C'est plutôt la digue C.M.B.A, qui présente un très haut degré de probabilité de contamination.

Ces tests de mise en solution, permettent donc de confirmer la dissolution lente des haldes de mines et l'existence d'un risque de pollution des eaux d'inhibition et de percolation à travers les stocks accumulés sous forme de digues dans le centre minier de Bou-Azzer.

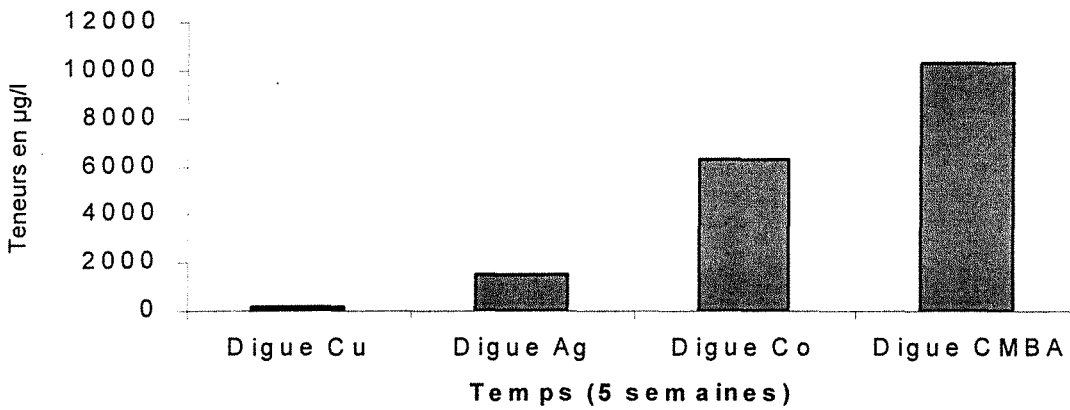
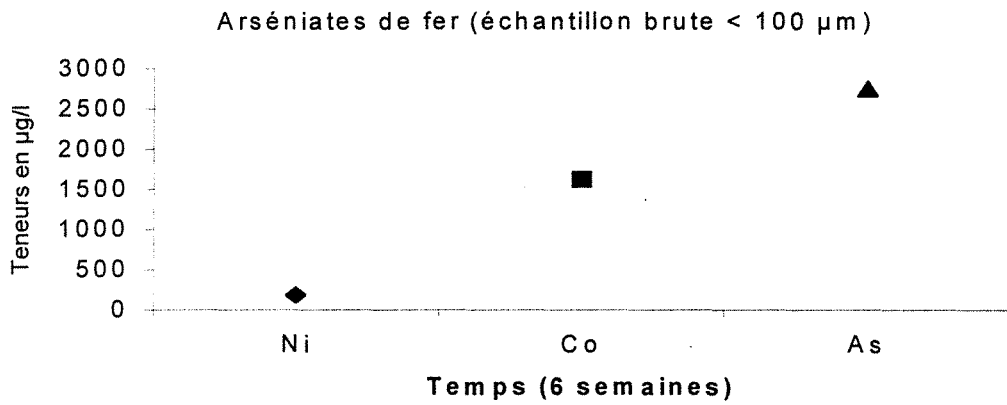
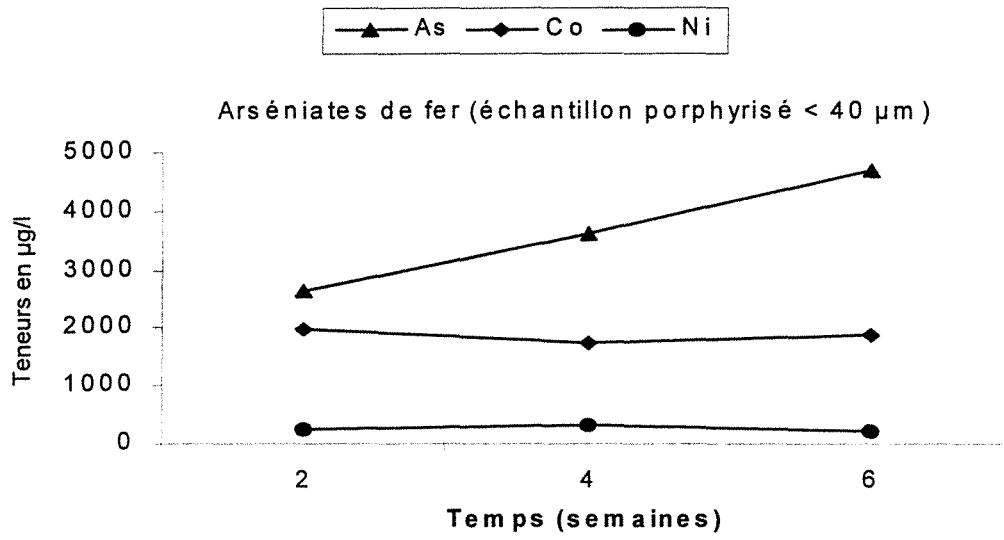


Fig 22 : Evolution de la solubilité des haldes de mines en fonction du temps et de la granulométrie.

II.7. BILANS QUANTITATIFS DE POLLUANTS MINÉRAUX DISSEMINÉS DANS LES REJETS MINIERS

A partir des analyses chimiques, nous avons établi des bilans quantitatifs de polluants minéraux stockés sous forme solide dans chaque type de rejet.

II.7.1. Les stériles de mines

Ils contiennent, 12 280 tonnes de polluants minéraux dont 8 503 t d'As, 1 521 t Co, 862 t Ni et 483 t Cr (cf, tableau 32, annexe 2).

II.7.2. Les rejets Hancock

Ces rejets renferment, 451 t d'As, 207 t Co, 56 t Ni (cf, tableau 33, annexe 2).

II.7.3. Les haldes de mines

Elles recèlent approximativement, 24 763 t d'As, 3 525 t Co, 725 t Ni, 1 116 t Cr (cf, tableau 34, annexe 2).

Le tableau 35, correspond au bilan global de polluants minéraux stockés dans les rejets miniers engendrés par les activités minières de Bou-Azzer. Ce bilan montre un stock global d'environ **46 135 t** de polluants minéraux, dont **33 717 t** d'arsenic, **5 253 t** Co, **1 642 t** Ni, **1 599 t** Cr et **100 t** Pb. L'arsenic disséminé dans les haldes de mines, représente 74 % par rapport au tonnage total, contre 25 % dans les stériles de mines et 1 % dans les rejets Hancock (Fig 23).

	As	Ni	Pb	Cd	Cr	Co	Mo	Zn	Cu
Rejets laveries et usine CMBA	24 763	725	68	1,56	1 116	3 525	1 787	227	693
Stériles de mines	8 503	862	27	0,01	483	1 521	220	305	349
Rejets Hancock	451	56	5	0,11	-	207	112	66	63
Total	33 717	1 642	100	1,68	1 599	5 253	2 119	598	1 105

Tableau 35. Bilan global des polluants minéraux disséminés dans les rejets miniers de Bou-Azzer.

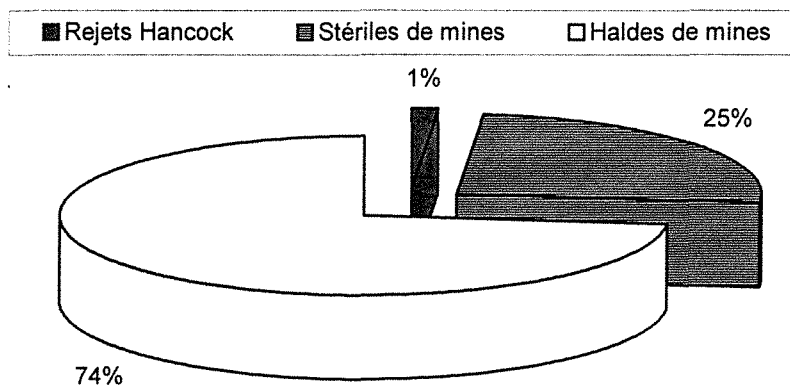


Fig 23. Répartition de l'As par nature de rejets.

II.8. CONCLUSION

Les principaux traits qui résultent de ce diagnostic concernant la mine de Bou-Azzer, se résument comme suit :

Les exploitations actuelles et les exploitations anciennes de Bou-Azzer, ont généré trois types de rejets :

1. les stériles de mines, dont le tonnage s'élève à 997 395 tonnes et qui doivent être associés à la notion de « concentrations naturelles » bien qu'ils soient le résultat d'une activité minière ;

2. les rejets Hancock, issus de la laverie gravimétrique et qui sont estimés à 123 079 t. Ces rejets, présentent une granulométrie comprise entre 2 et 5 mm ;

3. les haldes de mines, générées par les unités de traitement de cobalt, d'argent et de cuivre. Ces haldes sont stockées sous forme de digues et totalisent 1 166 843 t. Ces digues sont bâties sur des terrains généralement imperméables, mais, qui sont affectés par des déformations cassantes, le long desquelles les circulations, peuvent contaminer les eaux souterraines exploitées à titre d'eau potable le long de la boutonnière de Bou-Azzer.

Ces sources potentielles de pollution, contiennent des contaminants (As, Ni, Pb, Cd, Cr, Co, Mo, Zn, Cu...), qui sous forme ionique ou combinés chimiquement sont susceptibles d'exercer des effets toxiques sur les organismes végétaux et animaux à partir d'une certaine concentration. En effet, ces sources de pollution, recèlent approximativement 46 135 tonnes de polluants et micropolluants repartis comme suit :

- stériles de mines : 12 270 t dont 8 503 t d'arsenic ;
- rejets Hancock : 960 t dont 451 t d'arsenic ;
- haldes de mines : 32 905 t dont 24 763 t d'arsenic.

Ce sont les haldes de mines, qui pèsent énormément sur le milieu avoisinant la mine à court terme, mais aussi bien à long terme. En effet, elles présentent une granulométrie généralement inférieure à 100 µm et contiennent 74 % d'arsenic produit jusqu'à présent. Elles sont instables au point de vue chimique comme le montre les tests de solubilité, avec des teneurs en arsenic libérées dans le milieu aqueux qui s'élèvent à 10 340 µg As/l pour les rejets C.M.B.A et 6 309 µg As/l pour les rejets de la laverie gravimétrique. En plus, elles présentent une source de poussière qui risque de contaminer toutes les zones limitrophes, d'autant plus que les vents sont souvent violents dans cette région et les particules transportées, peuvent voyager sur des grandes distances.

Quant on connaît à titre d'exemple que la valeur maximale admissible fixée par toutes les normes pour l'eau potable est de 10 µg As/l ; il s'agit en réalité d'un problème potentiel pour lequel nous devons faire face pour éloigner toutes les menaces qui pèsent sur l'environnement.

Pour les métaux lourds disséminés dans ces rejets, ils peuvent être transporter sous différentes formes : métal complexé (en solution), métal adsorbé y compris l'adsorption biologique, métal précipité, métal sous forme d'ion libre. Les formes mobiles qui permettent la migration de ces polluants dans l'aquifère, correspondent soit à des ions métalliques (forme libre), soit à des ions complexés.

QUATRIEME PARTIE

ANALYSE DES FORMES DE DISPERSIONS POTENTIELLES DES POLLUANTS DANS LES ZONES D'UTILISATION DE L'EAU

CHAPITRE I : ANALYSE DES EAUX USEES DE LA MINE

CHAPITRE II : ANALYSE DES EAUX DE SURFACE A LA SORTIE DU
BARRAGE DE TIZGUI

CHAPITRE III : GEOCHIMIE DES SEDIMENTS DE L'OUED ALOUGOUM

CHAPITRE IV : ANALYSE DES EAUX DE SURFACE DESTINEES A
L'IRRIGATION

CHAPITRE V : ANALYSE DES EAUX SOUTERRAINES DESTINEES A LA
CONSOMMATION HUMAINE

CHAPITRE I

ANALYSE DES EAUX USEES DE LA MINE

INTRODUCTION

L'étude des tendances relatives aux quantités de polluant libérés par les haldes de mines, nécessite tout d'abord l'analyse des concentrations dans les eaux usées, générées par les digues opérationnelles ; digues N° VIII et N° X. Ces digues sont aménagées pour recevoir respectivement les pulpes de la laverie gravimétrique et les résidus de l'usine hydrométallurgique.

1.1. NIVEAU DE CONTAMINATION DES EAUX USEES DE LA MINE

1.1.1. Prélèvements réalisés

Les échantillons d'eau usée ont été prélevés à la sortie des digues cobalt N° VIII, N° X (digue C.M.B.A) et à la sortie laverie cobalt. En total, 20 échantillons ont été collectés pour analyser l'arsenic et métaux lourds

1.1.2. Méthodologie de prélèvement

➤ Echantillonnage continu proportionnel au débit

Dans ce système, l'échantillonnage se fait en même temps que la mesure du débit. Cette mesure se fait généralement par une méthode physique, livrant un signal utilisable pour commander l'échantillonneur (M. F. EDELINE, 1992).

Par manque de ce dispositif, nous avons utilisé un récipient gradué pour l'échantillonnage et un chronomètre pour mesurer le débit. Bien que dénommé continu, ce système est en réalité discontinu, mais, porte sur des durées courtes (10 minutes). Les échantillons élémentaires sont accumulés dans le récipient, où il a été prélevé un litre d'eau brute pour analyser les formes totales et un litre d'eau filtrée (micro-filtre en acétate de cellulose < 0,45 µm) pour doser les formes solubles. Cette technique peut donner la composition moyenne exacte de l'eau pendant les tranches de temps considérées, mais ne donne aucune information sur les valeurs extrêmes instantanées. Pour des raisons techniques, nous n'avons pas pu filtrer l'eau à la sortie de la laverie cobalt.

1.1.3. Résultats et discussions

Le dosage de l'arsenic et autres polluants a été réalisé au laboratoire de REMINEX. Les résultats d'analyses chimiques sont récapitulés dans le tableau 36, annexe 3.

La composition chimique des eaux usées, se présente comme suit :

➔ forme totale

- sortie laverie cobalt : 77 500 µg As/l, 5,7 µg Se/l, 8 500 µg Co/l, 5 670 µg Ni/l, 130 µg Pb/l, 4 400 µg Fe/l, 20 µg Bi/l ;
- sortie digue cobalt : 42 900 µg As/l, 14,3 µg Se/l, 460 µg Co/l, 430 µg Ni/l, < 70 µg Pb/l, 1 100 µg Fe/l, 70 µg Bi/l;
- sortie digue C.M.B.A : 73 720 µg As/l, 4,1 µg Se/l, 11 300 µg Co/l, 1 440 µg Ni/l, 80 µg Pb/l, 1 000 µg Fe/l, 64 µg Bi/l.

➔ fraction soluble

- sortie digue cobalt : 41 500 µg As/l, 13,4 µg Se/l, 250 µg Co/l, 360 µg Ni/l, < 70 µg Pb/l.
- sortie digue C.M.B.A : 71 280 µg As/l, 3,8 µg Se/l, 11 300 µg Co/l, 1 370 µg Ni/l, 80 µg Pb/l, 100 µg Fe/l.

➔ forme particulaire:

- sortie digue cobalt : 1 400 µg As/l, 0,9 µg Se/l, 210 µg Co/l, 70 µg Ni/l, < 70 µg Pb/l, 1 100 µg Fe/l, 70 µg Bi/l.
- sortie digue C.M.B.A : 2 440 µg As/l, 0,3 µg Se/l, 70 µg Ni/l, 900 µg Fe/l, 64 µg Bi/l.

D'après ces résultats, on peut en déduire les informations suivantes :

➔ l'arsenic, le sélénium et le nickel sont quasiment sous la forme soluble (< 0,45 µm) dans les eaux usées générées par la digue cobalt N° VIII et la digue C.M.B.A N° X (Fig 24).

➔ le cobalt et le plomb sont totalement dissous dans les eaux usées de la digue C.M.B.A. Par contre, ils présentent des formes particulières respectivement de 210 µg Co/l, < 70 µg Pb/l dans les eaux usées de la digue cobalt (Fig 25).

➔ le fer et le bismuth, se trouvent à l'état particulaire au niveau des eaux de la digue cobalt. Dans les eaux libérées par la digue C.M.B.A, le fer indique une forme particulaire de l'ordre de 900 µg/l, alors que le bismuth est totalement particulaire (64 µg/l) (Fig 26).

➔ en terme de quantité, les eaux usées de la digue C.M.B.A sont chargées en As, Co, Ni, Pb, Cu, Zn, Mn, Mo et Bi sous forme soluble ; cela est dû à la mise en solution (lixiviation) des anciennes haldes et à l'utilisation de certains réactifs régulateurs du pH.

➔ le Se, Cr, et Fe se trouvent beaucoup liés aux eaux usées de la digue cobalt.

➔ la fraction soluble en arsenic au niveau des digues opérationnelles représente 97 %, par rapport à la forme totale, contre 3 % pour les formes particulières (Fig 27).

1.2. BILAN QUANTITATIF ANNUEL DE POLLUANTS A LA SORTIE DES DIGUES

Les niveaux de concentration en arsenic et éléments associés dans les eaux usées, permettent d'établir un bilan global annuel approximatif de polluants susceptibles d'être générés par les haldes de mines. Le mode de calcul proposé, doit tenir compte des paramètres climatiques et hydrologiques du sous bassin versant de Bou-Azzer et de la consommation annuelle en eau des unités de traitement. Ainsi, la valeur quantitative probable libérée en chaque espèce chimique pourra être obtenue, en multipliant la teneur de chaque élément par le volume ruisselé annuellement. Les données hydrologiques concernant les haldes de mines sont exposées au tableau 37, où figurent :

- la superficie occupée par les digues ;
- la quantité d'eau déversée dans les digues opérationnelles (celle ci supposée égale à la consommation annuelle des deux unités de traitement ;
- l'apport d'eau annuel (précipitations) ;
- les infiltrations ;
- le ruissellement ;
- l'évaporation.

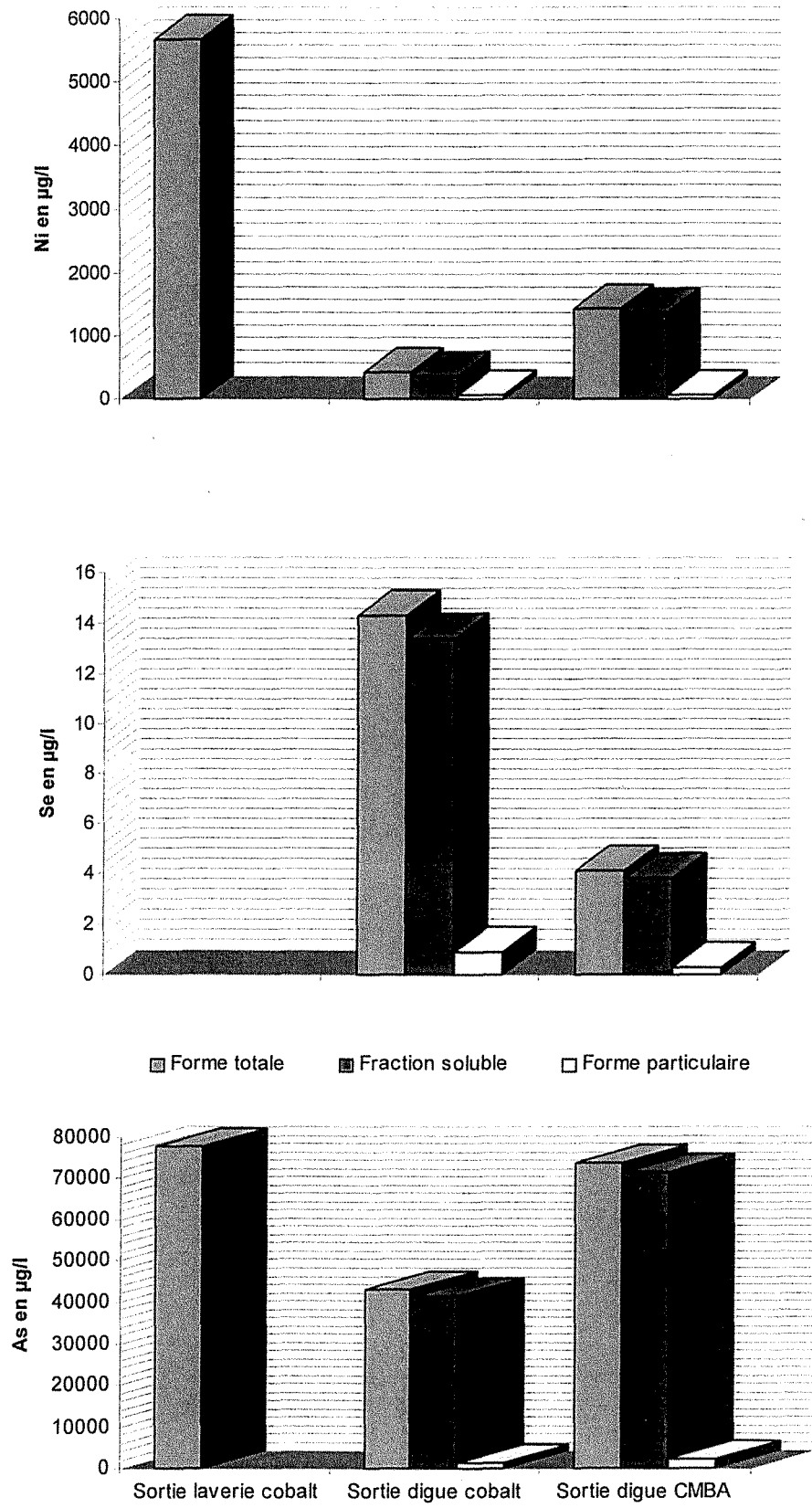


Fig 24. Teneurs en As, Se et Ni dans les eaux usées de la mine.

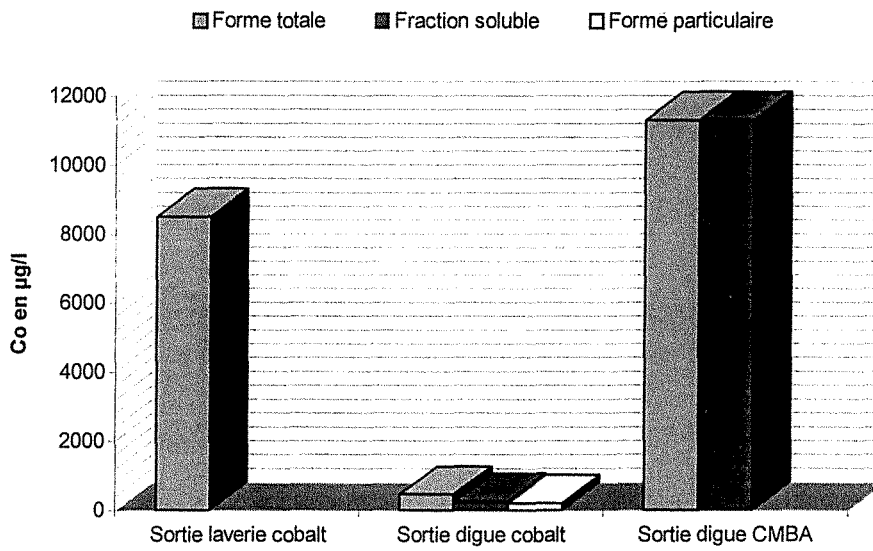
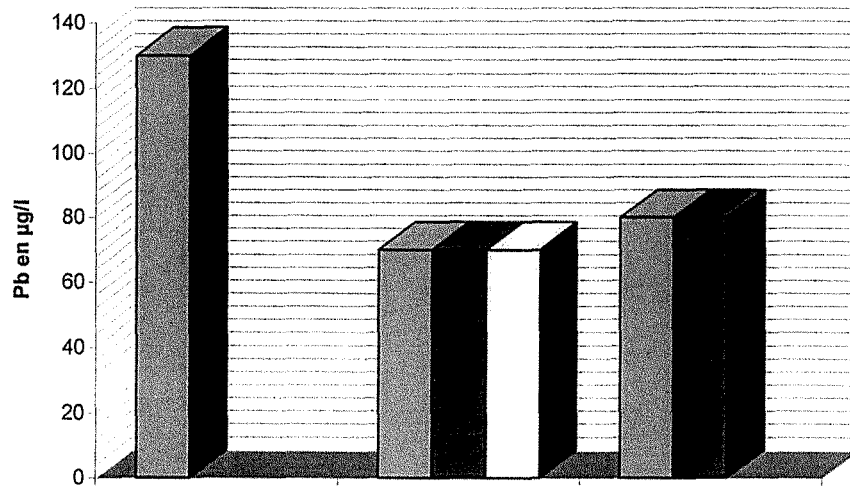


Fig 25. Teneurs en Co et Pb dans les eaux usées de la mine.

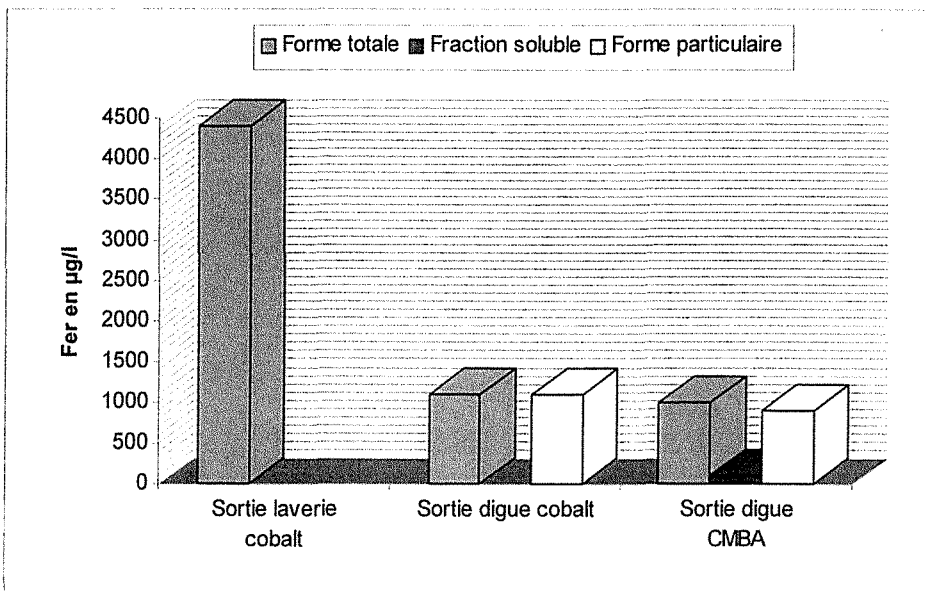
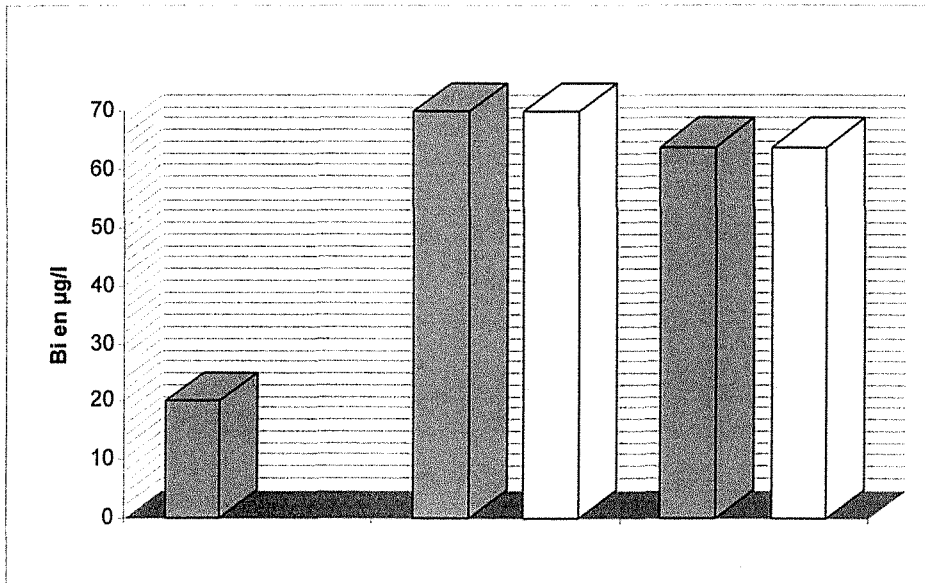


Fig 26. Teneurs en Fer et Bi dans les eaux usées de la mine.

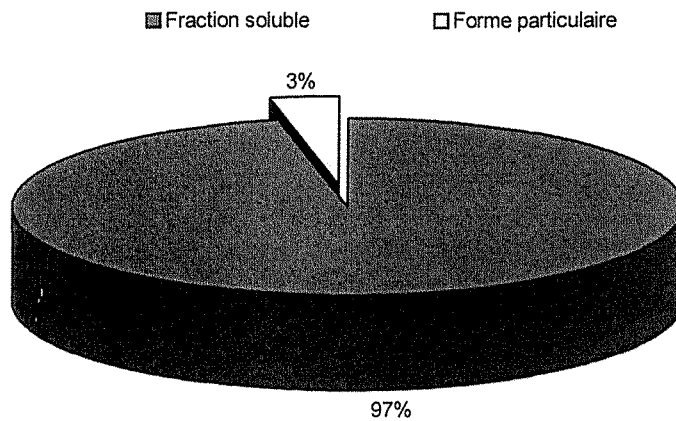


Fig 27. Répartition de l'As soluble et particulaire par rapport à la teneur totale dans les eaux usées des digues cobalt et C.M.B.A.

	Digue cobalt N° VIII	Digue C.M.B.A N° X	Autres digues (Co, Cu, Ag, Arséniate de fer)
Superficie occupée (m ²)	7 500	7 000	139 587
Pluviométrie annuelle en mm	84	84	84
Consommation moyenne annuelle laverie cobalt et usine CMBA (m ³)	105 000	78 000	-
Apport annuel (pluviométrie) (m ³)	630	560	11 725
Total (m ³). (1)	105 630	78 560	11 725
Evaporation (90 %) (m ³)	95 067	70 704	10 552
Infiltration (1) x 3 % (m ³)	3 169	2 357	352
Ruissellement (1) x 7 % (m ³)	7 394	5 499	821

Tableau 37. Bilan hydrologique des haldes de mines .

Le tableau 38 annexe 3, correspond au bilan global annuel approximatif de polluants minéraux à la sortie des digues. Il y a lieu de signaler que les quantités de polluants susceptibles d'être véhiculées par les pluies diluviennes déclenchées par les averses ne sont pas prises en compte. Dans des conditions similaires aux prises d'échantillons, les formes de dispersion et les quantités libérées annuellement sont les suivantes :

➔ forme totale :

- digue cobalt N° VIII : 317 kg As/an ; 3,4 kg Co/an ; 3,2 kg Ni/an et 0,105 kg Se/an ;
- digue CMBA N° X : 405 kg As/an ; 62 kg Co/an ; 7,92 kg Ni/an et 0,022 kg Se/an ;
- autres digues : 35 kg As/an ; 0,38 kg Co/an ; 0,35 kg Ni/an ; 0,012 kg Se/an.

➔ fraction soluble

- digue cobalt N° VIII : 307 kg As/l ; 1,8 kg Co/an ; 2,7 kg Ni/an ; 0,09 kg Se/an ;
- digue CMBA N° X : 392 kg As/an ; 62 kg Co/an ; 7,53 kg Ni/an ; 0,02 kg Se/an ;
- autres digues : 34 kg As/an, 0,21 kg Co/an ; 0,3 kg Ni/an ; 0,01 kg Se/an.

➔ forme particulaire :

- digue cobalt N°VIII : 10 kg As/an ; 1,6 kg Co/an ; 0,5 kg Ni/an ; 0,001 kg Se/an ;
- digue CMBA : 13 kg As/an ; 0,39 kg Ni/an ; 0,002 kg Se/an ;
- autres digues : 1 kg As/an ; 0,17 kg Co/an ; 0,05 kg Ni/an ; 0,002 kg Se/an.

Le fait d'intégrer les données hydrologiques des haldes de mines et la composition chimique des eaux usées de la mine, nous a amené à chiffrer un ordre de grandeur de la quantité d'arsenic générée annuellement par les haldes de mines.

En effet, cette quantité est d'environ **757 kg** d'arsenic, dont **733 kg** sous forme soluble et **24 kg** sous forme particulaire (Fig 28). On remarque qu'en l'absence d'eau, les digues I, II, III, IV, V, VI, VII, IX, XI et XII sont certainement moins génératrices d'arsenic. En revanche, les digues opérationnelles (N° VIII et X), semblent avoir d'effets négatifs importants, puisqu'elles contribuent jusqu'à 95 % d'arsenic total libéré dans le système fluvial du sous bassin versant de Bou-Azzer, dont 97 % sous forme soluble..

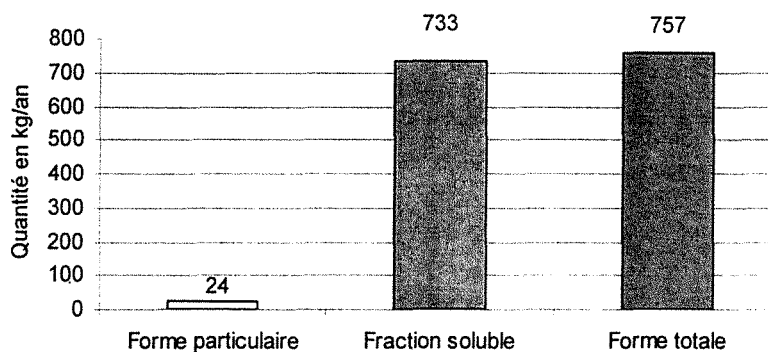


Fig 28. Arsenic en kg/an sous forme totale, soluble et particulaire généré par les haldes de mines.

1.3. CONCLUSION

Les eaux résiduaires générées par les digues opérationnelles N° VIII (digue cobalt) et N° X (digue C.M.B.A), présentent des teneurs en arsenic excessives qui dépassent largement le seuil de tolérance fixé pour les rejets directs publiés par le C.N.E en 1960 (0,1 mg As/l). Ces teneurs sont respectivement de l'ordre de 42,6 mg As/l (digue cobalt) et 73,72 mg As/l (digue C.M.B.A). De même, la teneur en cobalt dans les eaux usées libérées par les rejets de la digue C.M .B.A s'élève à 11,3 mg Co/l, contre 0,5 mg Co/l, fixée comme valeur limite admissible

Le sélénium est lié aux rejets des digues cobalt, avec des teneurs de 14,3 µg Se/l sous forme totale et 13,4 µg Se/l sous forme soluble, contre 4,1 µg Se/l (forme totale) et 3,8 µg Se/l (fraction soluble) dans les eaux usées de la digue C.M.B.A.

La dispersion de l'arsenic, cobalt, nickel et sélénium, à partir de la digue cobalt, montre des formes dissoutes, respectivement de 97 % As, 54 % Co, 84 % Ni et 94 % Se. Au niveau de la digue C.M.B.A, ces formes solubles, représentent 97 % As, 100 % Co, 95 % Ni et 93 % Se. Il paraît nettement que l'arsenic et le sélénium sont facilement libérés, dissous est transportés en solution.

Les fortes teneurs en arsenic total et soluble sont liées à la digue C.M.B.A, comme le montre les tests de mise en solution de ces rejets et la composition chimique des eaux usées à la sortie de cette digue. En effet, les formes solubles s'élèvent à **71,28 mg As/l**, contre **41,5 mg As/l** pour les eaux générées par la digue cobalt.

Sur le plan quantitatif, telle qu'elle ressort des analyses chimiques, les haldes de mines, génèrent annuellement :

← forme totale

757 kg d'arsenic, 66 kg de cobalt, 11 kg de nickel et 0,14 kg de sélénium ;

← fraction soluble

733 kg d'arsenic, 64 kg de cobalt, 10 kg de nickel et 0,12 kg de sélénium ;

← forme particulaire

24 kg d'arsenic, 2 kg de cobalt, 1 kg de nickel et 0,02 kg de sélénium.

Quant on connaît à titre d'exemple, que les valeurs maximales admises en arsenic pour l'eau potable et l'eau de surface destinées à l'irrigation sont respectivement de 50 µg As/l (fraction soluble) et 100 µg As/l (forme totale) ; il s'agit donc des quantités susceptibles de contaminer 15 Mm³ d'eau destinée à la consommation humaine et 8 Mm³ d'eau de surface destinée à l'irrigation.

CHAPITRE II

ANALYSE DES EAUX DE SURFACE A LA SORTIE DU BARRAGE DE TIZGUI

INTRODUCTION

Les eaux de surface drainées par l'Assif N'Talkherte, depuis le barrage de Tizgui jusqu'à son confluent avec l'oued Alougoum sont exploitées pour l'irrigation des terres le long de la vallée de l'oued Alougoum. La qualité de cette eau, ainsi que les flux migratoires d'arsenic et métaux lourds du barrage de Tizgui vers le système fluvial de l'oued Alougoum seront examinés dans ce chapitre.

II.1. NIVEAU DE CONTAMINATION DES EAUX A LA SORTIE DU BARRAGE

II.1.1. Méthodologie de prélèvement

La technique de prélèvement des eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui, repose sur l'échantillonnage discontinu couplé à une mesure de débit. Les échantillons d'un litre chacun sont prélevés de façon instantanée à cadence fixe (un quart d'heure), jusqu'à concurrence de 10 litres. L'ensemble est mélangé dans un récipient, où on prélève un litre d'eau filtré pour analyser les fractions solubles et un litre d'eau brute pour analyser les formes totales et particulaires. La conservation des échantillons a été faite par l'acide nitrique ultrapur et les analyses chimiques sont réalisées par le laboratoire de REMINEX.

Il convient de signaler que la forme totale d'un élément dans l'eau, correspond à la somme de la fraction soluble et des particulaires.

II.1.2. Interprétation des Résultats

Les résultats analytiques sont donnés par le tableau 39, annexe 3. Les teneurs en As, Co et Se présentées par la figure 29, se résument comme suit :

- formes totales : 2 980 µg As/l ; 170 µg Co/l ; 4,64 µg Se/l ;
- fractions solubles : 2 890 µg As/l ; 130 µg Co/l ; 4,49 µg Se/l ;
- formes particulaires : 90 µg As/l ; 40 µg Co/ ; 0,15 µg Se/l.

Les teneurs en sulfates et sodium sont de 295 mg SO_4^{2-} /l et 103 mg Na/l. S'agissant des autres polluants : Ni, Cd, Cr, Pb, Cu, Zn, Mn, Fe, Mo et Bi, les niveaux de concentration, ne laissent pas présumer pour ces derniers une contribution notable de la mine.

Ces analyses font apparaître 2 remarques :

1. les fractions solubles en As, Co et Se, des eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui, représentent 97 % par rapport aux teneurs totales pour l'arsenic, le sélénium et 76 % pour le cobalt.
2. le bismuth et le molybdène se trouvent totalement à l'état soluble à la sortie du barrage de Tizgui.

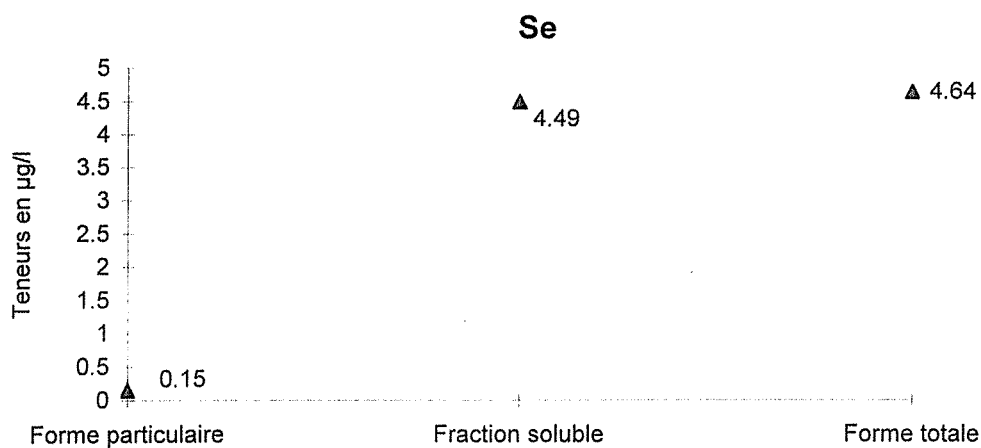
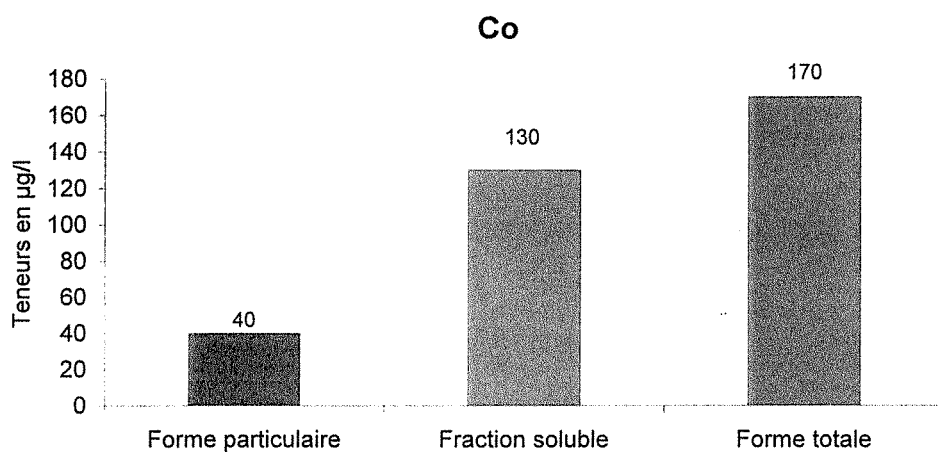
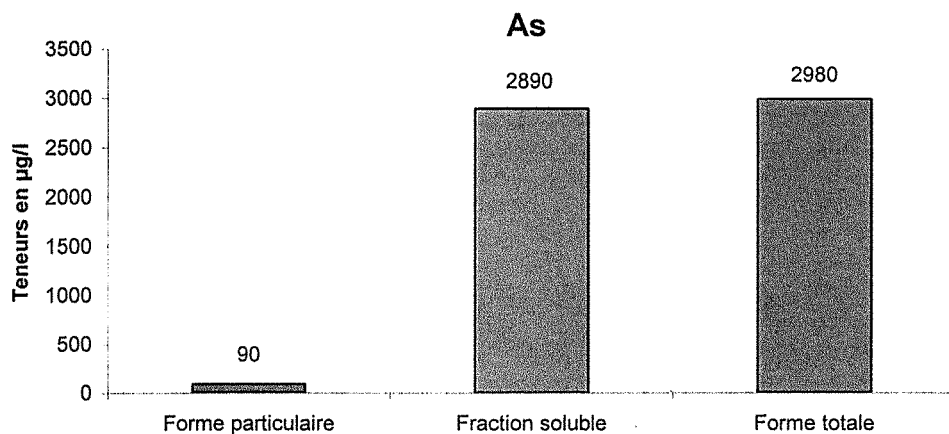


Fig 29. Teneurs en As, Co et Se sous forme totale, soluble et particulaire dans les eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui.

II.2. ETUDE DES TRANSFERTS DE POLLUANTS A PARTIR DES HALDES DE MINES

L'analyse des eaux usées de la mine et des eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui, permet d'affecter à chaque type de polluant un coefficient de transfert, c'est à dire le rapport de la quantité d'un élément dans l'eau de surface à la sortie du barrage à celle dans l'eau usée de la mine. Ce coefficient traduit aussi la mobilité de chaque élément dans le contexte superficiel. Pour fixer un ordre de grandeur de ces coefficients, nous prenons à titre d'exemple, l'arsenic, cobalt, sélénium, zinc, fer, manganèse, bismuth et le molybdène.

Les coefficients et les formes de transfert de ces polluants vers le barrage de Tizgui, à partir des haldes de mines sont consignés dans le tableau 40. Ce tableau met en évidence les observations suivantes :

↳ 5 % de l'arsenic généré par les haldes de mines, transite par le barrage de Tizgui. Celui-ci voyage beaucoup sous forme soluble et dans une moindre mesure sous forme particulaire.

↳ le cobalt migre beaucoup sous forme particulaire, il subit essentiellement une dispersion mécanique qui se traduit par des exportations de l'ordre 38 % sous forme particulaire, contre, 2,25 % pour les formes dissoutes.

↳ le sélénium voyage plus en solution. Son coefficient de transport s'élève à 52,2 % sous forme soluble et 25 % sous forme particulaire.

↳ le zinc est l'élément le plus mobile, avec un coefficient de transfert de 159 % sous forme totale.

↳ Le manganèse s'avère aussi mobile, mais sous forme particulaire. Les transferts en Mn des haldes vers le barrage sont estimés 37 % (forme particulaire) et 6,77 % (fraction soluble).

↳ pour les autres éléments : Fer, Bi et le Mo ; les exportations vers le barrage du Tizgui sont respectivement de 9,52 %, 14,92 % et 2,62 %.

Ces coefficients de transport et formes de dispersions, permettent de mettre en évidence la dissémination de ces polluants et leur accumulation dans le système ouvert. On a montré que le zinc, le sélénium, le bismuth, le manganèse, le fer, l'arsenic, le cobalt et le molybdène sont prépondérants dans les processus de dissémination. La mobilité de ces éléments s'organise dans l'ordre suivant :

forme totale : Zn > Se > Bi > Mn > Fe > As > Co > Mo

fraction soluble : Se > Mn > As > Mo > Co

forme particulaire : Co > Mn > Se > As

II.2.1. Bilan quantitatif annuel de transfert de polluants vers l'oued Alougoum à partir du barrage de Tizgui

Les quantités annuelles en polluants minéraux, transférées vers l'oued Alougoum par les eaux de ruissellement, peuvent être déterminées en multipliant la quantité annuelle en chaque élément générée par les haldes de mines par le coefficient de transfert affecté au même élément. Le tableau 41 ci dessous, illustre le bilan global annuel approximatif des transferts des polluants minéraux vers l'oued Alougoum, à partir du barrage de Tizgui. Ces exportations, se situent autour des valeurs suivantes :

	Teneurs moy eaux usées en µg/l			Teneurs eaux de surface sortie barrage en µg/l			Coefficients de transfert en %		
	Forme totale	Fraction soluble	Forme particulaire	Forme totale	Fraction soluble	Forme particulaire	Forme totale	Fraction soluble	Forme particulaire
As	58 310	56 390	1 920	2 980	2 890	90	5,1	5,12	4,68
Co	5 880	5 775	105	170	130	40	2,89	2,25	38
Se	9,2	8,6	0,6	4,64	4,49	0,15	50,43	52,2	25
Zn	220	-	-	350	160	190	159	-	-
Fe	1 050	50	1 000	100	-	-	9,52	-	-
Mn	345	310	35	34	21	13	9,85	6,77	37
Bi	67	-	67	10	10	0	14,92	-	-
Mo	49 475	46 150	3 370	1 300	1 300	0	2,62	2,81	-

Tableau 40. Exportations et formes de dispersions des polluants minéraux dans le système fluviale du sous bassin versant de Bou-Azzer.

- forme totale : 38 620 g As/an, 2 200 g Co /an , 65 g Se/an ;
- fraction soluble : 37 500 g As/an, 1 440 g Co/an, 60 g Se/an ;
- forme particulaire : 1 120 g As/an , 760 g Co/an, 5 g Se/an.

De ce qui vient d'être exposé, nous ne prétendons pas être complet car les transferts sont généralement conditionnés par les mécanismes morphogénitiques et les paramètres climatiques qui régissent le sous bassin versant de Bou-Azzer.

Cette analyse critique des formes de transport de l'arsenic et éléments associé, montre qu'une quantité non négligeable en arsenic soluble est drainée, depuis l'environnement immédiat des unités de traitement de cobalt et d'argent, jusqu'au l'oued Alougoum, via l'Assif N'Talkherte.

Il est possible de réduire fortement les flux d'As et autres polluants vers le barrage de Tizgui par des mesures simples à mettre en œuvre ; telles que l'aménagement d'un bassin de décantation juste en aval des digues opérationnelles, avec un recyclage complet des eaux usées, bonne conception des barrages de filtration implantés le long du système fluviale du sous bassin versant de Bou-Azzer pour éviter d'éventuels effondrement en cas de crues.

	Fraction soluble en g/an	Forme particulaire en g/an	Totale annuel en g/an
As	37 500	1120	38 620
Co	1440	760	2200
Se	60	5	65
Zn	-	-	14 860
Fe	-	-	1 380
Mn	230	220	450
Bi	-	-	130
Mo	16 300	200	16 500

Tableau 41. Bilan quantitatif annuel approximatif des transferts par ruissellement des polluants minéraux vers l'oued Alougoum en aval du barrage de Tizgui.

II.3. CONCLUSION

C'est sur l'eau de surface qui transite par le barrage de Tizgui, que l'impact environnemental des infrastructures minières installées dans le sous bassin versant de Bou-Azzer est le plus général et le plus contraignant.

La qualité de cette eau, telle qu'elle ressort des analyses chimiques est mauvaise en terme de concentration en As, moyenne pour le Ni, Pb, Cr, excellente pour le Se, Cu, Zn, Mn et Fe ; Norme marocaine relative à la qualité des eaux de surface (cf, tableau 41 bis, annexe 3).

Certains de ces éléments sont indispensables en faibles quantités mais tous dangereux au delà d'un certain seuil. L'arsenic, le cadmium et le plomb sont potentiellement toxiques pour l'homme, le nickel, le chrome, le sélénium, le cuivre et le zinc sont toxiques pour les végétaux. Tous ces éléments, présentent un danger de contamination de la chaîne alimentaire, avec accumulation le long de celle-ci. Ils peuvent avoir sur l'homme et les animaux des effets toxiques, cancérigènes, tératogènes ou mutagènes.

La composition chimique et les propriétés physiques de l'eau de surface à la sortie du barrage de Tizgui sont modifiées à un degré le rendant impropre à un ou plusieurs usages auxquels elle est destinée. Elle est plus particulièrement chargée en arsenic, sulfate et sodium, avec des teneurs suivantes :

- ➔ 2, 89 mg/l (forme soluble) et 90 µg/l (forme particulaire) ;
- ➔ 295 mg SO₄²⁻/l ;
- ➔ 103 mg Na/l.

Pour ces éléments, on donne souvent 10 µg As/l comme valeur maximale admissible pour l'eau potable et 100 µg As/l, 250 mg SO₄²⁻/l, 9 mg Na/l pour l'eau de surface destinée à l'irrigation. Ainsi, la contamination par l'arsenic, sulfate et sodium de l'eau de surface dans la retenue du barrage de Tizgui, qui alimente la vallée de l'oued Alougoum, s'avère inquiétante. Elle menace les écosystèmes, en présentant une action d'inhibition des mécanismes biologiques, ce qui risque de porter atteinte aux espèces végétales, animales et à la santé humaine.

Les flux annuels vers l'oued Alougoum, à partir du barrage sont estimés à 38 620 g d'As (forme totale), 37 500 d'As (fraction soluble). Ces valeurs, représentent approximativement 5 % de l'arsenic libéré annuellement par les digues opérationnelles.

En admettant la valeur 352 kg/an d'arsenic généré par les rejets de la digue cobalt et 405 kg/an généré par la digue C.M.B.A (celle ci a été mise en service en 1996), et que l'activité de la mine de Bou-Azzer est importante, depuis 1930 (68 ans) ; la quantité moyenne d'arsenic écoulée vers la vallée de l'oued Alougoum, en aval du barrage de Tizgui serait pour cette période de l'ordre de 1 258 kg.

En réalité, la quantité probable transfusée hors du sous bassin versant de Bou-Azzer, pourrait dépasser largement la valeur proposée car il fallait aussi tenir compte des flux provenant des structures géologiques notamment, les serpentines qui titrent 20 à 360 g As/t et les retombées atmosphériques. D'une façon générale, les flux en arsenic et métaux lourds d'origine minière ou naturelle qui pourraient transiter par le barrage de Tizgui sont fonction des facteurs suivants :

- l'intensité et la fréquence des précipitations ;
- le caractère et l'intensité des averses ;
- les circulations superficielles (eau de ruissellement).

CHAPITRE III

GEOCHIMIE DES SEDIMENTS DE L'OUED ALOUGOUM : CONTAMINATION PAR LES HALDES DE BOU-AZZER ET PAR LES ROCHES DU DISTRICT MINIER DE BOU-AZZER.

INTRODUCTION

Le District minier de Bou-Azzer est une zone exclue intégralement de toute végétation. Les rejets miniers et les roches en places sont exposés directement aux actions météorologiques qui favorisent l'extension des processus géomorphologiques. L'aridité totale du milieu, le rôle important, voire fondamentale de l'érosion mécanique pluviale est ainsi paradoxalement une caractéristique de cette zone. Il constitue le mode de transport des particules fines libérées dans le système hydrographique, principalement au niveau des haldes de mines.

Le relief très accidenté, caractérisé par des fortes pentes, la nature lithologique des terrains, le caractère des averses souvent orageuses et l'effet battant de la pluie, renforcent le ruissellement dans cette zone à activité minière. Ces eaux de ruissellement, entraînent la diffusion à des doses élevées des polluants dans les écosystèmes. Comme exemple de contamination, on examine les concentrations en arsenic et métaux lourds dans les sédiments ordinaires et les sédiments issus des haldes de mines, prélevés le long de l'oued Alougoum.

III.1. NIVEAUX DE CONTAMINATION DES SEDIMENTS

III.1.1. Prélèvements réalisés

Le long de l'oued Alougoum, depuis Zaouit Sidi Blal à Foum-Zguid, on a prélevé des échantillons de sédiments ordinaires et des sédiments issus des haldes anciennes de mines entraînées par ruissellement.

III.1.2. Méthodologie de prélèvement

Pour chaque type de sédiment et au niveau de chaque site, trois à quatre échantillons ont été prélevés. La valeur retenue qui servira de support pour juger sur l'intensité de la pollution et l'efficacité des eaux de ruissellement à transporter les polluants minéraux sera la valeur moyenne arithmétique des résultats. Chaque prélèvement d'au moins 1kg a été séché et conditionné en sacs plastiques étanches numérotés et portant le nom du site.

III.1.3. Préparation des échantillons

La préparation mécanique des échantillons a été réalisée au laboratoire de Bou-Azzer. Les échantillons ont été lavés à l'eau, séchés à l'étuve à 40 °C puis broyés à une granulométrie inférieure à 80 µm.

III.1.4. Résultats analytiques

Le dosage de l'arsenic et métaux lourds a été réalisé par les laboratoires de REMINEX et de Bou-Azzer. Les résultats analytiques sont donnés par les tableaux 42 et 43 et correspondent à des teneurs moyennes en arsenic et éléments associés.

	As	Co	Ni	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn
Zaouit Sidi Blal	975	167	61	< 1	115	21	88	74
Amazzer	250	49	20	< 1	64	12	35	23
Ait Aissa	175	41	29	< 1	45	34	52	88
Ait M'rabt	250	39	29	< 1	36	17	27	50
Tasstift	167	36	29	< 1	-	19	22	17
Foum-Eloued	125	13	21	< 1	-	10	14	12
Alougoum	175	21	28	< 1	-	11	20	15
Foum-Zguid	19	35	40	3	-	80	18	31

Tableau 42. Teneurs moyennes en polluants minéraux dans les sédiments ordinaires le long de l'oued Alougoum en mg/kg.

	As	Co	Ni	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn
Zaouit Sidi Blal	2 816	625	204	< 1	230	25	336	112
Amazzer	366	41	22	< 1	63	14	23	23
Ait Aissa	200	48	31	< 1	48	18	33	42
Ait M'rabt	366	49	29	< 1	38	20	24	50
Tasstift	266	46	32	1	-	19	27	16
Foum-Eloued	200	13	21	1	-	10	23	11
Alougoum	200	19	27	1	-	11	20	15
Foum-Zguid	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 43. Teneurs moyennes en polluants minéraux dans les sédiments issus des haldes de mines le long de l'oued Alougoum en mg/kg

III.1.5. Interprétation des résultats

Les échantillons analysés, présentent des teneurs moyennes en As, Co, Ni, Cr, Pb, Cu et Zn variables et généralement rétrogradant de l'amont vers l'aval (Fig 30 et 31). Les teneurs en arsenic (As) et autres polluants sont plus particulièrement excessives au niveau du douar Zaouit Sidi Blal, situé juste à 7 km en aval du barrage de Tizgui. Ces teneurs se situent autour des valeurs moyennes suivantes :

→ les sédiments ordinaires

975 mg As/kg , 167 mg Co/kg , 61mg Ni/kg, 115 mg Cr/kg, 88 mg Cu/kg.

→ les sédiments issus des haldes de mines

2 816 mg As/kg , 625 mg Co/kg, 204 mg Ni/kg, 230 mg Cr/kg, 25 mg Pb/kg, 336 mg Cu/kg , 112 mg Zn/kg .

En aval du douar Zaouit Sidi Blal, depuis Amazzer jusqu'au douar Alougoum, les teneurs moyennes en arsenic sont aussi élevées et varient de 125 à 250 mg As/kg pour les sédiments ordinaires et 200 à 366 mg As/kg pour les sédiments issus des haldes de mines.

Il convient de signaler que les produits de haldes de mines n'ont pas été détectés au niveau de la localité de Foum-Zguid, localisée à 65 km en aval de la mine. Les sédiments ordinaires prélevés au voisinage immédiat de cette localité, indiquent des teneurs moyennes faibles de l'ordre de : 19 mg As/kg, 35 mg Co/kg, 40 mg Ni/kg, 18 mg Cu/kg , 31mg Zn/kg. En revanche, les concentrations en plomb et cadmium sont beaucoup plus fortes par rapport à celles détectées en amont, avec des teneurs de 80 mg Pb/kg et 3 mg Cd/kg (cf, tableau 42).

III.2. L'IMPACT DES PHENOMENES NATURELS SUR LE MILIEU ETUDIE

Les sédiments ordinaires de l'oued Alougoum sont nettement pollués en arsenic. On note également des concentration élevées pour le cobalt, le chrome et le nickel. La vitesse d'érosion et la violence du ruissellement ont provoqué l'introduction des haldes de mines dans le système hydrographique de l'oued Alougoum.

Différents processus naturels et mécanismes morphogénitiques, caractérisent la boutonnière de Bou-Azzer : les actions mécaniques , les variations thermiques, les variations hydriques, les actions physico-chimiques , les micromigrations, le ruissellement et le vent. Ces mécanismes jouent un rôle déterminant dans la dégradation du milieu. Nous examinerions ci-après comment ces processus et ces mécanismes banaux fonctionnent et peuvent participer à la contamination des écosystèmes.

III.2.1 La nature lithologique des terrains

La boutonnière de Bou-Azzer est formé de roches précambriennes nues imperméables. Ces roches renferment des affleurements minéralisés dispersés le long de la boutonnière. Ce sont des filons émergents, le plus souvent au contact serpentines- gabbros, parfois aussi à même la serpentine, et que l'on peut suivre en surface sur des longueurs allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. En dehors des ces affleurements minéralisés, les roches en place contiennent des teneurs élevées en arsenic et métaux lourds, c'est le cas par exemple des serpentines qui recèlent en moyenne 20 à 360 g As/t, 160 g Co/t, 2 650 g Ni/t. Les autres roches ophiolitiques encaissent également des teneurs élevées en Co, Ni, Cr, Cu, Zn (cf. tableau 44).

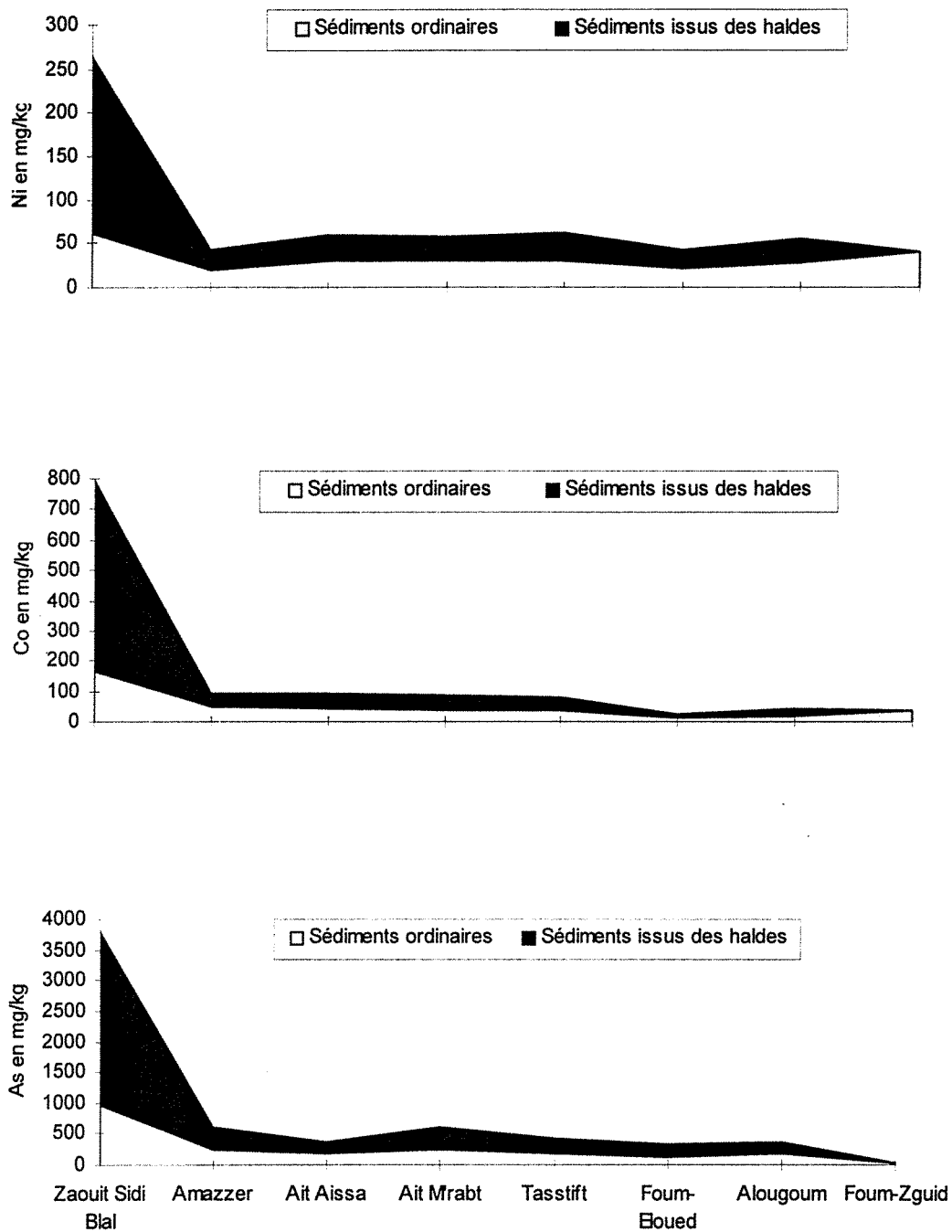


Fig 30. Evolution des teneurs moyennes en As, Co et Ni dans les sédiments ordinaires et dans les sédiments issus des haldes de mines, le long de l'oued Alougoum.

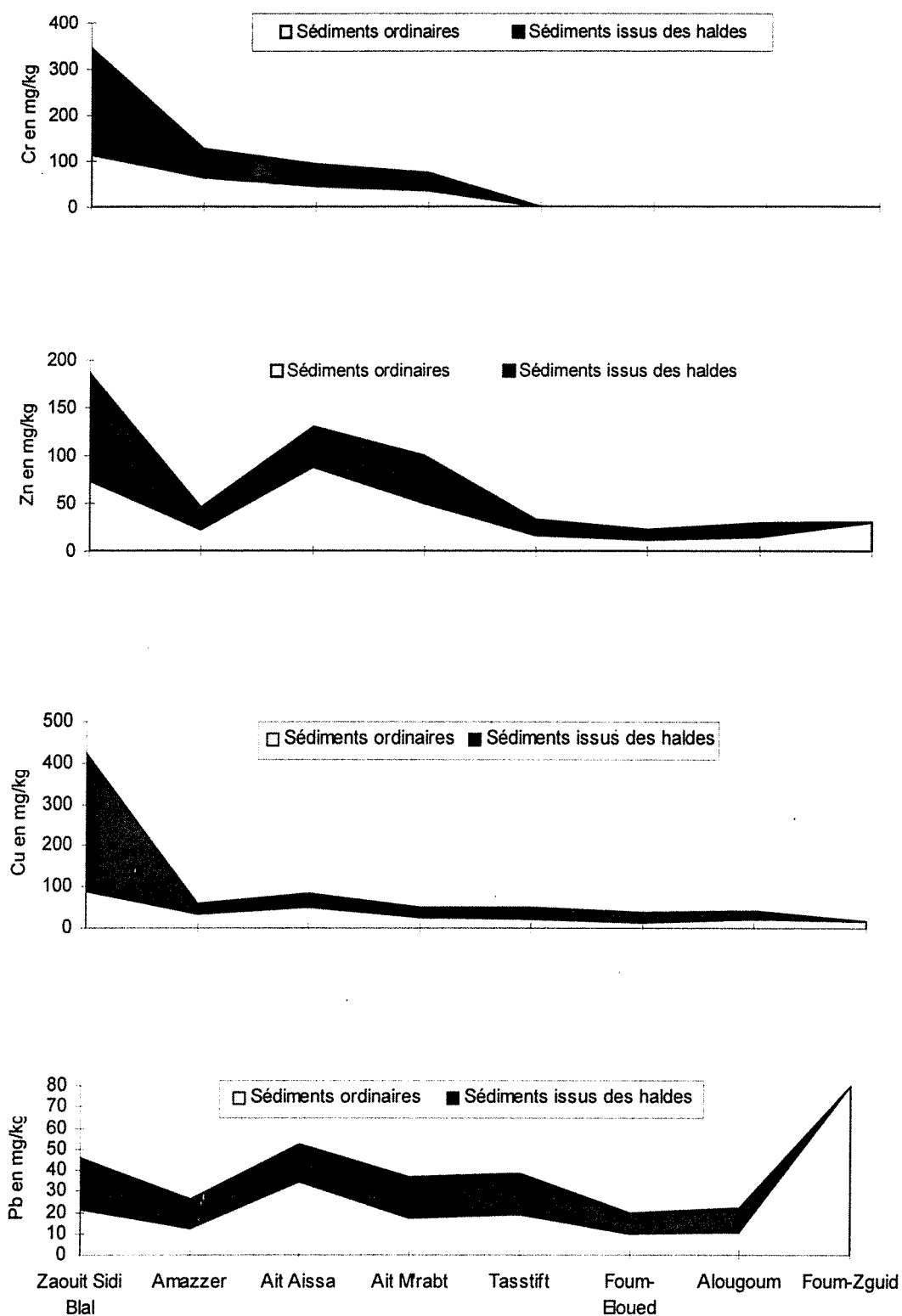


Fig 31. Evolution des teneurs moyennes en Pb, Cu, Zn et Cr dans les sédiments ordinaires et dans les sédiments issus des haldes de mines, le long de l'oued Alougoum.

	Co	Ni	Cr	Cu	Zn	V	B	Mo
Serpentines non différenciées	160	2 650	670	30	38	6,5	17	trace
Cumulats ultramafiques	200	1 390	530	205	182	21	17	trace
gabbros rubanés	73	470	230	180	100	65	14	1
leucogabbros	80	450	200	350	120	200	10	1
diabases et spilites	34	161	46	112	55	133	7	0,75
kératophyres	9,5	31	46	95	20	66	9,5	1,75
diorites quartziques	25	140	90	103	24	30	6	0,5
Filons d' aplites ou de quartz-albite	4	10	6	63	2	8	traces	1,5
Séricito-schistes, métatufs spilitiques	30	90	50	75	42	75	3,5	2,8
oligistoschistes	14	70	27	110	40	33	10	2
roches basiques et spilitiques de Tachdan	36	105	50	195	55	138	5	trace
granodiorite - Bleida	5	7	60	10	10	40	6	2

Tableau 44. Géochimie des roches ophiolitiques, des roches basiques de Tachdamt et des granodiorites tardi tectoniques, en g/t. d'après M. Leblanc (Note et mémoire du service géologique N° 280).

Ces anomalies naturelles positives, peuvent avoir un impact sensible vis-à-vis du milieu environnant. En fait, il se présente deux problèmes sérieux en partie conjugués :

- ▶ les rejets miniers qui recèlent plus de 46 000 de tonnes d'arsenic et métaux lourds ;
- ▶ la présence des structures géologiques, contenant des grosses anomalies géochimiques naturelles.

Les structures géologiques sont caractérisées par certaines conditions lithologiques particulières qui empêchent la formation de réserves d'eau importantes. Elles contribuent à donner à la zone un aspect nettement plus aride. En périodes pluvieuses ou lors des averses, l'eau ruisselle à peu près intégralement et ne s'infiltré que dans les fractures et les diaclases. Quelques heures après la pluie, la surface des roches se trouve complètement séchée par le soleil. Ces formations subissent intensément les effets de l'insolation, et, connaissent de très amples oscillations thermiques, ce qui favorise la fragmentation et la libération des polluants sous forme particulaire ou soluble.

Les infiltrations estimées à 3 % des apports annuels, alimentent les réseaux de nappes. Ces circulations constituent une bonne source de ravitaillement en eau pour quelques agglomérations installées à l'intérieur de la boutonnière de Bou-Azzer (Tiddiline, Ait Ahmane, Talamine...). De ce fait, les eaux souterraines exploitées à titre d'eau potable, peuvent être contaminées suite à l'altération et l'oxydation des roches en place et des rejets miniers arséniés.

III.2.2. Les mécanismes morphogénitiques

Le District minier de Bou-Azzer, présente par un système morphogénitique à prédominance des actions mécaniques. On y observe des formes de reliefs particulières qui proviennent de l'action de processus que nous rencontrons communément dans toute les régions avoisinantes : pluie agressive, érosion, vent chargé, variation de la température avec ou sans gel. Ce sont ces actions diverses qui jouent le rôle décisif dans l'élaboration des ces formes et qui contribuent aux transferts des polluants hors du District minier.

Nous étudierons donc successivement :

1. les processus initiaux, ceux qui modifient la surface de la roche ;
2. les modalités particulières de l'action des eaux de ruissellement ;
3. l'importance propre du vent dans le District minier de Bou-Azzer.

III.2.2.1. Les processus initiaux.

Il s'agit notamment des processus qui modifient superficiellement les propriétés des stériles de mines, découlant des travaux de recherche et d'abattage et les affleurements de la roche en place. Ce sont des processus de fragmentation qui jouent un rôle essentiel ; par leur action sur la roche, ils créent les conditions de travail de l'ablation, la facilitant plus ou moins, parfois même l'entravant. Les actions chimiques constituent la phases initiale de l'ablation. Ces actions chimiques permettent la mise en solution de certaines particules de la roche. Du fait même de la sécheresse dans la zone, ce sont les processus de nature mécanique qui prédominent. Cependant, ils n'agissent pas seuls et certains actions chimiques et biochimiques peuvent intervenir (TRICART et A. CAILLEUX, 1969).

a) Les actions mécaniques

L'importance des actions mécaniques dans la boutonnière de Bou-Azzer, résulte de la combinaison de deux facteurs :

① l'exposition directe à l'atmosphère de toute la surface du sol, ce qui facilite la fragmentation mécanique des roches cohérentes ;

② l'intensité accrue de certains processus atmosphériques par les conditions climatiques propres à la zone. La sécheresse de l'air se traduit par des températures extrêmes qui atteignent pendant certains mois 43 °C et par une évaporation extrêmement importante (l'évaporation potentielle moyenne annuelle s'élève à 4 665 mm) . Ces phénomènes permettent de sécher très vite la surface du sol et dilapident l'eau de ruissellement résultant de l'averse.

Les conditions propres à cette zone, ont donc pour effet d'y renforcer certains agents atmosphériques jouant un rôle important dans l'attaque des roches. Il s'agit particulièrement des processus mécaniques (variation de température et d'humidité, vent). Les actions atmosphériques mécaniques qui s'exercent sur la surface des roches, sont essentiellement la gélification, les variations thermiques (avec ou sans gel), les variations hydriques.

■ la gélification

La gélification est le plus efficace de tous les processus de fragmentation. C'est elle qui réduit le plus intensément et le plus rapidement les roches cohérentes, même les plus dures.

■ les variations thermiques

Les changements de température à sec ont une certaine action sur les roches. Ils provoquent des alternances de dilatation et de rétraction qui sont loin d'être négligeables. Rappelons que, par exemple, une granite ou granodiorite a un coefficient de dilatation qui atteint presque les deux tiers de celui du fer, ce qui est fort appréciable. Cependant, les coefficients de dilatation de diverses roches sont très différents les uns des autres. Ils sont élevés pour les granites et les gneiss, les calcaires durs et les quartzites, plus faibles pour les calcaires tendres. L'influence des oscillations thermiques varie aussi d'une roche à l'autre. Voici, par exemple, quelques coefficients de dilatation volumétriques formulés par R. BRINKMANN, 1956 ; J. TRICART et A. CALLEUX, 1969.

Quartz	35 . 10 ⁻⁶
Grès	5 - 20
Calcaire	10 - 20
Granite	6 - 20

La couleur de la roche intervient aussi par l'intermédiaire de l'échauffement. Elle est particulièrement importante dans le District minier de Bou-Azzer ; presque toutes les roches se recouvrent d'une patine de teinte foncée surtout les roches volcaniques du Précambrien III et les formations d'âge PII inférieur.

Cette patine peut atteindre des températures considérables, ce qui facilite la fragmentation de la roche et la libération des grains. En effet, la dilatation de la roche entraîne dans la masse de celle-ci, des efforts mécaniques, peut-être directement, peut-être aussi par l'intermédiaire ou avec le concours des variations d'humidité de la roche. Sous l'effet des variations thermiques et éventuellement hydriques de la roche, on se trouve donc en présence d'une couche superficielle

qui modifie son volume de manière relativement considérable, passant progressivement à une couche profonde dont le volume reste constant.

Cette transition affecte des couches plus ou moins profondes de la pellicule superficielle de la roche en fonction de l'amplitude des variations thermiques affectant sa surface. Elle est génératrice d'efforts qui tendent à provoquer des fissures et des décollements. Il finit ainsi par se détacher de la roche des copeaux dont la longueur et la largeur atteignent quelques centimètres et l'épaisseur quelques millimètres. Ce processus est désigné sous le nom de desquamation (J.TRICART, 1969). Elle affecte surtout les roches cristallines micro-grenues et les roches grenues à grains fins, massives, bien homogènes. Elle est plus active dans les granites que dans les gneiss.

Dans les roches hétérogènes, les variations thermiques ne détachent pas de copeaux mais de fragments irréguliers, calqués généralement sur la texture de la roche, dont les irrégularités ont localisé la rupture. Les variations thermiques provoquent ainsi une libération des grains et des particules fines, une désagrégation granulaire qui exploite naturellement de préférence les zones les moins cimentées. Elles peuvent ainsi mettre en relief la texture de la roche, par un véritable cisaillement qui souligne notamment les stratifications.

■ les variations hydriques

Les variations hydriques jouent en général sous deux formes : l'une chimique, par la mise en solution et par la précipitation des corps solubles, l'autre plus particulièrement mécanique, constituée par les variations de volume des roches en fonction de leur teneur en eau et par l'effet mécanique de la croissance des cristaux. Certains auteurs ont supposé que l'air des zones désertiques contient de nombreux cristaux de sel en suspension qui se déposent à la surface des roches et pénètrent dans leurs cavités notamment dans leurs fentes les plus fines et y cristallisent.

b) les actions physico-chimiques

Les actions physico-chimiques sont surtout la dissolution de certains corps par les eaux de pluies sans intervention des êtres vivants. Aussi jouent-elles, par rapport aux actions biochimiques, commandées par les êtres vivants, un rôle comparativement important dans cette région. Leur importance relative est d'autant plus grande que les autres processus sont plus déficients, ce qui leur permet d'être prépondérantes dans certains cas.

Les caractéristiques générales des actions physico-chimiques élémentaires de cette zone est l'alternance de courte période de brusque humectation et de forte dessiccation. Faute d'une humidité suffisante (rappelons que seuls les mois de Novembre et Décembre sont humides), le lessivage des corps solubles est faible. Les produits solubles ne sont qu'exceptionnellement entraînés en profondeur que dans les roches faillées et fissurées. Ces produits se maintiennent généralement en surface, prêts à se dissoudre à la première averse qui humectera la surface du sol. En suite, ils sont repris par les eaux de ruissellement. Il n'y a rien ici qui ressemble au régime réalisé dans les régions humides avec l'entraînement en profondeur, jusqu'à la nappe phréatique ; des produits dissous et leur évacuation par les sources.

Un véritable cycle s'établit dans une couche superficielle très peu épaisse, avec dissolution lors des averses, entraînant à faible profondeur ou vers les dépressions topographiques, puis cristallisation sous l'effet de l'évaporation immédiatement après l'averse. Ce cycle dure quelques heures, quelques jours tout au plus. Il est de courte durée et n'implique que des micromigrations. Il est cependant rompu dans certains cas, du fait de l'intervention du ruissellement qui permet l'exportation des produits dissous en aval du District, mais généralement par voie **superficielle** et non phréatique.

■ les micromigrations

Les micromigrations donnent naissance à des enduits superficiels qui se développent sur les roches cohérentes contenant des minéraux solubles ou altérables. Lorsque la roche est imbibée d'eau, l'eau pénètre et altère certains minéraux. Les produits dissous se concentrent ensuite à la surface supérieure, probablement sous l'effet de l'évaporation, et ils y forment une couche mince, riche en fer et manganèse auxquels sont associés d'autres minéraux. Le développement de ces induits est fortement influencé par les propriétés lithologiques. Les roches poreuses contenant des éléments solubles, comme les grès, lui sont particulièrement favorables. Notons en fin, que le climat intervient de manière décisive à côté de la lithologie dans la genèse des enduits.

■ les migrations à distance

Le volume ruisselé dépend en particulier de l'intensité des précipitations et la nature lithologique des terrains. Les migrations à distance sont provoquées par le ruissellement. Elles aboutissent à concentrer en aval du District et dans certaines positions topographiques privilégiées les produits sous forme solubles ou particuliers. Ces migrations sont liées notamment aux caractères des averses.. Au niveau du sous bassin versant de Bou-Azzer, où sont bâties les digues formant les haldes de mines, le ruissellement se charge d'une certaine quantité de produit (polluants minéraux), qui s'exerce sur une dizaine de kilomètres le long du réseau hydrographique de l'oued Alougoum.

III.2.2.2. . Les modalités particulières de l'action des eaux de ruissellement

Dans le District minier de Bou-Azzer, les petits oueds et les ravins sont généralement à sec durant toute l'année, sauf en périodes pluvieuses, où on peut constater quelques écoulements superficiels. En général, les sources ne jouent guère aucun rôle dans leur alimentation.

■ le ruissellement

Pendant la saison des pluies, (Octobre, Novembre et Décembre), ou en cas d'averse, le ruissellement est important dans le District minier de Bou-Azzer. C'est lui qui alimente l'écoulement des petits oueds et ravins. L'importance de ce ruissellement provient de toute une série de facteurs :

➔ la faiblesse voire l'absence de la couverture végétale, la protection des sols est presque nulle. Ainsi, les précipitations frappent directement la surface du sol, ce qui provoque une intense érosion pluviale avec diminution de la perméabilité superficielle. L'effet battant de la pluie est dans ce cas très prononcé, ce qui renforce le ruissellement.

➔ le caractère des averses qui atteignent parfois des intensités considérables, car elles sont souvent de caractère orageux.

➔ les facteurs lithologiques qui jouent en principe le rôle déterminant dans le fonctionnement du ruissellement. Du fait de l'absence de la végétation, cette influence lithologique s'exerce directement.

La topographie joue un rôle très grand dans le ruissellement. En effet, les terrains sont très accidentés et la pente est forte, par conséquent, le coefficient de ruissellement augmente. Le rôle joué par le ruissellement et la diminution des temps de concentration des crues, absence de la

couverture végétale, expliquent les débits de pointes considérables, donc un transfert de particules contaminées hors du District minier.

III.2.2.3. L'importance propre du vent dans le District minier de Bou-Azzer

Le District minier de Bou-Azzer est dépourvu de couverture végétale qui peut entraver l'action du vent, en retenant les particules nécessairement de petits calibres qu'il peut prendre en charge. Les sols et les rejets de mines sont offerts à l'action directe du vent qui joue avec les poussières, notamment les grains des haldes de mines. Le vent agit violemment surtout en période de sécheresse.

L'étude climatologique sur les vents, a montré que les grands déplacements se font généralement vers le Nord Est. Les fines mouvant des haldes mines, constituent une menace constante pour les sols fertiles et pour les agglomération humaines. Le mouvement de ces particules fines est surtout prononcé quant les vents sont violents.

Les grands déplacements de particules, ont lieu pendant des périodes où souffle les vents desséchants. C'est au printemps et en été que les fines sont constamment transportées dans la direction des vents dominant. Ces fines avancent sur des grandes distances car leur mouvement n'est pas freiné et après leur dépôt, elles sont reprises par les eaux de ruissellement.

III.3. CONCLUSION

Au vu des résultats analytiques et compte tenu des différents mécanismes morphogénétiques qui marquent le District minier de Bou-Azzer, des observations qui ont été enrichies et approfondies au cours d'une dizaine de visites effectuées sur les sites implantés en aval des exploitations de cobalt de Bou-Azzer, il en ressort ce qui suit :

1. le District minier de Bou-Azzer, représente la source principale de contamination par l'arsenic et éléments associés des sédiments ordinaires de l'oued Alougoum. Ces sédiments, indiquent des teneurs moyennes de l'ordre de 19 à 975 mg As/kg, 21 à 167 mg Co/kg, 20 à 61 mg Ni/kg et 36 à 115 mg Cr/kg.

2. les sédiments issus des haldes de mines et introduits dans le système hydrographique de l'oued Alougoum par des pluies diluviennes déclenchées par des averses violentes et à caractère brutal, présentent des concentrations moyennes de 200 à 2 816 mg As/kg, 13 à 625 mg Co/kg, 21 à 204 mg Ni/kg, 38 à 230 mg Cr/kg.

3. tout le cours de l'oued Alougoum sur les 7 km en aval du barrage de Tizgui est très pollués ainsi que le montre les analyses des sédiments ordinaires et des sédiments issus des haldes de mines à Zaouit Sidi Blal. En aval du douar Zaouit Sidi Blal, les teneurs chutent rapidement en raison de la dispersion liée à l'alluvionnement intense.

4. ces pollutions sont liées aux matériaux que l'on peut identifier dans les sédiments, comme provenant des haldes de mines stockées dans le sous bassin versant de Bou-Azzer et qui présentent au sein de ces sédiments des teneurs élevées en As, Co et Ni.

5. à cette source et cause de pollution, peut s'ajouter celles liées aux structures géologiques du District minier de Bou-Azzer, notamment les serpentines qui titrent 20 à 360 g As/kg, 160 g Co/kg et 2 650 mg Ni/kg et les retombées atmosphériques.

6. il n'est pas possible de quantifier les effets respectifs des matériaux de haldes et des serpentines dans la pollution des sédiments ordinaires.

En général, la pollution des sédiments le long de l'oued Alougoum, semble avoir une intensité et une extension considérable. Cette pollution témoigne d'un passif environnemental qui pourrait susciter des craintes importantes. De ce fait, nous proposons de développer une réflexion méthodologique permettant de cerner ce problème.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES EAUX DE SURFACE DESTINEES A L'IRRIGATION

INTRODUCTION

Le long de la vallée de l'oued Alougoum, placée sous l'influence des activités minières de Bou-Azzer, nous avons mené une étude fondée sur deux campagnes de prélèvements des eaux superficielles exploitées par la population pour l'irrigation. La première campagne date du mois d'Octobre 1995 et la deuxième a été réalisée durant le mois de Juin 1997.

A travers ce chapitre, nous traiterons conjointement les résultats chimiques de ces deux prélèvements. L'objectif fixé, consiste à examiner les teneurs en arsenic et métaux lourds dans les eaux destinées à l'irrigation, analyser l'évolution des teneurs dans le temps et dans l'espace et en fin, confronter les résultats aux valeurs limites acceptables et définir le degré de pollution des eaux d'irrigation.

IV.1. NIVEAU DE CONTAMINATION DES EAUX D'IRRIGATION

IV.1.1. Prélèvements réalisés

Huit sites individualisés ont été prospectés en aval de la mine de Bou-Azzer (Fig 32). La première campagne d'échantillonnage lancée le mois d'Octobre 1995, porte sur les prélèvements d'eau brute pour analyser les formes totales et concerne les sites allant du douar Zaouit Sidi Blal à Tasstift. Pendant le mois de Juin 1997, les prélèvements ont touché tous les sites qui s'étend du douar Zaouit Sidi Blal à la localité de Foum-Zguid.

IV.1.2. Méthodologie de prélèvement

Le problème de l'échantillonnage et de sa représentativité est très général dans toutes les sciences naturelles. Pour vérifier la qualité d'un produit industriel, un triage aléatoire d'échantillon suffit, mais, lorsque il s'agit d'une enquête ou d'analyse du milieu naturel, on choisit et on étudie généralement un très peu nombre d'échantillon qui représente vraiment peu de chose par rapport à l'énormité et à la complexité du phénomène à caractériser.

La recherche de la représentativité maximale, pose souvent des problèmes très délicats, qui nécessitent la mise en place d'une stratégie de prélèvement, avec l'objectif l'optimisation des moyens mis en œuvre. Dans le but d'acquérir une information la plus riche, la plus représentative et la plus signifiante possible, nous avons utilisé la technique de prélèvement suivante :

En général, la signification des mesures effectuées sur les eaux superficielles est soumise aux caractères locaux et temporels du milieu hydrologique. La valeur d'un échantillon dépend du point et du moment de prélèvement. Les prélèvements ont été effectués en principe à 25 cm au minimum sous le plan d'eau et au maximum à 25 cm au dessus du fond. Dans certains cas, où l'écoulement est faible, nous avons opéré à mi-profondeur. Pour étudier les formes de transport des éléments dans le système fluvial et distinguer le stock véhiculé sous forme particulaire, nous avons prélevé des échantillons d'eau brute et des échantillons d'eau filtrée à 0,45 μm . La stabilisation des échantillons a été faite par l'ajout de l'acide nitrique ultrapur.

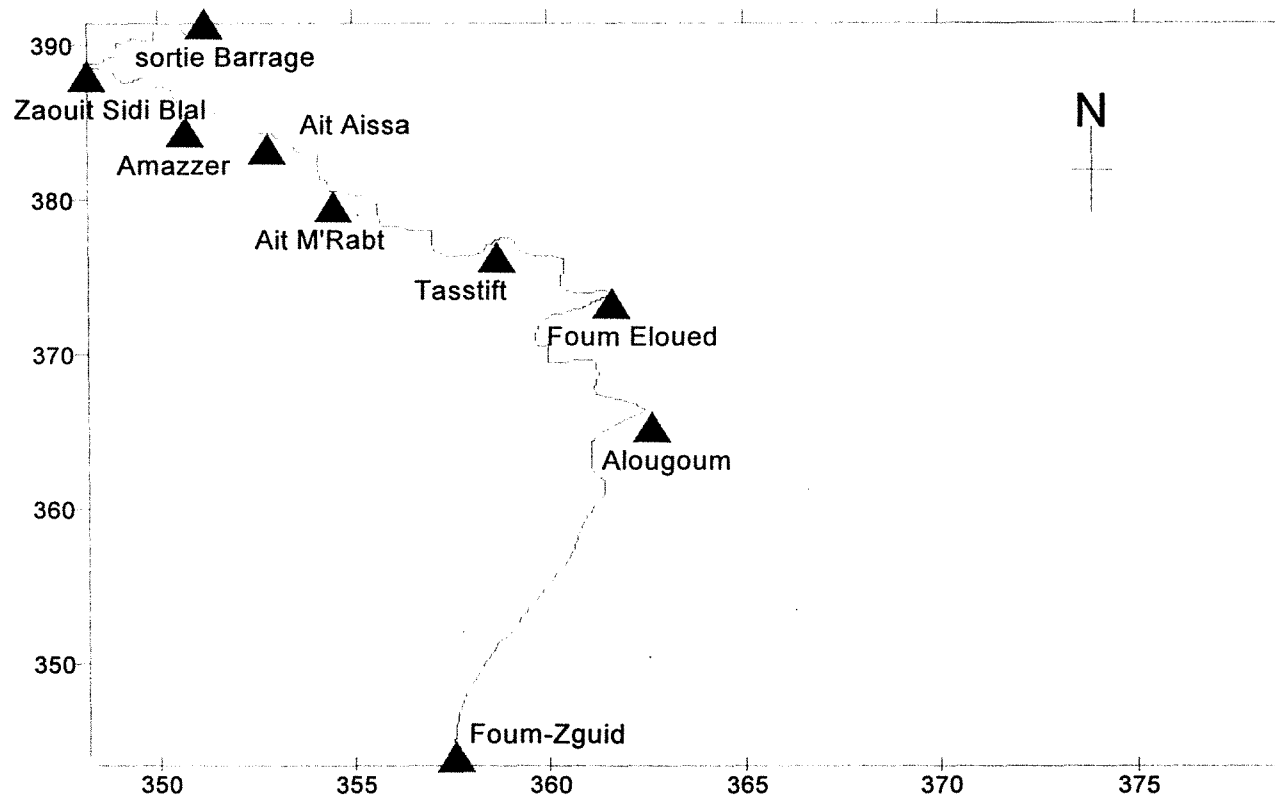
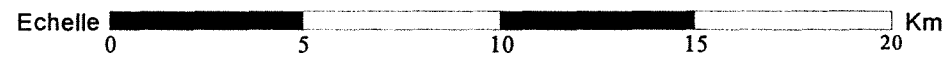


Fig 32. Localisation des points de prélèvements des eaux de surface destinées à l'irrigation



IV.1.3. Résultats et discussions

Dans les tableaux 45 et 46, Annexe 3, sont présentés respectivement les résultats d'analyses chimiques concernant les prélèvements du mois d'Octobre 1995 et Juin 1997, des eaux de surface destinées à l'irrigation. Ces résultats sont obtenus dans les laboratoires de REMINEX et de Bou-Azzer. Les valeurs indiquées dans le tableau 47 ci dessous, représentent les formes de dispersion et les teneurs moyennes en arsenic, des eaux d'irrigation (prélèvements Juin 1997).

Sites	Forme totale (a + b)	Fraction soluble (a)	Forme particulaire (b)
Barrage de Tizgui	2 980	2 890	90
Zaouit Sidi Blal	121	91,2	29,8
Amazzer	54,8	50,3	4,5
Ait Aissa	87,8	80,5	7,3
Ait M'rabt	90,3	66,5	23,8
Tasstift	67,6	66,5	1,1
Foum-Eloued	9,4	8,5	0,9
Alougoum	42	38	4
Foum-Zguid	34	19	15

Tableau 47. Forme de dispersion et teneurs moyennes en As en $\mu\text{g/l}$ dans les eaux d'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements Juin 1997).

Les teneurs moyennes en arsenic, varient de 9,4 à 121 $\mu\text{g/l}$ sous forme totale, 8,5 à 91,2 $\mu\text{g/l}$ (forme soluble) et 0,9 à 28,9 $\mu\text{g/l}$ (forme particulaire). Ces teneurs sont beaucoup plus marquées au niveau du douar Zaouit Sidi Blal ; 121 $\mu\text{g/l}$ (forme totale), 91,2 $\mu\text{g/l}$ (fraction soluble) et 29,8 $\mu\text{g/l}$ (forme particulaire). Rappelons que ce site se situe à 7 km en aval du centre minier de Bou-Azzer.

L'arsenic étant peu mobile, il a donc tendance à se concentrer au voisinage de la mine. Au fil de l'oued Alougoum, les teneurs moyennes en arsenic dans les eaux de surface, montrent une décroissance nette. Elles sont variables en fonction de la distance de l'émission : 121 $\mu\text{g/l}$ à 7 km et 34 $\mu\text{g/l}$ à la distance de 65 km. L'arsenic dans le système fluvial de l'oued Alougoum, migre en solution et sous forme particulaire. En effet, la fraction soluble dépasse dans la majorité des cas 56 %. Elle atteint 98 % dans les eaux du douar Tasstift. Quant aux particulaires, elles représentent 1,6 à 26 % par rapport à la forme totale, avec cependant, un taux élevés exceptionnels au niveau de la localité de Foum-Zguid (44 %).

La figure 33, met en relief l'évolution du coefficient de transport d'arsenic du barrage de Tizgui vers les eaux de surface destinées à l'irrigation. Ce coefficient, correspond au rapport de la quantité d'arsenic dans l'eau au niveau de chaque site à celle dans l'eau de surface au niveau du barrage. Les exportations varient donc de 0,31 à 4 % pour les formes totales, 0,29 à 3,15 % pour les fractions solubles et 1 à 33,11% pour les particulaires.

On constate que les transferts particuliers, à partir du barrage sont beaucoup plus importantes et plus particulièrement vers les douars Zaouit Sidi Blal, Ait M'rabt et Foum-Zguid. Il peut s'agir en effet, des sites privilégiés au piégeage de l'arsenic particulaire. Les auréoles de dispersions liées à cette forme seraient très probablement importantes aux niveaux de ces sites. Elles devraient être conditionnées par :

- ▶ les teneurs en arsenic dans les sédiments ordinaires et les sédiments issus des haldes de mines ;
- ▶ les circulations superficielles (eau de ruissellement, ruisseaux ...) ;
- ▶ les glissements mécaniques le long des pentes ;
- ▶ les vents.

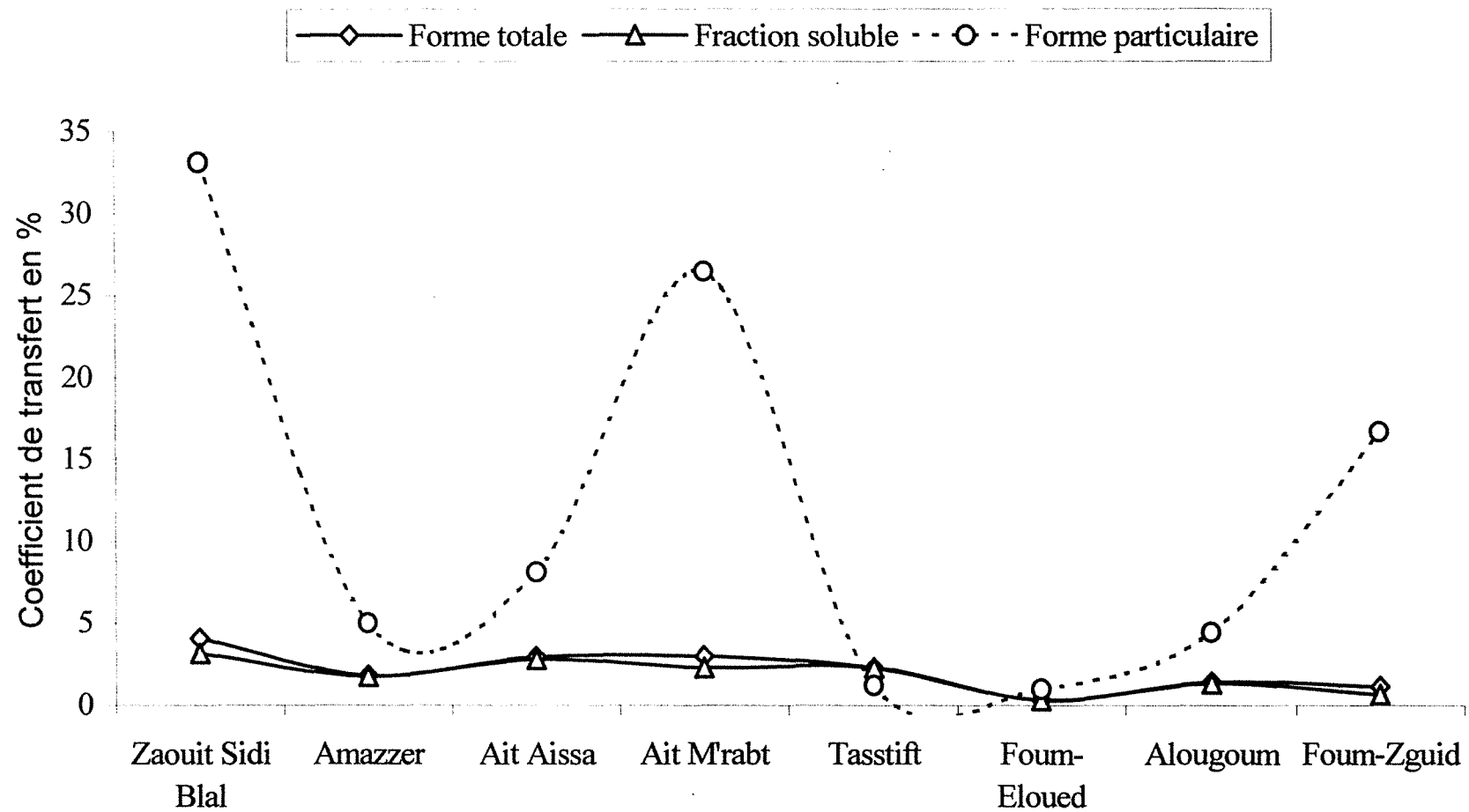


Fig 33. Evolution des exportations d'As sous forme totale, soluble et particulaire vers les eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum, à partir du barrage de Tizgui.

Le tableau 48, correspond aux teneurs en sélénium dans les eaux d'irrigation de quelques sites implantés le long de la vallée de l'oued Alougoum. Les trois échantillons analysés en aval de la mine, montrent des teneurs en sélénium qui progressent de l'amont vers l'aval et atteignent 22 µg/l (forme totale), 21 µg/l (fraction soluble) à la localité de Foum-Zguid.

Le sélénium est donc prépondérant dans le processus de dissémination. Il semble important de s'interroger sur son origine. En effet, cet élément présente sur plus de 60 km, des teneurs plus fortes que celles mesurées au niveau des eaux usées et au niveau du barrage de Tizgui. La présence d'eau de surface enrichie en sélénium le long de la vallée, apparaît comme un risque notable lié soit aux exploitations de cobalt, soit à une région présentant un sol avec des teneurs naturelles en sélénium élevées (fortes minéralisations correspondant à des phénomènes géologiques).

Sites	Forme totale	Fraction soluble	Forme particulaire
Barrage de Tizgui	4,64	4,49	0,15
Zaouit Sidi Blal	-	-	-
Amazzer	-	-	-
Ait Aissa	15	5,6	9,4
Ait M'rabt	-	--	-
Tasstift	-	-	-
Foum-Eloued	-	-	-
Alougoum	23	18	5
Foum-Zguid	22	21	1

Tableau 48: Forme de dispersion et teneurs en Se en µg/l dans les eaux d'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements Juin 1997).

Dans le tableau 49, on a présenté les teneurs en arsenic (As), sulfates (SO₄²⁻) et sodium (Na+) des eaux d'irrigation prélevées le mois d'Octobre 1995.

Sites	Arsenic total (µg/l)	Sulfate (mg/l)	Sodium (mg/l)
Barrage de Tizgui	100	295	103
Zaouit Sidi Blal	100	420	67,2
Amazzer	80	225	36,6
Ait Aissa	90	265	44,6
Ait M'rabt	80	315	44,4
Tasstift	70	355	62,8

Tableau 49. Teneur en arsenic, sulfate et sodium dans les eaux d'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements d'Octobre 1995).

Ces prélèvements, indiquent des teneurs en arsenic total comprises entre 70 et 100 µg/l. Les teneurs en sulfate et sodium s'avèrent importantes et oscillent entre 225 à 420 mg/l pour les sulfates et 36,6 à 103 mg/l pour le sodium.

La confrontation de ces résultats à ceux du mois de Juin 1997, ne montre pas de différences significatives. La seule différence notable qui mérite d'être signalée, est celle des teneurs en arsenic dans les eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui. Les prélèvements du mois d'Octobre, indiquent une concentration en arsenic total de 100 µg/l, contre 2 980 µg/l pour ceux du mois de Juin 1997. Cette forte teneur, s'explique par le démarrage de l'usine hydrométallurgique opérationnel début 1996, et qui libère des eaux trop chargées en arsenic (73 720 µg/l).

Pour les autres éléments (Ni, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, Mg, Ca, K, Mn, Al, F- et CN-), les teneurs détectées dans les eaux d'irrigation, ne laissent pas présumer pour ces derniers une

contribution notable de la mine. Par contre le cobalt, présente des teneurs relativement élevées suivantes :

■ prélèvements Juin 1997 :

Zaouit Sidi Blal (60 µg Co/l) ;

■ prélèvements Octobre 1995 :

Zaouit Sidi Blal (80 µg Co/l), Ait M'rabt (56 µg Co/l).

IV.2. PRINCIPAUX RAPPORTS IONIQUES DES EAUX DE SURFACE DESTINEES A L'IRRIGATION

L'examen du tableau 50 et la figure 34, montre que les eaux à la sortie du barrage de Tizgui ont un pH élevé de 8,2. Elles accusent une teneur en sulfate modérée et il en est de même pour la magnésie et le sodium. Ce sont des eaux avec une tendance bicarbonatée calcique, dont la matière en suspension est d'ailleurs plus faible : 1mg/l. Cet aspect bicarbonaté calcique est lié au procédé de revalorisation des anciennes haldes de cobalt. En effet, pendant la phase de la purification, on ajoute du calcaire à raison de 67 kg/TTV (soit 4 000 t/an) pour éliminer les arsénates de fer. De même, pour précipiter les hydroxydes de cobalt, on ajoute de la chaux à raison de 10 kg/TTV (soit 600 t/an).

	Matière en suspension en mg/l	Mg/Ca	Na/Mg	SO ₄ /Cl	Na/Cl	pH
Sortie Barrage de Tizgui	1	0,47	1,55	1,37	0,47	8.2
Zaouit Sidi Blal	1,4	0,42	0,64	4,72	0,75	6.6
Amazzer	5	0,62	0,69	5,36	0,87	8
Ait Aissa	0,4	0,61	0,77	5,19	0,87	7.8
Ait M'rabt	3,2	0,65	0,66	4,63	0,65	7.7
Tasstift	4,6	0,97	0,75	4,43	0,78	7.1

Tableau 50. Principaux rapports ioniques et pH des eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements Octobre 1995).

De même, les eaux à la sortie du barrage ont leur Na/Mg élevé mais qui diminue en aval, ainsi que leur SO₄/Cl faible dont la valeur augmente de 4 à 5 fois au fur et à mesure que l'on s'éloigne du barrage vers les sites implantés en aval. Ainsi, les eaux qui transitent par le barrage de Tizgui, malgré leur aspect bicarbonaté calcique, ne conservent pas leurs caractéristiques au fil de l'oued Alougoum.

De Zaouit Sidi Blal à Tasstift, et toujours sur le plan des rapports ioniques, on constate que les eaux d'irrigation, présentent un rapport Mg/Ca faible inférieur à 1 (0,42 à 0,97), un rapport Na/Cl compris entre 0,65 et 0,87. La forte prédominance des sulfates, se traduit par un rapport SO₄/Cl élevé qui atteint des valeurs exceptionnelles fortes à Amazzer (5,36) et à Ait Aissa (5,19). Il s'agit donc des eaux sulfato-calco-magnésien, mais avec la particularité que les teneurs en sodium sont élevées.

IV.3. CONFRONTATION DES RESULTATS AUX NORMES

La figure 35, illustre l'évolution des teneurs totales en arsenic, cobalt et sélénium dans les eaux d'irrigation. Au niveau du douar Zaouit Sidi Blal, les teneurs en arsenic et cobalt varient respectivement de 100 à 121 µg As/l et 60 à 80 µg Co/l. Ces valeurs sont supérieures aux teneurs maximales en As et Co fixées par le projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux destinées à l'irrigation (cf. tableau 51, annexe 3) : 100 µg As /l et 50 µg Co/l. Les

teneurs totales en sélénium dans les eaux d'irrigation du douar Alougoum et de la localité de Foug-Zguid, dépassent respectivement la valeur admise (20 µg/l) de 15 % et 10 %.

Les niveaux de concentration en Ni, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, F- CN-, Mg, Ca, K, Mn, Al et Cl, sont largement inférieurs aux valeurs limites admises pour les eaux destinées à l'irrigation. Toutefois, les teneurs en sulfates (SO_4^{2-}) et sodium (Na^+) excèdent de loin les normes. Elles varient de 225 à 420 mg SO_4^{2-} /l, 36 à 62,8 mg Na^+ /l, contre 250 mg SO_4^{2-} /l et 9 mg Na^+ /l comme valeurs limites acceptables (Fig 36).

IV.4. DEGRE DE POLLUTION DES EAUX D'IRRIGATION

Pour fixer un ordre de grandeur de l'intensité de pollution des eaux irrigation, on peut se servir de degré de pollution. Celui ci est défini comme étant égale au rapport de la quantité en élément dans l'eau sur la valeur limite admise. Ce rapport varie de 0,1 à 1,21 pour l'arsenic (Fig 37) ; 0,2 à 1,6 pour le cobalt (Fig 38) ; 0,9 à 1,68 (sulfate), 4 à 7,46 (sodium) (Fig 39) et 0,75 à 1,15 pour le sélénium. L'eau est considérée comme étant polluée si la valeur du degré de pollution est supérieure à 1. On constate donc une pollution en arsenic, cobalt, sélénium, sulfate et sodium dans les eaux d'irrigation exploitées au niveau des sites suivants :

- arsenic :

Zaouit Sidi Blal

- cobalt :

Zaouit Sidi Blal, Ait M'rabt

- sélénium :

Alougoum, Foug-Zguid

- sulfate :

Zaouit Sidi Blal, Ait Aissa, Ait M'rabt, Tasstift

- sodium :

Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait Aissa, Ait M'rabt, Tasstift.

IV.5. L'ORIGINE DE L'ENRICHISSEMENT DES EAUX D'IRRIGATION EN POLLUANTS MINERAUX

Le transport latéral des éléments polluants le long de l'oued Alougoum est soumis à deux facteurs limitants, liés d'une part, à la topographie et d'autre part, au climat (intervention des précipitations plus ou moins intenses sous formes d'averses). Ces précipitations donnent lieu à des transports de sédiments érodés issus des roches en places et des haldes de mines riches en arsenic et métaux lourds.

Les transports sont aussi conditionnés par la solubilité dans l'eau et par la stabilité chimique et physique des particules constituant les rejets arséniés de la mine. Le développement des surfaces érosives au niveau des rejets miniers est lui même contrôlé par l'intensité et la fréquence des précipitations et le vent. Différents mécanismes sont à l'origine de l'enrichissement en arsenic, sélénium, cobalt, sulfate, sodium..., des eaux de surface destinées à l'irrigation. Les mécanismes morphogénitiques explicités dans le chapitre III (paragraphe III.2.2, partie 4), jouent un rôle capital dans le transfert des polluants minéraux. Nous examinerons ici le facteur principal qui favorise la pollution des eaux de surface. Il s'agit notamment du ruissellement dans le cas des captages de surface.

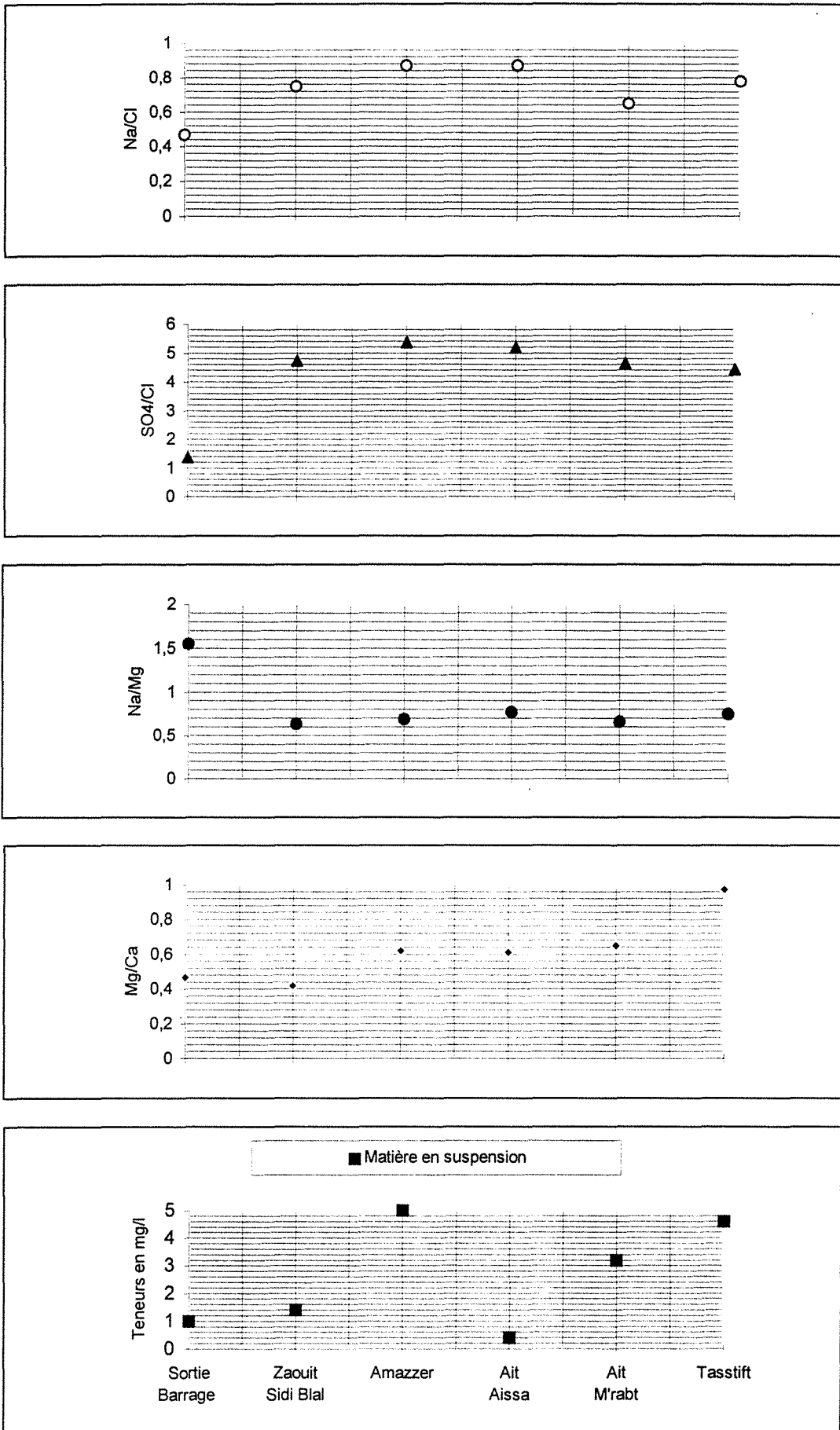


Fig 34. Matières en suspensions dans les eaux d'irrigation, avec les variations des rapports Mg/Ca, Na/Mg, SO₄/Cl et Na/Cl (prélèvements d'Octobre 1995).

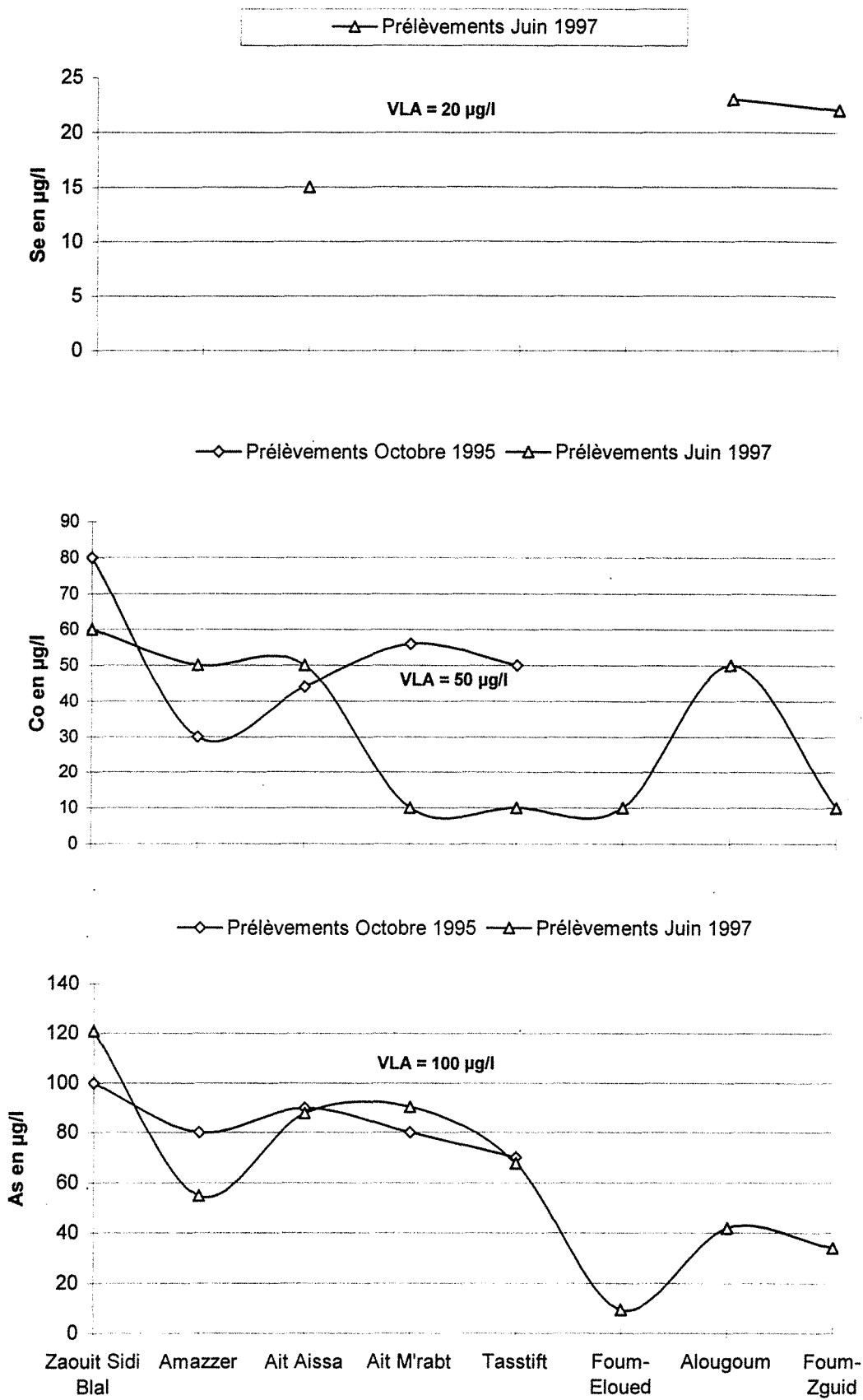


Fig 35. Evolution des teneurs en As, Se et Co dans les eaux de surface destinées à l'irrigation : confrontation des résultats aux normes en vigueur (VLA = valeur limite acceptable).

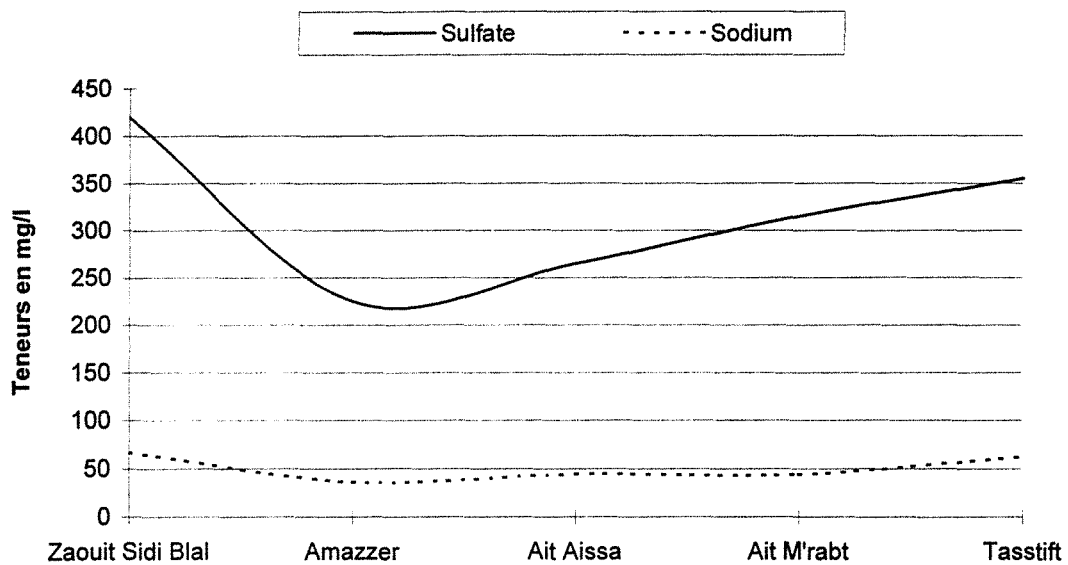


Fig 36. Evolution des teneurs en sulfate et sodium dans les eaux de surface destinées à l'irrigation, le long de la vallée de l'oued Alougou : confrontation des résultats aux normes en vigueur (prélèvements d'Octobre 1995).

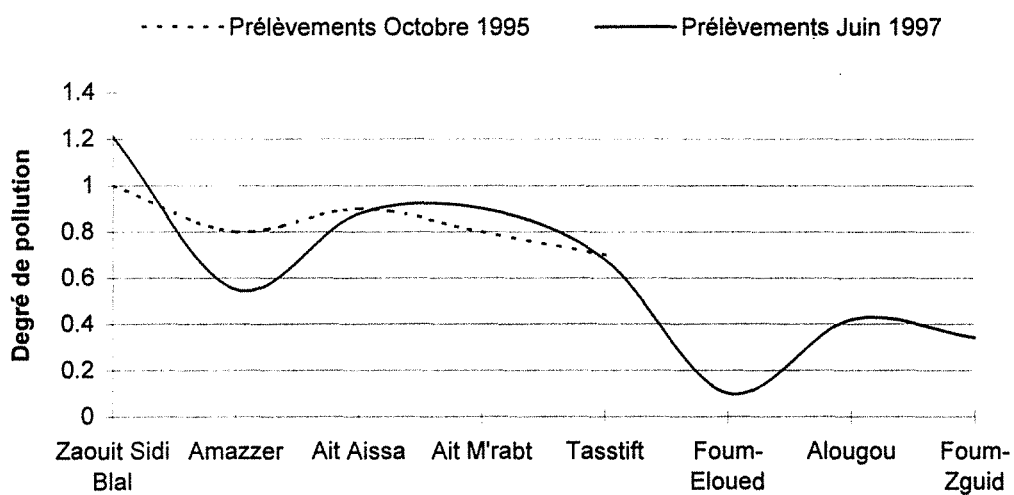


Fig 37. Degré de pollution en As des eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougou

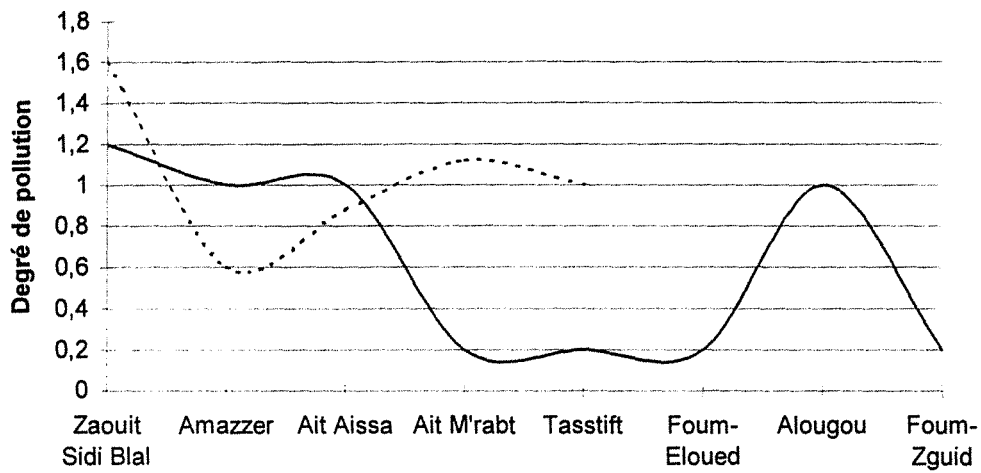


Fig 38. Degré de pollution en Co, des eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougou.

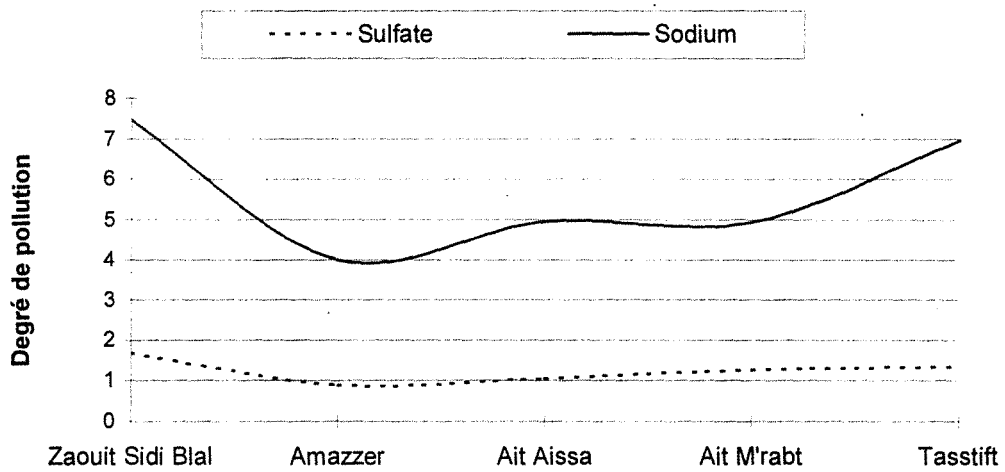


Fig 39. Degré de pollution en sulfate et sodium, des eaux destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougou (prélèvements d'Octobre 1995).

Le transport latéral des polluants se fait essentiellement par ruissellement, voire érosion. Il est réalisé en particulier sous **forme soluble** ($< 0,45 \mu\text{m}$) et **particulaire**. Il est contrôlé par l'intensité et la fréquence des volumes d'eau mis en jeu au cours des crues. Certaines crues, peuvent avoir des débits de pointe qui atteignent dans certains cas $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Crue du 23 et 24 Août 1998). Ces types de crues, provoquent parfois la rupture des barrages de filtration implantés en aval des haldes de mines. Elles contribuent donc aux transferts des quantités considérables de particules polluantes hors du sous bassin versant de Bou-Azzer.

En terme de quantité de produits transportés, on peut dire que les transferts peuvent être nuls si les précipitations donnent lieu à un ruissellement faible et que les eaux usées de la mine sont complètement recyclées. Les échantillons ont été prélevés pendant les mois, où les écoulements superficiels sont très faibles. Globalement, et dans des conditions particulièrement similaires aux périodes de prises d'échantillons, on peut présager des transports faibles. Il serait néanmoins utile d'analyser les eaux en aval de la mine pendant ou juste après la crue.

Si la quantité, la fréquence et la force des précipitations, constituent trois paramètres importants de la régulation des pertes des rejets arséniés de la mine par ruissellement, il faut également prendre en compte l'influence du vent, la topographie (pente forte) et la nature lithologique des terrains (formations précambriennes minéralisées imperméables et exclues de toute végétation qui peut freiner les mouvements latéraux.

IV.6. CONCLUSION

Les campagnes de prélèvements des eaux de surface lancées les mois d'Octobre 1995 et Juin 1997 à l'échelle de la vallée de l'oued Alougoum, montrent d'une manière évidente que les produits rejetés par les usines de traitement de cobalt et d'argent de Bou-Azzer, se retrouvent dans les eaux de surface exploitées par la population pour l'irrigation des terres.

La pollution des eaux d'irrigation est liée en particulier aux sédiments ordinaires et aux sédiments issus des haldes de mines contaminés sur plus de 40 km, le long de l'oued Alougoum par l'arsenic, et dont les teneurs varient de 125 à 2 816 mg As/kg.

La forme de transport de l'arsenic dans le système ouvert se traduit par des formes solubles qui atteignent dans certains cas 98 % par rapport à la forme totale. La confrontation des résultats d'analyses chimiques aux normes en vigueur, fait ressortir les observations suivantes :

☛ les eaux d'irrigation exploitées par la population du douar Zaouit Sidi Blal sont polluées en arsenic et cobalt, avec des teneurs respectivement de 121 µg As/l, 60 µg Co/l. Ces teneurs sont supérieures aux valeurs limites recommandées pour l'irrigation : 100 µg As/l, 50 µg Co/l.

☛ le douar Ait M'rabt exploite des eaux contaminées en cobalt qui dépassent de 12 % le seuil de tolérance. Les eaux d'irrigation de la localité de Foum-Zguid et d'Alougoum, indiquent des teneurs anormales en sélénium respectivement de 22 et 23 µg/l, contre 20 µg/l fixée par les normes. Le sélénium est abondant dans le système fluvial et présente des teneurs qui progressent de l'amont vers l'aval. Ceci nous permet pas d'affirmer ou infirmer un éventuel lien du sélénium avec la mine. Mais, il semble très probablement avoir d'autres sources d'origine naturelle.

☛ les eaux d'irrigation le long de l'oued Alougoum, présentent des teneurs en sulfate qui varient de 265 à 420 mg/l (1 à 2 fois la norme), il en est de même pour le sodium qui indique des concentrations variables de 36,6 à 67,2 mg/l, contre 9 mg/l fixée comme valeur limite admise. La présence des sulfates à des teneurs excessives, peuvent avoir un impact négatif sur les sols, tout en les acidifiant et en dissolvant les métaux lourds. Les teneurs excessives en sodium, 5 à 6 fois la norme, peut réduire la fertilité des sols et peut dans certains cas les rendre totalement stérile. Des efflorescences salines visibles en surface ont été observées plus particulièrement dans les sols des douars Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait Aissa, Ait M'rabt et Foum-Zguid. Cette salinisation résulte d'une part, de la pénétration trop faible de l'eau d'irrigation dans le sol, d'où un dépôt de sel dans les couches superficielles, d'autre part, d'une retombée de la nappe phréatique avec prélèvement du sel dans les couches profondes lorsque le drainage est mauvais.

☛ pour les autres éléments (Ni, Pb, Cu, Zn, Fe, F⁻, CN⁻), les analyses chimiques indiquent des teneurs largement inférieures aux valeurs limites acceptables, fixées par le projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux de surface destinées à l'irrigation.

Une situation alarmante qui mérite d'être signalée, c'est que les eaux de surface sont consommées par les habitants des douars **Ait Aissa** et **Foum-Eloued** à titre d'eau potable. Ces habitants ne disposent pas de captages souterrains, et là, les « risques sont vraiment réels ».

Rappelons que les formes et les teneurs moyennes en arsenic dans les eaux de surface au niveau du douar Ait Aissa s'élèvent à 87,8 µg As/l (forme totale) et 80,5 µg As/l (fraction soluble). Ces teneurs sont supérieures à la valeur maximale admissible pour une eau destinée à la consommation humaine (50 µg/l). Ces eaux contiennent également du sélénium, dont la forme totale est de 15 µg/l. Le sélénium dans l'eau de surface au niveau du douar Foum-Eloued, indique une teneur de 14,6 µg/l sous forme soluble, alors que la valeur admise pour une eau potabilisable est de 10 µg Se/l.

L'accroissement des teneurs en arsenic et métaux lourds dans les eaux de surface est contrôlée par deux facteurs essentiels ; l'érosion et le ruissellement. Au total, les transports des polluants minéraux par ruissellement et érosion sont gouvernés principalement par la topographie, le volume et l'intensité des précipitations qui interviennent à un moment de l'année.

Il est possible d'intervenir sur certains de ces paramètres afin de maîtriser les transferts des polluants dans les eaux de surface. L'implantation des barrières étanches et la mise en place de bandes enherbées en bordure des digues et des cours d'eau au niveau des zones habitées, constituent à cet égard une technique qui connaît actuellement un certain intérêt.

il convient de signaler que les teneurs en As, Co, Ni, Pb .. détectées dans les eaux d'irrigation, ne présentent pas de variabilité dans le temps ; les teneurs observées en 1995 sont comparables quantitativement à celles enregistrées en 1997.

D'une façon générale, le risque potentiel de pollution des eaux d'irrigation en arsenic et éléments associés, se présente surtout comme un risque limité dans le temps et étroitement corrélé aux épisodes pluvieux, qui interviennent parfois sous formes d'averses violentes qui balayent les débris et les particules fines riches en éléments traces métalliques et polluants minéraux.

CHAPITRE V

ANALYSE DES EAUX SOUTERRAINES DESTINEES A LA CONSOMMATION HUMAINE

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on examinera les teneurs en arsenic, sélénium, cobalt, nickel, cadmium, plomb, cuivre, zinc, fluorure et cyanure dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine. L'objectif poursuivi est de définir un « état des lieux » général de la contamination des nappes par les effluents générés par l'activité minière de Bou-Azzer, d'analyser les formes de dispersion potentielles et d'estimer l'impact des exploitations de cobalt sur les captages souterrains dans la vallée de l'oued Alougoum.

V.1. PRELEVEMENTS REALISES

En vue d'obtenir une image de la situation qui est vraiment très préoccupante dans la vallée de l'oued Alougoum, une campagne d'échantillonnage régionale a été menée au niveau des puits situés dans le bassin versant de l'oued Alougoum. En effet, 11 captages souterrains ont été examinés (Fig 40) :

Six captages sont exposés aux risques potentiels de pollution, le long de la vallée de l'oued Alougoum. Il s'agit des puits exploités par les douars Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait M'rabt, Tasstift, Alougoum et Foum-Zguid. Ces puits alimentent en eau potable une population de 200 à 1 500 habitants par site, à l'exception de la localité de Foum-Zguid, où le nombre de personne bénéficiant de l'eau potable dépasse 10 000 habitants. Par ailleurs, il y a lieu de signaler que les douars Ait Aissa et Foum-Eloued ne disposent pas de puits souterrains et exploitent de ce fait, les eaux de surface en tant qu'eau potable.

Cinq captages prélevés à titre de comparaison, dont trois : Talamine, Tiddiline et Figuier sont situés en amont des rejets miniers au sein du District minier de Bou-Azzer. Les deux autres : Taloust et Tagrafra sont localisés respectivement à l'Ouest et au Sud Ouest du centre minier de Bou-Azzer à l'abri des rejets arséniés de la mine.

V.2. METHODOLOGIE DE PRELEVEMENT

Pour qu'un échantillon d'eau souterraine soit représentatif, il faut qu'il porte sur au moins 100 m³. Pour obtenir cette représentativité, il faut utiliser une pompe. Le premier mètre cube est rejeté, ensuite un échantillon d'un litre est prélevé chaque 10 m³ jusqu'à concurrence de 10 litres. Ces 10 échantillons sont ensuite mélangés pour prélever 1 litre qui sera filtré (microfiltre en acétate de cellulose à 0,45 µm) et 1 litre d'eau brute. Les échantillons doivent être mis dans des flacons de plastique (polyéthylène) bien rincés. La conservation des échantillons se fait par l'acide nitrique ultrapur (Normatomme).

Cette technique n'a pas pu être utilisée dans la région étudiée. En effet, les ressources aquifères sont pauvres et se réduisent à quelques écoulements dans les terrasses alluviales. La proportion des roches imperméables, ne laissent augurer que de faibles ressources profondes. Ainsi, pour se rapprocher de la technique précitée, nous avons utilisé les pompes installées dans les puits ; le premier prélèvement d'au moins 1 m³ a été rejetée, ensuite un échantillon d'un litre est prélevé chaque 100 litres environ jusqu'à concurrence de 10 échantillons. La cadence des prélèvements est fixée à un quart heure. Ces 10 échantillons sont collectés dans un récipient, où il a été prélevé 1 litre d'eau filtré à 0,45 µm destinée à l'analyse des formes solubles et 1 litre d'eau brute pour analyser les formes totales et particulières.

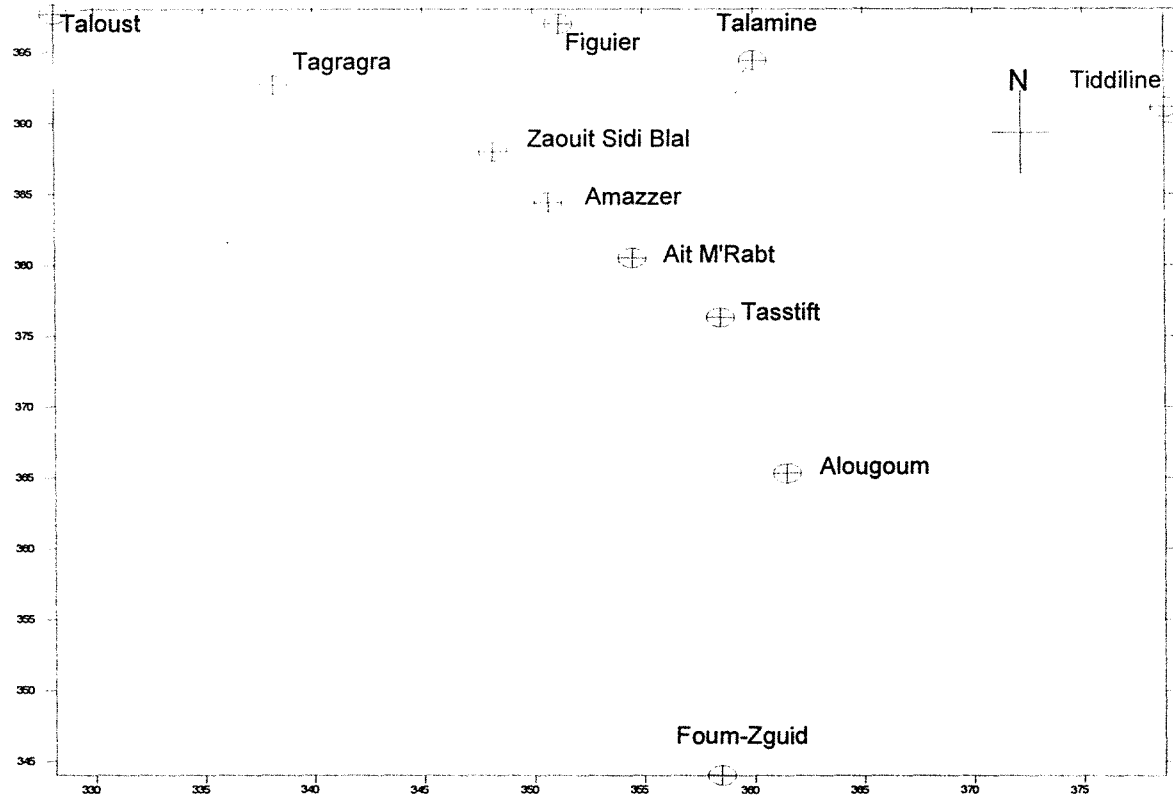
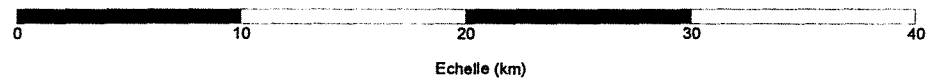


Fig 40. Localisation des points de prélèvement des eaux souterraines



V.3. RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

Le dosage de l'arsenic et métaux lourds a été réalisé par les laboratoires de REMINEX et de Bou-Azzer. Les résultats d'analyses chimiques sont exposés dans le tableau 52, annexe 3. Ils correspondent à la moyenne arithmétique des résultats obtenus par ces deux laboratoires. Par contre, le sélénium n'a pas été dosé au laboratoire de Bou-Azzer, on retiendra les valeurs obtenues au niveau du laboratoire de REMINEX.

Parmi les 11 substances recherchées, 8 sont apparues à des fréquences variables. Il s'agit de l'As, Co, Se, Pb, Cu, Zn, F⁻ et CN⁻. Dans un premier temps, nous traiterons les niveaux de concentration et les formes de dispersions de l'arsenic (As), sélénium (Se) et plomb (Pb) dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine.

V.4. INTERPRETATION DES RESULTATS

V.4.1. Formes et teneurs en arsenic dans les eaux phréatiques

Le tableau 53, met en évidence les formes de dispersions et les teneurs moyennes en arsenic dans le système aquifère de la vallée de l'oued Alougoum.

Puits		Forme totale	Fraction soluble	Forme particulaire
Zaouit Sidi Blal	µg/l	7,7	4,7	3
Amazzer	µg/l	12,2	12,1	0,1
Ait M'rabt	µg/l	8,2	7,6	0,6
Tasstift	µg/l	8,8	8,1	0,7
Alougoum	µg/l	44	29	15
Foum-Zguid	µg/l	32	22	10

Tableau 53. Forme de dispersion et teneurs moyennes en As dans le système aquifère de la vallée de l'oued Alougoum.

Pour le système aquifère témoin, les teneurs moyennes en arsenic sont données par le tableau 54 ci dessous :

Puits		Forme totale	Fraction soluble	Forme particulaire
Taloust	µg/l	35	22	13
Tagragra	µg/l	35	25	10
Talamine	µg/l	35	30	5
Tiddiline	µg/l	52	47	5
Figuier	µg/l	40	40	0

Tableau 54. Forme de dispersion et teneurs moyennes en As dans le système aquifère témoin .

Les résultats examinés pour la vallée de l'oued Alougoum exposée au risque potentiel de pollution (tableau 53), montrent une disparité spatiale des teneurs en arsenic indépendante de la distance d'émission. Contrairement aux eaux de surface, ce sont les sites les plus éloignés de la mine ; Alougoum (45 km) et Foum-Zguid (65 km) qui révèlent des teneurs élevées en arsenic respectivement de 44 et 32 µg/l (forme totale), 29 et 22 µg/l (fraction soluble), 15 et 10 µg/l (forme particulaire).

Cette variabilité est étroitement liée au type de sol à la topographie (la pente est forte en amont), la nature et à la distribution des précipitations au cours de l'année et aux potentialités en sols irrigués. Les zones de cultures irriguées en amont du douar Alougoum, ne représentent que 40 % par rapport à celles du douar Alougoum et 20 % par rapport à celles de la localité de Foug-Zguid.

En tout état de cause, la pollution des eaux phréatiques, dépend essentiellement du processus de lessivage, mécanisme plus lent et qui présuppose un rôle important du sol en tant que filtre biologique. Les autres sites situés en amont du douar Alougoum, indiquent des teneurs moyennes en arsenic qui varient de 7,7 à 12,2 µg/l (forme totale), 4,7 à 12,1 µg/l (fraction soluble) et 0,1 à 3 µg/l (forme particulaire).

Dans le système aquifère témoin (cf, tableau 54), les teneurs en arsenic sont plutôt remarquables, avec des valeurs qui oscillent entre 35 et 52 µg/l (forme totale), 22 et 47 µg/l (fraction soluble), 0 et 13 µg/l (forme particulaire). C'est dans l'eau des puits de Tiddiline et Figuier que de fortes teneurs en arsenic ont été détectées. Les structures précambriennes minéralisées (présence de serpentines) et les circulations en réseaux sont certainement à l'origine de l'augmentation des teneurs en arsenic dans ces captages souterrains.

Concernant les puits localisés hors d'impact : Taloust et Tagragra, les teneurs en arsenic sont 3 à 4 fois supérieures à celles enregistrées au niveau des puits forcés le long de la vallée de l'oued Alougoum. Ces résultats permettent d'écartier à l'état actuel, la contamination par l'As d'origine minière des eaux phréatiques exploitées le long de la vallée de l'oued Alougoum.

V.4.2. Formes et teneurs en sélénium dans les eaux phréatiques

Les formes de dissémination et les teneurs en sélénium dans les systèmes aquifères étudiés sont exposées par les tableaux 55 et 56.

Puits		Forme totale	Fraction soluble	Forme particulaire
Zaouit Sidi Blal	µg/l	-	-	-
Amazzer	µg/l	14,1	11,7	2,4
Ait M'rabt	µg/l	11,5	9,05	2,45
Tasstift	µg/l	9,6	9,2	0,4
Alougoum	µg/l	21	19	2
Foug-Zguid	µg/l	29	26	3

Tableau 55. Forme de dispersion et teneurs en sélénium dans le système aquifère de la vallée de l'oued Alougoum.

Puits		Forme totale	Fraction soluble	Forme particulaire
Taloust	µg/l	18	18	0
Tagragra	µg/l	14	13	1
Talamine	µg/l	18	16	2
Tiddiline	µg/l	13	11	2
Figuier	µg/l	35	26	9

Tableau 56. Forme de dispersion et teneurs en sélénium dans le système aquifère témoin.

Les valeurs présentées dans les tableaux 55 et 56, montrent que le sélénium est prépondérant dans le bassin versant de l'oued Alougoum. En effet, dans le système aquifère exposé, les eaux souterraines accusent des teneurs en sélénium qui varient de 9,6 à 29 µg/l (forme totale), 9 à 26 µg/l (forme soluble) et 0,4 à 3 µg/l (forme particulaire).

Dans le système aquifère témoin, les teneurs en sélénium sont beaucoup plus importantes, avec des valeurs qui oscillent entre 13 et 35 µg/l (forme totale), 11 et 26 µg/l (fraction soluble), 0 et 9 µg/l (forme particulaire). Là encore, les eaux de Taloust et Tagragra non exposées aux risques potentiels de pollution de la mine, indiquent des teneurs excessives en sélénium de 18 et 14 µg/l (forme totale), 18 et 13 µg/l (forme soluble).

Le sélénium est presque généralisé dans tous les sites prospectés. Il présente des teneurs relativement élevées dans les captages souterrains situés hors d'impact. L'origine du sélénium est donc discutable, et ne pourrait être liés très probablement qu'au chimisme des nappes locales, au climat hyperaride et à la présence des formations géologiques locales offrant un fond géochimique naturel à des taux élevés en sélénium.

V.4.3. Formes et teneurs en plomb dans les eaux phréatiques

Le tableau 57, illustre les formes de dissémination et les teneurs moyennes en plomb, des eaux souterraines exploitées pour la consommation humaine.

	Forme totale (µg/l)	Fraction soluble (µg/l)	Forme particulaire (µg/l)
Sites exposés	< 70	-	-
Zaouit Sidi Blal	< 70	-	-
Amazzer	< 70	-	-
Ait M'rabt	< 70	-	-
Tasstift	< 70	-	-
Alougoum	30	20	10
Foum-Zguid	30	20	10
Sites témoins			
Taloust	55	45	10
Tagragra	55	50	5
Talamine	20	20	0
Tiddiline	95	30	45
Figuier	40	<70	-

Tableau 57. Forme de dispersion et teneurs moyennes en plomb dans les eaux souterraines destinées la consommation humaine.

Dans les captages souterrains exposés, les teneurs moyennes en plomb sont inférieures à 70 µg/l (Zaouit Sidi Blal à Tasstift) et s'élèvent à 30 µg/l pour Alougoum et Foum-Zguid. Au niveau des captages témoins, on a détecté des taux élevés en plomb et plus particulièrement, dans les eaux du puits de Figuier ; 95 µg/l (forme totale), 30 µg/l (fraction soluble) et 45 µg/l (forme particulaire).

Les eaux souterraines de Tagragra et Taloust, montrent des teneurs en plomb qui varient de 30 à 45 µg/l (fraction soluble), 5 à 10 µg/l (forme particulaire) et 55 µg/l (forme totale). Il convient de signaler que le puits de Taloust situé à 30 km à l'Ouest de Bou-Azzer, alimente le secteur de Bou-Azzer en eau potable et approvisionne les usines de traitement de cobalt. Pour le puits de Tagragra, les eaux de captage sont exploitées à titre d'eau potable et à l'irrigation d'une ferme d'environ 10 hectares. Cette ferme comporte de l'arboriculture fruitière, céréaliculture, culture fourragère et culture maraîchère destinées quasiment aux marchés locaux.

V.5. CONFRONTATION DES RESULTATS AUX NORMES

La plupart des législations en vigueur sur la qualité des eaux souterraines et les éléments en traces sont basées sur la teneur soluble de chaque élément dans l'eau potable.

Les figures 41 et 42, illustrent respectivement les formes de dissémination et l'évolution des teneurs en arsenic et sélénium dans les eaux phréatiques. En se référant aux normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine (cf. annexe 3, tableau 58) ; les valeurs maximales recommandées sous forme soluble pour l'arsenic et le sélénium sont de 50 µg As/l et 10 µg Se/l. La confrontation des résultats aux normes, montre les observations suivantes :

- ◆ les eaux phréatiques exploitées en aval du Barrage de Tizgui, le long de l'oued Alougoum, présentent des teneurs moyennes en arsenic sous forme soluble qui se situent au dessous de la valeur maximale admissible (50 µg/l). En contrepartie, ces eaux indiquent des teneurs élevées en sélénium qui dépassent les normes, notamment, au niveau des douars Amazzer (11,5 µg/l), Alougoum (19 µg/l) et Foum-Zguid (26 µg/l). Pour cet élément, on donne comme teneur limite 10 µg/l pour l'eau potable : pour traitement physique simple et désinfection ; traitement normale physique, chimique ; traitement physique, chimique poussé affinage et désinfection.

- ◆ les eaux phréatiques témoins captées au sein du District minier de Bou-Azzer (Tiddiline, Talamine, Figuier), contiennent de l'arsenic soluble, avec des teneurs moyennes relativement élevées qui oscillent entre 30 à 47 µg/l, mais, qui restent inférieures aux normes. Ces eaux souterraines présentent des teneurs en sélénium de 1,1 à 2,6 fois supérieure à la valeur limite acceptable (10 µg/l).

- ◆ les eaux captées à Taloust pour approvisionner le secteur de Bou-Azzer en eau potable et les eaux du puits de Tagragra, montrent des teneurs en sélénium soluble supérieures à la norme : 18 µg/l pour Taloust et 13 µg/ pour Tagragra. Par contre, les teneurs moyennes en arsenic sont largement inférieures à 50 µg/l.

- ◆ concernant le plomb, les normes en vigueur, fixent 50 µg/l comme valeur maximale admissible pour une eau destinée à la consommation humaine. Les puits prospectés le long de la vallée de l'oued Alougoum, depuis Zaouit Sidi Blal jusqu'à Tasstift, révèlent des teneurs moyennes en plomb inférieures à 70 µg/l. Pour les autres sites, le plomb soluble indique des teneurs moyennes qui varient de 20 à 50 µg/l. C'est plutôt les eaux souterraines des puits de Taloust, Tagragra, Tiddiline et Figuier qui contiennent des teneurs relativement élevées en plomb et qu'il fallait surveiller à court terme, mais aussi bien qu'à long terme. Pour les autres éléments : Co, Cu, Zn, F⁻ et CN⁻, les teneurs moyennes sont inférieures aux seuils de tolérance.

V.6. DEGRE DE POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES

La figure 43, met en relief l'évolution de degré de pollution en arsenic et sélénium, des eaux phréatiques. L'arsenic indique un degré de pollution qui varie entre 0,15 et 0,88 pour les captages souterrains exposés, le long de la vallée de l'oued Alougoum.

Ce degré est de 0,7 à 1,04 pour les captages souterrains exploités à l'intérieur de la boutonnière de Bou-Azzer et 0,7 pour les puits de Taloust et Tagragra, situés en dehors de la vallée de l'oued Alougoum. Au vu de ces résultats, seul le puits de Tiddiline, présente aujourd'hui une légère pollution en arsenic.

Le sélénium au contraire, montre un degré de pollution élevé compris entre 0,96 et 3,5. La dispersion de cet élément est généralisée dans tous les captages souterrains. En effet, 9 captages sur 10, montrent une contamination en sélénium parfois 2 à 3 fois la norme admise.

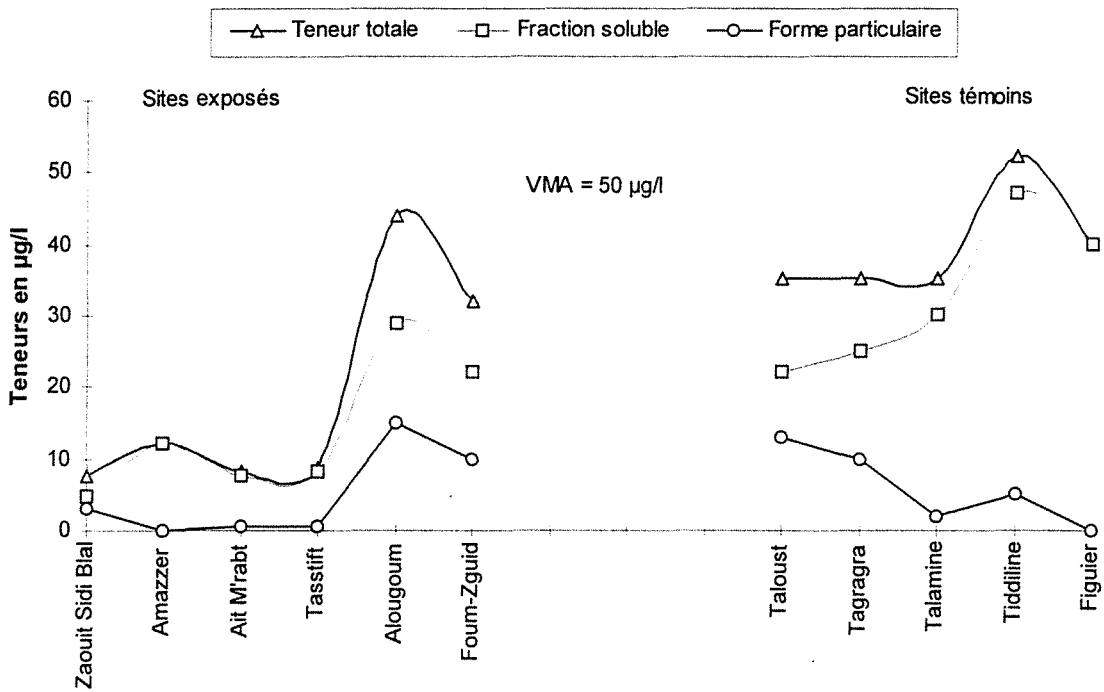


Fig 41. Evolution des teneurs moyennes en As sous forme totale, soluble et particulaire dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine : confrontation des résultats aux normes (VMA : valeur maximale admissible).

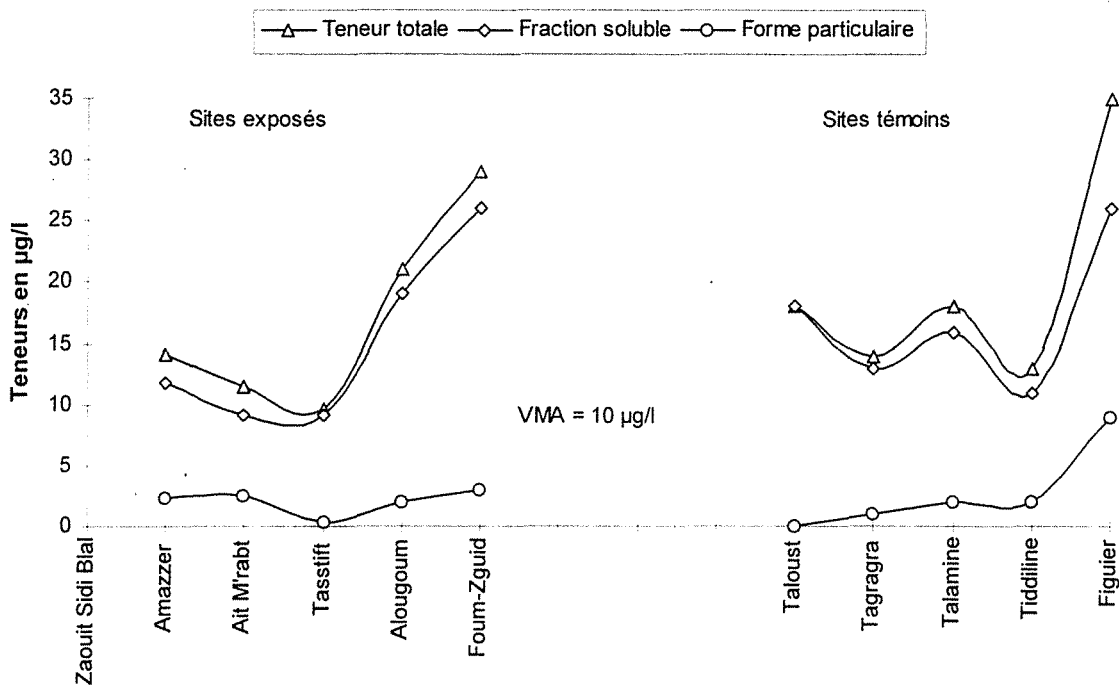


Fig 42. Evolution des teneurs en sélénium sous forme totale, soluble et particulaire dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine : confrontation des résultats aux normes (VMA : valeur maximale admissible).

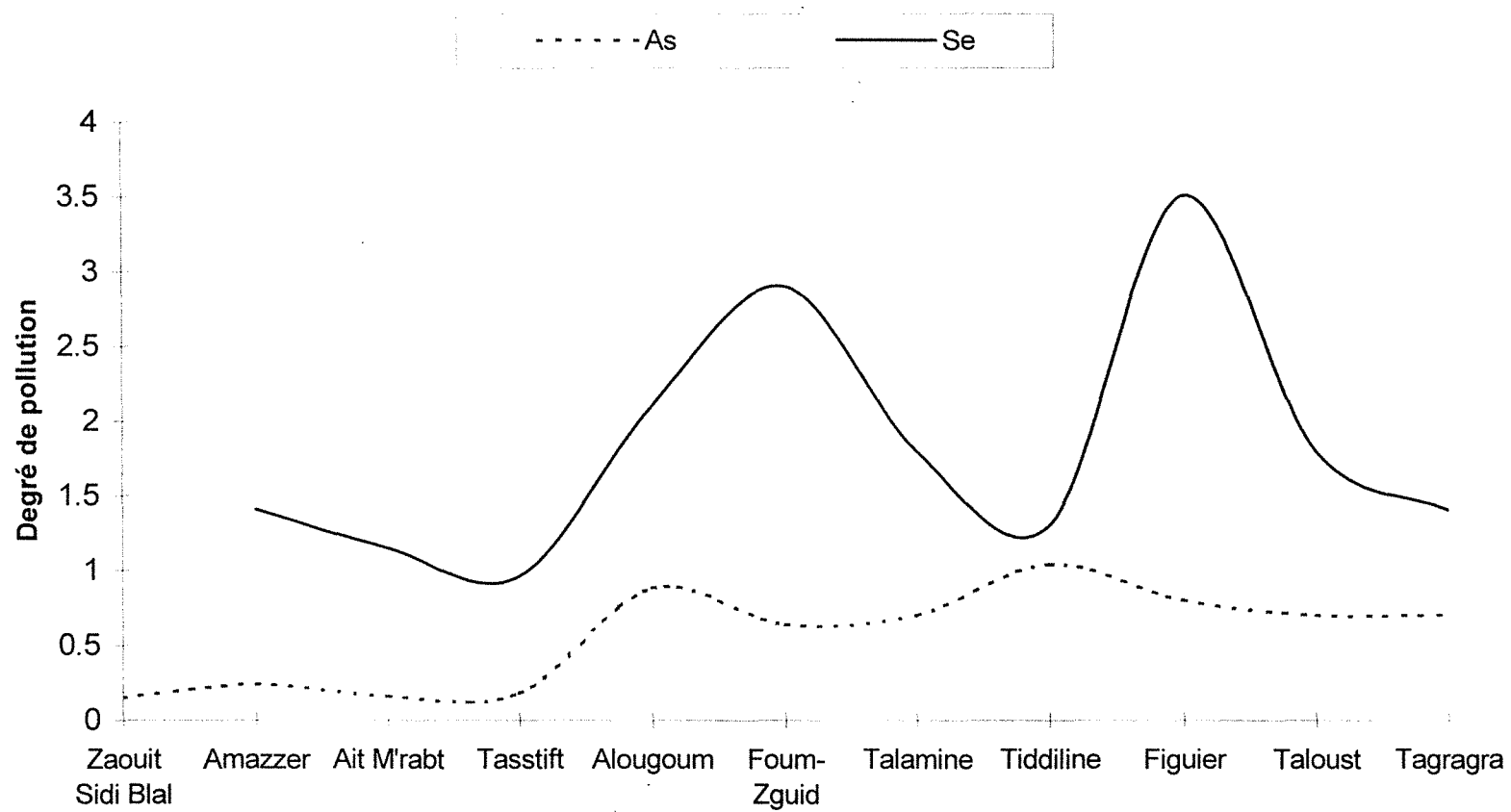


Fig 43. Evolution de degré de pollution en As et Se des eaux souterraines destinées à la consommation humaine dans le bassin versant de l'oued Alougoum.

V.7. CONCLUSION

L'analyse de la situation des eaux phréatiques dans le bassin versant de l'oued Alougoum, permet d'en tirer les conclusions suivantes :

☛ les eaux souterraines consommées à titre d'eau potable en aval de la mine de Bou-Azzer, le long de la vallée de l'oued Alougoum, présentent des teneurs en arsenic soluble qui varient de 4,7 à 29 $\mu\text{g/l}$. Ces valeurs sont aujourd'hui inférieures à la valeur maximale admissible (50 $\mu\text{g/l}$), fixée par le projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux destinées à la production d'eau potable. Toutefois, il faut rester prudent quant à l'évolution des teneurs dans le temps car les mécanismes de contamination et la durée de persistance de l'arsenic reste encore très hypothétique.

☛ les eaux souterraines témoins exploitées en dehors de la vallée de l'oued Alougoum, indiquent des teneurs en arsenic soluble inférieures aux normes en vigueur et qui se situent entre 22 et 47 $\mu\text{g/l}$.

☛ la problématique de l'eau souterraine consommée par la population dans le bassin versant de l'oued Alougoum, se traduit par la présence du sélénium à des taux élevés parfois au-delà du seuil de potabilité fixé à 10 $\mu\text{g Se/l}$.

En effet, les teneurs en sélénium des eaux phréatiques, le long de la vallée de l'oued Alougoum sont de 9,2 à 26 $\mu\text{g Se/l}$. Ces teneurs varient de 11 à 26 $\mu\text{g Se/l}$ pour les sites implantés au sein de la boutonnière de Bou-Azzer et 13 à 18 $\mu\text{g Se/l}$ pour les captages souterrains, situés hors d'impact. Par conséquent, les eaux souterraines, montre donc une pollution généralisée de 9 captages sur 10 et une contamination sévère pour certains captages de 2 à 3 fois la norme.

Il convient de signaler que l'eau phréatique consommée par la population, est traitée en quelque sorte par des méthodes chimiques simples (ajout de l'eau de javelle où traitement par sel de calcium et magnésium). Ce traitement est encore incomplet de l'eau. Toutes les normes exigent actuellement 10 $\mu\text{g Se/l}$ (fraction soluble), et là, la neutralisation par sel de calcium et magnésium ne suffiront plus. Face à ces résultats et à cette situation inquiétante, les pouvoirs publics doivent réagir très vite pour résoudre ce problème.

☛ pour les autres polluants minéraux : le cobalt, nickel, cadmium, cuivre, zinc, fluorure et cyanure, la situation ne semble pas actuellement inquiétante. Les analyses chimiques donnent une impression rassurante car les niveaux de concentration sont largement au dessous du seuil de tolérance.

CINQUIEME PARTIE



ANALYSE DES SOLS AGRICOLES ET DES VEGETAUX

CHAPITRE I : ETUDE PEDOLOGIQUE

CHAPITRE II : ANALYSE DES SOLS AGRICOLES

CHAPITRE III : ANALYSE DES VEGETAUX

CHAPITRE I

ETUDE PEDOLOGIQUE

INTRODUCTION

Cette étude pédologique a pour objectif : d'une part, de bien interpréter les teneurs totales en éléments traces (Co, Ni, As, Pb, Cd, Cr) dans les sols agricoles du bassin versant de l'oued Alougoum ; d'autre part, de distinguer ce qui résulte de contamination liée aux actions humaines et ce qui constitue simplement le fond pédo-géochimique naturel local. Ainsi, on examinera les sols cultivés pour pouvoir connaître s'ils sont indemnes de contamination, ou au contraire s'ils ont gardé la trace d'apports de polluants minéraux potentiellement dangereux.

La recherche a comporté quatre phases principales :

1. Etude préliminaire des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum, avec implantation des profils pédologiques ;
2. Echantillonnage des horizons pédologiques irrigués par l'oued Alougoum et exposés aux risques potentiels de pollution d'origine minière ;
3. Echantillonnage des horizons pédologiques témoins, localisés hors d'impact et devant servir de comparaison avec les horizons exposés ;
4. Analyse des échantillons afin d'apprécier l'évolution des teneurs en profondeur et discriminer héritage naturel et résultat d'une contamination d'origine anthropique.

1.1. DESCRIPTION DES METHODES D'INVESTIGATIONS

Trois approches à la fois analogiques et pédologiques sont appliquées dans cette étude. Ces approches sont toutes basées sur l'interprétation des teneurs totales en As, Co, Cd, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Fe et Ba dans les sols agricoles (D. Baiz, 1997). Elles s'appuient toutes sur les concepts et les techniques de la pédologie et portent sur les méthodes suivantes :

1. Démarche de comparaison verticale ponctuelle ;
2. Démarche de comparaison latérale ;
3. L'approche typologique.

1.1.1. Démarche de comparaison verticale ponctuelle

Cette démarche consiste à comparer les teneurs en éléments traces de l'horizon labouré avec celles des horizons sous-jacents. De fortes teneurs en surface contrastant avec des concentrations beaucoup plus faibles immédiatement en dessous sont plutôt un indice d'apports importants liés aux activités humaines (contamination anthropique). En effet, il n'y a aucune raison pour que cet horizon de surface, présente des teneurs en éléments traces beaucoup plus élevées que celles mesurées dans les horizons sous-jacents. En revanche, des teneurs en surface élevées, mais continuant de croître avec la profondeur, sont plutôt un argument en faveur d'une origine géogène donc naturelle .

Dans certains cas, la répartition verticale d'un élément trace, peut tout aussi bien correspondre à un état naturel qu'à une contamination ayant migré en profondeur.

1.1.2. Démarche de comparaison latérale

Dans cette approche analogique, il s'agit de comparer l'échantillon sur lequel on s'interroge au même type d'horizon issu du même type de sol, situé à proximité et censé être intact de contamination.

1.1.3. L'approche typologique

Par cette méthode, les résultats de l'échantillon sont comparés avec les données collectées sur le même horizon du même "type de sol" ou "série". Une "série" est définie comme un type de sol existant localement, développé sur une formation géologique précise et parfaitement caractérisé, aussi bien en ce qui concerne la morphologie du solum (structure, couleur, éléments grossiers, succession et épaisseur des horizons) qu'au plan analytique (granulométrie, carbone, calcaire, fer). Dans une telle sous population très homogène du point de vue géochimique, une faible contamination peut facilement être détectée. Dans cette approche, on se rapportera aux relations naturelles métal/fer ou métal/taux d'argile.

1.2. PRELEVEMENTS REALISES

15 profils pédologiques de 70 à 110 cm de profondeur et 100 à 120 cm de diamètre ont été réalisés dont 8 (P1 à P8) sont implantés en aval de la mine de Bou-Azzer, le long de la vallée de l'oued Alougoum. Les 7 autres profils (P9 à P15), considérés comme témoins, se situent hors d'impact. En total, 47 horizons pédologiques ont été échantillonnés (cf, tableau 59).

1.3. DESCRIPTION DES PROFILS A L'ETAT HUMIDE

Pour chaque profil, nous avons caractérisé les différents horizons pédologiques. Ensuite, le maximum d'information a été collecté à propos du solum étudié (cf. annexe 4, compte rendu pédologique, figures 44 à 58) à savoir :

- Couleur et consistance des horizons ;
- Structure ;
- Texture ;
- Répartition des résidus dans l'horizon labouré ;
- Trace d'activité biologique ;
- Test HCL ;
- Roche sous-jacente, nature et état ;
- Type de sol ;
- Conclusion agronomique.

1.4. METHODE D'ECHANTILLONNAGE

On a procédé d'abord à un nettoyage complet de la paroi de la fosse du haut vers le bas. Ensuite, on a fait ébouler avec un couteau les agrégats de l'horizon à prélever dans une pelle à poussière en respectant la structure et les limites des horizons. Les prélèvements ont été réalisés depuis le bas vers le haut pour éviter toute nouvelle salissure de la paroi nettoyée. Les échantillons de 1 kg chacun prélevés dans chaque horizon ont été transportés dans des sacs en plastiques, portant le numéro du profil, suivi du numéro de l'horizon.

1.5. PREPARATION DES ECHANTILLONS

La préparation mécanique des échantillons a été faite au laboratoire de Bou-Azzer. Les échantillons prélevés humides ont été émiétés à la main, étalés et mis à sécher à l'étuve 40°C

N° Profil	Lieu de prélèvement	Coordonnées		Altitude	Nombre D'horizon	Horizon				
		X	Y			1	2	3	4	5
1	Zaouit Sidi Blal	348,2	388	1115	2	0 - 22	22 - 85	-	-	-
2	Amazzer	350,7	384,4	1075	4	0 - 45	45 - 65	65 - 80	80 - 100	-
3	Ait Aissa	352,8	383,2	1020	3	0 - 30	30 - 64	64 - 100	-	-
4	Ait M'rabt	354,5	379,6	974	3	0 - 35	35 - 80	80 - 110	-	-
5	Tasstift	358,7	376,3	910	3	0 - 20	20 - 60	60 - 110	-	-
6	Foum-Eloued	361,6	373,3	866	2	0 - 40	40 - 100	-	-	-
7	Alougoum	362,6	365,3	803	4	0 - 20	20 - 62	62- 77	77 - 100	-
8	Foum-Zguid	357,6	344	670	2	0 - 40	40 - 110	-	-	-
9	Tagragra	338,2	392,7	1097	3	0 - 37	37 - 70	70 - 93	-	-
10	Taloust	330,7	397,5	1386	3	0 - 18	18 - 66	66 - 96	-	-
11	Tiddiline	377,4	391	1277	5	0 - 20	20 - 54	54 - 70	70 - 85	85 - 110
12	Talamine	361	397	1325	4	0 - 20	20 - 40	40 - 56	56 - 80	-
13	Figuier	351,5	394,2	1287	3	0 - 20	20 - 76	76 - 98	-	-
14	Assaka	331,8	399,4	1388	3	0 - 36	36 - 54	54 - 70	-	-
15	Taznakht Kasbah	327,1	398,8	1392	3	0 - 30	30 - 56	56- 70	-	-

Tableau 59. Localisation des profils pédologiques réalisés.

jusqu'à poids constant pour d'éviter les fermentations ou le développement de bactéries ou d'algues. Ensuite, ils ont été broyés à une granulométrie inférieure à 100 µm. Chaque échantillon a été homogénéisé et quarté en trois lots. Le premier a été destiné au laboratoire de REMINEX pour le dosage de l'arsenic et métaux en solution, le deuxième lot pour le laboratoire de l'E.N.S.G de Nancy pour faire des analyses contradictoire et le troisième lot est gardé comme témoin.

1.6. MINERALISATION DES TERRES A L'EAU REGALE

Une aliquote de 1 g de terre fine a été placée dans des ballons de 250 mL auxquels on a ajouté 7,5 mL d'acide chlorhydrique 12 M et 2,5 mL d'acide nitrique 14 M. Après deux heures d'attaques à 20 °C, le contenu des ballons a été porté à ébullition sous reflux, pendant deux heures, sous une hotte ventilée. Après refroidissement, la solution a été filtrée (filtre sans cendre). Le filtre est rincé à l'acide nitrique 2 M à chaud et le filtrat ajusté à 100 ml avec de l'eau distillée.

1.7. DOSAGE DE L'ARSENIC ET METAUX EN SOLUTION

Dans chaque série de minéralisation, 3 blancs d'attaque et un échantillon de référence ont été inclus. La concentration de l'arsenic et métaux en solution a été déterminée par spectrométrie d'absorption atomique (AAS) en flamme. Les résultats d'analyses chimiques de chaque profil sont exposés à l'annexe 4, tableaux 60 à 74.

1.8. RECHERCHE DES CONTAMINATIONS DES SOLS CULTIVES PAR COMPARAISON VERTICALE PONCTUELLE

Les figures 59 à 62, représentent respectivement la répartition de l'arsenic, cobalt, nickel et baryum dans 47 horizons des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum. L'examen de ces figures fait apparaître les observations suivantes :

Les profils exposés (P1 à P7) ont une concentration en arsenic plus élevée dans les horizons de surface qui varie de 60 à 157 mg/kg, contre 27 à 38 mg/kg dans les horizons profonds. Ceci, laisse présager une contamination d'origine anthropique (Fig 59). On remarque aussi une contamination par l'arsenic de l'horizon de surface du profil témoin P10 (Taloust), avec une teneur de 52 mg/Kg, contrastant avec une teneur beaucoup plus faible en profondeur (20 mg/kg). Il ne s'agit pas très probablement d'une contamination par la mine, mais d'un chimisme de la nappe local lié au climat aride (rappelons que la nappe phréatique au niveau de Taloust, indique des teneurs de 34 mg As/kg). Les profils témoins P11 (Tiddiline) et P 13 (Figuier), montrent dans l'horizon labouré une pollution en arsenic. Ces profils sont implantés dans la boutonnière de Bou-Azzer qui présente des anomalies géochimiques naturelles positives en arsenic.

Une contamination par le cobalt d'origine humaine est nettement décelable dans les horizons labourés des profils exposés P1 à P6. Les teneurs en cobalt de 25 à 52 mg/kg, diminuent en profondeur et le retour à une concentration similaire au fond géochimique se situe pour chaque profil, dès le deuxième horizon (Fig 60). On constate des apports en Ni relativement importants d'origine anthropique dans les horizons de surface des profils exposés P5 et P8 et dans les horizons de surface des profils témoins P9, P10, P12 et P13 (Fig 61).

Dans le cas du baryum (Fig 62), les teneurs sont élevées dans les horizons labourés, mais elles continuent généralement de croître avec la profondeur. Il s'agit d'une pollution d'origine naturelle liée à des sols présentant un fond pédo-géochimique à des niveaux élevés en baryum.

Concernant le sélénium, les analyses chimiques, ne permettent pas de cerner sur son origine car les teneurs sont données à une limite de détection inférieure à 40 ppm.

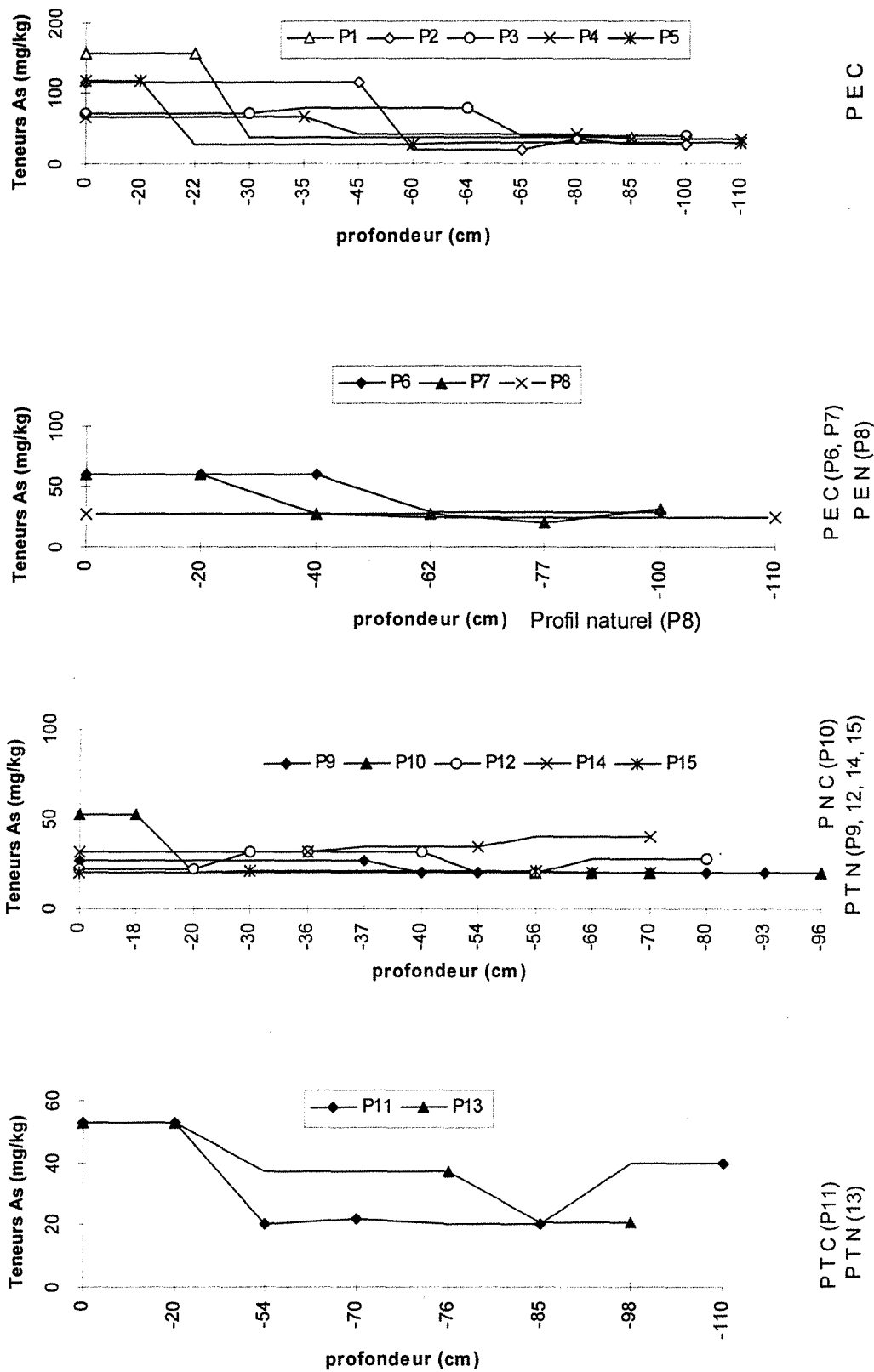


Fig 59. Recherche de contamination par l'As dans les sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle : PEC = profil exposé contaminé ; PEN = profil exposé naturel ; PNC = profil naturel contaminé ; PTC = profil témoin contaminé ; PTN = profil témoin naturel.

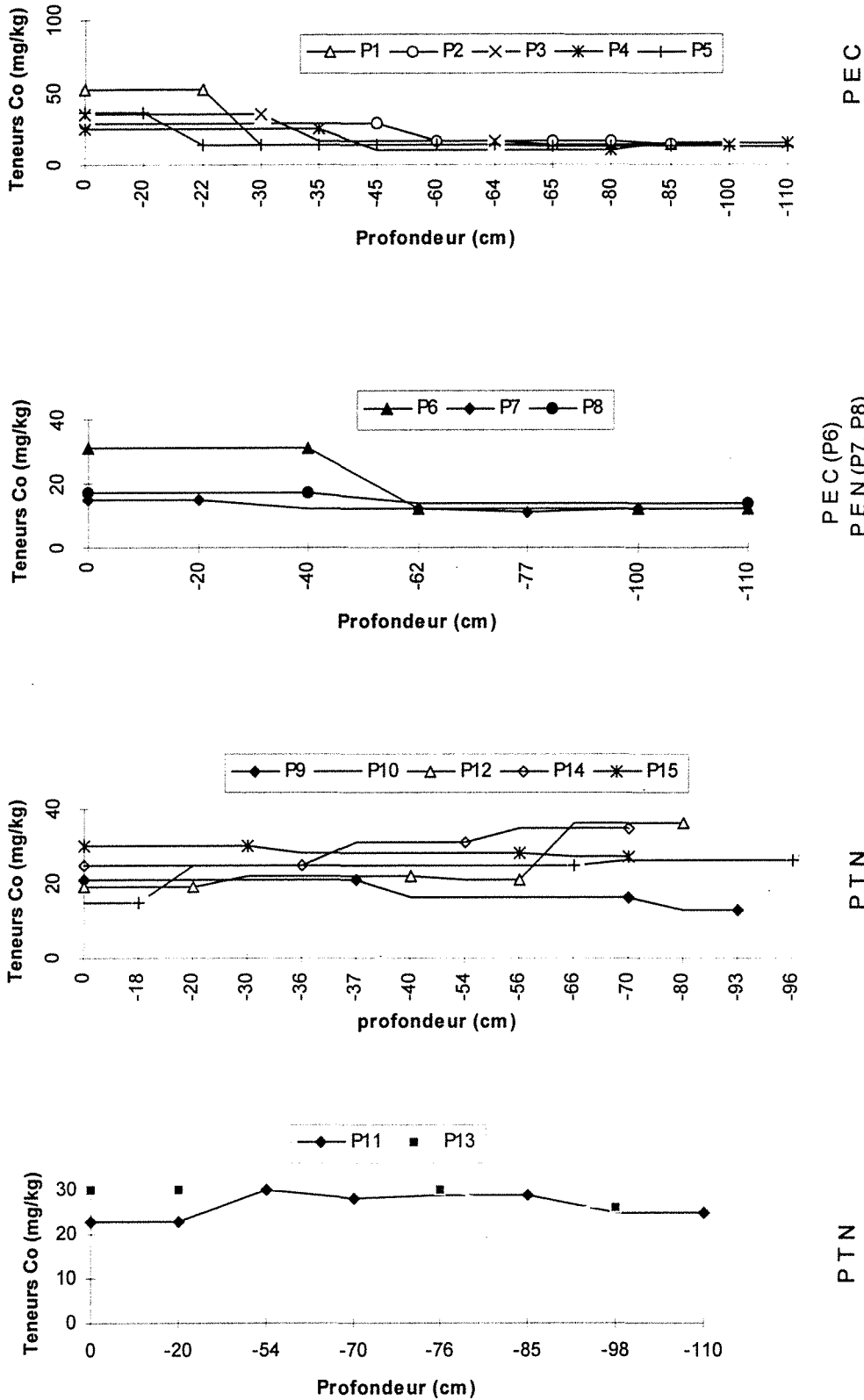


Fig 60. Recherche de contamination par le Co dans les sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle : PEC = profil exposé contaminé ; PEN = profil exposé naturel ; PTN = profil témoin naturel.

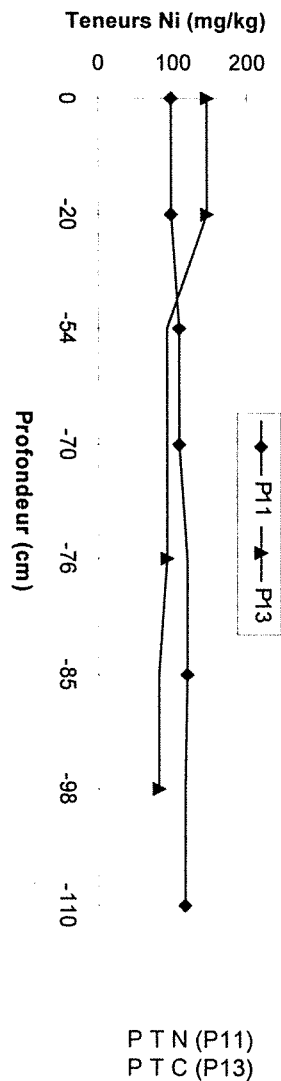
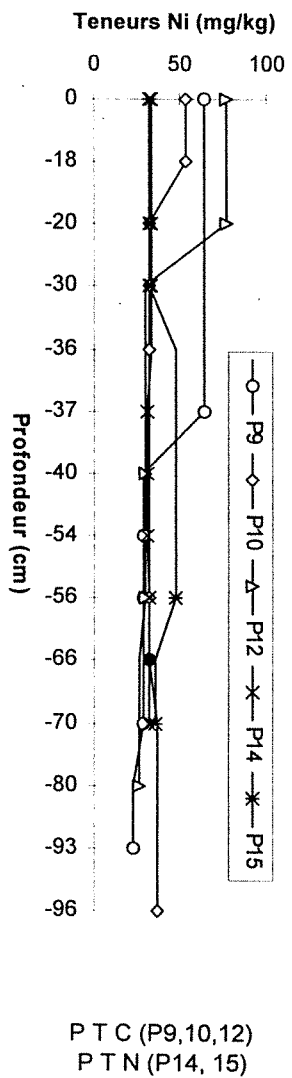
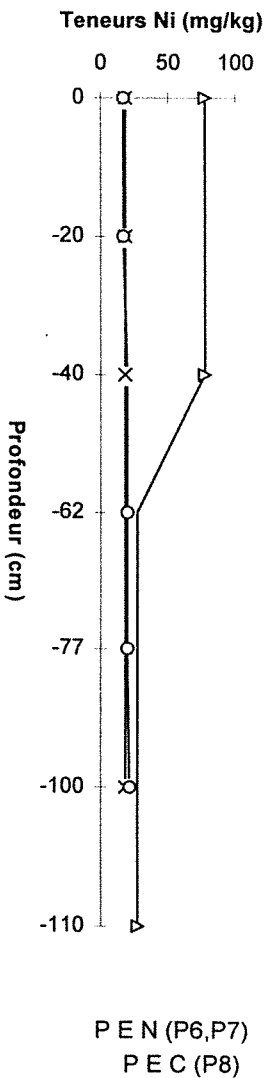
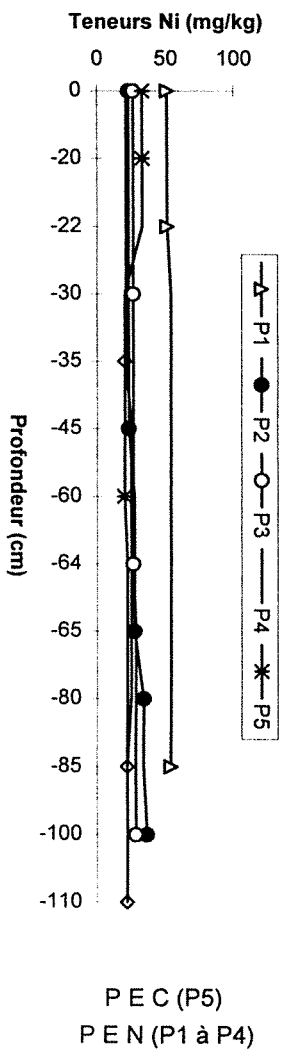


Fig 61. Recherche de contamination par le Ni dans les sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle : PEC = profil exposé contaminé ; PEN = profil exposé naturel ; PTC = profil témoin contaminé ; PTN = profil témoin naturel.

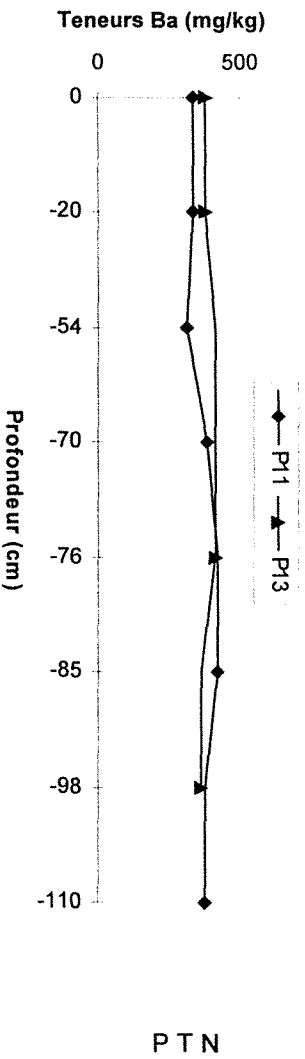
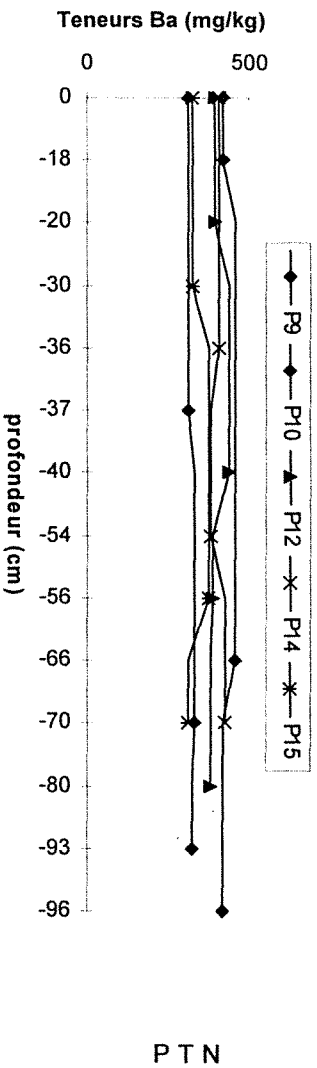
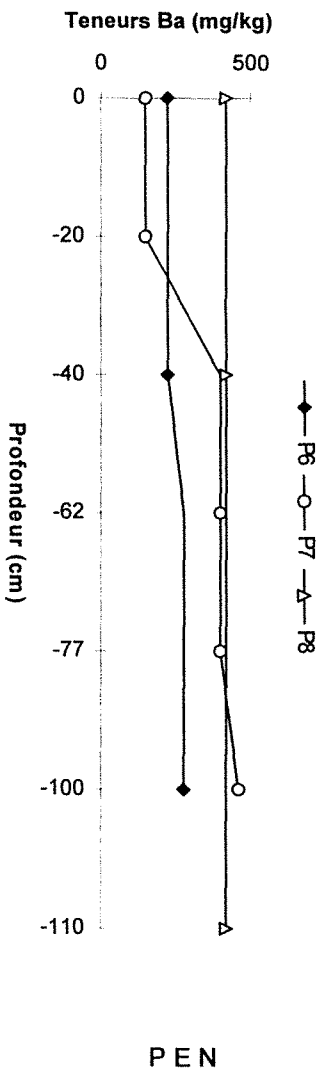
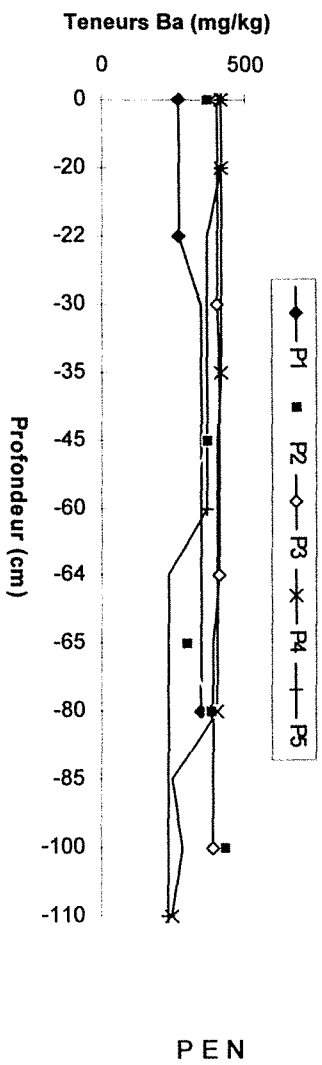


Fig 62. Recherche de contamination par le Ba dans les sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle : PEN = profil exposé naturel ; PTN = profil témoin naturel.

Par conséquent, on ne peut pas affirmer ou infirmer le lien de cet élément avec l'activité anthropique.

1. 9. RECHERCHE DES CONTAMINATIONS PAR COMPARAISON LATERALE

Dans cette démarche, les horizons labourés des profils exposés P1 à P5, peuvent être comparés valablement aux horizons labourés des profils témoins P14 et P15, non irrigués par l'oued Alougoum et censés être intacts de contamination.

Sur la figure 63, on constate que les teneurs en As dans les horizons de surface des profils exposés P1 à P5, oscillent entre 66 et 157 mg As/kg, alors que ces teneurs dans les horizons de surface des profils témoins, P 14 et P15 varient de 20 à 31 mg As/kg. Ceci est encore une fois un argument en faveur d'une origine anthropique (exploitations minières) de l'arsenic dans les horizons des profils exposés.

1.10. RECHERCHE DES CONTAMINATIONS PAR L'APPROCHE TYPOLOGIQUE

Par cette méthode, on analyse les relations entre l'As, Co, Ni, Cd, Cr, Pb, Cu, Zn totaux et fer total. Les horizons analysés proviennent de sols cultivés exposés, aussi bien que de sols témoins hors d'impact. Ce sont des horizons de surface mais aussi des horizons semi-profonds (entre 40 et 60 cm), voire très profonds (70 à 110 cm).

1.10.1. Notion de seuil d'investigation

Le seuil d'investigation est la teneur totale fixée dans une norme à valeur réglementaire. En général, cette teneur ne peut servir pour discriminer héritage naturel d'une part, et résultat d'une contamination d'autre part. Elle ne peut servir, au mieux, que de signal d'alerte au-dessus duquel des investigations plus détaillées sont nécessaires. Le seuil d'investigation est donc une valeur de teneur totale au dessus de laquelle une enquête pédologique et agronomique ou étude d'impact doit être engagée afin de déterminer si cette valeur est naturelle ou anthropique et pour évaluer les risques pour la chaîne alimentaire ou l'environnement

1. 10.2. Analyse des relations entre variables de la terre et fer total

1.10.2. 1. Relation arsenic et fer

Le nuage de points formé par les teneurs en arsenic total et fer total des sols cultivés, montre une relation négative dans les horizons labourés. Dans les horizons semi-profonds ou profonds, il paraît exister une bonne corrélation. En effet, les différences en As total dans le sous-sol semblent plus à relier avec les variations provenant du fond géochimique qu'à une éventuelle migration de l'As dans le profil (Fig 64).

Il paraît aussi, que les concentrations en As sont élevées pour 12 échantillons, dont 7 proviennent des horizons labourés des profils exposés P1 à P7. Ces teneurs varient largement dans une gamme de 42 à 157 mg/kg. Parallèlement, on constate un lessivage relativement faible de l'arsenic dans les horizons sous-jacents. Ces horizons, présentent des teneurs qui se situent entre 20 à 40 mg/kg. Pour ces types de sols, on peut considérer que des teneurs en arsenic supérieures à 30 mg/kg dans l'horizon labouré, correspondent à une contamination manifeste.

1.10.2.2. Relation cobalt et fer

L'examen de la figure 65, montre qu'il existe une bonne relation entre Co et Fer dans presque tous les horizons. Mais, on remarque que six échantillons présentent des teneurs en

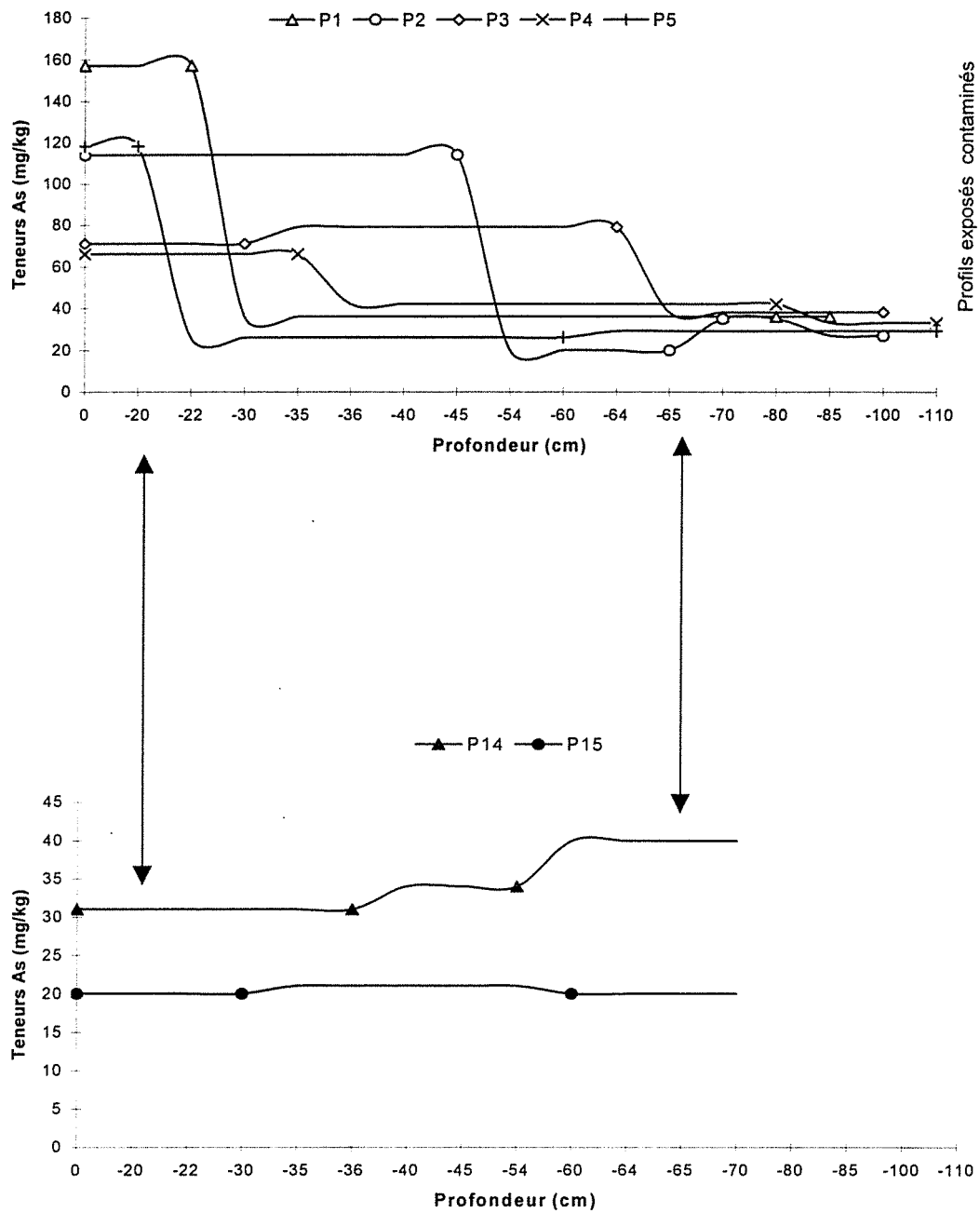


Fig 63. Recherche de contamination par l'As dans les sols cultivés le long de la vallée de l'oued Alougoum (P1 à P5) par comparaison latérale avec des sols de même type, situés hors d'impact (P14 et P15).

cobalt supérieures à 30 mg/kg que ce que la relation pouvait laisser prévoir. Ces échantillons proviennent des horizons de surface des profils exposés P1, P3, P5, P6, de l'horizon profond (66 à 96 cm) du profil témoin P10 (Taloust) et de l'horizon semi-profond (36 à 54 cm) du profil témoin P14 (Assaka). Le seuil de 30 mg/kg de cobalt, permet de distinguer ce qui résulte de contamination et ce qui constitue simplement le fond pédo-géochimique naturel.

1.10.2.3. Relation nickel et fer

On observe sur la figure 66 que les teneurs en Ni total et Fer total, présentent une relation positive, malgré des fortes teneurs en nickel dans les horizons de surface et horizons semi-profonds. Dans les horizons profonds, le fer est préférentiellement lié au nickel provenant du fond géochimique. Les teneurs en Ni sont élevées pour 15 échantillons. Il s'agit pour la plupart des horizons sous-jacents, des profils témoins P11 (Tiddiline) et P13 (Figuier), implantés au sein de la boutonnière de Bou-Azzer. Ces d'horizons sont développés sur des sols, présentant des anomalies géochimiques naturelles à fortes teneurs en nickel (structures précambriennes du PII inférieure). Une teneur en nickel supérieure à 40 mg/kg peut être considérée comme un indice de contamination.

1.10.2.4. Relation chrome et fer

La figure 67 montre qu'il existe une excellente corrélation Cr/Fer, quel que soit le type d'horizon. Les onze échantillons qui présentent une teneur en chrome supérieure à 60 mg/kg sont issus des horizons du profil témoin P11 (Tiddiline), localisé à proximité des gisements de chromite exploités par la compagnie de Tifnout Tighanimine (C.T.T), des profils témoins P13 (Figuier) et P15 (Taznakht Kasbah) ; localisés respectivement à 3 km et à 30 km à l'Ouest du centre minier de Bou-Azzer. Dans cette série d'horizons, une teneur supérieure à 60 mg/kg de chrome dans les horizons de surface, permet de distinguer les horizons contaminés de ceux qui sont restés intacts.

1.10.2.5. Relation Plomb et fer

Il n'existe pas d'axe privilégié pour le nuage de points correspondant à plomb total en fonction de fer total, quel que soit l'horizon considéré (Fig 68). Parmi les 47 échantillons analysés, deux échantillons se distinguent complètement par leur teneurs en plomb. Il s'agit des horizons labourés des profils exposés P1 (Zaouit Sidi Blal) et profil témoin P10 (Taloust), avec respectivement des teneurs en plomb de 34 et 32 mg/kg. Le seuil de 35 mg Pb/kg, n'a rien d'exceptionnel. En revanche, une teneur de 30 mg Pb/kg peut caractériser le fond géochimique local.

1.10.2.6. Relation cuivre et fer

La figure 69, fait apparaître une relation positive entre concentration en cuivre et fer quel que soit l'horizon considéré. Seul un échantillon, se singularise complètement par sa teneur de 52 mg Cu/kg. Il s'agit d'un horizon de surface du profil exposé P2 (Amazzer). A l'échelle du bassin versant de l'oued Alougoum, on peut affirmer qu'une teneur en cuivre supérieure à 50 mg/kg dans les horizons labourés, constitue un apport d'origine anthropique.

1.10.2.7. Relation baryum et fer

La figure 70, représente la distribution du baryum en fonction du taux de fer dans les sols cultivés, horizons de toutes profondeurs. Cette distribution semble visualiser une relation positive. La teneur maximale en Ba (460 mg/kg) a été détectée dans l'horizon profond (77 à 110 cm) du profil exposé P7 (Alougoum). La teneur minimale (148 mg Ba/kg), se rencontre dans l'horizon de surface (0 à 20 cm) du même profil. En général, les fortes teneurs en baryum décelées dans ces horizons ont leur origine naturelle et ne pourraient être attribuées aux activités humaines. Ainsi, une valeur moyenne supérieure à 450 mg Ba/kg de terre dans les

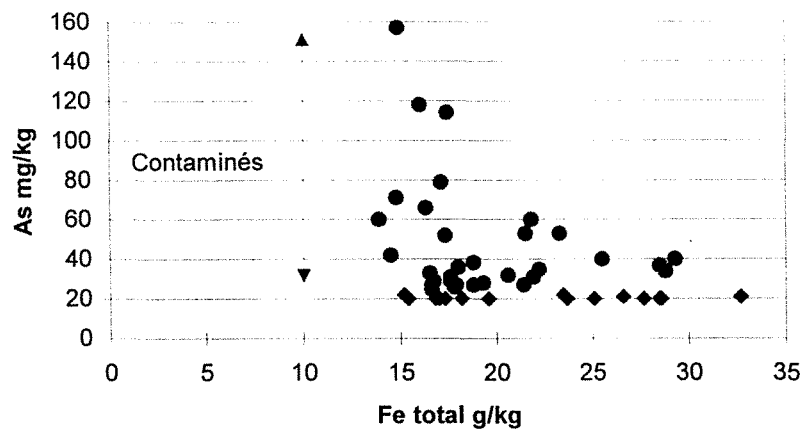


Fig 64. Relation entre arsenic et taux de fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de surface et plus profonds

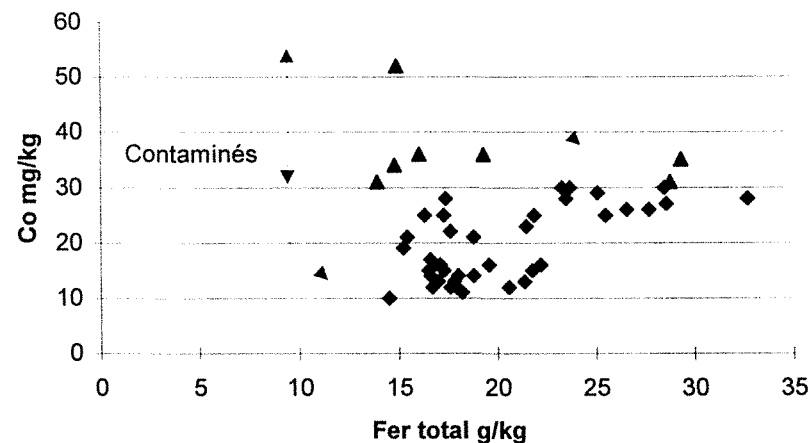


Fig 65. Relation entre cobalt et fer pour 47 horizons des sols prospectés horizons de toutes profondeurs.

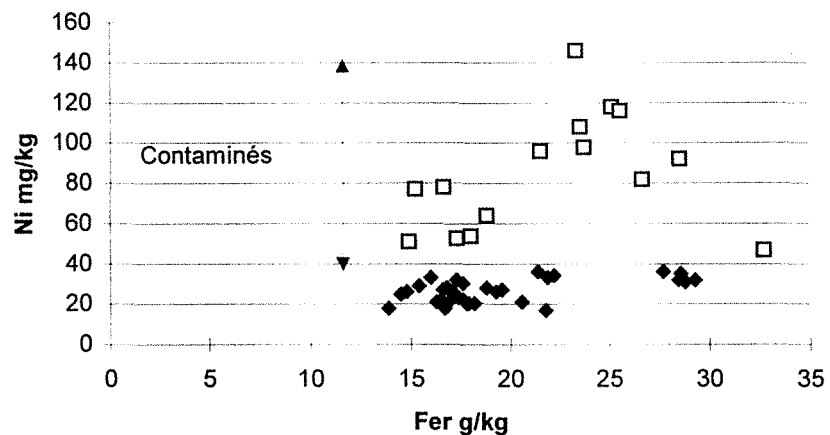


Fig 66. Relation entre le nickel et le fer pur 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.

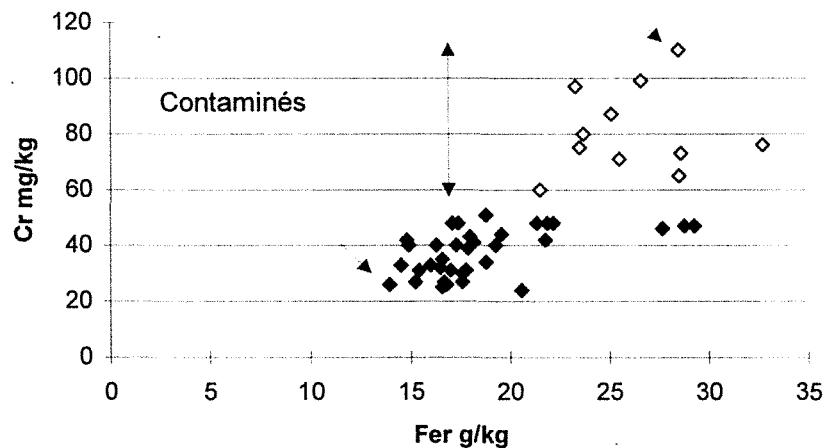


Fig 67. Relation entre chrome et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.

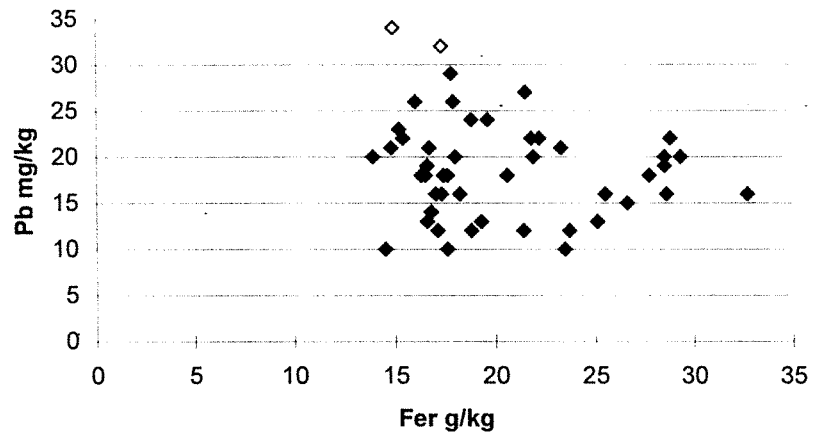


Fig 68. Relation entre le plomb et le fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.

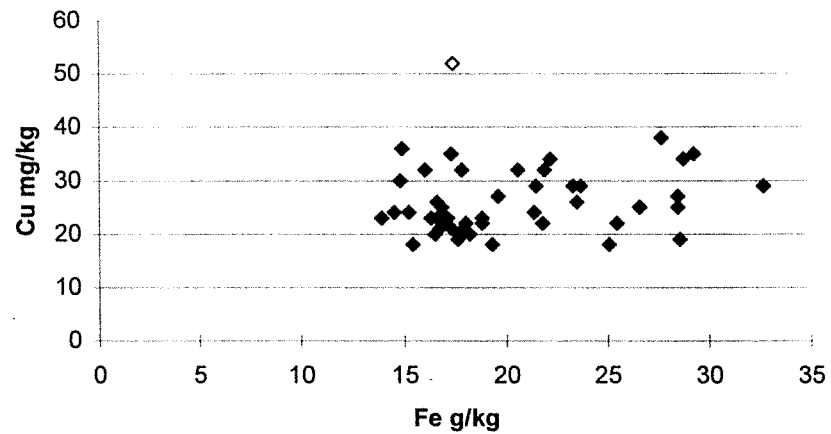


Fig 69. Relation entre le cuivre et le fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.

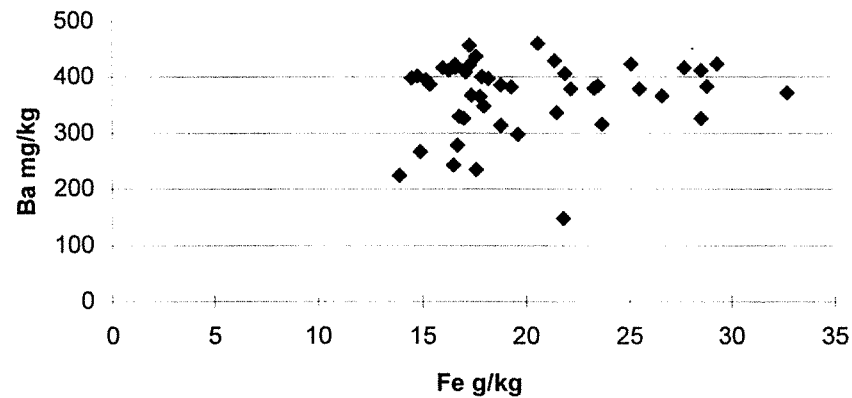


Fig 70. Relation entre baryum et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.

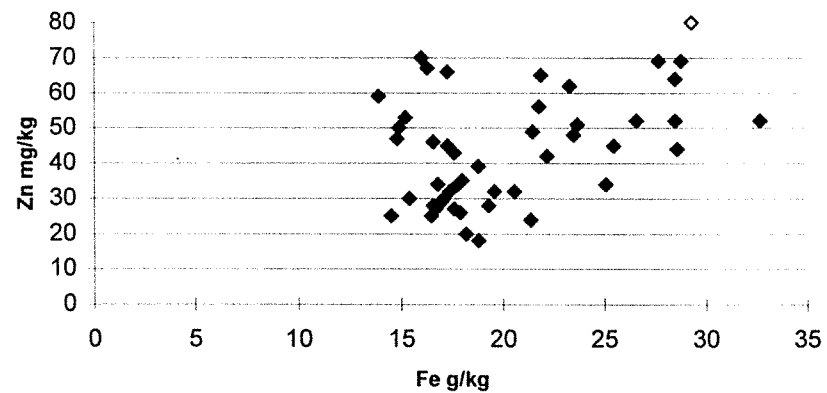


Fig 71. Relation entre le zinc et le fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.

dans les horizons labourés, pourrait constituer un argument en faveur d'une contamination liée aux actions humaines.

1.10.2.8. Relation zinc et fer

La corrélation liant la concentration en zinc et celle du fer dans les sols cultivés, semble positive (Fig 71). En effet, la distribution du zinc se fait en fonction du fer quel que soit l'horizon considéré. On observe quelques échantillons qui se caractérisent par des teneurs plus ou moins élevées. Cette augmentation des teneurs pourrait être attribuée à des apports notamment agricoles usuels tels que fumiers, engrais. Dans ce cas, on peut retenir la valeur de 70 mg Zn/kg comme seuil d'investigation à l'échelle du bassin versant.

1.10.2.9. Relation cadmium et fer

On observe sur la figure 72 qu'il n'y a pas véritablement de relation entre les teneurs en Cd et fer. Mais on remarque cependant, que les teneurs en Cd sont presque toutes élevées, variant de 2 à 4 mg/kg. Les horizons de surface des profils exposés (P1 à P8), présentent des teneurs contrastant avec des concentrations élevées dans les horizons sous-jacents.

Les horizons de surface des profils témoins, contiennent aussi des teneurs en Cd (2 à 4 mg/kg). Ainsi, la pollution en cadmium constatée aujourd'hui dans les sols cultivés à l'échelle du bassin, ne pourrait être attribuée aux actions humaines, mais à une pollution d'origine naturelle liée à un fond pédo-géochimique positive en cadmium. Une valeur supérieure à 4 mg Cd/kg de terre dans l'horizon labouré peut être prise comme seuil d'investigation à l'échelle du bassin versant considéré. Tout dépassement de cette teneur constitue une contamination certaine.

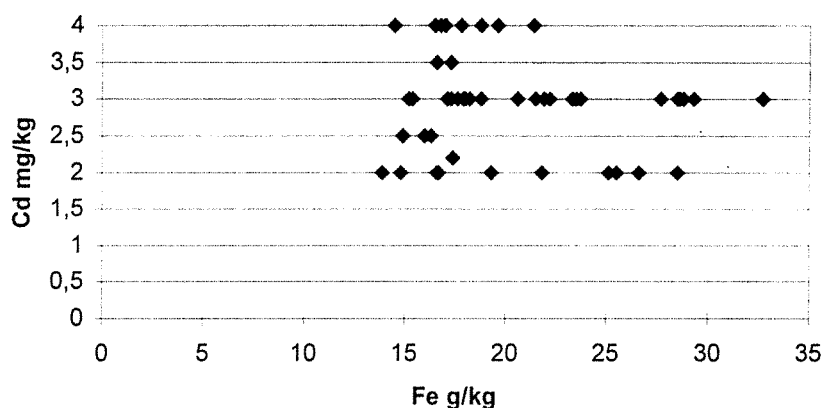


Fig 72. Relation cadmium et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs

1.12. CONCLUSION

L'étude pédologique des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum a permis d'établir les conclusions suivantes :

☛ Les teneurs en arsenic mesurées aujourd'hui dans les sols cultivés des profils exposés P1 à P7 (Zaouit Sidi Blal à Alougoum), situés en aval de la mine de Bou-Azzer, ne correspondent plus au fond géochimique naturel local. On révèle en particulier dans les horizons de surface des teneurs en arsenic excessives qui varient largement dans une gamme de 60 à 157 mg As/kg de terre. Ces teneurs dépassent de loin le fond géochimique naturel local (30 mg As/kg). Ceci conduit à attribuer à l'arsenic une origine anthropique (exploitations minières de cobalt de Bou-Azzer).

☛ L'analyse de l'évolution des teneurs en arsenic et éléments associés dans les horizons pédologiques, montre que les possibilités de réabsorption des polluants minéraux par les couches profondes sont très faibles. Les conditions climatiques (climat hyperaride, pluviométrie faible, évaporation intense etc ..) ont eu pour conséquence une accumulation des éléments polluants en particulier, l'arsenic dans les horizons labourés.

Cette pollution peut prendre des dimensions dramatiques, liées à la fois :

- ◆ à l'intensité des pollutions
- ◆ à la dispersion des pollutions
- ◆ à l'accumulation de la pollution dans les sols maintenus à des fins agricoles, cela signifie un très haut degré de contamination des plantes. Ce qui fait que le risque d'intoxication à partir de la consommation de plantes bioaccumulatrices d'As et métaux lourds est aussi probable.

☛ L'application de la méthode typologique, a permis de mettre en évidence des seuils d'investigations pour certains éléments traces (As, Co, Ni, Cd, Cr, Cu, Zn et Ba) pour les sols agricoles du bassin versant de l'oued Alougoum. Ces seuils sont de 30 mg As/kg, 30 mg Co/kg, 4 mg Cd/kg, 40 mg Ni/kg, 60 mg Cr/kg, 30 Pb/kg, 50 mg Cu/kg, 70 mg Zn/kg et 450 mg Ba/kg. Ces valeurs seront choisies comme valeurs de base ou valeurs de référence dans le chapitre II (Analyse des sols agricoles).

☛ Les seuils d'investigations proposés sont comparés à des valeurs seuils fixés par certaines normes réglementaires (cf. tableau 75). On constate que certains seuils actuellement proposés par les normes Afnor, Allemagne et Grande Bretagne sont placés en général trop haut pour signaler les anomalies en chrome, plomb, cuivre et zinc, qu'elles soient naturelles ou anthropiques dans les sols agricoles du bassin versant de l'oued Alougoum.

Éléments	Valeur seuil de la norme Afnor U 44 041	Allemagne	Grande Bretagne	Seuils d'investigation proposés
	(Total)	Total	A	A
Cd	2	3	3	4
As	-	20	10	30
Co	30	50	-	30
Ni	50	50	70	40
Cr	150	100	600	60
Pb	100	100	500	30
Cu	100	100	500	50
Zn	300	300	300	70
Ba	-	-	-	450

Tableau 75. Confrontation des seuils d'investigation proposés pour les sols agricoles du bassin versant de l'oued Alougoum aux valeurs guides maximum pour les concentrations admissibles dans les terres agricoles (sources : Ewers, 1988 ; Alloway, 1992).

CHAPITRE II

ANALYSE DES SOLS AGRICOLES

INTRODUCTION

L'étude pédologique des sols cultivés le long de la vallée de l'oued Alougoum, a montré l'existence de l'arsenic, cobalt, nickel, chrome, plomb, cadmium, cuivre, zinc etc, provenant du fond géochimique. Cependant, l'activité anthropique (exploitations minières), contribue à augmenter les concentrations en ces éléments dans les horizons labourés. Il y a aussi, les roches en place et les retombées atmosphériques, qui peuvent présenter aussi une source principale de pollution diffuse des sols par certains polluants minéraux.

Avant de confronter les résultats aux valeurs seuils d'une réglementation nationale ou à des références étrangères, nous avons procédé dans le chapitre I (paragraphe I.10. 2) à la détermination des seuils d'investigation des éléments en traces analysés dans les sols. Les teneurs en arsenic sont plus particulièrement élevées et dépassent le signal d'alerte au-dessus duquel des investigations plus détaillées sont nécessaires.

En effet, un des grands problèmes de la pédologie réside dans la représentativité des échantillons. Il est assez vertigineux, quant on y réfléchit un peu, de prétendre caractériser une couverture pédologique de plusieurs dizaines ou plusieurs centaines d'hectares (sur une épaisseur d'un mètre ou plus) par quelques profils seulement. C'est dans ce cadre, que nous avons développé nos recherches pour s'assurer au maximum de la représentativité des prélèvements. Pour ce faire, un grand nombre d'échantillon a été prélevé au niveau de chaque site. Le but fixé est d'une part, quantifier la pollution en intensité et en extension ; d'autre part, ramener les valeurs mesurées au seuil de tolérance admissible afin d'évaluer le degré de pollution et estimer l'impact de l'activité minière de Bou-Azzer sur les sols agricoles. Le dosage des éléments en traces a été complété par des analyses pédologiques classiques, telles que la granulométrie, carbone total, azote et carbone organique.

II.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DES SITES DE PRELEVEMENTS

Cette étude a été réalisée dans un premier temps sur les sols cultivés exposés, depuis Zaouit Sidi Blal à Foum-Zguid. Ensuite des sols cultivés témoins, non irrigués par l'oued Alougoum ont été prélevés à titre de comparaison. Il s'agit de l'Ouest en Est des sites suivants : Taloust, Tagragra, Figuier, Talamine et Tiddiline (Fig 73). Des sols vierges (non cultivés) ont été également prélevés au niveau de chaque agglomération.

II.2. METHODE D'ECHANTILLONNAGE DES SOLS

Pour être significatif, un échantillonnage doit porter sur 25 m³ de sol. Ainsi, nous avons échantillonné entre 0 et 25 cm de profondeur sur une surface de 250 m² en prélevant 8 à 10 échantillons par site. Les échantillons ont été conditionnés en sacs plastiques étanches numérotés et portant le nom du site. Ils ont été analysés séparément et la valeur retenue pour être comparée aux normes sera la valeur moyenne (arithmétique) des résultats.

II.3. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les échantillons prélevés ont été séchés à 40 °C jusqu'à poids constant, puis broyés inférieures à 100 µm au laboratoire de Bou-Azzer. Chaque échantillon d'au moins 1 kg a été d'abord homogénéisé puis quarté en trois.

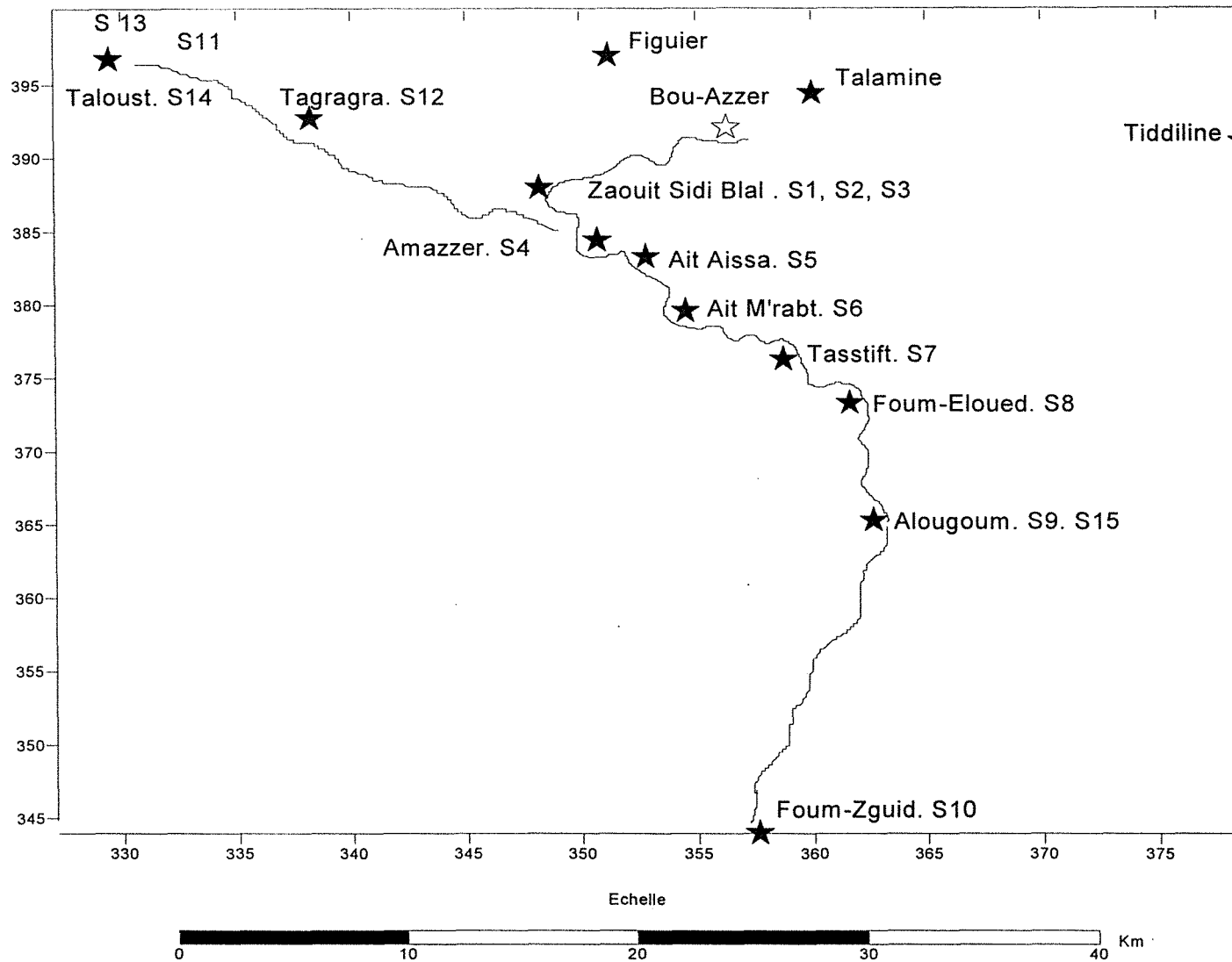


Fig 73. Localisation des points de prélèvements des sols agricoles (★) et des sols vierges (S).

Le premier lot a été analysé au laboratoire de REMINX, le deuxième a été étudié au laboratoire du centre de pédologie biologique (C.R.N.S) Nancy), où une analyse granulométrique comportant trois fractions et une étude physico-chimique des paramètres principaux a été réalisée (carbone organique, carbone total et l'azote). Le troisième lot est gardé comme témoin.

II.4. REGLEMENTATION SUR LES ELEMENTS EN TRACES DANS LES SOLS

Le Maroc ne dispose pas de normes concernant les sols agricoles. En France, il existe des valeurs limites de concentrations en éléments en traces dans les sols lors de la valorisation agricole de boues d'épuration. Il s'agit d'une norme homologuée NF U 44-041 « Matières fertilisantes : boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines ». Cette norme est rendue obligatoire par l'arrêté interministériel du 29 Août 1988 et comporte des spécifications portant sur les caractéristiques des boues et sur les modalités d'utilisation, avec une prescription sur les valeurs d'apports limites de métaux au sol et les teneurs limites en métaux (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg, Cr) à ne pas dépasser dans les sols (cf. annexe 5, tableau 76) (Andred, 1988 ; M. Mench, 1993). Cette réglementation s'inscrit dans le cadre européen de la directive CEE 86/278 modifiée le 2 Décembre 1988 (88 C/307/10). Dans la pratique, il est d'usage d'utiliser cette norme à titre indicatif pour classer la qualité des terres, mais elle ne tient pas compte des disparités des sols en matière de fond géochimique.

La réglementation est beaucoup plus avancée dans les pays du Nord de la CEE (Pays-Bas, Allemagne, Danemark) ou en Suisse. Les approches pour la qualité des sols sont diverses. Par exemple en Allemagne, il existe des valeurs guides selon les teneurs totales. En Suisse, les normes sur la qualité des sols tiennent compte de la concentration totale (extrait avec HNO_3) mais aussi des quantités solubles et échangeables par une solution de NaNO_3 . En effet, ceci permet de distinguer les cas selon la mobilité du métal dans le sol.

Aux Pays-Bas, il existe des valeurs seuils pour 3 niveaux de teneurs totales : niveau de référence (A), niveau donnant lieu à examen (B), niveau avec étude d'impact et éventuellement injonction de réhabiliter le milieu (C) (Ewers, 1991 ; M. Mench, 1993). Les valeurs du niveau (A) tiennent compte de la composition de la terre en argiles et en matières organique (cf. annexe 5, tableau 77).

L'approche en Grande-Bretagne fait l'hypothèse d'un sol à pH 6,5 et propose deux valeurs seuils selon l'utilisation du terrain (aire récréative, jardin, terre agricole) (Alloway, 1992 ; M. Mench, 1993).

Pour confronter les résultats d'analyses chimiques aux normes, nous avons opté donc pour des normes modernes s'inspirant des cas des pays les plus avancés dans ce domaine. Ainsi, nous préconisons l'adoption des normes néerlandaises qui partent du principe de la multifonctionnalité des sols, un sol devant pouvoir servir à tout usage ultérieur. Dans notre étude, les valeurs de base ou valeurs de référence correspondent aux seuils d'investigation prédéterminés dans le chapitre I (cf. tableau 75, chapitre I).

On considère que ces valeurs sont « normales » et acceptables dans le milieu étudié. Ces valeurs sont certainement suffisamment basses pour ne constituer aucune nuisance pour l'homme, les animaux ou les plantes et simultanément pour éviter tout transfert de contamination d'un milieu à un autre. Elles peuvent servir de comparaison entre un milieu à risque de pollution et un milieu exempt de toute pollution. Ainsi, elles vont varier d'une région naturelle à une autre et tout dépassement de ces valeurs dans le bassin versant de l'oued Alougoum doit en quelque sorte attirer l'attention de l'opérateur qui se doit d'approfondir la question pour savoir s'il s'agit d'une pollution ou non (fond géochimique naturel élevé) et éventuellement exercer une surveillance.

Pour les valeurs d'intervention (ou seuil de tolérance maximal), nous avons opté pour des valeurs néerlandaises (cf. annexe 5, tableau 78). Ce sont des valeurs qui ont été établies à partir de très nombreux travaux scientifiques prenant en compte principalement des critères de toxicité vis-à-vis de l'homme, d'écotoxicité, de mobilité dans le milieu naturel et cela pour chaque élément ou composé à risque. Ces valeurs n'ont plus de ce fait de caractère régional mais sont universels. Tout dépassement de ces valeur se traduit par une contamination certaine et il s'avère impératif d'intervenir pour ramener les teneurs en - dessous des seuils de toxicité admis.

Nous utilisons donc les valeurs d'intervention hollandaises qui ont l'avantage de tenir compte de la nature et de l'utilisation du milieu naturel local, en particulier pour les sols pour lesquels deux paramètres fondamentaux de contrôle des teneurs sont pris en compte. Il s'agit de la teneur en argile et la teneur en matière organique. Les valeurs brutes présentées dans le tableau 78, annexe 5, correspondent à un sol standard contenant 25 % d'argile et 10 % de matière organique (MO). Pour chaque échantillon, il faut donc corriger les valeurs du sol standard en utilisant des formules de correction aussi bien pour les métaux que pour les composés organiques.

Pour les métaux, la formule employée est :

$$V_c = \frac{V_i \times (A + B \times AR) + (C \times MO)}{(A + B \times 25) + (C \times MO)}$$

V_c = Valeur corrigée

V_i = Valeur d'intervention (ou valeur sol standard (annexe 5, tableau 78)

A, B et C sont des constantes (voir annexe 5, tableau 79)

AR = % d'argile (la fraction minérale < 2 µm)

MO = % matières organiques

Pour les composés organiques, la formule est la suivante

$$V_c = V_i \times MO/10$$

V_c = Valeur corrigée

V_i = Valeur sol standard

MO = % matières organiques

II. 5. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

II.5.1. Matériel et méthode

Les échantillons analysés concernent les horizons labourés (0 à 25 cm). Dans la texture d'un échantillon de sol, nous distinguons les fractions supérieures à 50 µm, les sables, obtenus par tamisage et les particules inférieures à 50 µm ou pélites que l'on a séparé par sédimentation en milieu liquide : limons grossiers, de 50 à 20 µm, les limons fins, de 20 à 2 µm et argiles, inférieures à 2 µm.

La série d'opérations techniques qui aboutit aux sous-fractions argileuses comprend :

a/ prétraitement de désagrégation

Ce prétraitement comporte les opérations suivantes :

→ Destruction de la matière organique par l'eau oxygénée

Nous avons utilisé l'eau oxygénée, qualité électrolytique pour éviter la forte acidité

(H₂O₂, qualité technique est stabilisé par SO₂⁻⁴ et PO₃⁻⁴) d'abord à température ordinaire (macération) puis à 60°/ 80° pendant quelques heures. Le partage des sables s'effectue par tamisage, alors que la séparation des limons (50 - 2 µm) et argiles (< 2 µm) nécessite une sédimentation d'une suspension stable en allonge.

↳ Dissolution des produits amorphes à bases de fer et aluminium

Ce traitement de désaluminisant et déferrifiant, se fait soit par le réactif oxalique (Tamm) + dithionite, soit par le carbonate de sodium (préconisé par Dejou, 1970) et l'acide chlorhydrique.

↳ Elimination des carbonates et des sels solubles

L'agent employé est l'acide chlorhydrique 2 N éliminé ensuite par lavage à l'eau déminéralisée. Après ces prétraitements chimiques, les échantillons sont soumis à l'agitation mécanique pour obtenir des suspensions qui seront stabilisées par des agents dispersants.

b/ Traitements de dispersions classiques

Les agents dispersants les plus couramment utilisés sont les solutions basiques (soude, ammoniacale), des sels d'acides organiques (citrate de sodium) ou mieux encore des polyélectrolytes (hexamétaphosphate), les sels de sodium étant les plus actifs. La méthode de fractionnement des argiles, repose sur l'utilisation d'une centrifugeuse (de type sharples) qui opère en flux continu et effectue une séparation selon la taille des particules argileuses élémentaires.

Les suspensions sont introduites à la base du bol de centrifugation. Il s'agit d'un cylindre (longueur 240 mm, diamètre 44 mm) disposé verticalement. Sous l'effet de la force centrifuge, le liquide forme le long de la paroi, un film annulaire dont l'épaisseur est contrôlée par l'ouverture de sortie des suspensions situées dans la partie haute du bol. Les particules sont soumises à la force centrifuge et à la force de déplacement du liquide. Pour une vitesse de rotation et un débit donnés, les particules de dimension supérieure à une taille donnée se déposent sur la paroi interne. Les particules de plus petite taille, n'ayant pas eu le temps de sédimentaire sont évacuées au sommet du bol avec l'effluent. Le taux d'argile a été mesuré par pesée d'un prélèvement à la pipette de Robinson. Il y a lieu de signaler que l'on peut obtenir le taux d'argile dispersée par le dosage direct de la silice par spectrométrie d'absorption atomique (méthode rapide approchée à 5 % près).

II .5.2. Résultats d'analyses granulométriques

Les résultats d'analyses granulométriques sont présentés au tableau 80. Les horizons de surface des sols maintenus à des fins agricoles, le long de la vallée de l'oued Alougoum ont un taux d'argile qui varie de 15, 8 à 23,1 %, une fraction sableuse de 35,65 à 50,4 %, un taux de limons grossiers compris entre 14,2 et 20,3 % et une fraction de limons fins qui oscille entre 15,9 et 27,45 %.

II.5.2.1. Classification des sols agricoles selon leur texture

Les principales propriétés des sols agricoles, peuvent être définies, grosso modo, à l'aide d'un triangle, appelé triangle des textures. Nous prenons à titre d'exemple, le triangle utilisé par le Service de Cartographie des Sols de France (P. Duchaufour, 1984). Les trois côtés du triangle correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile. Pour un sol donné, les axes des coordonnées ainsi tracés concourent en un point, dont la position renseigne immédiatement sur la composition granulométrique du sol. Les domaines délimités à l'intérieur du triangle correspondent aux différentes classes de textures.

Sites	Granulométrie en %			
	Sables	limons grossiers	limons fins	Argiles
	> 50 µm	50 - 20 µm	20 - 2 µm	< 2 µm
Zaouit Sidi Blal	42,8	14,6	19,5	23,1
Amazzer	35,65	16,25	27,45	20,65
Ait Aissa	41	18,35	23,45	17,2
Ait M'rabt	39,5	14,2	22,2	24,1
Tasstift	43,35	18,3	20,35	18
Foum-Eloued	43,8	19,8	20,6	15,8
Alougoum	43,3	20,3	20,3	16,1
Foum-Zguid	50,4	17,9	15,9	15,8
Tagragra	44,6	15,4	21,4	18,2
Taloust	34,1	34,5	18,6	12,8
Talamine	38,9	18,7	18,2	24,2
Tiddiline	29,7	15,7	27,3	27,3
Figuier	39,7	15,1	24,1	21,1

Tableau 80. Granulométrie des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum (horizons labourés : 0 - 25 cm).

A l'examen de la figure 74, on constate que les sols cultivés, depuis Zaouit Sidi à Tasstiff sont des limons sablo-argileux. Les sols de Foum-Eloued, Alougoum et Foum-Zguid sont des limons moyens sableux. En dehors de la vallée, on trouve des sols limono-sablo-argileux au niveau de Tagragra, Talamine et Figuier et des limons moyens-sableux au niveau de Taloust. Les sols du douar Tiddiline sont des limons argilo-sableux.

II.6. ANALYSE DU CARBONE TOTAL ET L'AZOTE

Le carbone et l'azote sont des éléments particulièrement intéressants à suivre et à quantifier dans l'étude des humus et des sols ; leur teneur nous permet d'établir des rapports C/N, dont les variations sont de bons indicateurs de degré d'humification des substances organiques.

II.6.1. Matériel et méthode

L'analyse du carbone total et l'azote a été faite par chromatographie en phase gazeuse (CARLO. ERBA) CHNS-O, EA 1108. Les étapes suivies au cours de l'analyse sont les suivantes :

- Combustion à 1 020 °C sous courant d'oxygène ;
- Pyrolyse à 1 800 °C ;
- Séparation des gaz par colonne chromatographique.

Les teneurs sont déterminées par étalonnage à partir d'un produit pur dont la teneur en carbone et azote est connue. L'intégrateur mesure la surface qui correspond à une teneur en carbone et azote, et à partir des résultats que donne l'étalon, on calcule la teneur en carbone total et azote des échantillons.

II.7. ANALYSE DU CARBONE ORGANIQUE

II.7.1. Matériel et méthode

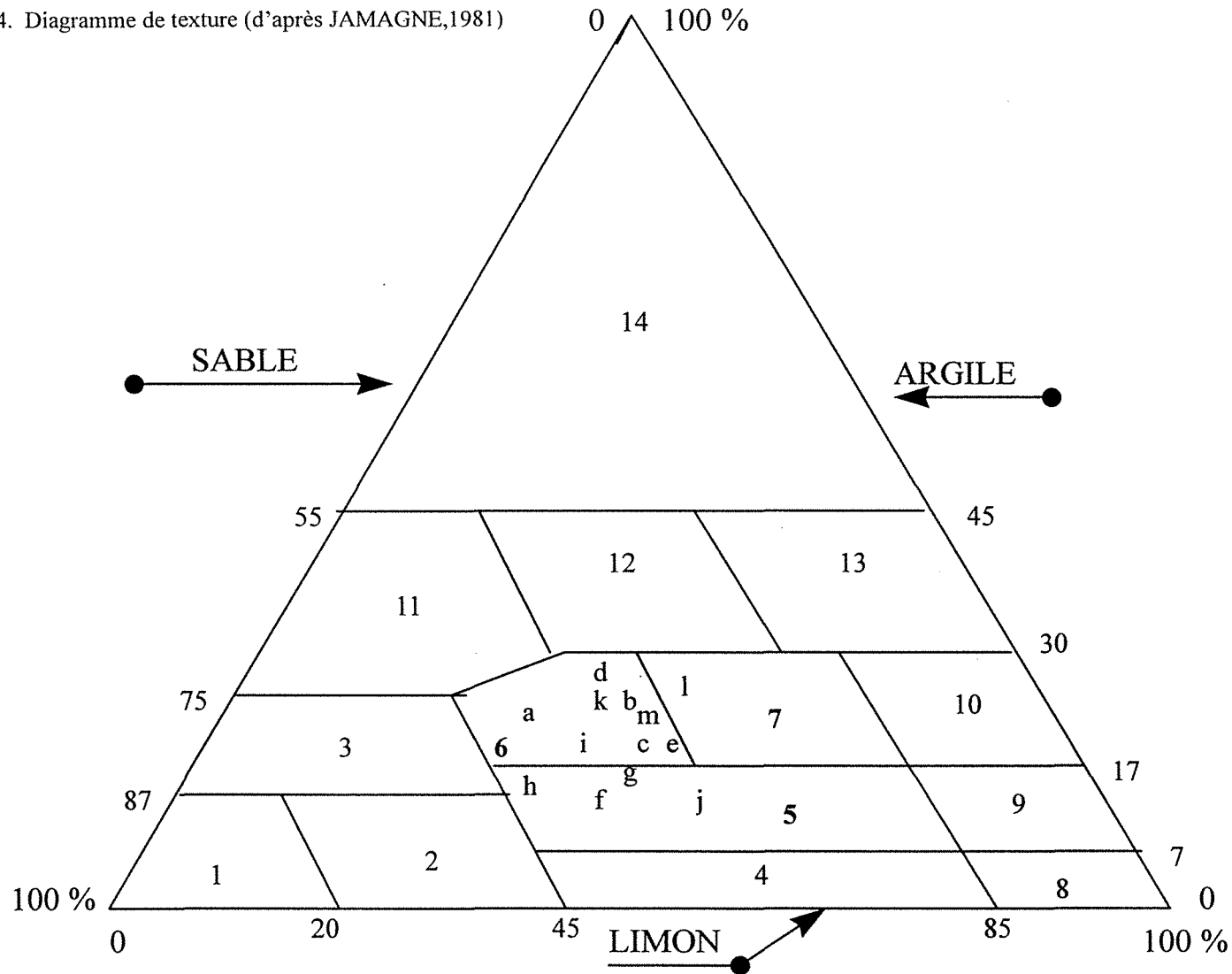
Les échantillons des sols ont été acidifiés avec HCL (2N), puis séchés sur plaque chauffante à 40 °C. Le dosage du carbone organique a été réalisé à l'aide d'un carmograph 12 de Wostoff. Après la combustion à 950 °C sous courant d'oxygène, une cellule de conductimétrie mesure la différence entre la soude NaOH (N/40) propre et la soude carbonatée. Cette différence correspond à la teneur en carbone organique.

II.8. LA MATIERE ORGANIQUE

Le taux de la matière organique, nous permet avec la fraction argileuse (< 2 µm) de corriger les teneurs en éléments polluants et de les ramener aux seuils de tolérance admissibles. Rappelons que les débris végétaux de toute nature, feuilles, rameaux morts, qui tombent sur le sol, constituent la source essentielle de la matière organique du sol. Ces débris végétaux, dès leur arrivée au sol, ils sont plus ou moins rapidement décomposés par l'activité biologique : la litière constitue la masse végétale, encore peu transformée, qui recouvre le sol minéral. Au cours de sa décomposition, elle donne naissance d'une part, à des éléments minéraux solubles ou gazeux, tels que NH₃, CO₃, nitrates sulfates, etc ; d'autre part, à des composés amorphes qui contractent des liaisons avec les éléments minéraux, les argiles notamment (formation du « complexe argilo-humique »).

Cette matière organique transformée, constitue l'humus au sens strict, relativement plus stable et résistant à la biodégradation que la matière organique fraîche. L'ensemble des processus de transformation de la matière organique fraîche en humus est désigné par le terme « humification ».

Fig 74. Diagramme de texture (d'après JAMAGNE,1981)



1: Sable; 2. Sable limoneux; 3. sable argileux; 4. Limon léger sableux; 5. Limon moyen sableux; 6. Limon sablo-argileux; 7: limon argilo-sableux; 8. Limon léger; 9. Limon moyen; 10. Limon argileux; 11. Argile sableux; 12. Argile; 13. Argile limoneuse; 14. Argile lourd; a: Zaouit Sidi Blal; b: Amazzer; c: Ait Aissa; d: Ait M'rabt; e: Tasstift; f: Foum-Eloued; g: Alougoum; h: Foum-Zguid; i: Tagragra; j: Taloust; k: Talamine; l: Tiddiline; m: Figuier.

La quantité globale de matière organique du sol est évaluée de manière approximative par le dosage du carbone organique. Comme la matière organique ne renferme que 58 % de carbone, on multiplie le C % (carbone organique) par le facteur $100/58 = 1,724$ pour avoir la M.O %. La matière organique (M.O) = C X 2 dans les sols à végétation permanente (forêt) et M.O = C x 1,724 dans les sols cultivés (P.DUCHAUFOR, 1984).

Le tableau 81 résume les résultats de l'étude physico-chimique des principaux paramètres acquis sur la terre des horizons (0 - 25 cm) : teneurs en carbone total (C), carbone organique, Azote (N), matière organique (M.O) et degré d'humification (C/N).

II.9. INTERPRETATION DES RESULTATS

II.9.1. Sols cultivés exposés

Les sols agricoles situés en aval de la mine de Bou-Azzer : Zaouit Sidi Blal, Ait M'rabt et Tasstift ont une structure limono-sablo-argileuse. Ces sols renferment en moyenne 42 % de sable, 36 % de limon et 22 % d'argile. La concentration moyenne en matière organique de 1,71 % est très minime pour ces sols contenant un taux d'argile moyen de 22 %. Ceci se traduit par la faiblesse des apports agricoles usuels (fumiers, engrais). Le rapport moyen C/N est de l'ordre de 12. Il s'agit des sols biologiquement actifs, avec une matière organique facilement biodégradable.

Les sols d'Amazzer et Ait Aissa, localisés de même le long de la vallée de l'oued Alougoum, présentent un taux moyen de sable de 38 %, 43 % de limon et 19 % d'argile. Il s'agit des sols limono-sablo-argileux, avec une carence en matière organique (0,87 % en moyenne). Ce taux de matière organique est très faible pour ces sols dont la teneur en argile est relativement élevée. Le degré d'humification moyen (C/N) d'environ 20, montre que ces sols sont faiblement actifs, avec un déséquilibre en carbone et azote.

Les sols cultivés au niveau du douar Foum-Eloued, Alougoum et Foum-Zguid, présentent une texture limono-moyenne sableuse, avec un taux moyen d'argile de 16 %. Ce sont des sols relativement faibles en matière organique (1,2 % en moyenne) et présentant un degré d'humification moyen de l'ordre de 15. Ce sont des sols biologiquement actifs dont la matière organique est facilement biodégradable.

II.10. TENEURS EN ELEMENTS TRACES DANS LES SOLS

Le tableau 82 annexe 4, illustre les teneurs moyennes en polluant minéraux dans les horizons labourés (0 - 25 cm) des sols prospectés au sein du bassin versant de l'oued Alougoum. Ces teneurs varient de 14 à 225 mg As/kg, 17 à 79 mg Co/kg, 15 à 199 mg Ni/kg, 0,3 à 4 mg Cd/kg, 17 à 44,5 mg Pb/kg, 25 à 53 mg Cr/kg, 18 à 47 mg Cu/kg, 33 à 107 mg Zn/kg, 351 à 526 mg Ba/kg.

II.10.1. Teneurs en arsenic dans les sols cultivés exposés

Les sols cultivés le long de la vallée de l'oued Alougoum, indiquent dans les horizons labourés des teneurs moyennes en arsenic qui varient de 22 à 225 mg/kg (moyenne 132 mg/kg). Les teneurs de 100 à 225 mg/kg (moyenne 148 mg/kg) ont été détectées au niveau des sols des douars Zaouit Sidi Blal à Alougoum. La teneur minimale de 22 mg/kg, se rencontre dans les sols de la localité de Foum-Zguid, située à 65 km en aval de la mine (Fig 75).

II.10.2. Teneurs en arsenic dans les sols cultivés témoins

Dans les horizons de surface des sols témoins, les teneurs moyennes en arsenic sont de 14 à 24 mg/kg (moyenne 19 mg/kg) (Fig 75). On constate que ces sols non irrigués par

Sites	Carbone total (%)	C. Organique (%)	Azote (%)	Matière organique (M.O) %	C/N
Zaouit Sidi Blal	3,46	1,13	0,09	1,94	12,55
Amazzer	2,45	0,86	0,05	0,96	17,2
Ait Aissa	1,92	0,46	0,03	0,79	15,33
Ait M'rabt	3,22	1,07	0,1	1,84	10,7
Tasstift	2,36	0,79	0,06	1,36	13,16
Foum-Eloued	1,83	0,64	0,06	1,10	10,66
Alougoum	1,6	0,57	0,05	0,98	11,4
Foum-Zguid	1,37	0,9	0,04	1,54	22,4
Tagragra	2,86	0,49	0,04	0,84	12,25
Taloust	1,15	0,59	0,04	1,01	14,75
Talamine	2,67	0,92	0,09	1,58	10,22
Tiddiline	4,28	2,18	0,24	3,75	9,08
Figuier	2,25	1,58	0,1	2,72	15,8

Tableau 81. Degré d'humification et variation des teneurs en matière organique, carbone total, carbone organique et azote dans les sols cultivés du bassin versant de versant de l'oued Alougoum.

l'oued Alougoum ont des concentrations en arsenic beaucoup plus faibles par rapport aux sols exposés.

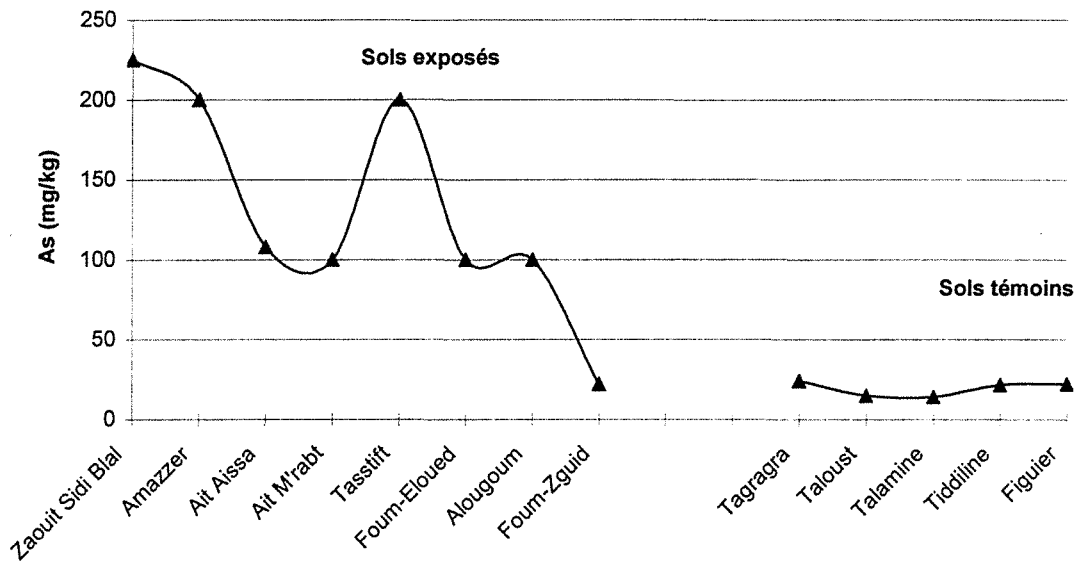


Fig 75. Evolution des teneurs moyennes en As dans les horizons labourés des sols prospectés.

II.10.3. Teneurs en arsenic dans les sols vierges

En général, la composition des sols en éléments traces est extrêmement diverse ; elle dépend de différents facteurs, mais deux prédominent : la nature des matériaux géologiques sur lesquels les sols se sont développés (qu'ils soient issus directement de l'altération des roches ou de leur remaniement) et les conditions climatiques.

Les sols vierges non cultivés, montrent des teneurs en arsenic qui se situent dans une gamme de 10 à 18 mg/kg (moyenne 13 mg/kg) (cf. annexe 4 tableau 83).

II.11. VALEURS CORRIGÉES POUR LES SOLS CULTIVÉS

Les valeurs mesurées dans les sols cultivés sont corrigées par rapport aux seuils de tolérance maximal (valeur d'intervention) et en fonction de la teneur en matière organique et du taux de la fraction argileuse. Les valeurs d'intervention corrigées pour les éléments analysés varient de 43 à 54 mg As/kg, 149 à 257 mg Co/kg, 137 à 224 mg Ni/kg, 10 à 11 mg Cd/kg, 438 à 520 mg Pb/kg, 287 à 397 mg Cr/kg, 141 à 187 mg Cu/kg, 436 à 756 mg Zn/kg et 379 à 671 mg Ba/kg (cf. annexe 4, tableau 84)

II.12. CONFRONTATION DES VALEURS MESURÉES AUX VALEURS CORRIGÉES

Dans le tableau 85 annexe 4, sont présentées les valeurs d'intervention (ou seuils de tolérance maximal) (V_i), les seuils d'investigations (S_i), les valeurs d'intervention corrigées (V_c) et les valeurs mesurées (V_m) des différents éléments analysés.

Un site est considéré comme pollué si la concentration moyenne d'une certaine substance dépasse la valeur la valeur d'intervention corrigée. Cela signifie qu'il y aura dégradation du milieu vivant et qu'il est indispensable d'intervenir rapidement.

Un site sera considéré comme à surveiller, si la concentration moyenne d'une certaine substance se situe entre le seuil d'investigation et la valeur d'intervention corrigée.

II.12.1. Sols cultivés exposés

Les sols cultivés le long de la vallée de l'oued Alougoum, depuis Zaouit Sidi Blal à Alougoum, ont une concentration en arsenic de 100 à 225 mg/kg. Ces teneurs sont supérieures aux valeurs d'interventions corrigées (46 à 53 mg/kg) (Fig 76). Cela signifie qu'il fallait intervenir pour ramener les valeurs mesurées aux seuils de toxicité admis.

II.12.2. Sols cultivés témoins

Dans les sols cultivés témoins, les teneurs en arsenic sont de 14 à 24 mg/kg. Les valeurs d'intervention corrigées varient de 43 à 54 mg As/kg. Il paraît à l'évidence que les teneurs mesurées sont inférieures aux valeurs d'intervention corrigées et largement en dessous de celles décelées dans les sols cultivés exposés (Fig 76).

Dans le jardin familial de Figuier, la concentration en nickel dans l'horizon de surface est de 199 mg/kg, contre 187 mg/kg comme valeur d'intervention corrigée. Les horizons labourés des sols cultivés de la localité de Fourn-Zguid et de Taloust sont pollués en baryum. Les teneurs sont respectivement de 441,5 mg Ba/kg et 526 mg Ba/kg, contre 440 et 379 mg Ba/kg comme valeurs corrigées.

Les éléments en traces dont la teneur totale dans la terre fine de l'horizon (0- 25 cm), se situe entre le seuil d'investigation et la valeur d'intervention corrigée sont exposés au tableau 86. Les sols cultivés exposés et témoins des sites portant une croix sont considérés comme à surveiller à moyen terme, mais aussi bien à long terme.

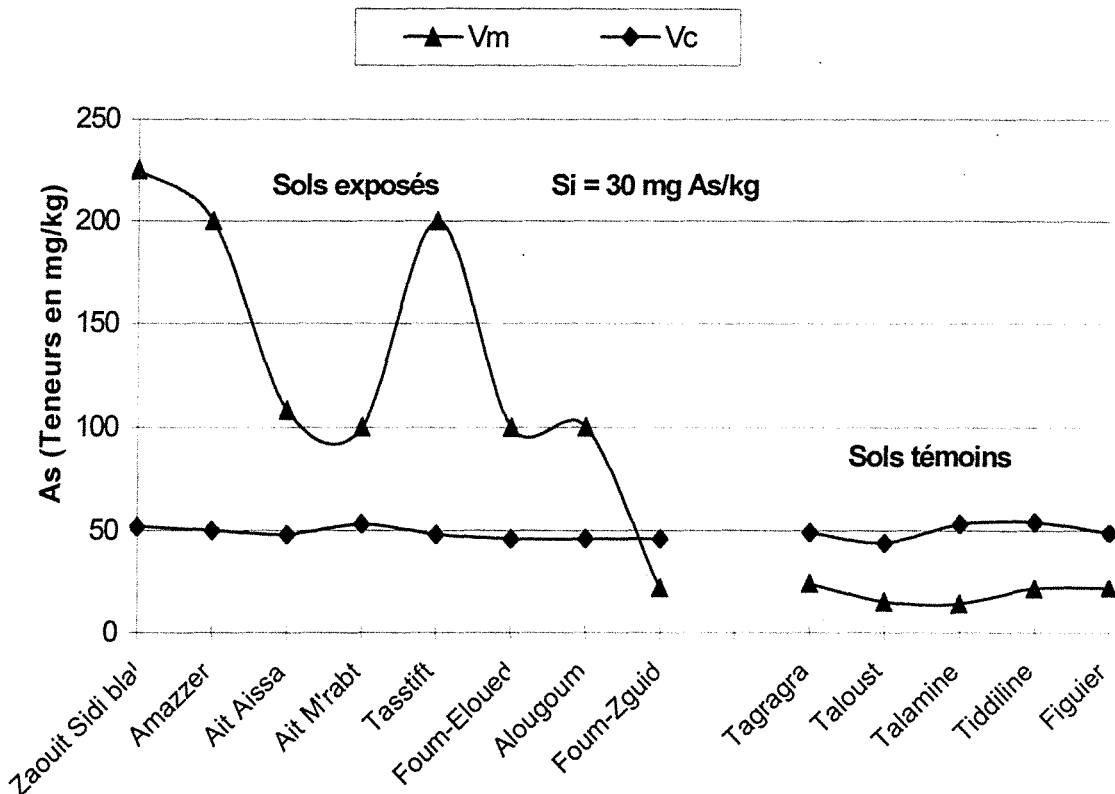


Fig 76. Confrontation des valeurs moyennes mesurées (Vm) en As des sols cultivés aux valeurs d'intervention corrigées (Vc) et seuils d'investigation (Si).

	Cobalt	Nickel	Plomb	Zinc
Zaouit Sidi Blal	x	x	x	
Amazzer	x			
Ait Aissa	x			
Ait M'rabt	x			x
Tasstift	x			x
Foum-Eloued	x			x
Alougoum				x
Foum-Zguid		x		
Tagragra		x		
Taloust		x	x	
Talamine		x	x	
Tiddiline		x	x	x
Figuier				x

Tableau 86. Sols agricoles (x) dont les teneurs moyennes en Co, Ni, Pb et Zn dans les horizons labourés sont comprises entre le seuil d'investigation et la valeur d'intervention corrigée.

II.13. DEGRE DE POLLUTION DES SOLS AGRICOLES

L'horizon 0 - 25 cm des sols cultivés le long de la vallée de l'oued Alougoum, depuis Zaouit jusqu'au douar Alougoum est pollué en arsenic. On considère que cette pollution se fait par le biais des eaux d'irrigation drainées par l'oued Alougoum, à partir du District minier de Bou-Azzer, sans autant négliger les retombées atmosphériques. Le degré de pollution en arsenic est défini comme étant égal au rapport de la concentration dans le sol à celle de la valeur d'intervention corrigée.

La figure 77, représente le degré de pollution des sols étudiés. Ce degré varie de 2,17 à 4,32 pour les sols exposés et 0,26 à 0,49 pour les sols témoins. Il est plus marqué dans l'horizon labouré des sols du douar Zaouit Sidi Blal (4,32), situé à 7 km en aval de la mine et décroît de l'amont vers l'aval, avec cependant, un accroissement sensible au niveau du douar Tasstift. Dans la localité de Foum-Zguid, située à 65 km en aval de la mine de Bou-Azzer, ce degré atteint 0,49. Il apparaît donc que les sols exposés, depuis Zaouit Sidi Blal à Alougoum ont des teneurs en arsenic de 2 à 4 fois le seuil de tolérance maximal admissible.

Pour les autres éléments (Co, Ni, Cr, Cd, Cu, Zn...), leur degré de pollution est inférieure à 1 pour l'ensemble des sols prospectés. Ils ne présentent certainement à l'état actuel, aucun risque vis-à-vis des écosystèmes.

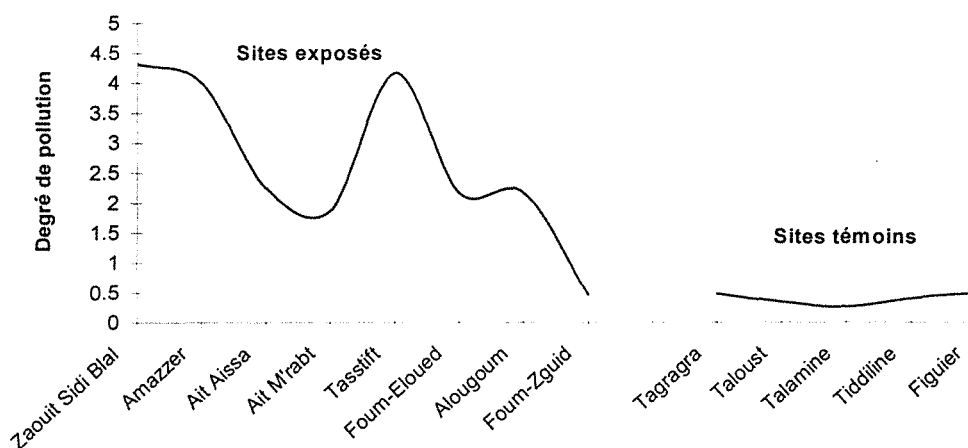


Fig 77. Degré de pollution en As des horizons labourés des sols agricoles prospectés.

II.14. TRANSFERT DE L'ARSENIC VERS LES SOLS CULTIVES A PARTIR DE LA MINE DE BOU-AZER.

L'activité minière de cobalt de Bou-Azzer a commencé depuis 1930. A cette époque le minerai extrait a longtemps fait l'objet d'un triage à la main et les résidus de scheidage ont été traités à sec dans une laverie pneumatique. Ce n'est que vers 1958 que la laverie actuelle de cobalt a été mise en service.

Depuis 1930 à nos jours, la quantité d'arsenic et éléments associés, disséminée dans les rejets miniers ne cesse d'augmenter. Les transferts de l'arsenic à partir des rejets miniers, des roches en places et des poussières sous formes de particules fines vers la vallée de l'oued Alougoum sont fonction surtout des conditions climatiques. Ils pourraient être importants au moments des crues et pendant le déclenchement des vents violents.

Il est possible de chiffrer un ordre de grandeur de l'accroissement en arsenic dans les sols cultivés pollués, depuis la mise en activité de la mine de Bou-Azzer jusqu'à 1998. Cet accroissement serait de 2,9 mg/kg (Zaouit Sidi Blal), 2,5 mg/kg (Amazzer), 1,1 mg/kg (Ait Aissa), 1 mg/kg (Ait M'rabt), 2,5 mg/kg (Tasstift), 1 mg/kg (Foum-Eloued) et 1mg/kg (Alougoum) (cf, tableau 87).

Ramené à l'horizon 0 - 25 cm, où est stocké l'arsenic, et en prenant une densité de 0,9, cela représente 225 à 652 mg/m²/an et donc 2,25 à 6,52 kg/ha/an.

Sites	Accroissement en mg As/kg de terre	Accroissement en mg As/m ² /an	Accroissement en kg As/ha/an
Zaouit Sidi Blal	2,9	652	6,52
Amazzer	2,5	562	5,62
Ait Aissa	1,10	247	2,47
Ait M'rabt	1	225	2,25
Tasstift	2,5	562	5,62
Foum-Eloued	1	225	2,25
Alougoum	1	225	2,25

Tableau 87. Accroissement en As dans les horizons labourés des sols pollués le long de la vallée de l'oued Alougoum (1930-1998).

II.15. CONCLUSION

L'étude menée sur les sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum nous permet de conclure ce qui suit :

- ☛ les sols vierges (non cultivés), présentent une teneur moyenne en arsenic de 13 mg As/kg de terre fine.
- ☛ les sols cultivés témoins, non irrigués par l'oued Alougoum, contiennent dans la terre fine de l'horizon 0 - 25 cm, une teneur moyenne de 19 mg As/kg.
- ☛ les sols cultivés exposés et irrigués par l'oued Alougoum , depuis Zaouit Sidi Blal jusqu'à Alougoum, montrent dans l'horizon labouré (0 - 25 cm) des teneurs en arsenic qui varient de 100 à 225 mg As/kg, avec une valeur moyenne de 148 mg As/kg. Ces teneurs dépassent de loin celles détectées dans les sols cultivés témoins, situés hors d'impact. Elles témoignent donc d'une forte contamination d'origine minière.
- ☛ les teneurs mesurées (100 à 225 mg As/kg) sont 2 à 4 fois supérieures aux valeurs d'intervention corrigées (46 à 53 mg As/kg). Cela signifie qu'il y aura certainement dégradation du milieu vivant et qu'il est indispensable d'intervenir rapidement pour ramener les teneurs détectées en-dessous des seuils de toxicité admis.

Cette pollution est liée aux anciennes et actuelles exploitations de cobalt, aux roches en places et aux particules fines sous forme de poussières chargées en arsenic. Rappelons que l'activité minière de Bou-Azzer a généré plus de 2 287 317 t de rejets dont plus de 1 166 000 t de haldes de mines (rejets fins inférieurs < 100 µm) qui titrent 1,4 à 79 kg As/t.

☛ l'ancienneté des exploitations de cobalt, qui pour certains gisements ont démarré depuis 1930, ont eu pour conséquence une augmentation importante de la concentration en arsenic dans les surfaces utiles agricoles exposés.

En admettant la valeur moyenne de 30 mg As/kg de terre pour le fond géochimique, et que l'activité minière de cobalt est surtout importante depuis 1930 (soit sur une période de 68 ans), l'accroissement de la concentration en arsenic dans les sols cultivés, depuis Zaouit Sidi Blal à Alougoum serait en moyenne de 1,73 mg As/kg/ de terre et par an pour cette période.

Ramené à l'horizon 0 - 25 cm, où est stocké l'arsenic, et en prenant une densité de 0,9, cela représente en moyenne 389 mg As/m²/an et donc 3,89 kg As/ha/an.

L'augmentation de la teneur en arsenic dans l'horizon labouré, pourrait altérer l'activité des micro-organismes des sols, avec pour conséquence, par exemple, un blocage du cycle de la matière organique, la perturbation de la nitrification ou de la fixation d'azote symbiotique, asphyxie des plantes et baisse des rendements.

☛ pour les autres éléments : Co, Ni, Cd, Pb, Cr, Cu, Zn et Ba, les teneurs dans les horizons de surface sont en dessous des seuils de tolérance admis (valeurs d'intervention corrigées).

Une remarque importante s'impose : la plupart des législations en vigueur sur la qualité des sols et les éléments en traces sont basées sur la concentration totale de chaque élément dans la terre fine. Or, il est impossible de fixer une valeur de teneur totale d'un élément qui puisse avoir une signification de risque utilisable pour tous les types de sols.

Les fortes teneurs en arsenic total décelées dans les sols cultivés exposés, ne donnent pas une juste idée des dangers encourus. Ce qui paraît à l'évidence, c'est que les teneurs en arsenic pouvant être absorbées par les végétaux, via les racines, peuvent être élevées. De ce

fait, il semble intéressant d'entamer des études d'écotoxicité en vue de l'identification des dangers liés à ces sites pollués. Les tests biologiques (bio-tests) apportent à la caractérisation analytique un complément nécessaire à la prise de décision.

En effet, les analyses physico-chimiques restent incomplètes quant à la prédiction du danger, puisque, l'arsenic analysé par voie physico-chimique peut se trouver sous une forme liée peu ou non toxique. Ainsi, pour compléter cette information chimique, l'utilisation de tests biologiques normalisés et de nouveaux tests en développement, adaptés à la problématique des sols contaminés, permet de caractériser le danger lié à ces sols souillés. Ces biotests sont donc des outils décisionnels nécessaires lors de la localisation, de l'évolution et de la réhabilitation des sites contaminés (A. Bispo et al, 1997).

Pour intervenir sur ces sites, il semble nécessaire de disposer dès maintenant d'une palette de techniques de réhabilitation permettant d'immobiliser l'arsenic dans le sol. Les méthodes pour le réhabilitation des terres contaminées par les métaux sont : dilution en profondeur par labour, le recouvrement par un substrat non contaminé, le lessivage par un agent chimique, l'extraction biologique par une culture de végétaux metallophytes, ou l'insolubilisation après apport de matière organique ou de matériaux minéraux.

La plupart des études d'immobilisation des éléments traces métalliques ont été réalisées fort logiquement dans des terres contaminées par des métaux mobiles dans la solution du sol comme Cd, Zn et Ni ou liés à la matière organique comme le cuivre. Malheureusement les études sur l'immobilisation de l'arsenic dans la solution du sol sont rares et les effets de certains matériaux exogènes sur la biodisponibilité de l'arsenic contenu dans la terre de surface ne sont pas connus. A cet effet, nous proposons d'entamer des études complémentaires à savoir :

- étude chimique et physique de spéciation ;
- extractions sélectives ou séquentielles « in vitro » censées simuler l'absorption racinaire ou la mobilité.

CHAPITRE III

ANALYSE DES VEGETAUX

INTRODUCTION

L'arsenic, le cobalt et le nickel sont parmi les principaux éléments traces potentiellement toxiques pour l'homme, la flore et la faune. Ces polluants se trouvent accumuler à des doses élevées dans les sols cultivés le long de la vallée de l'oued Alougoum. Les sols sont à la fois supports de vie et sites de productions végétales et animales. Lorsqu'ils sont pollués, en particulier par des micro-polluants comme l'arsenic, cobalt et nickel, ils deviennent l'une des voies de contamination des chaînes trophiques au même titre que l'eau, l'air et les aliments.

Si le sol propose, les plantes disposent. Sous ce thème, nous allons examiner les teneurs en As, Co, Ni et Se des végétaux prélevés le long de la vallée de l'oued Alougoum et les comparer à celles des végétaux témoins situés hors d'impact. Ceci nous permettra d'une part, de quantifier la pollution dans les végétaux et de donner une première évaluation de leur degré de contamination et d'autre part, d'estimer l'impact de l'activité minière sur les principales cultures végétales pratiquées en aval de la mine.

III. 1. PELEVEMENTS DES ECHANTILLONS

Les végétaux absorbent et fixent des quantités variables en certains éléments, les conditions les plus favorables à l'échantillonnage, sont celles où les peuplements végétaux sont les plus anciens, autochtones et homogènes quant à leur répartition. Les végétaux étudiés concernent des feuilles vertes des principales arboricultures fruitières dominantes dans la région, ainsi que des cultures fourragères représentées par la luzerne.

Les espèces inclus dans le tableau 88, annexe 4 ont été récoltées le long de l'oued Alougoum, depuis Zaouit Sidi Blal jusqu'à Fom-Zguid. Les espèces analogues témoins, situées en dehors de la vallée ont été prélevées au niveau des sites de Taloust, Tagragra, Talamine, Tiddiline et Figuier.

Auparavant, les plantes ont été identifiées et des prélèvements d'au moins 1 kg ont été réalisés pour chaque espèce végétale. Les espèces récoltées sont conservées dans des sachets en papier fort imperméabilisés numérotés et portant le nom du site de prélèvement et le numéro de l'espèce végétale. En total 78 échantillons ont été étudiés au laboratoire du centre de Pédologie et Biologique de Nancy.

III.2. METHODOLOGIE PREPARATOIRE A L'ANALYSE DES METAUX LOURDS.

Tous les échantillons ont été séchés à l'étuve à 40 °C pendant trois semaines jusqu'à poids constant. Ensuite, ils ont été broyés au broyeur à couteaux à trois reprises : d'abord un broyage à 5 µm, 1,5 µm et enfin un broyage fin inférieur à 0,5 µm.

III. 2.1. Protocole d'attaque acide sous énergie micro ondes

a/ Matériel utilisé

- * Four à micro ondes CEM MDS 81 D
- * Bombes Téflon fermées et tarées à 8 bars

b/ Protocole d'attaque acide

Des essais sont réalisés avec 200 mg d'échantillon sec, finement broyé. Le produit a été introduit dans un ballon de 250 ml avec 4 ml d'acide nitrique : HNO₃ normapur à 69 %.

Les échantillons sont ensuite traités selon les étapes suivantes :

1. Pré-digestion

Elle comprend deux étapes et a pour objectif le dégazage des oxydes d'azote et la préparation des échantillons à une attaque totale.

	Temps	Puissance total	Puissance appliquée	Pression
étape : 1	10'	600 w	12%	8 bars
étape : 2	12'	600 w	15%	8 bars

2. Attaque totale

Cette opération consiste à éliminer dans la solution tous les résidus, dépôts ou précipités. Elle comporte 3 étapes :

	Temps	Puissance totale	Puissance appliquée	Pression
étape : 3	10'	600 w	20 %	8 bars
étape : 4	15	600 w	25 %	8 bars
étape : 5	20'	600w	25 %	8 bars

III.3. ANALYSE DES ELEMENTS EN TRACES

Dans chaque série de minéralisation, 3 blancs d'attaque et un échantillon de référence ont été inclus. La concentration des éléments traces en solution (As, Co, Ni, Pb et Se) a été déterminée par l'ICP- AES JY 238 ultrace (Inductively Coupled Plasma -Atomique Emission Spectroscopie).

III.3.1. Description et principe de fonctionnement de l'ICP-AES JY 238 Ultrace

L'ICP-AES, est une technique analytique multiélémentaire rapide, permettant de déterminer les concentrations d'un grand nombre d'éléments appartenant au tableau de Mendeleïv à des niveaux inférieurs à la ppm.

- Principe

Cette technique se compose principalement :

1. d'une source d'atomisation et d'excitation : la torche à plasma inductif ;
2. d'un spectromètre permettant de faire les mesures d'intensités lumineuses à des longueurs d'ondes données ;
3. d'un ensemble informatique qui contrôle l'ensemble des séquences d'analyses.

1. La torche à plasma inductif

Elle est constituée d'une bobine d'induction, d'une alimentation de courant alternatif à haute fréquence et d'un tube de quartz dans lequel on fait circuler un courant d'argon.

- Fonctionnement

Un courant d'argon, ayant subi un début d'ionisation à froid par décharge tesla, débouche à l'extrémité d'un tube de quartz ouvert, concentriquement à cinq spires d'une bobine refroidie par une circulation d'eau. Ces spires sont parcourues par une radiofréquence produite par un générateur d'une puissance comprise entre 1 et 2,2 kilowatts.

Le champ magnétique variable confine les ions et les électrons sur un parcours annulaire. Le milieu devient de plus en plus conducteur par effet joule du fait de l'agitation des ions et des électrons par le champ haute fréquence et leur collision avec les atomes de gaz.

L'échantillon en solution est alors amené au centre de la torche par un tube de 1 à 2 mm de diamètre sous forme d'aérosol. Cet échantillon désolvaté et atomisé est porté à une température voisine de 6 000 °C. Les atomes étant alors ionisés dans leur quasi-totalité et les cation formés essentiellement monovalents. La « prise de lumière » dans le plasma est ensuite choisie en fonction de l'élément, suivant que le dosage est basé sur l'étude d'une raie ionique ou atomique.

2. Le spectromètre

Le spectromètre est le système qui permet de faire la mesure de l'intensité lumineuse pour une gamme de longueur d'onde comprise entre 165 et 780 nm avec un dispositif constitué d'un polychromateur associé à des photomultiplicateurs (un par raie).

- Principe

Le rayonnement émis par les atomes repassant automatiquement de l'état excité à l'état fondamental est directement proportionnel à la quantité d'atomes présents. Aux températures atteintes par la plasma, tous les atomes passent à l'état excité. L'analyse quantitative et simultanée est permise en plaçant face au spectre d'émission un réseau suffisamment performant pour discriminer les longueurs d'onde spécifiques de chaque atome constitutif de l'échantillon à analyser (montage optique du type Paschen- Runge à 0,50 m de focale avec réseau concave holographique). Un photomultiplicateur (un par raie) est placé dans le champ réfléchi à chaque longueur d'onde donnée et traduit l'intensité lumineuse en courant électrique proportionnel à la concentration de l'élément dosé.

III.4. REGLEMENTATION SUR LES ELEMENTS EN TRACES DANS LES VEGETAUX

Le rôle des éléments en traces ou les conséquences de leur accumulation sont nombreux dans le métabolisme des organismes vivants (Neuzil, 1990 ; M. Mench, 1993). Les études physiologiques ont permis de distinguer des éléments en traces indispensables (Fe, Mn, F, Cr, Zn, Mo, Ni, I, Se, Sn, Li, V, B, Cl, Si, As), indifférents (Ti), ou indésirables (Hg, Cd, Pb, Ti) (cf. annexe 5, tableau 89). Les premiers sont aussi dénommés oligo-éléments, et leur action bénéfique ou toxique dépend de seuils de concentrations dans les tissus.

Les recommandations sur la qualité des aliments sont fondées sur l'étude des mécanismes d'action et d'interaction des aliments, des quantités ingérées (bol alimentaire) et de la biodisponibilité des éléments lors du tracus intestinal. Les études de risques écotoxicologiques ont abouti à paramétrer quelques uns des flux ou des teneurs en métaux dans les aliments. Les comités d'experts mixtes FAO/OMS sur les additifs dans les aliments ont émis des recommandations sur les apports maximaux admissibles par semaine dans le cas de As, Cd, Hg, Pb, Cu (FAO/OMS), 1976 ; Ewers, 1991) (cf. annexe 5, tableau 90). Pour le cas du Zn et Sn, les

quantités généralement présentes dans les aliments ne semblent poser aucun problème d'ordre toxicologique et il n'a pas été fixé de dose journalière acceptable pour l'homme.

Il existe des valeurs guides ou tolérables concernant les concentrations en Cd, Pb, Hg et parfois As dans les denrées aux USA, en Suisse, en Allemagne et aux Pays-Bas (Mc Grath, 1989 ; Ewers, 1991). Les concentrations en éléments en traces dans les denrées végétales et les fourrages dépendent des facteurs liés au sol et aux espèces végétales, mais il faut souligner que les retombées atmosphériques par exemple dans le cas du cadmium, de l'arsenic ou du plomb peuvent avoir une forte contribution (Adriano, 1986 ; Jackson et Alloway, 1992). Des cas d'intoxication humaine ou animale ont été constatés à la suite de l'ingestion de végétaux contaminés par du Pb d'origine atmosphérique.

En France il existe une réglementation pour les végétaux sous forme de décret stipulant les concentrations maximales en As, Cd, Pb et Hg dans les aliments des animaux (cf. Annexe 5 tableau 91). De nombreuses valeurs guides ont été établies par exemple en Allemagne pour les teneurs en Pb, Cd et Hg dans les denrées alimentaires à usage humain (cf. annexe 5, tableau 92). En l'absence de données, ces valeurs peuvent être utiles à titre indicatif. Cependant, les résultats du sous-réseau de la FAO sur les teneurs en oligo-éléments des denrées alimentaires concluaient à une variation sensible des teneurs selon les pays (FAO, 1986).

Dans la majorité des pays, il n'existe pas de référentiel national et on utilise les valeurs établies ailleurs. C'est dans cette optique que nous préconisons l'adoption des valeurs guides maximum pour les concentrations dans les végétaux recommandées par la commission mixte FAO/OMS du codex alimentaire dans l'attente d'un référentiel propre au Maroc. Ces valeurs sont de 5 mg As/kg, 2 mg Se/kg, 0,5 mg Co/kg, 3 mg Ni/kg MS. Pour le plomb, nous préconisons l'adoption des normes françaises relatives aux concentrations maximales pour les éléments en traces indésirables dans l'alimentation des animaux (40 mg Pb/kg).

III.5. RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES ET DISCUSSIONS

Les tableaux 93 et 94 annexe 4, résument les résultats analytiques acquis sur les plantes analysées au laboratoire du centre Pédologie et Biologique de Nancy. Ils correspondent respectivement aux teneurs en As, Co, Pb, Ni et Se, des plantes exposées et irriguées par l'oued Alougoum et des plantes témoins récoltées en dehors de la vallée. Nous signalons que les valeurs mesurées en plomb dans les solutions d'attaque sont très proches des limites de détection (inférieures à 3 ppb). Il convient donc, pour cet élément, de considérer les résultats avec un seuil à 10 % d'erreur. En revanche, il n'existe aucune restriction pour les autres éléments (As, Co, Ni et Se), dont les mesures sont données avec une erreur inférieure à 1%.

III.5.1. Concentrations en As, Co et Ni dans les cultures fourragères

III.5.1.1. La luzerne

La luzerne est la seule culture fourragère pratiquée dans la région étudiée. La figure 78, illustre les variations des teneurs en As, Co et Ni dans la luzerne récoltée au sein du bassin versant de l'oued Alougoum. La composition des échantillons exposés, indique des teneurs qui varient de 3,9 à 25 mg As/kg, 0,4 à 2,9 mg Co/kg, 1 à 5,4 mg Ni/kg MS.

Les échantillons témoins, présentent les teneurs suivantes : 3,2 à 10,2 mg As/kg, 0,4 à 1,7 mg Co/kg et 0,6 à 6,2 mg Ni/kg MS. On constate que la luzerne exposée et irriguée par l'oued Alougoum a absorbé des quantités importantes en As, Co et Ni. La confrontation des résultats aux seuils de tolérance dans les fourrages, montre une forte pollution : en As et Co (Zaouit Sidi Blal à Foum-Eloued, Foum-Zguid, Tagragra, Talamine et Tiddiline) et en Ni (Amazzer, Alougoum, Tiddiline).

III.5.2. Concentrations en As, Co et Ni dans l'arboriculture fruitière

III.5.2.1. Le palmier dattier

Le palmier dattier est l'arboriculture fruitière dominante le long de la vallée de l'oued Alougoum. Il constitue la principale spéculation arboriculture et la principale source de revenu des agriculteurs. Les analyses de l'As, Co et Ni effectuées sur les feuilles du palmier dattier exposé, présentent des teneurs qui se situent qui varient de 3,2 à 13,4 mg As/kg, 0,1 à 0,9 mg Co/kg et 1 à 16,5 mg Ni/kg MS.

Concernant le palmier dattier témoin, les teneurs en As, Co et Ni sont de 2,1 à 3,2 mg As/kg, 0,1 à 0,2 mg Co/kg et 1,5 à 1,9 mg Ni/kg MS. Ces résultats, montrent une pollution du palmier dattier au niveau des sites suivants : en As (Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Foum-Eloued) ; en Co (Zaouit Sidi Blal, Foum-Eloued) et en Ni (Zaouit Sidi Blal) (Fig.79).

III.5.2.2. Le grenadier

Dans la figure 80 sont présentées les teneurs en As, Co et Ni détectées dans le grenadier. Ces teneurs varient de 3,1 à 5,9 mg As/kg, 0,1 à 1,4 mg Co/kg et 0,5 à 4,5 mg Ni/kg pour le grenadier exposés et 2,4 à 4 mg As/kg, 0,1 à 0,6 mg Co/kg et 0,6 à 1,1 mg Ni/kg MS pour le grenadier témoin. Les teneurs maximales tolérées dans les végétaux sont de 5 mg As/kg, 0,5 mg Co/kg et 3 mg Ni/kg MS. Cela signifie un excès remarquable des teneurs dans le grenadier : en As (Zaouit Sidi Blal, Ait M'rabt, Foum-Eloued, Alougoum) ; en Co (Zaouit Sidi Blal, Ait M'rabt, Foum-Eloued, Talamine) et en Ni (Zaouit Sidi Blal).

III.5.2.3. La vigne

Les échantillons de la vigne exposés, depuis Zaouit Sidi Blal à Foum-Zguid ont des teneurs en As, Co et Ni qui atteignent les valeurs suivantes : 4,7 à 15,2 mg As/kg, 0,4 à 2,2 mg Co/kg et 0,5 à 3,1 mg Ni/kg MS. Les échantillons témoins non irrigués par l'oued Alougoum, indiquent des teneurs de 3,7 à 7,7 mg As/kg, 0,5 à 1 mg Co/kg et 0,5 à 1,7 mg Ni/kg MS. La confrontation de ces deux résultats, montre que les teneurs en As, Co, Ni dans la vigne exposé sont beaucoup plus élevées à celles de la vigne témoin. Cependant, certaines espèces témoins sont également polluées (Fig 81).

III.5.2.4. Le figuier

Le figuier comme le palmier dattier est cultivé dans tous les sites prospectés. Le dosage de l'As, Co, Ni et Se dans les feuilles du figuier, montre des teneurs élevées au niveau des sites exposés. A titre d'exemple, les feuilles du figuier prélevées au douar Amazzer et Ait M'rabt, présentent respectivement des teneurs en As de 20 mg As/kg et 14,5 mg As /kg MS. La teneur minimale de 4,4 mg As/kg est détectée au niveau du douar Foum-Eloued. En général, les teneurs en As, Co, et Ni se situent autour de 4,4 à 20 mg As/kg, 0,2 à 2,9 mg Co/kg et 1,1 à 3,4 mg Ni/kg MS pour les échantillons exposés et 2,9 à 4,6 mg As/kg, 0,2 à 0,6 mg Co/kg et 0,9 à 8,4 mg Ni/kg MS pour les échantillons témoins.

La confrontation des résultats aux seuils tolérés dans les végétaux, indique une pollution : en As (Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait M'rabt, Tasstift, Foum-Zguid) ; en Co (Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait M'rabt, Tasstift, Foum-Zguid, Figuier) et en Ni (Zaouit Sidi Blal, Figuier, Tiddiline) (Fig 82).

III.5.2.5. L'amandier

Les feuilles de l'amandier témoin ont des concentrations en As, Co et Ni qui varient de 1,7 à 2,9 mg As/kg, 0,1 à 0,4 mg Co/kg et 0,6 à 8,4 mg Ni/kg MS. L'amandier des sites exposés atteint des concentrations de 4,7 à 14 mg As/kg, 0,2 à 0,6 mg Co/kg et 0,5 à 1,7 mg Ni/kg. Certains échantillons, présentent des teneurs excessives largement supérieures aux teneurs

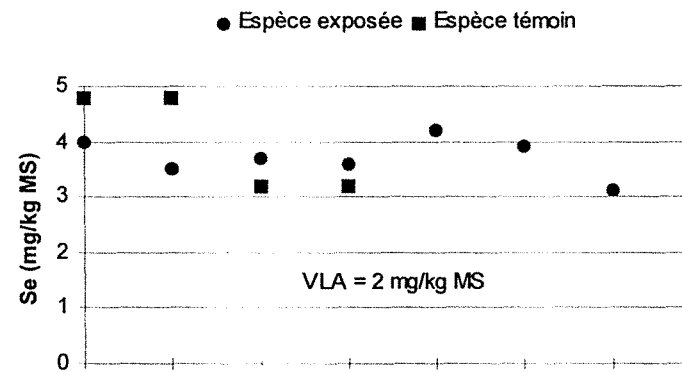
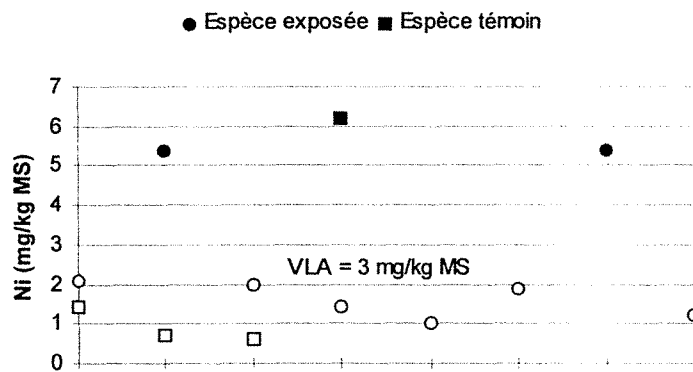
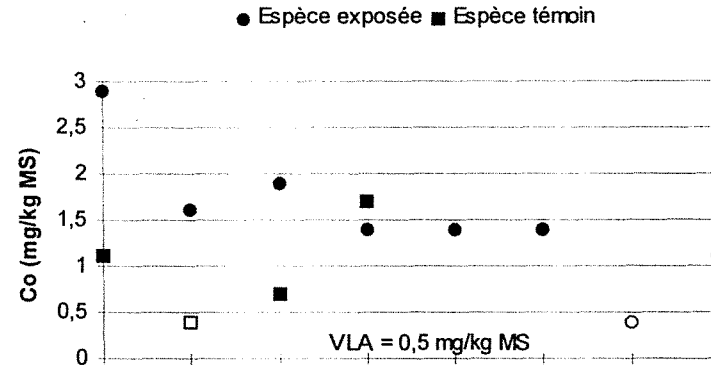
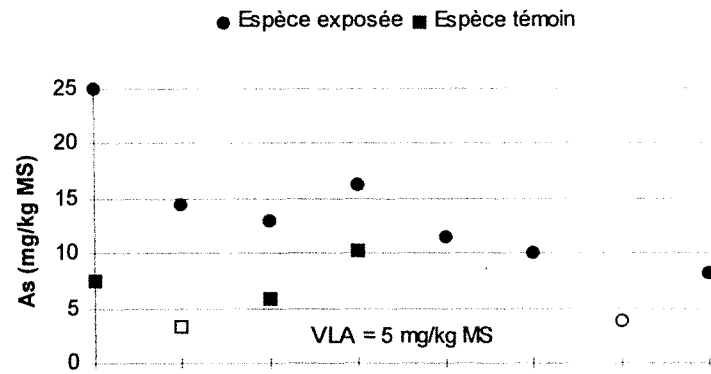


Fig 78. Teneurs en As, Co, Ni et Se dans la luzerne : confrontation des résultats aux valeurs limites acceptables, cercles rouges pleins et carrés Bleus pleins, luzerne contaminée : en As et Co (Zaouit Sidi Blal à Foum-Eloued, Foum-Zguid, Tagragra, Talamine et Tiddiline) ; en Ni (Amazzer, Alougoum, Tiddiline) ; en Se (tous les échantillons des sites prospectés).

La luzerne

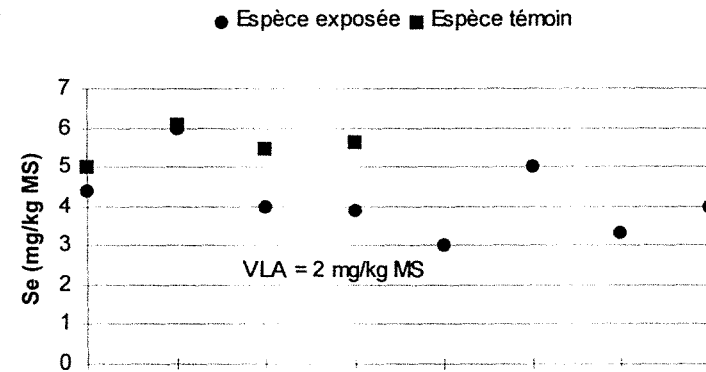
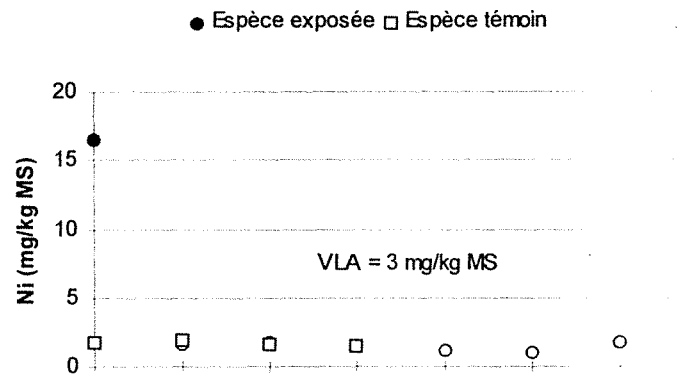
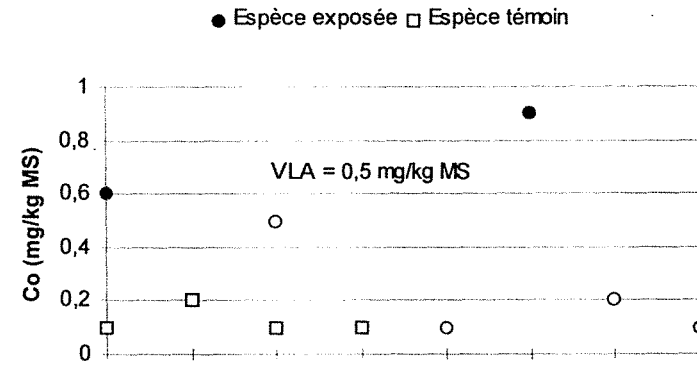
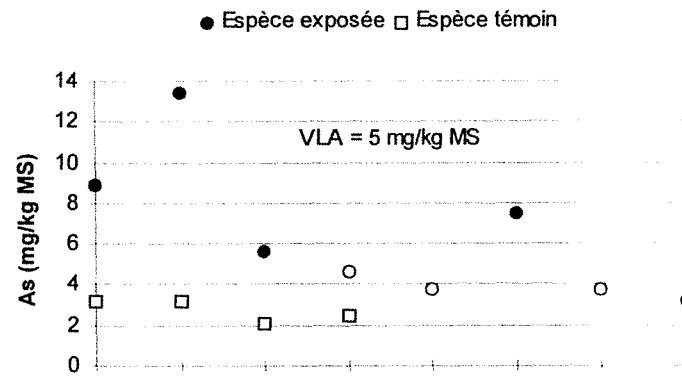


Fig 79. Teneurs en As, Co, Ni et Se dans le palmier dattier : confrontation des résultats aux valeurs limites acceptables, cercles rouges pleins et carrés bleus pleins, palmier dattier contaminé : en As (Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait Aïssa, Foum-Eloued) ; en Co (Zaouit Sidi Blal, Foum-Eloued) ; en Ni (Zaouit Sidi Blal) ; en Se (tous les échantillons des sites prospectés).

Le palmier dattier

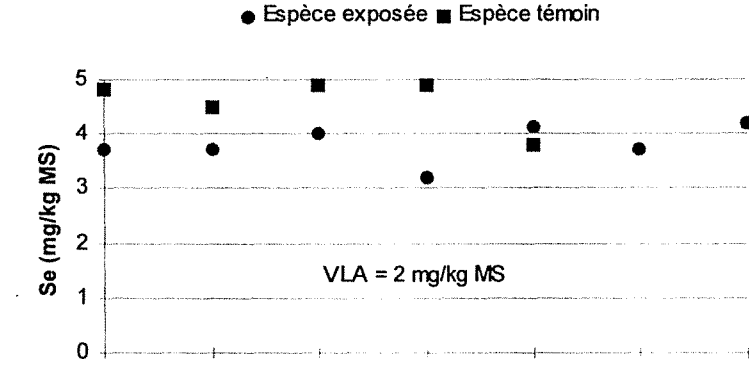
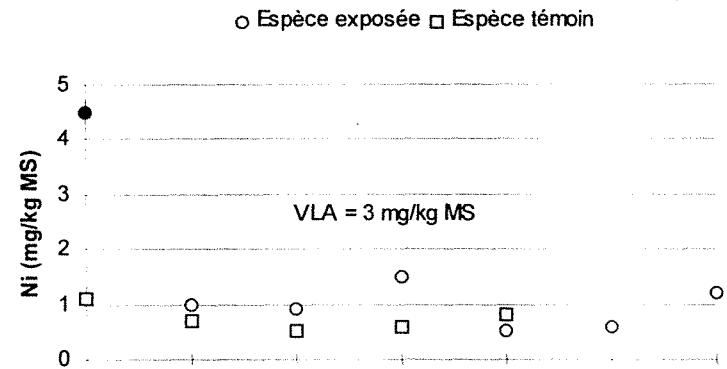
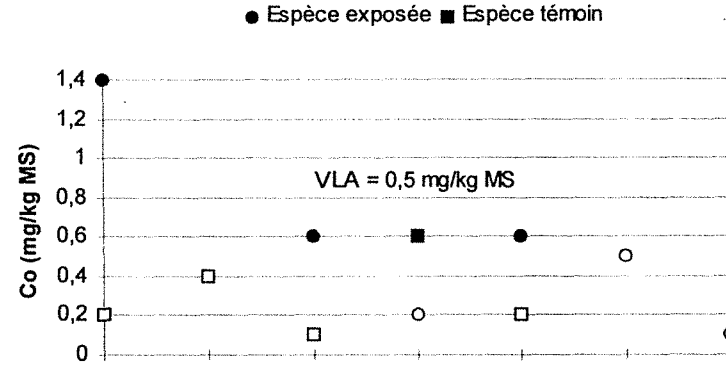
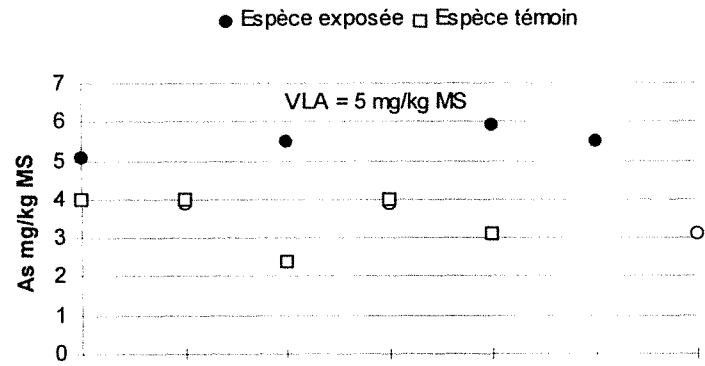


Fig 80. Teneurs en As, Co, Ni et Se dans le grenadier : confrontation des résultats aux valeurs limites acceptables, cercles rouges pleins et carrés bleus pleins, grenadier contaminé : en As (Zaouit Sidi Blal, Ait M'rabt, Foum-Eloued, Alougoum) ; en Co (Zaouit Sidi Blal, Ait M'rabt, Foum-Eloued, Talamine) ; en Ni (Zaouit Sidi Blal) ; en Se (tous les échantillons des sites prospectés).

Le grenadier

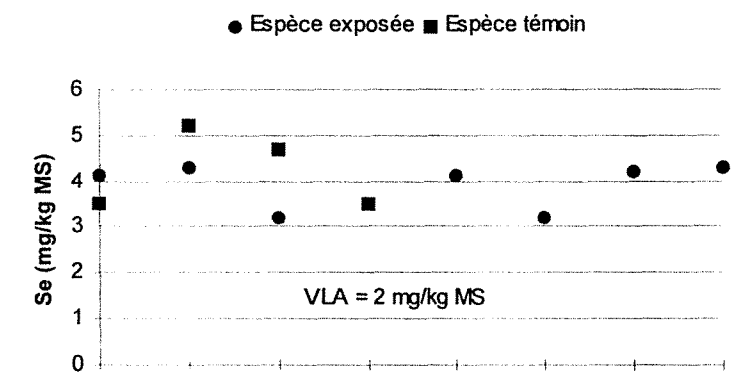
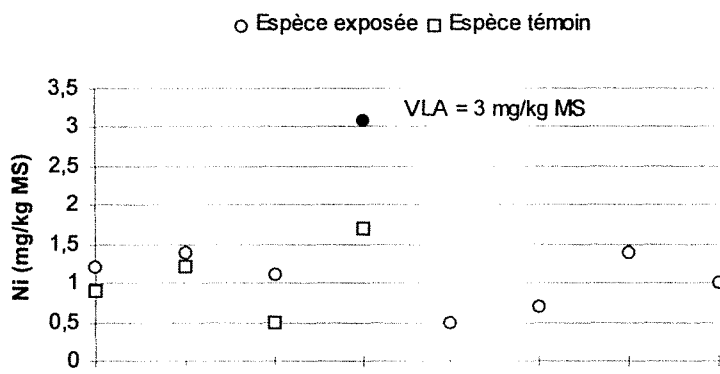
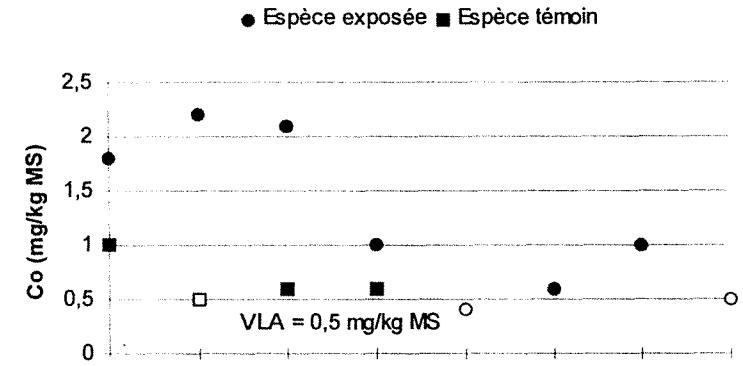
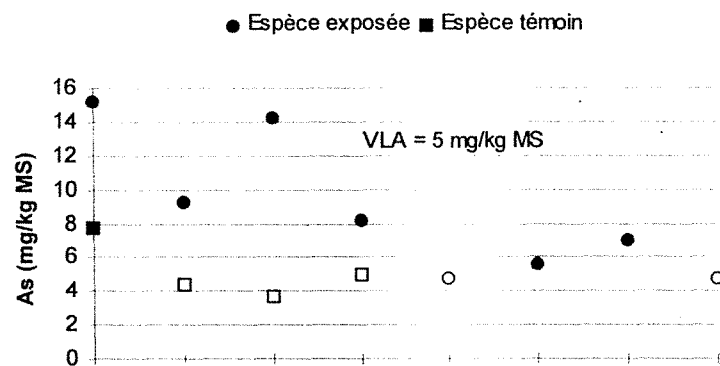


Fig 81. Teneurs en As, Co, Ni et Se dans la vigne : confrontation des résultats aux valeurs limites acceptables, cercles rouges pleins et carrés bleus pleins, vigne contaminée : en As (Zaouit Sidi Blal à Alougoum et Figuier) ; en Co (Zaouit Sidi Blal à Ait M'rabt, Foum-Eloued, Alougoum, Figuier, Taloust et Tiddiline) en Ni (Ait M'rabt) ; en Se (tous les échantillons des sites prospectés).

La vigne

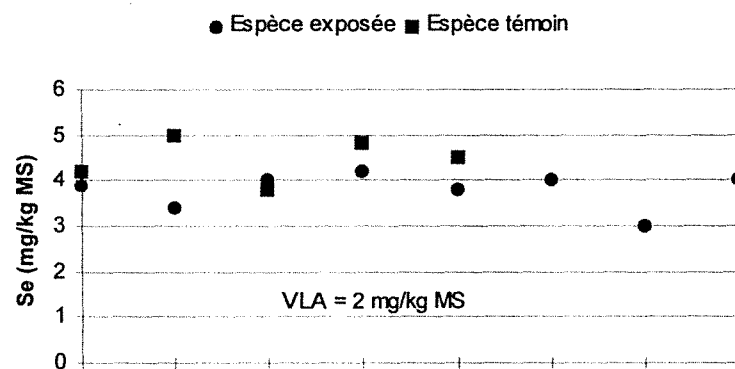
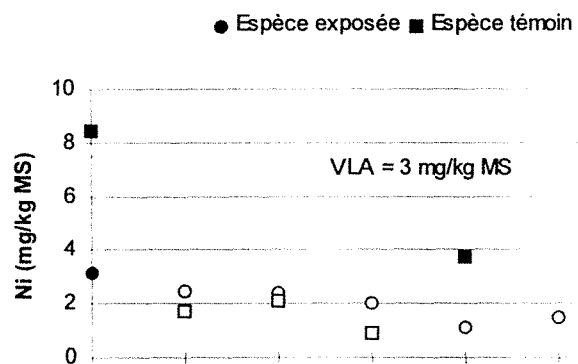
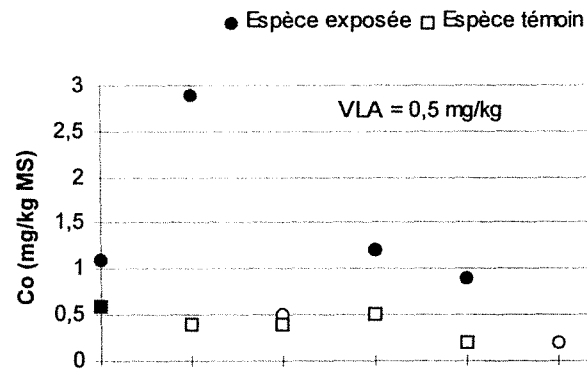
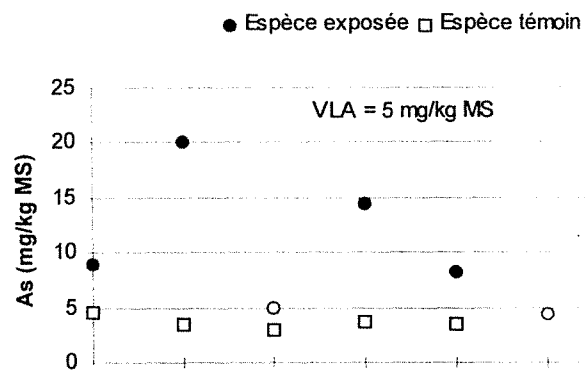


Fig 82. Teneurs en As, Co, Ni et Se dans le figuier : confrontation des résultats aux valeurs limites acceptables, cercles rouges pleins et carrés bleus pleins, Figuier contaminé : en As (Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait M'rabt, Tassstift et Foum-Zguid) ; en Co (Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait M'rabt, Tassstift, Foum-Zguid, Figuier) en Ni (Zaouit Sidi Blal, Figuier, Tiddiline) ; en Se (tous les échantillons des sites prospectés).

Le figuier

maximales recommandées pour les végétaux. Ainsi, les feuilles de l'amandier sont polluées : en As (Zaouit si Blal à Ait M'rabt) ; en Co (Zaouit Sidi Blal, Amazzer) et en Ni (Tagragra) (Fig 83).

III.5.2.6. L'olivier

La figure 84, montre la répartition des teneurs en As, Co et Ni dans les feuilles de l'olivier prélevées dans le bassin versant étudié. Les teneurs en As sont élevées pour l'olivier au niveau de Zaouit Sidi Blal, avec une valeur de 6,9 mg As/kg et au niveau du secteur de Figuier localisé à 2 km à l'Ouest du centre minier (5,9 mg As/kg). Pour le Co et le Ni, les teneurs sont en dessous des valeurs maximales recommandées.

III.5.3. Concentration en Se et Pb dans la luzerne et l'arboriculture fruitière

III.5.3.1. Concentration en sélénium

Les analyses du sélénium effectuées sur les échantillons qui représentent les végétaux prélevés dans le bassin versant de l'oued Alougoum, ne révèlent pas de différences significatives entre les sites de prélèvements. Les valeurs sont globalement comprises entre 3 et 6 mg Se/Kg. MS. Ceci peut être un argument en faveur d'une origine naturelle du Se contenu dans les plantes analysées (Fig 78 à 84).

III.5.3.2. Concentration en plomb

Les teneurs en plomb sont inférieures à 1mg/kg MS et ce quel que soit l'espèce végétale. Ces teneurs se situent dans une gamme de 0 à 0,35 mg/kg. C'est au niveau des sites localisés le long de la vallée de l'oued Alougoum que l'amandier, la vigne, le grenadier atteignent des teneurs maximales de 0,35 mg/kg. Pour les végétaux témoins, les teneurs sont également faibles et se situent entre 0 et 0,25 mg/kg.

III.6. TRANSFERTS SOLS PLANTES VIA LES RACINES

Rappelons que les teneurs moyennes en As, Co et Ni dans les sols pollués sont de 148 mg As/kg, 45 mg Co/kg et 30 mg Ni/kg. Les risques liés aux transferts de l'arsenic, cobalt et nickel du sol aux plantes, via les racines pourraient être importants. Le dosage de l'As, Co, Ni et Se dans les végétaux révèle des teneurs moyennes variables selon les espèces végétales :

- Arsenic : les espèces exposées, montrent des teneurs moyennes de 12,8 mg As/kg (luzerne), 8,75 mg As/kg (figuier), 8,61 mg As/kg (vigne), 6,68 mg As/kg (amandier), 6,32 mg As/kg (palmier), 5,32 mg As/kg (olivier) et 4,7 mg As/kg (grenadier). Ces concentrations sont de 2 à 3 fois supérieures aux doses moyennes détectées dans les espèces témoins (Fig 85).

- Cobalt : les teneurs moyennes en Co dans les espèces exposés sont de 1,64 mg Co/kg (luzerne), 1,2 mg Co/kg (vigne), 0,97 mg Co/kg (figuier), 0,44 mg Co/kg (amandier), 0,43 mg Co/kg (grenadier), 0,33 mg Co/kg (palmier) et 0,32 mg Co/kg (olivier). Ces valeurs sont supérieures à celles des échantillons témoins : 0,97 mg Co/kg (luzerne), 0,67 mg Co/kg (vigne), 0,42 mg Co/kg (figuier), 0,17 mg Co/kg (amandier), 0,47 mg Co/kg (grenadier), 0,12 mg Co/kg (palmier), 0,3 mg/kg (olivier) (Fig 86).

- Nickel : le couvert végétal exposé, montrent les teneurs moyennes qui varient de 3,35 mg Ni/kg (palmier), 0,81 mg Ni/kg (grenadier), 1,3 mg Ni/kg (vigne), 0,96 mg Ni/kg (amandier), 1 mg Ni /kg (olivier), 2,15 mg Ni/kg (figuier) et 2,55 mg Ni /kg (luzerne). Dans les végétaux témoins, ces teneurs sont de 1,67 mg Ni/kg (palmier), 0,75 mg Ni/kg (grenadier), 1 mg /kg Ni (vigne), 0,85 mg Ni/kg (olivier), 3,36 mg Ni/kg (figuier), 2,42 mg Ni/kg (amandier) et 2,25 mg Ni/kg MS (luzerne) (Fig 87).

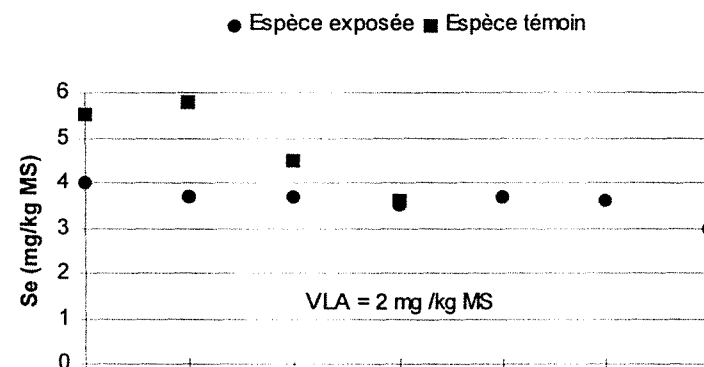
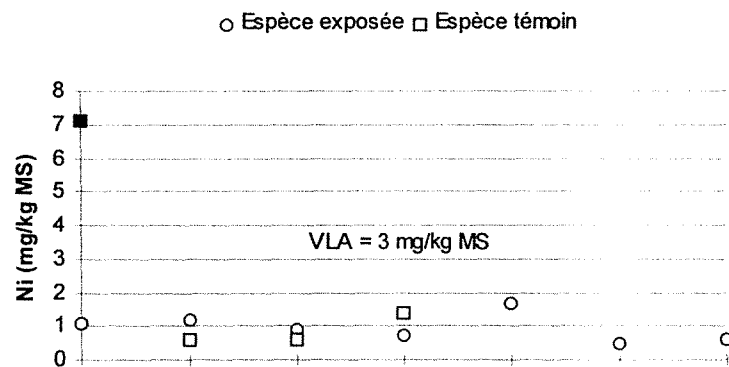
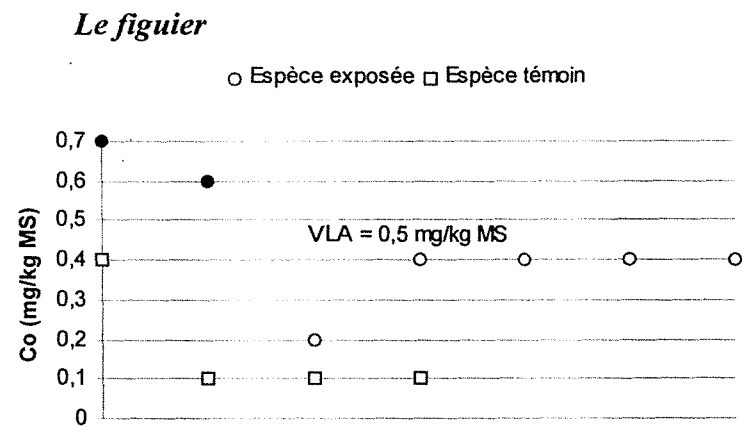
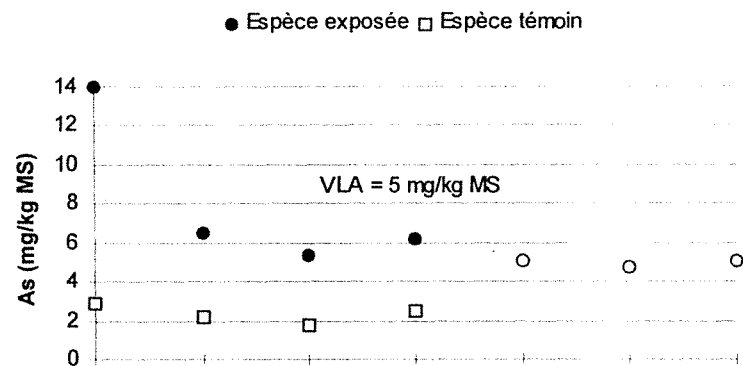


Fig 83. Teneurs en As, Co, Ni et Se dans l'amandier : confrontation des résultats aux valeurs limites acceptables, cercles rouges pleins et carrés bleus pleins, Amandier contaminé : en As (Zaouit Sidi Blal à Tasstift, Foug-Eloued ; en Co (Zaouit Sidi Blal, Amazzer) ; en Ni (Tagragra) ; en Se (tous les échantillons des sites prospectés).

L'amandier

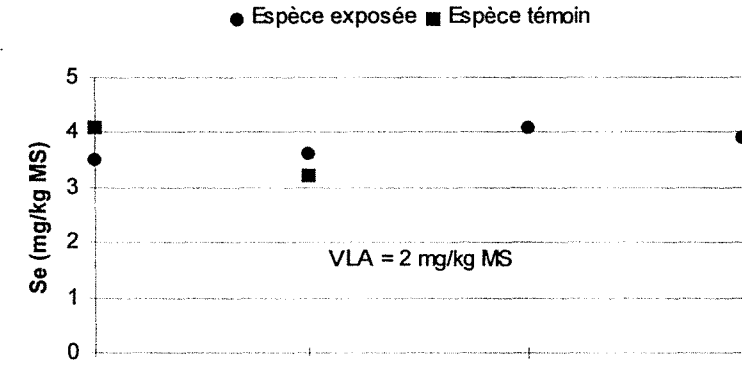
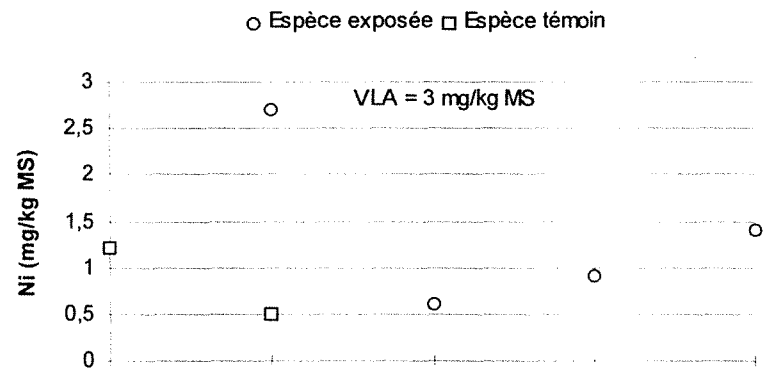
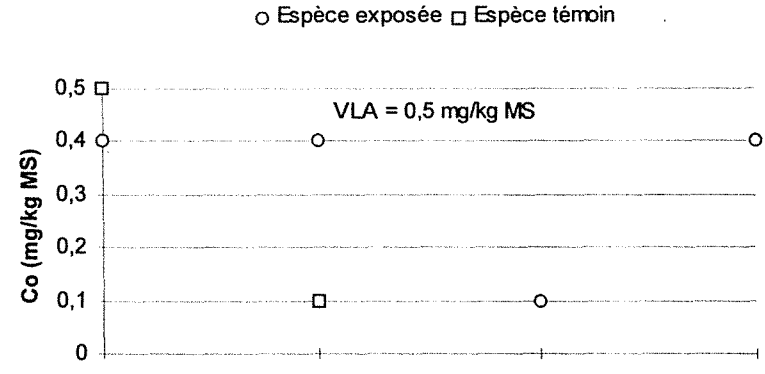
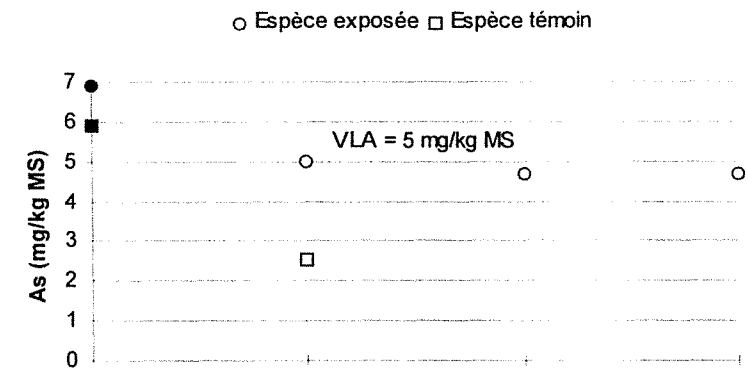


Fig 84. Teneurs en As, Co, Ni et Se dans l'olivier : confrontation des résultats aux valeurs limites acceptables, cercles rouges pleins et carrés bleus pleins, Olivier contaminé : en As (Zaouit Sidi Blal, Figuier) ; en Se (tous les échantillons des sites prospectés).

L'olivier

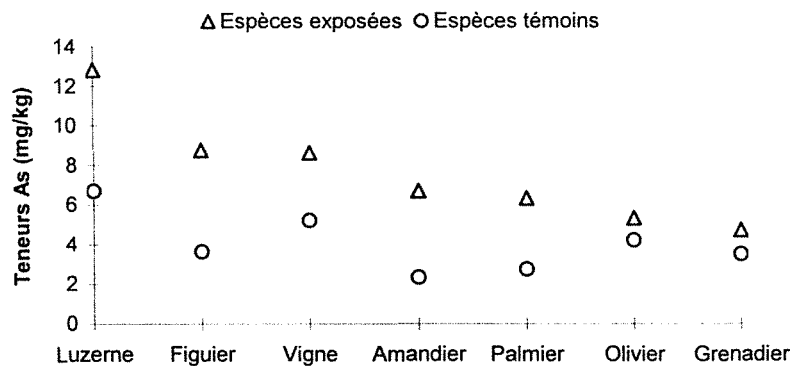


Fig 85 : Teneurs moyennes en As dans la luzerne et l'arboricultures fruitières.

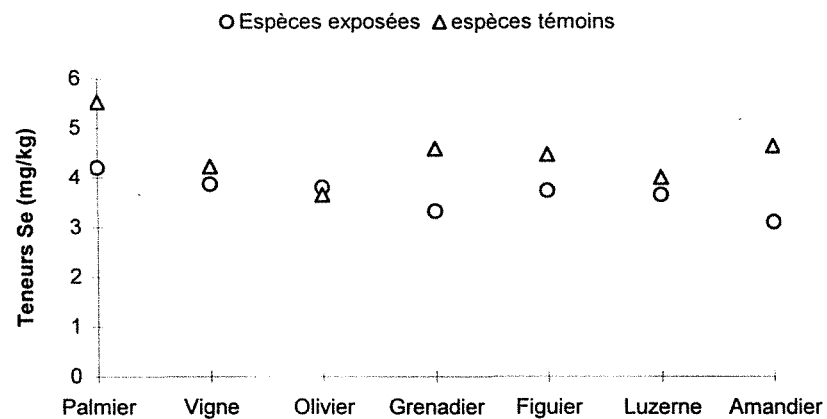


Fig 88 : Teneurs moyennes en Se dans la luzerne et l'arboricultures fruitières.

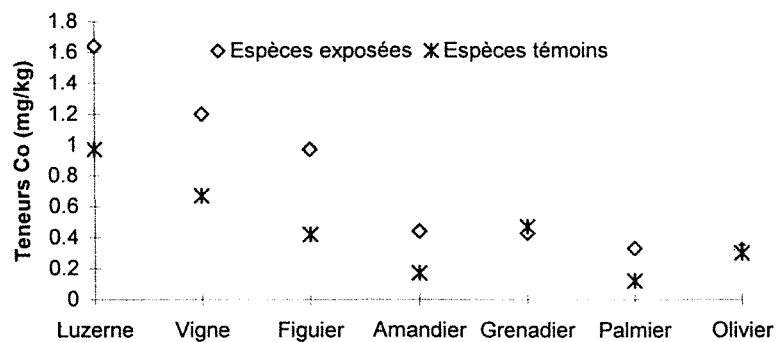


Fig 86 : Teneurs moyennes en Co dans la luzerne et l'arboricultures fruitières.

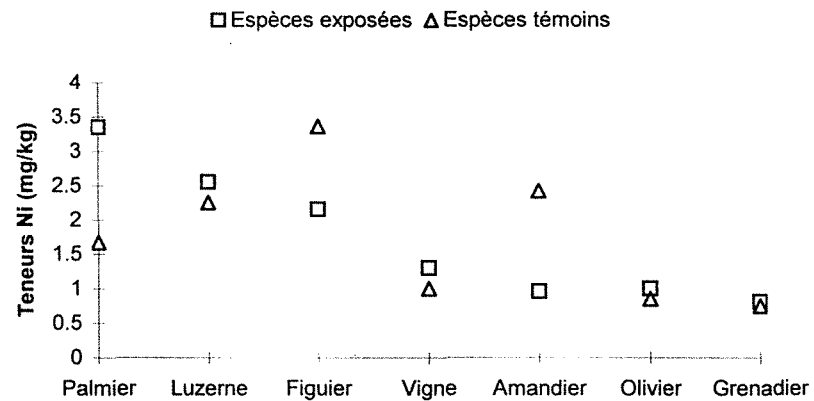


Fig 87 : Teneurs moyennes en Ni dans la luzerne et l'arboricultures fruitières.

- Sélénium : les teneurs moyennes pour les espèces végétales exposées et irriguées par l'oued Alougoum sont de 4,2 mg Se/kg (palmier), 3,79 mg Se/kg (grenadier), 3,86 mg Se/kg (vigne), 3,60 mg Se/kg (amandier), 3,8 mg Se/kg (olivier), 3,70 mg Se/kg (figuier) et 3,65 mg Se/kg (luzerne).

Les végétaux témoins non irrigués par l'oued Alougoum, indiquent les valeurs moyennes suivantes : 4,32 mg Se/kg (palmier), 3,64 mg Se/kg (grenadier), 3,7 mg Se/kg (vigne), 3,8 mg Se/kg (olivier), 3,54 mg Se/kg (figuier), 3,67 mg Se/kg (luzerne) et 3,92 mg Se/kg (amandier) (Fig 88).

Il est possible d'apprécier les transferts du sol aux plantes, via les racines en déterminant le coefficient de transfert. Celui ci est calculé comme étant égal au rapport de la concentration dans le végétal à celle dans le sol. Pour l'ensemble des espèces étudiées, ce coefficient est inférieur à 1. Pour l'As, il est de 0,09 pour la luzerne et varie de 0,03 à 0,06 pour l'arboriculture fruitière. S'agissant du Co, ce coefficient s'élève à 0,04 pour la luzerne et se situe entre 0,009 à 0,02 pour l'arboriculture fruitière. Concernant le Ni, il est de 0,08 (luzerne) et 0,02 à 0,11 (arboriculture fruitière).

Ces résultats, montrent que la luzerne assimile préférentiellement l'arsenic et le cobalt et dans une moindre mesure le nickel et ce quel que soit le site de prélèvement. En revanche, le palmier dattier est l'arboriculture fruitière qui incorpore plus de Nickel.

III.7. DEVENIR ET RISQUE POUR LA SANTE HUMAINE

Par sa consommation d'animaux, de fruits ou de végétaux, l'homme peut ingérer une proportion importante de micro-polluants (As, Co, Ni, Se....), d'où des risques pour sa santé. Les transferts vers l'homme peuvent être indirects par les plantes et les animaux ou directs en consommant les fruits.

✓ Transfert indirect par les plantes

L'accumulation des éléments en traces, notamment l'As, Co, Ni, Se dans les plantes analysées, résulte de leur biodisponibilité dans l'horizon labouré des sols cultivés, c'est-à-dire de leur aptitude à être transférés de cet horizon de surface ou horizons profonds vers le système racinaire du végétal. L'intensité du prélèvement est généralement liée aux caractéristiques de la plante :

- * le système racinaire et son installation dans le sol ;

- * l'espèce : la culture fourragère (luzerne) semble plus accumulatrice de l'arsenic et cobalt que les grandes cultures. Le palmier dattier est l'arboriculture fruitière qui accumule plus de nickel. La consommation des dattes est importante dans la région, d'où un très haut degré de probabilité de contamination par le nickel.

En général, la répartition des éléments en trace dans les végétaux n'est pas homogène dans la plante. Les concentrations peuvent être importantes dans les racines et les fruits. Il faut cependant noter l'influence d'autres paramètres qui facilitent les transferts vers les plantes, tels que le pH, la nature et le type de sol.

✓ Transfert indirect par les animaux

Les animaux peuvent absorber une quantité non négligeable de terre polluée en même temps que le fourrage, d'où un risque réel de contamination pour l'homme à travers la chaîne alimentaire.

III.8. CONCLUSION

☛ La composition du couvert végétal en As, Co, Ni, Pb et Se est variable selon l'espèce et la variété du végétal. Pour un même type de sol (sol peu évolué d'apport alluvial), on distingue des différences remarquables notamment en As. En effet, le couvert végétal témoin, non irrigué par l'oued Alougoum, présente des teneurs en As de 3,2 à 10,2 mg As/kg (luzerne) et 1,7 à 7,7 mg As/kg (arboriculture fruitière).

☛ Le couvert végétal exposé et irrigué par l'oued Alougoum, indique des teneurs en As qui se situent dans une gamme de 3,9 à 25 mg As/kg (luzerne) et 3,1 à 20 mg As/kg (arboriculture fruitière). Ces valeurs dépassent nettement celles détectées dans les végétaux témoins. Tout ceci conduit à attribuer une origine anthropique à l'As contenu dans le couvert végétal, irrigué par l'eau drainée par l'oued Alougoum, à partir du District minier de Bou-Azzer. Certaines espèces végétales, montrent des teneurs en As largement supérieures à la teneur maximale en As fixée pour les végétaux : 5 mg As/kg MS (Neuzil, 1990 ; M. Mench, 1993).

☛ Toujours à titre de comparaison, les teneurs en Co, varient de 0,1 à 2,9 mg Co/kg pour les espèces exposées et 0,1 à 1,7 mg Co/kg pour les espèces témoins. Concernant le Ni, les végétaux exposés, indiquent des teneurs de 0,5 à 16,5 mg Ni/kg et 0,5 à 8,4 mg Ni/kg pour les végétaux témoins. Les teneurs maximales de 2,9 mg Co/kg et 16,5 mg Ni/kg, correspondent respectivement aux teneurs dans la luzerne et le palmier dattier cultivés et collectés au niveau du douar Zaouit Sidi Blal, situé à 7 km en aval de la mine de Bou-Azzer.

Rappelons que les horizons labourés des sols exposés, depuis Zaouit Sidi Blal à Alougoum, présentent des teneurs moyennes en As qui varient de 100 à 225 mg As/kg (moyenne de 148 mg As/kg). Les résultats analytiques des végétaux, montrent bien qu'il existe une relation évidente entre les teneurs totale en As dans les sols et les teneurs dans les végétaux, mais il est clair que cette relation n'est pas directe et dépend de nombreux facteurs liés au végétal : si le sol propose, la plante dispose !.

☛ Le coefficient de transfert en As, calculé comme étant égal au rapport de la concentration dans le végétal à celle dans le sol est de l'ordre de 0,09 pour la luzerne et varie de 0,03 à 0,06 pour l'arboriculture fruitière.

☛ Pour le cobalt, ce coefficient atteint 0,04 (luzerne) et se situe entre 0,009 à 0,02 (arboriculture fruitière). Concernant le nickel, le facteur de transfert est de 0,08 (luzerne) et 0,02 à 0,11 pour l'arboriculture fruitière. De ces résultats, on en déduit, que la luzerne assimile bien l'arsenic et dans une moindre mesure le cobalt. Par contre, le palmier dattier est l'arboriculture fruitière qui incorpore préférentiellement le Ni, avec un facteur de transfert de 0,11.

☛ La contamination par l'As de la luzerne à des doses élevées a provoqué des effets toxiques de cette culture fourragère. Ces effets se traduisent par une régression importante des rendements de 71 %, en passant de 400 quintaux par hectare en 1980/1981 à 116,5 quintaux par hectare en 1995/1996.

☛ Le dosage du sélénium, ne révèle pas de différence significative et ce quel que soit le site de prélèvement. Les teneurs sont globalement comprises entre 3 et 6 mg Se/kg MS. Ceci pourrait être très probablement un argument en faveur d'une origine géogène donc naturelle du sélénium.

☛ Concernant le plomb, les quantités présentes dans les feuilles de l'arboriculture et la luzerne, ne présentent aucun problème d'ordre toxicologique. Les teneurs ne dépassent guère 1 mg Pb/kg MS, d'autant plus que la valeur fixée pour les fourrages verts est de 40 mg Pb/kg MS.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La finalité de cette étude était double : d'une part, participer à la caractérisation des sites soumis aux risques potentiels de pollution d'origine minière (mines de Bou-Azzer) et évaluer leur degré de pollution en arsenic (As) et métaux lourds ; d'autre part, contribuer à mettre à la disposition de la C.T.T (Compagnie de Tifnoute Tighanimie) et C.M.B.A (Cobalt Métallurgique de Bou-Azzer) un ensemble d'éléments de diagnostic et de pronostic pour le choix de techniques permettant d'atteindre un objectif de réduction de cette pollution. L'étude contribue également à la connaissance des facteurs intervenant dans le cycle géochimique de l'As des écosystèmes ; elle apporte en particulier des données sur le flux « mines - eaux de surface - sols agricoles - végétaux ».

Les premières investigations sur l'environnement de la mine de Bou-Azzer ont porté sur l'analyse des agrosystèmes placés en aval de la mine, sur une étude climatologique du bassin versant de l'oued Alougoum et sur l'analyse critique des données existantes sur le District minier de Bou-Azzer.

Sur le plan agricole, les zones de cultures potentiellement menacées par l'activité minière de Bou-Azzer sont estimées à 1 870 hectares et la population qui en vit dépasse 47 000 personnes.

Sur le plan climatologique deux remarques importantes sont à retenir :

1. la dissémination potentielle des polluants minéraux par l'eau à partir du district minier de Bou-Azzer est fonction de la pluviométrie et devrait être maximum en automne qui contribue pour plus de 50 % de la pluie annuelle.

2. la dispersion potentielle des polluants minéraux par le vent sous forme de poussières est fonction de degré de sécheresse et devrait être maximum en été et au printemps.

Le recensement et l'analyse critique des données existantes sur la mine de Bou-Azzer ont permis de caractériser les sources potentielles de pollution, d'établir un bilan quantitatif des rejets miniers stockés dans le périmètre de la mine et d'élucider les stocks d'arsenic et éléments associés disséminés dans ces rejets. En effet, les exploitations anciennes et actuelles ont engendré trois type de rejets :

- les haldes de mines stockées sous forme de digues dans le sous bassin versant de Bou-Azzer. Ces haldes issues des unités de traitement de cobalt, d'argent et de l'ancienne usine pilote de cuivre de Bleida sont estimées à 1 166 843 t ;

- les rejets Hancock issus de la laverie cobalt et qui sont évalués à 123 079 t ;

- les stériles de mines dispersés tout au long du District minier et qui résultent des travaux d'abattage et travaux de recherche. Ces rejets totalisent 997 395 t.

En total, 2 287 317 t de rejets arséniés sont stockés dans le périmètre de la mine (cf. figure 89). A ces sources potentielles de pollution, peut s'ajouter celles liées aux roches en places, notamment les serpentines qui titrent environ 20 à 360 g As/ t et les particules fines sous forme de poussières issues des haldes de mines.

Le bilan global d'As stocké sous forme solide dans les rejets miniers en amont du barrage de Tizgui s'élève à 33 717 t, dont 75 % d'As se trouve dans les haldes de mines (cf. figure 90).

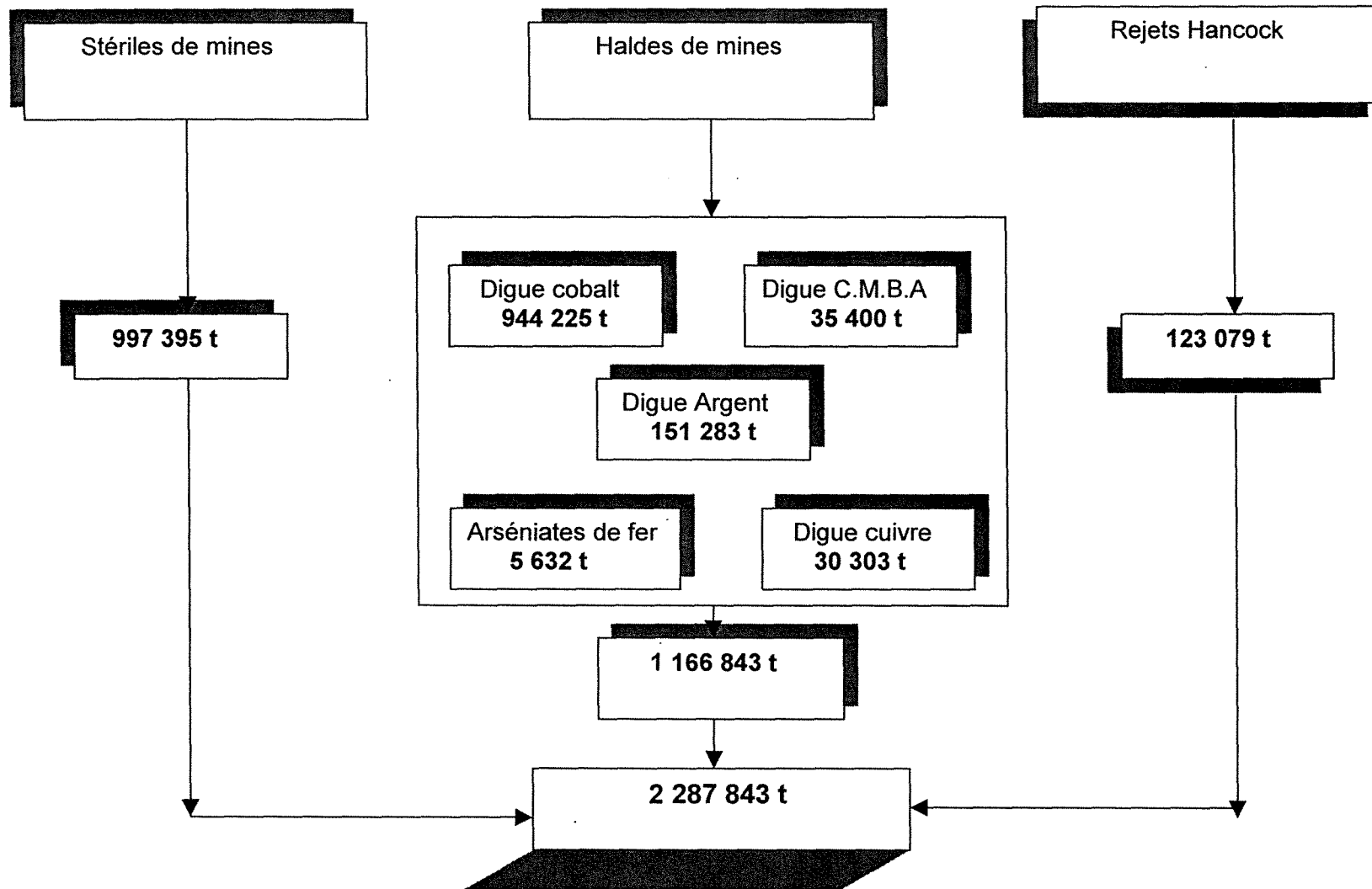


Fig 89 : Bilan quantitatif des rejets miniers stockés dans le périmètre de la mine.

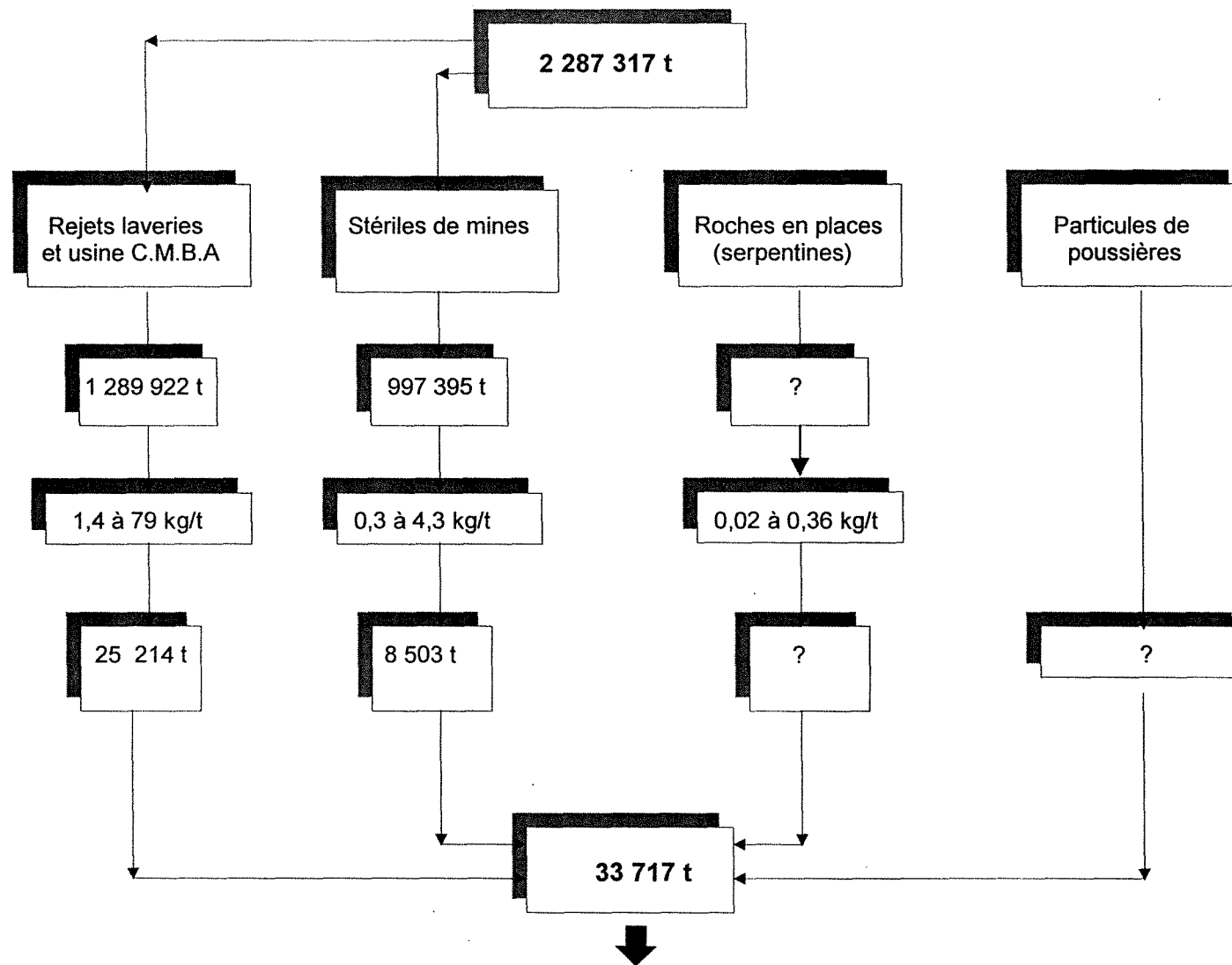


Fig 90. Bilan global d'As stocké dans les rejets miniers en amont du barrage de Tizgui sous forme solide.

Les haldes de mines ont fait l'objet de tests de mise en solution. Elles montrent une dissolution lente et un risque potentiel de pollution des eaux d'inhibition et de percolation à travers les stocks sur place (cf. figure 22, paragraphe II.6.1.troisième partie).

Les eaux usées générées par les digues opérationnelles (digue N° VIII et digue C.M.B.A) sont plus particulièrement trop chargées en arsenic soluble. C'est plutôt la digue C.M.B.A, conçue pour recevoir les rejets solides et aqueux du procédé hydrométallurgique (lixiviation) qui libère des quantités importantes en arsenic soluble (cf. figure 91).

Ces résultats, ont permis de paramétrer les flux annuels en As dans le système fluvial du sous bassin versant de Bou-Azzer en amont du barrage de Tizgui. Ces flux sont estimés à 757 kg/an (As total) dont 733 kg/an (fraction soluble) et 24 kg /an (forme particulaire).

L'examen des teneurs en arsenic et métaux lourds de l'eau de surface à la sortie du barrage de Tizgui, où elle est drainée par l'Assif N'Talkherte jusqu'à son confluent avec l'oued Alougoum, montre que la balance des entrées et sorties dans la retenue du barrage est positive pour la plupart des éléments chimiques. La composition de cette eau et ses propriétés sont modifiées à un degré le rendant impropre à un ou plusieurs usages auxquels elle est destinée. Sa qualité est mauvaise en terme de concentration en As ; moyenne pour le Co, Ni, Pb, Cr ; excellente pour le Se, Cu, Zn et Fe (projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux de surface).

Les flux d'As vers les écosystèmes situés en aval du barrage de Tizgui, le long de la vallée de l'oued Alougoum sont évalués à 37 500 g As/an pour l'arsenic soluble et 1 120 g As/an pour les transports particuliers, soit 38 620 g As/an sous forme totale (cf. figure 92). Ces flux, représentent à grosse au modo 5 % de la quantité annuelle d'As total générée par les digues opérationnelles soit 757 kg/an. Ils sont dus en particulier à la violence du ruissellement et à la mauvaise conception des barrages de filtration implantés en aval des digues, le long du système fluvial du sous bassin versant de Bou-Azzer.

Il est possible d'apprécier un ordre de grandeur de la quantité d'As mise en solution et transférée dans le système hydrographique de l'oued Alougoum, depuis la mise en activité de la mine de Bou-Azzer en 1930. Sur une période de 68 ans (1930-1998), le flux migratoire d'As serait de l'ordre de 1 258 kg As.

Le long de l'oued Alougoum, nous avons constaté les faits suivants :

1. la contamination des sédiments ordinaires par l'arsenic et autres polluants est liée d'une part, aux produits de haldes de mines que l'on peut identifier tout au long de l'oued et d'autre part, aux matériaux érodés des structures géologiques de la boutonnière de Bou-Azzer, offrant un fond géochimique naturel de niveau élevé en arsenic et éléments associés.

2. l'une des données analytiques majeures est la variabilité dans l'espace des concentrations en arsenic des sédiments ordinaires et des sédiments issus des haldes de mines. Cette variabilité se traduit par une dispersion sur plus de 45 km.

4. la présence de ces sédiments très pollués auxquels s'ajoutent les flux actuels d'As (soluble et particulaire, soit 38 620 g As/an) franchissant le barrage de Tizgui et les retombées atmosphériques ont un impact négatif sur les eaux de surface, les sols agricoles et les plantes. Cet impact, présente aujourd'hui un risque potentiel pour la santé humaine à travers la chaîne alimentaire (cf. figure 93).

Sans vouloir aborder ici les risques encourus pour l'homme, il faut dans cette étude évoquer le futur à court terme et moyen terme à partir des données actuelles. Ainsi, des effets d'intoxication, peuvent être exprimés chez l'homme qui consomme directement les diverses récoltes fruitières et les animaux. Mais, si on prend en considération la possibilité d'adaptation

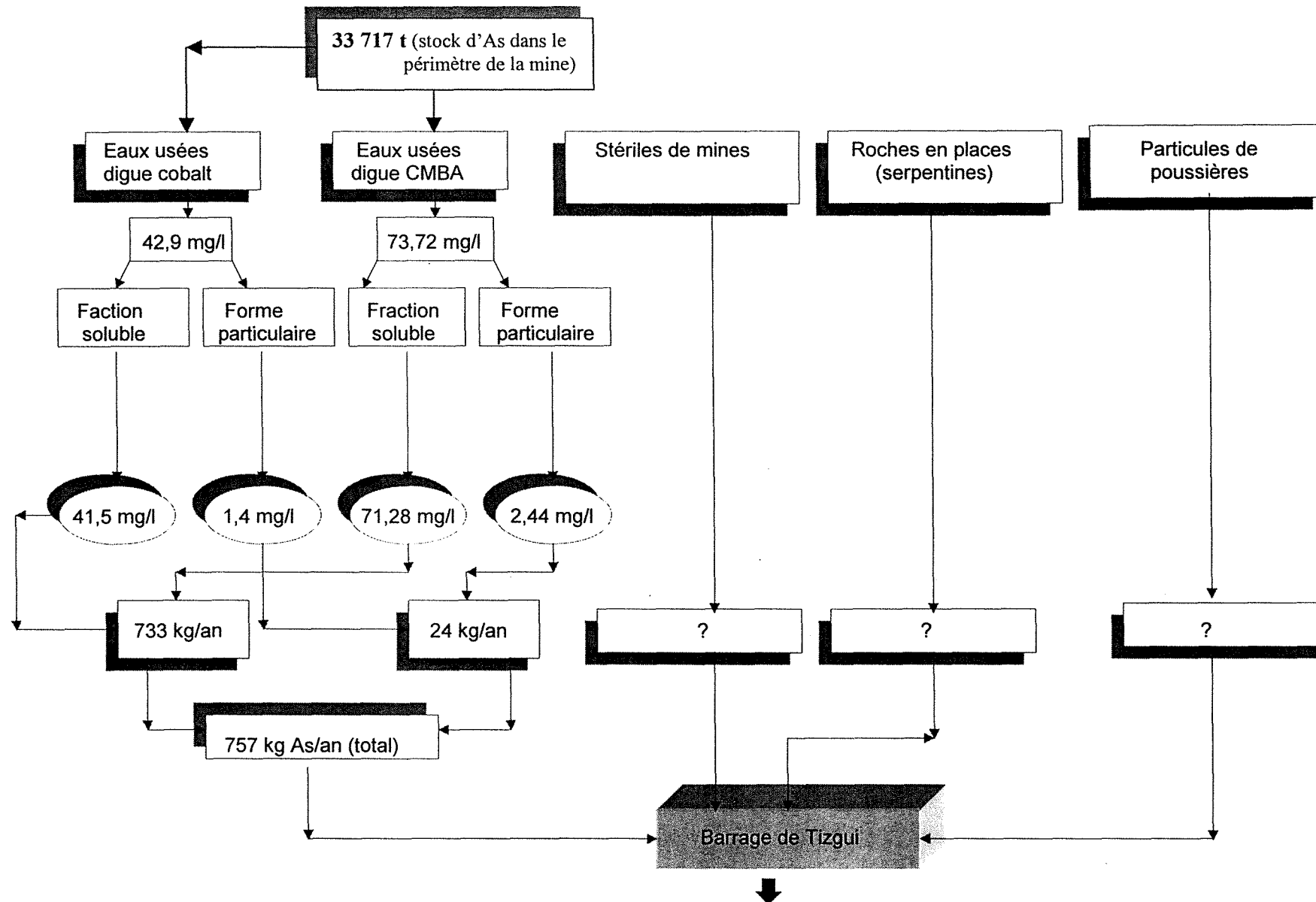


Fig 91. Bilan géochimique de l'As dans le système fluvial du sous bassin versant de Bou-Azzer en amont du barrage de Tizgui.

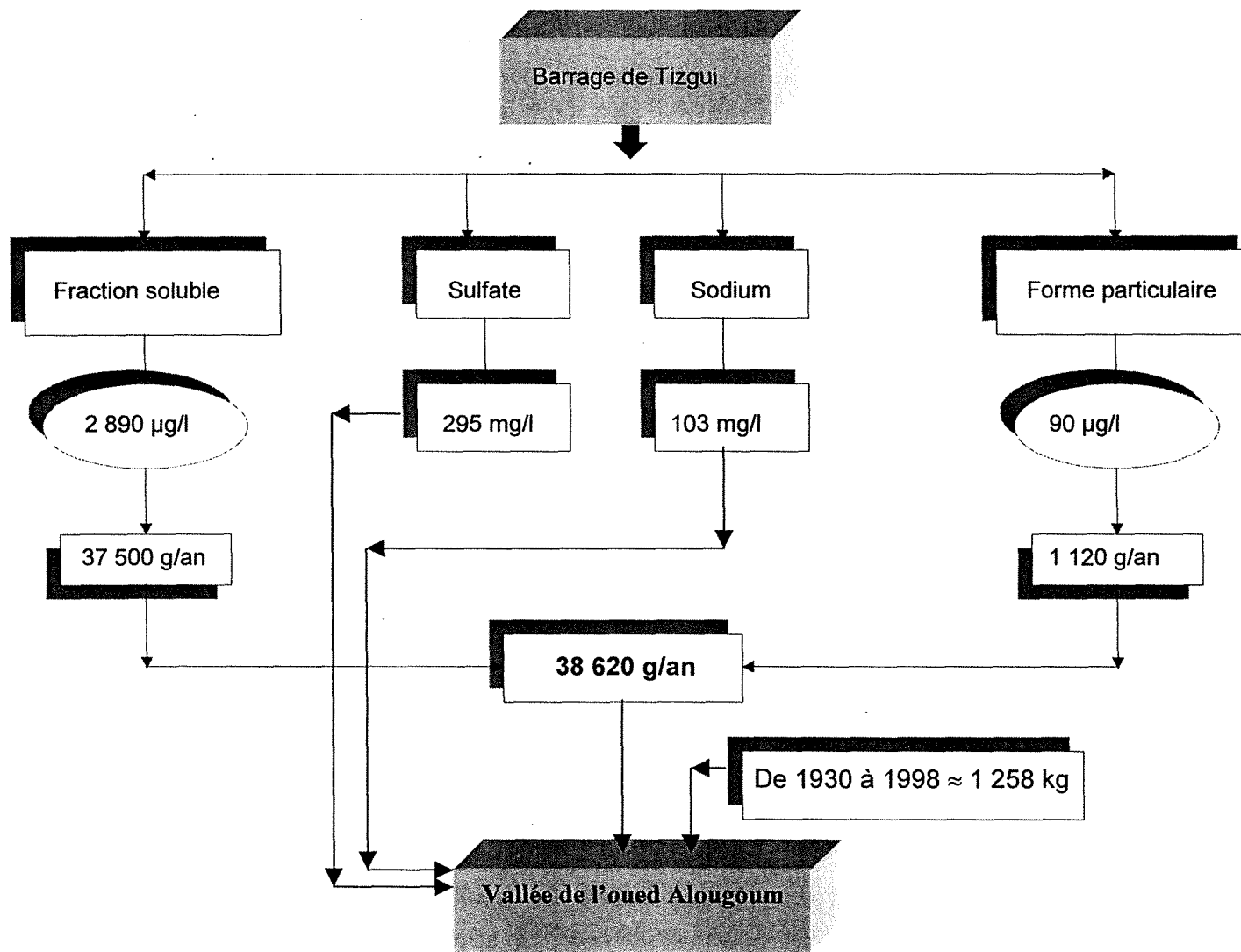


Fig 92. Bilan géochimique de l'As dans le système fluvial de l'Assif n'Talkherte en aval du barrage et provenant de la mine actuelle.

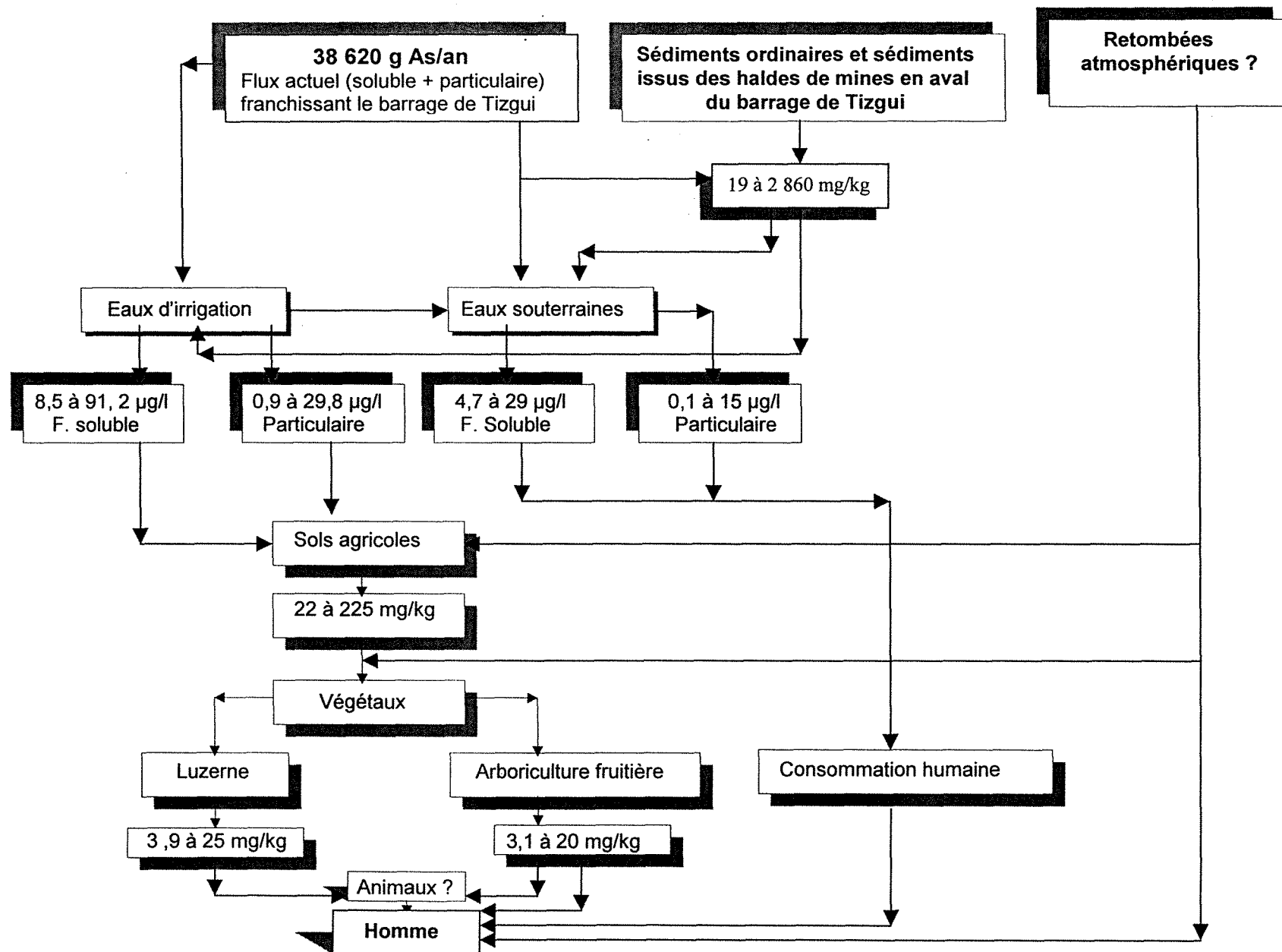


Fig 93. Cycle géochimique de l'As dans les écosystèmes de la vallée de l'oued Alougoum (Zaouit Sidi Blal à Foum-Zguid) (65 km).

des cellules différentes de l'organisme humain à l'arsenic et métaux lourds, on peut supposer qu'il existe un risque différent auquel s'exposent les hommes dans cette région à intense activité minière.

Les hommes qui habitent dans la vallée de l'oued Alougoum en permanence ont sans doute des mécanismes de défense à l'impact négatif de l'arsenic d'origine minière. Par contre les hommes récemment implantés à coté de la mine, ne peuvent pas avoir cette possibilité. Autrement dit, ces teneurs en arsenic, toxique, peuvent être inoffensives pour les hommes qui sont habitués à les subir et très dangereuses pour les hommes venus d'autres régions.

Il ne s'agit là que d'une hypothèse qui reste à vérifier, si elle est bien confirmée, elle permettra d'établir les conclusions sur les différents dangers auxquels s'exposent la population installée en aval de la mine, le long de la vallée de l'oued Alougoum.

En outre, il est évident que le diagnostic ou le pronostic de la qualité des sols et des végétaux en matière d'éléments en traces ne peut pas être établi sur la seule base des teneurs totales ; il convient aussi de considérer l'état et la spéciation des éléments dans le sol et les racines, leur probabilité et vitesse de transfert vers la solution du sol (critère de mobilité) et vers les organismes vivants (critère de biodisponibilité).

Pour estimer les risques encourus pour la population, il est indispensable d'entamer une étude d'écotoxicité qui a pour objectif d'évaluer l'impact physique et biologique de l'As sur les êtres vivants. Cette étude écotoxicologique, consiste à exposer des espèces biologiques définies à des doses croissantes en As afin de mesurer les effets sur la mortalité, la croissance et la reproduction.

Ces essais biologiques contrairement aux analyses chimiques, démontreront l'existence du danger et permettront de l'identifier. Il est important de ne pas se limiter à l'identification du danger à court terme (toxicité aigüe) mais également des recherches des informations sur le danger à plus long terme (toxicité chronique).

Au total, actuellement, l'impact de la mine de Bou-Azzer sur la vallée de l'oued Alougoum est négatif mais limité excepté pour l'As et dans une moindre mesure pour le Co et le Ni. En effet, de nombreux sites (Zaouit Sidi Blal, Amazzer, Ait Aissa, Ait M'rabt, Tasstift, Alougoum) sont fortement touchés par une pollution en arsenic d'origine minière qui peut prendre des dimensions dramatiques, liées à la fois :

- à l'intensité de la pollution ;
- à la dispersion de la pollution sur de grandes distances ;
- à la forme de la pollution (As dissout à 97 %), facilement intégrable dans la chaîne alimentaire ;
- à l'accumulation de la pollution dans les sédiments, les eaux de surface, les sols agricoles, puis transférée vers les plantes via les racines par assimilation ou adsorption.

En général, cette pollution est influente dans un grand rayon d'action (45 km) par le biais des cours d'eau, des vents ou d'autres phénomènes naturels. Par ailleurs, il est important de noter qu'une partie de la pollution potentielle est à imputer aux affleurements des roches de la boutonnière de Bou-Azzer constituées en particulier, des serpentines contenant 20 à 360 g As/t.

Dans la situation actuelle, trois causes conjuguées contribuent à la dégradation du milieu environnant :

- ☞ les structures géologiques en places (serpentes) riches en arsenic et métaux lourds ;
- ☞ les haldes de mines générées par les activités minières de Bou-Azzer et accumulées sous forme de digues dans le sous bassin versant de Bou-Azzer et qui recèlent plus de 25 000 t d'As ;
- ☞ les sédiments ordinaires et les sédiments issus des haldes de mines, introduits dans le système fluvial de l'oued Alougoum par des pluies torrentielles déclenchées par des averses violentes et à caractère brutal. Ces haldes titrent en moyenne 19 à 2 816 mg As/kg.

Sur ce problème, la question est évidemment quelle cible faut-il considérer pour atteindre un objectif de réduction de cette pollution ? :

◆ L'impact des roches en places de la boutonnière de Bou-Azzer ne peut être chiffré même approximativement. Ce type d'évaluation serait possible si l'activité minière de Bou-Azzer a été précédée d'une étude d'impact (audit) environnementale. Ces roches en place peuvent occasionner des préjudices environnementaux importants et il est difficile de remédier à cet état de fait, d'autant plus que les mesures de protection sont très difficiles à mettre en action.

◆ L'impact des haldes de mines pourrait au prix d'efforts modiques être largement limité.

◆ A l'échelle de la vallée de l'oued Alougoum, il est évident que la pollution des sédiments semble avoir une intensité et une extension considérable qui pourrait susciter des craintes importantes. Cette pollution relève donc d'une autre problématique. En effet, ces sédiments très pollués peuvent à eux seuls provoquer localement des effets convergents. Il s'agit là d'effets qu'il est impossible de contrôler totalement. Dans ce même cas, il est certain que si l'on peut induire une réflexion méthodologique pour aborder ce problème, des progrès considérables pourraient être obtenus.

D'une façon générale, après avoir réalisé une analyse environnementale des sites miniers de Bou-Azzer c'est à dire évalué impacts et résultats environnementaux, on se trouve aujourd'hui confronté à trois grands types de problèmes environnementaux, liés aux exploitations de cobalt de Bou-Azzer et qui sont particulièrement délicats :

1. le passé environnemental ;
2. le présent environnemental ;
3. le futur environnemental.

1. la gestion du passé environnemental, pose en effet de sérieux problèmes difficiles à résoudre actuellement. La cause principale de l'augmentation rapide de la contamination du milieu naturel au cours de ce siècle est la rupture des cycles écologiques par les activités minières anciennes qui n'ont pas pris en compte le devenir des rejets miniers arséniés.

Les exploitations anciennes ont provoqué l'introduction de l'As à des doses élevées dans les écosystèmes de l'oued Alougoum et plus particulièrement dans les sédiments qui présentent une pollution sévère sur plus de 45 km. Ces sédiments, demeureront une source majeure de contamination à moyen terme mais aussi bien à long terme. Autrement dit, même si on supprime totalement la pollution au niveau du barrage de Tizgui, ces sédiments auront d'effets induits directs importants et négatifs sur l'environnement physique, chimique et sur le monde vivant et les améliorations en ce sens sont très difficiles à mettre en œuvre.

2. pour le présent environnemental, il paraît évident que le développement de la mine, implique à la fois une maîtrise de l'environnement et une amélioration constante des procédés de stockage des haldes de mines vers moins d'impact négatifs sur l'environnement. Une politique de gestion des haldes de mines recouvre en fait deux concepts différents ; le confinement convenable qui évite les émissions dans les écosystèmes d'une part, et le retraitement industriel pour réduire fortement les stocks d'arsenic d'autre part.

Les activités en cours, peuvent provoquer des dégradations importants et il faudra veiller pour le futur à redresser la situation. Ainsi, en amont du barrage de Tizgui, au niveau du centre minier de Bou-Azzer, il est possible de réduire fortement les flux migratoires d'arsenic et éléments associés vers la vallée de l'oued Alougoum. Pour ce faire, nous proposons les mesures techniques suivantes :

- ▶ une gestion durable des rejets miniers, avec un renforcement des talus des digues pour éviter d'éventuels effondrements en cas de crues (conception des digues, calcul de pente d'équilibre des talus de remblais etc).

- ▶ l'implantation des barrières étanches et la mise en place des bandes enherbées en bordures des digues.

- ▶ un recyclage complet des eaux usées générées par les digues. Ceci repose en premier lieu sur la construction d'un bassin de décantation juste en aval des digues opérationnelles qui libèrent des quantités importantes en arsenic (73,7 mg As/l pour la digue C.M.B.A n° X et 42,9 mg As/l pour la digue cobalt n° VIII).

- ▶ renforcement des barrages de filtration existants en aval des digues. Il semble que ces barrages devront jouer à l'avenir un rôle de premier plan en matière de lutte contre le drainage des particules fines de haldes de mines. Dans ce cas, le laminage des crues sera mis à profil pour réduire les débits d'apports, ce qui de surcroît permet d'augmenter le volume des ressources en eau mobilisées, denrée rare pour cette zone. Ces ressources en eau peuvent approvisionner les unités de traitement de cobalt.

- ▶ le vent est un facteur climatique très important dans la zone, il est caractérisé par sa fréquence et son intensité. L'édification des tranchées perpendiculaires à la direction des vents dominants (SW-NE) ou des brises vents, peuvent immobiliser la migration des particules fines des haldes de mines.

- ▶ la mise au point de technologies propres et appropriées pour piéger l'arsenic en aval des digues, sont des voies de travail à développer. Ces techniques pourraient être fondées non plus sur un traitement chimique mais une fixation organo-chimique de l'arsenic. Dans ce cas, il fallait aménager des bassins, où est favorisée l'implantation des végétaux et micro-organismes les plus efficaces à la neutralisation des eaux et à la fixation de l'arsenic.

2. concernant le futur environnemental, Il paraît tout aussi évident que le développement de la mine de Bou-Azzer ne pourra se faire que par un respect accru de l'environnement aussi bien pour les anciennes et actuelles exploitations que pour les rejets miniers générés par ces exploitations.

Il est néanmoins indispensable pour la société de prévoir la gestion et la remise en état des sites miniers après la fermeture, d'élaborer un schéma directeur d'une véritable politique ayant pour objectif, d'assurer une surveillance opérationnelle à long terme des rejets miniers arséniés stockés sous formes de digues dans le sous bassin versant de Bou-Azzer pour protéger les écosystèmes situés en aval de la mine.

La compréhension de la gravité du problème, nous permet de proposer un schéma général de transport et de la contamination par l'As le long de la vallée de l'oued Alougoum,

placée en aval des gisements de cobalt de Bou-Azzer (figure 94). Ce schéma repose sur les différents aspects du diagnostic mine de Bou-Azzer environnement.

De ces différents aspects du diagnostic, il apparaît clairement que dans la situation actuelle, les rejets arséniés, les roches en places (serpentes), les sédiments ordinaires et les sédiments issus des haldes de mines, les retombées atmosphériques, constituent des sources majeures de la contamination des écosystèmes par l'arsenic.

Le milieu dans lequel transite le polluant et qui correspond au **vecteur** de transport et de dispersion est la vallée de l'oued Alougoum. Les **voies de transport** sont à la fois fluviales, aériennes et biochimiques. La **cible** de la pollution est tour à tour : « **sédiments - eaux de surface - sols agricoles – végétaux** », avec des niveaux de concentration différenciés et plus marqués pour les sédiments, sols, culture fourragère (luzerne) et certaines espèces de l'arboriculture fruitière (palmier dattier).

L'utilisation de ce schéma à la recherche concrète dans certaines régions, permet de définir les voies possibles de transport de la pollution des métaux lourds et de l'intoxication de la population, et de définir la cible de l'impact. Cependant, dans chaque région il est nécessaire de construire un schéma directeur à plus grande échelle et de bien spécifier la cible. L'application de ce type de schéma permet de préciser la direction de la recherche et de concentrer les efforts sur l'évaluation de la pollution et de la vulnérabilité de la cible.

Il s'agit en effet, d'un modèle qui pourrait servir de cadre méthodologique d'approche des environnements miniers complexes et qui pourrait ainsi être transposé à d'autres sites présentant un risque potentiel de pollution.

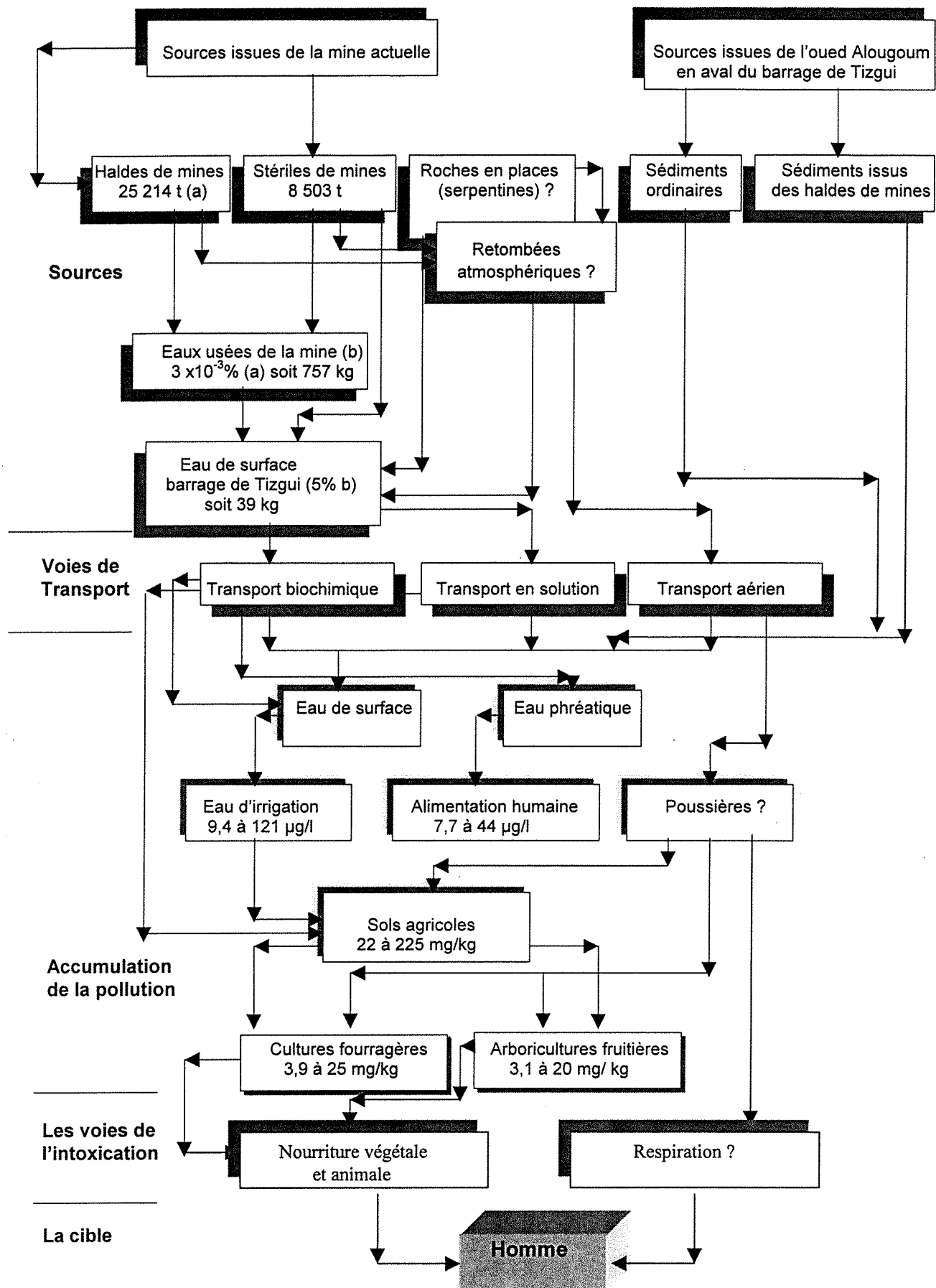


Fig 94. Schéma de transport et de la contamination par l'As le long de la vallée de l'oued Alougoum en aval du barrage de Tizgui.

ANNEXE 1



Année agricole	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	T.annuel
1936/1937	0,0	0,0	0,0	17,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	20,4
1937/1938	0,0	9,0	8,4	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	17,9
1938/1939	1,9	0,0	0,3	38,4	1,1	9,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	53,0
1939/1940	0,0	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	8,5
1940/1941	5,0	16,4	0,0	24,0	8,5	0,0	5,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	60,9
1941/1942	3,5	0,0	2,0	8,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,5
1942/1943	5,0	17,0	56,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	85,0
1947/1948	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	1,5	12,2
1948/1949	0,0	15,7	0,0	28,1	0,0	0,0	33,9	22,5	0,0	0,0	0,0	0,0	100,2
1949/1950	2,0	0,0	7,5	55,3	3,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	4,0	72,3
1950/1951	27,8	19,0	0,0	0,0	0,5	15,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	62,8
1951/1952	0,0	9,0	48,5	1,5	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	61,0
1952/1953	72,0	0,0	23,5	0,0	32,9	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	129,4
1953/1954	0,0	18,5	29,0	32,9	0,2	0,2	22,6	8,0	0,0	0,0	0,0	-	111,4
1954/1955	0,0	3,0	235,5	2,8	2,1	1,3	0,0	0,0	8,6	26,0	0,0	3,8	283,1
1955/1956	21,7	18,6	17,5	28,2	104,0	12,6	0,0	1,1	0,9	0,0	0,0	0,0	204,6
1956/1957	17,4	12,4	0,0	0,0	0,5	2,0	20,8	0,0	5,0	0,0	0,0	15,0	73,1
1957/1958	0,0	21,2	20,0	26,5	5,0	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	80,1
1984/1985	0,0	0,0	22,5	25,5	22,0	28,0	0,0	35,0	16,0	0,0	0,0	0,0	149,0
1985/1986	1,5	0,0	6,5	3,0	0,0	0,0	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,5
1986/1987	7,0	12,0	3,0	1,0	0,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,0
1987/1988	42,0	28,0	11,0	62,0	0,0	0,0	2,0	0,0	4,0	0,0	0,0	1,5	150,5
1988/1989	0,0	17,0	57,0	0,0	0,0	64,0	53,0	39,0	1,0	0,0	0,0	0,0	231,0
1989/1990	0,0	7,0	11,0	97,0	0,0	13,0	5,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	135,0
1990/1991	8,5	8,0	0,0	34,0	0,0	10,5	0,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0	64,0
1991/1992	0,0	1,0	0,0	19,0	0,0	19,0	9,0	2,5	5,0	0,0	0,0	7,0	62,5
1992/1993	0,0	14,0	42,0	2,0	2,0	31,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	92,0
1993/1994	0,0	48,0	1,0	0,0	5,5	6,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	66,5
Moyenne	7,9	10,8	21,5	18,4	6,8	8,2	6,1	4,2	1,5	1,0	0,0	1,4	87,7
Max	72,0	48,0	235,5	97,0	104,0	64,0	53,0	39,0	16,0	26,0	1,0	15,0	283,1
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5

Tableau 7, annexe 1 : Hauteur des précipitations annuelles (mm) au poste de Foug-Zguid (1936-1994).

Année agricole	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	T: annuel	Normale
1931/1932	-	-	-	-	-	-	-	-	3,5	0	0	4,3	7,8	-
1932/1933	0	0	2,4	1,6	2	0	0	0	0	15	0	22	43	43
1933/1934	2	1,5	0	-	0	-	-	-	0	0	0	0	3,5	-
1934/1935	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1935/1936	24,6	0	0	0	0	0	0	0	0	6,5	0,2	0	31,3	37,2
1936/1937	0,1	1,7	6	10,3	0	0	0	0	1,1	0	0,3	3,2	22,7	32,3
1937/1938	0,1	6,3	27,5	0,2	0	0	0,6	29,6	0	2,2	4	3	73,5	42,6
1938/1939	5	4,9	6,3	-	0	0	0	5,3	0	0	1,1	-	22,6	-
1939/1940	-	17,3	0	7,3	0	0	0	0	0	0	0	-	24,6	-
1940/1941	22,3	29	0,1	21,7	3,4	0	2	1,4	0	0	0	0	79,9	50,1
1941/1942	1,2	7,7	1,2	10,5	2,2	6,2	3,6	0	0	0	0,4	0	33	47,2
1942/1943	9	9,5	33,5	38,8	0	6,2	10,8	3,4	0	0	0	0	111,2	56,4
1943/1944	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1944/1945	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1945/1946	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1946/1947	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1947/1948	-	0	0	0	0	1	25,5	4,8	0	1,2	0	0	32,5	41,4
1948/1949	0	4,2	0	7	0	9,3	33	59	0,6	0	1	5	119,1	60,7
1949/1950	7	0	7	58	1	0	0	1	4,7	0	0	23,7	102,4	64,9
1950/1951	19	33,2	0	0	0,5	14,3	1,5	1,5	0	0	0	0,5	70,5	65,4
1951/1952	5,6	10	61,5	1,5	0	0	0	8	0	0	0	0	86,6	67,1
1952/1953	27,5	0	32,1	0	15	0	10,7	0	2,3	2	1,5	0,5	91,6	69
1953/1954	13	5,8	20,4	27,7	0	5,9	0	9,6	0	1	0	0	80,4	69,8
1954/1955	0	0	32,7	0	4,2	0	0	2,9	13,6	3,1	0	2,3	353,1	88,7
1955/1956	0	37,4	21,3	13,9	50,8	11,8	1,3	-	1,3	0	-	0	137,8	-
1956/1957	3,4	0	-	-	-	-	-	-	-	0	0	3	6,4	-
1957/1958	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1958/1959	0	2,4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,4	-
1959/1960	19	13,5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,5	-
1960/1961	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1961/1962	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1962/1963	-	-	-	-	8,6	0	1,4	11,5	2	0	0	0	23,5	-
1963/1964	0	0	0	6,5	13	0	0	6	0	0	0	0	25,5	84,8
1964/1965	8,8	0	0	4	0	47	0	5,5	0	0	0	0	65,3	83,6
1965/1966	10	82,5	12,1	0	0	0	0	0	4	6	0	0	114,6	85,3
1966/1967	0	2	19,2	0,1	0	10	0	2,7	16	0	0	3	53	83,6
1967/1968	63	15	26,5	0	0	4,5	2	6,9	0	0	1	5,6	124	85,7
1968/1969	0	0	1	12	12,7	17,2	0	0,8	0	0	0	5,3	49	83,9

Tableau 8, annexe 1 : Hauteur des précipitations annuelles (mm) au poste de Zagora.

Année agricole	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	T: annuel	Normale
1969/1970	7,5	5,8	11,5	0	5,3	0	3,6	0	0	0	0	6	39,7	81,9
1970/1971	2,1	1,9	19,4	1,4	0	1	3,5	3,6	0	3	4,5	3,3	43,7	80,7
1971/1972	5,9	0,3	0,3	0	0	4,5	0	32,5	0	0	0	0	43,5	79,7
1972/1973	0	12,9	14,8	32	0	0,7	0	1,8	0	1,2	0	8	71,4	79,4
1973/1974	0	0	16,8	0,5	0	0	16	0,3	0	0	0	0	33,6	77,6
1974/1975	0	0	7,5	15,9	0	0	0	19,5	0	0	0	2	44,9	76,4
1975/1976	0	0,5	0	6,7	22	4	0,2	4,3	34,8	0	0	0	72,5	76,3
1976/1977	21,8	0	0	9,1	0,5	0	0	3,8	0,5	0	0	0	35,7	74,9
1977/1978	7,6	0,8	0	8	30,9	0,2	0	0	0	0	0	22,9	70,4	74,7
1978/1979	0	3,7	0	0	86	0,4	2,4	0	0	0	0	0	92,5	75,3
1979/1980	3,6	134,9	6,4	0	13,6	14,4	38,9	0,5	0	0	0	0	212,3	79,6
1980/1981	4,8	0	6	22	0	4,7	0	0	0	0	0	0,4	37,9	78,3
1981/1982	0	0	23,5	0	10	6,4	0,5	0,6	9	0	0	0,2	50,2	77,5
1982/1983	0	0	3,2	0	2	0	0,3	0,2	2,4	0	0	11	19,1	75,8
1983/1984	0	0	0	0	7,6	0	0	1,5	0	0	0	0	9,1	74
1984/1985	2,5	0,2	10,5	0	8,5	28,2	0	38,2	13,6	0	0	0	101,7	74,7
1985/1986	0,4	2	2,5	8,3	0,2	6,5	0,4	0	0	0	0,3	0	20,6	73,3
1986/1987	9	23,6	0,5	0	0,5	0	0	0	1,2	0	0	0	34,8	72,3
1987/1988	2,5	2	4	19,9	4,5	17,2	6,1	4,5	0	1	0	0	61,7	72
1988/1989	1,5	3,6	28,3	0	0	5,6	4,9	0	0	1	0	1,3	46,2	71,4
1989/1990	6,6	9,8	32,2	69,5	1,3	0	0,8	0	0,1	0	0,3	0,6	118,2	72,5
1990/1991	1	5,2	0	41,8	0	3,2	0,6	2,3	0	1,5	0	4	59,6	72,2
1991/1992	0	64,4	0	16	0	5,6	0,8	3,3	6,3	0	0	2,6	99	72,8
1992/1993	0	2	0	21,1	0	27,5	1,2	0	0	0	0,8	0	52,6	72,4
1993/1994	0	24,1	17,9	2,8	4,8	5	0	0	0	0	0	0	54,6	72
1994/1995	0	105,7	2,2	0	0	-	7,8	11,2	0	0	0	0	126,9	72,8
Total	317,4	687,3	814,6	496,1	311,1	268,5	180,4	288	117	44,7	15,4	143,7	3677,7	-
moyenne	6,10	12,73	15,37	10,12	5,98	5,37	3,54	5,76	2,21	0,83	0,29	2,76	65,67	-
Max	63	134,9	327	69,5	86	47	38,9	59	34,8	15	4,5	23,7	353,1	-
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,5	-

Tableau 8, annexe 1 (fin) : Hauteur des précipitations annuelles (mm) au poste de Zagora (1931-1995).

Année agricole	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	T. annuel	Normale
1974/1975	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	11,5	4,9	16,4	
1975/1976	1,2	0	0	10,5	0	12,1	9,1	8,2	16,4	5,9	0	2	65,4	65,4
1976/1977	110,5	0	0	2,5	16,8	0	0	19,1	18,8	0	0	0	167,7	116,6
1977/1978	44,3	27,7	0	47,4	48	0	0	0	0	0	0	17,4	184,8	139,3
1978/1979	0,5	34,4	5,1	1,4	62	5,8	0	0	8,7	0,6	1,5	0	120	134,5
1979/1980	23,8	70,8	12,1	0	29,6	13,3	46,7	1,6	0,3	0	0	2,2	200,4	147,7
1980/1981	18,9	2,9	15,4	42,8	6,3	19,6	1,7	0,5	0	1,4	4,6	1,1	115,2	142,3
1981/1982	1,8	6,4	15,5	0	1,6	1	6,9	1,9	18,3	0	2,3	0,6	56,3	130
1982/1983	3,3	0	0,6	0	4,5	0,5	0,4	5,7	4,2	0,5	0,7	2,1	22,5	116,5
1983/1984	0	2,4	13,7	0	1,6	0	0	0	0	0,5	0	0	18,2	105,6
1984/1985	3,5	0	28,3	0,6	32,7	24	0	53,9	8,3	0	2	1,6	154,9	110,5
1985/1986	3,2	25,3	36,5	3	0,4	9,4	1,3	0	0	0	1,9	1,2	82,2	108
1986/1987	9,7	3,5	0	1,6	6,4	0	3,3	0	3,1	0	0	0,2	27,8	101,3
1987/1988	42,3	57,6	18,4	19,9	30,9	87,8	19,1	5,3	0	0	0	0	281,3	115,1
1988/1989	5,6	17,7	69,3	0	83,5	55,9	11,8	0,6	0	0	1,3	5	250,7	124,8
1989/1990	12,2	14,5	16,1	77,1	1,3	0	37	0	10,2	0	5,3	11,7	185,4	128,9
1990/1991	12,6	0	0,8	11,7	0	18,1	7,4	5,2	0	2	18,9	12	88,7	126,3
1991/1992	1	6,4	12	54,9	1,5	62,9	24,8	0,6	4,4	0	0	5,4	173,9	129,1
1992/1993	0	12,5	2,1	27,5	4,6	22,8	2,8	0	0,7	0	6,5	1,6	81,1	126,5
1993/1994	0	17,1	38,2	1,8	22,2	1,4	33	0,1	0,1	1,1	1,1	10,6	126,7	126,5
1994/1995	0,6	83,5	0	0	0	1	64,9	50,3	2,4	0	2,1	0,7	205,5	124,4
1995/1996	14,75	19,08	14,2	15,13	17,67	16,78	15,51	7,57	4,79	0,57	2,37	3,77	132,19	118,4
Total	309,75	401,78	298,3	317,83	371,57	352,38	285,71	160,57	100,69	12,57	62,07	84,07	2757,29	
Moyenne	14,75	19,13	14,20	15,13	17,69	16,78	13,61	7,65	4,58	0,57	2,82	3,82	125,33	
Max	110,5	83,5	69,3	77,1	83,5	87,8	64,9	53,9	18,8	5,9	18,9	17,4	281,3	
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	

Tableau 9, annexe 1 : Hauteur des précipitations annuelles (mm) au poste d'Assaka (Taznakht) (1974-1996).

Nom de la station	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy.annuelle
Zagora (1931/1995)	6,1	12,73	15,37	10,12	5,98	5,37	3,54	5,76	2,21	0,83	0,29	2,76	65,67
Foum-Zguid (1936/1994)	7,9	10,8	21,5	18,4	6,8	8,2	6,1	4,2	1,5	1,0	0,0	1,4	87,7
Assaka (1974/1996)	14,75	19,13	14,2	15,13	17,69	16,78	13,61	7,65	4,58	0,57	2,82	3,82	125,33
Sous Bassin de Bou-Azzer	5,57	13,98	15,19	14,73	7,08	10,6	6,54	6,61	2,7	0,59	0,65	2,45	84,64
Bassin versant de l'oued Alougoum	7,4	13,89	15,19	14,06	7,12	9,96	6,62	6,52	2,66	0,63	0,64	2,52	82,67

Tableau 10, annexe 1 : Pluies mensuelles moyennes (mm) aux postes de Zagora, Foum-Zguid, Assaka (Taznakht), bassin versant de l'oued Alougoum et sous bassin versant de Bou-Azzer.

		Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
1964	Max	19	30	32	33	39	42	44	43	39	36	27	22
	Min	2	3	8	7	19	20	22	23	18	10	5	2
1965	Max	26	27	34	33	37	41	43	43	38	30	26	24
	Min	1	5	10	9	16	18	26	20	15	12	6	5
1966	Max	27	28	30	35	37	42	43	43	42	32	24,2	21,4
	Min	3	8	7	11	16	20	21	20	17	10	3	1,7
1967	Max	22,4	26	28	30	38,4	41	44	42,2	36	35	28,6	20,2
	Min	1	3,8	8,4	7	13,1	18,8	22	24	17,6	12	5,8	1
1968	Max	20,3	25	26	34,6	37,7	39,8	42	43	39,2	34,2	28,2	33
	Min	0	4	5	9	11,4	15,8	22,4	20,5	18,2	14,4	-	4
1969	Max	24,8	25,08	35	32	30,6	39	42	44,4	39,2	31,4	27,2	23,2
	Min	3,8	6,4	8,4	7,8	9,4	16,5	21,8	21,4	15	11,5	6,5	0
1970	Max	27	25,4	31,8	31	37	41,4	43	44,4	30,9	33,6	24,7	20,3
	Min	3,5	4	5	7	11,4	16,5	20,5	21,2	19,6	12,2	8	1,6
1971	Max	20,3	20,7	22,8	27,7	28,8	35,3	39,8	38,5	34,1	28,9	20,4	16,5
	Min	6,6	7,9	10,4	12,7	16	21,9	24,9	25,3	22,3	17,5	9,5	5,7
1972	Max	22	26	27	31,5	36	39,4	44	42,5	38,6	32	28	19
	Min	1	3,4	6	9,4	11	16,5	20,8	20,5	15	13,3	6,5	1,4
1973	Max	22,5	27	29,5	35,2	39	41	44	43	41	34,5	28	22,3
	Min	2,2	1	8	9,2	15,1	17,8	20,4	20	15,8	10,3	8	0,5
1974	Max	19,4	20,9	21,1	24,9	33,8	36,7	39,6	39,4	34,7	27,9	23,4	17,5
	Min	4,5	6,9	9,1	13	20,1	33	27,1	27,4	21,5	14,3	10,8	6,1
1775	Max	18,2	21,6	24,7	25,6	30,1	25,7	40,2	39,2	35,8	30,2	22,3	16,5
	Min	5,2	7,9	10,7	13,1	17,4	22,3	27,4	36	21,6	19,6	8,9	6,3
1976	Max	15,6	19	21,7	25,1	30,2	36,2	39,4	38,9	32,7	28,6	23	20
	Min	4,2	7,4	9,6	12,5	17	33,4	22,7	25	20,7	16,6	9,2	7
1977	Max	19,8	22,4	25,6	28,4	31,5	36,6	40,5	36	34,7	27,9	24,4	19,3
	Min	6,6	8,9	11,3	15,9	17,1	22,4	24,7	25,5	22,4	15,1	9,9	8,8
1978	Max	18,7	23	25	28,8	31,1	36,6	42,3	38,5	36,1	28,3	21,4	27
	Min	7,4	11,1	11,7	14,5	17,2	21,7	27,6	25,3	22,4	16,5	8,7	2,8
1979	Max	19,2	22	23,9	28,1	32,9	36,4	40,7	41,2	34,3	27,1	22,4	19,6
	Min	8,8	10	11,1	16,2	19,9	21,9	27,4	27,4	22,2	16,1	10,8	5,6
1980	Max	21,2	26,2	34	33,5	37	43	44	43	39,5	35,5	28,8	22,4
	Min	1,4	6	5,6	10,8	11,4	17,2	26	22,2	16,6	8,4	4,6	-0,2
1981	Max	23,6	26,6	32,8	33	39	41,8	43	42	40,8	37	27	26,2
	Min	0,2	1,2	8,6	8,6	9,2	19,8	17,8	18,7	15,6	11	4,2	3,6
1982	Max	23,5	27,5	37,4	30,4	37	42	43,6	43,4	40,2	35,5	26	24
	Min	1,7	2	8,6	8,4	11	19	19	21,8	17,5	10,4	6,4	1,5
1983	Max	25	29	30,4	34	38	41	44,4	44	41,5	34	29,5	28,4
	Min	0,4	3,2	7	9	14,8	18	22,8	20,4	18,8	14	8,8	3
1984	Max	23,4	28	36,5	41	43	43,2	43	35	30,8	31	22,5	26
	Min	-2	6,4	12	19,5	20,6	23,2	18,4	10,4	17,5	6,2	7,2	1,2
1985	Max	22,5	30,8	29,4	33,3	36,2	44	43	44	39,4	-	32,2	19,1
	Min	-4	4	7	11	12,4	18,7	22,6	23,5	20,8	-	7,6	6,3
1986	Max	24	28,4	28,6	32,4	40,6	43	45	43	41	31,8	29	27
	Min	2	1	6	6	11,6	17	22,4	22,5	19,8	13,6	6	-2
1987	Max	25,6	31,4	33	38,2	39,6	42	45	44,6	41,7	34	28,3	25,8
	Min	-3	2,6	8,6	9,4	15,6	19,2	21	19,2	13	8,4	4,5	2
1988	Max	20,3	21,6	25,8	36,5	39	39,5	45	44,5	41,5	33,7	22,4	22,5
	Min	4,5	8	10,3	10	11	16,4	21	23,8	16,6	11,2	10,8	0
1989	Max	19,2	28,1	25,3	33,8	36,8	43,2	43,1	43	40,4	37,6	28,1	24,3
	Min	0,2	3,3	10,8	6,2	13,7	15,8	23	20,3	17	10,4	8	5,8
1990	Max	21,5	27,2	29,2	32,2	39,8	43,3	44,2	42,6	40,2	37	30,2	24,4
	Min	0,6	6,3	8	9,2	14,4	19,2	23,4	23,2	19,4	13	5	1,4
1991	Max	21	25	27,6	33,8	37	41,6	44,4	44,2	41,4	33,2	30,2	21,4
	Min	1	1,6	5,8	7,2	4	18	23,6	22,8	17	10,2	3,8	2,2
1992	Max	21	25,2	29,8	33,6	37,2	42	43,2	42,4	41,4	37,6	27,2	25,2
	Min	0,2	4	6,6	9	11	18	22	22,8	16,6	10,6	3,8	2,2
1993	Max	20,2	23	31,2	35	39	44	44	43	42	35,4	25,8	23,4
	Min	1,8	3	4	10	12	21,2	25,2	25,2	14,6	7,6	5,6	3
1994	Max	23,4	28	29,8	32,4	42,8	44	45	43	40,4	32,6	27,6	23,4
	Min	1	3,2	7	9,8	12	19,8	21,9	21,9	13,4	11,4	11,4	4,2
1995	Max	24	27,8	27,4	31,6	41,4	42,2	46,8	44,4	40	35	32,8	24
	Min	0,4	6,4	9,4	12	24	21	22,4	22,4	17	14,4	9,2	6
Moyenne	Max	21,92	25,71	28,94	32,14	36,67	40,3	43,06	42,07	38,39	32,85	26,46	22,79
	Min	2,1	5,02	8,28	10,32	14,24	19,93	22,85	22,61	17,98	12,32	7,21	3,11

Tableau 11., annexe 1 : Températures maximales et minimales absolues mensuelles (°C) au poste de Zagora (1964-1995).

Année		Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
1984	Max	21,2	23,9	25,3	27,2	29,9	38,9	40,6	41,2	35,5	30,2	24,5	19,6
	Min	10,3	11,8	12	12,3	14,6	17,6	22,7	21,3	16,3	14,1	12,02	9,4
1985	Max	16	16,7	20,07	28,2	28,9	36,5	40,8	39,5	34,3	27,2	22,2	11,2
	Min	8,6	8,9	9,8	14,01	15,6	17,04	22,2	19,9	17,2	15,7	13,3	11,2
1986	Max	21,1	25,2	25,5	27,4	29,5	32,7	41,5	42	38,2	28,3	26,3	11,2
	Min	11,02	12	12,8	13,02	14,5	17,03	21,6	21,9	18,2	15	13,6	11,2
1987	Max	17,5	18,7	22,5	26,8	30,7	32,5	42,1	41,2	38,9	27,9	24,9	22,2
	Min	8,03	8,96	0,1	13,2	15,2	16,2	21	20,7	19,03	14,2	12,5	10,5
1988	Max	19,4	20,2	23,8	13,9	34,2	39,2	42,5	42,9	39,6	25,8	25,2	23
	Min	10,2	10,1	12,5	13,9	22,5	27,9	32,9	33,5	19,1	13,5	13,2	12,2
1989	Max	22,2	23,5	23,8	26,5	28,9	37,2	42,2	41,2	0,35	28,6	26,02	21
	Min	10,8	12,1	12,4	12,7	13,35	17,5	22,7	21,6	17,5	14,2	13,03	10,5
1990	Max	16,5	0,19	23	26,8	24,5	32,5	41	41,2	38,7	27,8	25,4	22,03
	Min	8,2	9,5	12	13,5	15,2	15,4	21	20,5	20,3	15	12,7	10,9
1991	Max	21,96	23,57	23,74	26,2	28,93	36,66	41	40,9	34,63	27,96	25,46	20,93
	Min	10,67	12,25	12,8	12,7	14,41	18,03	22,93	21,64	17,8	14,35	13,63	10,77
1992	Max	16,9	18,34	22,16	6,73	30,64	32,63	41,22	40,29	38,9	27,67	24,76	21,54
	Min	7,96	9,37	11	13,86	15,51	16,42	21	20,51	19,26	14,03	12,46	10,9
1993	Max	15,93	16,78	20,06	28,23	28,19	36,1	40,93	39,32	33,4	26,2	21,76	20,9
	Min	7,7	8,17	9,8	16	15,93	19,7	22,25	19,9	16,53	15,6	22,1	10,87
Moyenne	Max	18,86	17,7	22,93	23,79	29,43	35,48	41,35	40,91	33,24	27,76	24,65	19,36
	Min	9,35	10,32	10,42	13,62	15,68	18,28	23,03	22,15	18,12	14,57	13,85	10,84

Tableau 12, annexe 1 : Températures maximales et minimales absolues mensuelles (°C) au poste de Fourn-Zguid (1984-1993).

Année		Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
1975	Max	-	-	-	-	-	31,6	39,2	37,6	34,1	30,3	25,4	18,1
	Min	-	-	-	-	-	7,6	12,4	11,2	8,7	8,6	-0,3	-1,2
1976	Max	16,7	17,6	20,1	20,2	29,8	36,8	36,7	39,6	31,6	25,9	22,6	18
	Min	-7,3	-0,1	0,3	0,9	4,2	9,6	10,2	13,9	9,7	8,9	3,3	0,3
1977	Max	18,6	21,1	25,4	28,4	30,9	30,4	41,2	36,1	33,7	27,2	24,8	19,8
	Min	-0,5	0,3	3,2	6,1	2,3	2,6	6,4	11,7	10,2	3,7	1,2	-1,2
1978	Max	13,6	19,8	20,6	29,5	32,7	37,5	36,4	35,5	28,2	23,4	23,4	26,8
	Min	2,4	2,4	4,9	3,2	7,1	11,4	-	16	15	7,6	2	-2,2
1979	Max	23,8	27,6	25,2	30	30,8	34	38,4	37,5	36,3	30,2	25,2	21,4
	Min	-0,7	-0,8	-2,7	1,3	7,2	11,8	13,4	15	10	7	0,05	-4,8
1980	Max	19,4	22	29,6	29	31,6	37,4	38,3	37,8	34	29,7	23,8	22,6
	Min	-3,8	1,4	0,8	5,5	5	9,4	14,5	15,8	10	5	1,5	-3,3
1981	Max	22,6	22	28,2	27,4	32,8	35	37,2	35	35,3	31	22,4	24
	Min	-4,8	0,1	2,8	4	4,2	12,5	12	12	10,4	7	0	-1,2
1982	Max	22	24,2	24,3	24	31,6	36,2	36,3	37,6	34,6	30,2	23	22
	Min	-3,8	-3,6	3,2	2,3	5,8	14,4	12,2	10,8	10,7	4,2	0,2	-3,7
1983	Max	20,3	24,2	25,8	29,4	30	35	38,2	38,2	35,6	29,5	25,7	22,3
	Min	-4,8	-2,8	1,4	3,2	7	11,5	13,3	13,7	13	8	3,8	-2
1984	Max	23	25,2	26,8	29,8	28,8	36	37,2	37,2	34,6	30,6	22,2	20
	Min	-3,2	-0,3	0,2	6,5	4,6	9,5	17,2	12,2	11	8	1,8	-2
1985	Max	18,2	24,8	25,3	28,2	30,6	36,5	37,1	37,6	34	29,2	28	20,4
	Min	-2,8	1	4	4,6	7,8	11,5	14,2	16,5	13	8,2	4	-2
1986	Max	20,6	23,8	24,2	25,2	33,4	35,4	38,6	36,3	35	27	23,2	22,1
	Min	-2	-2	2,4	2,3	8,4	10,2	15,8	14,8	13,4	7	2	-5,1
1987	Max	22,2	26	27,6	30,4	33	35	37,8	37,9	36,4	26,8	23,8	20,3
	Min	-5,3	0	4,1	5,5	9,4	11,3	14,2	12,2	11,8	8	1	-1,4
1988	Max	21,6	21,5	26,8	30,2	31,8	33	38,6	37,6	35,2	29	22	20,2
	Min	-1	-1,2	2,7	3,5	6,2	10,8	15	16,3	12,9	6	1,2	-2,5
1989	Max	14,4	24,5	24,2	28,3	30,2	36,4	36,8	36	34,2	29,5	23,8	20,5
	Min	-14,2	-1,3	1	2,4	8,6	10	15,5	14,8	11,2	8,6	2	0,5
1990	Max	19,5	24,1	25,4	26,2	33,6	37,3	37,9	37,7	33,8	30,4	26,8	21,2
	Min	-2,8	1,2	3,2	2	9,2	12,1	15,4	15,4	10,6	7,2	0	-3
1991	Max	18,5	21,4	24,5	29,3	31,3	35,2	37	38,8	35	27,5	25,5	18,1
	Min	-4	-6,3	0,4	4,2	7,9	11,8	16,1	18,6	12	5,6	-0,2	-2
1992	Max	16,5	19,4	22,5	28,2	30,5	36	37,3	36,3	35,1	30,2	23,8	32,4
	Min	-3	-0,2	0,5	4	8,6	9,8	14,6	12,1	11,2	5,8	-1,3	-1,1
1993	Max	18,5	17,1	26	26,4	32,7	37,5	38	38	34	30,6	20,3	22
	Min	-5,6	-0,3	0,6	4,1	4,9	13,4	15,9	13,6	8,8	3,8	1,3	-1,8
1994	Max	21	22	24,5	29	35,4	38	38,4	36,8	35,7	28,2	25,5	21
	Min	-3,2	-0,6	3	4	7	11	16,5	17,5	9,4	8,2	2,5	-1,5
1995	Max	22,4	23	22,8	25,7	35	34,9	37,8	37,8	34,7	28,8	26	22
	Min	-3	-0,7	1,5	4,5	11	11,6	14,4	11,2	11,2	8,3	0,6	-1,5
1996	Max	25,5	25,7	26,4	29	31,7	36,2	38,7	37,5	32,8	30,5	24,2	20,7
	Min	0,4	0,2	0,6	5,5	7	13,2	17,4	15	9,2	7	0,5	-2,5
Moyenne	Max	19,95	22,71	25	27,8	31,81	25,51	37,87	37,3	34,27	28,89	24,15	21,62
	Min	-3,46	-0,6	1,81	3,79	6,82	10,77	14,12	14,1	11,06	6,89	1,23	-2,05

Tableau 13, annexe 1 : Températures maximales et minimales absolues mensuelles (°C) au poste d'Assaka (Taznakht) (1975-1996).

ANNEXE 2



Gisements	Surface couverte (m ²)	Tonnage sur place
Méchoui	3 000	40 500
El gir (amiante)	4 565	28 800
Mokhazni	960	5 180
Bouofrokh (amiante)	394	2 125
Figuier	272	1 069
Tarouni	7 050	73 700
Tizi	5 000	33 750
Filon 2	2 310	17 170
Puits III	3 750	50 625
Bou-Azzer Est	14 000	142 425
Aghbar	9 639	93 329
Bouismas	13 500	126 900
Oumlil	3 250	26 200
Tamdrost	11 270	193 890
Ambed I	160	864
Ambed II	120	648
Ambed III	200	810
Ightem	5 600	85 260
Agoudal (chromite)	9 000	24 300
Filon 51	320	1 800
Filon 52	1 300	26 082
Filon 53 Est	800	10 800
Filon 53 W	250	1 456
Filon 61	580	9 712
Total	97 290	997 395

Tableau 22, annexe 2 : Bilan global des stériles de mines.

Gisements	Surface couverte (m ²)	Tonnage sur place
Tarouni	2 712	25 120
Tizi	600	1 860
Filon 2	1 400	8 140
Puits III	8 000	52 800
Bou-Azzer Est	9 400	32 425
Aghbar	1 000	2 200
Tamdrost	106	234
Ightem	100	300
Total	23 318	123 079

Tableau 23, annexe 2 : Bilan global des rejets Hancock.

Digues	Surface couverte (m ²)	Tonnage sur place
I	30 000	510 000
II	30 980	115 875
III et IV	19 800	229 500
V	3 600	39 100
VI	1 400	6 800
VII	4 000	17 000
VIII (opérationnelle)	7 500	25 950
IX (digue argent)	31 697	151 283
X (digue CMBA)	7 000	35 400
XI (arséniate de Fer)	9 710	5 632
digue de cuivre	8 400	30 303
Total	154 087	1 166 843

Tableau 24, annexe 2 : Bilan global des haldes de mines.

Gisements	As (%)	Co (%)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Cr (%)	Mo (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)
Méchoui	0,67	0,12	141	32	< 0,03	0,009	0,02	64	150
Elgir	0,11	0,03	764	70	< 0,03	0,15	< 0,01	92	30
Bouofroh	0,17	0,05	1 276	38	< 0,03	0,12	< 0,01	230	80
Moghazni	0,21	0,03	890	49	< 0,03	0,06	0,01	57	260
Figuier	0,03	0,005	457	29	< 0,03	0,06	< 0,01	41	230
Tarouni	0,73	0,03	129	15	< 0,03	0,01	< 0,01	131	70
Tizi	0,44	0,01	49	15	< 0,03	0,01	0,01	186	310
Filon II	0,34	0,18	826	29	< 0,03	0,08	0,04	96	980
Puits III	0,4	0,078	162	10	< 0,03	0,01	0,03	65	250
Bou-Azzer Est	0,34	0,11	527	17	< 0,03	0,09	0,01	110	160
Aghbar	1,14	0,11	1 269	37	< 0,03	0,08	0,01	95	460
Tamdroust	0,74	0,04	228	12	< 0,03	0,001	0,02	364	70
Oumlil	2,93	0,56	739	14	< 0,03	0,02	0,03	364	1 090
Ambed I	7,31	1,76	7 960	53	< 0,03	0,3	0,09	118	680
Ambed II	1,09	0,76	2 552	61	< 0,03	0,12	< 0,01	283	370
Ambed III	2,71	1,36	8 800	36	< 0,03	0,2	0,01	95	2 280
Bouismas	0,59	0,09	330	39	< 0,03	0,01	0,05	1 066	810
Ightem	0,19	0,03	972	29	< 0,03	0,09	0,02	108	820
Agoudal	0,63	0,4	1 425	42	< 0,03	0,2	0,08	153	60
F 51	2,83	0,25	17 650	38	< 0,03	0,14	< 0,01	418	690
F 52	15,93	2,48	22 000	471	< 0,03	0,05	< 0,01	2 375	1 260
F 53 Est	12,86	1,5	3 166	80	< 0,03	0,14	0,01	817	50
F 53 Ouest	2,32	1,5	1 088	54	< 1	-	0,02	286	175
F 61	0,07	0,06	183	105	< 1	-	< 0,01	901	112

Tableau 26, annexe 2 : Teneurs moyennes en arsenic et éléments associés des stériles de mines.

Gisements	As (%)	Co (%)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Cr (%)	Mo (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)
Puits III	0,76	0,16	395	47	< 1	-	0,1	925	285
Bou-Azzer Est	< 0,01	0,07	335	44	< 1	-	0,09	172	482
Tamdroust	0,05	0,14	337	45	< 1	-	0,11	250	603
Tizi	0,14	0,17	291	13	< 1	-	0,04	180	202
Aghbar	0,11	0,12	520	53	< 1	-	0,06	74	547
Tarouni	0,05	0,17	310	34	< 1	-	0,1	364	1 041
Filon II	0,14	0,2	517	53	< 1	-	0,07	105	365
Ightem	5,7	1,43	29 700	75	< 1	-	0,66	302	2 293

Tableau 27, annexe 2 : Teneurs moyennes en arsenic et éléments associés des rejets Hancock.

Références	Nature	As (%)	Co (%)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Cr (%)	Mo (%)	Cu (ppm)
Digue I	Co	2,79	0,38	566	77,5	1,5	0,14	0,11	519,5
Digue II	Co	2,1	0,33	751,5	54,5	1	0,14	0,1	521
Digue III	Co	1,14	0,23	429	64	1,5	0,09	0,06	458
Digue IV	Co	1,17	0,16	502,5	39	< 1	0,08	0,08	815
Digue V	Co	1,99	0,43	677	56	-	0,07	0,08	485,5
Digue VI	Co	1,81	0,35	811,5	52	-	0,1	0,09	707
Digue VII	Co	1,83	0,3	3 374,5	47	-	0,07	0,12	541
Digue VIII	Co	1,65	0,27	563,25	43,75	-	0,06	0,11	288
Digue IX	Ag	2,02	0,26	793,5	30,5	1	0,05	0,15	477,5
Digue X	CMBA	0,72	0,1	319,5	24,5	-	0,11	0,12	372
Digue XI	Arséniate de fer	7,9	0,18	209	41	1	0,02	0,09	1 239
Digue XII	Cu	0,14	0,03	178,7	20,7	-	0,01	0,03	3 000

Tableau 28, annexe 2 : Teneurs moyennes en arsenic et éléments associés des haldes de mines.

Gisements	Tonnage sur place	As	Ni	Pb	Cr	Co	Mo	Zn	Cu
Méchoui	40 500	271	6	1	4	50	8	3	6
Elgir	28 800	32	22	2	45	9	0,014	3	1
Bouofrokh	2 125	4	3	0,07	3	1	0,019	0,49	0,17
Mokhazni	5 180	11	5	0,25	3	2	1	0,29	1
Figuier	1 069	0,32	0,5	0,031	1	0,05	1	0,043	0,24
Tarouni	73700	538	9	1,1	8	25	6,63	10	5
Tizi	33 750	148	2	0,05	2	5	4	6	10
filon 2	17 170	58	14	0,49	14	31	7	2	17
Puits III	50 625	205	8	0,5	5	40	15	3	13
Bou-Azzer Est	142 425	484	75	2,42	128	158	14	16	23
Aghbar	93 329	1 064	118	3,45	77	104	9	9	43
Tamdrost	193 890	1 435	44	2,32	13	72	39	71	14
Oumlil	26 200	768	19	0,36	7	147	8	3	29
Ambed I	864	63	7	0,045	3	15	1	0,1	0,58
Ambed II	648	7	2	0,039	1	5	0,06	0,18	0,24
Ambed III	810	22	7	0,029	2	11	0,081	0,076	2
Bouismas	126 900	749	52	4,94	21	118	63	135	103
Ighthem	85 260	162	83	2,47	78	28	17	9	70
Agoudal	24 300	153	25	1,02	49	90	19	4	1
F.51	1 456	41,2	257	0,055	2	4	0,13	0,6	1
F.52	1 800	287	40	0,84	1	45	0,16	4	2
F.53 Est	10 800	1 388	34	0,86	16	162	1	9	0,54
F.53 W	26 082	605	28	1,4	-	393	5	7	5
F.61	9 712	7	2	1	-	6	1	9	1
Total	997 395	8 503	862	27	483	1 521	220	305	349

Tableau 32, annexe 2 : Stock de polluants minéraux disséminés dans les stériles de mines (en tonnes).

Gisements	Tonnage sur place	As	Ni	Co	Mo	Zn	Cu	Pb
Puits III	52 800	401	21	85	51	49	15	2
Bou-Azzer Est	32 425	3	11	53	29	6	16	1
Tamdrost	234	0,1	1	0,32	0,25	0,05	0,14	0,01
Tizi	1 860	3	0,54	3	0,74	0,33	0,37	0,02
Aghbar	2 200	3	1	3	1	0,16	1	0,11
Tarouni	25 120	13	8	43	25	9	26	1
F.II	8 140	11	4	16	3	1	3	0,43
Ightem	300	17	9	4	2	0,1	1	0,02
Total	123 079	451	56	207	112	66	63	5

Tableau 33, annexe 2 : Stock de polluants minéraux disséminés dans les rejets Hancock (en tonnes).

Références	Tonnage sur place	As	Ni	Pb	Cd	Cr	Co	Mo	Zn	Cu
Digue I	510 000	14 229	289	39,52	0,87	688	1 938	561	87	265
Digue II	115 875	2 433	87	6,31	0,12	156	377	116	16	60
Digue III et IV	229 500	2 662	107	11,82	0,27	195	453	241	25	146
Digue V	39 100	778	26	2,19	0,035	27	168	63	4	19
Digue VI	6 800	123	6	0,35	0,006	7	23	6	1	5
Digue VII	17 000	311	57	0,8	0,016	0,001	50	20	2	9
Digue VIII	25 950	429	15	1,13	0,05	0,001	71	28	6	10
Digue IX (Ag)	151 283	3 056	120	4,61	0,15	0,006	393	227	80	68
Digue X (CMBA)	35 400	255	11	0,86	0,033	39	34	41	3	13
Arséniate de Fer	5 632	445	1,17	0,23	0,005	1,12	10	478	1	7
Digue de Cuivre	30 303	42	5,41	0,63	0,0009	3,3	8	6	2	91
Total	1 166 842	24 763	725	68	1,56	1 116	3 525	1 787	227	693

Tableau 34, annexe 2 : . Stock de polluants minéraux disséminés dans les haldes de mines (en tonnes).

ANNEXE 3



			As	Co	Ni	Se	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Mn	Fe	Bi	Mo
	Teneur totale	µg/l	77 500	8 500	5 670	5,7	< 20	130	4 520	50	200	2 920	4 400	20	53 800
Sortie laverie cobalt	Fraction soluble	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Forme particulaire	µg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Teneur totale	µg/l	42 900	460	430	14,3	< 20	< 70	80	< 20	100	90	1100	70	31 540
Sortie digue cobalt	Fraction soluble	µg/l	41 500	250	360	13,4	< 20	< 70	< 50	< 20	< 50	30	0	0	27 300
	Forme particulaire	µg/l	1 400	210	70	0,9	< 20	< 70	< 50	< 20	< 50	60	1100	70	4 240
	Teneur totale	µg/l	73 720	11 300	1 440	4,1	< 20	80	< 50	60	340	600	1 000	64	67 500
Sortie digue C.M.B.A	Fraction soluble	µg/l	71 280	11 300	1 370	3,8	< 20	80	< 50	20	270	590	100	0	65 000
	Forme particulaire	µg/l	2 440	0	70	0,3	< 20	0	<50	40	70	10	900	64	2 500

Tableau 36, annexe 3 : Teneurs en polluants minéraux sous formes totale, soluble (< 0,45 µm) et particulaire des eaux usées de la mine.

			As	Co	Ni	Se	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Mn	Fe	Bi	Mo
	Forme totale (1)	kg/an	317	3,4	3,2	0,105	-	< 0,5	0,6	< 0,15	7,4	0,7	8,13	0,5	233
Digue cobalt N° VIII	Fraction soluble (2)	kg/an	307	1,8	2,7	0,09	-	< 0,5	< 0,3	< 0,15	< 0,36	0,22	0	0	202
	Forme particulaire (3)	kg/an	10	1,6	0,5	0,001	-	< 0,5	< 0,3	< 0,15	< 0,36	0,48	8,13	0,5	31
	Forme totale (4)	kg/an	405	62	7,92	0,022	-	0,43	< 0,3	0,33	1,87	3,3	5,5	0,35	371
Digue CMBA N° X	fraction soluble (5)	kg/an	392	62	7,53	0,02	-	0,43	< 0,3	0,1	1,48	3,24	0,55	0	357
	Forme particulaire (6)	kg/an	13	0	0,39	0,002	-	0	< 0,3	0,23	0,39	0,06	4,95	0,35	14
	Forme totale (7)	kg/an	35	0,38	0,35	0,012	-	-	0,07	-	0,08	0,07	0,9	0,05	26
Digues Co, Cu, Ag,	Fraction soluble (8)	kg/an	34	0,21	0,3	0,01	-	-	-	-	-	0,02	0	0	22,4
arséniates de fer	Forme particulaire (9)	kg/an	1	0,17	0,05	0,002	-	-	-	-	-	0,05	0,9	0,05	3,6
(1) +(4) + (7)	Forme totale	kg/an	758	66	11,47	0,14	-	-	-	-	9,35	4	14,53	0,9	630
(2) +(5) + (8)	Fraction soluble	kg/an	733	64	10,46	0,12	-	-	-	-	-	3,48	0,55	0	581,4
(3) +(6) + (9)	Forme particulaire	kg/an	24	2	0,77	0,02	-	-	-	-	-	0,59	13,98	0,9	48,6

Tableau 38, annexe 3 : Bilan global annuel approximatif des polluants minéraux (en kg/an) susceptibles d'être libérés par les haldes de mines de Bou-Azzer.

		As	Co	Ni	Se	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Mn	Fe	Bi	Mo
Teneur totale	µg/l	2 980	170	< 50	4,64	< 20	< 70	< 50	< 30	350	34	100	10	1 300
Fraction soluble	µg/l	2 890	130	< 50	4,49	< 20	< 70	< 50	< 20	160	21	< 10	10	1 300
Forme particulaire	µg/l	90	40	< 50	0,15	< 20	< 70	< 50	-	190	13	< 90	0	0

Tableau 39, annexe 3 : Teneurs en polluants minéraux des eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui, à 4 km en aval du centre minier de Bou-Azzer.

		As	Co	Ni	Cd	Pb	CN ⁻	Cu	Fe	Na	Ca	Mg	Al	K	Cl	SO ₄ ²⁻	F ⁻
Sortie barrage	µg/l	100	100	310	1	10	50	10	380	103 000	140 000	66 200	40	6 000	215 000	295 000	200
Zaouit Sidi Blal	µg/l	100	80	110	0,8	40	2	10	80	67 200	250 000	105 000	30	20 800	89 000	420 000	100
Amazzer	µg/l	80	30	7	1	40	8	6	240	36 600	83 400	52 500	30	7 600	42 000	225 000	170
Ait Aissa	µg/l	90	44	20	0,8	50	1	8	90	44 600	93 000	57 400	30	8 600	51 000	265 000	140
Ait M'rabt	µg/l	80	56	20	0,6	60	7	8	670	44 400	103 000	67 100	40	8 600	68 000	315 000	120
Tasstift	µg/l	70	50	10	0,5	70	4	6	360	62 800	85 000	82 700	60	11 200	80 000	355 000	120

Tableau 45, annexe 3 : Teneurs en polluants minéraux des eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements d'Octobre 1995).

Sites			As	Co	Ni	Se	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe	F ⁻	CN ⁻
Zaouit Sidi Blal	Teneur totale	µg/l	121	60	-	-	-	< 70	-	< 50	< 20	-	-
	Fraction soluble	µg/l	91,2	50	-	-	-	< 70	-	< 50	< 20	-	-
	Forme particulaire	µg/l	29,8	10	-	-	-	< 70	-	< 50	< 20	-	-
Amazzer	Teneur totale	µg/l	54,8	< 50	-	-	-	< 70	-	< 50	60	-	-
	Fraction soluble	µg/l	50,3	< 50	-	-	-	< 70	-		< 20	-	-
	Forme particulaire	µg/l	4,5	< 50	-	-	-	< 70	-	-	-	-	-
Ait Aissa	Teneur totale	µg/l	87,8	< 50	-	15	-	< 70	-	< 50	60	-	-
	Fraction soluble	µg/l	80,5	10	-	5,6	-	< 70	-	< 50	< 20	-	-
	Forme particulaire	µg/l	7,3		-	9,4	-	< 70	-	< 50		-	-
Ait M'rabt	Teneur totale	µg/l	90,3	10	-		-	< 70	-	< 50	120	-	-
	Fraction soluble	µg/l	66,5	10	-		-	< 70	-	< 50	< 20	-	-
	Forme particulaire	µg/l	23,8	0	-		-	< 70	-	< 50		-	-
Tasstift	Teneur totale	µg/l	67,6	10	-		-	< 70	-	-	-	-	-
	Fraction soluble	µg/l	66,5	10	-		-	< 70	-	< 50	< 20	-	-
	Forme particulaire	µg/l	1,1	0	-		-	< 70	-	-	-	-	-
Foum-Eloued	Teneur totale	µg/l	9,4	10	-	-	-	< 70	-	-	-	-	-
	Fraction soluble	µg/l	8,5	10	-	14,6	-		-	< 50	-	-	-
	Forme particulaire	µg/l	0,9	0	-	-	-		-	-	-	-	-
Alougoum	Teneur totale	µg/l	42	50	< 20	23	< 20	< 70	50	100	-	200	20
	Fraction soluble	µg/l	38	35	< 20	18	< 20	< 70	20	20	-	200	20
	Forme particulaire	µg/l	4	15	< 20	5	< 20	< 70	30	80	-	0	0
Foum-Zguid	Teneur totale	µg/l	34	10	< 20	22	< 20	90	300	140	-	280	50
	Fraction soluble	µg/l	19	10	< 20	21	< 20	< 80	< 20	70	-	-	50
	Forme particulaire	µg/l	15	0	< 20	1	< 20	-	-	70	-	-	0

Tableau 46, annexe 3 : Teneurs moyennes en polluants minéraux des eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements Juin 1997) .

			As	Co	Ni	Se	Cd	Pb	Cu	Zn	F ⁻	CN ⁻
Zaouit Sidi Blal	Teneur totale	µg/l	7,7	20	-	-	-	< 70	-	190	-	-
	Fraction soluble	µg/l	4,7	20	-	-	-	< 70	-	190	-	-
	Forme particulaire	µg/l	3	0	-	-	-	< 70	-	0	-	-
Amazzer	Teneur totale	µg/l	12,2	10	-	14,1	-	< 70	-	-	-	-
	Fraction soluble	µg/l	12,1	10	-	11,7	-	< 70	-	-	-	-
	Forme particulaire	µg/l	0,1	0	-	2,4	-	< 70	-	-	-	-
Ait M'rabt	Teneur totale	µg/l	8,2	-	-	11,5	-	< 70	-	< 50	-	-
	Fraction soluble	µg/l	7,6	-	-	9,05	-	< 70	-	< 50	-	-
	Forme particulaire	µg/l	0,6	-	-	2,45	-	< 70	-	< 50	-	-
Tasstift	Teneur totale	µg/l	8,8	20	-	9,6	-	< 70	-	-	-	-
	Fraction soluble	µg/l	8,1	20	-	9,2	-	< 70	-	-	-	-
	Forme particulaire	µg/l	0,7	0	-	0,4	-	< 70	-	-	-	-
Alougoum	Teneur totale	µg/l	44	10	< 20	21	< 20	30	10	35	260	40
	Fraction soluble	µg/l	29	10	< 20	19	< 20	20	10	10	240	0
	Forme particulaire	µg/l	15	0	< 20	2	< 20	10	0	25	20	40
Foum-Zguid	Teneur totale	µg/l	32	20	< 20	29	< 20	30	< 20	60	330	20
	Fraction soluble	µg/l	22	10	< 20	26	< 20	20	< 20	20	330	10
	Forme particulaire	µg/l	10	10	< 20	3	< 20	10	< 20	40	0	10
Taloust	Teneur totale	µg/l	35	< 50	< 20	18	< 20	55	< 20	30	290	20
	Fraction soluble	µg/l	22	< 50	< 20	18	< 20	45	10	20	280	0
	Forme particulaire	µg/l	13	< 50	< 20	0	< 20	10	-	10	10	20
Tagragra	Teneur totale	µg/l	35	35	< 20	14	< 0,20	55	47	30	230	0
	Fraction soluble	µg/l	25	20	< 20	13	< 0,20	50	< 20	30	25	0
	Forme particulaire	µg/l	10	10	< 20	1	< 0,2	5	-	0	205	0
Talamine	Teneur totale	µg/l	35	10	< 20	18	< 0,20	20	33	35	280	0
	Fraction soluble	µg/l	30	10	< 20	16	< 0,20	20	24	20	280	0
	Forme particulaire	µg/l	5	0	< 20	2	< 0,20	0	9	15	0	0
Tiddiline	Teneur totale	µg/l	52	20	< 20	13	< 0,20	95	55	350	140	0
	Fraction soluble	µg/l	47	10	< 20	11	< 0,20	30	< 20	220	140	0
	Forme particulaire	µg/l	7	10	< 20	2	< 0,20	65	-	30	0	0
Figuier	Teneur totale	µg/l	40	30	< 20	35	< 0,20	40	43	20	210	50
	Fraction soluble	µg/l	40	20	< 20	26	< 0,20	< 70	28	20	180	20
	Forme particulaire	µg/l	0	10	< 20	9	< 0,20	-	15	0	30	30

Tableaux 52, annexe 3 : Teneurs moyennes en polluants minéraux des eaux souterraines destinées à la consommation humaine.

ANNEXE 4

***DESCRIPTION DES PROFILS
A L'ETAT HUMIDE***

Profils exposés aux risques potentiels de pollution d'origine minière (P1 à P8)

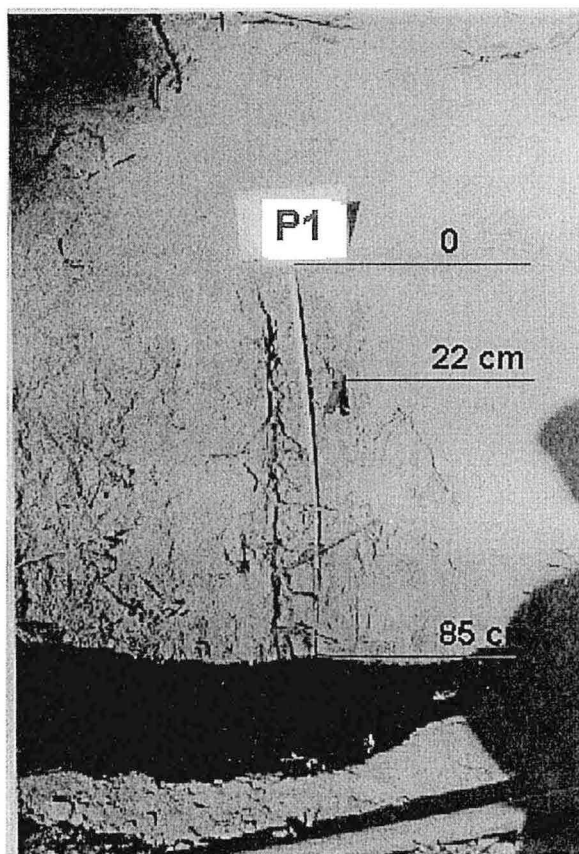


Fig 44: Profil 1 échantillonné dans la parcelle dite Bikchban au nom de Mr Ait HADDOU, situé à 54 m de l'angle N 90 de la maison de Mr KOUBAILI HAMMOU et à 7 km en aval de la mine de Bou-Azzer.

Secteur : Zaouit Sidi Blal, zone Ouest : X = 348,2 Y = 388, altitude 1115 m, nombre d'horizon 2.
Parcelle abandonnée à cause des effluents générés par l'activité minière de Bou-Azzer.

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 22 cm	157	52	51	2,5	34	< 40	40	36	50	267	14 900	231	123	9,6	130	20	20,9
22 - 85 cm	36	14	54	3	20	< 40	43	22	35	348	18 000	-	65,3	3,9	140	28	27,5

Tableau 60, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en As, Co, Ni, Pb, Cu et Zn d'origine anthropique dans l'horizon labouré, horizon 0 - 22 cm contaminé par l'As.

Fig 44 : Profil 1 situé à 4 m du lit majeur de l'oued Alougoum, reposant sur des alluvions, pente 2 à 4 %, vallée rectiligne, terrasses, micro-relief uni, érosion en nappe, apports d'alluvions avec efflorescence saline dus au dépôt de la calcite utilisée en amont par la société pour neutraliser les effluents générés par les unités de traitement de cobalt. Cultures en banquettes, drainage externe et interne bon, présence d'horizon limitant, irrigation traditionnelle (gravitaire par seguia). La végétation dominante est le palmier dattier.

Horizon (0 - 22 cm) :

Couleur (7.5 YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, Structure polyédrique fine à moyenne, sec, présence de graviers et d'éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches diffus de 5 à 15 % sous forme de nodules friables, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité importante, peu cimenté, peu plastique, présence de cavité, activité biologique moyenne, labouré, racines moyennes, transition graduelle.

Horizon (22 - 85 cm) :

couleur (7.5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse structure polyédrique fine à moyenne, sec, graviers et éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches en amas et diffus de 5 à 15 %, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, poreux, peu plastique, activité biologique faible, racines nombreuses, transition graduelle.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol profond sans contraintes agronomiques

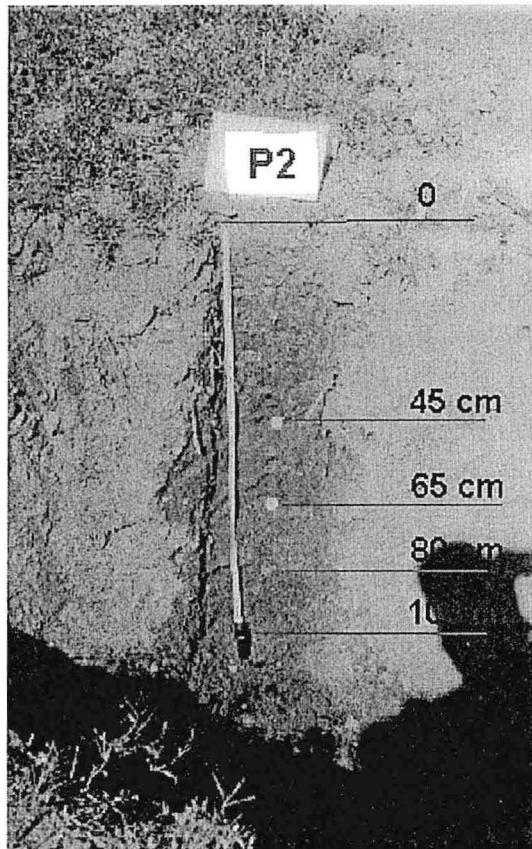


Fig 45 : Profil 2 échantillonné dans la parcelle dite Boutaloust au nom de Mr BAHALI Mohamed, situé à 27 m de l'angle Nord de sa maison et à 12 km en aval de la mine de Bou-Azzer.

Secteur : Amazzer, X = 350,7 Y = 384,4 Altitude 1075 m, nombre d'horizon 4.
Parcelle en jachère avec quelques palmiers dattiers.

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 45 cm	114	28	23	2,2	18	< 40	48	52	32	367	17 400	207	49,8	16,8	104	29,4	31,4
45 - 65 cm	20	16	27	4	24	< 40	44	27	32	298	19 600	-	90	7,9	80,1	22,4	25,7
65 - 80 cm	35	16	34	3	22	< 40	48	34	42	379	22 200	-	106,8	5	107	25,5	29
80 - 100 cm	27	13	36	4	12	< 40	48	24	24	429	21 400	-	38,3	6	47	20,7	35,8

Tableau 61, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en As, Co et Cu d'origine anthropique dans l'horizon labouré, horizon 0- 45 cm contaminé par l'As.

Fig 45 : Profil 2 situé sur des alluvions de l'oued Alougoum, pente 2 à 4 %, vallée rectiligne, terrasses, micro-relief uni, érosion en nappe, apports d'alluvions et colluvions, efflorescence saline visible en surface, présence de débris végétaux, surface caillouteuse, présence de graviers, drainage externe et interne bon, présence d'horizons limitant, amélioration existantes : irrigation traditionnelle ; gravitaire par seguia.

Horizon (0 - 45 cm) :

Couleur (7.5 YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique moyenne, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches diffuses inférieures à 2 %, fente inférieures à 0, 2 cm avec écartement de 5 à 10 cm, vides très importants, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, activité biologique moyenne, labouré, racines moyennes, transition graduelle et régulière.

Horizon (45 - 65 cm) :

Couleur (7.5 YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limoneuse, vive effervescence, présence d'éléments grossiers inférieurs à 2 % et des taches diffus, structure polyédrique moyenne, vides très importants, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable, fragile, présence de trace d'activité biologique moyenne, quelques racines moyennes, transition graduelle et régulière.

Horizon (65 - 80 cm) :

Couleur (7.5 YR 3/4) brun rouge foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure polyédrique moyenne, éléments grossiers de 15 à 30 %, graviers, taches diffus de 2 à 5 %, humide, granules et nodules friables, macroporité importante, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable, fragile, pas de racines, activité biologique faible, transition très nette et régulière.

Horizon (80 - 100 cm) :

Couleur (7.5 YR 3/4) brun rouge foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure massive, éléments grossiers de 15 à 30 %, graviers, humide, vides importants, peu poreux, induré, non plastique, peu friable, pas de racines, activité biologique faible, transition très nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial et colluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond (> 80 cm) sans contraintes agronomiques.

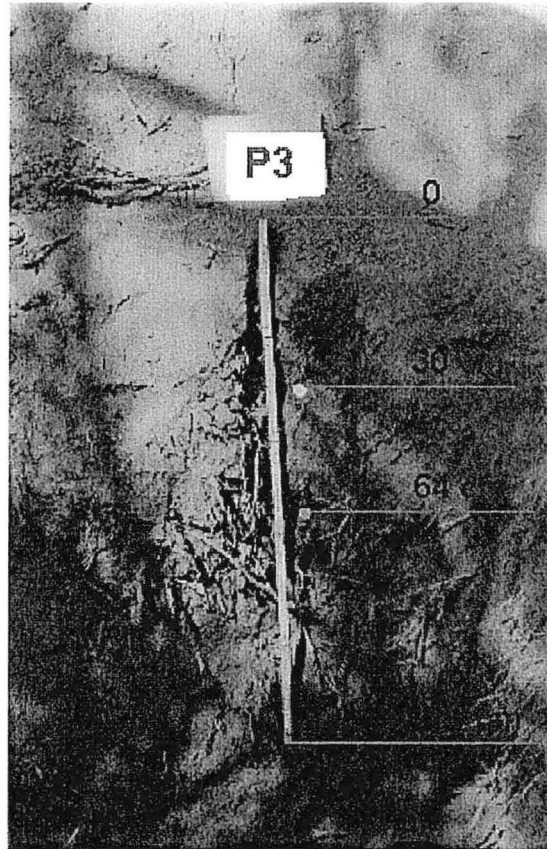


Fig 46 : Profil 3 échantillonné dans la parcelle dite Agdal au nom de Mr Ait BAKKA Mohamed Ben Lahcen, situé à 114 m de l'angle Nord de la maison de Mr Ait BIH Mohamed et 16 km en aval de la mine de Bou-Azzer.

Secteur : Ait Aissa, X = 352,8 Y = 383,2 Altitude 1020 m, nombre d'horizon 3.
 Palmier dattier très dense, horizons très fortement colonisés par les racines du palmier dattier.

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 30 cm	71	34	26	2	21	< 40	42	30	47	402	14 800	172	41,5	4,3	49,8	32,5	46,5
30 - 64 cm	79	16	26	3	12	< 40	48	23	30	409	17 100	-	53,3	4,7	60,2	33,5	39,6
64 - 100 cm	38	14	28	3	12	< 40	51	22	18	386	18 800	-	34,8	4,3	39	33,1	49,3

Tableau 62, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en As, Co, Pb et Zn d'origine anthropique dans l'horizon labouré, horizons 0 - 30 cm et 30 - 64 cm contaminés par l'As.

Fig 46 : Profil 3 situé sur des alluvions récents, vallée rectiligne, terrasses, pente de 2 à 4 %, présence de débris végétaux, drainage interne et externe bon, efflorescence saline, présence d'horizon limitant, sableux en profondeur, irrigation traditionnelle qui se fait par seguia.

Horizon (0 - 30 cm) :

Couleur (5 YR 4/3) brun rougeâtre, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique subangulaire moyenne généralisée, sans éléments grossiers, taches inférieures à 2 % sous forme de nodules, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, globalement poreux, peu cimenté, peu plastique, humide, friable et fragile, quelques racines fines, labouré, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon (30 - 64 cm) :

Couleur (5 YR 4/3) brun rougeâtre, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique subangulaire moyenne généralisée, taches diffus, nodules, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, sans éléments grossiers, macroporosité importante, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable, fragile, activité biologique moyenne, beaucoup de racines fines à moyennes, limite rectiligne et brutale avec l'horizon sous-jacent.

Horizon (64 - 100 cm) :

Couleur (5 YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture sableuse, effervescent, structure grumeleuse fine généralisée, présence de graviers, taches diffus, vides très importants, très poreux, très friables, très fragiles, quelques racines, activité biologique forte, transition très nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique: Sol très profond avec un horizon textural limitant (sableux).

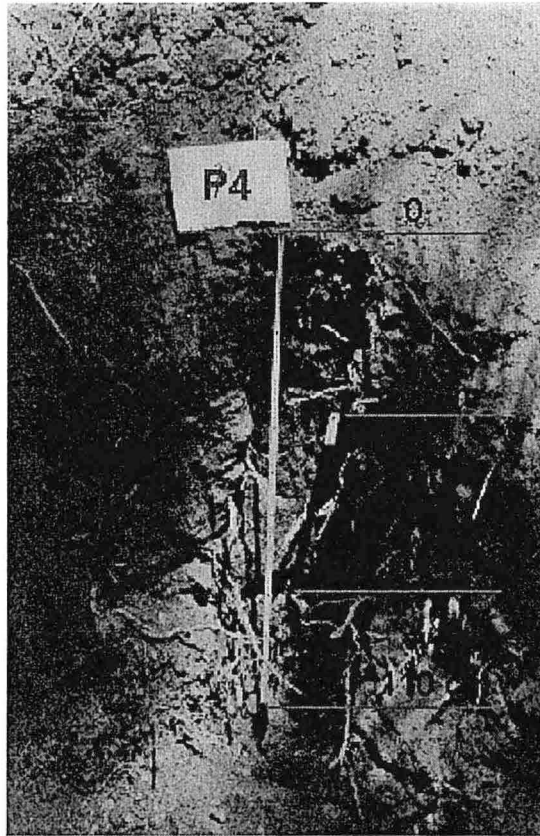


Fig 47 : Profil 4 échantillonné dans la parcelle dite Boulagrara au nom de Mr IKHZAMEN Hamd, situé à 67 m de l'angle Nord de la maison de Mr Haj Ali Oulmous et 18 km en aval de la mine de Bou-Azzer.

Secteur : Ait M'rabt, X = 354,3 Y = 379,6 Altitude 974 m, nombre d'horizon 3.
 Palmier dattier en haute densité, profil fortement colonisé par les racines du dattier.

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 35 cm	66	25	21	2,5	18	< 40	40	23	67	413	16 300	241	70,3	3,7	87,5	33,4	46,9
35 - 80 cm	42	10	25	4	10	< 40	33	24	25	398	14 500	-	91,3	14	70,3	32,9	52,2
80 - 110 cm	33	15	22	4	18	< 40	32	20	25	242	16 500	-	72,8	03,8	60,5	25,4	30,2

Tableau 63, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en As, Co et Zn d'origine anthropique dans l'horizon labouré, horizons 0 - 35 cm contaminé par l'As.

Fig 47 : Profil 4 situé sur des alluvions récents, vallée de l'oued Alougoum, terrasses, pente 2 à 4 %, micro- relief uni, érosion en nappe, apports alluviaux, présence de débris végétaux, drainage interne et externe bon, irrigation traditionnelle ; gravitaire par segouia, efflorescence saline visible en surface.

Horizon (0 - 35 cm) :

Couleur (5Y 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique à polyédrique subangulaire fine généralisée, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches diffuses inférieures à 2 %, présence de fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants cohérents, poreux, peu cimenté, plastique, friable, peu fragile, labouré, activité biologique moyenne, racines fines, transition graduelle et régulière.

Horizon (35 - 80 cm) :

Couleur (5Y 3/3) brun rougeâtre foncé, texture sablo-limoneuse, vive effervescence, structure polyédrique à polyédrique angulaire fine généralisée, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches inférieures à 2 %, présence de fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants cohérent, poreux, peu cimenté, plastique, friable et peu fragile, labouré, beaucoup de racines moyennes, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon (80 - 110 cm) :

Couleur (5Y 4/5) rouge jaunâtre, vive effervescence, texture sableuse structure grenue fine généralisée, présence d'éléments grossiers de 2 à 15 %, des graviers, des cailloux, des blocs, taches de 2 à 5 %, nodules friables, vides très importants meuble, très poreux, non cimenté, peu plastique, très fragile et très friable, grosses racines, transition très nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond ne présentant pas de contraintes agronomiques.

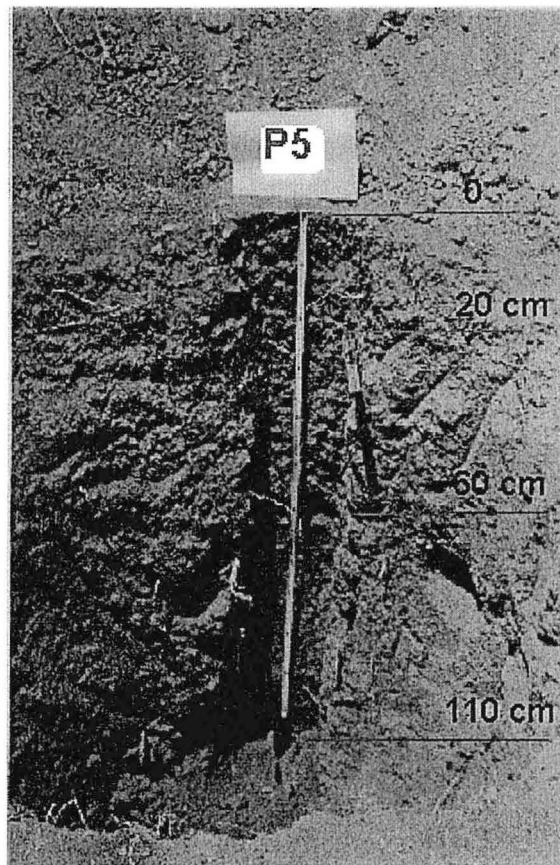


Fig 48 : Profil 5 échantillonné dans la parcelle dite Ben Zaber au nom de Mr Gueldass Elhassan, situé à 65 m de l'angle Nord 120 de la maison de Mr Ait TALEB Mohamed.

Secteur : Tasstift, X = 358,7 Y = 376,3. Altitude 910 m, nombre d'horizon 3.
Parcelle en jachère avec plantation de dattiers.

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 20 cm	118	36	33	2,5	26	< 40	33	32	70	416	16 000	180	92	3,4	105	36,2	32,4
20 - 60 cm	26	13	20	4	29	< 40	31	32	34	365	17 800	-	78,5	3,7	64,5	28,9	43,3
60 - 110 cm	29	12	22	3	10	< 40	30	20	27	234	17 600	-	49,3	5	32,5	2,6	42,8

Tableau 64, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en As, Co, Ni et Zn d'origine anthropique dans l'horizon de surface, horizons 0 - 20 cm contaminé par l'As.

Fig 48 : Profil 5 situé sur des alluvions de l'oued Alougoum, dans une vallée rectiligne, terrasses, pente 2 à 4 %, micro-relief uni, érosion en nappe, drainage interne et externe bon, irrigation traditionnelle ; gravitaire par seguia.

Horizon (0 - 20 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique à polyédrique angulaire nette généralisée, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches de 2 à 5 %, présence de granules calcaires, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, racines fines et moyennes, labouré, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon 2 (20 - 60 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique à polyédrique subangulaire nette généralisée, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches de 2 à 5 %, granules calcaire, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, racines fines, transition graduelle et régulière.

Horizon (60 - 110 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique subangulaire fine généralisée, sans éléments grossiers, taches diffus en nodules, vides faibles, très poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, quelques racines, transition graduelle et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond sans contraintes agronomiques.

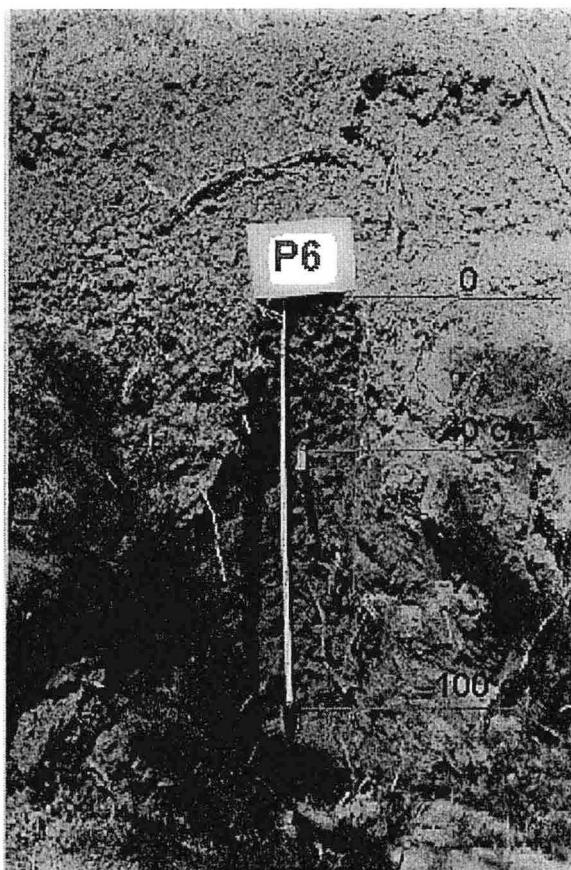


Fig 49 : Profil 6 échantillonné dans la parcelle dite Majout au nom de Mr IHMOUDI Brahim, situé à 109 m de l'angle Nord de sa maison.

Secteur : Foum-Eloued, X = 362,6 Y = 365,3. Altitude 866 m, nombre d'horizon 2.
Palmier dattier en haute densité.

P6 Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 40 cm	60	31	18	2	20	< 40	26	23	59	224	13 900	158	23,7	6,6	43,6	2,2	39,5
40 - 100 cm	29	12	18	2	21	< 40	27	21	27	278	16700	-	45,5	13,9	39,9	1,5	52,6

Tableau 65, annexe 4 : Recherche des contaminations des sol cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en As, Co et Zn d'origine anthropique dans l'horizon de surface, **horizons 0 - 40 cm contaminé par l'As.**

Fig 49 : Profil 6 situé sur des alluvions récents, dans une vallée rectiligne, terrasses, pente 2 à 4 % micro-relief uni, érosion en nappe, présence de débris végétaux, irrigation traditionnelle ; gravitaire par segua.

Horizon (0 - 40 cm) :

Couleur (5 YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique moyenne généralisée, sans éléments grossiers, taches diffuses, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité faible, très poreux, peu cimenté peu plastique, friable et fragile, beaucoup de racines fines à moyennes, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon (40 - 100 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture sablo-limoneuse, vive effervescence, structure grumeleuse moyenne généralisée, sans éléments grossiers, taches diffus, macroporosité faible, très poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, grosses racines, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial

Conclusion agronomique : Sol très profond sans contraintes agronomiques.

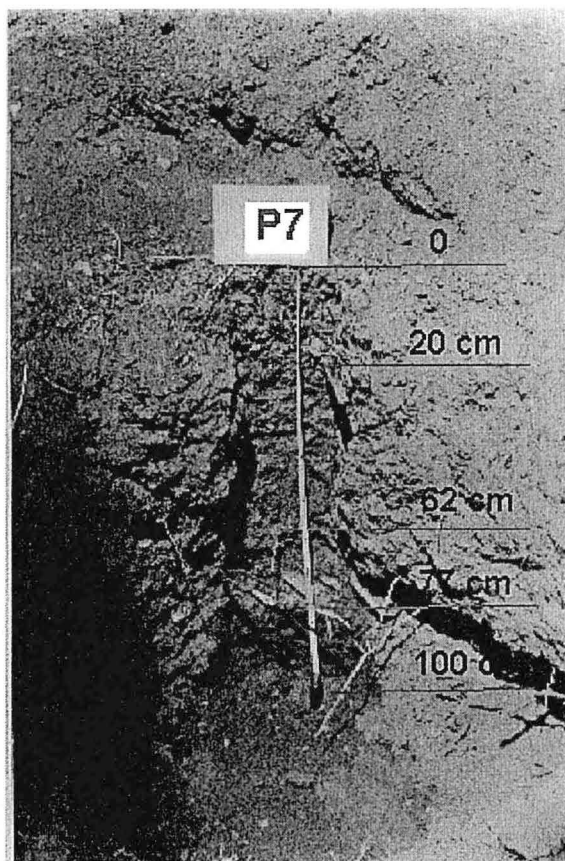


Fig 50 : Profil 7 échantillonné dans la parcelle dite Tabhirt n'Tanout au nom de Mr RAHOU Mohamed, situé à 73 m au Sud Est de la maison de Mr TAY Mohamed et à 45 km en aval de la mine de Bou-Azzer.

Secteur : Alougoum, X = 362,6 Y = 365,3. Altitude 803 m, nombre d'horizon 4.
Parcelle cultivée : précédent céréale, palmier dattier, luzerne.

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 20 cm	60	15	17	2	22	< 40	42	22	56	148	21 800	161	31,5	7,7	103	34,3	4,7
20 - 62 cm	27	12	20	3	26	< 40	39	21	26	401	17 900	-	42	5,6	49,1	30,8	41,2
62 - 77 cm	20	11	20	3	16	< 40	41	20		397	18 200	-	30,3	8,7	22,9	17,1	2,8
77 - 100 cm	32	12	21	3	18	< 40	24	32		460	20 600	-	56,8	18,1	56,8	21,8	35,8

Tableau 66, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en As et Zn d'origine anthropique dans l'horizon labouré,
horizons 0 - 20 cm contaminés par l'As,
horizon 77 - 100 cm contaminé par le Ba d'origine naturelle.

Fig 50 : Profil 7 situé sur les alluvions de l'oued Alougoum, dans une vallée rectiligne, terrasses, pente de 2 à 4 %, érosion en nappe, micro-relief uni, présence de débris végétaux, drainage interne très bon, externe bon, irrigation traditionnelle ; gravitaire par seguia.

Horizon (0 - 20 cm) :

Couleur (10YR 4/4) brun jaunâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique à polyédrique subangulaire moyenne généralisée, sec, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches diffuses, fentes inférieures à 0,2 cm, avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, peu poreux, peu cimenté, peu plastique, friable, peu fragile, beaucoup de racines fines à moyennes, labouré, activité biologique moyenne, transition nette et régulière.

Horizon (20 - 62 cm) :

Couleur (10YR 4/4) brun jaunâtre foncée, vive effervescence, structure polyédrique à polyédrique subangulaire moyenne généralisée, texture sablo -limoneuse, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches diffus, fentes inférieures à 0,2 cm présentant un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité faible, peu poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et peu fragile, racines fines, activité biologique forte, transition nette et régulière.

Horizon (62 - 77 cm) :

Couleur (10 YR 4/4) brun jaunâtre foncée, texture sableuse, structure grenue, éléments grossiers de 5 à 15 %, présence de graviers et cailloux, macroporosité très faible, non poreux, non cimenté, très friable et très fragile, quelques racines, activité biologique forte, transition nette et régulière.

Horizon (77 - 100 cm) :

Couleur (10 YR 4/4) brun jaunâtre foncée, texture sableuse, vive effervescence, structure polyédrique à polyédrique subangulaire, moyenne généralisée, sans éléments grossiers, taches diffus, vides très faibles, peu poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et peu fragile, quelques racines moyennes, activité biologique forte, transition nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial

Conclusion agronomique : Sol très profond avec deux horizons limitant (sables, graviers).

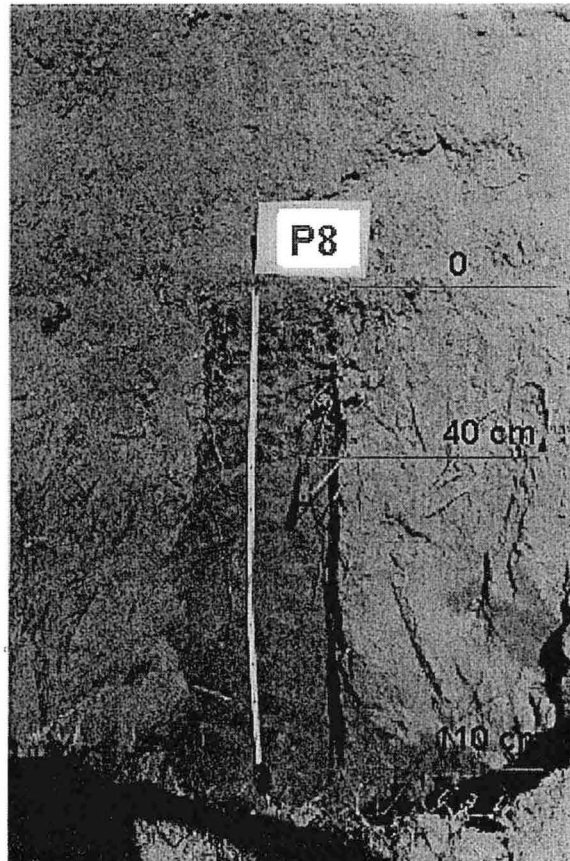


Fig 51 : Profil 8 échantillonné dans le jardin géré par l'autorité locale de Foum-Zguid, situé à 47 m à l'Ouest de la grande porte du jardin et à 65 km en aval de la mine de Bou-Azzer.

Secteur : Foum-Zguid, X = 357,6 Y = 344. Altitude 670 m, nombre d'horizon 2.
Parcelle cultivée (luzerne, palmier dattier, roseaux et tamarix).

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 40 cm	27	17	78	3,5	19	< 40	25	26	46	422	16 600	158	28,3	8,3	29,5	17,7	26,3
40 - 110 cm	25	14	27	2	13	< 40	35	23	28	417	16 600	-	19,2	14,3	19,9	15,8	26,3

Tableau 67, annexe 4 : Recherche des contaminations du sol cultivé par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en Ni et Zn d'origine anthropique dans l'horizon de surface.

Fig 51 : Profil 8 situé sur le lit majeur de l'oued, dans une vallée rectiligne, terrasses, apports alluviaux, pente de 2 à 4 %, micro-relief uni, présence de débris végétaux, efflorescence visible, drainage interne très bon, drainage externe bon, cultures en banquettes, irrigation traditionnelle ; gravitaire par seguia et par puits.

Horizon (0 - 40 cm) :

Couleur (10 YR 4/4) brun jaunâtre foncée, texture limono-sableuse, effervescence, structure polyédrique subangulaire à grenue fine généralisée, sans éléments grossiers, taches diffuses, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides faibles, poreux, peu cimenté, non plastique, très friable et fragile, labouré, racines moyennes, transition très nette et régulière.

Horizon (40 - 110 cm) :

Couleur (10 YR 4/4) brun jaunâtre foncée, texture sableuse, effervescence, structure polyédrique subangulaire fine généralisée, sans éléments grossiers, taches diffus, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides faibles, poreux, peu cimenté, non plastique, très friable et fragile, quelques racines, activité biologique animale semblant absente, transition très nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond présentant une contrainte texturale (sables) en profondeur.

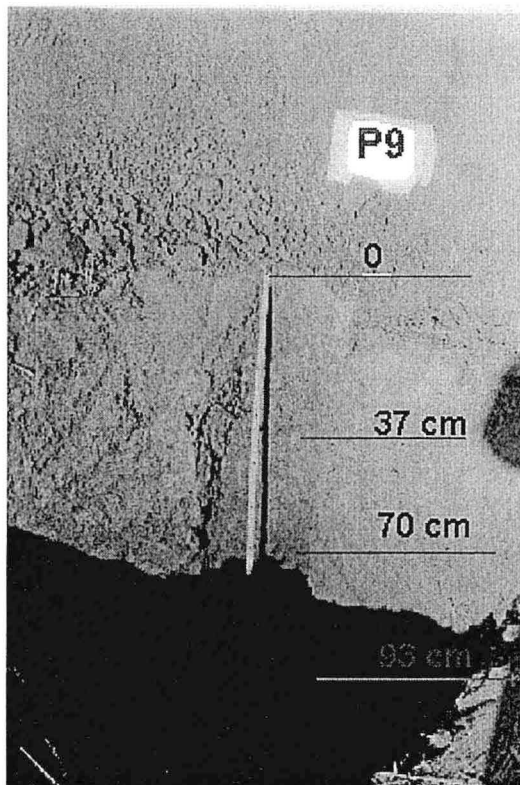
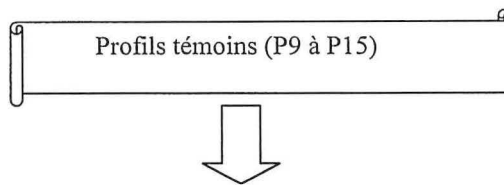


Fig 52 : Profil 9 échantillonné dans la ferme de Mr IBALIN Hammou, situé à 86 m au Sud Ouest de sa maison et à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer en dehors de la vallée de l'oued Alougoum.

Secteur : Tagragra, X = 338,2 Y = 392,7. Altitude 1097 m, nombre d'horizon 3
Sol nouvellement mis en culture (7 an), avec des cultures de pommiers, dattiers, figuier, oliviers, henné et céréales.

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 37 cm	27	21	64	4	24	< 40	34	23	39	314	18 800	182	143,5	3,6	140	13,9	28,4
37 - 70 cm	20	16	28	4	14	< 40	26	25	34	329	16 800	-	26,5	8,6	111	42,7	27,9
70 - 93 cm	20	13	22	4	16	< 40	31	23	29	326	17 000	-	79,8	9,5	82,8	32,8	30,7

Tableau 68, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☞ Apports importants en Ni d'origine anthropique dans l'horizon labouré.

Fig 52 : Profil 9 situé au Sud Ouest de la mine de Bou-Azzer, dans une vallée rectiligne, non irrigué par les eaux de l'oued Alougoum, pente de 2 à 4 %, apports alluviaux, efflorescence visible, présence de débris végétaux, drainage interne et externe bon, érosion en nappe, culture en banquettes, irrigation par puits et traditionnelle ; gravitaire par seguia.

Horizon (0 - 37 cm) :

Couleur (5 YR 5/4) brun rougeâtre, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure grumeleuse nette et moyenne, sans éléments grossiers, tache en amas, granules, nodules, fentes inférieures à 0, 2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, racines moyennes, activité biologique moyenne, transition nette et régulière.

Horizon (37 - 70 cm) :

Couleur (5 YR 5/4) brun rougeâtre, texture sablo-limoneuse, vive effervescence, structure grumeleuse peu nette et moyenne, sans éléments grossiers, granules, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, peu poreux, peu plastique, friable et fragile, pas de racine, activité biologique moyenne, transition diffus et régulière.

Horizon (70 - 93 cm) :

Couleur (5YR 5/3) brun rougeâtre, texture sablo- limoneuse, vive effervescence, structure grumeleuse moyenne, sans éléments grossiers, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité importante, peu poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et peu fragile, pas de racine, activité biologique moyenne, transition diffus et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond sans contraintes agronomiques.

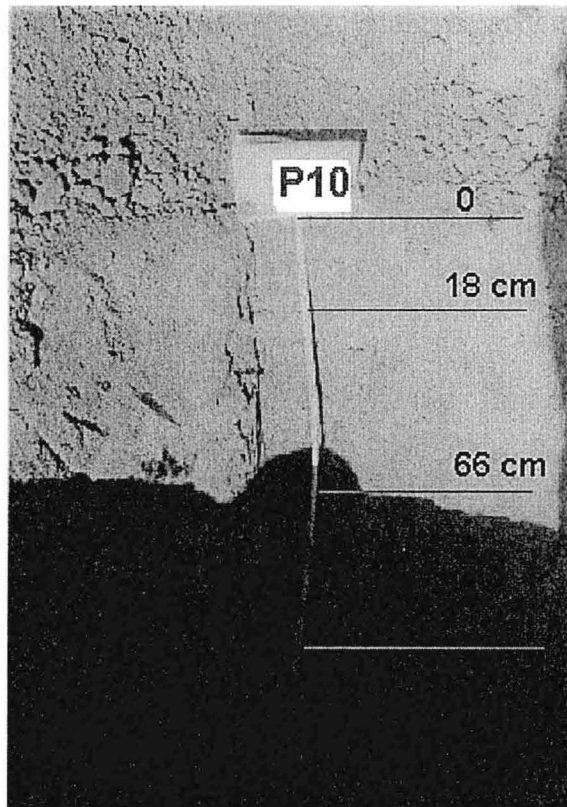


Fig 53 : Profil 10 échantillonné dans la ferme de Mr HADA Mohamed, situé à 69 m de l'angle Nord 140 de sa maison et à 30 km à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer.

Secteur : Taloust, X = 330,7 Y = 397,5. Altitude 1386 m, nombre d'horizon 3.
Parcelle mise en culture sur le lit majeur de l'oued avec dominance de l'amandier, abricotier, céréale et luzerne.

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 18 cm	52	15	53	3,5	32	< 40	40	21	45	421	17 300	128	35,8	13,3	39,5	16,6	26,9
18 - 66 cm	20	25	32	3	16	< 40	40	35	66	457	17 300	-	51,8	13,4	56,2	25,9	28
66 - 96 cm	20	26	36	3	18	< 40	46	38	69	417	27 700	-	112,8	7,1	63,2	26	27,4

Tableau 69, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

← Apports importants en As, Ni et Pb d'origine anthropique dans l'horizon labouré,
horizon 0 - 18 cm contaminé par l'As,
horizon 18 - 66 cm contaminé par le Ba d'origine naturelle.

Fig 53 : Profil 10 situé à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer, dans une vallée rectiligne, sur des alluvions récents, micro-relief uni, érosion en nappe, terrasses, présence de débris végétaux, graviers, cailloux, drainage interne et externe très bon, irrigation traditionnelle ; gravitaire par seguia.

Horizon (0 - 18 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique subangulaire peu nette moyenne généralisée, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches de 2 à 5 % en amas, fentes inférieures à 0, 2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, quelques racines, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon (18 - 66 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure polyédrique subangulaire peu nette moyenne généralisée, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches diffus de 2 à 5 % en amas, nodules friables, fentes inférieures à 0, 2 cm présentant un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, pas de racine, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon (66 - 96 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limoneuse, structure polyédrique subangulaire peu nette moyenne généralisée, vive effervescence, sans éléments grossiers, taches diffus de 2 à 5 % en amas, nodules friables, macroporosité faible, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, pas de racines, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond (> 80 cm) sans contraintes agronomiques.

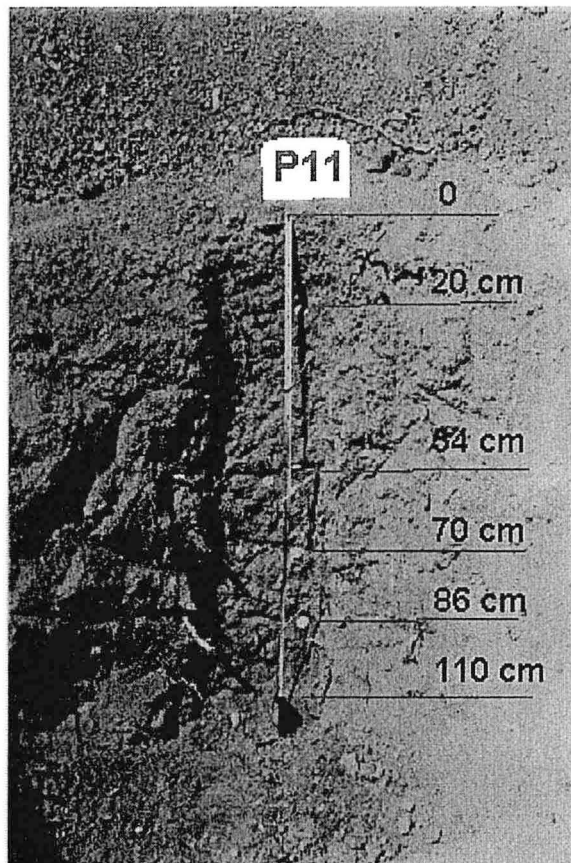


Fig 54 : Profil 11 échantillonné dans la parcelle dite Ain Lâasri au nom de Mr MOUDOUD Mohamed, situé à 29 m de l'angle Nord 230 de la maison de Mr Ait Omar Elhoussaine et à l'Est du centre minier de Bou-Azzer.

Secteur : Tiddiline, X = 377,4 Y = 391. Altitude 1277, nombre d'horizon 5.
Parcelle mise en culture (légumes, céréales, palmiers dattiers, figuiers, grenadiers et amandiers).

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	C _d	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 20 cm	53	23	96	3	27	< 40	60	29	49	336	21 500	273	113,8	12,8	105	28,3	17
20 - 54 cm	20	30	98	3	12	< 40	80	29	51	316	23 700	-	41,8	23,1	91,2	26	17,4
54 - 70 cm	22	28	108	3	10	< 40	75	26	48	385	23 500	-	73,5	13,3	69	28,8	21,7
70 - 85 cm	20	29	118	2	13	< 40	87	18	34	423	25 100	-	35,8	09,8	39,1	32,7	30,2
85 - 110 cm	40	25	116	2	16	< 40	71	22	45	379	25 500	-	33	14,5	51,3	34,8	28

Tableau 70, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

← Apports importants en As et Pb d'origine anthropique dans l'horizon de surface.
Apports importants en Ni et Cr d'origine naturelle

Fig 54 : Profil 11 situé dans la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa, à l'Est de Bou-Azzer centre, sur des alluvions de l'oued, dans une vallée rectiligne, terrasses, micro-relief uni, pente de 2 à 4 %, érosion en nappe, présence de débris végétaux, drainage interne et externe bon, irrigation traditionnelle ; gravitaire par seguia.

Horizon (0 - 20 cm) :

Couleur (10 YR 5/3) brun, texture limono-argileuse, vive effervescence, structure grenue moyenne généralisée, éléments grossiers inférieurs à 2 %, graviers, taches diffus, fentes inférieures à 0,2 cm, vides importants, poreux, très fragile, labouré, quelques racines, activité biologique moyenne, transition diffus et régulière.

Horizon (20 - 54 cm) :

Couleur (10 YR 5/3) brun, texture limoneuse, vive effervescence, structure grenue moyenne généralisée, éléments grossiers inférieurs à 2 %, graviers, taches diffuses, fentes inférieures à 0, 2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité faible, poreux, fragile, quelques racines, activité biologique moyenne, transition nette et régulière.

Horizon (54 - 70 cm) :

Couleur (10 YR 5/2) brun verdâtre, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure grenue moyenne généralisée, éléments grossiers de 2 à 15 %, graviers, taches diffus, fentes inférieures à 0, 2 cm, présentant un écartement de 5 à 10 cm, vides important, poreux, fragile, quelques racines moyennes, activité biologique moyenne, transition nette et régulière.

Horizon (70 - 86 cm) :

Couleur (10 YR 5/2) brun verdâtre, vive effervescence, texture sableuse, structure grenue peu nette moyenne généralisée, éléments grossiers de 2 à 15 %, graviers, taches diffus avec un écartement inférieur de 5 à 10 cm, macroporosité faible, poreux, fragile, quelques racines, transition très nette et régulière.

Horizon (86 - 110 cm) :

Couleur (10 YR 4/1) verdâtre foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure grenue peu nette généralisée, présence d'éléments grossiers inférieurs à 2 %, graviers, taches diffus, fentes inférieures à 0, 2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité très faible, poreux, fragile, quelques racines, transition très nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond sans contraintes agronomiques.

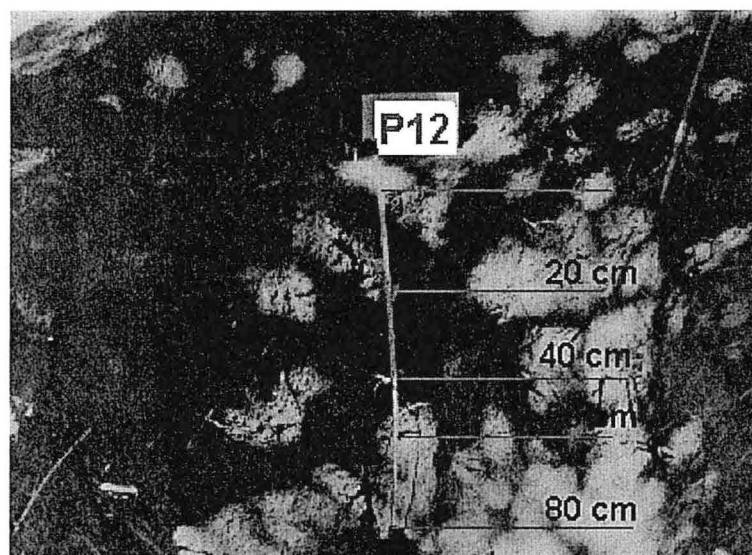


Fig 55 : Profil 12 échantillonné dans la parcelle dite Ouawmslawt, situé à 4 m au Nord du puits exploité par Mr Ait MRIM Addi et au Nord Est du centre minier de Bou-Azzer.

Secteur : Talamine, X = 361 Y = 397. Altitude 1325 m, nombre d'horizon 4.
Parcelle mise en culture (céréales, dattiers, abricotiers et figuiers).

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 20 cm	22	19	77	3	23	< 40	27	24	53	395	15 200	242	80,5	3	80	22,6	29,5
20 - 40 cm	31	22	30	3	18	< 40	27	19	43	437	17 600	-	81,3	7,5	94,7	24,5	27,7
40 - 56 cm	20	21	29	3	22	< 40	31	18	30	387	15 400	-	95,5	5,7	113	21,8	6,5
56 - 80 cm	28	36	26	2	13	< 40	40	18	28	382	19 300	-	101	16,3	73,3	19,8	29,3

Tableau 71, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en Ni et Zn d'origine anthropique dans l'horizon de surface.

Fig 55 : Profil 12 situé en dehors de la vallée de l'oued Alougoum, sur le bord Nord de la Boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa, dans une vallée rectiligne, terrasses, micro-relief uni, pente de 2 à 4 %, apports alluviaux, présence de débris végétaux, efflorescence saline visible en surface, drainage interne et externe bon, cultures en banquettes, irrigation par puits.

Horizon (0 - 20 cm) :

Couleur (5 YR 3/4) brun rouge foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique, taches diffuses, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité très faibles, peu poreux, non fragile, quelques racines moyennes, labouré, activité biologique moyenne, transition très nette et régulière.

Horizon (20 - 40 cm) :

Couleur (5YR 3/4) brun rouge foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure grenue, présence de granules et de nodules, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm , vides importants, poreux, beaucoup de racines, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon (40 - 56 cm) :

Couleur (5YR 3/4) brun rouge foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure grenue, granules et nodules, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, poreux, fragile, beaucoup de racines, transition graduelle et régulière.

Horizon (56 - 80 cm) :

Couleur (5YR 4/4) brun rougeâtre, vive effervescence, texture sableuse, structure massive, présence des taches de fer, granules et nodules, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité très faible, peu poreux, quelques racines, transition nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond avec dominance de calcaire.

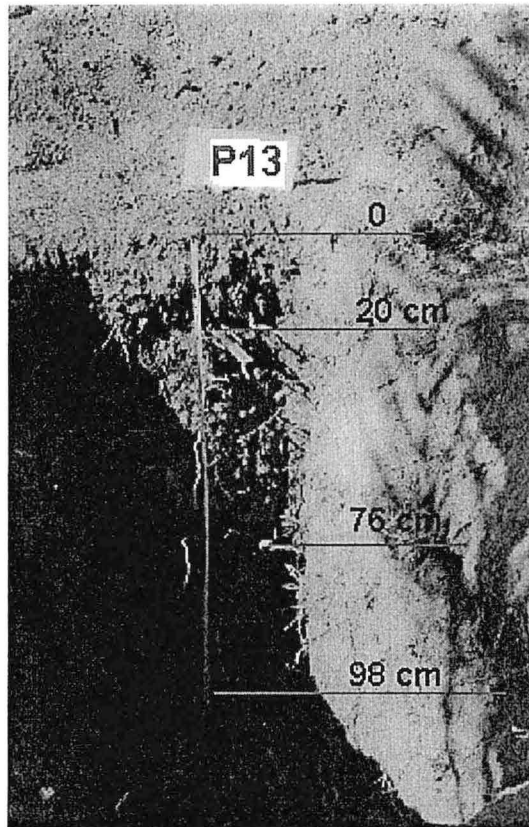


Fig 56 : Profil 13 échantillonné dans la parcelle dite Figuier au nom de Mr AKHZAM Hammou, situé à 19 m de l'angle Nord 60 du bassin d'eau et à 2 km à l'Ouest du centre minier de Bou-Azzer.

Secteur : Figuier, X = 351,5 Y = 394, 2. Altitude 1287 m, nombre d'horizon 3.
Parcelle mise en culture (céréales, jeunes plantations de dattiers, grenadiers et amandiers).

Prof	mg/kg											g/kg					
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	A	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 20 cm	53	30	146	3	21	< 40	97	29	62	380	23 300	211	49	16,5	31,4	34,4	27,7
20 - 76 cm	37	30	92	3		< 40	110	25	52	412	28 500	-	31,8	15,8	34,5	35,9	26,2
76 - 98 cm	21	26	82	2		< 40	99	25	52	366	26 600	-	33,3	5,5	39,6	31,7	26,1

Tableau 72, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle (A = taux d'argile).

☛ Apports importants en As d'origine anthropique dans l'horizon de surface,
Apports importants en Ni et Cr d'origine naturelle,
horizon 0 - 20 cm contaminé par l'As.

Fig 56 : Profil 13 situé dans la Boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa, dans une vallée rectiligne, pente de 2 à 4 %, terrasses, présence de débris végétaux, graviers, efflorescence visible, micro - relief uni, apports alluviaux, amélioration existante : épierrage, cultures en banquettes, irrigation par puits et gravitaire par seguia.

Horizon (0 - 20 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique subangulaire, moyenne, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches diffuses, fentes inférieures à 0, 2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité faible, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, labouré, quelques racines fines, activité biologique moyenne, transition très nette et régulière.

Horizon (20 - 76 cm) :

Couleur (5YR 4/4) brun rougeâtre, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure polyédrique subangulaire moyenne, éléments grossiers inférieurs à 2 %, taches diffus, nodules, vides importants, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, beaucoup de racines, activité biologique moyenne, transition très nette et régulière.

Horizon (76 - 98 cm) :

Couleur (5YR 4/4) brun rougeâtre, texture limono-sableuse, vive effervescence, structure grumeleuse moyenne, sans éléments grossiers, taches diffus, vides faibles, peu poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, quelques racines fines, activité biologique moyenne, transition très nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol très profond sans contraintes agronomiques.

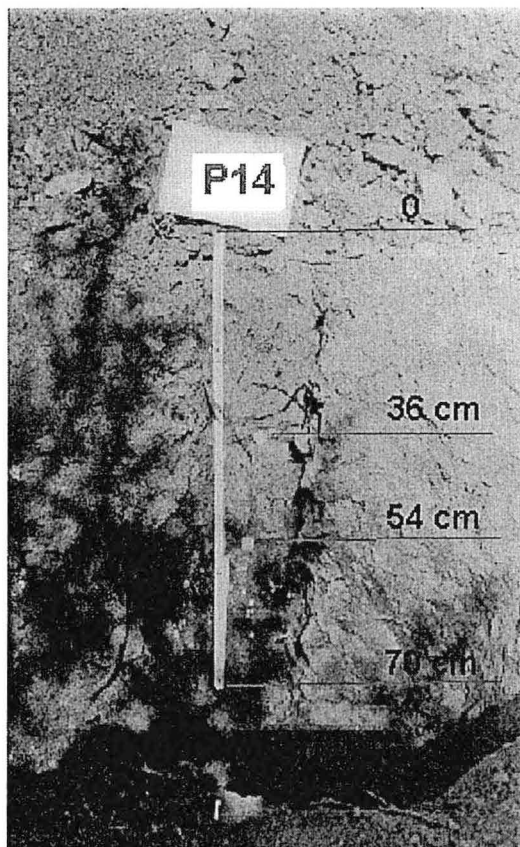


Fig 57 : Profil 14 échantillonné dans la parcelle située dans la ferme de Mr EL YAKOUBI Hassan à 88 m à l'Ouest de la maison de Mr MOURAD El Madani et à 30 km à l'Ouest du centre minier de Bou-Azzer.

Secteur : Assaka, X = 331,8 Y = 399,4. Altitude 1388 m, nombre d'horizon 3.
Parcelle mise en culture (luzerne, amandier et dattier).

Prof	mg/kg											g/kg				
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 36 cm	31	25	33	3	20	< 40	48	32	65	406	21 900	44	16,1	47,8	21,7	21,6
36 - 54 cm	34	31	31	3	22	< 40	47	34	69	383	28 800	98,8	4	64,5	21,4	23,1
54 - 70 cm	40	35	32	3	20	< 40	47	35	80	423	29 300	50,5	17	82	25,4	24,3

Tableau 73, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle

☛ Profil naturel.

Fig 57 : Profil 14 situé à 27 km à vol d'oiseau à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer, dans une vallée rectiligne, terrasses, pente de 2 à 4 %, micro-relief uni, présence de débris végétaux, efflorescence visible, apport alluvial, drainage interne et externe bon, amélioration existante : irrigation par puits et gravitaire par seguia.

Horizon (0 - 36 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure polyédrique moyenne généralisée, taches diffuses, nodules friables, fentes inférieures à 0,2 cm présentant un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité faible, cohérent, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, labouré, racines fines, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon (36 - 54 cm) :

Couleur (5YR 3/3) brun rougeâtre foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure polyédrique moyenne généralisée, taches diffus, nodules friables, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité importante, cohérent, poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, labouré, racines nombreuses, activité biologique moyenne, transition très nette et régulière.

Horizon (54 - 70 cm) :

Couleur (5YR 3/4) brun rouge foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure grumeleuse moyenne généralisée, présence de nodules, fentes inférieures à 0,2 cm, avec un écartement de 5 à 10 cm, vides faibles, cohérent, peu poreux, peu cimenté, peu plastique, friable et fragile, pas de racine, transition très nette et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol profond sans contraintes agronomiques.

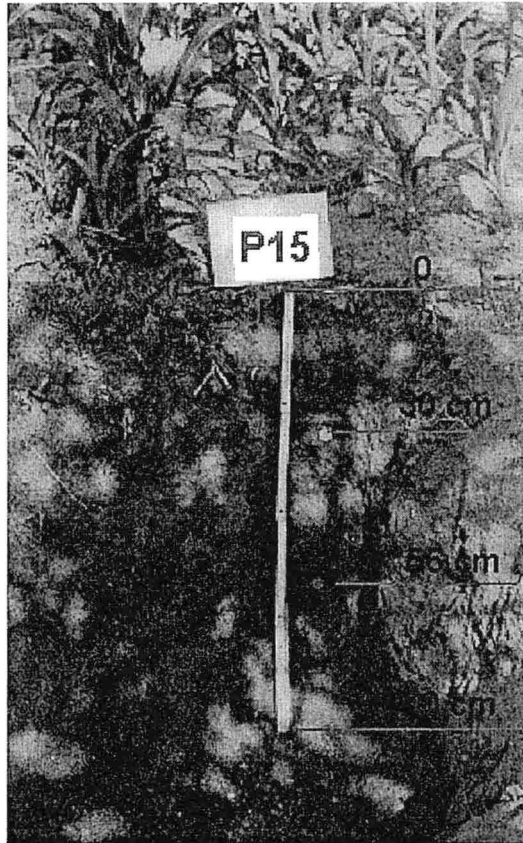


Fig 58 : Profil 15 échantillonné dans la parcelle dite Akalmou au nom de Mr JAMAA Brahim, situé à 130 m de l'angle Nord 20 du cimetière de Taznakht Elkasba.

Secteur : Taznakht Elkasba, X = 327,1 Y = 398,8. Altitude 1392 m , nombre d'horizon 3.
Parcelle mise en culture (maïs et amandiers).

Prof	mg/kg											G/kg				
	As	Co	Ni	Cd	Pb	Se	Cr	Cu	Zn	Ba	Fe	CaCO ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O
0 - 30 cm	20	30	32	2	20	< 40	65	27	64	326	28 500	81,5	12,1	47,1	24,8	22,1
30 - 56 cm	21	28	47	3	16	< 40	76	29	52	372	32 700	84	7,5	54,4	27,1	23,4
56 - 70 cm	20	27	35	3	16	< 40	73	19	44	315	28 600	80,5	25,4	73,6	19,5	23,1

Tableau 74, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle

← Apports importants en Cr d'origine naturelle.

Fig 58 : Profil 15 situé en dehors de la vallée de l'oued Alougoum, à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer, dans une vallée rectiligne, terrasses, pente de 2 à 4 %, micro-relief uni, érosion en nappe, présence de débris végétaux, drainage interne et externe bon, irrigation traditionnelle par seguia.

Horizon (0 - 30 cm) :

Couleur (5 YR 3/4) brun rouge foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure grumeleuse moyenne généralisée, sans éléments grossiers, taches inférieures à 0,2 cm, avec un écartement de 5 à 10 cm, vides importants, peu poreux, peu cimenté, peu plastique, peu fragile, peu friable, labouré, racines fines, activité biologique moyenne, transition nette et régulière.

Horizon (30 - 56 cm) :

Couleur (5YR 3/4) brun rouge foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure grumeleuse moyenne généralisée, sans éléments grossiers, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité faible, poreux, peu cimenté, peu plastique, peu fragile et peu friable, présence de racines, activité biologique moyenne, transition graduelle et régulière.

Horizon (56 - 70 cm) :

Couleur (5YR 3/4) brun rouge foncée, texture limoneuse, vive effervescence, structure grumeleuse moyenne généralisée, présence d'éléments grossiers de 2 à 15 %, de granules, fentes inférieures à 0,2 cm avec un écartement de 5 à 10 cm, macroporosité très faible, non poreux, peu cimenté, peu plastique, peu fragile et peu friable, pas de racines, transition graduelle et régulière.

Type de sol : Sol peu évolué d'apport alluvial.

Conclusion agronomique : Sol profond sans contraintes agronomiques.

Sites Exposés	As	Co	Ni	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Ba
Zaouit Sidi Blal	225	79	58	< 1	44,5	-	47	50,5	-
Amazzer	200	40	15	< 0,3	17	53	20	33	-
Ait Aissa	108	43	26	< 1	26	40	31	67	-
Ait M'rabt	100	32	19	< 1	23,5	40	20	107	-
Tasstift	200	60	33,5	< 1	25,5	36	35	100,5	-
Foum-Eloued	100	42	21	< 1	22	25	25	85	-
Alougoum	100	17	16	< 1	22	-	23	84	-
Foum-Zguid	22	20	131	4	28	-	26,5	57	441,5
Sites Témoins									
Tagragra	24	18	104	4	30	-	20	46	351
Taloust	15	17	91	3	47	-	18	45	526
Talamine	14	18	140	3,5	31	-	26	65,5	439
Tiddiline	21,5	324	128	3	35	-	32	74	385
Figuier	22	25	199	4	26	-	31,5	72	424

Tableau 82. Annexe 4. Teneurs moyennes en polluants minéraux des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum (en mg/kg)

Sites	Désignation	mg/kg										%		
		As	Co	Se	Ni	Fe	Pb	Cu	Zn	Cr	Ba	Mg	Na	K
Zaouit Sidi Blal	S1	15	20	< 10	33	21 700	17	43	41	42	538	1,85	0,26	2,87
	S2	12	14	< 10	45	19 000	10	23	25	44	583	1,98	1,05	4,1
	S3	11	31	< 10	43	37 600	12	67	64	58	493	2,08	2,08	2,82
Amazzer	S4	12	18	< 10	30	13 100	27	28	30	37	198	2,28	0	1,74
Ait Aissa	S5	10	11	< 10	24	14 800	15	18	22	33	392	3,3	0,39	4,08
Ait M'rabt	S6	16	18	< 10	31	17 000	10	17	16	38	395	1,85	0,4	4,84
Tasstift	S7	17	12	< 10	20	14 400	12	20	22	40	517	1,59	0,89	3,34
Foum-Eloued	S8	15	11	< 10	17	11 300	10	14	19	35	473	1,23	0,83	3,03
Alougoum	S9	14	22	< 10	30	20 100	10	25	26	32	651	1,62	0,03	4,63
	S15	12	15	< 10	22	23 700	14	26	30	34	693	1,55	0,03	3,17
Foum-Zguid	S10	18	19	< 10	36	21 600	13	26	32	39	483	1,98	0,47	3,2
Assaka	S11	11	16	< 10	23	15 200	15	27	30	29	427	3	0,17	2,68
Tagragra	S12	10	17	< 10	29	15 200	21	26	30	22	404	3,04	0,19	3,14
Taznakht Kasbah	S13	10	17	< 10	30	16 200	24	25	60	20	550	4,1	0,18	3,1
Taloust	S14	13	13	< 10	19	12 200	14	19	22	29	508	1,3	0,6	2,51

Tableau 83. Annexe 4. Niveaux de concentrations pour différents éléments des sols vierges dans le bassin versant de l'oued Alougoum.

Sites	Texture	As	Co	Ni	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Ba
Zaouit Sidi Blal	Limon sablo-argileux	52	226	199	11	504	366	177	668	587
Amazzer	Limon sablo-argileux	50	208	184	11	490	347	169	614	537
Ait Aissa	Limon sablo-argileux	48	182	163	11	470	321	158	538	468
Ait M'rabt	Limon sablo-argileux	53	233	205	11	511	373	181	692	607
Tasstift	Limon sablo-argileux	48	188	168	11	472	327	160	554	484
Foum-Eloued	Limon moyen sableux	46	171	155	10	458	310	152	504	440
Alougoum	Limon moyen sableux	46	174	157	10	461	312	154	552	446
Foum-Zguid	Limon moyen sableux	46	171	155	10	456	310	151	503	440
Tagragra	Limon sablo-argileux	49	192	172	11	479	331	163	570	496
Taloust	Limon moyen sableux	44	149	137	10	438	287	141	436	379
Talamine	Limon sablo-argileux	43	234	205	11	514	374	182	695	609
Tiddiline	Limon argilo-sableux	54	257	224	11	520	397	187	756	671
Figuier	Limon sablo-argileux	49	211	187	11	485	350	168	620	546

Tableau 84, annexe 4. Valeurs corrigées (Vc) par rapport aux valeurs d'intervention (Vi) des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum (en mg/kg).

Sites		As	Co	Ni	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Ba
Zaouit Sidi Blal	Vm	225	79	58	< 1	44,5	-	47	50,5	-
	Vc	52	226	199	11	504	366	177	668	587
Amazzer	Vm	200	40	15	< 0,3	17	53	20	33	-
	Vc	50	208	184	11	490	347	169	614	537
Ait Aissa	Vm	108	43	26	< 1	26	40	31	67	-
	Vc	48	182	163	11	470	321	158	538	468
Ait M'rabt	Vm	100	32	19	< 1	23,5	40	20	107	-
	Vc	53	233	205	11	511	373	181	692	607
Tasstift	Vm	200	60	33,5	< 1	25,5	36	35	100,5	-
	Vc	48	188	168	11	472	327	160	554	484
Foum-Eloued	Vm	100	42	21	< 1	22	25	25	85	-
	Vc	46	171	155	10	458	310	152	504	440
Alougoum	Vm	100	17	16	< 1	22	-	23	84	-
	Vc	46	174	157	10	461	312	154	552	446
Foum-Zguid	Vm	22	20	131	4	28	-	26,5	57	441,5
	Vc	46	171	155	10	456	310	151	503	440
Tagragra	Vm	24	18	104	4	30	-	20	46	351
	Vc	49	192	172	11	479	331	163	570	496
Taloust	Vm	15	17	91	3	47	-	18	45	526
	Vc	44	149	137	10	438	287	141	436	379
Talamine	Vm	14	18	140	3,5	31	-	26	65,5	439
	Vc	53	234	205	11	514	374	182	695	609
Tiddiline	Vm	21,5	24	128	3	35	-	32	74	385
	Vc	43	257	224	11	520	397	187	756	671
Figuier	Vm	22	25	199	4	26	-	31,5	72	427
	Vc	49	211	187	11	485	350	168	620	546
Seuils d'investigation (Si)	mg/kg	30	30	40	4	30	60	50	70	450
Valeurs d'intervention (Vi)	mg/kg	55	240	210	12	530	380	190	720	625

Tableau 85, annexe 4. Confrontation des teneurs moyennes mesurées (Vm) en polluants minéraux des sols prospectés aux valeurs d'intervention corrigées (Vc), Valeurs d'intervention (Vi) et seuils d'investigations (Si) (en mg/kg de terre).

Espèces exposées							
Sites	Palmier dattier	Grenadier	Vigne	Amandier	Olivier	Figuier	Luzerne
Zaouit Sidi Blal	x	x	x	x	x	x	x
Amazzer	x	x	x	x	x	x	x
Ait Aissa	x		x	x		x	x
Ait M'rabt	x	x	x	x		x	x
Tasstift	x	x	x	x	x	x	x
Foum-Eloued	x	x	x	x		x	x
Alougoum	x	x	x	x		x	x
Foum-Zguid	x	x	x		x	x	x
Espèces témoins							
Taloust		x	x	x		x	x
Tagragra	x	x	x	x	x	x	x
Talamine	x	x		x		x	x
Tiddiline	x	x	x	x		x	x
Figuier	x	x	x		x	x	

Tableau 88, annexe 4 : Arboricultures fruitières et cultures fourragères (x) prélevées dans le bassin versant de l'oued Alougoum.

Sites	Espèces	As	Co	Pb	Ni	Se
Zaouit Sidi Blal	Palmier	8,9	0,6	0,09	16,5	4,4
	Grenadier	5,1	1,4	0,3	45	3,7
	Vigne	15,2	1,8	0,15	1,2	4,1
	Amandier	14	0,7	0,35	1,1	4
	Olivier	6,9	0,4	0,1	2,7	3,5
	Figuier	9	1,1	0,2	3,1	3,9
	Luzerne	25	2,9	0,25	2,1	4
Amazzer	Palmier	13,4	0,2	0,08	1,6	6
	Grenadier	3,9	0,4	0,15	1	3,7
	Vigne	9,2	2,2	0,25	1,4	4,3
	Amandier	6,5	0,6	0,3	1,2	3,7
	Olivier	5	0,4	0,09	0,6	3,6
	Figuier	20	2,9	0,3	2,5	3,4
	Luzerne	14,5	1,6	0,15	5,4	3,5
Ait Aissa	Palmier	5,6	0,5	0,1	1,7	4
	Vigne	14,2	2,1	0,35	1,1	3,2
	Amandier	5,4	0,2	0,25	0,9	3,7
	Figuier	4,9	0,5	0,2	2,4	4
	Luzerne	13	1,9	0,1	2	3,7
Ait M'rabt	Palmier	4,6	0,1	0	1,4	3,9
	Grenadier	5,5	0,6	0	0,9	4
	Vigne	8,2	1	0	3,1	3,5
	Amandier	6,2	0,4	0,2	0,7	3,5
	Figuier	14,5	1,2	0,3	2	4,2
	Luzerne	16,3	1,4	0	1,4	3,6
Tasstift	Palmier	3,7	0,1	0	1,2	3
	Grenadier	3,9	0,2	0,2	1,5	3,2
	Vigne	4,8	0,4	0,1	0,5	4,1
	Amandier	5	0,4	0,15	1,7	3,7
	Olivier	4,7	0,1	0,1	0,9	4,1
	Figuier	8,2	0,9	0,2	1,1	3,8
	Luzerne	11,5	1,4	0,3	1	4,2
Foum-Eloued	Palmier	7,5	0,9	0,1	1	5
	Grenadier	5,9	0,6	0,35	0,5	4,1
	Vigne	5,6	0,6	0,1	0,7	3,2
	Amandier	4,7	0,4	0,2	0,5	3,6
	Figuier	4,4	0,2	0,1	1,5	4
	Luzerne	10	1,4	0,15	1,9	3,9
Alougoum	Palmier	3,7	0,2	0,15	1,7	3,3
	Grenadier	5,5	0,5	0,1	0,6	3,7
	Vigne	7	1	0,1	1,4	4,2
	Amandier	5	0,4	0,15	0,6	3
	Figuier	4,1	0,4	0,15	1,2	3
	Luzerne	3,9	0,4	0,1	5,4	3,1
Foum-Zguid	Palmier	3,2	0,1	0	1,7	4
	Grenadier	3,1	0,1	0	1,2	4,2
	Vigne	4,7	0,5	0,1	1	4,3
	Figuier	5,9	0,6	0,2	3,4	4
	Olivier	4,7	0,4	0,15	1,4	3,9
	Luzerne	8,2	1,1	0,15	1,2	3,2

Tableau 93, annexe 4 : Teneurs en As, Co, Pb, Ni et Se des plantes exposées et irriguées par l'oued Alougoum (en mg/kg MS)

Sites	Espèces	As	Co	Pb	Ni	Se
Figuier	Palmier	3,2	0,1	0,1	1,7	5
	Grenadier	4	0,2	0,1	1,1	4,8
	Vigne	7,7	1	0,1	0,9	3,5
	Olivier	5,9	0,5	0	1,2	4,1
	Figuier	4,6	0,6	0,25	8,4	4,2
Tagragra	Palmier	3,2	0,2	0	1,9	6,1
	Vigne	4,4	0,5	0,1	1,2	5,2
	Luzerne	7,5	1,1	0	1,4	4,8
	Grenadier	4	0,4	0	0,7	4,5
	Figuier	3,5	0,4	0	1,7	5
	Amandier	2,9	0,4	0	7,1	5,5
	Olivier	2,5	0,1	0	0,5	3,2
Taloust	Luzerne	3,2	0,4	0,1	0,7	4,8
	Amandier	2,2	0,1	0	0,6	5,8
	Grenadier	2,4	0,1	0	0,5	4,9
	Vigne	3,7	0,6	0	0,5	4,7
	Figuier	2,9	0,4	0	2,1	3,8
Talamine	Palmier	2,1	0,1	0	1,6	5,4
	Grenadier	4	0,6	0	0,6	4,9
	Luzerne	5,9	0,7	0	0,6	3,2
	Figuier	3,7	0,5	0	0,9	4,8
	Amandier	1,7	0,1	0	0,6	4,5
Tiddiline	Palmier	2,5	0,1	0	1,5	5,6
	Grenadier	3,1	0,2	0	0,8	3,8
	Luzerne	10,2	1,7	0	6,2	3,2
	Figuier	3,5	0,2	0	3,7	4,5
	Vigne	5	0,6	0	1,7	3,5
	Amandier	2,5	0,1	0	1,4	3,6

Tableau 94, annexe 4 : Teneurs en As, Co, Pb, Ni et Se des plantes témoins récoltées en dehors de la vallée l'oued Alougoum (en mg/kg. MS).

ANNEXE 5



LES NORMES

GRILLE DE QUALITE DES EAUX DE SURFACE

		CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4	CLASSE 5	
Paramètres	Unités	Excellente	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise	
Organoleptiques							
1	Couleur (échelle Pt)	mg Pt/l	<20	20-50	50-100	100-200	>200
2	Odeur (dilu à 25°C)		< 3	3-10	10-20	>20	-
Physico-chimiques							
3	Température	°C	< 20	20-25	25-30	30-35	> 35
4	pH		6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-9,2	<6,5ou>9,2	<6,5ou>9,2
5	Conductivité à 20°C	µs/cm	< 750	750-1300	1300-2700	2700-3000	> 3000
6	Chlorure (Cl ⁻)	mg/l	<200	200-300	300-750	750-1000	> 1000
7	Sulfate (SO ₄ ²⁻)	mg/l	<100	100-200	200-250	250-400	> 400
8	MES	mg/l	<50	50-200	200-1000	1000-2000	>2000
9	O ₂ dissous	mg/l	>7	7-5	5-3	3-1	<1
10	DBO ₅	mg/l	<3	3-5	5-10	10-25	>25
11	DCO	mg/l	<30	30-35	35-40	40-80	>80
12	Oxydabilité KMnO ₄	mg/l	≤ 2	2-5	5-10	>10	-
Substances Indésirables							
13	Nitrates (NO ₃ ⁻)	mg/l	≤ 10	10-25	25-50	>50	-
14	NTK	mg.N/l	≤ 1	1-2	2-3	>3	-
15	Ammonium	mgNH ₄ /l	≤ 0,1	0,1-0,5	0,5-2	2-8	>8
16	Baryum	mg/l	≤ 0,1	0,1-0,7	0,7-1	>1	-
17	Phosphate (PO ₄ ³⁻)	mg/l	≤ 0,2	0,2-0,5	0,5-1	1-5	>5
18	P total (Pt)	mg/l	≤ 0,1	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-3	>3
19	Fe total (Fe)	mg/l	≤ 0,5	0,5-1	1-2	2-5	>5
20	Cuivre (Cu)	mg/l	≤ 0,02	0,02-0,05	0,05-1	>1	-
21	Zinc (Zn)	mg/l	< 0,5	0,5-1	1-5	>5	-
22	Manganèse (Mn)	mg/l	≤ 0,1	0,1-0,5	0,5-1	>1	-
23	Fluorure (F ⁻)	mg/l	≤ 0,7	0,7-1	1-1,7	>1,7	-
24	Hydrocarbures	mg/l	<0,05	0,05-0,2	0,2-1	>1	-
25	Phénols	mg/l	≤ 0,001	0,001-0,005	0,005-0,01	>0,01	-
26	Détergents anioniques	mg/l	≤ 0,2	≤ 0,2	0,2-0,5	0,5-5	>5
Substances Toxiques							
27	Arsenic(As)	µg/l	≤ 10	≤ 10	10-50	> 50	-
28	Cadmium (Cd)	µg/l	≤ 3	≤ 3	3- 5	> 5	-
29	Cyanures (CN ⁻)	µg/l	≤ 10	≤ 10	10-50	> 50	-
30	Chrome total (Cr)	µg/l	≤ 50	≤ 50	≤ 50	> 50	-
31	Plomb (Pb)	µg/l	≤ 10	≤ 10	10-50	> 50	-
32	Mercuré (Hg)	µg/l	≤ 1	≤ 1	≤ 1	> 1	-
33	Nickel (Ni)	µg/l	≤ 20	≤ 20	20-50	> 50	-
34	Selenium (Se)	µg/l	≤ 10	≤ 10	≤ 10	> 10	-
35	Pesticides par subst	µg/l	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	> 0,1	-
36	Pesticides totaux	µg/l	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	> 0,5	-
37	H.P.A. totaux	µg/l	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	> 0,2	-
Bactériologiques							
38	Coliformes Fécaux	/100ml	≤ 20	20-2000	2000-20.000	>20.000	-
39	Coliformes Totaux	/100ml	≤ 50	50-5000	5000-50.000	>50.000	-
40	Streptoco. Fécaux	/100ml	≤ 20	20-1000	1000-10.000	>10.000	-
Biologique							
41	Chlorophylle a	µg/l	<2,5	2,5-10	10-30	30-110	>110

Tableau 41 bis, annexe 5. Projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux de surface (source : Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement).

PROJET DE NORME DE QUALITE DES EAUX DESTINEES A L'IRRIGATION

	PARAMETRES	VALEURS LIMITES
PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES		
1	Coliformes fécaux	5000/100ml*
2	Salmonelle	Absence dans 5l
3	Vibrion Cholérique	Absence dans 450 ml
PARAMETRES PARASITOLOGIQUES		
4	Parasites pathogènes	Absence
5	Œufs, Kystes de parasites	Absence
6	Larves d'Ankylostomidés	Absence
7	Fluococercaires de Schistosoma hoematobium	Absence
PARAMETRES TOXIQUES		
8	Mercuré Hg mg/l	0,001
9	Cadmium Cd mg/l	0,01
10	Arsenic As mg/l	0,1
11	Chrome total mg/l	0,1
12	Plomb Pb mg/lb	5
13	Cuivre Cu mg/l	0,2
14	Zinc Zn mg/l	2
15	Sélénium Se mg/l	0,02
16	Fluor F mg/l	1
17	Cyanures Cn mg/l	1
18	Phénols mg/l	3
19	Aluminium Al mg/l	5
20	Beryllium Be mg/l	0,1
21	Cobalt Co mg/l	0,05
22	Fer Fe mg/l	5
23	Lithium mg/l	2,5
24	Manganèse Mn mg/l	0,2
25	Molybdène Mo mg/l	0,01
26	Nickel Ni mg/l	0,2
27	Vanadium V mg/l	0,1

* 1 000 CF/100ml pour les cultures consommées crues

Tableau 51, annexe 5 : Projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux de surface destinées à l'irrigation (source : Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement).

PROJET DE NORME DE QUALITE DES EAUX DESTINEES A L'IRRIGATION

suite

		VALEURS LIMITES INDICATIVES
SALINITE		
28	Salinité totale mg/l*	7680
29	Conductivité électrique mS/cm à 25°C*	12
	si le SAR du sol = 0 - 3	0,2
	3 - 6	0,3
	6 - 12	0,5
	12 - 20	1,3
	20 - 40	3
IONS TOXIQUES		
30	Sodium (Na)	
	■ Irrigation de surface (SAR)	9
	■ Irrigation par aspersion (mg/l)	69
31	Chlorures (Cl)	
	■ Irrigation de surface (mg/l)	350
	■ Irrigation par aspersion (mg/l)	105
32	Bore (mg/l)	3
EFFETS DIVERS		
33	Température	35°C
34	pH	6,5-8,5
35	Matières en suspension mg/l	2 000
36	N-NO ₃ ⁻ mg/l	50
37	Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	
	- Irrigation par aspersion (mg/l)	518
38	Sulfates mg/l	250

* A partir d'une conductivité électrique de 3 mS/cm, une eau présente en moyenne des restrictions sévères pour l'irrigation, mais des rendements de 50% du rendement potentiel peuvent être réalisés avec des eaux de 12 mS/cm (cas de l'orge).

**GRILLE DE QUALITE DES EAUX DESTINEES A LA PRODUCTION
DE L'EAU POTABLE**

Catégorie →		A1		A2		A3		
		G	I	G	I	G	I	
PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES								
1	Couleur	mg pt/l	10	20	50	100	50	200
2	Odeur à 25°C		3		10		20	
PHYSICO-CHIMIQUES								
3	Température	°C	20	30	20	30	20	30
4	PH	ph	6,5-8,5	-	6,5-9,2	-	6,5-9,2	-
5	Conductivité à 20°C	µs/cm	1300	2700	1300	2700	1300	2700
6	Chlorures (Cl ⁻)	mg/l	300	750	300	750	300	750
7	Sulfates(SO ₄)	mg/l	200	-	200	-	200	-
8	MES	mg/l	50	-	1000	-	2000	-
9	O ₂ dissous	mg/l	7(90%)	-	5(70%)	-	3(50%)	-
10	DBO ₅	mg/l	3	-	7	-	10	-
11	DCO	mg/l	-	-	25	-	40	-
12	Oxydabilité KMnO ₄	mg/l	2	-	5	-	10	-
SUBSTANCES INDESIRABLES								
13	Bore	mg/l	-	1	-	1	-	1
14	Ammonium	mgNH ₄ /l	0,05	0,5	1	1,5	2	4
15	NTK	mgN/l	1	-	2	-	3	-
16	Nitrates (NO ₃)	mg/l	-	50	-	50	-	50
17	Phosphores	mgP ₂ O ₅ /l	0,4	-	0,7	-	0,7	-
18	Baryum	mg/l	-	1	-	1	-	1
19	Cuivre (Cu)	mg/l	-	1	-	2	-	2
20	Zinc (Zn)	mg/l	-	5	-	5	-	5
21	Manganèse (Mn)	mg/l	-	0,1	0,1	0,1	1	-
22	Fer dissous (Fe)	mg/l	-	0,3	1	2	1	3
23	Fluorures (F)	mg/l	0,7	1,5	0,7	1,5	0,7	1,5
24	Hydrocarbures dissous	mg/l	-	0,05	-	0,2	0,5	1
26	Phénols	mg/l	-	0,001	-	0,005	-	0,01
27	Détérgents anioniques	mg/l	-	0,5	-	0,5	-	0,5
SUBSTANCES TOXIQUES								
28	Arsenic (As)	µg/l	-	50	-	50	-	100
29	Cadmium (Cd)	µg/l	1	5	1	5	1	5
30	Chrome total (Cr)	µg/l	-	50	-	50	-	50
31	Plomb (Pb)	µg/l	-	50	-	50	-	50
32	Mercuré (Hg)	µg/l	-	1	-	1	-	1
33	Sélénium (Se)	µg/l	-	10	-	10	-	10
34	Nickel (Ni)	µg/l	-	50	-	50	-	50
35	Cyanures (CN ⁻)	µg/l	-	50	-	50	-	50
36	Pesticides par subst	µg/l	-	0,1	-	0,1	-	0,1
37	Pesticides au total	µg/l	-	0,5	-	0,5	-	0,5
38	HPA	µg/l	-	0,2	-	0,2	-	0,2
PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES								
39	C.fécaux	/100ml	20	-	2000	-	20000	-
40	C.totaux	/100ml	50	-	5000	-	50000	-
41	S.fécaux	/100ml	20	-	1000	-	10000	-

G : Valeur guide
I : Valeur impérative

A1 : traitement physique simple et désinfection.
A2 : traitement normal physique, chimique et désinfection.
A3 : traitement physique, chimique poussé affinage et désinfection.

Créel

Tableau 58, annexe 5. Projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux destinées à la production de l'eau potable (source : Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement).

Eléments	Norme NF U44041(mg/kg M.S)	Directive CEE 1988 (mg/kg MS a)
Cadmium	2	1 à 3
Cuivre	100	50 à 140
Nickel	50	30 à 75
Plomb	100	50 à 300
Zinc	300	150 à 300
Mercure	1	1 à 1,5
Chrome	150	100 à 200

Tableau 76, annexe 5 : Valeurs limites de concentration en éléments en traces dans les sols lors de la valorisation agricole de boues d'épuration (d'après Andred, 1988 ; M. Mench, 1993), (a) : mg/kg d'un échantillon représentatif des sols dont le pH est de 6 à 7.

	Allemagne	Suisse		Pays-Bas			Grande-Bretagne (c)	
	(Total)	Total (a)	(extrait) (b)	A	B	C	A	B
Antimoine	5							
Arsenic	20			15 + 0,4 (L + H)	30	50	10	40
Baryum				200	400	2000		
Bore		50						
Beryllium	10							
Cadmium	3	0,8	0,03	0,4 + 0,007 (L + 3H)	5	20	3	15
Chrome	100	75		50 + 2L	250	800	600	1000
Cobalt	50	25		20	50	300		
Cuivre	100	50	0,7	15 + 0,6 (L = H)	100	500	130	130
Gallium	10							
Plomb	100	50	1	50 + L + H	150	600	500	2000
Mercure	2	0,8		0,2 + 0,0017 (2L + H)	2	10	1	20
Molybdène	5	5		10	40	200		
Nickel	50	50	0,2	10 + L	100	500	70	70
Sélénium	10						3	6
Etain		50			20	50	300	
Thallium	1	1						
Uranium	5							
Vanadium	50							
Zinc	300	200	0,5	50 + 1,5 (2L + H)	500	3000	300	300
Zirconium	300							

Tableau 77, annexe 5 : Valeurs guides maximum pour les concentrations admissibles dans les terres agricoles (a : extrait par HNO₃ concentré ; b : extrait par NaOH ; c : A - terre cultivée, B - zone récréative. L : pourcentage d'argiles ; H : pourcentage de matière organique. (Source : Ewers, 1988 ; Alloway, 1992 ; M. Mench, 1993).

Composés	Valeurs de base	Valeurs d'intervention
Métaux		
Chrome (Cr)	100	380
Cobalt (Co)	20	240
Nickel (Ni)	35	210
Cuivre (Cu)	36	190
Zinc (Zn)	140	720
Arsenic (As)	29	55
Molybdène (Mo)	10	200
Cadmium (Cd)	0,8	12
Baryum (Ba)	200	625
Mercure (Hg)	0,3	10
Plomb (Pb)	85	530
Polluants minéraux		
Cyanures (libres)	1	20
Cyanures (totaux complexés) pH < 5	5	650
Cyanures (totaux complexés) pH > 5	8	50
Thiocyanates (totaux)		20
Composés aromatiques		
Benzène	0,05	1
Ethylbenzène	0,05	50
Toluène	0,05	130
Xylènes	0,05	52
Phénol	0,05	40
Hydrocarbures aromatiques polycycliques		
H.A.P (totaux)	1	40
Hydrocarbures chlorés		
P.C.B (totaux)	0,02	1
Huiles minérales		
	50	5000

Tableau 78, annexe 5 : Valeurs de base et d'intervention pour les sols (en mg/kg de matières sèches). D'après J.C. SAMAMA, GEOSUM, Formulation d'une politique Environnementale Minière (PEM) à Madagascar.

Eléments	A	B	C
As	15	0,4	0,4
Ba	30	5	0
Cd	0,4	0,007	0,021
Cr	50	2	0
Co	2	0,28	0
Cu	15	0,6	0,5
Hg	0,2	0,0034	0,0017
Pb	50	1	1
Mo	1	0	0
Ni	10	1	0
Zn	50	8	1,5

Tableau 79, annexe 5 : Valeurs constantes de correction A, B et C en fonction des éléments pour formules de correction dans les sols.
(D'après J.C. SAMAMA, Office National de l'Environnement, Formulation d'une Politique Environnementale Minière à Madagascar (PEM)).

Eléments	Terre (mg/kg)	Végétaux (Mg/kg MS)	Apports pour animaux (mg/kg MS)	Homme mg/j
As	0,1 - 40	0,1 - 5		
Co	1 - 40	0,02 - 0,5	0,1	0,3
Ni	10 - 1 000	0,1 - 3		
Se	0,1 - 2	0,02 - 2		0,01
Cr	5 - 3000	0,2 - 1		
Fe	10 000- 100 000	50 - 200	30	13
Mn	200 - 1 000	50 - 150	50	3
Zn	10 - 100	25 - 50	50	13
Cu	8 - 40	5 -15	10	5
B	5 - 80	5 - 40		
Mo	1 - 10	0,1 - 1	0,2 - 3	0,2
F	100 - 400	2 - 20		
V	20 - 500	0,1 - 10		
I	1 - 20	0,04 - 0,5	0,2	0,1

Tableau 89, annexe 5 : Valeurs guides maximum pour les concentrations dans la terre, les végétaux et apports maximaux admissibles pour les animaux et l'homme (FAO, 1976 ; Neuzil, 1990 ; M. Mench, 1993)

Eléments	mg/personne	mg/kg de poids corporel
Arsenic		0,35
Cuivre		3,5
• Mercure (total)	0,3	0,005
• méthylmercure	0,2	0,0033
Plomb (+)	3	0,05
Cadmium	0,4 - 0,5	0,0067 - 0,0083

Tableau 90, annexe 5 : Apports maximaux admissibles par semaine en As, Cd, Hg, Pb et Cu (FAM/OMS, 1976 ; Ewers, 1991 ; M. Mench, 1993). (+) : niveau non applicable chez les enfants.

Eléments	Alimentations pour animaux	Teneur maximale en mg/kg d'aliment ramené à un taux d'humidité de 12 %
Arsenic	Aliments simples	2
	à l'exception de:	
	• farines d'herbes, de luzerne et de trèfles déshydratés	
	ainsi que pulpes de betteraves sucrières déshydratées et mélassées	4
	• phosphates et aliments des animaux provenant de la transformation des poissons ou d'autres animaux marins	10
	Aliments complets	2
Plomb	Aliments complémentaires	4
	à l'exception des composés minéraux	12
	Aliments simples	10
	à l'exception de:	
• fourrages verts	40	
• phosphates	30	
• levures	5	
Aliments complets	5	
Aliments complémentaires	10	
à l'exception des composés minéraux	30	
Mercure	Aliments simples	0,1
	à l'exception des aliments des animaux provenant de la transformation des poissons ou d'autres animaux marins	0,5
	Aliments complets	0,1
	Aliments complémentaires	0,2
Cadmium	Aliments simples d'origine végétale	1
	Aliments simples d'origine animale	2
	à l'exception des aliments pour animaux familiers	
	Phosphates	10

Tableau 91, annexe 5 : Teneurs maximales pour les éléments en traces indésirables dans l'alimentation des animaux (source J.O. 13 Avril 1989 ; M. Mench, 1993).

	Pb	Cd	Hg
Blé (grains)	0,3	0,1	0,03
Seigle (grains)	0,4	0,1	0,03
Riz (grains)	0,4	0,1	0,03
Pommes de terre	0,25	0,1	0,02
Légumes verts	0,8	0,1	0,05
Chou frisé	2		
Herbes potagères	2		
Epinards		0,5	
Tomate, légumes, fruits	0,25	0,1	
Tubercules		0,1	
Céleri			
Pomme, poire	0,5	0,05	0,03
Fruits à noyau	0,5	0,05	0,03
Baies, petits fruits	0,5	0,05	0,03
Citrus	0,5	0,05	0,03
Autres fruits	0,5	0,05	0,03

Tableau 92, annexe 5 : Valeurs recommandées pour le cadmium, le plomb et le mercure dans les denrées alimentaires en Allemagne (mg/kg de poids frais) (d'après M. Mench, 1993).



LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Première partie

Fig. 1 : Localisation de la zone étudiée.....	13
---	----

Deuxième partie

CHAPITRE : I

Fig. 2 : Délimitation de la zone étudiée : bassin versant de l'oued Alougoum	30
Fig. 3 : Bassin versant de l'oued Alougoum : réseau hydrographique	32
Fig. 4 : Sous bassin versant de Bou-Azzer : réseau hydrographique	34

CHAPITRE : II

Fig. 5 : Carte des précipitations de la zone étudiée	42
Fig. 6 : Chronique des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1936-1995).....	44
Fig. 7 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1975-1995).....	44
Fig. 8 : Evolution des températures moyennes maximales et minimales absolues mensuelles dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1975-1995).....	46
Fig. 9 : Evolution des températures moyennes mensuelles dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1975-1995).....	46
Fig. 10 : Diagramme ombothermique (Goussen) du bassin versant de l'oued Alougoum (1975-1995).....	47
Fig. 11 : Diagramme ombothermique (Goussen) du sous bassin versant de Bou-Azzer (1975-1995).....	47
Fig. 12 : Comparaison de degré d'aridité mensuel du bassin versant de l'oued Alougoum à celui des bassins de Zagora, Fougoum-Zguid et Assaka (Taznakht).....	50
Fig. 13 : Evolution de degré d'aridité mensuel dans le sous bassin versant de Bou-Azzer.....	50
Fig. 14 : Evaporation potentielle moyenne mensuelle en fonction de la température moyenne mensuelle de l'air dans le bassin versant de l'oued Alougoum (1984-1994).....	52

CHAPITRE III

Fig. 15 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Alougoum.....	63
Fig. 16 : Carte lithologique du sous bassin versant de Bou-Azzer.....	65

Troisième partie

CHAPITRE I

Fig. 17 : District minier de Bou-Azzer : localisation des gîtes et gisements de cobalt, d'amiante et de chromite.....	70
Fig. 18 : Carte géologique de la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa.....	73

CHAPITRE II

Fig. 19 : Répartition des flux de polluants par nature des rejets.....	81
Fig. 20 : Localisation des haldes de mines dans le sous bassin versant de Bou-Azzer.....	83
Fig. 21 : Carte géologique de Bou-Azzer centre, positionnement des haldes de mines.....	84

Fig. 22 : Evolution de la solubilité des haldes de mines en fonction du temps et de la granulométrie.....	88
Fig. 23 : Répartition de l'As par nature de rejets.....	89

Quatrième partie

CHAPITRE I

Fig. 24 : Teneur en As, Se et Ni dans les eaux usées de la mine.....	94
Fig. 25 : Teneurs en Co et Pb dans les eaux usées de la mine.....	95
Fig. 26: Teneurs en Fer et Bi, des eaux usées de la mine.....	96
Fig. 27 : Répartition de l'As soluble et particulaire par rapport à la teneur totale dans les eaux usées des digues cobalt et CMBA.....	96
Fig. 28 : Arsenic en kg/an sous forme totale, soluble et particulaire généré par les haldes de mines.....	98

CHAPITRE II

Fig. 29 : Teneurs en As sous forme totale, soluble et particulaire, Dans les eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui.....	101
--	-----

CHAPITRE III

Fig. 30 : Evolution des teneurs moyennes en As, Co et Ni dans les sédiments Ordinaires et les sédiments issus des haldes de mines.....	111
Fig. 31 : Evolution des teneurs moyennes en Pb, Cu, Zn et Cr dans les sédiments Ordinaires et les sédiments issus des haldes de mines.....	112

CHAPITRE IV

Fig. 32 : Localisation des points de prélèvements des eaux de surface destinées à l'irrigation.....	121
Fig. 33 : Evolution des exportations d'As sous forme totale, soluble et particulaire vers les eaux de surface destinées à l'irrigation, à partir du barrage de Tizgui	123
Fig. 34 : Matières en suspension dans les eaux d'irrigation, avec les variations des rapports Mg/Ca, Na/Mg, SO ₄ /Cl et Na/Cl (prélèvements d'Octobre 1995).....	127
Fig. 35 : Evolution des teneurs totales en As, Se et Co dans les eaux de surface destinées à l'irrigation : confrontation des résultats aux normes en vigueur.....	128
Fig. 36 : Evolution des teneurs en sulfates et sodium dans les eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum : confrontation des résultats aux normes (prélèvements d'Octobre 1995).....	129
Fig. 37 : Degré de pollution en As des eaux de surface destinées à l'irrigation	129
Fig. 38 : Degré de pollution en Co des eaux de surface destinées à l'irrigation	130
Fig. 39 : Degré de pollution en sulfate et sodium des eaux de surface destinées à l'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements d'Octobre 1995).....	130

CHAPITRE V

Fig. 40 : Localisation des points de prélèvements des eaux souterraines destinées à la consommation humaine.....	135
Fig. 41 : Evolution des teneurs moyennes en As sous forme totale, soluble et particulaire dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine : confrontation des résultats aux normes.....	140
Fig. 42: Evolution des teneurs en Se sous forme totale, soluble et particulaire dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine : confrontation des résultats aux normes.....	140
Fig. 43 : Evolution de degré de pollution en As et Se des eaux souterraines destinées à la consommation humaine.....	141

Cinquième partie

CHAPITRE I

Fig. 44: Profil 1 échantillonné dans la parcelle dite Bikchban, situé à 7 km en aval de la mine de Bou-Azzer.....	240
Fig. 45: Profil 2 échantillonné dans la parcelle dite Boutaloust, situé à 12 km en aval de la mine de Bou-Azzer.....	242
Fig. 46 : Profil 3 échantillonné dans la parcelle dite Agdal, situé à 16 km en aval de la mine de Bou-Azzer.....	244
Fig. 47: Profil 4 échantillonné dans la parcelle dite Boulagragra, situé à 18 km en aval de la mine de Bou-Azzer.....	246
Fig. 48 : Profil 5 échantillonné dans la parcelle dite Ben Zaber, situé à 30 km en aval de la mine de Bou-Azzer.....	248
Fig. 49 : Profil 6 échantillonné dans la parcelle dite Majout, situé à 35 km en aval de la mine de Bou-Azzer.....	250
Fig. 50 : Profil 7 échantillonné dans la parcelle dite Tabhirt n'Tanout, situé à 40 km en aval de la mine de Bou-Azzer.....	252
Fig. 51 : Profil 8 échantillonné dans la ferme gérée par les autorités locales de Foum-Zguid, situé à 65 km en aval de la mine de Bou-Azzer.....	254
Fig. 52 : Profil 9 échantillonné dans la ferme de Mr Ibali hammou, situé à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer	256
Fig. 53: Profil 10 échantillonné dans la ferme de Hada Mohamed, situé à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer	258
Fig. 54 : Profil 11 échantillonné dans la parcelle dite Ain Laâsri , situé à l'Est du centre minier de Bou-Azzer et au sein de la boutonnière de Bou-Azzer.....	260
Fig. 55: Profil 12 échantillonné dans la parcelle dite Ouawmslawt, situé au Nord Est de la mine de Bou-Azzer.....	262
Fig. 56 : Profil 13 échantillonné dans la parcelle dite Figuier, situé à 2 km à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer.....	264
Fig. 57 : Profil 14 échantillonné dans la ferme de Mr Elyacoubi hassan, situé à 30 km à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer.....	266
Fig. 58 : Profil 15 échantillonné dans la parcelle dite Akalmou, situé à 32 km à l'Ouest de la mine de Bou-Azzer.....	268
Fig. 59: Recherche de contamination par l'As dans les sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle.....	148
Fig. 60 : Recherche de contamination par le Co dans les sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle.....	149
Fig. 61 : Recherche de contamination par le Ni dans les sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle.....	150
Fig. 62 : Recherche de contamination par le Ba dans les sols cultivés par comparaison verticale ponctuelle.....	151
Fig. 63 : Recherche de contamination par l'As dans les sols cultivés le long de la vallée de l'oued Alougoum (P1 à P5) par comparaison latérale avec des sols de même type situés en dehors de la vallée (P14 et P15).....	153
Fig. 64 : Relation entre arsenic et taux de fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de surface et plus profonds.....	155
Fig. 65 : Relation entre cobalt et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.....	155
Fig. 66 : Relation entre le nickel et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.....	155
Fig. 67 : Relation entre le chrome et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.....	155
Fig. 68 : Relation entre le plomb et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.....	156
Fig. 69 : Relation entre le cuivre et le fer.....	156
Fig. 70 : Relation entre le baryum et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.....	156
Fig. 71 : Relation entre le zinc et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.....	157

Fig. 72 : Relation entre le cadmium et fer pour 47 horizons des sols prospectés, horizons de toutes profondeurs.....	157
---	-----

CHAPITRE II

Fig. 73 : Localisation des points de prélèvements des sols agricoles.....	161
Fig. 74 : Diagramme de texture des sols agricoles étudiés	167
Fig. 75 : Evolution des teneurs moyennes en As dans les horizons labourés des sols prospectés.....	170
Fig. 76: Confrontation des valeurs moyennes mesurées (Vm) en As des sols cultivés aux valeurs d'intervention corrigées (Vc) et seuils d'investigation (Si).....	171
Fig. 77 : Degré de pollution en As des horizons labourés des sols agricoles prospectés.	172

CHAPITRE III

Fig. 78 : Teneurs en As, Co, Ni et Se dans la luzerne : confrontation des résultats aux normes.....	181
Fig. 79 : Teneurs en As, Co, Ni et Se dans le palmier dattier : confrontation des résultats aux normes.....	182
Fig. 80 : Teneurs en As, Co, Ni et Se dans le grenadier : confrontation des résultats aux normes.....	183
Fig. 81 : Teneurs en As, Co, Ni et Se dans la vigne : confrontation des résultats aux normes.....	184
Fig. 82 : Teneurs en As, Co, Ni et Se dans le figuier : confrontation des résultats aux normes.....	185
Fig. 83 : Teneurs en As, Co, Ni et Se dans l'amandier : confrontation des résultats aux normes.....	187
Fig. 84 : Teneurs en As, Co, Ni et Se dans l'olivier : confrontation des résultats aux normes.....	188
Fig. 85 : Teneurs moyennes en As dans la luzerne et l'arboriculture fruitière.....	189
Fig. 86 : Teneurs moyennes en Co dans la luzerne et l'arboriculture fruitière	189
Fig. 87 : Teneurs moyennes en Ni dans la luzerne et l'arboriculture fruitière	189
Fig. 88 : Teneurs moyennes en Se dans la luzerne et l'arboriculture fruitière	189

CONCLUSION GENERALE

Fig. 89 : Bilan quantitatif des rejets miniers stockés dans le périmètre de la mine.....	194
Fig. 90 : Bilan global d'As stocké dans les rejets miniers en amont du barrage de Tizgui.....	195
Fig. 91 : Bilan géochimique de l'As dans le système fluvial de sous bassin versant de Bou-Azzer en amont du barrage de Tizgui.....	197
Fig. 92 ; Bilan géochimique de l'As dans le système fluvial de l'Assif n'Talkhert en aval du barrage de Tizgui et provenant de la mine actuelle.....	198
Fig. 93 : Cycle géochimique de l'As dans les écosystèmes de la vallée de l'oued Alougoum (Zaouit Sidi Blal à Foum-Zguid).....	199
Fig. 94 : Schéma général de transport et de la contamination par l'As le long de la vallée de l'oued Alougoum en aval du barrage de Tizgui.	204



LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Deuxième partie

CHAPITRE I

Tableau 1 : Population installée le long de la vallée de l'oued Alougoum (recensement 1994), source : autorités locales de Taznakht et de Foum Zguid.....	31
Tableau 2 : Surface utile agricole en hectare dans la vallée de l'oued Alougoum, source : CMV de Taznakht et de Foum-Zguid.....	36
Tableau 3 : Surface occupée par les céréalicultures et cultures fourragères dans la vallée de l'oued Alougoum, source : CMV de Taznakht et de Foum-Zguid.....	36
Tableau 4 : Rendements des différentes spéculations des surfaces utiles agricoles irriguées pour les campagnes 1980/1981 et 1995/1996, source CMV de Taznakht et de Foum-Zguid.....	37
Tableau 5 : Arboriculture fruitière (nombre de pied productif : 1995/1996) dans la vallée de l'oued Alougoum, source CMV de Taznakht et de Foum-Zguid.....	37
Tableau 6 : Répartition des troupeaux dans la vallée de l'oued Alougoum (1995/1996), source : CMV de Taznakht et de Foum-Zguid.....	39

CHAPITRE II

Tableau 7, annexe 1 : Hauteur des précipitations annuelles (mm) au poste de Foum-Zguid.....	206
Tableau 8, annexe 1 : Hauteur des précipitations annuelles (mm) au poste de Zagora.....	207
Tableau 9, annexe 1 : Hauteur des précipitations annuelles (mm) au poste d'Assaka (Taznakht).....	209
Tableau 10, annexe 1 : Pluies mensuelles moyennes (mm) aux postes de Zagora, Foum-Zguid, Assaka, Bassin versant de l'oued Alougoum et dans le sous bassin versant de Bou-Azzer.....	210
Tableau 11, annexe 1 : Températures maximales et minimales absolues mensuelles (°C) au poste de Zagora (1964-1995).....	211
Tableau 12, annexe 1 : Températures maximales et minimales absolues mensuelles (°C) au poste de Foum-Zguid (1984-1993).....	212
Tableau 13, annexe 1 : Températures maximales et minimales absolues mensuelles (°C) au poste d'Assaka (1975-1996).....	213
Tableau 14 : Degré d'aridité et indice d'humidité annuel dans le bassin versant de l'oued Alougoum et le sous bassin versant de Bou-Azzer (1975-1995).....	49
Tableau 15 : Limites climatiques des subdivisions des régions sèches, d'après F. Joly (1957).....	49
Tableau 16 : Paramètres climatiques du bassin versant de l'oued Alougoum.....	53
Tableau 17 : Paramètres climatiques du sous bassin versant de Bou-Azzer.....	54

CHAPITRE III

Tableau 18 : Lame d'eau moyenne dans les bassins versant de l'oued Alougoum, Zagora et Assaka (Taznakht) et sous bassin de Bou-Azzer.....	57
Tableau 19 : Coefficient d'infiltration et débit spécifique dans la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa, d'après ; ROBAUX, 1939 ; G. TUILLE, 1953.....	58
Tableau 20 : Bilan global hydrologique de la boutonnière de Bou-Azzer Elgrâa.....	60

Troisième partie

CHAPITRE I

Tableau 21: Principaux arséniures et sulfoarséniures de Co, Ni et Fe dans les gisements de cobalt de Bou-Azzer, d'après M. Leblanc, 1975.....	75
---	----

CHAPITRE II

Tableau 22, annexe 2 : Bilan global des stériles de mines.....	215
Tableau 23, annexe 2 : Bilan global des rejets Hancock.....	216
Tableau 24, annexe 2 : Bilan global des haldes de mines.....	217
Tableau 25 : Bilan quantitatif des rejets miniers stockés à l'intérieur du District minier de Bou-Azzer.....	80
Tableau 26, annexe 2 : Teneurs moyennes en arsenic et éléments associé, des stériles de mines.....	218
Tableau 27, annexe 2 : Teneurs moyennes en arsenic et éléments associé, des rejets Hancock.....	219
Tableau 28, annexe 2 : Teneurs moyennes en arsenic et éléments associé, des haldes de mines.....	220
Tableau 29 : Composition minéralogique des haldes de mines.....	82
Tableau 30 : Nature lithologique des terrains porteurs des haldes de mines.....	85
Tableau 31 : Résultats chimiques des tests de lixiviation des haldes de mines.....	87
Tableau 32, annexe 2 : Stock de polluants minéraux disséminés dans les stériles de mines.....	221
Tableau 33, annexe 2 : Stock de polluants minéraux disséminés dans les rejets Hancock.....	222
Tableau 34, annexe 2 : Stock de polluants minéraux disséminés dans les haldes de mines.....	223
Tableau 35 : Bilan global des polluants minéraux disséminés dans les rejets miniers.....	89

Quatrième partie

CHAPITRE I

Tableau 36, annexe 3 : Teneurs en polluants minéraux sous forme totale, soluble et particulaire, des eaux usées de la mine.....	225
Tableau 37 : Bilan hydrologique des haldes de mines.....	97
Tableau 38, annexe 3 : Bilan global approximatif des polluants minéraux susceptible d'être libérés par les haldes de Mines de Bou-Azzer.....	226

CHAPITRE II

Tableau 39, annexe 3 : Teneurs en polluants minéraux des eaux de surface à la sortie du barrage de Tizgui.....	227
Tableau 40 : Exportations et formes de dispersions des polluants dans le système fluvial du sous bassin versant de Bou-Azzer.....	103
Tableau 41 : Bilan quantitatif annuel approximatif des transferts des polluants Vers l'oued Alougoum en aval du barrage de Tizgui.....	105
Tableau 41 bis annexe 5 : Projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux de surface.....	270

CHAPITRE III

Tableau 42 : Teneurs moyennes en polluants minéraux dans les sédiments ordinaires, le long de le long de l'oued Alougoum.....	108
Tableau 43 : Teneurs moyennes en polluants minéraux dans les sédiments issus des haldes de mines, le long de l'oued Alougoum.....	109
Tableau 44 : Géochimie des roches ophiolitiques, des roches ultrabasiques de Tachdamt et des granodiorites tardi tectonique en g/t.....	113

CHAPITRE IV

Tableau 45, annexe 3 : Teneurs en polluants minéraux des eaux de surface destinées à l'irrigation (prélèvements d'Octobre 1995).....	228
Tableau 46, annexe 3 : Teneurs moyennes en polluants minéraux des eaux de surface destinées à l'irrigation (prélèvements Juin 1997).....	229
Tableau 47 : Forme de dispersion et teneurs moyennes en As dans les eaux de surface destinées à l'irrigation (prélèvements Juin 1997).....	122

Tableau 48 : Forme de dispersion et teneurs en Se dans les eaux d'irrigation prélèvements Juin 1997).....	124
Tableau 49 : Teneurs en arsenic, sulfate et sodium dans les eaux d'irrigation le long de la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements d'Octobre 1995).....	124
Tableau 50 : Principaux rapports ioniques et pH des eaux de surface dans la vallée de l'oued Alougoum (prélèvements du mois d'Octobre 1995).....	125
Tableau 51 annexe 5 : Projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux de surface destinées à l'irrigation.....	271

CHAPITRE V

Tableau 52, annexe 3 : Teneurs moyennes en polluants minéraux des eaux souterraines destinées à la consommation humaine en ($\mu\text{g/l}$).....	230
Tableau 53 : Forme de dispersion et teneurs moyennes en arsenic dans le système aquifère de la vallée de l'oued Alougoum.....	136
Tableau 54 : Forme de dispersion et teneurs moyennes en arsenic, dans le système aquifère témoin.....	136
Tableau 55 : Forme de dispersion et teneurs en sélénium dans le système aquifère de la vallée de l'oued Alougoum.....	137
Tableau 56 : Forme de dispersion en sélénium dans le système aquifère témoin.....	137
Tableau 57 : Forme de dispersion et teneurs moyennes en plomb dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine.....	138
Tableau 58 annexe 5 : Projet de normes marocaines relatives à la qualité des eaux destinées à la production de l'eau potable.....	273

Cinquième partie

CHAPITRE I

Tableau 59 : Localisations des profils pédologiques réalisés.....	146
Tableau 60, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Zaouit Sidi Blal par comparaison verticale ponctuelle (profil P1).....	232
Tableau 61, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Amazzer par comparaison verticale ponctuelle (profil P2).....	234
Tableau 62, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Ait Aissa par comparaison verticale ponctuelle (profil P3).....	236
Tableau 63, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Ait M'rabt par comparaison verticale ponctuelle (profil P4).....	238
Tableau 64, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Tassstift par comparaison verticale ponctuelle (profil P5).....	240
Tableau 65, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Foug-Eloued par comparaison verticale ponctuelle (profil P6).....	242
Tableau 66, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Alougoum par comparaison verticale ponctuelle (profil P7).....	244
Tableau 67, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Foug-Zguid par comparaison verticale ponctuelle (profil P8).....	246
Tableau 68, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Tagragra par comparaison verticale ponctuelle (profil P9).....	248
Tableau 69, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Taloust par comparaison verticale ponctuelle (profil P10).....	250
Tableau 70, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Tiddiline par comparaison verticale ponctuelle (profil P11).....	252
Tableau 71, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Talamine par comparaison verticale ponctuelle (profil P12).....	254
Tableau 72, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Figuier par comparaison verticale ponctuelle (profil P13).....	256
Tableau 73, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Assaka par comparaison verticale ponctuelle (profil P14).....	258
Tableau 74, annexe 4 : Recherche des contaminations des sols cultivés à Taznakht Kasbah par comparaison verticale ponctuelle (profil P15).....	260

Tableau 75 : Confrontation des seuils d'investigations proposés pour les sols agricoles du bassin versant de l'oued Alougoum aux valeurs guides maximum pour les concentrations admissibles dans les terres agricoles.....	159
--	-----

CHAPITRE II

Tableau 76, annexe 5 : Valeurs limites de concentration en éléments en traces dans les sols lors de la valorisation agricole de boues d'épuration.....	274
Tableau 77, annexe 5 : Valeurs guides maximum pour les concentrations admissibles dans les terres agricoles.....	275
Tableau 78, annexe 5 : Valeurs de base et d'intervention pour les sols (en mg/kg de matière sèches).....	276
Tableau 79, annexe 5 : Valeurs constantes de correction A, B et C en fonction des éléments pour formules de correction dans les sols.....	277
Tableau 80 : Granulométrie des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum (horizons 0 - 25 cm).....	165
Tableau 81 : Degré d'humification et variation des teneurs en matière organique carbone total, carbone organique et azote dans les sols cultivés	169
Tableau 82, annexe 4 : Teneurs moyennes en polluants minéraux des sols cultivés dans le bassin versant de l'oued Alougoum	262
Tableau 83, annexe 4 : Niveau de concentration pour différents éléments des sols vierges	263
Tableau 84, annexe 4 : Valeurs corrigées (Vc) par rapport aux valeurs d'intervention (Vi) des sols prospectés dans le bassin versant de l'oued Alougoum.....	264
Tableau 85, annexe 4 : Confrontation des teneurs moyennes mesurées (Vm) en polluants minéraux des sols prospectés aux valeurs d'intervention corrigées (Vc) et seuils d'investigations (Si)	265
Tableau 86 : Sols cultivés dont les teneurs moyennes en Co, Ni, Pb et Zn dans les horizons labourés sont comprises entre le seuil d'investigation (Si) et la valeur d'intervention corrigée (Vc)	172
Tableau 87 : Accroissement en As dans les horizons labourés des sols pollués le long de la vallée de l'oued Alougoum (1930 -1998).....	173

CHAPITRE III

Tableau 88, annexe 4 : Arboricultures fruitières et cultures fourragères prélevées dans le bassin versant de l'oued Alougoum.....	266
Tableau 89, annexe 5 : Valeurs guides maximum pour les concentrations dans la terre, les végétaux et apports maximaux admissibles pour les animaux et l'homme (FAO, 1976).....	278
Tableau 90, annexe 5 : Apports maximaux admissibles par semaine en As, Cd, Hg, Pb et Cu (FAO/OMS, 1976).....	278
Tableau 91, annexe 5 : Teneurs maximales pour les éléments en traces indésirables dans l'alimentation des animaux.....	279
Tableau 92, annexe 5 : Valeurs recommandées pour le Cd, Pb et Hg dans les denrées alimentaires en Allemagne.....	280
Tableau 93, annexe 4 : Teneurs en As, Co, Pb, Ni et Se dans les plantes exposées et irriguées par l'oued Alougoum	267
Tableau 94, annexe 4 : Teneurs en As, Co, Pb, Ni et Se dans les plantes témoins récoltées en dehors de la vallée de l'oued Alougoum.....	268



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- ADRIANO. D C**, 1986. Trace elements in the terrestrial environ. Springer-Verlag, New York, 533 p.
- AFNOR**, 1991. Produits organiques. Amendements organiques, supports et milieux de culture. Echantillonnage. Normes expérimentales U44-101. pp. 339-344 In Recueil de normes française, Afnor, Paris La Défense.
- ALLOWAY. B J**, 1992. Land. Contamination and reclamation, pp. 137-164, In R M Haason (ed). Understanding our environment : an introduction to environment chemistry and pollution, Royal society of chemistry, Cambridge.
- ANDRED**, 1988. La valorisation agricole des boues des stations d'épuration urbaines. Cahier technique de la direction de l'eau et de la prévention des pollutions et des risques n° 23, 117p.
- ANALUSIS** . Revue mensuelle de la société de 1997, chimie industrielle et de la société française de chimie, An - international – Analytical - chemistry, Novembre-Décembre 1997 : Dossier Soil pollutants/ Polluants des sols, vol 25, n° 9-10, publications ELSEVIER, 358 p.
- AZIZI. R S**, 1990 . Géologie du Précambrien Terminal (III) et traitement statistique des données Géochimique de Prospection dans la boutonnière de Bou-Azzer El Grâa (Anti- Atlas, Maroc), 265 p.
- BAIZE. D** , 1997. Détection de contamination modérée en éléments traces dans les sols agricoles, Analisis Magazine, 1997, vol 25, n° 9-10, pp 29-34.
- BAIZE. D, JABIOL, B**, 1995. Guide pour la description des sols, Technique et Pratique, éd INRA, 369 p.
- BISPO. A, JOURDAIN. MJ, JAUZEIN. M**, 1997. Les apports de tests d'écotoxicité à l'analyse d'une terre contaminée, Analisis Magazine, 1997, vol 25, n° 9-10, pp 66 - 69.
- BONNEAU. M, SOUCHEIR. B**, 1979. Pédologie, Constituants et Propriétés du Sol, éd MASSON, Paris New York- Milan, 454 p.
- BURGHELLE. J**, 1935. Les minéraux oxydés du gisement de cobalt de Bou-Azzer (Anti-Atlas), notes et Mém n° 36, 59 p.
- CHAMAYOU. J.**, 1966 . Hydrogéologie de la vallée du Drâa moyen, thèse, Montpellier, pp 28 - 211.
- DUCHAUFOR. Ph**, 1977. Pédologie, Pédogenèse et Classification, éd MASSON, Paris- New York- Barcelone - Milan, 469 p.
- DUCHAUFOR. Ph**, 1984 - Pédologie, éd MASSON, Paris - New York – Barcelone - Milan -São Paulo, pp 5 - 149
- DIMANCHE. P**, 1993. Consultation en Ecologie et Planification de l'utilisation des sols, Direction de l'hydraulique, Arrondissement de Ouarzazate, 1981. Aménagement hydraulique de milieu rural, étude de l'alimentation en eau de 39 douars dans l'annexe de Taznakht Province de Ouarzazate. Résultats d'une campagne de 29 sondage à l'air de reconnaissance et dossier technique complet des aménagements proposés, pp. 25 - 110.
- EDELIN. F**, 1992. Epurification physico-chimique des eaux, théorie et technologie, éd CEREDOC, 283 p.
- Enquête Hydrogéologique et réalisation de 34 sondages à l'air de reconnaissance pour l'alimentation en eau de 26 localités nécessiteuses dans la région de Fourn-Zguid, Annexe de Fourn-Zguid Province de TATA, 1991. Exposé des résultats obtenus et Dossiers des Aménagements Hydrauliques proposés, 156 p.
- EWERS. U**, 1991 - Standards, guidelines, and legislative regulations concerning metals and their compounds, pp. 687-711 In E Merian (ed). Metals and their compounds in the environment : occurrence, analysis and biological relevance, VCH, Weinheim.

- FAO/OMS**, 1976. Liste de concentrations maximales de contaminants recommandées par la commission mixte FAO/OMS du codex alimentarius, deuxième série. Secrétariat du Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires, CAC/FAL, FAO, Rome.
- FAO**, 1986. Consultation 1985 du réseau coopératif européen sur les oligo-éléments, Murat-le-Quaire 17-20/09/1985, FAO, Rome.
- HERBET. G, SEYMOUR. J.** Sauvons la planète, Guide pratique 160 mesures concrètes pour la préservation de l'environnement (ed), Hachette, 187 p.
- Institut français de l'environnement (Ifen), 1994-1995. L'Environnement en France, éd DUNOD, 400 p.
- JACKSON. A P, ALLOWAY. B J**, 1992. The transfert of cadmium from agricultural soils to the human food chain, in D C Adriano (éd) Biogeochemistry of trace metal, Lewis publishers, Boca raton, Florida. pp 109 -158.
- JEMALI. A, MOHAMMI. A**, 1996. Manuel des méthodes d'analyses des eaux, des végétaux et des sols, pp 2-127.
- KABBAJ. A, COMBE**, 1977. Ressources en eau du Maroc, Tome 3, domaine atlasique et Sud atlasique, éd du Serv. Géol. Maroc , pp 160 à 298.
- KHABATTAK, - PENDIAS. A.** 1992. Traces Elements in Soils and Plants, 2nd Edition. CEC Press Inc, Boca Raton Florida, USA, 365 p.
- LEBLANC. M**, 1981, Ophiolites précambriennes et gîtes arséniés de cobalt (Bou-Azzer - Maroc) Notes et Mém. Serv. Géolog. n° 280, 305 p.
- LEBLANC M.** 1973. Les formations infra-cambriennes de Bou-Azzer (Anti-Atlas central, Maroc) : Lithostratigraphie, tectonique et position structurale. Notes et Mém. Serv. Géolog. T 34, n°. 254, pp. 7 - 14.
- LEBLANC. M, LANCELOT. J. R**, 1980. Interprétation géodynamique du domaine panafricain (Précambrien terminal) de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir de données géologiques et géochronologiques. Can ; J. Earth Sci., 17, pp. 142-155.
- L'environnement en France, 1994-1995 éd Dunod, Ifen, 398 p.
- Les Entretiens de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie, palais des congrès de Nancy, 18 Juin 1993 : l'eau, la terre et l'homme, 31 p.
- LIBBEY. j**, 1994. Science et changements planétaires vol 5 n° 4, éd AUPELE. UREF, pp 223 à 286.
- MARSILY. G**, 1994. Hydrogéologie, comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants, Ecole des mines de PARIS, 243 p.
- MATEI. B**, 1974. Pollution et protection de l'atmosphère, ING ; PASCU- URSU, éd Technica BUCAREST, éd EYROLLE, Paris, 304 p.
- MENCH. M**, 1993. Notions sur les éléments en traces pour une qualité des sols et des produits végétaux. Purpan, 106, 118-127, 166.
- MENCH. M, AMANS. V , ARROUAYU. D, DIDIER. V, FARGUES. S, GOMEZ. A, LOFFLER. M, MASSON.P, SPITERI. P, et WEISSEHORN. I**, 1993. Réhabilitation in situ de sols pollués par le plomb issu d'émissions industrielles : efficacité de phases fixatrices introduites dans le sol pour réduire la mobilité et la biodisponibilité du plomb, 127 p.
- Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate, étude des périmètres de petite et moyenne hydraulique de la zone d'action de l'ORMVA de Ouarzazate : Fiche des périmètres de l'ensemble de Bani (0164/DRA/FP 9), pp 1- 32.

Ministère de l'Agriculture et de la Reforme Agraire , Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate, Décembre 1988 : Etude hydrologique du bassin versant de l'oued Alougoum pour la réalisation d'un barrage de déviation des eaux de crues, Technoexportstoy, 36 p.

Ministère des Travaux Publics de la Formation Professionnelle et de la Formation des Cadres, Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, Septembre 1994. Etude du plan directeur de l'aménagement des eaux des bassins du Guir, Ziz, Rheris et Drâa, SOGREAH Ingénierie, pp 1 à 86.

Ministère de l'Agriculture et de la Reforme Agraire , Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate, Septembre 1991. Projet d'amélioration des terrains de parcours de la région de Ouarzazate, rapport de synthèse de l'entretien organisé à Ouarzazate, 41 p.

Ministère de l'Agriculture et de la Reforme Agraire , Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate. Différentes manifestations de la dégradation de l'environnement dans la zone d'action de L'O.R.M.V.A de Ouarzazate, 9 p.

NAHAL. I, 1975. Principe de conservation du sol, (éd) MASSON, 136 p.

OUTABIHT. H, IGHAZRAN. M., KHANA. A, 1990. Séminaire sur les Perspectives de Développement Agricole au Maroc, dégradation du patrimoine foncier des régions semi arides et les mesures de sauvegarde, 37 p.

REMENIERAS. G. Hydrologie de l'ingénieur, éd Eyrolles Paris, pp 231 à 456.

RICOUR. J, LALLEMAND. A, 1994 . Sites pollués et Déchets 750 définitions pour un langage commun, éd BRGM n° 26, 128 p.

SAMAMA. J. C, GEOSUM. Formulation d'une Politique Environnementale Minière (PEM) à Madagascar, rapport final, 278 p.

SAMAMA. J. C, 1995. Bases physico-chimiques et géologiques de la prospection géochimique, Document CESEV-ENSG, 23 p.

Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement, 1988. Manuel de l'Observatoire de la Qualité des sols (OQS). Direction de l'eau et de la prévention de la pollution et des risques. Ministère de l'environnement, Neuilly sur Seine.

TARDY. Y. le Cycle de l'eau, Climats, Paléoclimats et géochimie globale, éd Masson, Paris , Nex Tork, Barcelone, Milan , Mexico, Saplo Paulo, p 301.

Technoexportstoy, 1988. Etude hydrologique du bassin versant de l'oued Alougoum pour la réalisation d'un barrage de dérivation des eaux de crues, 35 p

Technoexportstoy, 1990. Protection des berges, périmètres de Fom-Zguid, Rabat, marché n° 13/89/OR/07, pp 4 - 25.

TRICART. T, CAILLEUXC. A, 1969. Traité géomorphologie, les modelés des régions sèches, vol IV, société d'édition d'enseignement supérieur Paris, 471 p

UNESCO-PNUE, 1995. Education relative à l'Environnement, quo vadis ? vol, XX, n° 2, pp 1 à 5.

UNESCO-PNUE, 1994. Désertification, l'Education Environnementale à la Ressource, vol, XIX, n° 3, 12 p.

UNESCO-PNUE, 1994. Population, Oeuvrer pour un développement équitable et durable en harmonie avec l'environnement, vol, XIX, n° 4 , 12 p.

VALENCE, G., 1969. Travaux pratiques de chimie minérale, ENSG de Nancy, 92 p.

VIERTMANN. W, 1993. Projet de lutte contre la désertification dans la vallée du Drâa , la maîtrise des ruissellements pour la production Agricole - étude préliminaire, 58 p.

AUTORISATION DE SOUTENANCE DU DIPLOME DE THESE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur SAMAMA Jean-Claude, Professeur, ENSG - INPL

Monsieur TOLLON Francis, Directeur de Recherche, Université Sabatier, Toulouse

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur BERDOUZI El Houssaine

à soutenir devant l'**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,**

le :

DIPLOME DE THESE

Spécialité : **"GEOSCIENCES"**

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDŒUVRE CEDEX

Fait à Vandoeuvre le, 29 septembre 1999

Le Président de l'I.N.P.L.,

J. HARDY



Résumé

Ce travail s'inscrit dans les préoccupations actuelles de la pollution de l'environnement par différents facteurs qu'ils soient liquides ou solides. Les gisements de cobalt de Bou-Azzer (Anti-Atlas central- Maroc) dans lesquels l'arsenic est un élément majeur du minerai, répondent par excellence à ces formes de pollution. En effet, les exploitations anciennes et les exploitations actuelles ont engendré une décharge minière dont on compte aujourd'hui plus de 1 166 843 t de haldes de mines (rejets fins arsénisés inférieurs à 100 μm). La quantité d'As disséminée dans les haldes de mines s'élève actuellement à 25 214 t. Ces haldes, présentent une dissolution lente et un risque de pollution des eaux d'inhibition et de percolation à travers les stocks accumulés sous forme de digues dans le sous bassin versant de Bou-Azzer qui constitue le berceau des principales crues de l'oued Alougoum.

L'importance de certains processus atmosphériques par les conditions climatiques propres à la région, la nature lithologique des terrains et la violence du ruissellement, jouent un rôle déterminant dans la dispersion de l'As et éléments associés autour de la mine. Les flux migratoires d'As vers la vallée de l'oued Alougoum, à partir de la mine actuelle sont de l'ordre de 39 kg As/an dont 97 % d'As sous forme soluble ($< 0,45 \mu\text{m}$). En différents secteurs stratégiques de la vallée de l'oued Alougoum, la contamination par l'As des écosystèmes a été bien caractérisée en intensité et en extension: les sédiments ordinaires contiennent jusqu'à 750 mg As/kg, les produits de haldes de mines entraînés par ruissellement, recèlent des teneurs moyennes qui se situent dans une gamme de 200 à 2 860 mg As/kg.

S'agissant des sols agricoles, trois démarches qui sont à la fois analogiques et pédologiques ont été testées et ont fait la preuve de leur efficacité. Elles ont permis de discriminer héritage naturel et ce qui résulte de contamination d'origine anthropique. De fortes teneurs en As d'origine minière ont été détectées dans les horizons labourés (0 - 25 cm) des sols cultivés de la vallée de l'oued Alougoum. Ces sols, présentent une contamination par l'As de 2 à 4 fois le seuil de toxicité admis. Cette pollution influente dans un grand rayon d'action (45 km), se traduit par des teneurs moyennes qui varient de 100 à 225 mg As/kg de terre. Sur la période 1930 - 1998, l'accroissement en As dans les terres cultivées s'élève à 1,73 mg As/kg de terre et par an soit 3,89 kg As/ha/an.

La pollution du couvert végétal semble aussi avoir une intensité et une extension considérable qui pourrait susciter des craintes importantes. Les teneurs moyennes sont de 12 mg As/kg M.S (luzerne) et 6,73 mg As/kg M.S (arboriculture fruitière). La cause principale de l'augmentation rapide de la contamination du milieu naturel au cours de ce siècle est la rupture des cycles écologiques par les activités minières anciennes qui n'ont pas pris en compte le devenir des rejets arsénisés de la mine.

Au bassin versant de l'oued Alougoum, à côté des risques liés aux exploitations minières de cobalt, il existe deux sources de l'arsenic pouvant créer des dégâts environnementaux, à savoir: les structures précambriennes de la boutonnière de Bou-Azzer constituées notamment des serpentines contenant 20 à 360 g As/t et les sédiments de l'oued Alougoum très pollués sur de grandes distances. Ces sédiments témoignent d'un passif environnemental qui pose en effet, de sérieux problèmes difficiles à résoudre actuellement et les améliorations en ce sens sont très difficiles à mettre en œuvre.

Dans la situation actuelle, au niveau du centre minier de Bou-Azzer en amont du barrage de Tizgui, il est possible de réduire fortement les flux d'As par des mesures simples à mettre en œuvre (construction d'un bassin de décantation avec neutralisation et fixation de l'As juste en aval des digues opérationnelles, renforcement des barrages de filtration existants, aménagement des tranchées perpendiculaires aux vents dominants (SW - NE) ou des brises vents pour freiner le mouvement des particules fines sous forme de poussières riches en arsenic et provenant des haldes de mines.

Pour le futur environnemental, il est néanmoins indispensable de prévoir la gestion et la remise en état des sites miniers après fermeture, d'élaborer un schéma directeur d'une véritable politique ayant pour objectif d'assurer une surveillance opérationnelle des rejets miniers pour limiter les émissions dans les écosystèmes.

Un schéma général de dispersion et de la contamination par l'As le long de la vallée de l'oued Alougoum a été élaboré. Sur ce schéma apparaissent les sources majeures de la pollution et les liens de cause à effet de la pollution (voies de transport, accumulation, voies de l'intoxication et la cible). Il s'agit d'un modèle qui pourrait être utilisé comme technique d'investigation dans d'autres mines présentant un risque de pollution. Mais pour chaque recherche, il est indispensable de construire un schéma spécial et de bien spécifier la cible. L'utilisation de ce schéma permet de préciser la direction de la recherche et de concentrer les efforts sur l'évaluation de la pollution et de la vulnérabilité de la cible.

Mots clés : Bou-Azzer - Arsenic (As) - décharge minière - haldes de mines - pollution - dispersion - ruissellement - vallée de l'oued Alougoum - contamination - anthropique - écosystèmes - bassin versant de l'oued Alougoum - serpentines.