

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Minier



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

En Génie Minier

Sujet :

Proposition d'une méthode d'exploitation du gisement de bentonite de Mostaganem sur la base d'une analyse statistique multidimensionnelle

Proposé par : BENTAL (filiale de l'ENOF)

Dirigé par :

Dr. Kamel OMRACI

Présenté et étudié par :

Mohamed OUAHAB

Promotion 2007/2008

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord «ALLAH» le tout puissant.

Je tiens, à témoigner ma sincère reconnaissance à Monsieur Kamel OMRACI qui m'a encadré et dirigé ce travail avec rigueur et disponibilité. Il m'a inculqué une partie de ses qualités scientifiques grâce à de nombreux conseils et avis sur les travaux que j'ai pu entreprendre. De plus, il a su partager son expérience au cours de discussions afin de m'éclairer lors de mes moments de doutes. Ainsi, pour tous les côtés positifs que je veux retenir ici, je voudrais lui exprimer un grand merci.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département de génie minier.

Je tiens à remercier vivement les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce modeste travail.

Que tous mes amis, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur soutien moral dont ils ont fait preuve à mon égard.

Enfin, que tous ceux, qui de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce travail trouvent ici l'expression de mes meilleurs remerciements.

DÉDICACE

À ma mère

À mon père

À mes frères

À tous mes amis

Je dédie ce travail

Mohamed

ملخص :

أطيان البنتونيت تعرف عملية الإستغلال و الإستخراج منذ ما يناهز الخمسين عاماً في منطقة مْزِيلَة -ولاية مستغانم-، تشكل بنتونيت مْزِيلَة خضع لقواعد جيولوجية بسيطة لكن تفصيلاتها الهندسية تعرف تعقيدا أكبر، معززة بحكم تمييز أطيان بنوعيات مختلفة. حاولنا تحسين درايتنا بهذا المنجم بإستعمال التحليل الإحصائي الإعتيادي و المتعدد الأبعاد (طريقة التحليل بالمركبات الأساسية). المعطيات المتوفرة عبارة عن نتائج تحليلات ريولوجية لأحاديد أُقْتُطِعَت في طبقات البنتونيت. التحليل الإحصائي سمح لنا بإيضاح أهمية التعرف على تغير المعايير الريولوجية في هذا المنجم من أجل إيجاد أحسن تسير لعمليات الإزالة، الإستخلاص و تصنيف مستودعات البنتونيت.

كلمات مفتاحية :

البنتونيت، مْزِيلَة، أطيان، إحصاء، التحليل بالمركبات الأساسية، الإستغلال، تصنيف.

Résumé :

Des argiles bentonitiques sont exploitées depuis une cinquantaine d'années, dans la région de M'ZILA (W.Mostaganem). La genèse de ce gisement de bentonite obéit à des règles géologiques simples mais leur géométrie détaillée présente une grande complexité, renforcée par le fait qu'on doit distinguer des argiles de qualités très différentes. Pour cela, on essaie de mieux connaître ce gisement en utilisant les analyses statistiques simple et factorielle (avec la méthode ACP). Les données disponibles sont les résultats d'analyses rhéologiques des rainures prélevées dans des couches de bentonite.

Les analyses statistiques nous permettent de mettre en évidence l'importance d'une connaissance de la variabilité des paramètres rhéologiques dans ce gisement pour mieux gérer les opérations de découverte, d'extraction et de classification des dépôts de bentonite. Ainsi deux grands secteurs ont été identifiés (secteur à bentonite de forage et hors bentonite de forage). L'orientation de l'exploitation tient compte de cette répartition sectorielle

Mots clés :

Bentonite, M'ZILA, argiles, statistique, ACP, exploitation, orientation.

Abstract :

The bentonitic clays have been mined for more than a fifty years, in the area of M'ZILA(W.Mostaganem). The genesis of the bentonitic deposit obeys the simple geological rules, but their detailed geometry has a great complexity, reinforced by the fact that one must distinguish from clays, very different qualities.

The available data are the results of rheological analysis of the bentonitic core samples. This data are used to improve our knowledge on the bentonite compositions of different classes and different deposits by using the usual and principal component analysis (PCA).

We insist on the importance of the variability of the rheological parameters on the management of mining, extraction/classification and production. We show how the use of these statistical analysis can help us to better manage discovering, extraction, from the bentonite deposits. Also two sectors were identified (sector of drilling bentonit and sectors outside of drilling bentonit). The exploitation take something of bentonit sector.

Keywords:

Bentonit, M'ZILA, clays, statistics, PCA, exploitation, classification

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. INTRODUCTION GENERALE	1
--------------------------------	---

CHAPITRE I

I. LES ARGILES BENTONITIQUES ET LEURS USAGES.....	5
A. INTRODUCTION	5
B. ARGILES	5
C. LA BENTONITE.....	8
C.1. HISTORIQUE	8
C.2. DÉFINITION.....	8
C.3. AUTRES MINÉRAUX DE BENTONITE	9
C.4. CLASSIFICATION DE LA BENTONITE	9
C.5. ABSORPTION D'ION.....	9
C.6. STRUCTURE DE LA MONTMORILLONITE	9
C.7. ASPECT MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE	10
C.8. LES CONDITIONS DE FORMATION DE LA BENTONITE	11
C.9. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES BENTONITES	12
C.10. LES PRINCIPALES UTILISATIONS DE LA BENTONITE	13

CHAPITRE II

I. GÉOLOGIE DU GISEMENT	17
A. GÉOLOGIE REGIONALE	17
A.1. INTRODUCTION	17
A.2. STRATIGRAPHIE	19
B. GÉOLOGIE LOCALE	23
B.1. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE.....	23
B.2. APERÇU GÉOLOGIQUE DU SITE :	23
B.3. CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU GISEMENT	25
B.4. CARACTÉRISTIQUES DES COUCHES	25
B.5. CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DE LA BENTONITE DE MOSTAGANEM	28

B.6. SPECIFICATION DE LA BENTONITE DE MOSTAGANEM SELON LES USAGES DE LA BENTONITE :	29
II. CALCULS DES RESERVES DU GISEMENT DE M'ZILA(MOSTAGANEM)	30
A. LES CRITERES MINIMUMS QUALITE ADOPTES POUR L'EVALUATION DES RESERVES DANS LE RAPPORT SONAREM 1972	30
B. LES CRITERES MINIMUM QUALITE ADOPTÉES POUR L'EVALUATION DES RESERVES DANS LE RAPPORT SIDAM (1979)	30
C. TRAVAUX REALISÉS ET DEGRE DE CONNAISSANCES	31
C.1. TRAVAUX SONAREM1971	31
C.2. TRAVAUX SIDAM 1977/1981	31
C.3. TRAVAUX SIDAM (1994)	32
C.4. PROJET QUALITE 2000-2001	35
C.5. SYNTHESE DES TRAVAUX	39
CHAPITRE III	
I. INTRODUCTION	41
II. LES EXIGENCES DU PLAN DE CONTRÔLE	41
III. SIGNIFICATION DES PARAMETRES RHÉOLOGIQUES	42
A- LA VISCOSITE PLASTIQUE	42
B- YIELD-VALUE (ou YIELD POINT)	42
C- LA FILTRATION « FILTRAT »	43
D- LA CONCENTRATION EN SABLE « RESIDU <75 μ »	43
E- LA VISCOSITE APPARENTE	44
IV. ÉTUDE STATISTIQUE	44
A- PRÉSENTATION DU LOGICIEL SPAD 5.5	44
B- BASE DES DONNÉES UTILISÉE POUR L'ÉTUDE STATISTIQUE	44
C- L'ETUDE STATISTIQUE USUELLE (SOMMAIRE)	45
D- ANALYSE STATISTIQUE FACTORIELLE A PLUSIEURS VARIABLES	50
D.1 ETUDE STATISTIQUE MULTIDIMENSIONNELLE DES DONNEES DU GISEMENT M'ZILA	50
V. CONCLUSION	59

CHAPITRE IV

I.	INTRODUCTION :	61
II.	CONDITIONS TECHNICO-MINIERES DU GISEMENT DE M'ZILA	62
A.	RÉGIME DE FONCTIONNEMENT	62
B.	CAPACITÉ DE PRODUCTION	62
C.	DURÉE DE VIE DE LA MINE	62
III.	DEVELOPPEMENT DES TRAVAUX	63
A.	LA DECOUVERTURE DU GISEMENT	63
B.	ACCÈS ET OUVERTURE DU GISEMENT	64
B.1.	LA LONGUEUR DES PISTES	64
B.2.	LA LARGEUR DE LA PISTE	66
B.3.	LA PENTE DE LA PISTE :	66
C.	TECHNOLOGIE D'EXPLOITATION	67
C.1.	SYSTEME D'EXPLOITATION :	67
C.2.	ELEMENTS DU SYSTEME D'EXPLOITATION :	67
D.	PROCESSUS D'EXPLOITATION	70
D.1.	L'EXTRACTION	70
D.2.	LE CHARGEMENT	77
D.3.	LE TRANSPORT	81
IV.	ORIENTATION D'EXPLOITATION DANS LE GISEMENT DU M'ZILA	84
A.	PHASES D'EXPLOITATION	84
A.1	PHASE N°01 (EXPLOITATION DE LA COUCHE XIV)	84
A.2	PHASE N°02 (EXPLOITATION DE LA COUCHE XI)	84
A.3	PHASE N°03 (EXPLOITATION DE LA COUCHE X)	85
A.4	PHASE N°04 (EXPLOITATION DE LA COUCHE IV)	86
A.5	PHASE N°05 (EXPLOITATION DE LA COUCHE VII)	87
A.6	PHASE N°06 (EXPLOITATION DE LA COUCHE III)	87
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	

CONCLUSION GENERALE.....	90
PERSPECTIVES.....	91
BIBLIOGRAPHIE.....	92
ANNEXES	

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I. 1 Classification sommaire des minéraux argileux	8
--	---

CHAPITRE II

Tableau II. 1 Caractéristiques géométriques, rhéologique et physico-mécaniques des couches	26
Tableau II. 2 Comparaison entre la composition chimique moyenne de la bentonite de Mostaganem et des bentonites d'autres régions.....	29
Tableau II. 3 Critères SONAREM 1972.....	30
Tableau II. 4 Critères SIDAM (1979).....	30
Tableau II. 5 Sommaire des réserves géologiques du gisement M'zila par couche, au 31/12/1993	31
Tableau II. 6 Les travaux des réalisations physiques.....	36
Tableau II. 7 Récapitulatif des réserves des gisements d'argile bentonitique de M'ZILA Mostaganem réalisés par les différents organismes d'études	39

CHAPITRE III

Tableau III. 1 Les exigences du plan de contrôle du tout venant issu du gisement.....	41
Tableau III. 2 Moyennes et écarts types des paramètres rhéologiques et physico-mécaniques.	45
Tableau III. 3 Matrice des corrélations.....	52
Tableau III. 4 Valeurs propres, pourcentage, pourcentage cumulé.	53
Tableau III. 5 Coordonnées des variables sur les axes 1 à 3 (variables actives).....	53
Tableau III. 6 Statistiques sommaires de la couche III.....	57
Tableau III. 7 Statistiques sommaires de la Couche IV.....	57
Tableau III. 8 Statistiques sommaires de la Couche VII	57
Tableau III. 9 Statistiques sommaires de la Couche X	58
Tableau III. 10 Statistiques sommaires de la Couche XI.....	59
Tableau III. 11 Statistiques sommaires de la Couche XIV	59

CHAPITRE IV

Tableau IV. 1 Caractéristique de bulldozer CATERPILLAR D75	64
Tableau IV. 2 La longueur moyenne des pistes d'accès.....	65
Tableau IV. 3 Les indices de rippabilité.....	72

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I. 1 Structure cristallographique de minéraux argileux	7
Figure I. 2 Arrangement des octaèdres et tétraèdres dans un feuillet de montmorillonite	10
Figure I. 3 Schéma descriptif du rôle de la boue de forage bentonitique	14

CHAPITRE II

Figure II. 1 Carte géologique de la bordure occidentale du massif du DAHRA	18
Figure II. 2 Colonne stratigraphique du bassin du Chélif dans la région de Mostaganem	21
Figure II. 3 Coupe de la cluse de Chélif (djebel Meni) (d'après PERRODON ,1957).....	22
Figure II. 4 Colonne stratigraphique du gisement de M'ZILA	23
Figure II. 4 Colonne stratigraphique du gisement de M'ZILA	23
Figure II. 5 Plan topographique sur Auto CAD de gisement de M'ZILA.....	24

CHAPITRE III

Figure III. 1 modèle de Bingham.....	42
Figure III. 2 Les histogrammes des différents paramètres rhéologiques et physiques.	47
Figure III. 3 Fenêtre de SPAD 5.5 (après exécution des calculs sur le fichier BENTAL1).....	51
Figure III. 4 Cercle de corrélation (axe 1 et 2) des variables continues (BENTAL.1).	54
Figure III. 5 Cercle de corrélation des variables continues (BENTAL.1).	55

CHAPITRE IV

Figure IV. 1 Section typique d'une exploitation de bentonite à M'ZILA.	63
Figure IV. 2 plan d'exploitation avec les pistes d'accès (plan avec Auto CAD)	65
Figure IV. 3 Profils en travers de la piste d'accès.	66
Figure IV. 4 Largeur de la plate forme de travail.	69
Figure IV. 5 Schéma de l'action du ripper sur le sol.	70
Figure IV. 6 Schéma représentant la subdivision du bloc d'excavation en sous-blocs.	72
Figure IV. 7 Schéma représentant le refoulement du matériau défoncé.....	73
Figure IV. 8 Schéma représentant le volume (ABDE) ameubli par le ripper.....	75
Figure IV. 9 Le mode d'excavation.....	77
Figure IV. 10 La succession des coupes pour l'obtention d'un profil donné.....	77
Figure IV. 11 Schéma du travail de la chargeuse dans le chantier :	79
Figure IV. 12 plan orienté de l'exploitation de la bentonite.....	88

Introduction générale

Introduction générale

I. INTRODUCTION GENERALE

La définition de l'argile est double ; une roche sédimentaire meuble, imperméable, grasse au toucher, imbibée d'eau et qui peut être façonnée [21]. Du point de vue géologique, l'argile est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux spécifiques, aluminosilicates plus ou moins hydratés, eux-mêmes nommés argiles.

Les roches argileuses présentent une grande diversité : diversité de compositions, de propriétés dans leur nomenclature et diversité ainsi que dans leurs applications industrielles.

La bentonite est un produit qui provient de l'altération des aluminosilicates. Le niveau d'exigence et la sensibilité à la présence d'impuretés dépendent de l'usage destiné aux bentonites. La bentonite comme la plupart des minéraux industriels est extraite dans des exploitations à ciel ouvert, et est utilisé dans des procédés qui exploitent ses propriétés intrinsèques ou améliorées par des traitements légers. La sélection optimale des qualités en chantiers d'exploitation nécessite une bonne évaluation de la variabilité des substances en place. La gestion correcte du mélange et la classification des réserves réclament une bonne compréhension du rôle des impuretés et des relations entre celles-ci et les propriétés physico-rhéologiques de la bentonite.

L'objet de ce mémoire concerne l'optimisation de l'exploitation du gisement bentonitique de M'ZILA (wilaya de Mostaganem) et en particulier l'amélioration des connaissances des variabilités rhéologiques de ces argiles.

Ce travail a été mené avec le soutien de la Société BENTAL (filiale de l'ENOF).

Des argiles bentonitiques sont exploitées depuis une cinquantaine d'année, dans la région du M'ZILA. Le matériau extrait à ciel ouvert subit divers traitements : émottage, fragmentation, classification, séchage, cuisson éventuelle à diverses températures avec rebroyage , criblage et activation.

La prospection de nouvelles réserves devient pour beaucoup d'exploitations une clé stratégique de développement. Pour minimiser la probabilité de perte, il faut investir sur les bonnes cibles. Pour trouver ces cibles on ne peut s'appuyer que sur des informations géologiques, rhéologiques ou chimiques. Les indices géologiques sont les plus importants et les plus utilisés pour la prospection des réserves de bentonite.

Introduction générale

La question qui se pose est celle du critère souhaitable pour la classification des matières extraites. Dans la pratique, la méthode d'analyse des sondages carottés est basée sur la définition d'une zone d'influence autour d'un échantillon. Cette zone sera exploitée et classifiée en utilisant la valeur de l'échantillon du sondage. La méthode du polygone d'influence ou du voisin le plus proche n'est pas une méthode optimale pour cette étape de l'estimation, et surtout pour la sélection.

L'expérience des exploitants et l'observation visuelle des affleurements des différentes lithologies d'argile leur permettent de corriger une partie des erreurs de la classification. Mais les études statistiques présentées au troisième chapitre montrent que cet outil est perfectible.

La statistique étant utilisée depuis longtemps pour l'estimation des gisements miniers, a prouvé sa capacité dans ce domaine. Toutefois, l'application des outils statistiques dans le domaine des minéraux industriels n'est pas si fréquente et dans le cas des argiles on dispose de peu d'études publiées [1].

Pour les calculs statistiques nous avons utilisée SPAD 5.5 (statistique pour l'analyse des données). Ce travail cherchera à identifier l'origine de ces variations et à proposer une estimation plus apte à l'évaluation et la classification des couches de bentonite.

L'étude concerne les gisements bentonitiques du M'ZILA (wilaya de Mostaganem). Les gisements de bentonite sont usuellement localisés par sondages carottés effectués selon deux profils. La longueur des échantillons est variable, elle dépend de leur continuité et de leur homogénéité apparente.

L'idée initiale des études réalisées dans le cadre de ce mémoire vise à améliorer la prévision de la qualité des produits issus des argiles bentonitiques de M'ZILA.

On propose dans ce mémoire des méthodes permettant de mieux gérer l'incertitude sur la prévision de la qualité de l'argile. Dans ce contexte on va aborder les problématiques suivantes:

- Le cadre de cette étude ne permettait pas des études expérimentales sur ces argiles. On essaie d'améliorer la connaissance de cette famille d'argile par des analyses statistiques des données disponibles de la base des sondages de SONAREM ainsi que les rainures réalisées par BENTAL qui se compose des données d'analyses rhéologiques.
- Au préalable, il est important d'examiner la fiabilité des données. Dans la base de données, les données anciennes ne sont pas complètes, l'analyse chimique n'a pas été faite pour tous les échantillons. Ces lacunes d'informations rendent difficile la tâche d'analyses statistiques des données et limite la connaissance générale de ce gisement.
- Les variations chimiques d'un gisement à un autre permettent de mieux comprendre la différence

Introduction générale

entre les couches du gisement mais malheureusement nous n'avons pas une base de données des paramètres chimiques.

- Après avoir étudié les paramètres statistiques des différentes couches, la question qui suit est celle de la variation spatiale des données.

Les nouveautés de ce travail se trouvent :

- ❖ Dans les études détaillées des relations statistiques des paramètres dans les couches et en les comparants à l'échelle du gisement.
- ❖ Dans l'application de la statistique. L'utilisation de ces outils est peu mentionnée dans les minéraux industriels et encore moins fréquente dans le cas de la bentonite. Les études statistiques sont faites pour la première fois sur les gisements bentonitiques de M'ZILA.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons consacré une grande partie pour présenter la bentonite, ses applications et les paramètres importants dans chaque cas d'application industrielle.

Le deuxième chapitre porte sur la géologie régionale et locale de ce gisement d'argiles .Les lithologies bentonitiques y sont décrites.

Le troisième chapitre décrit l'acquisition des données, les analyses statistiques globales et détaillées des paramètres rhéologiques.

Le dernier chapitre est consacré à l'orientation de l'exploitation vu les résultats du précédent chapitre.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et les perspectives.

CHAPITRE I : les argiles bentonitiques et leurs usages

I. LES ARGILES BENTONITIQUES ET LEURS USAGES

A. INTRODUCTION

Avant d'entrer dans le détail de la géologie du gisement bentonitique de M'ZILA, on présente dans ce chapitre, la bentonite et ses usages. Cela permet aux lecteurs non initiés au sujet, de faire connaissance avec les termes techniques.

Un des objectifs de ce chapitre est de mieux comprendre la relation entre les propriétés industrielles souhaitées, la composition des dépôts in situ, et les comportements des divers types d'argiles.

B. ARGILES [1]

Le terme Argile trouve son origine dans le mot grec « **Argilos** » dont la racine Argos signifie blanc.

Les constituants des argiles sont des minéraux, qui sont extrêmement petits. Pour en connaître la nature, la structure et la classification, il fallut attendre les techniques raffinées qui se sont offertes aux minéralogistes au XX^{ème} siècle. Les minéraux argileux sont en forme de feuillets ou de lattes microniques, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal est composé de quelques centaines de feuillets empilés, de taille nanométrique. C'est la structure du feuillet élémentaire qui caractérise l'espèce minérale. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées.

Il existe deux sortes de couche, selon que les oxygènes ou hydroxyles sont associés en tétraèdres ou en octaèdres. Dans la couche tétraédrique, la cavité des tétraèdres est occupée par le cation silicium, qui peut être substitué par de l'aluminium. Dans la couche octaédrique la cavité octaédrique est occupée par des petits cations de (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+}). Au cas où les charges positives et négatives ne s'équilibrent pas, il en résulte une charge du feuillet, et d'autres cations viennent se loger entre les feuillets pour équilibrer la structure. Ici résident les capacités d'échange des argiles et leur pouvoir adsorbant.

Les minéraux de la famille de la kaolinite : kaolinite, halloysite, dickite et nacrite sont des minéraux à deux couches. Une couche tétraédrique à cœur de silicium et une couche octaédrique à cœur d'aluminium. La formule chimique structurale est $Si_2Al_2O_5(OH)_4$. L'équidistance interfoliaire est de 7 Å.

Les illites sont des argiles à trois couches, une couche octaédrique associée à deux couches tétraédriques dans lesquelles une partie du silicium est remplacée par de l'aluminium. Les ions aluminium de la couche octaédrique peuvent être remplacés par les ions Mg et Fe et des ions de potassium assurent la neutralité de l'ensemble.

Les minéraux de la famille des smectites ou la famille des montmorillonites sont bâties sur le même modèle que les illites. La variation de composition du groupe des smectites est liée à la présence de différents cations échangeables, faiblement retenus étant donné la faible charge cationique. Les smectites comprenant des cations divalents Mg ou Ca contiennent 2 couches d'eau dans l'interfoliaire. L'équidistance interfoliaire est de 14-15Å. Par contre, les smectites avec des cations monovalents comme le Na ne contiennent qu'une seule couche d'eau ($d=12$ Å). La bentonite fait partie de cette famille (montmorillonite sodique).

La figure I.1 présente la structure cristallographique de ces trois familles d'argile. Le Tableau I.1 donne une classification brève des argiles.

Les minéraux argileux sont parmi les plus importants, sinon les plus importants, de nos minéraux industriels. Des millions de tonnes sont utilisés annuellement dans une grande variété d'applications.

Les progrès de la technique, tant en ce qui concerne le traitement des matières premières que l'élaboration de produits nouveaux, élargissent sans cesse le domaine de leurs applications.

Ces minéraux ne se rencontrent pas isolément, mais dans des roches composées d'un mélange de minéraux typiques des argiles et d'autres minéraux ou matériaux associés (quartz, oxydes de fer, calcite, débris végétaux).

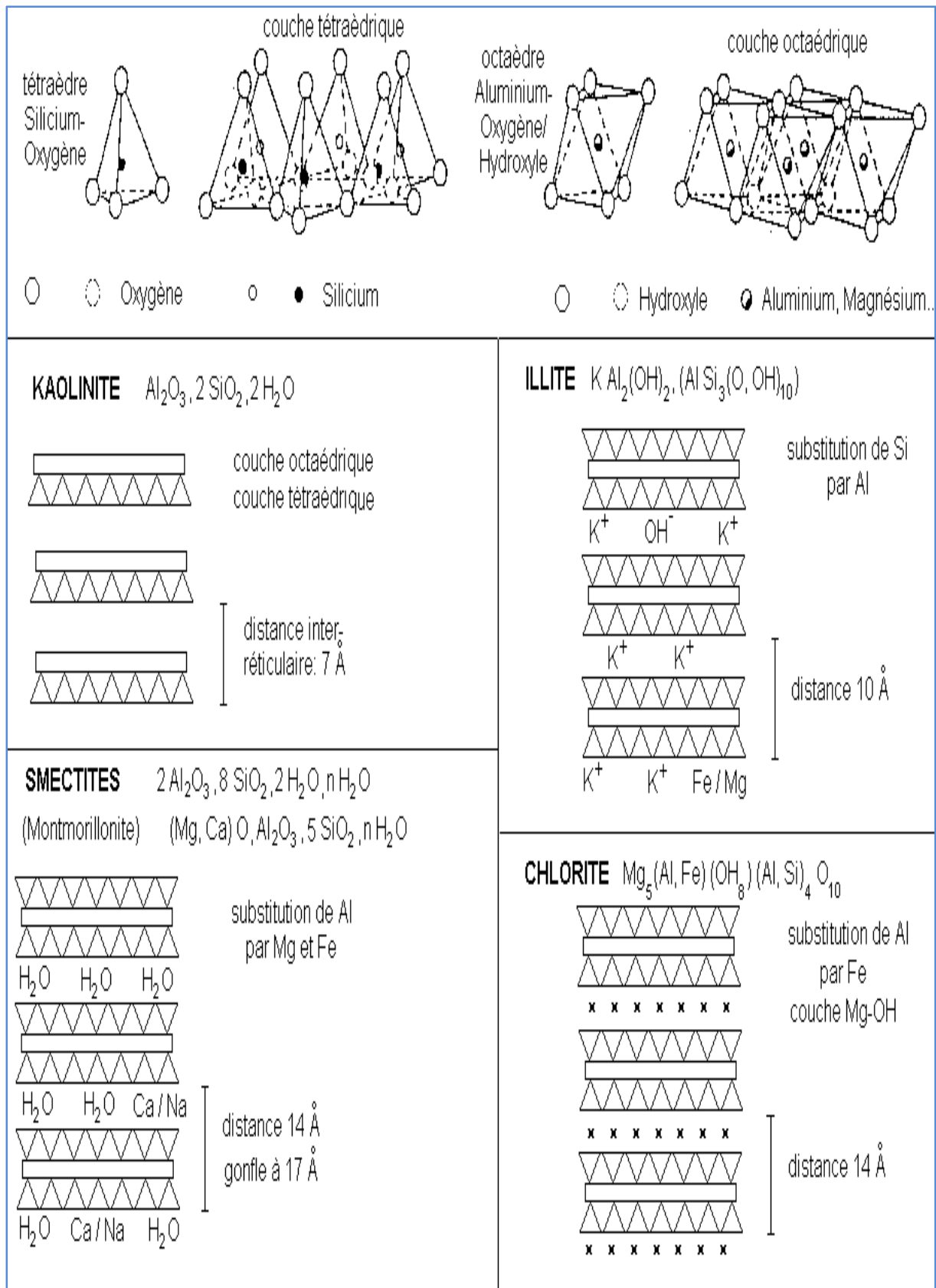


Figure I. 1 Structure cristallographique de minéraux argileux [2]

Tableau I. 1 Classification sommaire des minéraux argileux [1]

principales familles		Espèces minérales				
		Composants dominants				
		Si et Al	Si, Al, Fe et Mg	Si, Al et Mg	Si et Mg	Si, et Fe
Minéraux à 2 couches		Kaolinite halloysite	Berthiérine (chamosite)	Amosite	Serpentine (antigorite) (chrysolite)	Greenalite cronstedite
Minéraux à 3 couches	Illites et vermiculite	Illites vermiculite	Illites vermiculite	Vermiculite		Glauconite (céladonite)
	Smectites	Montmorillonite	Beidellite	Saponite	hectorite Stevensite	Nontronite
	Chlorite	Chlorite	Chlorite (clinochlore)	Chlorite	Chlorite (pennine)	
	Pyrophyllite et Talc	Pyrophyllite			Talc	
Minéraux en lattes				Attapulgite	Sépiolite	

C. LA BENTONITE [3]

C.1. HISTORIQUE

Le terme bentonite a été employé en premier par Knight (1898) pour décrire une argile plastique fortement colloïdale et fortement gonflante de la région de Fort Benton au Wyoming, Etats-Unis d'Amérique (Grim, 1968). Ce terme a ensuite été étendu aux matériaux naturels dont la composition et les propriétés sont dominées par les smectites.

La bentonite est une argile dont le principal constituant est la montmorillonite. Ce dernier nom fut proposé pour la première fois en 1847, pour désigner une argile plastique découverte à Montmorillon, en France.

C.2. DÉFINITION

Les bentonites sont des matériaux argileux essentiellement composés de Smectite, (elles contiennent plus de 75% de montmorillonite). Elles montrent des propriétés plastiques gonflantes, qui favorisent l'introduction des molécules d'eau à cause de la présence des cations volumineux entre les feuillets.

Ces matériaux argileux sont caractérisés par la superposition des feuillets élémentaires, entre ces feuillets se situent des cations échangeables, principalement Ca et Na.

C.3. AUTRES MINÉRAUX DES BENTONITES

En dehors de la Montmorillonite, qui en constitue l'essentiel, les bentonites peuvent renfermer d'autres minéraux associés :

- Des minéraux argileux : Chlorite ou Sépiolite.
- Du quartz ou des résidus de silice amorphe.
- Des carbonates.
- Des sulfates (gypse).

C.4. CLASSIFICATION DE LA BENTONITE

-Les Montmorillonites peu magnésiennes et dont la base échangeable est sodique (Na-bentonite) gonflent énormément à l'eau et peuvent même former des gels permanents.

-Les bentonites calciques (Ca-bentonite) où Fe peut partiellement remplacer Al et gonflent peu. Elles forment par contre avec l'eau une suspension thixotropique.

C.5. ABSORPTION D'ION

Les Montmorillonites ont la propriété d'absorber des quantités importantes d'oxygène, de sodium, calcium, ou composés organiques.

C.6. STRUCTURE DE LA MONTMORILLONITE

L'établissement des structures a fait l'objet de nombreuses études. La plus connue est celle de Hofmann, Endel et Wilm (1933).

La montmorillonite appartient au groupe des minéraux argileux à 14 \AA , caractérisé par un feuillet qui comporte une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques type $\frac{1}{2}$.

La Montmorillonite est composée d'unités constituées de deux couches de silicium tétraédrique et d'une couche centrale d'aluminium octaédrique.

Ces couches sont disposées de telles sortes que les atomes d'oxygènes des sommets de chaque tétraèdre de silicium et un des plans d'hydroxyles de la couche octaédrique se situent dans un même plan.

Les sommets des tétraèdres sont formés par quatre atomes d'oxygène reliés à l'atome de silicium central ainsi qu'aux atomes d'oxygènes des octaèdres par liaisons covalentes. Les octaèdres ont par contre leurs sommets occupés par quatre atomes d'oxygènes et deux hydroxyles reliés à l'atome d'aluminium central par liaisons de coordinance.

Les hydroxyles de la couche octaédrique sont placés directement en dessous des cavités Hexagonales de réseau d'oxygène de couches tétraédriques (figure I.2).

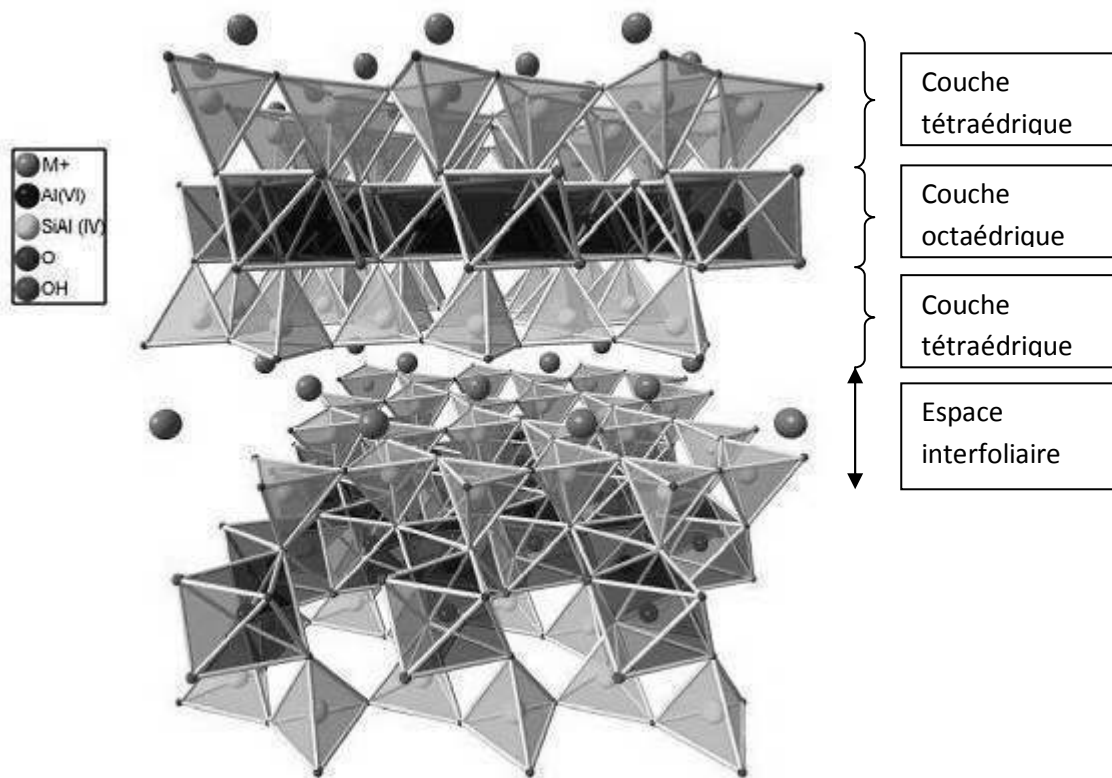


Figure I. 2 Arrangement des octaèdres et tétraèdres dans un feuillet de montmorillonite [3]

C.7. ASPECT MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE [4]

La bentonite est un matériau au toucher savonneux, faisant des copeaux sous l'ongle, généralement non plastique à son humidité.

A l'affleurement, elle forme rapidement par dessiccation d'importantes fissures de retrait. Un des traits caractéristiques de ces affleurements est l'absence de ravinement que l'on y observe par le jeu des hydratations et dessiccations successives, il se crée un talus

constitué de petits grains d'argile. A la moindre pluie, ces grains gonflent et forment une mince couverture continue et parfaitement imperméable sur laquelle l'eau ruisselle.

Au microscope électronique, la montmorillonite se présente sous forme d'agrégats de plaquettes très minces dont les bords peuvent montrer des enroulements, très exceptionnellement, on peut observer des particules présentant des formes définies avec des combinaisons d'arêtes rectilignes faisant entre elles des angles de 60 à 120°.

C.8. LES CONDITIONS DE FORMATION DE LA BENTONITE

Il est difficile de préciser, les conditions de formation de la bentonite, il semblerait que les minéraux à groupe non centro-symétrique seraient de néoformation et que les centro-symétriques seraient de dégradation.

La Montmorillonite est rencontrée :

- Dans les milieux sédimentaires, riches en magnésium et à PH légèrement ou nettement alcalins, un excès en potassium dans ces milieux, laisserait apparaître les micas.
- Au niveaux des sols (chernozines, rendzines).
- Comme produit d'altération :
 - ✓ Des roches éruptives acides (pegmatites....).
 - ✓ Des cendres volcaniques (fort benton, USA).
 - ✓ Des rhyolites (Maghnia, Algérie).
 - ✓ Des roches acides vitreuses (Smectite du Sud de l'Espagne).

L'altération hydrothermale peut conduire à la formation de la montmorillonite, localisée sur les bords de gisement alors que la kaolinite se forme à l'intérieur. Elle est aussi le produit de la synthèse hydrothermale (en présence de magnésium, ainsi qu'un pH relativement élevé).

C.9. PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES BENTONITES [7]

C.9.a Gonflement

Mise en suspension en présence d'eau, la bentonite forme une suspension colloïdale provoquant un important gonflement qui est un des indices marquants un produit. Les bonnes bentonites commerciales gonflent 15 à 20 fois de leur volume initial. Certaines qualités peuvent atteindre un gonflement de 40.

Cette propriété de gonflement est détruite par la chaleur. Elle est réversible et peut être activée par des additions (soude ou phosphate solubles).

C.9.b Capacité d'échange de base

Pour la compensation des charges, des cations sont faiblement liés au réseau structural. Ils sont d'habitude alcalins ou alcalino-terreux. Susceptibles d'être échangés dans certaines conditions. L'épaisseur des couches d'eau entre les feuillets de la montmorillonite dépend du cation interchangeable: pour le Na^+ , il y a une couche monomoléculaire (distance interlamellaire = 12.5A°); avec des ions Ca^{+2} il y a deux couches de molécules d'eau (distance = 14.5 à 15A°). Les cations échangeables ont une influence notable sur les propriétés des bentonites.

C.9.c Plasticité

Du fait de leur richesse en particules colloïdales, les bentonites sont très plastiques. L'étendue du domaine plastique (IP= indice de plasticité) des bentonites est élevé et varie de 700 à 500 suivant la nature de la bentonite.

Les bentonites sont capables de retenir sous forme « rigide » une grande quantité d'eau (IL= indice de liquidité) de façon à constituer un état plastique. Les montmorillonites sodiques ont des valeurs qui vont de 350% à plus de 700% tandis que les montmorillonites calciques ont des valeurs de IL de 100 à 200 %.

Par broyage, la bentonite peut être réduite à une finesse dix fois plus élevée que celle du ciment.

C.9.d Gels de bentonite

Si la quantité d'eau introduite dans une bentonite est faible, les particules s'immobilisent les une contre les autres et on obtient des gels de dureté variable avec la concentration et dont la consistance augmente plusieurs heures après la préparation.

Ces gels manifestent le phénomène de thixotropie, c'est à dire qu'ils épaississent au repos prolongé et reprennent leur viscosité normale par simple agitation.

C.9.e Suspension de bentonite

Si la quantité d'eau d'apport est forte par rapport à la quantité de bentonite, la dispersion atteint progressivement un degré très élevé. C'est ainsi qu'à des concentrations de l'ordre de 5% dans l'eau pure, les bentonites peuvent donner des suspensions qui demeurent stables pendant plusieurs jours.

Le pH de ces suspensions est généralement au voisinage de 9, qui correspond à l'optimum de stabilité. Les acides provoquent la précipitation à une rapidité croissante avec la variation du pH.

C.9.f La teinte de la bentonite

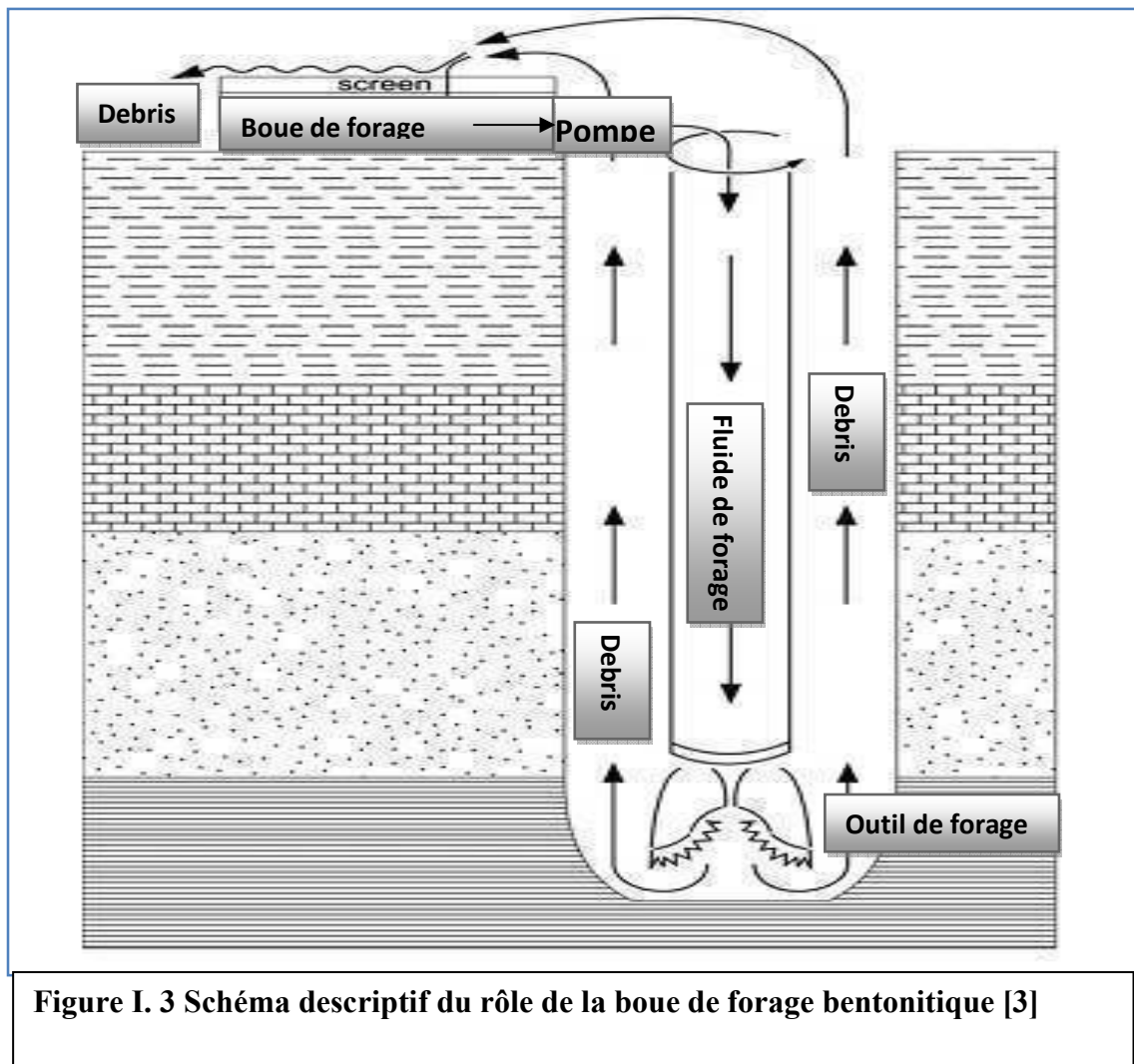
La teinte de la bentonite est souvent indicatrice de ses applications. La bentonite de couleur vert brunâtre est généralement de qualité pour les boues de forage, tandis que la bentonite blanchâtre est bonne pour les moules de fonderie.

C.10. LES PRINCIPALES UTILISATIONS DE LA BENTONITE [3]

C.10.a les boues de forage

La bentonite sodique est le constituant majeur de la boue de forage. Nous n'entrerons pas ici dans une description détaillée du rôle joué par la bentonite dans les boues de forage. Il suffit de comprendre que la quasi totalité des forages pour le pétrole et le gaz se fait en milieu fluide. L'eau seule n'ayant pas la viscosité souhaitable, on y ajoute la bentonite. La boue de forage joue un rôle essentiel en refroidissant et lubrifiant l'outil de forage, en maintenant les parois et en véhiculant les résidus de roche vers la surface. La boue maintient aussi une pression hydrostatique sur les couches traversées (Figure I.3). Cette application de la bentonite est évidemment reliée au nombre de trous forés et non à la productivité des puits. C'est ce qui explique la position dominante du marché mondiale. De fait la publication "World Oil" rapportait que 89 % du total de puits forés en exploration pour le pétrole et le gaz l'avait été en Amérique du Nord qui produisait la même année 24 % seulement de la production mondiale. Bien que la consommation de bentonite varie dépendant du type de formation traversé et qu'il soit difficile de poser des absolus sur des patrons de consommation, certaines statistiques ont été établies qui permettent des rapprochements utiles entre la quantité de

bentonite utilisée et le nombre de pieds forés. La quantité de bentonite par 1 000 pieds forés a varié de 4,05 à 4,72 tonnes. De façon sécuritaire, on peut donc estimer une utilisation de 4 tonnes de bentonite par mille pieds forés pour jauger du potentiel d'un marché. Et grâce aux propriétés rhéologiques, une tonne de bentonite sodique permet de produire plus de 16 m³ de boue, pour le forage en milieu non salé. Les propriétés de viscosité de ces boues permettent de remonter les « débris ou cuttings » en surface. Cette boue permet aussi de créer, sur les parois du trou, un revêtement étanche et lubrifie les tiges et l'outil de forage.



C.10.b La bentonite de fonderie

La bentonite de fonderie sert à la préparation des moules en fonderie. Cette application est liée à l'arrivée des sables qualifiés de synthétiques sur le marché. Ce sont essentiellement des sables de silice auxquels on mêle une argile sodique dans une proportion de 4 à 6 %. Cette proportion peut varier considérablement et peut atteindre 10 à 15 % pour les moulages à

pression. De très nombreux mélanges sont préparés dans le commerce pour des spécialités. L'argile utilisée peut être une bentonite naturelle du type Wyoming ou une bentonite de traitement (terres décolorantes ou bentonite non-gonflante selon la terminologie américaine, traitée en y ajoutant de faibles quantités de carbonate de sodium). La tendance des sables dits synthétiques à remplacer les sables naturels (bien que ceux-ci continuent d'être utilisés) s'explique par leur uniformité et la fiabilité des résultats d'application. C'est un liant économique (récupérable en partie et montrant peu de perte au procédé de moulage). La tendance vers les moulages à haute pression ne peut qu'amplifier la demande de la bentonite.

C.10.c Bouletage des minerais de fer

La quantité ajoutée au minerai varie de 4,5 kg à 8 kg la tonne, selon le type de concentré. Les statistiques publiées aux États-Unis et au Canada laisse supposer que plus de 20 livres de bentonite sont mêlées aux concentrés, ce qui est peu probable, car un surplus de bentonite amollirait la boulette produite. La bentonite naturelle (gonflante) est préférée par les compagnies minières à cause de ses qualités liantes supérieures et de son action de renforcement à haute température. Les compagnies visent évidemment à utiliser le moins de bentonite possible pour atteindre les propriétés désirables dans le bouletage. Essentiellement, les boulettes doivent être suffisamment solides pour résister au transport et à la manutention et posséder une bonne réductibilité.

C.10.d Génie civil

Pour la création de voile d'étanchéité d'excavations, l'injection de coulis de ciment (la présence de bentonite permettant le maintien en suspension du ciment).

C.10.e Terres décolorantes

Les bentonites trouvent également des débouchés pour la décoloration des huiles et comme support de catalyse (bentonites activées à l'acide).

C.10.f Autres utilisations

La bentonite est un nanocomposite recherché comme charge minérale dans les insecticides et pesticides, les aliments de bétails, les engrais, les produits cosmétiques, les polymères, en pharmacie (comme pansement gastrique) etc.

CHAPITRE II : Géologie du gisement

I. GÉOLOGIE DU GISEMENT

A. GÉOLOGIE REGIONALE [8]

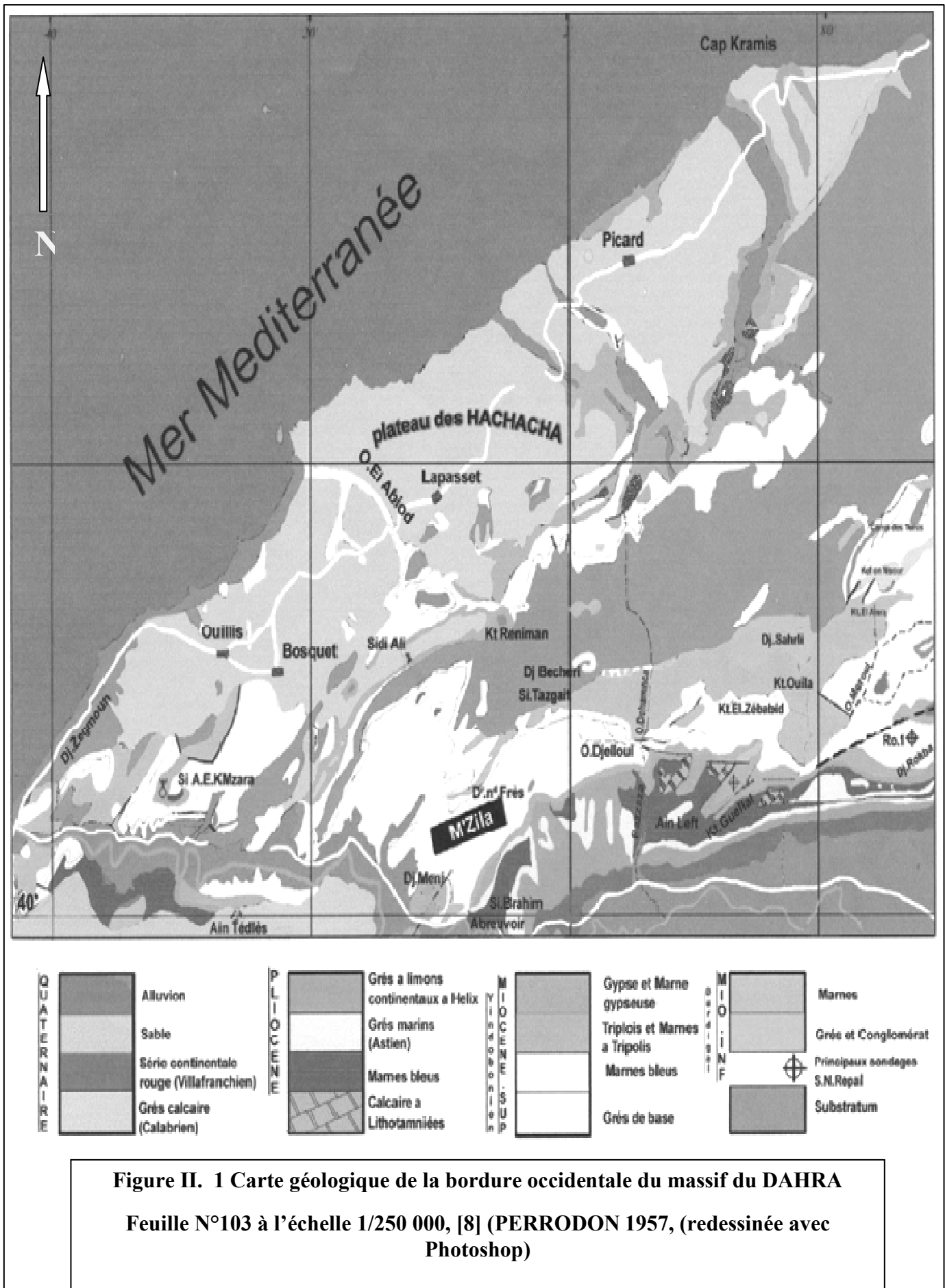
A.1. INTRODUCTION

Le bassin du bas CHELIF forme une cuvette intra montagneuse de direction NE SW. Il se situe dans la zone externe de l'atlas tellien occidental qui correspond au segment algérien de l'orogénèse alpine.

D'Est en Ouest, le bassin de CHELIF est subdivisé en trois ensembles géographiques.

- le haut Chélif;
- le moyen Chélif;
- le bas Chélif (notre secteur d'étude).

Le bassin du bas Chélif est situé entre deux ensembles de formation essentiellement secondaires qui sont le massif du Dahra au Nord et l'Ouarsenis au Sud. Les dépôts accumulés du bassin du bas Chélif vont du Miocène post nappe (Miocène moyen-sup) au quaternaire (Figure II-1). Les reliefs occupent une partie importante dans le bassin où ils viennent s'accoler au massif crétacé du Dahra pour former un même ensemble orographique. Dès la mise en place du bassin (miocène inf et moy), des mouvements NS à NW/ SE ont engendré le plissement des différentes formations Mio plioquaternaire ainsi que la mise en place des failles. Ces différentes phases se traduisent par des discordances angulaires observées sur le terrain entre le Miocène Inférieur le Miocène sup et le Pliocène et à l'intérieur même de ces étages (Binger, 1952). Les cinérites forment un faciès important dans la formation des bentonites de la région étudiée.



A.2. STRATIGRAPHIE [4]

A.2.1 Stratigraphie du bassin du bas Chélif (région de Mostaganem):

Géologiquement, le gisement de M'ZILA fait partie du bassin du Bas Chélif, ce dernier est de type intra montagneux comblé de sédiments du Mésozoïque, Cénozoïque et de dépôts du Quaternaire (Figure II.2).

MESOZOÏQUE :

Il est représenté par le Crétacé inférieur, il affleure sur une longue bande orientée nord-est et caractérisé par des dépôts de quartzites, de calcaire siliceux et de marnes schisteuses, d'une épaisseur de 200m environ.

PALEOGENE :

Il est représenté par l'Oligocène qui affleure sur la côte au Nord Ouest sur une surface réduite, il est caractérisé par des marnes, des argiles marneuses, du sable brun, des grès et des calcaires marneux.

MIOCENE :

Le Miocène est très largement développé dans la région.

- **Miocène inférieur :** Il est représenté par une série monotone d'argiles, et des marnes renfermant des veines de gypse, grès et conglomérats.
- **Miocène supérieur :** Il comporte une série de grès glauconieux, de marnes argileuses et une puissante couche de marnes bleues (550m) renfermant des intercalations de calcaires, de grès et d'argiles bentonitiques et d'argiles gypsifères. Le gisement de M'ZILA appartient à cet horizon d'argiles bentonitiques. Les niveaux de cinérites observés dans la formation des marnes bleues sont riches en glauconie et de soufre au niveau des ponts de Chélif tandis qu'au bassin elles sont représentées par des tufs ryolithiques qui séparent les deux formations Tiélat et Tefaraoui (Figure II-3), ce niveau est riche en feldspath, micas, silice en boule.
- **Miocène terminal :** Le Miocène terminal repose sur les formations du Miocène supérieur. Il affleure en bande caractérisé par une alternance de marnes à tripolis purs et de calcaires siliceux, l'épaisseur totale peut atteindre 30m.

PLIOCENE :

En discordance sur le Miocène, le Pliocène offre une partie inférieure composée de grès et des conglomérats ; le tout surmonté par des grès marins (Astien) et des grès et limons continentaux à Hélix. Ces dernières formations sont en discordance avec les précédentes.

QUATERNAIRE :

Il est représenté par des grès calcaires, évoluant à travers toute la zone Nord Ouest de la région de Hadjads et Sidi Ali jusqu'à la mer méditerranée par différentes roches continentales rubéfiées, sableuses et argileuses, ainsi que par des sables marins côtiers tout au long de la côte.

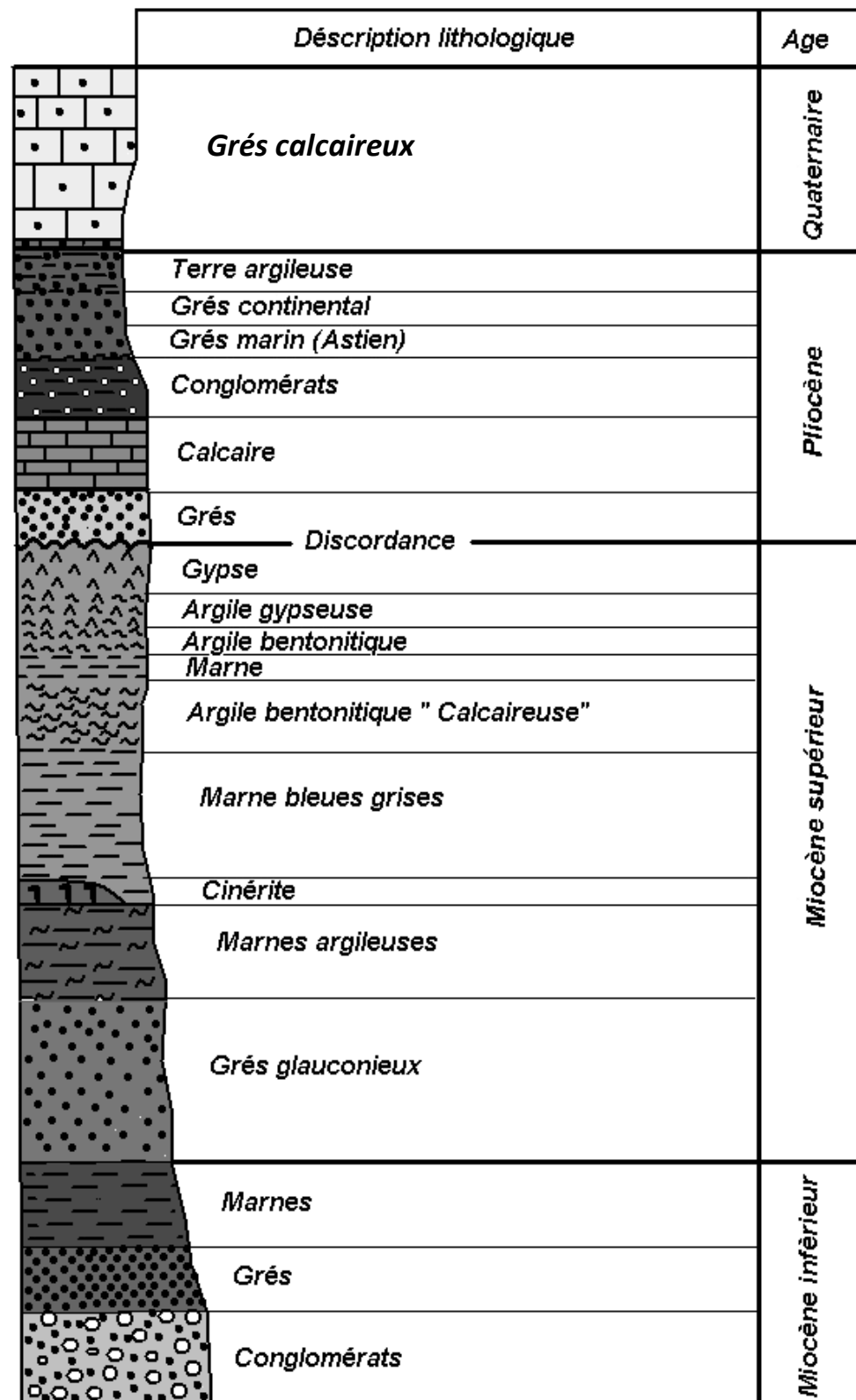
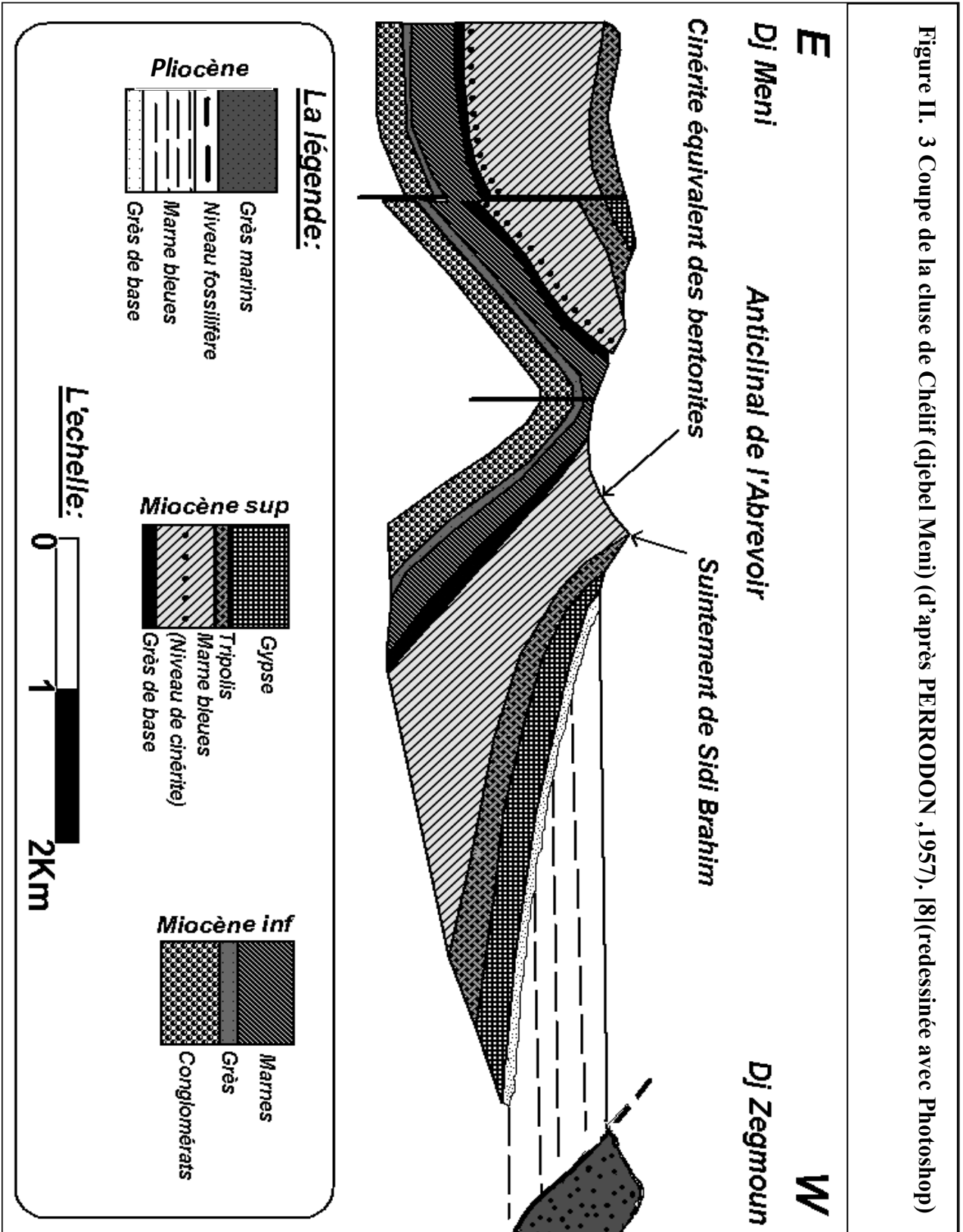


Figure II. 2 Colonne stratigraphique du bassin du Chélif dans la région de Mostaganem [4] (rapport SIDAM, (redessinée avec Photoshop)

Figure II. 3 Coupe de la cluse de Chélif (d'après PERRODON, 1957). [8](redessinée avec Photoshop)



B. GÉOLOGIE LOCALE

B.1. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE

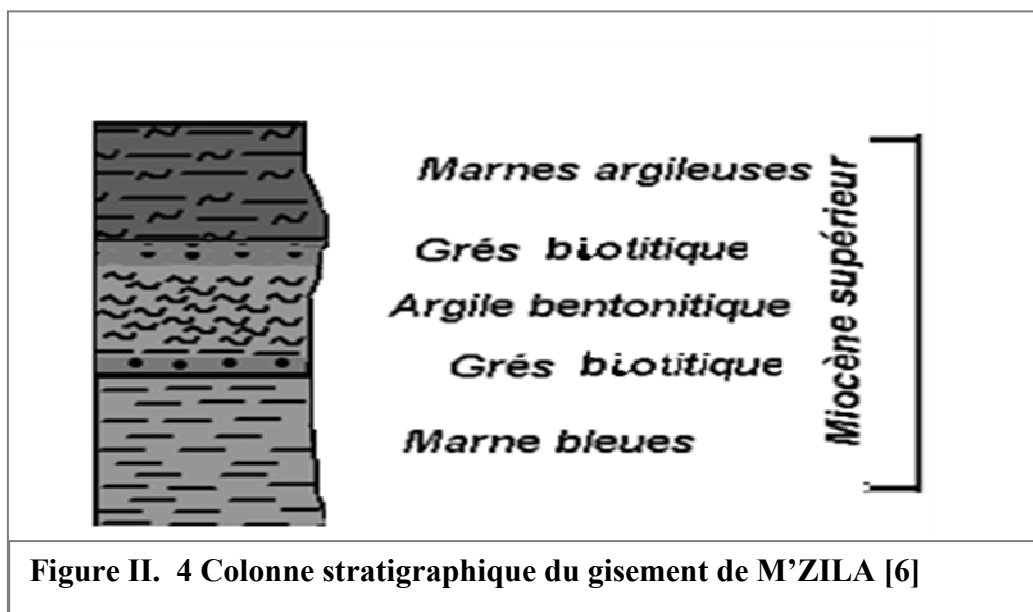
La zone de M'ZILA qui fait l'objet de ce travail, s'inscrit dans une surface de 5.2 Km², à une distance de 45Km au Nord Est de Mostaganem et à environ 10 Km à l'Est du village ACHASTA.

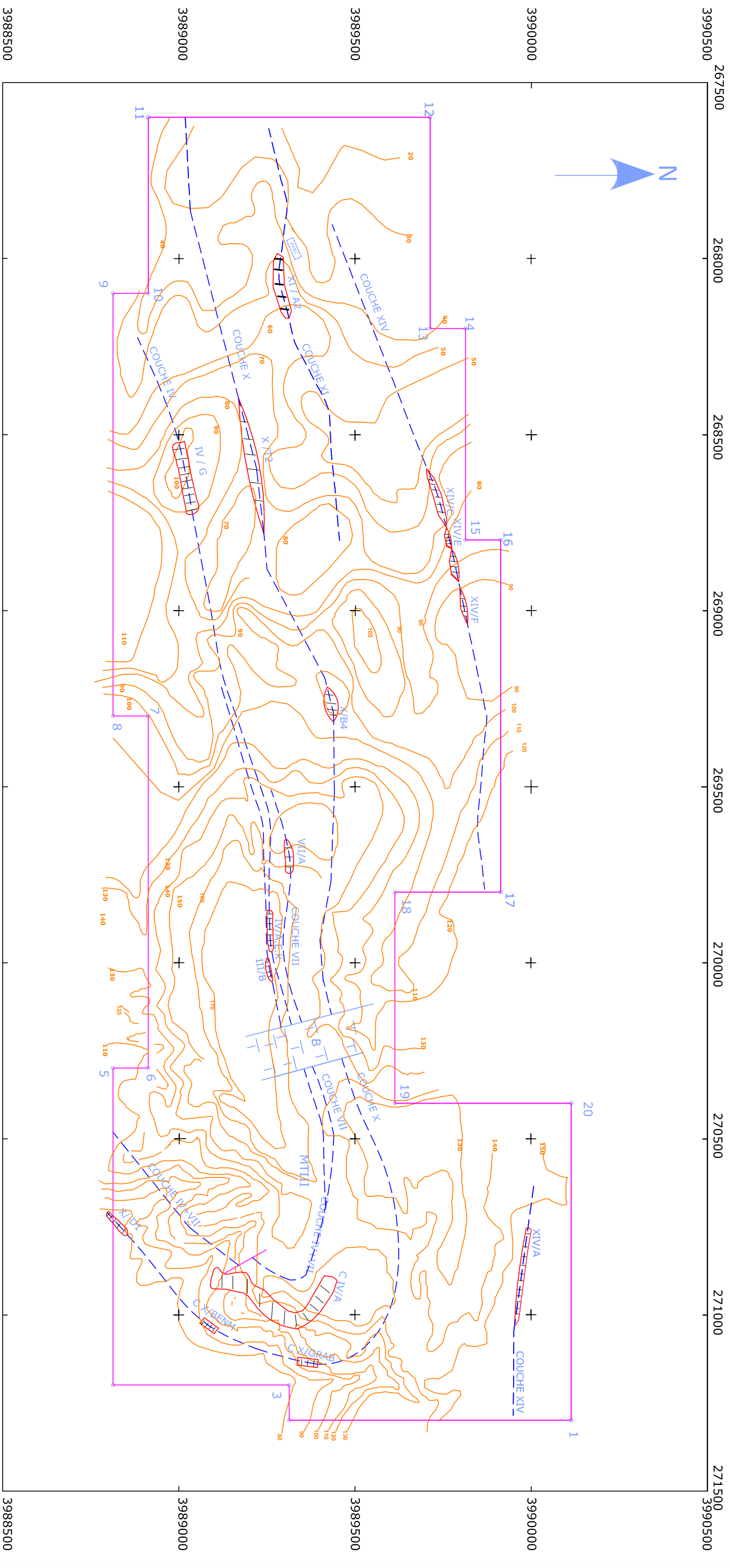
Le caractère essentiel de sa topographie réside dans l'apparition d'une masse marneuse qui forme des crêtes, de 0 à 100m, plus marquée à l'Est. L'érosion par drainage et par ravinement a donné un cachet bien particulier à cette zone.

L'infrastructure routière actuelle s'avère adéquate pour la plupart des travaux et les besoins éventuels, seulement les pistes qui mènent aux chantiers en exploitation deviennent impraticables pendant la période des intempéries. Le champ minier de M'ZILA peut être rejoint par véhicule motorisé.

B.2. APERÇU GÉOLOGIQUE DU SITE :

À l'échelle du gisement de M'ZILA, la séquence du Miocène supérieur exposée dans la région des exploitations débute à la base par un banc épais de marne bleue compacte. Cette dernière est surmontée par les couches d'argiles bentonitiques, qui sont interstratifiées avec des grès biotitiques. Cette séquence est ensuite recouverte par une marne argileuse (Figure II-4). Quatorze couches d'argiles bentonitiques ont été reconnues dans le gisement de M'ZILA.





GISEMENT DE M'ZILA

Superficie du gisement = 3690000 m² = 369 ha
Le périmètre du gisement = 10800 m

Figure II. 5 Plan topographique sur Auto CAD de gisement de M'ZILA.

- Courbes du niveau
- Bornes du périmètre minier
- périmètre minier
- + Zone broyée
- / Faille
- parcelle et son numéro
- - - C .XIV Couche et son numéro
- - - Rainures sur la couche

PROJET D'OPTIMISATION D'EXPLOITATION DU GISEMENT MULTICOUCHE DE BENTONITE DU M'ZILA (W.MOSTAGANEM)

ECHELLE	REALISE SUR AUTOCAD PAR	PROMOTION	CONTROLE PAR
1/2500	M.OUAHAB	2007-2008	K.OMRACI

B.3. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU GISEMENT [9]

Les argiles exploitées de M'ZILA sont des bentonites qui appartiennent au groupe des montmorillonites.

Le gisement se présente sous forme d'un synclinal dont l'axe est orienté NE-SO d'une direction de N70° et se prolonge vers l'Ouest dont les flancs nord et sud sont constitués par des couches parallèles entre elles ayant presque la même direction mais un pendage différent.

Le gisement de M'ZILA est composé de 14 couches d'argiles bentonitiques identifiées de I à XIV (Elles sont numérotées de (I la plus récente, vers le sommet à XIV la plus ancienne, vers la base)) se situant au cœur d'un synclinal dont l'axe est presque Est-Ouest (Figure II-5).

Les couches du flanc Nord présentent un pendage 10° à 45° S et celles du flanc Sud un pendage 10° à 35°N.

Les 14 couches d'argiles bentonitiques du gisement de M'ZILA sont tracées d'une façon discontinues " en direction", entaillées par des ravins et un drainage dendritique.

Leur extension se prolonge sous le mort terrain, dans une plaine à topographie moins accidenté.

La limite Est des couches, traversée par une zone faillée, coïncide au sommet du synclinal. A cet endroit, les couches changent de direction et s'incurvent pour continuer vers le Sud-Ouest et ensuite l'Ouest.

Les couches du flanc Sud sont affectées par une tectonique cassante de faible amplitude.

B.4. CARACTERISTIQUES DES COUCHES

Le tableau II.1 présente un sommaire des principales caractéristiques de chaque couche du gisement de M'ZILA. Ce tableau possède une valeur indicative seulement, puisque tous les paramètres requis pour la classification des bentonites en fonction de leur utilisation n'ont pas été mesurés systématiquement pour chaque couche. De plus, pour la même couche, la qualité de la bentonite peut varier d'un endroit à l'autre.

La lecture L600 de la viscosité et le volume d'eau libre (filtrat) sont les deux seuls paramètres dont les valeurs soient disponibles la pour la plupart des couches, les mesures récentes de ces paramètres ont été préférées aux plus anciennes dans l'élaboration du tableau du tableau II.1.

Tableau II. 1 Caractéristiques géométriques, rhéologique et physico-mécaniques des couches [5]

Couches/ parcelles		Caractéristiques géométriques			Caractéristiques physiques moyenne						Eléments de gisement		
		Long (m)	Larg (m)	Epais (m)	Vis. L600 (cp)	filtrat (cm ³)	Res >75μ (%)	IG (%)	CPV (g/cm ²)	CXV (g/cm ²)	Azim Direct (°)	Azim Pend (°)	Angle Pend (°)
I	A B	3000	8	1.1	03.80	22.00	-	-	-	-	70	160	35
III	B	60	10	04	07.93	28.94	06.81	-	-	-	60	150	35
	A	70	10	04	09.75	24.67	06.15	8.82	683.6	112	70	160	35
IV	A	130	10	04	11.48	17.94	05.00	12.00	480	113	80	170	30
	AEK	70	8	04	11.11	18.18	05.13	-	4.17	-	80	160	30
VII	A	60	12	07	05.64	19.28	09.76	11.00	591	139	70	160	35
X	GRA	60	08	02	17.91	15.86	01.33	13.80	-	-	70	160	30
	D1	45	08	07	16.00	17.75	13.90	-	-	-	70	170	30
	Ben.	50	10	05	13.93	21.28	02.19	10.27	-	-	80	160	35
	B4	60	08	03	15.00	21.68	04.46	11.36	-	-	80	160	35
	T2	100	10	02	18.45	23.75	-	-	-	-	80	160	30
XI	A2	900	8-30	6	19.00	20.00	08.00	11.00	-	-	70	160	25
XII		3738	05	03	33.00	16.00	-	-	-	-	70	170	30
XIII	C	700	7	0.9	25.00	22.00	-	-	-	-	70	160	45
XIV	D	25	12	06	36.00	30.04	13.50	11.00	-	-	90	160	40
	E	40	12	06	33.86	27.27	13.50	11.00	-	-	90	160	40
	F	40	12	6	29.26	26.02	06.50	-	-	-	90	160	40
	C	60	03	6	22.81	19.66	5.16	12.30	-	-	80	160	45

La description qui suit présente un résumé de la qualité et de l'importance en terme de réserves de chacune des couches de bentonite reconnue dans le gisement de M'ZILA (notons que l'orientation d'utilisation de la bentonite a été faite par rapport aux valeurs moyennes du tableau II.1) :

Couche I :

Elle a été tracée sur les deux flancs du synclinal, sur une longueur minimale de 3300 mètres, et a été exploitée dans les chantiers 4 et 13.

Couche II :

Elle a été exploitée dans la chantier 12. Par contre, elle ne possède pas une grande extension et ses réserves sont minimales.

Couche III :

Elle a été tracée seulement sur le flanc Nord du synclinal. Elle est en cours d'exploitation.

Couche IV :

Il s'agit d'une couche de bonne épaisseur qui fusionnerait avec la couche VII dans le nez et sur le flanc sud du synclinal selon l'interprétation de l'ENOF. Elle a été exploitée dans les carrières 5 et 10, mais ses réserves sont encore importantes.

Couche V :

Elle est de faible extension et ses réserves sont modestes. De plus, les analyses suggèrent qu'elle est de mauvaise qualité et ne pourrait servir que comme bentonite de charge.

Couche VI :

Elle est de faible extension et trop mince pour supporter une exploitation rentable.

Couche VII :

Il s'agit d'une couche de bonne épaisseur qui a été tracée sur les deux flancs du synclinal. Elle ne possède pas les caractéristiques requises pour les boues de forage, mais est de bonne qualité en fonderie. La couche VII a été exploitée dans les chantiers 11 et 14.

Couche VIII :

Elle n'a jamais été exploitée, peut-être à cause de son épaisseur relativement faible (1,7m).

Couche IX:

Cette couche est très mince ne contient pas de réserves significatives D'ailleurs, la bentonite y serait de mauvaise qualité.

Couche X:

Il s'agit de la couche qui a été tracée sur la plus grande distance, soit près de 5,4 kilomètres. Même si elle a été exploitée dans cinq chantiers (3, 6, 9, 15 et Fahim), elle contient encore des réserves très importantes.

Couche XI:

Elle est restreinte à la partie ouest du flanc nord du synclinal. Elle a été exploitée dans le chantier 2, sur une longueur de 900 mètres. Cependant, sa limite vers l'Ouest contient encore des réserves importantes.

Couche XII:

Elle n'est connue que sur le flanc nord du synclinal. Cette couche exploitée dans le chantier 8 serait la même que celle qui affleure dans les chantiers 1 et 7 plus à l'Ouest.

Couche XIII:

Elle a été exploitée dans la carrière 16.

Couche XIV:

C'est la couche la plus importante du gisement en épaisseur (9 à 12m) et en réserves (plus de 268 000 t).

Le potentiel d'accroissement des réserves est réel à l'Ouest.

B.5. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DE LA BENTONITE DE MOSTAGANEM [4]:

On reconnaît généralement deux types principaux de bentonite à l'état naturel. La plus répandue est la bentonite calcique, dont une analyse typique est donnée au tableau II.2 (bentonite du Sud des États-Unis). La bentonite calcique n'est pas gonflante, et donc impropre à la préparation des boues de forage. Par contre, son ion échangeable (Mg^{+2}) lui confère une capacité d'absorption élevée, d'où son utilisation dans la décoloration des huiles végétales et minérales, et le raffinage des produits pétroliers. L'autre variété est la bentonite sodique, qui est naturellement gonflante et trouve son application dans la préparation des boues de forage. Une analyse représentative de ce type de bentonite est présentée au tableau II.2.

De par sa composition chimique, la bentonite de Mostaganem se rattache aux bentonites sodiques (tableau II.2). Comme la bentonite du Wyoming, sa teneur en $Na_2O > 2\%$ lui confère un indice de gonflement élevé et donc de bonnes propriétés pour la préparation des boues de forage. Par contre, sa teneur en $MgO < 3\%$ la rend impropre à la production de terres décolorantes, contrairement à la bentonite de Maghnia qui est de bonne qualité pour cette application (tableau II.2).

Tableau II. 2 Comparaison entre la composition chimique moyenne de la bentonite de Mostaganem et des bentonites d'autres régions. [4]

% poids	Sud USA	Wyoming	Maghnia	Mostaganem
SiO ₂	59.00	64.30	58.89	65.50
TiO ₂	ND	ND	00.28	00.27
Al ₂ O ₃	18.40	19.80	17.37	13.85
Fe ₂ O ₃	05.10	04.04	03.32	02.91
FeO	01.26	02.06	ND	00.70
MnO	ND	ND	00.07	00.03
MgO	02.86	02.03	03.37	02.27
CaO	03.88	00.73	01.06	01.86
Na ₂ O	00.41	02.81	01.32	02.22
K ₂ O	00.78	00.44	01.30	00.97
H ₂ O ⁺	02.91	01.44	04.46	03.27
H ₂ O ⁻	05.40*	02.11*	08.26	06.06
P ₂ O ₅	ND	ND	00.05	00.06
SO ₃	ND	ND	00.68	00.02
TOTAL	100 .00	100.00	100.43	099.99

* Faite par calcul

ND non déterminée

B.6. SPECIFICATION DE LA BENTONITE DE MOSTAGANEM SELON LES USAGES DE LA BENTONITE :

L'usine de Mostaganem produit de la bentonite pour trois usages principaux : les boues de forage, les moules de fonderie et la bentonite de charge industrielle. Chacune de ces applications nécessite des qualités propres.

La production de boues de forage requiert une bentonite dont la viscosité est élevée (>10 centipoises) et dont le volume d'eau libre est faible (< 18 cm³). Ces deux paramètres ont été mesurés systématiquement, depuis 1972, pour les bentonites de Mostaganem. Cependant, tel que mentionné dans le rapport de la SONAREM (1972), les résultats des analyses de 1972 sont douteux. En effet, plusieurs de ces analyses indiquaient une viscosité faible et un volume d'eau libre élevé pour des bentonites qui, en pratique, produisaient des boues de forage de bonne qualité. Pour les mêmes couches de bentonite, les analyses récentes du laboratoire de l'unité de l'ENOF à Mostaganem, qui ont été fournies à SIDAM (bureau d'étude canadien) , ont donné de bien meilleurs résultats. Pour cette raison les analyses récentes doivent être préférées aux plus anciennes.

La production de moules de fonderie requiert une bentonite dont la résistance à la compression est supérieure à 570 g/cm² (à vert) et supérieure à 3 400 g/ cm² (à sec). De plus, la résistance au cisaillement doit être supérieure à 165 g/cm² (à vert) et supérieurs à 1 510 g/ cm² (à sec).

Essentiellement, la bentonite de charge est celle qui ne rencontre pas les normes requises pour la production des boues de forage ou des moules de fonderie. Il s'agit d'un produit de qualité inférieure, qui commande un prix moindre, la seule spécification requise pour cet usage est un degré d'humidité inférieur à 18%.

L'étude de SIDAM (1979) avait démontré que la bentonite de Mostaganem est très supérieure à celle de Maghnia pour la production des boues de forage à cause de son indice de gonflement plus élevé (proportionnel à la teneur en Na_2O), de sa teneur en sable plus faible et de sa composition plus homogène. La bentonite de Mostaganem serait également supérieure à celle d'Amérique du Nord pour la fabrication des moules de fonderie.

II. CALCULS DES RESERVES DU GISEMENT DE M'ZILA(MOSTAGANEM) [9], [4], [5]:

A. LES CRITERES MINIMUMS QUALITE ADOPTES POUR L'EVALUATION DES RESERVES DANS LE RAPPORT SONAREM 1972

Tableau II. 3 Critères SONAREM 1972

Humidité (%)	Refus sur tamis (75 μ) (%)	pH	Eau libre (cm ³)	viscosité	Gel	Pouvoir gélifiant
12-15	jusqu'a 10	9-10	≤18	≥10	15-110	86-148

Parmi les propriétés physico-mécaniques conformes aux normes requises, seules l'eau libre et la viscosité ont été déterminées et ce pour la production de bentonite de forage.

B. LES CRITERES MINIMUM QUALITE ADOPTES POUR L'EVALUATION DES RESERVES DANS LE RAPPORT SIDAM (1979)

Tableau II. 4 Critères SIDAM (1979)

	Bentonite de forage	Bentonite de fonderie	Bentonite de charge
Viscosité	≥10cP		
Eau libre	≤18cm ³		
Résistance à la compression		> 570 g/cm ² (à vert) > 3400 g/cm ² (à sec)	
Résistance au cisaillement		165 g/cm ² (à vert) 1510 g/cm ² (à sec)	
Humidité			< 18 %

C. TRAVAUX REALISÉS ET DEGRE DE CONNAISSANCES

C.1. TRAVAUX SONAREM1971 :

En 1971, il était prévu un ensemble de travaux de recherches et de prospection au Nord Est de la ville de Mostaganem afin de découvrir un gisement d'argile bentonitique dont les réserves estimées selon les catégories industrielles ne seraient pas inférieures à 1 000 000 t. Les argiles bentonitiques destinées à l'usine de Mostaganem devaient être de qualité satisfaisante pour la production de la bentonite de forage.

A l'issue des travaux de recherches et miniers effectués par SONAREM en 1972. 14 couches numérotées de I à XIV ont été reconnues et évaluées. Les réserves des 7 couches les plus importantes (III, IV, VII, X, XI, XII et XIV) ont été estimées à 2230000 t sur la base des données suivantes :

➤ La somme des épaisseurs des couches III, IV, VII, X, XI, XII, et XI :

$$2,0+5,0+4,0+4,0+3,0+4,0+9,0=31 \text{ m ,}$$

➤ Longueur moyenne des 7 couches :

$$(2000+ 4000 + 2000 + 4000 + 1000 + 800 + 3000) / 7 = 2400 \text{ m}$$

➤ Angle de pendage moyen des couches : 36°50'

➤ Profondeur mesurée le long du pendage : 25 m

➤ Densité de la bentonite : 2.0

➤ Profondeur d'exploitation : 10m

Les travaux devaient s'effectuer en 2 étapes :

a. Travaux de recherche sur la région située à 35 km au Nord Est de Mostaganem. A 4km à l'Est du village ACHASTA pour repérer les couches d'argiles bentonitiques les plus intéressantes.

b. Prospection et évaluation des couches d'argiles bentonitiques.

Tous les travaux de terrain commencés en Mai 1971 ont été arrêtés le 23/08/1971 suite à des difficultés de financement de la recherche.

C.2. TRAVAUX SIDAM 1977/1981

En 1977, les géologues de SIDAM (expert-conseils, Canada) ont visité le chantier de M'ZILA et ils ont prélevé des échantillons soit dans les tranchées ou en vrac. Une série a été expédiée au Canada pour des essais technologiques, et d'autres ont été analysés au laboratoire de Mostaganem pour la détermination des paramètres physiques. En effet et contrairement aux résultats rapportés par SONAREM 1972 (équipe soviétique), les viscosités étaient assez élevées et variaient entre 10 et 20 cp. SIDAM a délimité les couches les plus prospectives. Elles sont au nombre de trois (03) X, VII, et XIV. Les réserves ont été calculées sur la base

des données des travaux et des documents de SONAREM 1972. Lors des visites de SIDAM, l'argile bentonitiques provenait de l'exploitation du chantier Fahim.

La majorité des essais de traitement a été effectuée dans les laboratoires d'INDUSMIN à Toronto. Les analyses chimiques des échantillons ont été réalisées au laboratoire METRICLAB à Montréal. Les essais sur la bentonite ont été orientés vers les applications industrielles les plus largement utilisées c'est à dire comme bentonite de forage, fonderie et pelletisation des minerais de fer.

Les critères de base utilisés pour la classification des échantillons sont : la densité, la teneur en sable, l'indice de gonflement, la densité relative, le contenu colloïdal.

❖ En 1977. SIDAM a recalculé les réserves de trois couches les plus prospectives X, VII et XIV selon la topographie et l'importance de la longueur de la couche. Elles ont été évaluées à 900 000 t jusqu'à une profondeur de 10 m en aval pendage. Les couches X et VII recèlent respectivement 300 000 t et 100 000 t en catégorie prouvée (C1). Les réserves de la couche XIV sont de 500 000 t en catégorie probable (C2) (rapport SIDAM. 1979).

Dans son étude de rentabilité pour l'usine de bentonite de Mostaganem, SIDAM (1981) a déterminé des réserves qui totalisent 670 840 t réparties dans les couches X, VII, IV, III, XIII et XIV pour 10 années d'exploitation et une profondeur de 10m.

C.3. TRAVAUX SIDAM (1994)

SIDAM a effectué son propre calcul de réserve en utilisant comme document de base le plan N°M-71701-2651 du rapport SIDAM (1979), il a été actualisé à l'aide de la carte géologique sur fond topographique de M'ZILA, échelle 1 /5000 mise à jour par l'ENOF(1993). Ce dernier calcul des réserves a été réalisé à partir de la carte 9002-G-025.

Les paramètres que SIDAM (1994) a utilisés pour le calcul des réserves sont les suivants :

✓ *Longueur* : la longueur inexploitée de chaque couche, sur la carte 9002-G-025, a été mesurée à l'aide du logiciel AUTOCAD, à l'exclusion des zones exploitées, et d'une zone très accidentée, au niveau de la section 297 250 E, entre les stations 304 900 N et 305 700 N. L'exploitation de cette zone accidentée est techniquement difficile et conséquemment, elle a été soustraite au calcul des réserves.

✓ *Profondeur* : les réserves ont été calculées jusqu'à une profondeur de 10 mètres mesurée le long du pendage. Cependant, comme l'épaisseur des couches présentée au Tableau II.5 est une épaisseur apparente (épaisseur mesurée horizontalement, sans correction

pour l'angle de pendage), il est nécessaire d'introduire cette correction au niveau de la profondeur. C'est-à-dire d'utiliser la profondeur verticale dans le calcul des réserves. Cette profondeur verticale est égale au produit de la profondeur mesurée le long du pendage par le sinus de l'angle de pendage des couches. Pour les couches I à XIII, un pendage moyen de 30° a été utilisé dans les calculs. Cette valeur correspond à la moyenne des 62 mesures de pendage présentées sur les profils 717-MO-022 à 026 du rapport de SIDAM(1981). La profondeur verticale considérée pour les couches I à XIII est donc de 5.0 mètres ($10 \text{ mètres} \times \sin 30^\circ$). Quant à la couche XIV, son pendage serait de l'ordre de 55° (SONAREM, 1972; SIDAM, 1979 et 1981). La profondeur verticale considérée pour cette couche est donc de 8,2 mètres ($10 \text{ mètres} \times \sin 55^\circ$).

✓ *Volume* : c'est le produit de l'épaisseur horizontale par la longueur inexploitée par la profondeur verticale.

✓ *Réserves (en tonnes)* : elles sont égales au produit du volume par la densité. Une densité de 2.0 tonnes/m^3 a été utilisée pour la bentonite de Mostaganem, comme dans les calculs de la SONAREM (1972) et de SIDAM (1979 et 1981).

✓ *Réserves prouvées* : ce sont celles qui sont préparées pour la production. Pour cette catégorie de réserves, la découverte est faite, le contrôle de qualité a été effectué et l'épaisseur de la couche est connue.

✓ *Réserves probables* : ce sont celles pour lesquelles la continuité de la couche a été démontrée par des puits de sondage (ou des sondages à la tarière), et dont la qualité a été vérifiée au laboratoire de Mostaganem. Par contre, la découverte n'est pas faite et l'épaisseur de la couche est indéterminée. Toutes les réserves calculées par SIDAM appartiennent à cette catégorie, sauf celle qui sont préparées pour la production. Ces derniers sont les seules qui sont considérées comme des réserves prouvées.

✓ *Réserves possibles* : les réserves appartenant à cette catégorie n'ont pas été calculées, parce que les réserves prouvées et probables suffisent à assurer la production pour plusieurs dizaines d'années.

❖ Résultats de SIDAM :

Le calcul détaillé des réserves, couche par couche, est présenté au tableau II.5. Ces réserves s'appliquent à la longueur totale des couches, telle que démontrée par des sondages ou des puits d'exploration, à l'exclusion des secteurs déjà exploités et de la zone accidentée mentionnée précédemment.

Les réserves totales du gisement M'ZILA, jusqu'à une profondeur de 10 mètres mesurée le long du pendage, s'élèvent à 1 038 562 tonnes. Toutes ces réserves sont classées dans la

Catégorie des réserves probables, sauf celles qui sont préparée pour l'exploitation. Ces dernières sont considérées comme des réserves prouvées. Du point de vue de leurs réserves, les couches XIV, X, IV et VII sont les plus importantes. A elles quatre, elles totalisent 71% des réserves totales du gisement. Par contre, les couches II, VI et IX ne contiennent que des réserves minimales, dont il n'a pas été tenu compte dans ce calcul.

Le calcul de SIDAM s'accorde bien avec celui de l'unité de l'ENOF à Mostaganem, qui indiquait des réserves géologiques de 1 116 900 tonnes en date du 31 décembre 1993. Il s'accorde également bien avec les calculs de SIDAM en 1979 (900 000 tonnes) et en 1981 (1 378 240 tonnes). Par contre, il semblerait que les réserves de 2 230 000 tonnes calculées par les spécialistes soviétiques en 1972 soient surestimées (SONAREM, 1972). Cette surévaluation provient essentiellement de la profondeur considérée dans le calcul des réserves, soit 25 mètres le long du pendage. Cette profondeur est exagérée, compte tenu des méthodes d'exploitation et des équipements présentement utilisés à Mostaganem.

Tableau II. 5 Sommaire des réserves géologiques du gisement M'ZILA par couche, au 31/12/1993 [4]

Couches	Epaisseur Moyenne (m)	Longueur inexploitée (m)	Profondeur verticale (m)	Volume (m ³)	Réserves (t)	Réserves par catégories(t)	
						Prouvées	Probables
I	1.5	2701	5.0	20258	40515	13000	27515
II	-	-	-	-	<i>Négligeable</i>	<i>Négligeable</i>	<i>Négligeable</i>
III	4.0	1350	5.0	27000	54000	19600	34400
IV	7.7	2001	5.0	77038	154077	7000	147077
V	4.5	207	5.0	4658	9315	0	9315
VI	-	-	-	-	<i>Négligeable</i>	<i>Négligeable</i>	<i>Négligeable</i>
VII	4.5	1923	5.0	43268	86535	23350	63185
VIII	1.7	2273	5.0	19320	38641	0	38641
IX	-	-	-	-	<i>Négligeable</i>	<i>Négligeable</i>	<i>Négligeable</i>
X	7.0	3292	5.0	115220	230440	18100	212340
XI	3.2	416	5.0	6656	13312	800	12512
XII	3.0	2718	5.0	40770	81540	0	81540
XIII	3.7	1659	5.0	30692	61383	1600	59783
XIV	10.5	1561	8.2	134402	268804	5300	263504
TOTAL				502081	1038562	88750	949812

C.4. PROJET QUALITE 2000-2001 [5]:

❖ Les raisons du projet qualité réalisé en 2000-2001 :

Le projet de réhabilitation du gisement de bentonite de M'ZILA a été initié fin 1999 suite à :

- a) des réclamations (filtrat élevé, viscosité instable) des clients de bentonite de forage pétrolier par la Division Substances Utiles de l'ENOF en raison de l'urgence à réaliser ce projet, seuls les couches et parcelles préparées et accessibles à l'exploitation ont fait l'objet de travaux ;
- b) Absence de bilan technologique de référence ;
- c) l'unité travaille d'une manière empirique sur le plan du traitement ;
- d) Variation de la qualité entre et au sein des différentes parcelles.

Les réserves géologiques du gisement de M'ZILA sont limitées par :

➤ La profondeur d'exploitation : l'exploitation se fait à ciel ouvert par zones étroites et limitées ; dès que la profondeur d'exploitation atteint 04 à 05 mètres, l'extraction devient difficile à cause du pendage (45°) des couches et faute de moyens mécaniques adéquats.

➤ La méconnaissance totale de la variation des paramètres rhéologiques de la bentonite en profondeur. Une campagne de forage permettra :

- D'étudier l'évolution de la qualité des couches en profondeur.
- De réévaluer les réserves afin de mieux rationaliser l'exploitation ; les réserves géologiques entre les parcelles sont inconnues.
- De délimiter la profondeur maximum d'exploitation après avoir défini une nouvelle méthode qui permette de mobiliser les ressources plus en profondeur par rapport à la limite d'exploitation.

❖ Les travaux de réalisation physiques du projet

Le tableau II.6 ci-dessous donne les principaux travaux engagés pour la reconnaissance qualitative du gisement.

Tableau II. 6 Les travaux des réalisations physiques

Désignation	Prévu	Réalisé	Ecart
levé	12	14	2
Report /calque	12	14	2
Rainurage	92	79	-13*
Echantillonnage	215	241	26
Analyses	215	215	0

* l'écart de réalisation est dû au refus d'accès par les propriétaires terriens au site.

Les travaux géologiques réalisés dans le cadre du projet de réhabilitation du gisement de bentonite de Mostaganem, ont permis de reconstituer une banque de données géologiques et analytiques sur le gisement; ce qui suit est une présentation des caractères et des résultats obtenus sur l'évaluation de la qualité par parcelle contrairement au rapport de 1971 où les travaux ont été faits par couche.

❖ Caractérisation géologique des couches d'argiles bentonitiques :

i. Couche XIV - Parcelle F - Rainure 1, 2,3, 4.

Réserves : 2490 tonnes –

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur m	
40	8	5	35°S	N110°	Rainure 1	16.4
					Rainure 2	7.50
					Rainure 3	8.40
					Rainure 4	4.70

Couche XIV - Parcelle E - Rainure 1, 2, 3,4.

Réserves : 3380 tonnes -

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur m	
40	10	10	45°S	N94°	Rainure 1	7.0
					Rainure 2	6.5
					Rainure 3	3.0
					Rainure 4	10.0

ii. Couche XIV - Parcelle D - Rainure 1,2,3

Réserves : 1810 tonnes -

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur m	
25	7	5	45°S	N110°	Rainure 1	7.0
					Rainure 2	10.0
					Rainure 3	6.0

iii. Couche XIV - Parcelle C - Rainure 1, 2, 3, 4, 5,6.

Il s'agit du fond d'une ancienne zone déjà exploitée

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur m	
60	4.5	13	45°S	N94°	Rainure 1	4.5
					Rainure 2	7.0
					Rainure 3	7.0
					Rainure 4	3.0
					Rainure 5	2.5
					Rainure 6	4.5

iv. Couche XI - Parcelle A2 - Rainure 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8

Réserves : 6000t

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur m	
150	10	3	20°S	N50-90°	Rainure 1	9.2
					Rainure 2	10.0
					Rainure 3	8.0
					Rainure 4	0.0
					Rainure 5	5.8
					Rainure 6	8.0
					Rainure 7	3.5
					Rainure 8	24.0

v. Couche X - Parcelle 1 - Rainure 1, 2, 3

Réserves : 3216 tonnes -

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur (m)	
45	7	5	30°N	N70°	Rainure 1	7.0
					Rainure 2	6.0

vi. Couche X - Parcelle T2 - Rainure 1

Réserves : fond de chantier, réserves restantes 800 tonnes

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur (m)	
100	2	2	30°S	N90°	Rainure 1	2.0 m

vii. Couche VII - Parcelle A - Rainure 1, 2, 3, 4, 5 et 6

Réserves : 9704 tonnes .

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur m	
60	7	10	35°S	N80°	Rainure 1	10.0
					Rainure 2	10.0
					Rainure 3	7.5
					Rainure 4	5.5
					Rainure 5	6.5
					Rainure 6	5.0

viii. Couche IV - Parcelle AEK - Rainure 1, 2, 3, 4, 5 et 6

Réserves : 3616 tonnes -

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur m	
70	5	5	30°N	N80°	Rainure 1	7.5
					Rainure 2	6
					Rainure 3	4.5
					Rainure 4	5.0
					Rainure 5	7.6
					Rainure 6	6.5
					Rainure 7	5.3

ix. Couche III - Parcelle B - Rainure 1,2, 3, 4, 5.

Réserves : 2051 tonnes-

Paramètres géométriques :

Longueur m	Largeur m	Profondeur m	pendage	direction	épaisseur m	
50	4	5	35°S	N80	Rainure 1	2.5 m
					Rainure 2	3.6 m
					Rainure 3	5.0 m
					Rainure 4	4.5 m
					Rainure 5	2.0 m

C.5. SYNTHÈSE DES TRAVAUX :

Le tableau II.7 ci dessous nous donne une synthèse des travaux d'estimation des réserves :

Tableau II. 7 Récapitulatif des réserves du gisement d'argile bentonitique de M'ZILA Mostaganem réalisés par les différents organismes d'études [10]:

Références documentaires	Carrières / site	Catégories			Total (t)
		C ₁ (t)	C ₂ (t)	B(t)	
RAPPORTS DES TRAVAUX DE RECHERCHE					
A. TRAVAUX DE SONAREM 1972					
SONAREM au (1972) Travaux de recherche géologique effectués sur le gisement de M'ZILA	Les réserves des 7 couches les plus importantes (III, IV, VII, X, XI, XII et XIV) sur 14 couches connues, étaient estimées sans calcul en raison de l'arrêt prématuré du projet à 2 230 000 t pour une profondeur d'exploitation de 10m (25m en pendage).				
B. ETUDES SIDAM 1979					
SIDAM (1979)	couches III, IV, VII, X, XI, XII, XIV jusqu'à 25 m de prof.				1378 240
C. ETUDES SIDAM 1981					
SIDAM (1981) Etude de développement de l'industrie algérienne des bentonites, phase I et II et Etude de rentabilité pour l'usine de bentonite de Mostaganem phase III	Pour 3 couches X, VII, XIV, jusqu'à 10 m de prof.	Prouvée	probable		total
		400 000	500 000		900 000
	III, IV, V, VII, X, XIII, XIV	Total réserves exploitables		Réserves minières pour 10 années	
		670 840	400 000		
D. TRAVAUX DE L'ENOF					
1993		C1	C2	B	Total
		176900	250 000		426900
E. ETUDES SIDAM 1994					
SIDAM (1994) Etude de développement des argiles bentonitiques de M'ZILA (dans ce travail SIDAM a expertisé les réserves ENOF 1993)	pour les couches I, III, IV, V, VII, VIII. X. XI. sur 10m.	Prouvée	probable		total
		88 750	949 812		1038 562
Les réserves des couches II, VI, IX sont négligeables.					
F. BENTAL 2000 : rapport sur le projet qualité					
Au 31/12/2000		245 560	745440	151445	1142445

CHAPITRE III : Étude statistique des paramètres rhéologiques

I. INTRODUCTION

Dans les gisements bentonitiques actuels, on se trouve de plus en plus souvent face à des produits qui n'ont pas la qualité attendue. Dans ce chapitre on aura recours aux outils statistiques pour mettre en évidence l'importance des différents paramètres rhéologiques de la bentonite face aux différentes couches du gisement.

Compte tenu de l'utilisation de la bentonite dans les domaines (pétrolier, industriel,...etc) et pour la définition des zones plus ou moins homogènes, dans le gisement les critères et les exigences (représentés par les normes API) sont prises en compte dans l'étude statistique.

Une des sources du problème posé par la société BENTAL (filiale de L'ENOF) peut sans doute se trouver dans la variation de la qualité requise des argiles bentonitiques. Néanmoins l'analyse statistique est faite sur les données des rainures, car les études réalisées antérieurement (les sondages de SONAREM) pour ce gisement n'ont pas été conformes et considérées comme douteuses.

Les études réalisées dans ce chapitre ont pour but de comprendre :

- La variation des données rhéologiques dans les différentes couches de gisement.
- La relation entre les variables et leurs interprétation statistique simple et factorielle.

II. LES EXIGENCES DU PLAN DE CONTRÔLE [10], [11]

Tableau III. 1 Les exigences du plan de contrôle du tout venant issu du gisement

Exigences du plan de contrôle – TOUT VENANT									
Paramètres									
Produit			Humidité (%)	Visc. L600 (cp)	filtrat (cm ³)	Res >75 μ	CPV *	CPX**	IG***
Bentonite de forage	Hydraulique	FB1	25 max	12 min	27 max	25 max	--	--	--
	Pétrolier	FB2	25 max	16 min	25 max	15 max	--	--	--
Bentonite de fonderie		FD	20 max	--	--	--	350 min	90 min	10 min
Bentonite de charge industrielle		BCI	18 max	--	--	--	--	--	--

-- paramètres non nécessaire.

*CPV : Compression à vert. Exprimée en gramme par centimètre carré (g/cm²) ;

**CPX : Cisaillement à vert. Exprimé en gramme par centimètre carré (g/cm²) ;

***IG : indice de gonflement.

Les exigences de contrôle illustrées dans le tableau III.1ci-dessus sont des normes recommandées par l'institut américain du pétrole (API). Et pour aboutir à ces exigences la société BENTAL s'appuie sur des protocoles expérimentaux certifiés « ISO 9001 ». (cf. Annexe1).

III. SIGNIFICATION DES PARAMETRES RHÉOLOGIQUES [11]

A- LA VISCOSITE PLASTIQUE

La viscosité plastique (VP) est mesurée au viscosimètre FANN (cf. Annexe1) la différence entre la lecture L600 et la lecture L300, et elle est donnée par la formule suivante :

$$\text{Viscosité plastique (VP)} = L600 - L300$$

Elle dépend de la teneur en solides de la boue. Une augmentation de viscosité plastique ne pourra être combattue que par une élimination de solides (par centrifugation) ou, bien entendu, par dilution. Par ailleurs, la viscosité plastique va être liée à la taille des particules et aussi à leur forme.

B- YIELD-VALUE (ou YIELD POINT)

La yield value c'est la tension minimale en dessous de la quelle il n'y a pas écoulement, en pratique les boues de forage applique le plus souvent le modèle de Bingham :

$$f = Y_V + V_P * g \quad (\text{figure III.1})$$

où : Y_V = yield value ;

V_P = viscosité plastique.

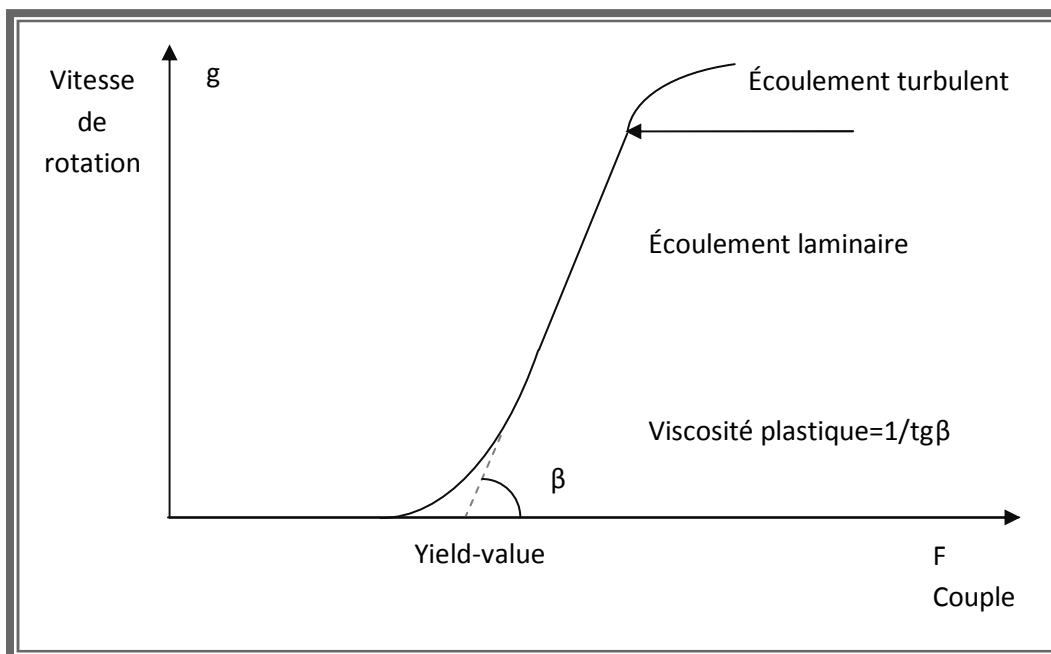


Figure III. 1 modèle de Bingham

La yield value est due surtout aux interactions physiques ou chimiques existant entre particules en suspension. Ces interactions vont dépendre aussi de la distance entre particules, donc

de leur nombre, donc de la teneur en solides. La forme et la taille des particules vont aussi agir sur la Yield-value.

La Yield –Value est aussi donnée par la formule suivante :

$$\text{Yield Value} = L300 - VP$$

C- LA FILTRATION « FILTRAT »

Lorsque la boue se trouve au contact des parois plus ou moins perméables du trou, la partie liquide filtre dans la formation en déposant sur les parois sa partie solide que l'on appelle "cake". En effet, les hauts filtrats peuvent déliter les formations délicates (argiles, marnes) et favoriser les éboulements. De plus, le cake déposé peut être épais au point d'empêcher le passage du tricône lors des manœuvres de changement d'outils. Pour ces raisons, il est extrêmement important de connaître la filtration. Le protocole de mesure est donné en annexe (cf. Annexe1).

Le filtrat doit être :

- Suffisamment élevé pour augmenter la vitesse d'avancement ;
- Suffisamment bas pour ne pas déliter ou faire gonfler les formations argileuses et marneuses et pour éviter les collages du matériel tubulaire en face des zones perméables (calcaires, dolomies, grès, etc.);
- Il ne doit pas envahir les formations productives, occasionner des émulsions avec l'huile en place ou modifier la porosité et la perméabilité de ces formations, etc.

Fixer le filtrat que doit posséder une boue est un problème délicat qui nécessite une grande connaissance des problèmes et des objectifs de forage. Disons simplement que des filtrats de 20 à 25 cm³ en 30 mn sont courants en forage.

D- LA CONCENTRATION EN SABLE « RESIDU <75μ »

On appelle "sable", en terminologie boue, les particules qui ne passent pas sur un tamis de 200 mesh Tyler, c'est-à-dire les particules dont le diamètre est supérieur à 0,075 mm. Des particules inférieures à 0,075 mm (75 microns) sont appelées "silt". La présence de sable dans une boue a un effet abrasif sur toutes les pièces en mouvement et en particulier sur les chemises et pistons des pompes ainsi que sur les outils. De plus, à concentration élevée le sable augmente la densité de la boue et peut sédimenter dans le trou pendant les arrêts de circulation risquant d'occasionner des coincements.

E- LA VISCOSITE APPARENTE

Ce paramètre présente le rendement d'une argile qui est le volume de boue à 15 centpoises de viscosité apparente que l'on peut obtenir avec une tonne de produit sec .

La viscosité apparente est donnée par la formule suivante :

$$\text{viscosité apparente (VA)} = L600/2$$

IV. ÉTUDE STATISTIQUE

L'étude statistique a été subdivisée en trois parties essentielles ; étude statistique simple et étude statistique factorielle (par la méthode de l'ACP) et ces deux méthodes ont été faites avec le logiciel SPAD 5.5, la troisième étant une étude statistique détaillée des couches.

A- PRÉSENTATION DU LOGICIEL SPAD 5.5

SPAD 5.5 ou «Statistique Pour l'Analyse Des Données», est un logiciel très bien adapté pour les techniques d'analyse factorielle (tel que : l'ACP (analyse en composantes principales), AFC (analyse factorielle des correspondances), ACM (analyse des correspondances multiples)..etc.), notons aussi, ce logiciel se base sur les principes d'algèbre linéaire et la statistique, et propose comme résultat les coordonnées des variables sur les composantes calculées.

B- BASE DES DONNÉES UTILISÉE POUR L'ÉTUDE STATISTIQUE

Notre étude s'articule sur une base de données (fichier Excel) obtenue à partir des échantillons prélevés dans les rainures, cette base nommée «BENTAL1» collecte onze (11) variables. Parmi ces onze nous avons dix (10) variables continues et une (01) variable nominale (ou qualitative) prenant les modalités désignant les parcelles (A, AEK,...etc.).

❖ Les variables continues (quantitatives) sont :

- L600 : lecture direct du viscosimètre FANN (600 tours /minute)
- L300 : lecture direct du viscosimètre FANN (300 tours /minute)
- V_p : viscosité plastique
- Yield value
- Humidité
- Filtrat
- Res 75 μ
- IG (indice de gonflement)
- Couche
- Rainure

❖ La variable qualitative est :

- Parcelle

C- L'ETUDE STATISTIQUE USUELLE (SOMMAIRE)

Le Tableau III.2 regroupe les moyennes et les écart-types des paramètres rhéologiques les plus importants de la base des données BENTAL.1.

Tableau III. 2 Moyennes et écarts types des paramètres rhéologiques et physico-mécaniques.

Libellé de la variable	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
L600	306	19,13	12,58	3,00	85,00
L300	186	17,99	13,35	2,00	81,00
Viscosité Plastique	186	4,03	1,68	-2,00	12,00
Yield Value	186	13,97	12,81	-3,00	77,00
Viscosité Apparente	306	9,56	6,29	1,500	42,50
Humidité	186	14,22	5,12	4,00	27,00
filtrat	286	21,98	5,52	12,00	42,00
Res<75	207	6,18	5,33	0,00	34,00
IG	107	11,24	2,18	7,00	17,80

- On constate que la valeur moyenne des lectures directes « L600 » est en général supérieure de 7 par rapport à la valeur exigé pour les deux catégories de bentonite de forage hydraulique et pétrolier (FB1 et FB2) ainsi que le pourcentage des lectures inférieures à 12 centipoises est environ 35%,ce qui permet normalement d'avoir une bentonite de bonne qualité mais en revanche nous avons un écart type important pour L600 ,l'effectif le plus important (90 valeurs) est situé dans l'intervalle [6-12] .
- On remarque une bonne moyenne et un écart type élevée de la lecture L300 et sont de valeurs très proche de la lecture qui précède. Nous avons deux effectifs importants (65 valeurs) sont situés dans l'intervalle [0-5] et [5-10].
- pour la viscosité plastique nous avons une moyenne faible et écart type significatif et cela est normal puisque cette valeur VP n'est que la différence entre L600 et L300, ce qui renforce l'avis précédent dans (L300 et L600), l'effectif le plus important (55 valeurs) est situé dans l'intervalle [3-4].
- Concernant le Yield point, on remarque que la courbe de l'histogramme (Figure III.3) est asymétrique, l'écart type est considérable et qui est de l'ordre de la moyenne, l'effectif le plus important (90 valeurs) est situé dans l'intervalle [3-6] .
- On observe que la moyenne de l'humidité (14 %) est loin de la valeur maximum exigé (25% pour le forage), avec un écart type qui est notable (5.12%), Nous avons trois

effectifs importants (103 valeurs) sont situés dans l'intervalle [7.5-10], [10-12.5], [15-17.5].

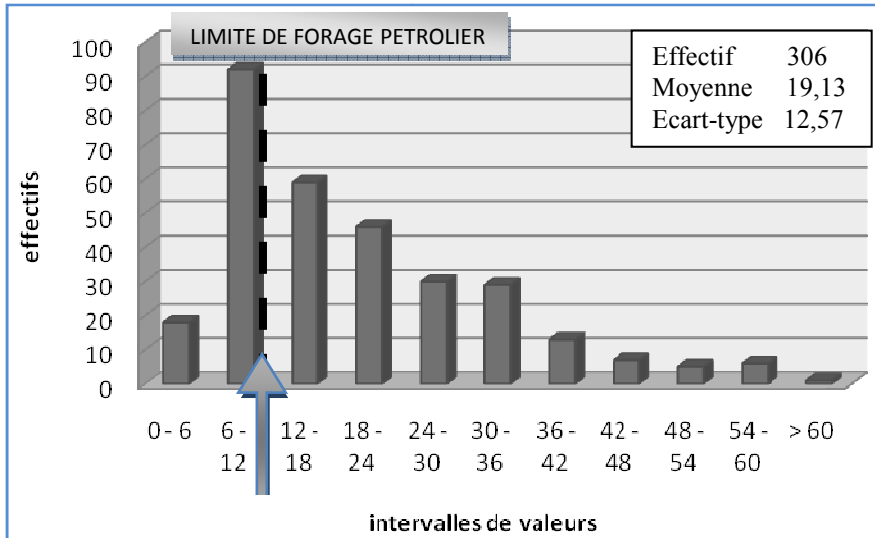
- Dans le cas de filtrat nous avons une moyenne proche de la norme API, (de l'ordre de 22) avec un écart type important (5.5), Nous avons quatre effectifs importants (215 valeurs) sont situés dans l'intervalle [15-18], [18-21], [21-24], [24-27].
- Pour le taux de sable (res <75 μ), la moyenne est faible et loin de la valeur maximum admise pour les exigences du plan de contrôle (25 pour FB1 et 15 pour FB2) et l'écart type est très élevé face à la moyenne.
- L'indice de gonflement comporte une très bonne moyenne qui est supérieur à la valeur exigée par la norme, l'écart type est relativement acceptable.
- Dans cette étude usuelle, on constate qu'il existe des valeurs très erratique et irrégulières pour plusieurs paramètres mais on peut expliquer cela par la chimie et la minéralogie ainsi que par les conditions expérimentales qui peuvent influencer sur les mesures. Heureusement pour certains paramètres comme par exemple le taux de sable (res <75), ce dernier exige un taux max de 15% et 25% pour la bentonite de forage pétrolier et hydraulique, cependant il n'est pas demandé dans d'autres catégories de bentonites de connaître ce taux. On regardera un peu plus loin la possibilité de distinguer les paramètres en utilisant les méthodes multivariées. Pour ces raisons nous avons utilisé la méthode de l'ACP pour affiner cette analyse statistique.

❖ Conclusion :

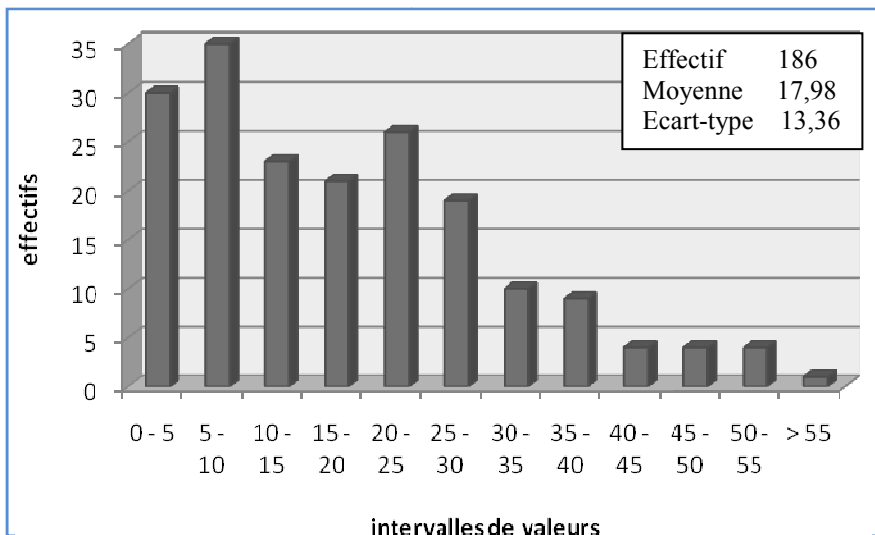
Globalement les caractéristiques rhéologiques de la bentonite de Mostaganem entrent dans les normes et spécification en terme de valeur moyennes mais notons tout de même la grande variabilité des valeurs exprimée par un écart type important que l'on cherchera à expliquer dans l'analyse en composantes principales.

Figure III. 2 Les histogrammes des différents paramètres rhéologiques et physiques.

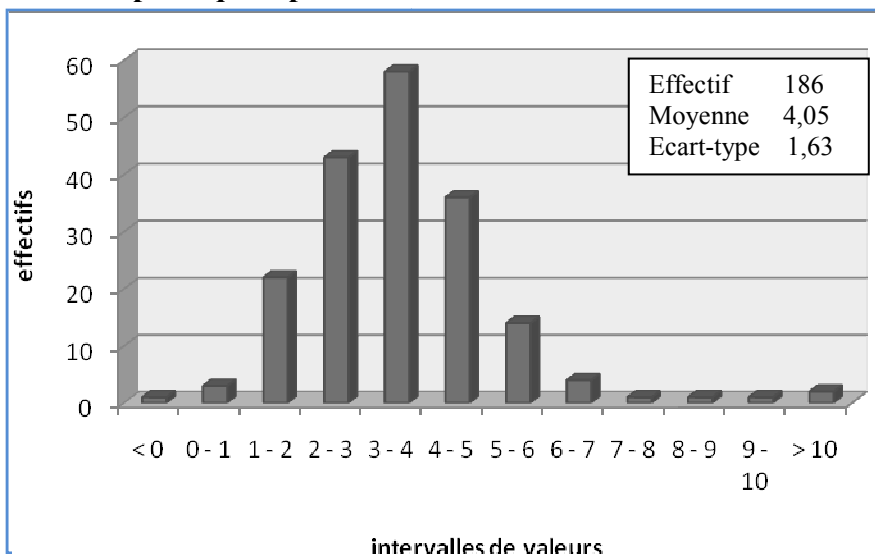
Lecture direct L600 :



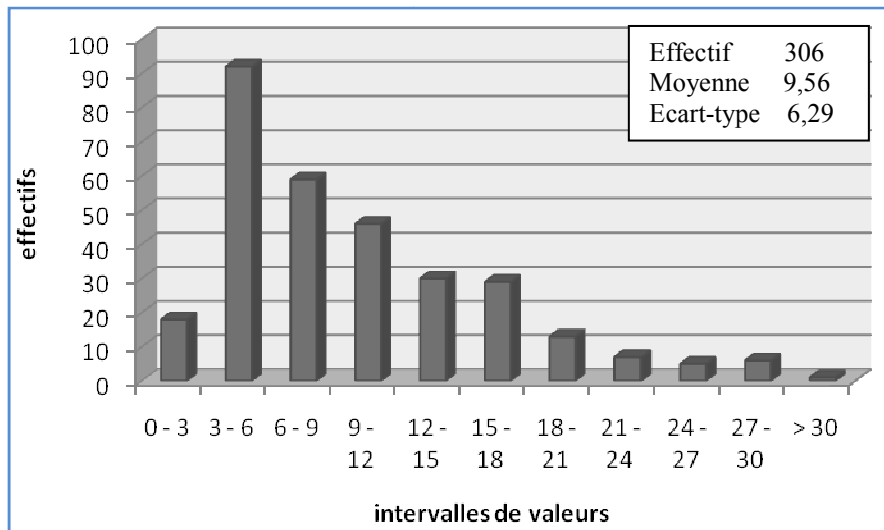
Lecture direct L300 :



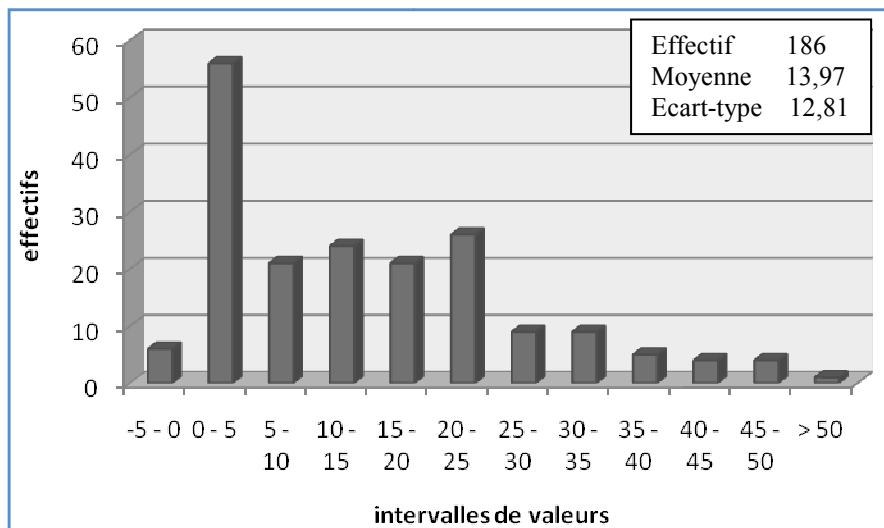
Viscosité plastique Vp :



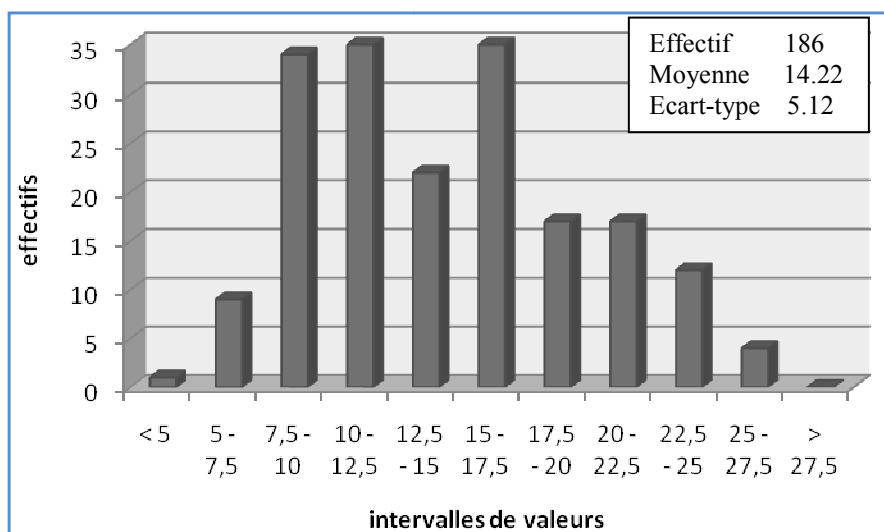
Viscosité apparente : VA =L600/2



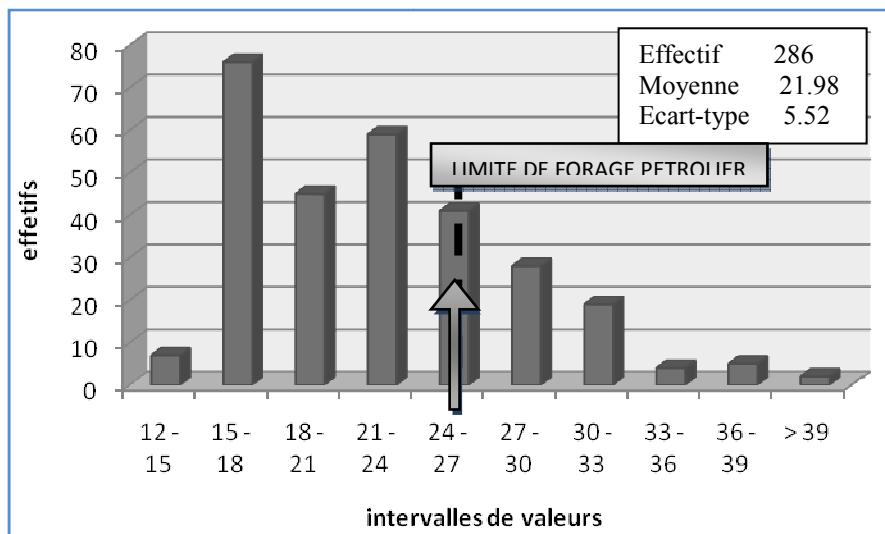
Yield point:



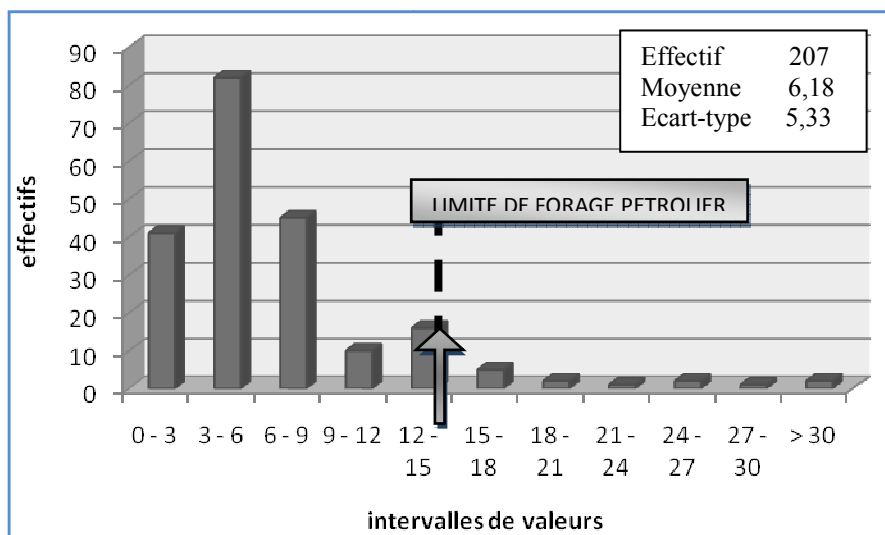
Humidité :



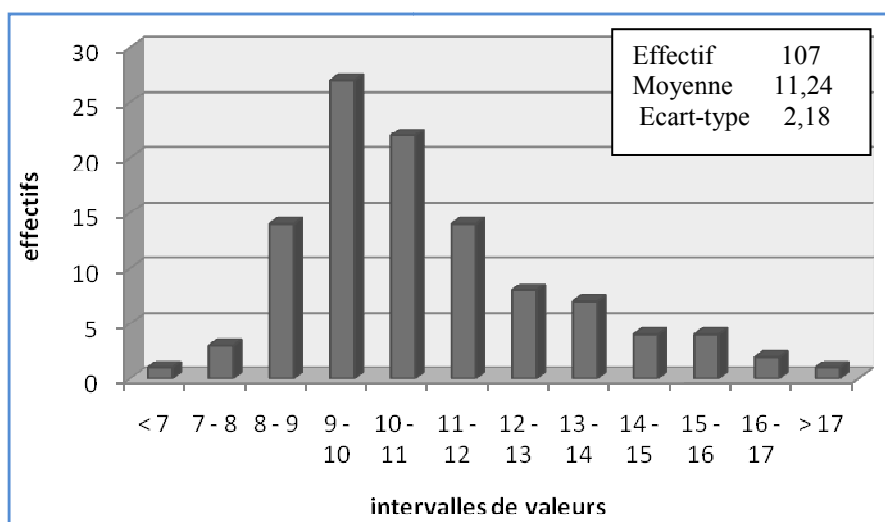
Filtrat :



Res 75 μ :



Indice de gonflement IG :



D- ANALYSE STATISTIQUE FACTORIELLE A PLUSIEURS VARIABLES [12], [13]

En première approximation, on peut considérer que l'analyse statistique à plusieurs variables est née aux environs de 1930. L'analyse en composantes principales (ACP) en tant que méthode statistique multivariée a été créée avant la deuxième guerre mondiale. Cependant, l'application plus large de cette méthode s'est seulement produite dans les années 60, pendant la « révolution quantitative » en sciences naturelles et en sciences sociales.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'ordination classique. A partir d'un ensemble n d'objets dans un espace de p descripteurs, son but est de trouver une représentation dans un espace réduit de k dimensions ($k \ll p$) qui conserve "le meilleur résumé " (au sens du maximum de la variance projetée). Les composantes principales sont des combinaisons linéaires des variables initiales, telles que :

- les CP sont ordonnées selon l'information (variance) qu'elles restituent, la 1^{ère} étant celle qui restitue le plus d'information .
- les CP sont des vecteurs indépendants, c'est-à-dire des variables non corrélées entre elles.

- ❖ L'intérêt de l'ACP :

- Représentation assez fidèle des individus d'une population en 2 ou 3 dimensions.
- Localisation des grandes masses d'individus.
- Détection des individus exceptionnels et d'éventuels groupes isolés d'individus.
- Détection des liaisons entre les variables.

- ❖ Le but de l'ACP :

Trouver des axes orthogonaux (indépendants) qui ont la propriété d'extraire le maximum de la variance projetée (ou inertie projetée) des individus ou objets.

Et cela est abouti à l'aide de :

- calcul de la matrice des données centrées-réduites.
- calcul de la matrice des corrélations variables/variables.
- calcul de la matrice des vecteurs propres et des valeurs propres.

D.1 ETUDE STATISTIQUE MULTIDIMENSIONNELLE DES DONNEES DU GISEMENT M'ZILA

L'exécution de cette étude a été faite selon la démarche suivante :

- Préparation des données dans un fichier EXCEL.
- Importation des données du fichier EXCEL (*.xls) à un fichier SPAD (*.sba).
- Création d'une filière pour faire une ACP.
- exécution des calculs.

La Figure III.3 montre l'étape exécutive de l'étude statistique complète dans SPAD 5.5

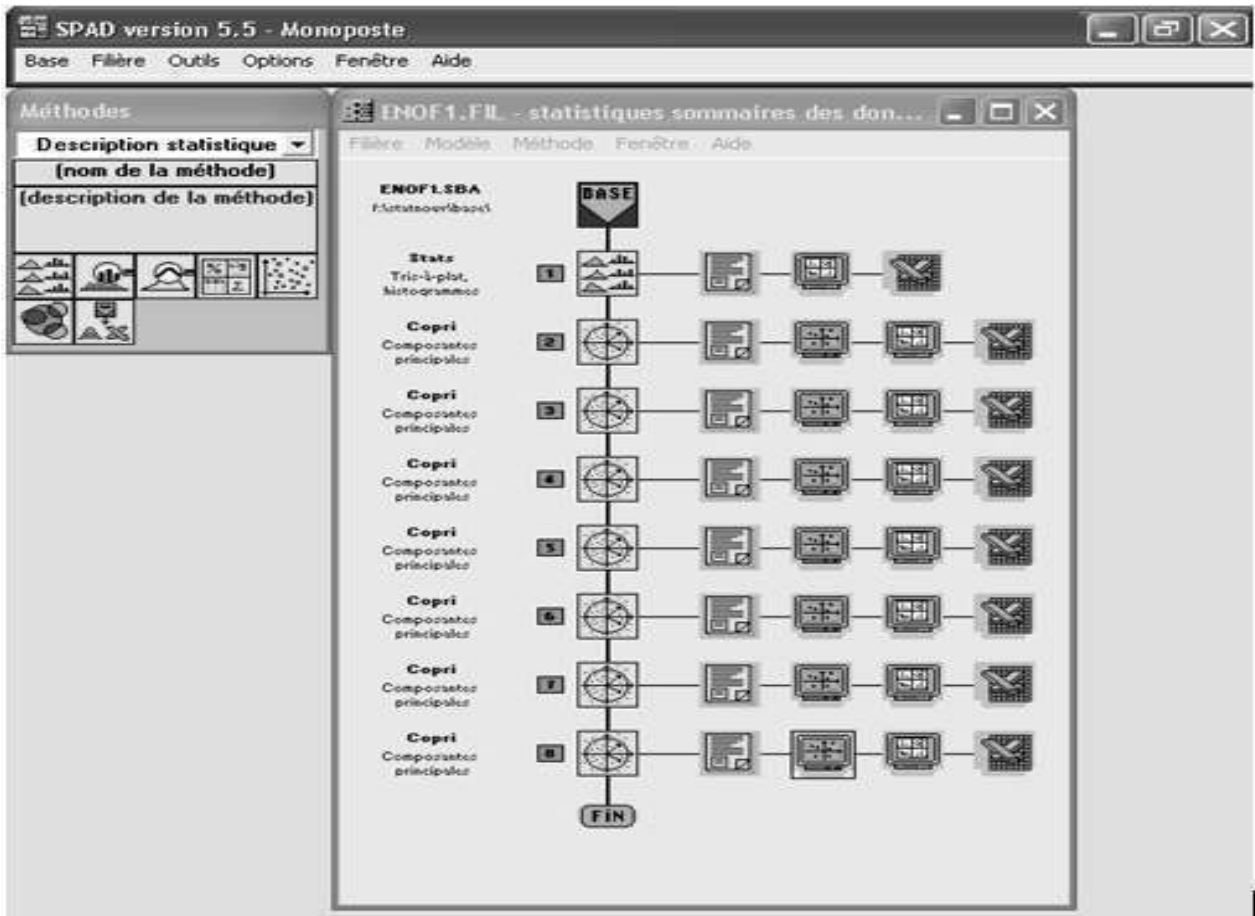


Figure III. 3 Fenêtre de SPAD 5.5 (après exécution des calculs sur le fichier BENTAL1)

D.1.1 ÉTUDE STATISTIQUE MULTIDIMENSIONNELLE GLOBALE

Avant d'entrer dans une analyse plus approfondie des données, il est conseillé d'étudier la matrice de corrélation entre les variables. Le Tableau III.3 nous fournit le coefficient de corrélation calculé en utilisant toutes les données des échantillons qui ont fait l'objet d'une analyse rhéologique complète de base « BENTAL.1 ».

Tableau III. 3 Matrice des corrélations

les variables	couche	rainure	L600	L300	Viscosité Plastique	Yield point	Viscosité Apparente	Humidité	filtrat	res	IG
couche	1,00										
rainure	-0,20	1,00									
L600	0,57	-0,01	1,00								
L300	0,38	0,04	0,87	1,00							
Viscosité Plastique	0,10	0,10	0,42	0,38	1,00						
Yield point	0,38	0,03	0,85	0,99	0,27	1,00					
Viscosité Apparente	0,57	-0,01	1,00	0,87	0,42	0,85	1,00				
Humidité	-0,18	0,35	0,18	0,19	0,24	0,17	0,18	1,00			
filtrat	0,16	-0,13	-0,09	-0,10	-0,26	-0,07	-0,09	-0,22	1,00		
res	0,13	-0,12	0,16	0,11	-0,08	0,12	0,16	-0,11	0,20	1,00	
IG	0,27	-0,25	0,26	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	-0,26	-0,06	1,00

On remarque :

- une corrélation importante entre L600, viscosité apparente et la couche, et une autre moins forte avec L300.
- La corrélation entre Yield Point et L300 est imposée par les hypothèses du calcul.
- Une autre corrélation existe entre L600 et L300, la Viscosité Plastique Vp et Yield Point à cause de l'intervention de la lecture L600 dans les calculs de ces derniers.
- À cause des effets réciproques et complexes entre variables, l'interprétation des coefficients de corrélation n'est pas toujours facile.

L'analyse factorielle des données (tableau III.4) de chaque paramètre montre que les 03 premiers facteurs peuvent quasiment expliquer une grande part de la variance des données puisque ils donnent environs 68.31 % de l'information globale.

Tableau III. 4 Valeurs propres, pourcentage, pourcentage cumulé.

Numéro des axes	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	4,2866	38,97	38,97
2	1,8458	16,78	55,75
3	1,3819	12,56	68,31
4	0,8476	7,71	76,02
5	0,7964	7,24	83,26
6	0,6883	6,26	89,51
7	0,6308	5,73	95,25
8	0,3903	3,55	98,80
9	0,1323	1,20	100,00

La contribution des variables sur les premiers axes factoriels est donnée dans le tableau III.5 qui nous indique que ce sont les caractéristiques rhéologiques qui sont représentées sur l'axe 1 avec la couche et sur l'axe 2 c'est plutôt les propriétés de filtration et d'humidité qui nous renseignent sur l'état de la boue en liaison avec la rainure (propriété de rétention d'eau).

Tableau III. 5 Coordonnées des variables sur les axes 1 à 3 (variables actives)

les variables	Axe 1	Axe 2	Axe 3
couche	-0,57	-0,51	-0,14
rainure	0,00	0,66	0,36
L600	-0,98	-0,05	-0,03
L300	-0,93	0,07	0,19
Viscosité Plastique	-0,47	0,41	-0,11
Yield point	-0,91	0,02	0,21
Viscosité Apparente	-0,98	-0,05	-0,03
Humidité	-0,21	0,69	0,04
filtrat	0,13	-0,54	0,57
res	-0,15	-0,41	0,38
IG	-0,21	-0,19	-0,82

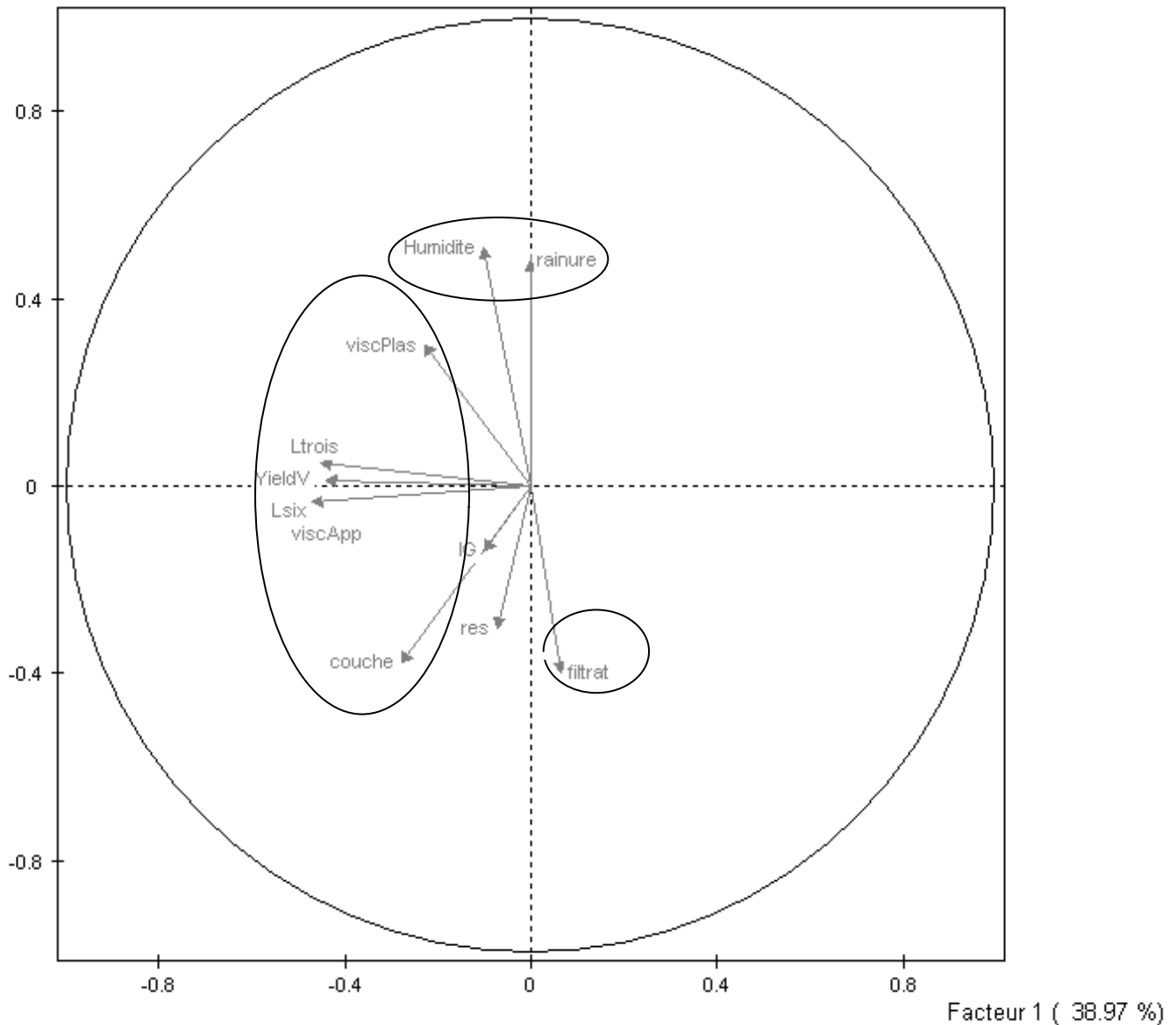
On constate sur la figure III.4 la présence de trois groupements, le premier est caractérisé par le regroupement de la « couche » et les caractéristiques rhéologiques : « L600, L300, viscosité

plastique et Yield point » sur l'axe factoriel N° 1, ce qui montre une forte relation entre les propriétés de consistance (la viscosité) de la bentonite et la couche que nous pouvons expliquer par l'accroissement de la viscosité en profondeur des couches, le deuxième représente le regroupement « humidité- rainure » sur l'axe factoriel N°2 qui évoluent dans le même sens. La relation qui existe entre ces deux paramètres c'est la distribution des paramètres dans la surface horizontale puisque, d'une part l'humidité se localise le long de la surface, et d'une autre part les rainures qui se sont distribuées en surface d'une manière horizontale. Au deuxième regroupement s'ajoute le « filtrat ou l'eau libre » qui met en évidence la relation qui peut exister dans ce regroupement comme étant la propriété de rétention d'eau.

Figure III. 4 Cercle de corrélation (axe 1 et 2) des variables continues (BENTAL.1).

Axes factoriels 1 et 2 : 55.75%

Facteur 2 (16.78 %)

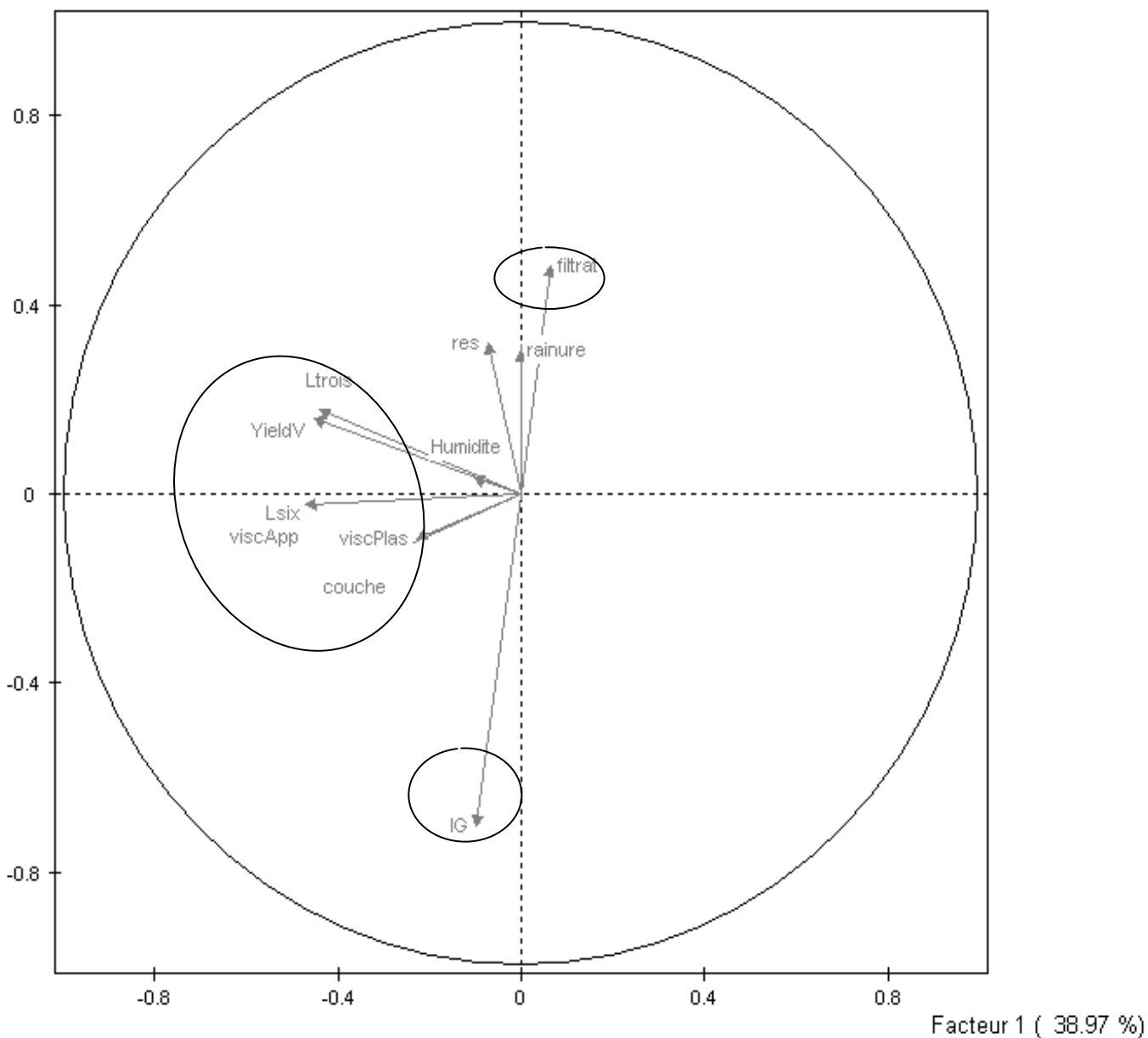


Dans la Figure III.5 on observe dans l'axe 3, une relation opposée entre « filtrat » et l'indice de gonflement. Plus l'eau libérée du sol est importante, plus le gonflement diminue et inversement, et ce qui est expliqué par la propriété de rétention d'eau.

Figure III. 5 Cercle de corrélation des variables continues (BENTAL.1).

Axes factoriels 1 et 3 :51.53 %

Facteur 3 (12.56 %)



D.1.2 ÉTUDE STATISTIQUE DÉTAILLÉE

Dans une suite logique de l'étude, nous avons utilisé la même base des données « BENTAL.1 » en faisant un filtre sur les données afin de mieux affiner les observations qualitatives précédentes. Nous avons remarqué que cette étude ne serait satisfaisante et complète que par une autre étude détaillée et cela en analysant les variables couche par couche séparément. L'étude statistique multidimensionnelle détaillée avec ACP confirme les mêmes résultats que l'étude statistique multidimensionnelle globale.

Couche III

Tableau III. 6 Statistiques sommaires de la couche III

les variables	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
L600	32	8,84	2,24	5,00	16,00
L300	16	4,87	2,03	2,00	10,00
Viscosité Plastique	16	3,06	0,97	2,00	6,00
Yield Value	16	1,81	1,74	-1,00	5,00
Viscosité Apparente	32	4,42	1,12	2,50	8,00
Humidité	16	15,94	2,84	12,00	24,00
filtrat	22	27,77	4,35	22,00	42,00
Res	32	6,48	2,78	0,50	13,00
IG	05	8,82	0,18	8,60	9,00

Le Tableau III.6 nous fournit les statistiques sommaires de la couche III en utilisant SPAD. On voit bien que nous avons dans cette couche une moyenne de la viscosité faible (L600) avec un écart type important. Par contre, nous avons un filtrat très élevé, donc elle est de qualité peu satisfaisante pour les boues de forage, mais elle est convenable comme charge industrielle.

Couche IV:

Tableau III. 7 Statistiques sommaires de la Couche IV

Libellé de la variable	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
L600	55	9,564	2,808	4,000	17,000
L300	18	6,833	2,432	4,000	12,000
Viscosité Plastique	18	4,444	1,257	3,000	8,000
Yield Value	18	2,389	2,430	-3,000	7,000
Viscosité Apparente	55	4,782	1,404	2,000	8,500
Humidité	18	16,167	3,948	11,000	27,000
filtrat	50	18,920	2,989	15,000	32,000
res	49	4,347	1,607	2,000	10,000
IG	35	10,237	0,714	9,000	12,000

Les statistiques sommaires de la couche IV que nous offre Le Tableau III.7, montre que cette couche à une viscosité L600 inférieure à la norme pour le forage mais a un filtrat acceptable, ce qui lui confère une utilisation pour le forage hydraulique vu les normes requises en améliorant la viscosité par coupage avec une autre couche à viscosité élevée.

Couche VII :

Tableau III. 8 Statistiques sommaires de la Couche VII

les variables	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
L600	17	6,706	2,629	3,000	12,000
L300	17	4,412	2,031	2,000	8,000
Viscosité Plastique	17	2,294	1,362	-2,000	4,000
Yield Value	17	2,118	2,246	-1,000	7,000
Viscosité Apparente	17	3,353	1,315	1,500	6,000
Humidité	17	11,177	2,915	8,000	17,000
filtrat	17	19,282	3,742	13,400	27,000
res	13	9,769	6,553	3,000	28,000

La couche VII montre une viscosité (L600) faible en moyenne avec un écart type élevé, et vu son taux d'humidité cette bentonite peut être utilisée comme charge industrielle.

Couche X :

Tableau III. 9 Statistiques sommaires de la Couche X

Les Variables	Effectif	Moyenne	Ecart-Type	Minimum	Maximum
L600	65	16,569	4,933	7,000	33,000
L300	30	13,667	4,819	4,000	28,000
Viscosité Plastique	30	3,967	0,795	2,000	6,000
Yield Value	30	9,700	4,670	1,000	23,000
Viscosité Apparente	65	8,285	2,467	3,500	16,500
Humidité	31	13,700	4,734	5,000	23,000
filtrat	65	20,631	5,090	12,000	37,000
res	45	4,989	6,959	0,000	34,000
IG	35	11,614	2,690	7,000	17,800

La couche X apparaît très intéressante, elle a une viscosité moyenne (L600) supérieure à la valeur minimale requise pour le forage pétrolier, le filtrat est également bon, cela implique que cette couche est favorable pour une utilisation comme boue de forage pétrolier. Cette bentonite est considérée comme « bentonite standard » vu ses qualités.

Couche XI :

Tableau III. 10 Statistiques sommaires de la Couche XI

Les Variables	Effectif	Moyenne	Ecart-Type	Minimum	Maximum
L600	49	33,490	10,459	13,000	58,000
L300	49	28,449	10,102	9,000	52,000
Viscosité Plastique	49	5,041	1,749	2,000	12,000
Yield Value	49	23,408	10,041	0,000	46,000
Viscosité Apparente	49	16,745	5,230	6,500	29,000
Humidité	49	18,776	4,423	9,000	26,000
filtrat	49	20,143	3,934	15,000	33,000

Le tableau III.10 montre une bentonite à caractéristique rhéologique très intéressante (viscosité), et vu ces résultats, cette couche s'oriente vers une utilisation comme boue de forage pétrolier, et peut jouer le rôle d'un adjuvant qui améliorera les caractéristiques des couches pauvres en faisant un coupage avec les autres couches. La bentonite de cette couche se classe comme « super-bentonite » par rapport à ses qualités (la viscosité L600) qui est supérieure à 30centipouises.

Couche XIV :

Tableau III. 11 Statistiques sommaires de la Couche XIV

les variables	Effectif	Moyenne	Ecart-type	Maximum	Minimum
L600	88	25,136	13,501	4,000	85,000
L300	56	22,625	14,625	2,000	81,000
Viscosité Plastique	56	3,839	1,698	1,000	12,000
Yield Value	56	18,786	14,204	0,000	77,000
Viscosité Apparente	88	12,568	6,751	2,000	42,500
Humidité	56	10,304	3,099	4,000	19,000
filtrat	83	24,966	5,837	15,000	39,000
res	68	7,474	5,757	1,000	30,000
IG	32	12,294	2,030	9,000	17,000

La couche XIV présente un fort potentiel en terme de qualité de boue de forage avec L600 très élevée, et ressemble beaucoup à la couche XI. C'est la couche la plus importante du gisement. Elle est de très bonne qualité pour la boue de forage bien qu'elle ait un volume d'eau libre qui est élevé (à la limite de la valeur maximale normalisée 25). La couche XIV se classe aussi dans la catégorie des « super-bentonites ».

V. CONCLUSION

Le résultat de l'étude statistique présentée dans ce chapitre peut être résumé de la façon suivante :

- Bien évidemment, L'étude statistique simple et factorielle (étude qualitative et quantitative) a démontré l'existence d'une relation apparente entre la viscosité représentée par ses paramètres, la couche de la bentonite et la direction du maximum de la variation dans l'espace multivariable, cette relation nous pouvons l'assimiler à la consistance qui englobe l'ensemble des caractéristiques rhéologiques de la bentonite, de telle sorte que la viscosité s'amplifie dans la profondeur des couches.
- Dans l'axe 2 et 3 de cercle de corrélation, la relation entre l'humidité, la rainure et filtrat est plus compliquée, mais nous pouvons néanmoins donner une explication entre les variables liées à la présence de l'eau dans les pores. On peut assimiler cette relation à la propriété de rétention d'eau de la bentonite avec les rainures qui sont superficielles.
- L'étude statistique détaillée a affirmée la possibilité d'orienter l'utilisation de la bentonite sans passer par d'autres techniques plus coûteuses et plus complexes, en désignant les catégories des bentonites pour chaque couche étudiée.
- le classement de la catégorie des bentonites pour les couches étudiées est :
 - ❖ super-bentonite : couche XI et XIV au Nord Ouest du gisement ;
 - ❖ bentonite-standard : couche X au Nord du gisement ;
 - ❖ bentonite à charge industrielle : couche VII et couche III au Sud du gisement;
 - ❖ bentonite de forage hydraulique : couche IV par coupage avec une bentonite-standard (couche X) au Sud Est du gisement.
- L'augmentation de la variance est un paramètre important et le plus difficile à gérer. Pour l'exploitant il n'est pas très difficile de s'adapter à une augmentation ou une baisse de la moyenne présumée pour chaque paramètre rhéologique mais il est difficile de s'adapter à une variation de variance.

CHAPITRE IV : Exploitation du gisement

I. INTRODUCTION :

L'exploitation à ciel ouvert des couches de bentonites se fera à partir de chantiers se situant à l'affleurement des couches à la surface et plusieurs devront être ouverts simultanément pour alimenter l'usine. Les chantiers pouvant fournir jusqu'à 143 tonnes par jour pendant 6 mois de l'année, alors l'exploitation et le développement pourront se faire en même temps.

L'exploitation des argiles du chantier M'ZILA vise exclusivement la production des bentonites finies (boues de forage, fonderie et charge industrielle).

Les réserves minières sont confinées essentiellement dans les couches III, IV, VII, X, XI et XIV, qui seront exploitées par deux zones d'extraction dont le développement va se faire d'une manière horizontale et étroite et d'une profondeur excédant rarement les 20 mètres.

Les chantiers qui seront exploités au cours des années sont situés sur l'affleurement de 6 couches à la surface. Ils sont donc de faible tonnage chacun et il faut en exploiter plusieurs concomitamment.

La planification des développements de ces chantiers d'abattage est le pivot de l'exploitation. Une bonne planification est celle qui prévoit quels seront les chantiers à développer et ceux à exploiter de façon à donner la production de minerai annuellement requis par l'usine (23000 tonnes par an).

Les travaux d'exploitation sont répartis sur trois chantiers :

- Travaux de découverte
- Travaux d'extraction et mise en stock intermédiaire
- Travaux de chargement et transport vers l'usine.

II. CONDITIONS TECHNICO-MINIÈRES DU GISEMENT DE M'ZILA

A. RÉGIME DE FONCTIONNEMENT [6]

L'exploitation du gisement de M'ZILA fonctionne selon le régime suivant :

- Le nombre de jours ouvrables par an161 jours/an
durant la période comprise entre le mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre ;
- Le nombre de jours ouvrables par semaine6 jours /semaine ;
- Le nombre de postes de travail par jour.....1 poste /jour ;
- Le nombre d'heures de travail par poste7 heures /poste.

B. CAPACITÉ DE PRODUCTION [6]

B.1. CAPACITÉ ANNUELLE DE PRODUCTION, A [t/an] :

La tâche technique assignée à ce projet est d'alimenter une usine de production annuelle en bentonite égale à 23000 tonnes /an. Donc : **A = 23000 tonnes /an**

B.2. PRODUCTION JOURNALIÈRE, Aj [t/j] :

La production journalière est le rapport de la production annuelle « A » sur le nombre de jours ouvrables par an « Njo » :

$$A_j = A / N_{jo}$$

IV.1

$$A_j = 143 \text{ tonnes /jour}$$

B.3. PRODUCTION PAR POSTE, Ap [t/poste] :

Elle est calculée à partir de la formule suivante :

$$A_p = A_j / N_{pj}$$

IV.2

Où:

Aj - la production journalière, Aj = 143 t/jour ;

Npj - le nombre de postes par jour, Npj = 1 poste.

$$A_p = 143 \text{ tonnes / poste}$$

C. DURÉE DE VIE DE LA MINE [6]

La durée d'exploitation est déterminée par l'expression suivante

$$T = Q / A$$

IV.3

Où :

Q - les réserves actuelles du gisement, Q= **1090160 t, [6]**;

A - la production annuelle de la carrière, A = **23000 t/an.**

$$T = 47 \text{ ans}$$

III. DEVELOPPEMENT DES TRAVAUX

L'exploitation du gisement doit se faire en deux temps: le développement, qui consiste à décaper les collines pour ôter le stérile, et l'abattage mécanisé qui consiste à extraire le minerai brut.

Le taux de production à l'usine permet de faire ces deux opérations, à mi-temps chacune, avec une seule équipe de travail et le même équipement.

A. LA DECOUVERTURE DU GISEMENT [14], [4], [15]

Avant de commencer la découverte, un fossé de dérivation des eaux de pluie doit être creusé en amont du chantier de façon à garder à sec la zone de travail de décapage. Le fossé doit récolter et diriger les eaux d'écoulement venant de la colline vers un endroit choisi qui ne nuit pas aux véhicules (embourbage).

Les travaux de découverte consistent à déplacer la terre stérile de recouvrement vers les terrains réservés à cet effet (mise à teruil). De façon à réduire la contamination du minerai par le stérile, et à faciliter l'abattage, le décapage doit commencer à la limite du chantier et progresser vers la couche de bentonite. Ceci est illustré à la figure IV.1.

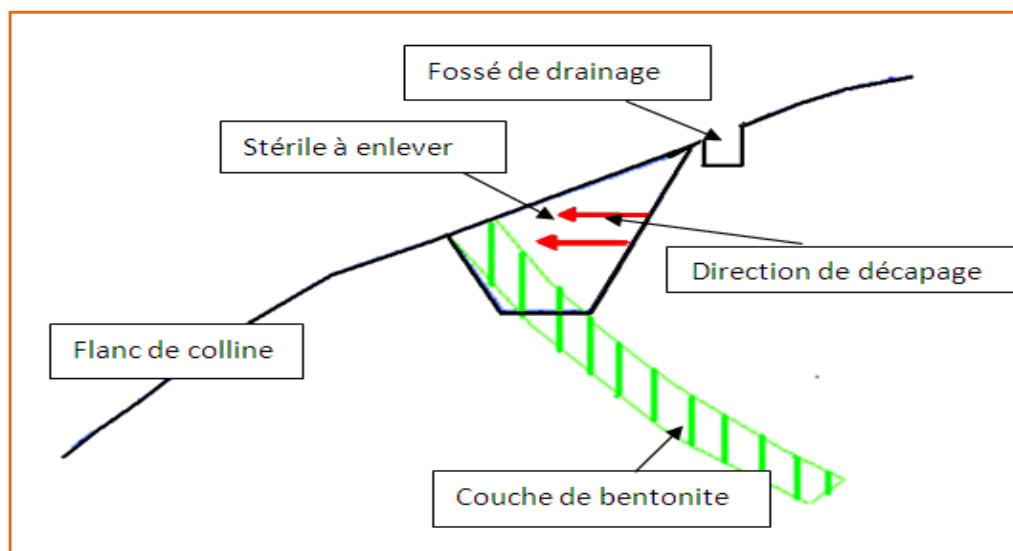


Figure IV. 1 Section typique d'une exploitation de bentonite à M'ZILA.

Le stérile est chargé dans les camions qui le déversent à un endroit approprié (trou à remplir ou stabilisation des voies d'accès) après s'être assuré que l'aire de dépôt ne sera pas exploitée ultérieurement.

Le gisement de M'ZILA dispose d'un bulldozer CATERPILLAR de type D75, ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau IV. 1 Caractéristique de bulldozer CATERPILLAR D75

Puissance du moteur		250 ch
Caractéristiques de la lame	capacité	3.89 m ³
	Longueur de la lame	4.12 m
	Hauteur de la lame	1.11 m
	Profondeur de cavage	0.67 m
Caractéristiques des dents de rippage	Largeur de la poutre	2.20 m
	Profondeur maximale de défoncement	0.748 m

B. ACCÈS ET OUVERTURE DU GISEMENT [16]

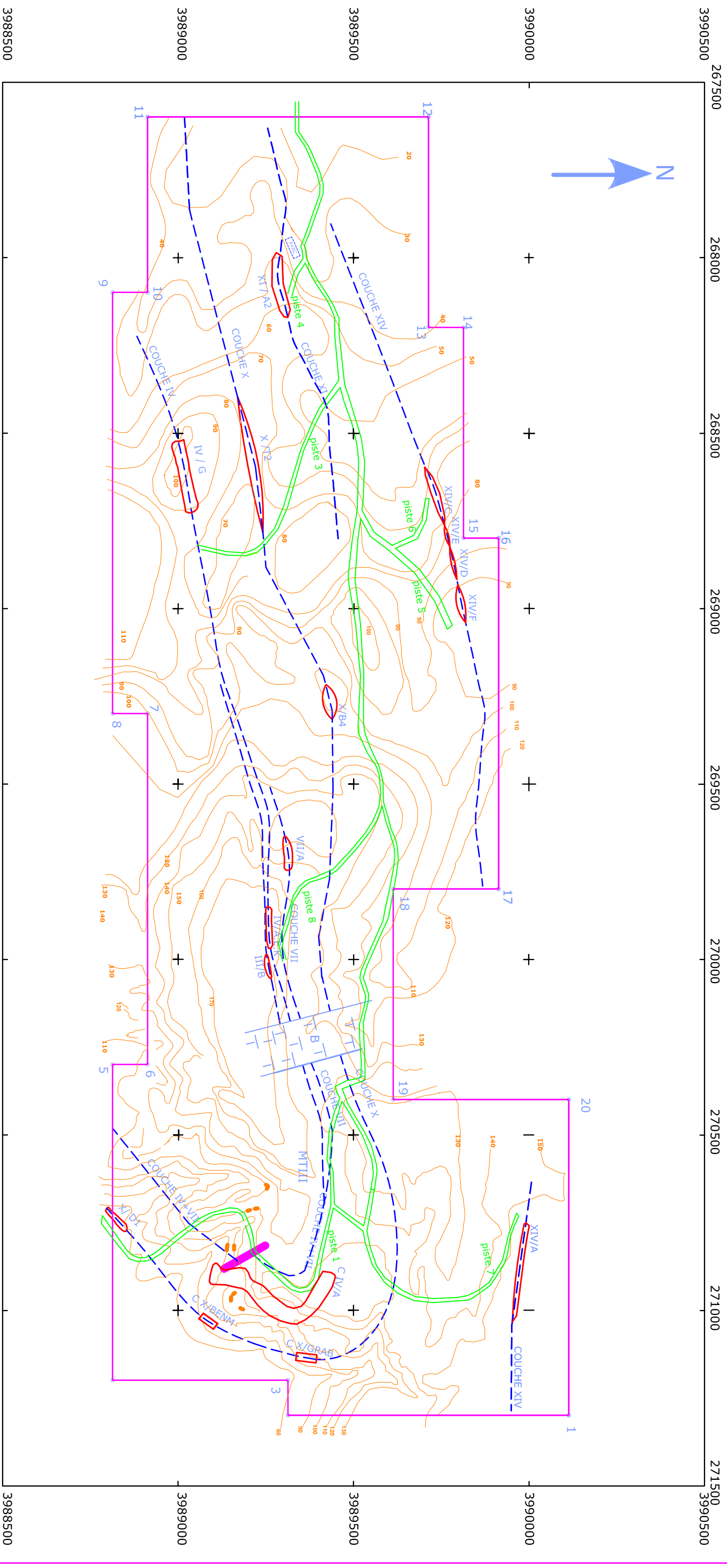
Les pistes d'accès aux parcelles d'exploitations dont la longueur atteint plus que 6 Km (figure IV.2) nécessitent un entretien périodique deux (02) fois par an. Elles deviennent impraticables après les pluies.

B.1. LA LONGUEUR DES PISTES

La longueur moyenne de chaque piste est donnée dans le tableau suivant :

Tableau IV. 2 La longueur moyenne des pistes d'accès

Couches	Parelles	Piste d'accès	Métrage
III	B	P1	400 m
IV	A	P2	600 m
	AEK	P3	500 m
X	T2	P4	400 m
XI	A2	P5	070 m
XIV	F	P6	400 m
	C	P7	200 m
	A	P8	4000 m



GISEMENT DE M'ZILA

Superficie du gisement = 3690000 m² = 369 ha
 Le périmètre du gisement = 10800 m

- Bornes du périmètre minier
- périmètre minier
- ▣ Zone broyée
- ▬ Faille
- ▭ Carrière et son numéro
- C. XIV Couche et son numéro

Figure IV. 2 Les pistes d'accès

PROJET D'OPTIMISATION D'EXPLOITATION DU GISEMENT MULTICOUCHE DE BENTONITE DU M'ZILA (W.MOSTAGANEM)

ECHELLE	REALISE SUR AUTOCAD PAR	PROMOTION	CONTROLE PAR
1/2500	M.OUAHAB	2007-2008	K.OMRACI

B.2. LA LARGEUR DE LA PISTE

La largeur de la chaussée des pistes dépend des paramètres techniques des camions utilisés pour le transport. Pour une voie double, elle est donnée par la formule suivante :

$$T = 2(A + C) + X + r \quad (\text{IV.4})$$

Où :

A - la largeur de la benne du camion MAN, $A = 4,6 \text{ m}$;

C - la largeur de la bande de sécurité déterminée par la relation :

$$C = 0,5 + 0,005 * V \quad (\text{IV.5})$$

$V = 20 \text{ Km/h}$, la vitesse moyenne des camions.

$$C = 0,60 \text{ m} ;$$

X - la distance entre les bennes des camions, $X = 2 * C$, soit : $X = 1,20 \text{ m}$;

r - la largeur de la rigole d'évacuation d'eau, $r = 0,4 \text{ m}$.

La largeur de la piste sera :

$$T = 12. \text{ m}$$

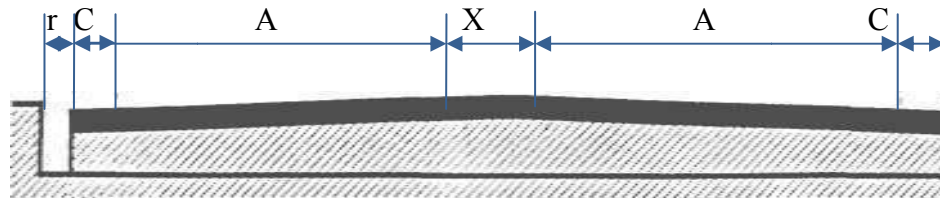


Figure IV. 3 Profils en travers de la piste d'accès.

Echelle (1/100)

B.3. LA PENTE DE LA PISTE :

Le profil des pistes doit permettre l'évacuation des eaux météoriques. Pour cela, les pistes doivent être légèrement inclinées :

- 8 à 10 % en ligne droite ;
- 5 à 6 % dans les virages.

Dans les virages afin d'éviter que les engins miniers et de transport ne sortent de la piste, on envisage un léger dévers qui doit être inférieur à 3 %.

C. TECHNOLOGIE D'EXPLOITATION [16], [17], [14]**C.1. SYSTEME D'EXPLOITATION :**

L'exploitation est un processus complexe et décisif. La finalité de l'exploitation est de permettre en sécurité, au maximum et en moins de pertes et de dilution, l'extraction des minerais utiles du sol (ou du sous- sol) avec un effet économique.

Etant donné que les argiles sont des roches tendres, l'extraction de ces roches va être réalisée par rippage, le chargement avec une chargeuse sur pneu et enfin, le transport sera par camions, globalement le sens d'orientation de l'exploitation sera d'Ouest en Est pour les couches les plus importantes.

Le choix de la méthode d'exploitation dépend des différents engins miniers et de transports employés ainsi que les exigences d'usine qui va être alimenté par les argiles bentonitiques de ce gisement. Par conséquent, on propose une méthode d'exploitation où l'extraction se fera par gradins conduits successivement jusqu'au contour optimal, les travaux miniers dans le gradin inférieur ne démarrent que peu avant la fin de ceux dans le gradin immédiatement supérieur.

Afin d'obtenir le front initial des travaux, chaque gradin sera préparé par creusement d'une piste d'accès à partir de la route principale qui constitue la limite occidentale du gisement. Ces pistes seront tracées latéralement au sens de développement des gradins d'exploitation.

C.2. ELEMENTS DU SYSTEME D'EXPLOITATION :

La nature du gisement ainsi que les engins mis en œuvre pour l'extraction et le transport des roches minières et stériles prédéterminent les principaux paramètres du système d'exploitation.

C.2.1. Hauteur du gradin :

Le choix de la valeur de cet élément dépend :

- Des propriétés physico- mécaniques de la roche ;
- De la stabilité des talus des gradins ;
- Des paramètres de travail du bulldozer.

Pour le gisement de M'Zila, la hauteur maximale des gradins est fixée à 4 m à cause de la faible consolidation de cette roche et également des paramètres de stabilité des talus.

C.2.2. Angle de talus du gradin :

Il est fonction des mêmes paramètres cités pour la hauteur du gradin.

- L'angle de talus du gradin en exploitation sera : $\alpha = 45^\circ$.
- L'angle de talus du gradin en liquidation sera : $\delta = 38^\circ$.

C.2.3. Largeur de la plate forme de travail :

L'extraction des roches minières sera réalisée par émottage mécanique ainsi donc, la largeur minimale de la plate forme de travail serait :

$$L_{p.t} = Z + T + C + A, [m] \quad (IV.6)$$

Où :

Z - la largeur du prisme éventuel d'éboulement. [m] ;

T - la largeur de la voie de transport, [m] ;

C - la distance entre l'arête inférieure du talus et la voie de transport, [m] ;

A - la largeur de l'enlevure en massif, [m].

- La valeur de « Z » est donnée par la formule (cf figure IV.4) suivante :

$$Z = H \left[\frac{1}{\text{tg}(\delta)} - \frac{1}{\text{tg}(\alpha)} \right] \quad (IV.7)$$

Où :

H[m] - la hauteur du gradin ;

$\delta[^\circ]$ - l'angle de talus du gradin en liquidation ;

$\alpha[^\circ]$ - l'angle de talus du gradin en exploitation ;

Pour : H = 4m, $\delta = 38^\circ$ et $\alpha = 45^\circ$, on trouve :

$$Z = 4 \left[\frac{1}{\text{tg}(38)} - \frac{1}{\text{tg}(45)} \right] = 1.12m$$

Z = 1.12 m mais. pour avoir plus de sécurité, on prend

$$\mathbf{Z=1.5m}$$

- La valeur de « C » est donnée par l'expression

$$C = 0,2 * H \tag{IV.8}$$

Ce qui nous donne : **C=0.8 m**

- Nous avons vu précédemment (accès et ouverture du gisement) que **T=12m**

- La largeur de l'enlevure en massif « A » est égale à l'entrée des dents de rippage qui est égale à la largeur moyenne du trapèze « ABED » défoncé par le ripper, c'est-à-dire (du chapitre 4, paragraphe II.4) : **A=3.27m**

- Alors, la largeur de la plate- forme minimale serait égale à : **Lp.t=17.6 m**

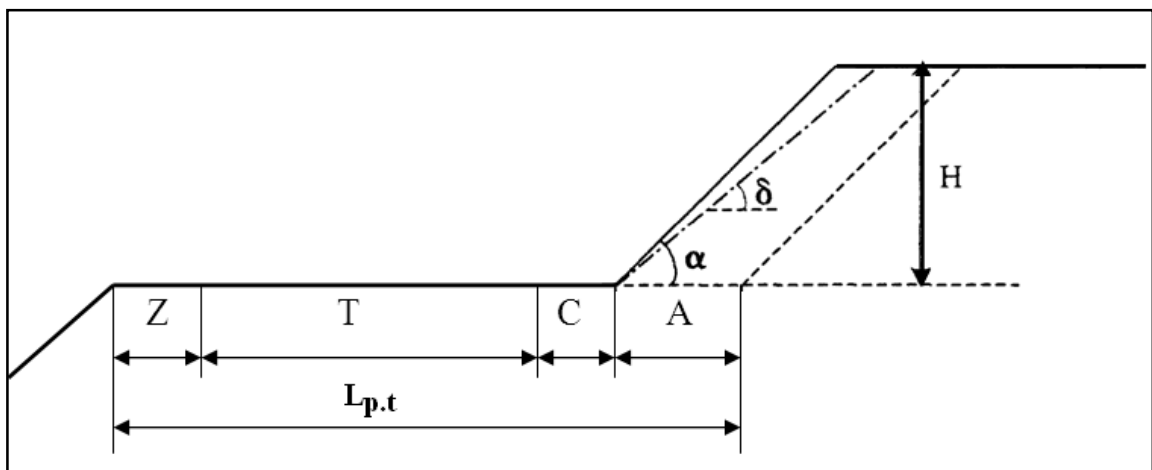


Figure IV. 4 Largeur de la plate forme de travail.

Echelle (1 / 200)

C.2.6. Longueur du bloc

Suivant la longueur, un gradin peut être divisé en blocs dont leur longueur est fonction de la production. Si on détermine la longueur du bloc « L_B » pour une production hebdomadaire « A_{heb} »; on aura :

$$L_B = A_{heb} / (A * H) \tag{IV.9}$$

Où :

A_{heb} - la production hebdomadaire de la carrière, $A_{\text{heb}} = 429 \text{ m}^3 / \text{semaine}$;

H - la hauteur du gradin, $H = 4 \text{ m}$;

A - la largeur de l'enlevure en massif, $A = 3,27 \text{ m}$.

Le calcul nous donne :

$L_B = 33 \text{ m}$

D. PROCESSUS D'EXPLOITATION

D.1. L'EXTRACTION [18], [16], [14]

L'extraction est réalisée par émottage mécanique des roches à l'aide des rippers remorqués par bulldozers, un ripper est un lourd multident (ou trident). Ces derniers, qui s'enfoncent dans le sol durant la translation, sont suffisamment écartées pour permettre le dégagement de la matière désagrégée.

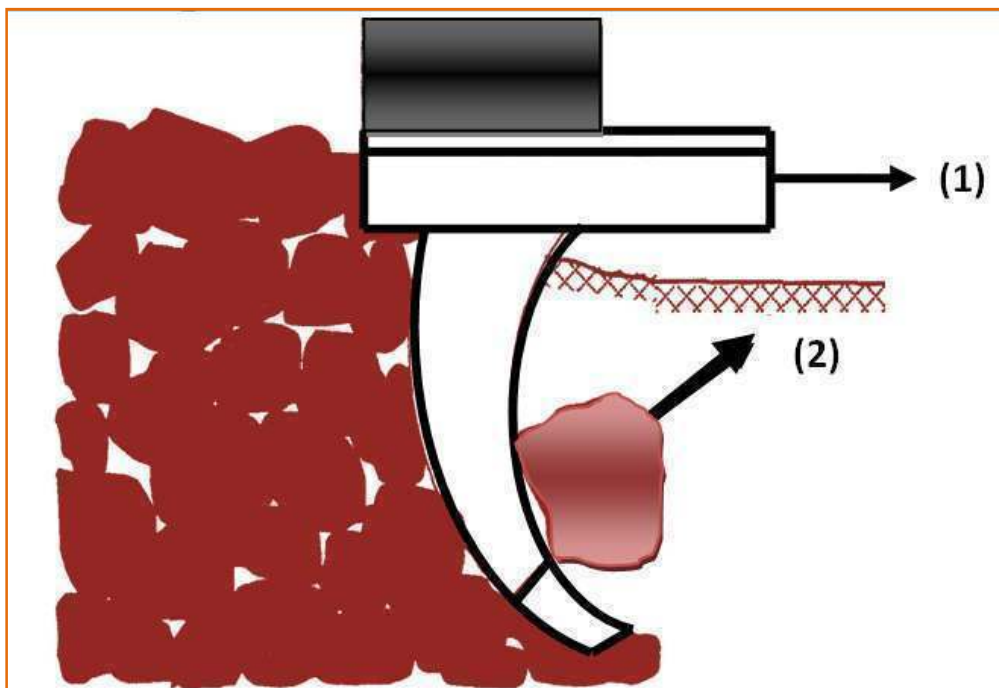


Figure IV. 5 Schéma de l'action du ripper sur le sol.

(1) – le sens de déplacement du ripper ;

(2) – le sens d'arrachement des roches .

D.1.1. Le défoncement au ripper :

❖ La direction :

La direction de défoncement est imposée par le tracé du chantier. Il est recommandé de réaliser la scarification dans la direction de refoulement des bulldozers, c'est-à-dire le long du bloc d'excavation.

❖ La vitesse :

Afin d'obtenir une production économique et d'éviter l'altération des dents du ripper. Il est recommandé de choisir une vitesse de rippage qui est égale à **1,5 Km/h**.

❖ Le nombre de dents :

Il est nécessaire de faire des essais avant de décider du nombre de dents. Puisque les argiles sont des roches tendres, on peut commencer à travailler avec deux dents. Si le matériau est facilement pénétré et défoncé en blocs de taille satisfaisante, on essaye de travailler avec trois dents.

❖ La profondeur de défoncement :

La profondeur effective de défoncement du massif peut être déterminée à l'aide de l'expression suivante :

$$h_d = (1/K_2)[K_1 * h_t - 0.5(d - B_s) * \text{tg}\theta] \quad (\text{IV.10})$$

Où :

K₁ - le coefficient qui tient compte de la forme de la section de la fente ;

K₂ - le coefficient qui tient compte de l'influence de l'état du massif sur les dimensions des piliers non détruits qui se forment lors des passages;

B_s - la largeur du fond de la fente;

θ - l'angle du bord de la fente, généralement il est compris entre **40°** et **60°**, Pour notre projet, on prend **θ = 50°** ;

d - la distance entre les passages voisins, **d = 1 m** ;

h_t - la profondeur maximale de la pénétration de la dent, **h_t = 0,748 m**.

Les paramètres K_1 , K_2 et B_s sont les indices de rippabilité qui dépendent de la nature du terrain à scarifier. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 3 Les indices de rippabilité

Classe des roches en fonction de leur rippabilité	K_1	K_2	B_s [m]
Facilement ameublées	1.00	0.85	0.30-0.50
Moyennement ameublées	0.95	0.95	0.20-0.30
Difficilement ameublées	0.90	1.00	0.15-0.25

On considère que les argiles de M'ZILA sont des bentonites facilement ameublées, et dont les indices de rippabilité sont les suivants :

$$K_1 = 1.00, K_2 = 0.85 \text{ et } B_s = 0.40.$$

Donc, la profondeur de défoncement effectif du massif serait :

$$h_d = (1/0.85)[1*0.748 - 0.5(1-0.40)*\text{tg}50]$$

$$h_d = 0.46\text{m}$$

❖ Durée d'un cycle de rippage:

Le bloc d'excavation est subdivisé en trois sous- blocs, qui vont être rippés séparément. La durée d'un cycle de rippage est la durée de rippage d'un sous-bloc d'excavation, elle comprend le temps d'une passe « Trip » et le temps des manœuvres « Tm ».

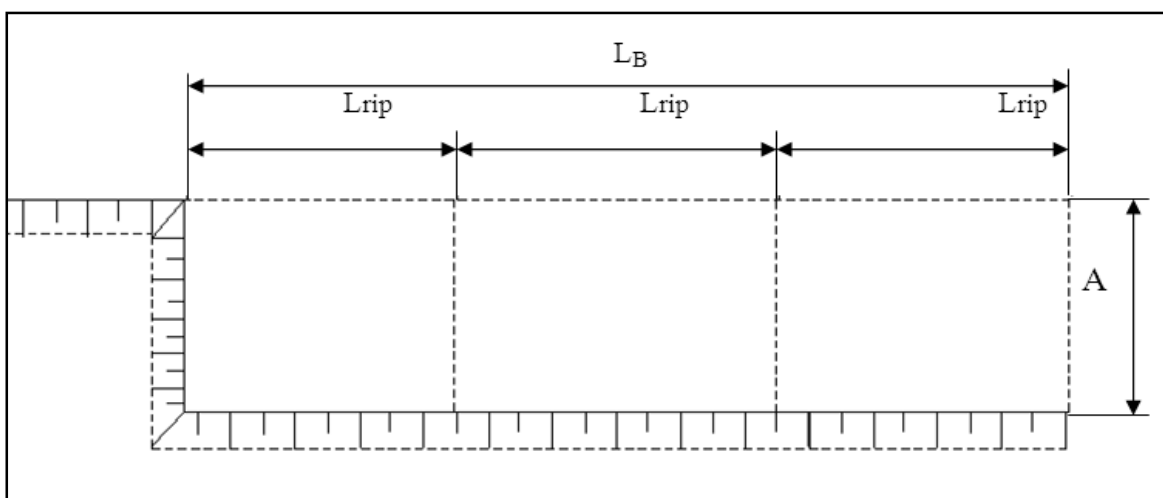


Figure IV. 6 Schéma représentant la subdivision du bloc d'excavation en sous-blocs.

- Le temps d'une passe correspond au temps nécessaire pour le défoncement d'un sous-bloc d'excavation, il est donné par l'expression suivante :

$$T_{rip} = L_{rip} / V_{rip} \tag{IV.11}$$

Où :

L_{rip} - la distance de rippage qui est égale au tiers de la longueur du bloc d'excavation, $L_{rip} = L_B / 3 = 33 / 3 = 10 \text{ m}$;

V_{rip} - la vitesse moyenne de rippage, $V_{rip} = 1.5 \text{ Km/h} = 25 \text{ m/min}$.

Donc : $T_{rip} = 10 / 25$ Alors :

$$T_{rip} = 0.4 \text{ min}$$

- Le temps des manœuvres représente le temps nécessaire pour le ripper afin de lever, se retourner et abaisser les dents de nouveau. Il est estimé à :

$$T_m = 1.5 \text{ min}$$

- La durée d'un cycle de rippage serait :

$$T_{cy.rip} = T_{rip} + T_m \tag{IV.12}$$

$$T_{cy.rip} = 0.4 + 1.5 = 1.9 \text{ min}$$

Alors :

$$T_{cy.rip} = 1.9 \text{ min}$$

❖ Le coefficient d'utilisation pratique du ripper :

Lors d'un poste de travail, le bulldozer réalise le rippage du bloc d'excavation ainsi que le refoulement du matériau défoncé vers la plate-forme inférieure.

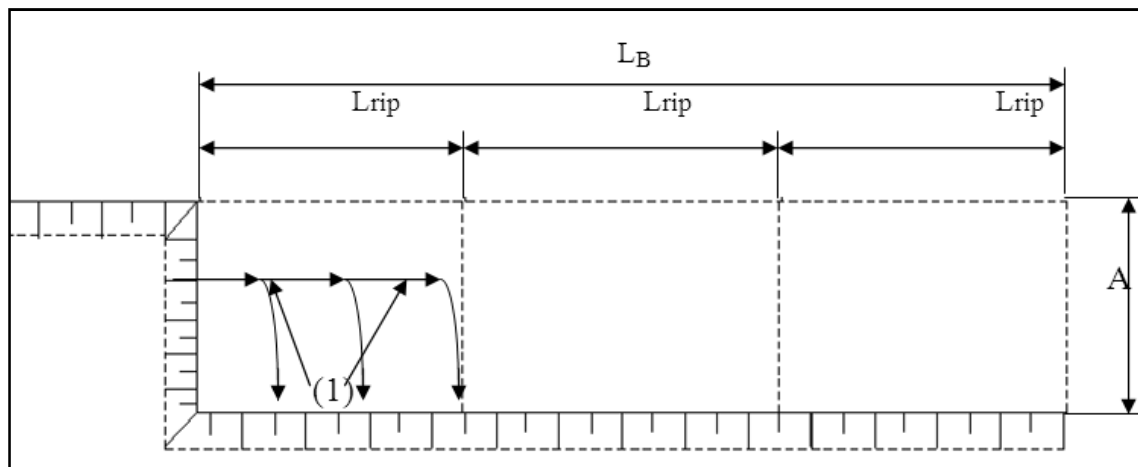


Figure IV. 7 Schéma représentant le refoulement du matériau défoncé.
(1) — la direction de refoulement.

- Le temps de refoulement du matériau défoncé à chaque cycle de rippage :

Il est estimé par l'expression suivante :

$$T_{cy.ref} = T_{ref} + T_{ret} + T_{mL} + T' \quad (IV.13)$$

Où :

T_{ref}- le temps nécessaire pour le refoulement du matériau ameubli est :

T_{ref} = 4 min;

T_{ret}- le temps de retour du bulldozer, **T_{ret} = 3 min ;**

T_{mL} - le temps des manœuvres de la lame, **T_{mL} = 3 min ;**

T' - le temps tenant compte du colmatage du matériau et de la difficulté de refoulement, **T' = 2 min.**

Le temps total nécessaire pour le refoulement du matériau défoncé à chaque passe de ripper est estimé à :

$$T_{cy.ref} = 12 \text{ min}$$

- Le coefficient d'utilisation pratique du ripper :

La durée d'un poste de travail est composée de :

$$T_p = N_{cy} * (T_{cy.ref} + T_{cy.rip}) + T_{main} \quad (IV.14)$$

Où :

T_{cy.rip} - la durée du cycle de rippage, **T_{cy.rip} = 1.9 min ;**

T_{cy.ref} - la durée du cycle de refoulement, **T_{cy.ref} = 12 min ;**

N_{cy} - le nombre de cycles de rippage- refoulement,

$$N_{cy} = A_j * k_i / C_r \quad (IV.15)$$

Ou :

A_j : la production journalière $A_j = 429/6 = 71.5 \text{ m}^3/\text{jour}$;

K_i : coefficient d'irrégularité , $K_i = 1.3$;

C_r : capacité de la lame de ripper, $C_r = 3.89 \text{ m}^3$.

N_{cy} = 71.5 * 1.3 / 3.89 = 24 cycles ;

T_{main} - le temps de maintenance,

$$T_{main} = T_p - N_{cy} * (T_{cy.rip} + T_{cy.ref}) \tag{IV.16}$$

$$T_{main} = 86 \text{ min}$$

T_p - la durée d'un poste de travail, **T_p = 420 min** ;

Donc, le coefficient d'utilisation pratique du ripper est :

$$K_{u.rip} = N_{cy} * T_{cy.rip} / T_p \tag{IV.17}$$

$$K_{u.rip} = 0.11$$

➤ Le volume d'argiles défoncé à chaque cycle de rippage :

Le trapèze « ABDE » représente la section du volume défoncé après chaque passe du ripper.

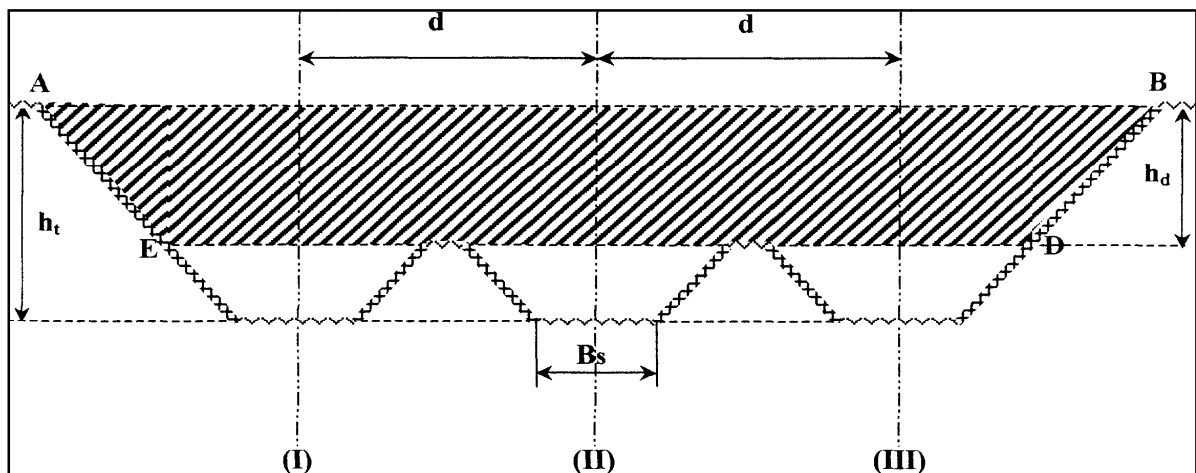


Figure IV. 8 Schéma représentant le volume (ABDE) ameubli par le ripper.
(I, II, III : les sillons formés par les dents du ripper).
(Échelle : 1/200)

À partir du schéma, le volume défoncé serait :

$$V = h_d * L_{rip} * [2d + B_s + (2h_t - h_d) / \text{tg}\theta] \tag{IV.18}$$

Pour : $L_{rip} = 10\text{m}$, $h_d = 0.46\text{ m}$, $h_t = 0.748\text{ m}$, $d = 1\text{m}$, $B_s = 0.40$, $\theta = 50^\circ$. on aurait :

$$V = 0.46 * 10 * [2 * 1 + 0.40 + (2 * 0.748 - 0.46) / \text{tg}50]$$

$$V = 15.04 \text{ m}^3$$

- Le rendement pratique du ripper :

Pour évaluer la production du ripper, on utilise la formule suivante :

$$Rr=60*V*Tp*Ku/ Tcy.rip \quad (IV.19)$$

Où :

V - le volume réel ameubli par le ripper, **V = 15.04 m³**;

Tcy.rip- durée d'un cycle de rippage, **Tcy.rip= 1.9 min**;

Tp - la durée d'un poste de travail, **Tp = 7 heures** ;

Ku - le coefficient d'utilisation pratique du ripper, **Ku =0,11**.

Le rendement pratique du ripper est :

$$Rrip = 365.7 \text{ m}^3 / \text{poste}$$

- Remarque :

D'après Le rendement du ripper **365.7 m³/poste**, on note que le bulldozer peut assurer la production hebdomadaire, qui est égale à **429 m³/semaine**, en 2 jours, ce qui nous donne un temps de réserve du bulldozer de 4 mois par an et sans oublier les 6 mois où le chantiers ne travaille pas à cause de la pluie.

D'une part, on peut dire que notre bulldozer est plus puissant qu'on en a besoin mais d'autre part, cette puissance nous permet de faire par le meme bulldozer : le nettoyage de la plate forme de travail, la préparation des autres blocs d'exavation (enlever les roches stériles) et la réalisation des pistes d'accès à chaque niveau d'exploitation . Cet excès de puissance nous donne la possibilité d'augmenter la production en cas d'expansion du marché, ce qui nous ramène vers une utilisation rationnelle de ce bulldozer. De plus, ce temps de réserve nous permet de faire des révisions générales du bulldozer sans interrompre la production.

En attendant l'expansion du marché, on propose la location du bulldozer pendant ce temps de réserve.

D.1.2. Mode d'exavation :

Effectuant une première passe avec le bulldozer à partir du sommet (point A), on dégage une plate- forme d'une largeur « BC » égale à celle du bulldozer. Ensuite, on commence d'abord par la désagrégation des roches par le ripper puis leur refoulement par le bulldozer tout en donnant à la plate- forme de travail une légère pente vers le talus pour éviter le dérapage des engins. Le ripper et le bulldozer travaillent de façon à suivre au plus près la ligne« AD ».

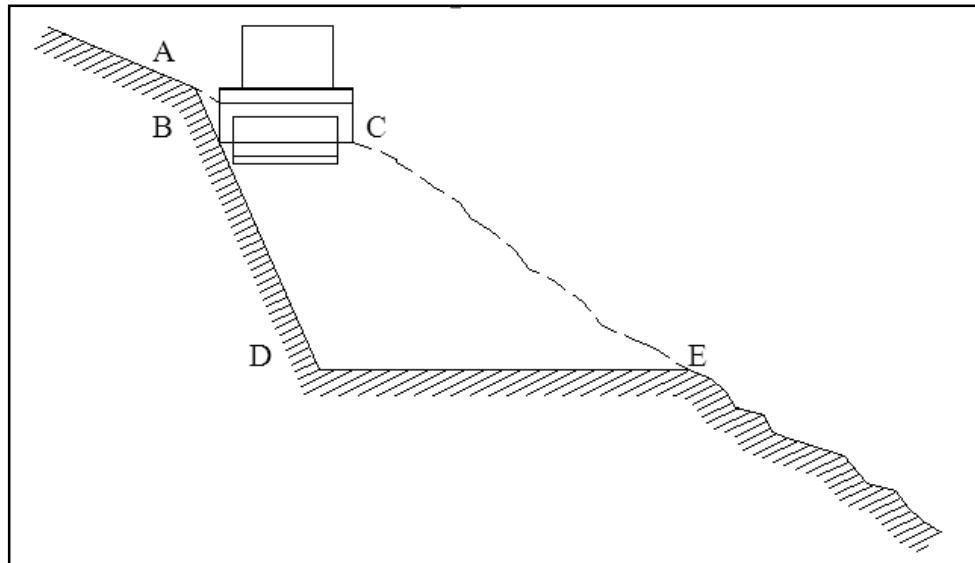


Figure IV. 9 Le mode d'excavation

L'excavation doit toujours commencer à la partie supérieure, se poursuivre en descendant et en établissant une excavation en gradins. Chaque coupe sera décalée sur la précédente, pour que le talus ait la pente voulue « 45° ». Il faut après chaque excavation de 0.25 m de profondeur, décaler latéralement la coupe suivante de 0.25 m.

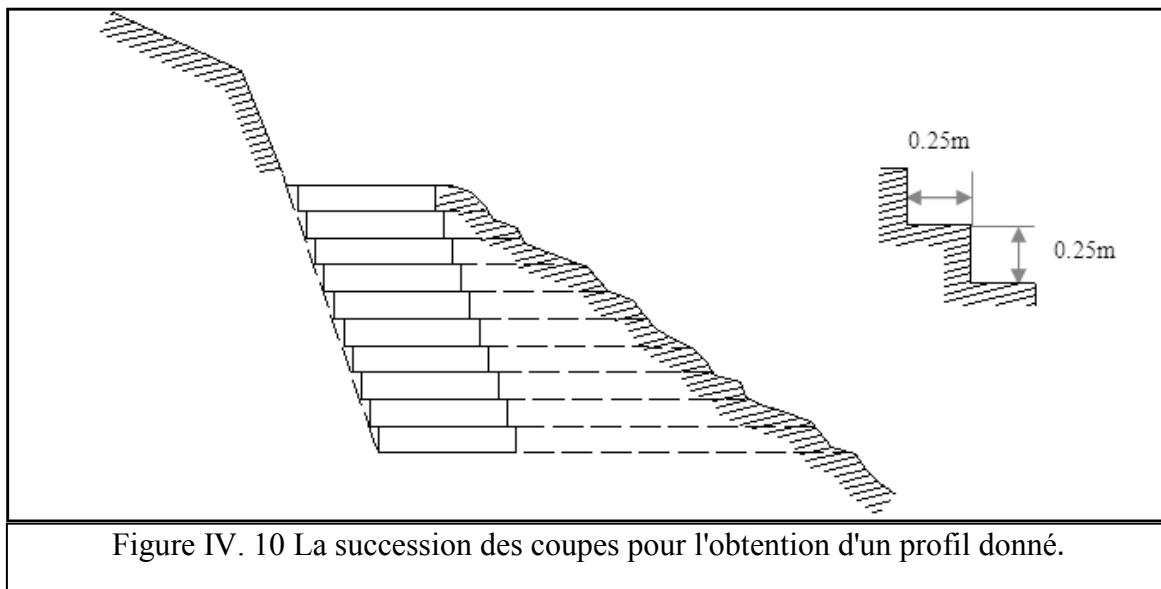


Figure IV. 10 La succession des coupes pour l'obtention d'un profil donné.

D.2. LE CHARGEMENT [18], [16], [14]

Le chargement des roches fragmentées par le ripper est assuré par des chargeuses sur pneus. Ces dernières ont les avantages suivants :

- Vitesse élevée ;
- Possibilité de circuler sur surfaces revêtues ;
- Souplesse d'utilisation ;

- Elles peuvent surmonter des pentes jusqu'à 20° ;
- Leurs organes de travail sont changeables, ce qui permet de les utiliser pour d'autres travaux que le chargement : nettoyage des gradins et des banquettes de transport, construction des routes, émottage des roches, etc.

Les principaux paramètres technologiques qui définissent le rendement d'une chargeuse sont :

- La capacité de charge ;
- La force de pénétration ;
- La hauteur de déchargement du godet ;
- L'angle de basculement du godet lors du chargement.

D.2.1. Schéma du travail de la chargeuse :

Il existe plusieurs schémas de chargement et ils sont tous basés sur l'organisation de la mise en place de la chargeuse et de l'engin de transport : le camion.

Pour le choix, on s'est basé sur :

- La distance de déplacement de la chargeuse entre le point de chargement et celui de déchargement ;
- L'angle de virage de la chargeuse ;
- La sécurité du travail du camion ;
- La simplicité des manœuvres pour la chargeuse ainsi que pour le camion.

On choisira un schéma où le chargement se fera avec un virage partiel de la chargeuse lors de son déplacement vers le chantier et le retour vers le camion placé d'un angle de 30° par rapport au front de taille. La chargeuse sur pneus ainsi chargée, s'éloigne du chantier en marche arrière avec un angle de (30° - 45°) dans la direction opposée du camion ensuite, en marche avant s'approche du camion et décharge son godet. La chargeuse vide, s'éloigne du camion en marche arrière avec un virage d'un petit angle puis, en marche avant s'approche du chantier.

Dans ce schéma, la chargeuse se déplace sur des distances inférieures ou égales à 15 m, tout en gardant sa perpendicularité au front de taille.

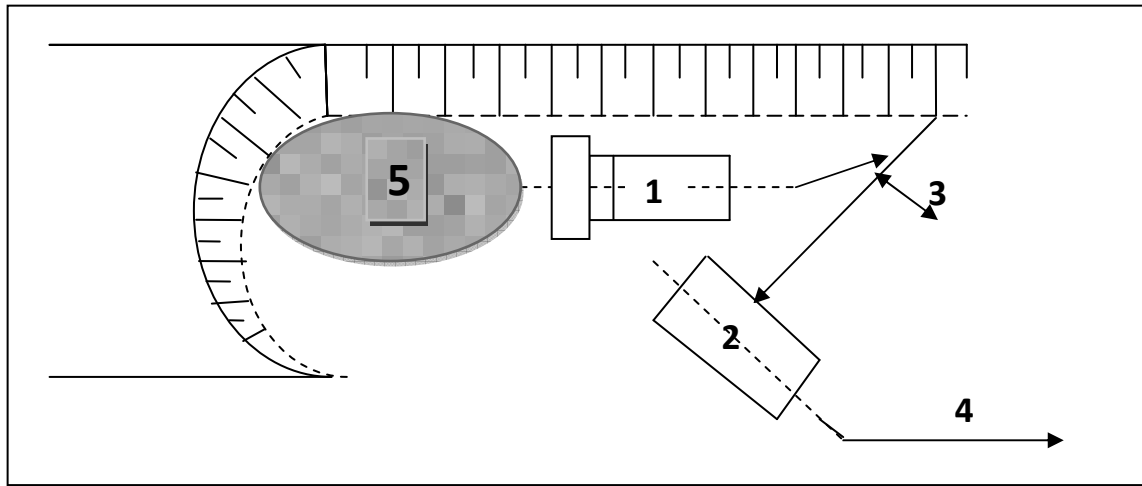


Figure IV. 11 Schéma du travail de la chargeuse dans le chantier :

1 –chargeuse ; 2 –camion ; 3 –direction du mouvement de la chargeuse ;
4 –direction du mouvement du camion ; 5 –la matière première à charger.

D.2.2. Détermination du temps de cycle de la chargeuse :

La durée du travail d'un cycle de la chargeuse lors de la réalisation des travaux de chargement et de transport est calculée par l'expression suivante :

$$T_c = T_r + T_{ch} + T_d + T_v \quad (IV.20)$$

Où:

T_r – la durée de remplissage du godet, $T_r=25\text{sec}$;

T_d – la durée de déchargement du godet, $T_r=20\text{sec}$;

T_{ch} – la durée de parcours de la chargeuse chargée vers le lieu du déchargement, il est déterminé par la formule suivante :

$$T_{ch} = 3.6 * L_{ch} / V_{ch} \quad (IV.21)$$

Où :

L_{ch} – la longueur de parcours de la chargeuse vers le lieu du déchargement, $L_{ch}=15\text{m}$;

V_{ch} – la vitesse de parcours en charge, $V_{ch}=2\text{Km/h}$;

$$T_{ch}=27\text{sec}$$

T_v – la durée de parcours à vide vers le lieu du chargement, elle est donnée par l'expression suivante :

$$T_v = 3.6 * L_v / V_v \quad (IV.22)$$

Où :

L_v – la longueur de parcours à vide, $L_v = 15$ m ;

V_v – la vitesse de la chargeuse à vide, $V_v = 6$ Km /h.

$$T_v = 9 \text{ sec}$$

Donc, $T_c = 20 + 27 + 25 + 9$

$$T_c = 81 \text{ sec}$$

D.2.3. Détermination du volume du godet de la chargeuse :

D.2.3.1. Le nombre de cycles par poste « N_{cy} » :

$$N_{cy} = 3600 * T_p * K_u / T_c \quad (\text{IV.23})$$

Où :

T_p – la durée du poste de travail, $T_p = 7$ h ;

K_u – le coefficient d'utilisation pratique du poste, $K_u = 0,75$;

T_c – la durée du cycle de la chargeuse, $T_c = 81$ sec.

$$N_{cy} = 233 \text{ cycles}$$

D.2.3.2. Le volume à déplacer par cycle :

$$V_c = (A_p * K_f) / (N_{cy} * \gamma) \quad (\text{IV.24})$$

Où :

A_p - la charge à déplacer par poste et elle est égale à la production par poste, $A_p = 143$ t/poste;

K_f - le coefficient de foisonnement, $K_f = 1.6$;

γ - la masse volumique du matériau, $\gamma = 2$ t/m³

N_{cy} - le nombre de cycles de travail de la chargeuse par poste, $N_{cy} = 233$ cycles.

Le calcul nous donne :

$$V_c = 0.5 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

D.2.3.3. Le volume théorique du godet de la chargeuse qu'il faut utiliser :

$$V_g = V_c / R_v \quad (\text{IV.25})$$

Où : R_V - le rendement volumique de la chargeuse, $R_V = 0,9$.

Alors : $V_g = 0.55 \text{ m}^3$

D.2.4. Rendement effectif de la chargeuse :

Le rendement par poste de la chargeuse est déterminé par l'expression suivante :

$$R_{EFF} = (3600 * V_g * K_r * \gamma * T_P * K_U) / (T_C * K_F) \quad (IV.26)$$

Où :

V_g : la capacité du godet de la chargeuse en.

K_F : coefficient de foisonnement.

K_r : coefficient de remplissage du godet de la chargeuse;

T_P : durée d'un poste de travail ;

γ : masse volumique ;

K_U : coefficient d'utilisation de la chargeuse durant un poste de travail.

Pour : $V_g = 0.55 \text{ m}^3$, $K_r = 0.95$, $\gamma = 2 \text{ t/m}^3$, $T_P = 7 \text{ heures}$, $K_U = 0.75$, $T_C = 81 \text{ sec}$, $K_F = 1.6$.

On trouve :

$$R_{EFF} = 152.4 \text{ t/poste}$$

D.3. LE TRANSPORT [18], [16], [14]

La matière première est transportée du point de chargement (front de taille) au point de déchargement (les trémies des consommateurs) au moyen des camions à benne basculante.

La distance de transport du minerai utile est :

- Carrière- usine de traitement : **45Km.**

D.3.1. La capacité de charge des camions :

$$G = V_{benne} * \gamma_F = V_{benne} * \gamma / K_F \quad (IV.27)$$

Où :

V_{benne} : volume de la benne = 16 m^3 ;

γ_F : poids volumique foisonné ;

$\gamma = 2 \text{ t/m}^3$, poids volumique ;

$K_F = 1.6$, coefficient de foisonnement.

$$G = 20 \text{ tonnes}$$

D.3.2. Rendement des camions qui transportent le matériau vers l'usine de traitement :

➤ durée d'un cycle du camion :

La durée du parcours du camion est donnée par l'expression suivante :

$$T_{CC.B} = T_{CH} + T_M + 60 * L_B / V_{1.B} + 60 * L_B / V_{2.B} + T_D \quad (IV.28)$$

Où :

T_M - le temps nécessaire aux manœuvres,

$T_M = 2 \text{ min}$;

L_B - la distance de transport "entre le chantier et l'usine. $L_B = 45 \text{ Km}$;

$V_{1.B}$ - la vitesse à charge :

$$V_{1.B} = V_{\max} / 3$$

Soit : $V_{1.B} = 33 \text{ Km / h}$.

$V_{2.B}$ - la vitesse à vide :

$$V_{2.B} = V_{\max} / 2$$

Soit : $V_{2.B} = 50 \text{ Km / h}$.

T_D - le temps de déchargement, $T_D = 0,6 \text{ min}$;

T_{CH} - le temps de chargement du camion, il est égale à :

$$T_{CH} = T_C * M \quad (IV.29)$$

T_C : la durée du cycle de la chargeuse, $T_C = 81 \text{ sec} = 1,35 \text{ min}$,

M : le nombre de godets pour charger le camion :

$$M = G * K_F / E * K_r * \gamma \quad (IV.30)$$

Où :

G - la capacité du camion, $G = 20 \text{ tonnes}$;

E - la capacité du godet de la chargeuse, $E = 3,5 \text{ m}^3$:

K_F - le coefficient de foisonnement des roches. $K_F = 1,6$

K_r - le coefficient de remplissage du godet, $K_r = 0,95$.

$M = 6$ godets

Donc : $T_{CH} = 8.1 \text{ min}$

A.N :

$$T_{CC.B} = 7.7 + 2 + 60 * 45 / 33 + 60 * 45 / 50 + 0.6$$

$$T_{CC.B} = 146.52 \text{ min}$$

D.3.3. Nombre de cycles nécessaires pour déplacer la charge d'un poste :

$$N_{CY.NEC} = A_{PB} * K_I / G \quad (IV.31)$$

Où :

K_I - le coefficient d'irrégularité, $K_I = 1,3$;

A_{PB} - la production par poste alimentant l'usine, $A_{PB} = 143 \text{ t/poste}$;

G - la capacité de charge du camion, $G = 20 \text{ tonnes}$.

$$N_{CY.NEC} = 9.3 \text{ cycles}$$

D.3.4. Nombre de cycles possibles d'un camion par poste

$$N_{CY.POS} = 60 * T_P * K_U / T_{CCB} \quad (IV.32)$$

Sachant que : $T_P = 7$ heures, $T_{CCB} = 142.12 \text{ min}$, $K_U = 0.85$.

$$N_{CY.POS} = 2.50 \text{ cycles/poste}$$

D.3.5. Nombre de camions nécessaires :

$$N_{C.B} = N_{CY.NEC} / N_{CY.POS} \quad (IV.33)$$

$$N_{C.B} = 3.72$$

Alors, il faut 4 camions, dont un camion de réserve pour un éventuel remplacement de l'un deux pour panne technique.

D.3.6. Rendement effectif de chaque camion :

$$R_{C.B} = 60 * T_P * G * K_U * K_r / T_{CCB} \quad (IV.34)$$

pour : $T_P=7$ heures, $G=20$ tonnes, $K_U=0.85$, $K_r=0.95$, $T_{CCB}=142.52$ min,

On a alors:

$$R_{C,B}=47.60 \text{ tonnes /poste.}$$

IV. ORIENTATION DE L'EXPLOITATION DU GISEMENT [19], [20]

L'exploitation du gisement de M'ZILA se fera par des gradins de 4 m et ceci par rapport à l'ordre de l'exploitation qui a été prédéfini dans le chapitre III, en tenant compte de l'orientation de l'utilisation de la bentonite et de la possibilité d'accès. La priorité d'exploitation se mène vers les zones les plus riches en terme de bentonite de forage et en deuxième zones pour les autres catégories. Au Nord et Nord-Ouest seront concentrés les travaux d'extraction de la bentonite de forage (couche XIV, XI et X) et dans le flanc Sud et Sud-Est l'extraction de la bentonite autre que de forage.

A. PHASES D'EXPLOITATION (cf. Figure IV.12)

A.1. PHASE N°01 (EXPLOITATION DE LA COUCHE XIV) : *super bentonite*

Le volume des roches à abattre pour la couche XIV : $V=134402 \text{ m}^3$.

❖ Parcelle C (niveau 60-70)

- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 60-70m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 40m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage .

❖ Parcelle E (niveau 70-90)

- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 70-90m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 40m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.

❖ Parcelle D (niveau 80-90)

- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 80-90m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 25m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage ;

- ❖ Parcelle A (niveau 150-160)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 150-160m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 60m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.

A.2. PHASE N°02 (EXPLOITATION DE LA COUCHE XI) : *super bentonite*

Le volume des roches à abattre pour la couche XI : $V=6656 \text{ m}^3$.

- ❖ Parcelle A2 (niveau 50-60)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 50-60m ;
- Des gradins de 4m vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.

A.3. PHASE N°03 (EXPLOITATION DE LA COUCHE X) : *bentonite standard*

Le volume des roches à abattre pour la couche X: $V=115220 \text{ m}^3$.

- ❖ Parcelle T2 (niveau 70-80)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 70-80m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 100m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.
- ❖ Parcelle B4 (niveau 100-120)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 100-120m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 60m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.
- ❖ Parcelle D1 (niveau 80-90)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 80-90m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 45m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.
- ❖ Parcelle BEN (niveau 70-80)

- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 70-80m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 50m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.
- ❖ Parcelle GRA (niveau 90-110)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 90-110m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 60m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.

A.4. PHASE N°04 (EXPLOITATION DE LA COUCHE IV) : *bentonite de forage hydraulique*

Le volume des roches à abattre pour la couche IV : $V=77038 \text{ m}^3$.

- ❖ Parcelle A (niveau 110-150)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 110-150m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 130m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.
- ❖ Parcelle G (niveau 150-160)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 150-160m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 1500m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.
- ❖ Parcelle AEK (niveau 170-180)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 170-180m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 70m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.

A.5. PHASE N°05 (EXPLOITATION DE LA COUCHE VII) : *bentonite de charge industrielle*

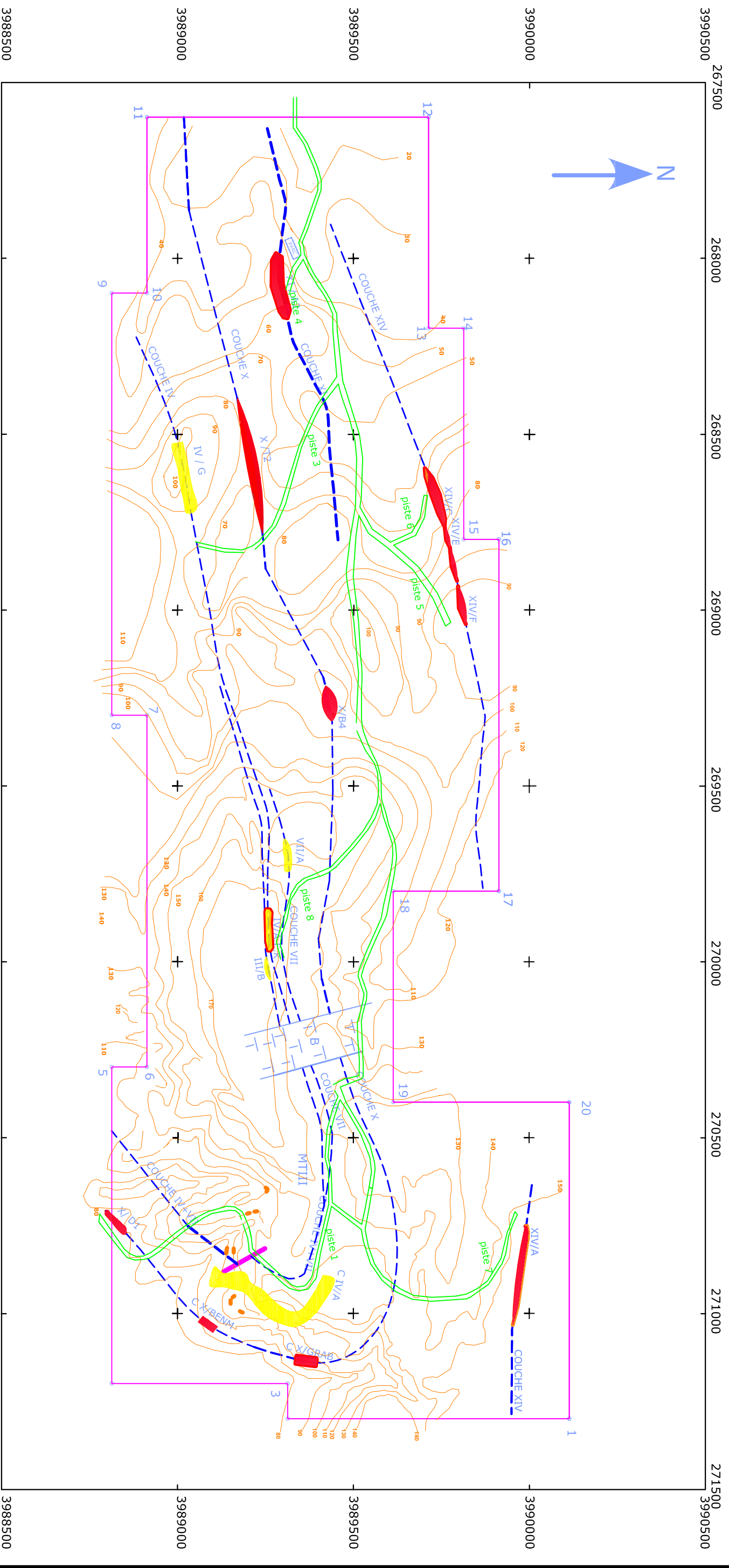
Le volume des roches à abattre pour la couche VII: $V=43268 \text{ m}^3$.

- ❖ Parcelle A (niveau 150-140)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 150-140m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 60m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.

A.6. PHASE N°05 (EXPLOITATION DE LA COUCHE III) : *bentonite de charge industrielle*

Le volume des roches à abattre pour la couche III : $V=27000 \text{ m}^3$.

- ❖ Parcelle B (niveau 170-180)
- Préparation de la piste d'accès ;
- Ouverture et décapage d'un niveau sous-jacent productif entre les courbes de niveau 170-180m ;
- Des gradins de 4m d'hauteur et 60m de longueur vont évoluer par le développement des travaux d'abattage.



GISEMENT DE M'ZILA

Superficie du gisement = 3690000 m² = 369 ha
 Le périmètre du gisement = 10800 m

Figure IV .13 plan orienté de l'exploitation de la bentonite

- COUCHE HORS BENTONITE DE FORAGE
- COUCHE POUR BENTONITE DE FORAGE
- Bornes du périmètre minier
- périmètre minier
- Zone broyée
- Faille
- Carrière et son numéro
- C. XIV Couche et son numéro

PROJET D'OPTIMISATION D'EXPLOITATION DU GISEMENT MULTICOUCHE DE BENTONITE DU M'ZILA (W.MOSTAGANEM)

ECHELLE	REALISE SUR AUTOCAD PAR	PROMOTION	CONTROLE PAR
	M.OUAHAB	2007-2008	K.OMRACI

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

❖ CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de notre projet de fin d'études intitulé : « Optimisation de l'exploitation d'un gisement de bentonite de M'ZILA (wilaya de Mostaganem) », cette étude a permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- L'étude géologique et topographique du gisement bentonitique de M'ZILA a permis l'évaluation de ses réserves actuelles qui sont estimées à **1090160 tonnes**, ce qui permet, avec une production annuelle de **23000 tonnes**, d'alimenter l'usine de traitement pendant **47 ans**.
- La majeure partie des réserves (71%) est contenue dans les quatre couches IV, VII, X et XIV. Les couches II, VI et IX ne renferment que des couches à réserves négligeables.
- La bentonite de la région de Mostaganem appartient à la variété de la montmorillonite sodique.
- Ce gisement a déjà fait l'objet d'exploitation de quelques couches, et notre tâche a été de prévoir la meilleure manière d'exploiter la mine pour le restant des couches (III, IV, VII, X, XI, XIV) en faisant une étude statistique sommaire et multidimensionnelle afin de mieux cerner les caractéristiques rhéologiques et les propriétés de rétention de l'eau de la bentonite issue de chaque couches.
- L'étude statistique a démontré :
 - L'existence d'une part, d'une relation entre les paramètres de viscosité et la couche, et d'autre part une relation plus compliqué liée à la propriété de rétention d'eau de la bentonite entre l'humidité , la rainure et le filtrat (étude ACP globale).
 - Selon une ACP sur chaque couche nous avons établi un classement de la catégorie des bentonites pour les couches étudiées suivant :
 - ✓ Super-bentonite : couche XI et XIV ;
 - ✓ Bentonite-standard : couche X ;
 - ✓ Bentonite de charge industrielle : couche VII et III ;
 - ✓ Bentonite de forage hydraulique : couche IV par coupage avec une bentonite-standard (couche X).
- Nous avons choisi et défini tous les paramètres de mode d'ouverture et du système d'exploitation, à savoir : l'emplacement, l'aménagement et les paramètres de la

Conclusion générale et perspectives

piste d'ouverture et de transport ; les éléments du système d'exploitation, chargement... etc.

- Le plan d'exploitation s'est basé sur les résultats d'analyse statistique a fin de mieux répartir les travaux d'exploitation en deux grandes zones, les zones à bentonite de forage situées au Nord et Ouest du gisement et les zones hors bentonite de forage (telle que la bentonite de fonderie et bentonite de charge industrielle) situées du coté Sud et Sud-Est du gisement . Pour la bentonite de fonderie statistiquement nous ne pouvons pas affiner cette classe de bentonite à cause de l'absence des données des analyses requises dans les normes (trop peu de valeurs mesurées).
- La couche XIV montrant une bonne qualité celle de plus grande épaisseur, ses extensions devraient être exploitées et explorées en priorité.

❖ *PERSPECTIVES*

- Vue l'utilité d'une connaissance géologique et géométrique fine des dépôts d'argile, pour améliorer la qualité de la production, une étude plus détaillée de la genèse des gisements et de la formation des différentes qualités de bentonite est nécessaire. Il est important d'essayer d'aborder cette question par une étude bibliographique des gisements similaires et des valeurs observées sur le gisement. L'étude détaillée pourrait être un sujet de recherche en soi.
- La méthode d'échantillonnage appliquée pose des problèmes pour la régularisation des données qui est un des premiers pas essentiels d'une étude géostatistique. Ces problèmes présentent des conséquences non souhaitables sur le modèle du variogramme expérimental obtenu. cette question doit être bien ficelée pour assurer un bon contrôle de qualité de la bentonite.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. **M.KONESHLOO**, "CARACTERISATION, ESTIMATION ET VALORISATION DES ARGILES KAOLINITIQUES DU BASSIN DES CHARENTES". these doctorat de l'école des mines de Paris ,2007.
- [2]. (<http://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>).
- [3]. **HAYDN H.MURRAY**, "APPLIED CLAY MINERALOGY ",2007, U.S.A: ELSEVIER.
- [4]. **SIDAM**, "Rapport de développement M'ZILA",1994, inédit.
- [5]. Rapport final projet qualité, BENTAL ,2002, inédit.
- [6]. Plan d'exploitation annuelle, BENTAL, 2007, inédit.
- [7]. **S.DEHIM**, " Etude gitologique des argiles bentonitiques ",2004. PFE,USTHB.
- [8]. **A.PERRODON**, " Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algerie occidentale".(bulletin N°12), 1957.
- [9]. rapport SONAREM " résultat des travaux géologiques effectués sur le gisement de M'ZILA ",1972.
- [10]. protocole d'analyse. BENTAL, inédit.
- [11]. **C.GARCIA**, "Boue de forage",institut français du pétrole,1981. technip.
- [12]. **N.CHEZE**, Statistique descriptive AF 167. Technique de l'ingénieur,2007.
- [13]. **S.TUFFERY**, "data mining et statistique décisionnelle",2005. technip.
- [14]. **V.KOVALENKO**, "exploitation des carrières",1986. OPU.
- [15]. **CATERPILLAR**, "catalogue d'un bulldozer D75.
- [16]. **A.ZAHAR**, "identification des dépenses relatives aux tâches d'exploitation",1995. PFE,ENP.
- [17]. **BOKY**, "exploitation des mines ",1968. Edition Mir.
- [18]. **A.GABAY-J.ZEMP**, "Les engins mécaniques de chantier",Paris. Edition Bordas.
- [19]. **F.LOUNIS**, "Projet d'ouverture et d'exploitation du gisement de calcaire de KEF BATHA",2007. PFE,ENP.
- [20]. **N.BOUMEZOUED-H-F.GUEZLANE**, "Etude qualitative du gisement d'el-khroub",2003. PFE,ENP.
- [21] LE PETIT LAROUSSE, 1997 .

ANNEXE

ANNEXE 1

I. ESSAIS DE LABORATOIRE :

Ce paragraphe a pour objet de décrire les méthodes d'analyses effectuées au niveau du laboratoire afin d'assurer que les produits fabriqués ou achetés aux exigences spécifiées.

Il s'applique à l'unité de production de Mostaganem.

1. Terminologie:

- API : American Petroleum Institute
- T.V : Tout venant. Minerai provenant de la carrière à l'état brut.
- P.F : Produit fini
- FB1 : bentonite de forage hydraulique.
- FB2 : bentonite de forage pétrolier .
- FD : bentonite de fonderie.
- B.C.I : Bentonite de charge industrielle.
- Res.75 μ : résidu 75 μ pour la mesure du taux de sable.
- IG : indice de gonflement.

2. Documents de référence:

Norme API

3. Description:

I.1 Préparation du tout venant :

i. Tout venant de forage:

La préparation s'effectue au laboratoire sur une quantité de 50 grammes selon les opérations suivantes :

- Mesure du taux d'humidité initiale, puis humidification du T.V
- Quantité d'eau à ajouter : $0,8 X (28 - \text{taux humidité initiale})$
- Activation au carbonate : la quantité de carbonate à ajouter est égale à : $2.5/100 X (50 + \text{taux d'humidité initiale})$
- Malaxage et pétrification à l'eau
- Boudinage de la pâte obtenue
- Séchage à l'étuve à 110°C
- Broyage au pilon
- Tamisage sur un tamis 100 meshes (149 μ)

Le tamisât obtenu constitue un produit fini prêt aux différentes analyses.

ii. Tout venant de fonderie et de B.C.I :

La préparation s'effectue sur une quantité de 500 grammes pour la fonderie et 100 grammes pour la B.C.I. Les étapes suivantes sont à observer :

➤ TV Fonderie :

- Séchage à l'étuve à 110 °C de l'échantillon brut pendant une ou deux heures jusqu'à l'obtention d'une humidité de 10%.
- Concassage de l'échantillon
- Broyage dans un broyeur à disques

- Tamisage sur un tamis 100 meshes.

Le tamisât ainsi obtenu constitue un produit fini prêt aux différentes analyses.

- **TV BCI** : Mesure de l'humidité en l'état.

I.2 Analyse des échantillons :

L'ingénieur chimiste « Chargé de Qualité » effectue une vérification des analyses et tient compte des exigences requises pour chaque type de produit pour éventuellement orienter la destination du produit.

i. Bentonite de forage :

- *mesure de la viscosité* :

L300 = Lecture de la viscosité à 300 rpm (rotation par minute)

L600 = Lecture de la viscosité à 600 rpm (rotation par minute)

❖ Le viscosimètre Fann :

Cet appareil de mesure est à cylindres coaxiaux, dont l'annulaire libéré entre le rotor et le stator est rempli du fluide à tester (Figure 3.1). Le cylindre extérieur est entraîné à vitesse constante (taux de cisaillement). La résistance opposée au mouvement développée par le cylindre intérieur est mesurée. La déviation angulaire lue (vitesse θ_i) correspond à la tension de cisaillement. Cet appareil n'est pas adapté à tous les types de fluides et est particulièrement imprécis pour de faibles taux de cisaillement, on lui préférera alors un rhéomètre. Il permet de déterminer la limite d'écoulement (YV), la viscosité plastique (VP) et la viscosité apparente (VA), les paramètres d'un fluide Binghamien (boue bentonitique) et n et K les paramètres d'un fluide d'Ostwald (boue polymère). Dans le cas de l'eau pure (fluide Newtonien), la limite d'écoulement, YV, est nulle et la viscosité plastique est 1mPa.s (ou centipoise).



Figure 3.1 Viscosimètre Fann

❖ **Mode opératoire :**

Préparer une suspension de 22,5 g +/- 0,1 g de bentonite dans 350 cm³ +/- 0,5 d'eau distillée. Après agitation durant 5mn +/- 0,5 dans un malaxeur (Hamilton Beach), enlever le bol de l'agitateur et gratter les grains de bentonite collés à la paroi. Remettre en agitation et répéter la même opération chaque 5 à 10 mn. Le temps d'agitation total est de 20mn +/- 1.

Laisser la suspension de bentonite reposer dans un bloc couvert.

Après vieillissement de 16 heures, verser la suspension dans le bol de l'agitateur et agiter de nouveau pendant 5 mn +/- 0,5.

Placer la suspension dans le bol du Viscosimètre FANN et noter les lectures L600 et L300 et ce, quand l'aiguille se stabilise sur le cadran.

❖ **Calcul :**

$$\text{Viscosité plastique (VP)} = L600 - L300$$

$$\text{Yield point} = L600/2 - VP$$

$$\text{Ratio} = \text{Yield point} / VP$$

➤ **Perte au filtrat (l'eau libre) :**

❖ **Le filtre presse :**

Il a été mis au point par les pétroliers américains pour les boues de forage. Il permet de mesurer, par comparaison, la capacité d'une boue à former un cake plus ou moins imperméable et à limiter l'imprégnation du terrain (eau libre, filtrat). Cet essai, selon la norme API-13A [API, 91], est réalisé dans une cellule cylindrique transparente normalisée dans laquelle une pression de 700kPa est appliquée sur 400ml de boue (Figure 3.2). La base du cylindre est équipée d'un filtre en papier. L'eau ainsi filtrée est collectée par ajutage dans une éprouvette graduée. Le test dure 30min. A la fin, on mesure le volume du filtrat et l'épaisseur du cake formé sur le papier filtre.

L'EAU LIBRE: remplissant les macropores entre les particules : elle peut être éliminée par séchage à l'étuve à une température de 105 °C.

❖ **Mode opératoire :**

Reprendre la suspension précédente et agiter pendant une minute. Verser la suspension dans la cellule de filtre presse. Avant la filtration, vérifier l'étanchéité des pièces et s'assurer qu'elles sont bien sèches.

Régler le premier timer à 7,5 mn et le second à 30 mn et ouvrir la vanne de pression à 100 PSI (07 bars) et placer une éprouvette sous l'orifice de la cellule. Toutes ces opérations doivent être effectuées simultanément dans moins de 15 secondes.

Après 7,5 mn le premier timer sonne; Enlever l'éprouvette et placer une autre.

Quand le second timer sonne, enlever la deuxième éprouvette.



Figure 3.2 Schéma du filtre-presse [PANT, 99]

❖ **Calcul :**

Filtrat = 2. Volume recueilli dans la deuxième éprouvette

➤ **Mesure du taux de sable :** (résidu 75 μ)

❖ **Mode opératoire :**

○ **Voie humide :**

- Prendre 10 g +/- 0,01 g de bentonite
- Mettre en suspension dans 350 cm³ d'eau.
- Additionner de 0,2g d' Hexaséphosphate de sodium.
- Agiter pendant 30mn +/- 1
- Transférer la suspension dans un tamis 200 meshes
- Laver l'échantillon sur ce tamis avec de l'eau contrôlée à 10 PSI +/- 1, avec la buse de régulation et ce, pendant 02 mn. Au moment du lavage, laisser le coude de la buse reposer sur le bord du tamis et déplacer le jet sur tout l'échantillon.
- Transférer le résidu du tamis au plateau d'évaporation.
- Sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.

○ **Voie sèche :**

- Prélever 15g de produit fini ;
- Sécher pendant 02 heures ;
- Peser 10g de l'échantillon séché ;
- Tamiser la quantité pesée sur un tamis 200 meshes (75 microns).

❖ **Calcul :**

Résidu 75 μ en % = 100. poids du résidu / poids de l'échantillon.

ii. **Bentonite de fonderie :**

➤ **Paramètres physico-mécaniques :**

Ces mesures sont spécifiques à la bentonite de fonderie.

Les résistances à la compression et au cisaillement, indiquent si le sable, une fois serré, est en état de résister aux diverses sollicitations mécaniques, auxquelles moules et noyaux sont exposés, au transport, au remoulage et à la coulée.

CPV = Compression à vert. Exprimée en gramme par centimètre carré (g/cm^2)

CXV = Cisaillement à vert. Exprimé en gramme par centimètre carré (g/cm^2)

Les propriétés d'une argile de fonderie, sont déterminées sur des éprouvettes confectionnées avec un mélange de sable à haute teneur en silice, d'argile en contrôle et d'eau.

❖ Préparation du mélange :

Dans un malaxeur (GF) de chez G. FISCHER (Suisse), on introduit :

- 3 Kg de sable, soit une quantité suffisante pour assurer une bonne homogénéisation et permettre de préparer le nombre d'éprouvettes nécessaires aux divers contrôles.
- 240g de bentonite soit 8% du poids du sable sec.
- On mélange et on malaxe deux minutes à sec.
- On ajoute uniformément au mélange 90 cm^3 d'eau distillée soit 3% du poids du sable sec.
- Le mélange ainsi humidifié est malaxé pendant 6 mn sans interruption.
- On vide alors le malaxeur en ouvrant la trappe de vidange et en laissant toujours tourner les meules.

❖ Confection des éprouvettes :

Le mélange (sable + argile + eau) est recueilli dans un récipient convenable (capsule par exemple). On confectionne aussitôt des éprouvettes cylindriques à l'aide d'un Damoir, sur lesquelles sont effectués les différents contrôles.

❖ Mesure de la CPV et du CXV :

-CPV :

On utilise un appareil d'essai de résistance de marque GF (figure 3.3). L'éprouvette est placée horizontalement entre les mors de l'appareil. Les mors de surface plane sont placés l'un sur le piston, l'autre en face du piston. Le cadran du manomètre est équipé de deux aiguilles noire et rouge; Cette dernière sert de témoin. Les deux aiguilles à zéro, on tourne le volant dans le sens des aiguilles d'une montre; le piston avance et écrase l'éprouvette.

Au moment de la rupture, on note la valeur indiquée sur l'aiguille témoin.

-CXV :

Le cisaillement à vert est mesuré de la même façon à l'aide de mors appropriés

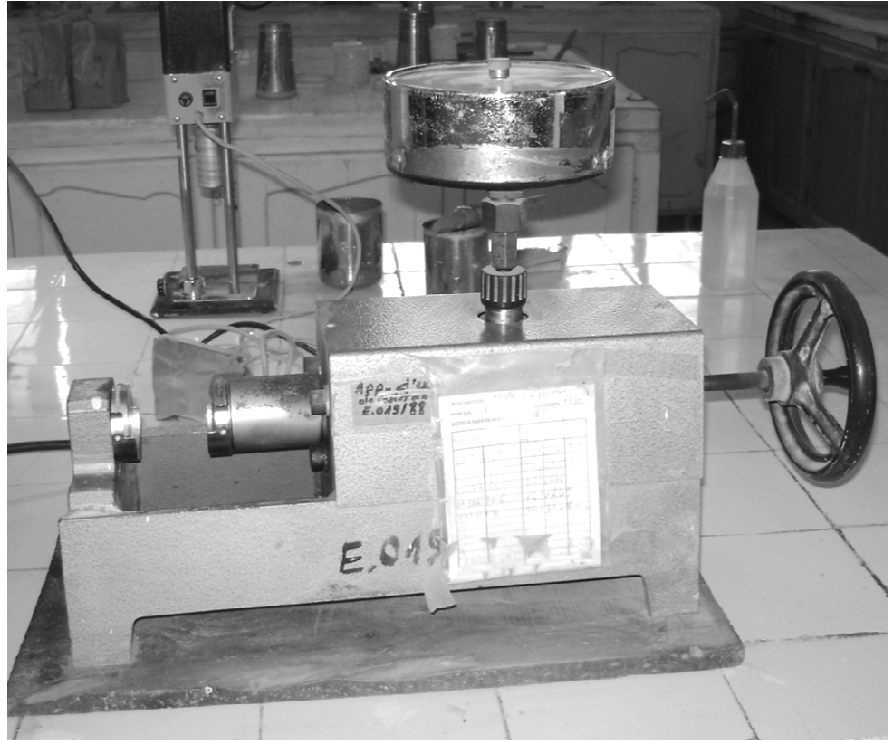


Figure 3. 3 appareil d'essai de résistance de marque GF

➤ **Mesure de l'indice de gonflement :**

❖ **Mode opératoire :**

2g de bentonite à teneur d'humidité connue, sont pesés sur la balance de précision (0,01g), puis versés en petites fractions avec la spatule, dans l'eau distillée contenue dans le tube en verre gradué (de 100 ml).

Il est important d'attendre qu'une fraction soit complètement déposée au fond du tube avant d'en ajouter une autre (attendre environs 45mn avant d'ajouter une fraction nouvelle).

La bentonite absorbe l'eau et gonfle lentement. Après avoir ajouté tout l'échantillon (temps total d'addition inférieur à 1 h), on le laisse se stabiliser pendant 2 heures puis on lit sur le tube gradué le volume du sédiment déposé.

❖ **Expression du résultat :**

$$V' = 100 V / (100 - M)$$

V' = volume de gonflement calculé en rapport avec la matière solide

V = volume de dépôt

M = teneur en humidité

iii. **Bentonite de charge industrielle :**

➤ **Mesure de l'humidité :**

❖ **Mode opératoire :**

- Peser 10g de bentonite

- Sécher à l'étuve à 110°C pendant 02 heures.
- Refroidir dans un dessiccateur.

❖ **Calcul :**

$$\text{Humidité (\% en poids)} = \frac{100 \times (\text{poids de l'échant. de départ} - \text{Poids de l'échant. séché})}{\text{Poids échantillon de départ}}$$

➤ **Mesure de la finesse :**
(Passant au tamis 100 mesh)

Prélever 150g de produit fini.

Sécher à l'étuve à 110°C pendant 02 heures.

Peser 100g de l'échantillon séché.

Tamiser la quantité pesée sur un tamis 100 mesh (149 μ).

La quantité de tamisât recueillie par rapport aux 100g, représente le % de passant.

ANNEXE 2

La base des données du M'ZILA

N° échantillon	couche	rainure	parcelle	L600	L300	VP	YV	VA	Humidité	filtrat	res	IG
2c3r1A	3	1	AT	10				5		25	6	
3c3r1A	3	1	AT	11				5,5			8	
4c3r1A	3	1	AT	8				4			5	
5c3r2A	3	2	AT	10				5			7,5	
6c3r2A	3	2	AT	9				4,5		24	6	
7c3r2A	3	2	AT	10				5			0,5	
8c3r2A	3	2	AT	12				6			8	
9c3r3A	3	3	AT	9				4,5			8	
10c3r3A	3	3	AT	8				4			6,5	
11c3r3A	3	3	AT	8				4		25	7	
12c3r4A	3	4	AT	10				5			6	9
13c3r4A	3	4	AT	11				5,5		24	6	9
14c3r5A	3	5	AT	10				5		25	5	8,6
15c3r5A	3	5	AT	11				5,5			6,5	8,9
16c3r6A	3	6	AT	10				5			6	8,6
17c3r6A	3	6	AT	9				4,5		25	6,5	
1c3r1B	3	1	B	7	4	3	1	3,5	12	34	3	
2c3r1B	3	1	B	5	2	3	-1	2,5	17	30	7	
3c3r1B	3	1	B	8	4	4	0	4	16	42	6	
1c3r2B	3	2	B	5	3	2	1	2,5	12	28	7	
2c3r2B	3	2	B	7	4	3	1	3,5	14	30	6	
3c3r2B	3	2	B	6	4	2	2	3	17	33	11	
4c3r2B	3	2	B	6	4	2	2	3	15	29	11	
1c3r3B	3	3	B	5	2	3	-1	2,5	14	28	8	
2c3r3B	3	3	B	7	4	3	1	3,5	15	22	13	
3c3r3B	3	3	B	9	5	4	1	4,5	19	24	9	
4c3r3B	3	3	B	16	10	6	4	8	24	23	3	
1c3r4B	3	4	B	10	7	3	4	5	19	30	12	
2c3r4B	3	4	B	10	7	3	4	5	15	28	1	
3c3r4B	3	4	B	8	5	3	2	4	15	27	3	
1c3r5B	3	5	B	9	6	3	3	4,5	15	27	4	
2c3r5B	3	5	B	9	7	2	5	4,5	16	28	5	
1c4r1G	4	1	G	4				2				10,5
2c4r1G	4	1	G	5				2,5				10,9
3c4r1G	4	1	G	6				3		19	3	10,2
1c4r2G	4	2	G	8				4		17,5	3,8	11
2c4r2G	4	2	G	6				3		16	3,4	10
3c4r2G	4	2	G	7				3,5		17	3,6	11
4c4r2G	4	2	G	8				4		18	3,2	10,2
1c4r3G	4	3	G	7				3,5		16	4	10
2c4r3G	4	3	G	10				5		17	3,5	11
3c4r3G	4	3	G	7				3,5		18	3,6	10
4c4r3G	4	3	G	7				3,5		18,5	4	11
1c4r4G	4	4	G	6				3		19	5	9
2c4r4G	4	4	G	9				4,5		15,5	4	11
3c4r4G	4	4	G	9				4,5		17,5	3,6	10,6
4c4r4G	4	4	G	12				6		17	4	12
1c4r5G	4	5	G	8				4				

2c4r5G	4	5	G	10				5		17,5	4	12
N° échantillon	couche	rainure	parcelle	L600	L300	VP	YV	VA	Humidité	filtrat	res	IG
4c4r5G	4	5	G	9				4,5		17	4	11
3c4r5G	4	5	G	8				4		16	5,2	11
1c4r6G	4	6	G	4				2				
2c4r6G	4	6	G	10				5		22	3,8	10
3c4r6G	4	6	G	13				6,5		21	4	9,5
1c4r7G	4	7	G	9				4,5		22	4	10
2c4r7G	4	7	G	7				3,5		21	4,5	10
3c4r7G	4	7	G	12				6		22	3,5	10
4c4r7G	4	7	G	11				5,5		21,5	4	9,7
1c4r8G	4	8	G	13				6,5		22	4	9,8
2c4r8G	4	8	G	10				5		20	3,6	9,5
3c4r8G	4	8	G	10				5		22	3,8	9,5
4c4r8G	4	8	G	9				4,5		22,5	4,2	9,8
1c4r9G	4	9	G	12				6		21	4	10
2c4r9G	4	9	G	10				5		20	3,6	9,5
3c4r9G	4	9	G	11				5,5		20,5	6,2	9,6
4c4r9G	4	9	G	10				5		22	5	9
1c4r10G	4	10	G	8				4		22	5,5	10
3c4r10G	4	10	G	10				5		20	3,8	10
4c4r10G	4	10	G	8				4		21	3,6	10
1c4r1AEK	4	1	AEK	9	5	4	1	4,5	27	18		
2c4r1AEK	4	1	AEK	13	9	4	5	6,5	11	15,5	2	
3c4r1AEK	4	1	AEK	12	8	4	4	6	23	17	6	
4c4r1AEK	4	1	AEK	13	8	5	3	6,5	14	15	2	
1c4r2AEK	4	2	AEK	15	10	5	5	7,5	13	17	2	
2c4r2AEK	4	2	AEK	14	10	4	6	7	14	16	3	
1c4r3AEK	4	3	AEK	17	12	5	7	8,5	19	18,5	5	
2c4r3AEK	4	3	AEK	10	6	4	2	5	20	17,5		
1c4r4AEK	4	4	AEK	11	7	4	3	5,5	17	21	8	
2c4r4AEK	4	4	AEK	16	8	8	0	8	18	22	10	
1c4r5AEK	4	5	AEK	8	5	3	2	4	12	16	4	
2c4r5AEK	4	5	AEK	8	4	4	0	4	16		5	
3c4r5AEK	4	5	AEK	14	9	5	4	7	12	16	8	
1c4r6AEK	4	6	AEK	8	4	4	0	4	15	16	3	
2c4r6AEK	4	6	AEK	9	5	4	1	4,5	14	18	3	
3c4r6AEK	4	6	AEK	7	4	3	1	3,5	15	32	4	
1c4r7AEK	4	7	AEK	11	4	7	-3	5,5	15	15,5	6	
2c4r7AEK	4	7	AEK	8	5	3	2	4	16	16	9	
1c7r1A	7	1	AS	5	2	3	-1	2,5	8	17	3	
2c7r1A	7	1	AS	8	5	3	2	4	8	21,2	5	
3c7r1A	7	1	AS	7	5	2	3	3,5	14	26	12	
4c7r1A	7	2	AS	5	4	1	3	2,5	9	26	11	
5c7r1A	7	2	AS	5	2	3	-1	2,5	17	19,6	5	
6c7r1A	7	2	AS	6	4	2	2	3	8	18,8	5	
7c7r1A	7	3	AS	3	2	1	1	1,5	11	19,2		
8c7r1A	7	3	AS	7	4	3	1	3,5	16	17	11	
9c7r1A	7	3	AS	4	2	2	0	2	10	19,6		
10c7r1A	7	4	AS	8	6	2	4	4	10	16,2	15	
11c7r1A	7	4	AS	9	7	2	5	4,5	9	18		
12c7r1A	7	5	AS	5	2	3	-1	2,5	10	27		

N° échantillon	couche	rainure	parcelle	L600	L300	VP	YV	VA	Humidité	filtrat	res	IG
14c7r1A	7	5	AS	9	6	3	3	4,5	15	19	12	
15c7r1A	7	6	AS	6	3	3	0	3	10	15,2	4	
16c7r1A	7	6	AS	12	8	4	4	6	9	13,4	4	
17c7r1A	7	6	AS	12	8	4	4	6	11	16	28	
1c10r1T2	10	1	TII	14	11	3	8	7	17	37		
2c10r1T2	10	1	TII	22	18	4	14	11	8	27		
1c10r2T2	10	2	TII	20	17	3	14	10	9	25		
2c10r2T2	10	2	TII	18	15	3	12	9	14	22,5		
1c10r3T2	10	3	TII	22	18	4	14	11	18	24		
2c10r3T2	10	3	TII	25	20	5	15	12,5	17	25		
1c10r4T2	10	4	TII	20	18	2	16	10	12	27		
2c10r4T2	10	4	TII	21	17	4	13	10,5	11	27		
1c10r5T2	10	5	TII	16	13	3	10	8	16	21,5		
2c10r5T2	10	5	TII	16	12	4	8	8	10	24		
1c10r6T2	10	6	TII	12	7	5	2	6	21	27		
2c10r6T2	10	6	TII	22	18	4	14	11	12	23		
1c10r7T2	10	7	TII	16	12	4	8	8	14	27		
2c10r7T2	10	7	TII	19	14	5	9	9,5	20	22		
1c10r8T2	10	8	TII	17	13	4	9	8,5	15	24		
2c10r8T2	10	8	TII	17	13	4	9	8,5	22	16,5		
1c10r9T2	10	9	TII	16	12	4	8	8	20	17,5		
2c10r9T2	10	9	TII	18	14	4	10	9	14	23		
1c10r10T2	10	10	TII	18	14	4	10	9	15	19		
2c10r10T2	10	10	TII	20	16	4	12	10	23	16		
1c10r1D1	10	1	DI	16	12	4	8	8	16	17,6	18	
2c10r1D1	10	1	DI	12	8	4	4	6	11	19	34	
3c10r1D1	10	1	DI	7	4	3	1	3,5	5	25	26	
4c10r1D1	10	1	DI	23	17	6	11	11,5	9	15	16	
5c10r1D1	10	1	DI	16	12	4	8	8	16	17,5	13	
1c10r2D1	10	2	DI	10	6	4	2	5	13	18	8	
2c10r2D1	10	2	DI	8	5	3	2	4	11	17,4	7	
3c10r2D1	10	2	DI	15	11	4	7	7,5	8	15	13	
1c10r3D1	10	3	DI	20	15	5	10	10	9	16,8	2	
2c10r3D1	10	3	DI	33	28	5	23	16,5	5	16,2	2	
1c10r1GRA	10	1	GRA	22				11		13,5	0,8	17,8
2c10r1GRA	10	1	GRA	20				10		14	0,5	15
1c10r2GRA	10	2	GRA	9				4,5		15,5	0,5	14
2c10r2GRA	10	2	GRA	9				4,5		15	2,4	14
3c10r2GRA	10	2	GRA	19				9,5		17,5	2,4	15
1c10r3GRA	10	3	GRA	20				10		15	0,9	12
2c10r3GRA	10	3	GRA	24				12		17	3,2	11
3c10r3GRA	10	3	GRA	19				9,5		16	0,2	11
1c10r4GRA	10	4	GRA	18				9		12	1,8	13,5
2c10r4GRA	10	4	GRA	20				10		15	0,8	17
3c10r4GRA	10	4	GRA	17				8,5		24	1,2	11
2c10r1B4	10	1	BIV	15				7,5		21	7,5	11
3c10r1B4	10	1	BIV	10				5		23	13	12
1c10r2B4	10	2	BIV	8				4		25	4	9,6
2c10r2B4	10	2	BIV	10				5		24	3	10
3c10r2B4	10	2	BIV	25				12,5		16	0,4	16
1c10r3B4	10	3	BIV	19				9,5		25	0,8	10,7
1c10r4B4	10	4	BIV	15				7,5		18,5	3	10,6

N° échantillon	couche	rainure	parcelle	L600	L300	VP	YV	VA	Humidité	filtrat	res	IG
2c10r4B4	10	4	BIV	18				9		21	4	11
1c10r1BEN	10	1	BEN	13				6,5		22	2,6	10
2c10r1BEN	10	1	BEN	16				8		21	2,5	9
3c10r1BEN	10	1	BEN	18				9		16	1	12
1c10r2BEN	10	2	BEN	13				6,5		14	1,2	8,6
2c10r2BEN	10	2	BEN	22				11		12,5	0	14
3c10r2BEN	10	2	BEN	20				10		13	1,6	15,7
1c10r3BEN	10	3	BEN	17				8,5		16	5	12
2c10r3BEN	10	3	BEN	15				7,5		20	6	12
3c10r3BEN	10	3	BEN	15				7,5		20	5	12
1c10r4BEN	10	4	BEN	12				6		26	1	9
2c10r4BEN	10	4	BEN	11				5,5		25	0,6	7
3c10r4BEN	10	4	BEN	10				5		30	0,9	8
1c10r5BEN	10	5	BEN	9				4,5		26	2,4	8
2c10r5BEN	10	5	BEN	11				5,5		29	2,8	8
3c10r5BEN	10	5	BEN	17				8,5		26	1,6	9
4c10r5BEN	10	5	BEN	12				6		24	0,9	10
1c11r1A2	11	1	All	32	27	5	22	16	19	20		
2c11r1A2	11	1	All	54	48	6	42	27	22	15		
3c11r1A2	11	1	All	25	20	5	15	12,5	10	20,3		
4c11r1A2	11	1	All	22	18	4	14	11	14	25		
5c11r1A2	11	1	All	39	34	5	29	19,5	14	19		
1c11r2A2	11	2	All	44	34	10	24	22	20	15,5		
2c11r2A2	11	2	All	47	42	5	37	23,5	12	17		
3c11r2A2	11	2	All	44	39	5	34	22	9	27		
4c11r2A2	11	2	All	37	32	5	27	18,5	22	19		
5c11r2A2	11	2	All	33	27	6	21	16,5	10	16		
6c11r2A2	11	2	All	26	22	4	18	13	20	17,5		
7c11r2A2	11	2	All	27	23	4	19	13,5	23	22,5		
1c11r3A2	11	3	All	13	10	3	7	6,5	19	22,5		
2c11r3A2	11	3	All	20	16	4	12	10	19	22		
3c11r3A2	11	3	All	23	18	5	13	11,5	16	19		
4c11r3A2	11	3	All	29	24	5	19	14,5	15	18,5		
5c11r3A2	11	3	All	15	12	3	9	7,5	13	21,5		
6c11r3A2	11	3	All	38	34	4	30	19	16	26		
1c11r5A2	11	5	All	41	36	5	31	20,5	10	15,6		
2c11r5A2	11	5	All	32	26	6	20	16	18	16,5		
3c11r5A2	11	5	All	54	45	9	36	27	20	15,5		
4c11r5A2	11	5	All	58	52	6	46	29	21	17		
1c11r6A2	11	6	All	40	35	5	30	20	22	20		
2c11r6A2	11	6	All	44	38	6	32	22	24	23		
3c11r6A2	11	6	All	50	46	4	42	25	26	21		
4c11r6A2	11	6	All	32	27	5	22	16	19	17		
5c11r6A2	11	6	All	35	28	7	21	17,5	16	17,5		
1c11r7A2	11	7	All	27	24	3	21	13,5	23	33		
2c11r7A2	11	7	All	28	24	4	20	14	19	21,6		
3c11r7A2	11	7	All	35	31	4	27	17,5	14	23,5		
1c11r8A2	11	8	All	36	32	4	28	18	23	18,5		
2c11r8A2	11	8	All	24	20	4	16	12	23	16,5		
3c11r8A2	11	8	All	42	39	3	36	21	25	17		
4c11r8A2	11	8	All	34	30	4	26	17	24	19,5		
5c11r8A2	11	8	All	24	12	12	0	12	18	22		

N° échantillon	couche	rainure	parcelle	L600	L300	VP	YV	VA	Humidité	filtrat	res	IG
7c11r8A2	11	8	All	25	21	4	17	12,5	20	22,5		
8c11r8A2	11	8	All	28	24	4	20	14	20	18		
9c11r8A2	11	8	All	14	9	5	4	7	12	29		
10c11r8A2	11	8	All	23	20	3	17	11,5	22	27,5		
11c11r8A2	11	8	All	40	35	5	30	20	25	20,5		
12c11r8A2	11	8	All	33	28	5	23	16,5	17	18		
13c11r8A2	11	8	All	30	23	7	16	15	18	16,5		
14c11r8A2	11	8	All	36	30	6	24	18	23	22,5		
15c11r8A2	11	8	All	28	22	6	16	14	23	17,5		
16c11r8A2	11	8	All	40	35	5	30	20	22	18		
17c11r8A2	11	8	All	54	50	4	46	27	24	17,5		
18c11r8A2	11	8	All	32	26	6	20	16	16	17,5		
19c11r8A2	11	8	All	30	24	6	18	15	19	17		
1c14r1A	14	1	AXIV	21				10,5		21	6	12
2c14r1A	14	1	AXIV	19				9,5		22,5	7	12
3c14r1A	14	1	AXIV	15				7,5		22	7	12
4c14r1A	14	1	AXIV	14				7		21	8	12,6
5c14r1A	14	1	AXIV	15				7,5		20	6	12
6c14r1A	14	1	AXIV	17				8,5		22	7	12,6
7c14r1A	14	1	AXIV	12				6		22	8	11
8c14r1A	14	1	AXIV	11				5,5		22,5	9	11
1c14r2A	14	2	AXIV	25				12,5		18	4	13,8
2c14r2A	14	2	AXIV	24				12			5	12
3c14r2A	14	2	AXIV	26				13			6	13
4c14r2A	14	2	AXIV	22				11		18,5	3,5	12
5c14r2A	14	2	AXIV	28				14		16,5	3,9	13,6
6c14r2A	14	2	AXIV	32				16		16	4,6	12,9
7c14r2A	14	2	AXIV	30				15			5	12,6
8c14r2A	14	2	AXIV	28				14			4	12,8
1c14r3A	14	3	AXIV	38				19		16,5	3	17
2c14r3A	14	3	AXIV	43				21,5		16	2	16
3c14r3A	14	3	AXIV	50				25		15,5	2,7	14,8
4c14r3A	14	3	AXIV	30				15		17	4	14
5c14r3A	14	3	AXIV	34				17		16,5	3,6	15,6
6c14r3A	14	3	AXIV	22				11		16,5	3	13
7c14r3A	14	3	AXIV	26				13		15	3	15
8c14r3A	14	3	AXIV	21				10,5		17	2,6	12,9
1c14r4A	14	4	AXIV	21				10,5		23	6	9,6
2c14r4A	14	4	AXIV	23				11,5		21,5	7,5	10
3c14r4A	14	4	AXIV	14				7		22	7	9
4c14r4A	14	4	AXIV	15				7,5		23	6,5	10
5c14r4A	14	4	AXIV	15				7,5		23	4,5	10,6
6c14r4A	14	4	AXIV	16				8		22	6	9
7c14r4A	14	4	AXIV	11				5,5		22	5	9
8c14r4A	14	4	AXIV	12				6		22	4,8	10
15c14r1C	14	1	C	4	2	2	0	2	11	32	2	
16c14r1C	14	1	C	4	2	2	0	2	13	30	8	
17c14r1C	14	1	C	20	15	5	10	10	12	16	3	
18c14r2C	14	2	C	10	7	3	4	5	4	26	3	
19c14r2C	14	2	C	6	4	2	2	3	8	32	4	
20c14r2C	14	2	C	4	2	2	0	2	6	34	3	
21c14r3C	14	3	C	5	3	2	1	2,5	12	32	7	

N° échantillon	couche	rainure	parcelle	L600	L300	VP	YV	VA	Humidité	filtrat	res	IG
23c14r3C	14	3	C	5	3	2	1	2,5	9	38	3	
24c14r4C	14	4	C	11	8	3	5	5,5	9	25	1	
25c14r4C	14	4	C	12	7	5	2	6	8	26	2	
26c14r5C	14	5	C	14	12	2	10	7	9	25	2	
27c14r6C	14	6	C	12	8	4	4	6	8	24	2	
28c14r6C	14	6	C	14	9	5	4	7	9	21	2	
29c14r1D	14	1	D	26	23	3	20	13	15	27	12	
30c14r1D	14	1	D	40	35	5	30	20	19	27	13	
31c14r2D	14	2	D	45	43	2	41	22,5	18	32	15	
32c14r2D	14	2	D	32	29	3	26	16	14	30	19	
33c14r2D	14	2	D	30	24	6	18	15	18	31,4	14	
34c14r2D	14	2	D	55	50	5	45	27,5	11	24	12	
35c14r3D	14	3	D	59	53	6	47	29,5	13	32	12	
36c14r3D	14	3	D	22	19	3	16	11	10	30		
37c14r3D	14	3	D	15	14	1	13	7,5	9	37	11	
1c14r1E	14	1	E	34	30	4	26	17	10	28,4	30	
2c14r1E	14	1	E	85	81	4	77	42,5	8	22	17	
3c14r1E	14	1	E	36	24	12	12	18	9	24	7	
4c14r1E	14	1	E	23	20	3	17	11,5	10	38,8	7	
5c14r1E	14	1	E	25	23	2	21	12,5	7	20	4	
6c14r2E	14	2	E	30	28	2	26	15	8	26,6	13	
7c14r2E	14	2	E	34	31	3	28	17	9	28,4	17	
8c14r3E	14	3	E	48	43	5	38	24	8	28,8	4	
9c14r4E	14	4	E	30	27	3	24	15	7	23,2	9	
10c14r4E	14	4	E	21	17	4	13	10,5	7	31,2	8	
11c14r4E	14	4	E	22	19	3	16	11	7	29,6	12	
12c14r4E	14	4	E	27	25	2	23	13,5	8	25,6	13	
13c14r4E	14	4	E	27	24	3	21	13,5	7	27,2	23	
14c14r4E	14	4	E	32	27	5	22	16	7	28	25	
38c14r1F	14	1	F	32	28	4	24	16	8	32		
39c14r1F	14	1	F	48	43	5	38	24	11	23		
40c14r1F	14	1	F	28	23	5	18	14	10	20		
41c14r1F	14	1	F	25	21	4	17	12,5	9	24		
42c14r1F	14	1	F	30	26	4	22	15	12	20		
43c14r1F	14	1	F	52	47	5	42	26	12	20		
44c14r1F	14	1	F	27	23	4	19	13,5	9	23,5		
45c14r1F	14	1	F	34	28	6	22	17	13	27		
46c14r1F	14	1	F	19	15	4	11	9,5	11	39		
47c14r2F	14	2	F	21	14	7	7	10,5	10	30		
48c14r2F	14	2	F	20	16	4	12	10	9	31,5		
49c14r2F	14	2	F	25	22	3	19	12,5	15	25		
50c14r2F	14	2	F	25	21	4	17	12,5	14	30		
51c14r3F	14	3	F	40	35	5	30	20	8	28		
52c14r3F	14	3	F	30	26	4	22	15	14			
53c14r3F	14	3	F	30	26	4	22	15	13	24,5		
54c14r3F	14	3	F	30	25	5	20	15	15	25		
55c14r4F	14	4	F	20	16	4	12	10	9	24		
56c14r4F	14	4	F	20	17	3	14	10	9	24		
nbre valeurs				306	186	186	186	306	186	286	207	107