UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU - FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION. LABORATOIRE DE RECHERCHE GÉOMATERIAUX, ENVIRONNEMENT ET AMENAGEME NT(L.G.E.A) DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème

Etude de l'altérabilité du matériau marne sous l'effet des eaux acides

Présenté par Mme HAMITI née Touat Kamelia

Membre du jury :

Monsieur M. DJEMAI	: Professeur à L'UMMTO	Président
Monsieur B. MELBOUCI	: Professeur à l'université de l'UMMTO	Promoteur
Monsieur O. BOUDLAL	: Maître de Conférence classe A à l'UMMTO	Examinateur

Promotion : 2018/2019

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenues et encouragées tout au long de cette année.

J'exprime en premier lieu ma gratitude à mon promoteur, Monsieur Melbouci Bachir, pour m'avoir donné la chance de réaliser ce mémoire de recherche. Je le remercie pour son suivi, son soutien qui n'ont cessés de me prodiguer tout au long de cette période du projet.

Je remercie également les professeurs et l'équipe du laboratoire LGEA de l'université de Mouloud Mammeri, les ingénieurs des différents organismes de contrôle (CETIM , LNHC, LCTP) , pour leur présence et leur collaboration.

Ensuite, mes remerciements vont directement à mes proches, à mes très chères parents, mon mari, mes enfants, mes frères et sœurs, à mes beaux parents, qui m'ont énormément soutenus et encouragés.

J'adresse aussi un grand merci aux membres du jury qui ont acceptés, sans réserve aucune, d'évaluer ce mémoire à sa juste valeur et de me faire part de leurs remarques surement pertinente qui, avec un peu de recul, contribueront, sans nul doute, au perfectionnement du présent travail.

Liste des figures

Figure 01 : Echantillon représentatif de la marne d'Azazga. 05

Figure 02 : Alternance gel-dégel et son impact sur les roches. 06

Figure 03: Effet du vent sur les roches. 06

Figure 04: Action des racines sur les roches. 07

Figure 05: Altération chimique des roches provoquée par l'eau et les gaz atmosphériques. 09

Figure 06 : Courbe densité sèche- teneur en eau du matériau marne étudié. 15

Figure 07 : Essai du pycnomètre à eau sur la roche marne étudiée. 16

Figure 08 : Essai de pesé hydrostatique sur le matériau marne étudiée. 17

Figure 09 : Essai au bleu de Méthylène sur la marne. 19

Figure 10 : Essai d'Atterberg - Détermination de la limite de plasticité et liquidité de la marne en bloc. 21

Figure 11: Graphique de détermination de la limite de liquidité de la marne en bloc. 22

Figure12: Confection des rouleaux de pate (Limite de plasticité marne en bloc). 23

Figure 13 : Classification des sols fins Diagramme de plasticité (Selon L.C.P.C.NF EN-206-1)..... 24

Figure14 : Illustration de la dégradation du matériau au contact de l'eau lors de l'essai de la granulométrie par tamisage. 25

Figure 15 :Granulométrie par sédimentation marne en bloc. 26

Figure 16 : Courbe granulométrique du matériau marne en bloc. 27

Figure 17 : Résultats de l'essai minéralogique sur le matériau marne. 29

Figure 18 : Droite intrinsèque du matériau marne. 32

Figure 19 : Classification des particules solides d'un sol. 33

Figure 20 : Diagramme de plasticité (d'après Casagrande 1948). 34

Liste des figures

Figure 21 : Classification des sols selon GTR (AFNOR NF P 11-300 cf. paragraphe 2.6)..... 36

Figure 22: Echantillons de marne à soumettre à l'essai d'altération. 38

Figure 23: Illustration de l'essai d'altération sur les roches de marne sélectionnées. 39

Figure 24 : Mise en évidence de la dégradation du matériau marne au contact de l'eau..... 39

Figure 25: Essai de compression simple sur la roche marne. 40

Figure 26 : Courbe granulométrique de la roche reconstituée sur la fraction 10/20. 44

Figure 27 : Graphique de détermination de la limite de liquidité roche reconstituée (fraction 10/20). 45

Figure 28: Le sol une interface dans l'environnement (Robert 1992-1995). 47

Figure 29: Composition en phosphore de certains détergents. 49

Figure 30: Phénomènes de fixation du phosphate sur différents constituant dans le sol. 49

Figure 31:Courbe granulométrique de la roche en bloc polluée de phosphates PO4. 50

Figure 32: Graphique de détermination de la limite de liquidité roche en bloc polluée de phosphates PO4. 51

Figure 33 : Courbe granulométrique de la roche en bloc polluée de sulfates SO4. 53

Figure 34 : Graphique de détermination de la limite de liquidité roche en bloc polluée. 54

Figure 35: Courbe granulométrique de la roche en bloc polluée de sulfates SO4 et phosphates PO4. 56

Figure 36 : Graphique de détermination de la limite de liquidité roche en bloc polluée. 57

Figure 37 : Courbe granulométrique de la roche en fraction polluée de phosphates PO4. 59

Figure 38: Graphique de détermination de la limite de liquidité de la roche fractionnée polluée PO4 60

Figure 39 : Courbe granulométrique de la roche en fraction polluée de sulfates SO4. 62

Liste des figures

Figure 40 : Graphique de détermination de la limite de liquidité roche fractionnée polluée d'acide SO4. 63

Figure 41 : Courbe granulométrique de la roche fractionnée polluée de phosphates PO4 et sulfates SO4. 65

Figure 42: Graphique de détermination de la limite de liquidité roche fractionnée polluée. 66

Figure 43: Classification des particules solides d'un sol. 68

Figure 44 : Classification des sols fins Diagramme de plasticité 70

Figure 45:Droite intrinsèque du matériau marne pollué de phosphates PO4. 72

Figure 46:Droite intrinsèque du matériau marne pollué de sulfates SO4. 73

Figure 47:Droite intrinsèque du matériau marne pollué de phosphates et sulfates. 73

Figure 48: Superpositions des granulométries de la marne en bloc intacte et polluée. 76

Figure 49:Décantation des particules de la roche polluée de PO4. 77

Figure 50 : Superpositions des granulométries de la marne fractionnée intacte et polluée. 78

Figure 51 :Superpositions des granulométries de la marne en bloc et reconstituée non polluée.79

Figure 52 : Superposition des granulométries de la marne en bloc et en fraction, polluée de PO4. 79

Figure 53:Superposition des granulométries de la marne en bloc et en fraction, polluée de SO4. 80

Figure 54: Superposition des granulométries de la marne en bloc et en fraction, polluée de SO4 et PO4. 80

Tableau 01 : teneur en eau optimale du matériau marne. **14**

Tableau 02 : Essai du pycnomètre **16**

Tableau 03 : Mesures de l'essai de pesé hydrostatique. **18**

Tableau 04 : Essai d'Atterberg **22**

Tableau 05 : Essai de la limite de plasticité **23**

Tableau 06 : Essai de sédimentation sur la roche marneuse **26**

Tableau 07 : Composition chimique de la roche marneuse **29**

Tableau 08 : Normes d'interprétation du taux du Calcaire du sol d'après Loz et Mathieu, 1990. **30**

Tableau 09 : Essais de laboratoire réalisés sur la marne d'Azazga **33**

Tableau 10 : Degré de plasticité des sols selon Ip. **34**

Tableau 11 : Classification des sols selon l'agressivité (NF P18-011) **35**

Tableau 12:Normes d'interprétation du taux du Calcaire du sol d'après Loz et Mathieu, 1990. **35**

Tableau 13 : Essai de résistance à la compression simple. **40**

Tableau 14: Qualification de la résistance d'une roche en fonction de la valeur de la résistance en compression simple Rc **41**

Tableau 15 : Essai de sédimentation marne intacte sur la fraction 10/20. **43**

Le Tableau 16 : Essai d'Atterberg réalisé sur la marne reconstituée (fraction10/20). **44**

Tableau 17 : limite de plasticité de la marne fractionnée 10/20. **45**

Tableau 18 : Essai de sédimentation de la marne en bloc, polluée de PO4. **50**

Tableau 19 : Essai d'Atterberg réalisé sur la marne en bloc polluée d'acide PO4. **51**

Tableau 20 : Limites de plasticité marne en bloc polluée de PO4. **52**

Tableau 2**1**: Essais de sédimentation de la marne en bloc polluée de PO4+SO4. ..... **53**

Tableau 2**2** : Essai d'Atterberg sur la marne en bloc polluée d'acide SO4+PO4 ..... **54**

Tableau **23** : Limites de plasticité marne en bloc polluée de SO4 et PO4. ..... **55**

Tableau **24** : Essai de sédimentation sur marne fraction 10/20 polluée de PO4. ..... **56**

Tableau **25** : Essai d'Atterberg sur marne fractionnée polluée d'acide PO4. ..... **57**

Tableau **26** : Limite de plasticité de la roche en fraction polluée de phosphates PO4. ..... **58**

Tableau **27** : Essai de sédimentation sur marne fractionnée 10/20 polluée de SO4..... **59**

Tableau **28** : Essai d'Atterberg réalisé sur marne fractionnée polluée d'acide SO4..... **60**

Tableau**29** : Limite de plasticité de la roche en fraction polluée de sulfates SO4 ..... **61**

Tableau **30**:Essai de sédimentation sur marne fractionnée polluée de SO4+PO4 ..... **62**

Tableau **31** : Essai d'Atterberg réalisé sur la marne fractionnée polluée d'acide SO4 et PO4 **63**

Tableau **32** : Limite de plasticité de la roche en fraction polluée de sulfates SO4 et phosphates PO4. ..... **64**

Tableau**33**: Résultats des essais laboratoire. **65**

Tableau **34** : degré de plasticité des sols selon Ip. **66**

Tableau **35** : Cohésion et angle de frottement. **67**

Tableau**36**: Essais chimique sur marne polluée **67**

Tableau **37**:Classification du sol selon l'agressivité (NF P18-011)..... **69**

Introduction 01

Chapitre I : Généralités

I.1 Introduction 03
I.2 Choix de la zone d'étude 03
I.3 Qu'est-ce que l'altération d'une roche ? 04
I.4 L'altération mécanique (ou physique) 05
I.5 L'altération biologique 07
I.6 L'altération chimique 08
I.7 Conclusion 09

Chapitre II : Essais d'identifications sur la roche marneuse

II.1 Introduction 13
II.2 Détermination de la teneur en eau (optimale) NFP 94-093 13
II.3 Détermination de la masse volumique des particules solides NFP 94-054 15
II.4 Détermination de la masse volumique sèche d'un élément de roche NFP 94-064 ... 17
II.5 Taches aux Bleu de Méthylène NFP 94-068 18
II.6 Limites d'Atterberg NFP 94-051 (limite de liquidité à la coupelle –limite de plasticité au rouleau) 20
II.7 Analyse granulométrique par Sédimentation NFP 94-057 24
II.8 Essai chimique et minéralogique 27
II.9 Essai de cisaillement rectiligne (consolidé drainé) à la boite de Casagrande (NF P 94-071-1) 30
II.10 Classification du sol 32
II.11 Interprétation des résultats 33
II.12 Conclusion 37

Chapitre III Altérabilité de la roche marneuse sous l'effet d'eaux acides

III.1 Introduction 38
III.2 Essais d'altération sur la marne en bloc 38
III.3 Essais d'altérabilité sur la marne reconstituée 42
III.3.1 Analyse granulométrique par Sédimentation (NFP 94-057) sur la marne fractionnée . 43

III.3.2 Limites d'Atterberg (NF P 94-051) sur la marne reconstituée 44
III.4 Caractérisation de l'altération du matériau en contact d'eau polluée 46
III.5 Essais sur roche en bloc polluée..... 47
III.5.1 Essai sur roche en bloc polluée de phosphates PO4..... 48
III.5.2 Essai sur roche en bloc polluée de phosphates SO4..... 52
III.5.3 Essai sur roche en bloc polluée de sulfates SO4 et phosphates PO4 55
III.6 Essai sur roche fractionnée (fraction10/20) polluée..... 58
III.6.1 Essai sur roche fractionnée polluée de phosphates PO4 58
III.6.2 Essai sur roche fractionnée polluée de sulfates SO4..... 61
III.6.3 Essai sur roche fractionnée polluée de sulfates SO4 et phosphates PO4 64
III.6.4 Essai d'Atterberg sur roche fractionnée polluée de sulfates SO4 et phosphates PO4 .. 66
III.7 Classification de la marne fractionnée et en bloc, polluée et non polluée 67
III.8 Interprétation des résultats..... 68
III.9 Conclusion..... 70

Chapitre IV : Essais mécaniques et interprétation des résultats

IV.1 Introduction..... 72
IV.2 Essais mécaniques sur matériau pollué 72
IV.3 Essai chimique sur le matériau pollué..... 74
IV.4 Interprétation des résultats 75
IV.5 Conclusion 81

Conclusion générale 82
Bibliographie.

Avant-propos

Introduction

La ville d'Azzazga, en grande Kabylie, est construite à mi-pente d'un versant montagneux (Djebel Abed) orienté sensiblement Nord Est-Sud Ouest et à la faveur d'un replat topographique de pente maximale de 10%. Elle est délimitée au Nord et au Sud, par deux grands thalwegs à écoulement intermittent : Iazouguen et Bou Léna. Le paysage présenté par ailleurs, une morphologie souvent moutonnée liée, soit à la solifluxion soit à des mouvements de terrain, lents de plus grande ampleur. D'après des travaux antérieurs, des glissements de terrain anciens et récents sont reconnus sur les rives des deux thalwegs principaux.

Il existe une présence d'eau souterraine sous forme de nappes pelliculaires, qui se développe en période pluviale, dans les éboulis du Numidien constitués de grés grossiers altérés à matrice argilo-limoneuse peu sableuse. L'infiltration de ces eaux dans les niveaux sous-jacents à savoir les flysch (marnes) et les argiles miocènes forme des niveaux d'eau souterraine sous forme de nappe semi profonde.

Ces nappes, après saturation, sont à l'origine de mouvements de terrain assez spectaculaires survenus à la wilaya d'Azazga durant ces dernières annéeset qui ont causésdes dégâts matériels considérables.

La formation géologique à caractère argileuse et marneuse de la région, favorise ces mouvements de terrain compte tenu des mauvaises caractéristiques mécaniques de celles-ci, des retraits-gonflements de sol donnant lieu à des tassements différentiels affectant la région (réseau routier, constructions).

L'eau reste l'agent principal des altérations des roches. Ces altérations se traduisent généralement par des échanges de matière avec le milieu extérieur. Soit par le départ d'un ou de plusieurs constituants, ou à l'inverse, par l'apport d'autres éléments. Les nappes souterraines se sont contaminées de façon continue ces dernières années par des produits chimiques solubles issus de l'activité humaine en surface notamment en zone urbaine.

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à l'impact de l'eau potable ou l'eau acidulée sur la roche marneuse et son effet sur l'altérabilité de cette dernière.

Pour cela, nous avons mis notre échantillon de sol en contact d'eau potable, et d'eau contaminée d'agents acides (sulfates H_2SO4 et phosphates H_2PO4) généralement présents dans les eaux souterraines.

Avant-propos

Nous avons réparti notre travail comme suit :

Dans le **chapitre I**, nous exposant le choix du site d'étude et nous définissons de façon globale ce qu'est l'altération et les phénomènes la provoquant.

Le **chapitre II** englobe les essais de laboratoire réalisés pour l'identification de la roche, ainsi que les essais chimiques et minéralogiques effectués sur celle-ci. Nous finissons ce chapitre par une classification de la roche.

Dans le **chapitre III**, nous soumettons l'échantillon de sol dans ces différents états (en bloc ou reconstitué) aux essais d'altération chimique après contaminationde celui-ci d'eau polluée.

Nous évaluerons l'évolution de la courbe granulométrique et de l'indice de plasticité de chaque échantillon. Nous terminons le chapitre par la classification des différents cas de sol étudiés.

Pour finir nos essais, nous soumettant notre échantillon dans le **chapitre IV** aux essais de cisaillement pour évaluer l'effet des eaux polluées sur la roche. Une interprétation des résultats viendra clôturer ce chapitre.

Une **conclusion** générale viendra résumer notre travail et notre synthèse sur le thème évoqué dans ce mémoire.

Chapitre I : Généralités

Chapitre I

Généralités

I.1 Introduction

Les roches marneuses, très répondues dans la ville d'Azazga, ont fait l'objet de nombreuses études et recherches en raison de leur nature qui les rend très difficiles à la construction. Ce sont des roches sédimentaires formées de calcaire et d'argile. Pour cette raison, comme les argiles, elles sont tendres, finement poreuses, friables quand elles sont sèches, et plastiques lorsqu'elles sont mouillées. Mais elles ont la particularité de faire effervescence avec les acides à cause de leur contenance en calcaire.

En effet, l'altération chimique des roches de la ville d'Azazga est un des facteurs qui influence sur la stabilité des massifs rocheux. Cette altération conduit à la dégradation des propriétés physiques et mécaniques de la roche.

I.2 Choix de la zone d'étude

Les glissements de terrain ne cessent de hanter les habitants de la ville d'Azazga sise à quelques 30 km à l'est de Tizi Ouzou. Ce pôle urbain qui reste l'un des plus importants de la wilaya souffre indéniablement de ce phénomène ravageur qui le fragilise à plus d'un titre dans son essor économique. Toute expansion urbanistique vers sa zone nord reste hypothéquée, du moins présentement, et elle demeure conditionnée par une prise en charge effective de ce problème. Alors que le périmètre urbain de la ville d'Azazga est de 920 ha, presque la moitié qui représente 440 ha est déclarée comme zone instable (défavorable) à la construction. Un problème qu'on a toujours qualifié de maîtrisable avec la mise en place d'une étude géologique et géotechnique dans laquelle seraient prises en compte les questions liées au drainage des quantités d'eaux importantes absorbées par les tréfonds de cette agglomération. Le phénomène est aggravé par des eaux pluviales locales quand les précipitations sont importantes et que les canalisations et les ruisseaux rejettent de part et d'autre, additionnées à des milliers de mètres cubes qui se charrient en profondeur depuis le mont des Ait Bouhini, et aussi à partir du versant Ouest de la forêt de Yakourène, qui n'est autre qu'un retranchement sous-jacent de l'Akfadou qui présente l'une des plus importantes réserves aquifères du nord du pays, ne serait-ce qu'eu égard aux innombrables sources naturelles à haut débit qui caractérisent ses soubassements vers Yakourène, Idjeur, Bouzeguène, etc. En outre, toutes les

études réalisées depuis 1974 à Azazgaont toujours montré que le facteur hydrique est la cause principale de cette instabilité étendue. La morphologie en pente raide de cette ville ne peut qu'accentuer le phénomène durant les périodes de fortes crues qui affectent le sol qui se présente ainsi caractérisé de plusieurs instabilités.

Lorsque le sol est uniformément poreux et perméable, l'eau de pluie s'infiltre jusqu'à une couche imperméable et sature la roche jusqu'à la surface libre de la nappe.

Ainsi, tout produit répandu en surface du sol, comme les engrais, les pesticides utilisés en agriculture, ou les déchets, les produits chimiques jetés ici et là, sont dissous par l'eau, et sont transportés vers le bas. Les roches subissent alors des altérations chimiques par la circulation des eaux polluées.

I.3 Qu'est ce que l'altération d'une roche ?

L'altération d'une roche est à l'origine de la formation d'un sol. C'est la séparation des éléments d'une roche par l'action d'un phénomène mécanique, physique, biologique ou chimique.

L'altération a pour effet de décomposer une roche soit, en ions solubles et en grains solides qui vont être mobilisés par l'érosion, soit en un dépôt résiduel demeurant sur place.

Les actions purement mécaniques des agents d'érosion produisent des fragments de même composition chimique que la roche d'origine. Les phénomènes chimiques donnent des solutions de lessivage qui sont exportées, ou fournissent les éléments pour former de nouveaux minéraux dans le sol (néoformation). Les roches érodées forment un manteau d'altération (éluvion). La contribution des organismes à cette couche, sous forme d'humus[1], aboutit à la formation d'un sol dont la nature et l'épaisseur varient selon les climats.

L'altération des marnes se traduit essentiellement par une dégradation de la structure de la roche en surface sous l'effet de divers mécanismes (Buffalo 1989 ; Gallart 1989).

[1] Humus : couche supérieure du sol créée, entretenue et modifiée par la décomposition de la matière organique.

Figure 01: Echantillon représentatif de la marne d'Azazga.

I.4 L'altération mécanique (ou physique)

C'est la fragmentation de la roche mère en parties plus petites sans modification de la composition minéralogique et chimique initiale. Un certain nombre d'agents sont responsables de la désagrégation mécanique d'une roche, et donc d'une modification du relief.

L'action de l'eau : les pluies ont des effets dévastateurs, les ruissellements provoquent une dénudation des terrains.

Les variations de température : elles engendrent une désagrégation mécanique directe, ou indirecte en agissant sur la variation du volume des roches.

L'augmentation des températures conduit à des différences de dilatation thermique entre les minéraux d'une roche. Tandis que les baisses de températures provoquent l'action du gel dégel, qui, en présence d'eau, augmente le volume de glace dans les fissures, par conséquent un éclatement de la roche, ceci forme des éboulis qui sont entrainés par les glaciers et les eaux de ruissellement.

[2]

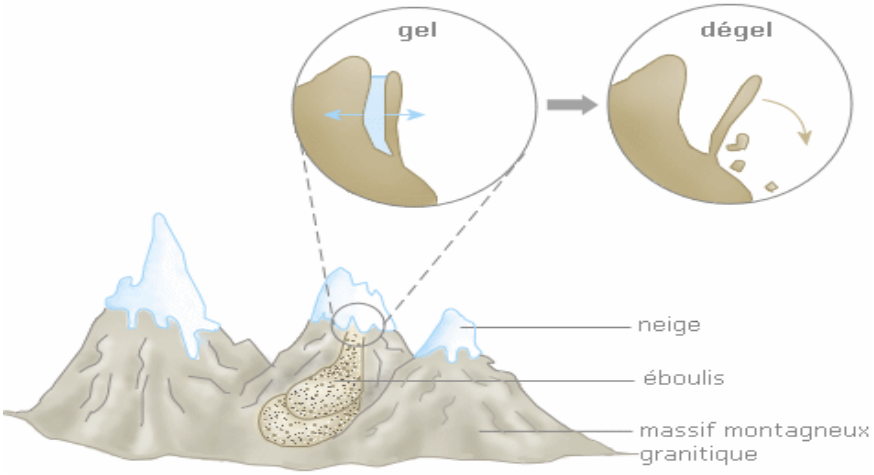


Figure 02: Alternance gel-dégel et son impact sur les roches.

L'action des glaciers : la pression exercée sur les roches par le déplacement des glaciers peut les transformer en matériaux très fins (limons, poussière...) celle-ci peut être visible après le retrait du glacier.

L'action du vent : le vent soufflant sur une surface désertique balaie les particules les plus fines et peut faire apparaitre la surface rocheuse. Exemple d'un sol alluvial, le vent élimine la fraction la plus fine, laissant sur place un désert pavé de cailloux.

[3]

Figure 03: Effet du vent sur les roches.

[2] Source : https://www.maxicours.com/se/cours/action-d-autres-agents-d-erosion-et-de-transport/
[3] Source : http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/erosion/alteration.

Ces agents climatiques fractionnent la roche en fragments plus petits (blocs, graviers, sables, limons et argile).

I.5 L'altération biologique

C'est l'action mécanique des racines des végétaux qui ouvrent les fractures. Les racines des arbres poussent dans le sol où elles absorbent l'eau et les minéraux nécessaires à la croissance et à la survie de ces derniers. Ces racines peuvent être si développées qu'elles atteignent les roches sous le sol, qu'elles vont fissurer, pour pouvoir poursuivre leur croissance. Elles contribuent ainsi à la fragmentation et à l'érosion des roches sous le sol.

[45] **Figure 04: Action des racines sur les roches.**

L'activité biologique (bactéries, plantes, champignons) participe également à l'altération des roches de façon chimique par :

- Déplacement de l'équilibre chimique par le prélèvement des sels minéraux dans les eaux de surfaces ;
- Relarguage des protons (H^+) dans les eaux (particulièrement par les racines), ce qui contribue à acidifier les eaux qui favorise l'altération ;
- Apport de matière O_2, CO_2, matière organique qui conduit à la production d'acides organiques.

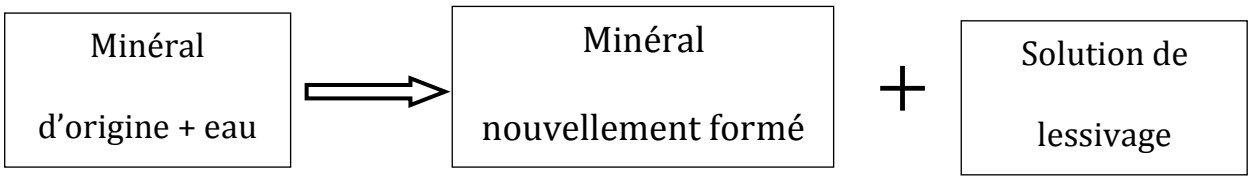
[4] Source : http://raymond.rodriguez1.free.fr/Documents/Organisme-V/Nutrition_plante/index.htm
[5] Source : http://profsvt71.e-monsite.com/pages/classe-terminale-s/theme-1b-geologie/chapitre-8-fabrication-et-recyclage-de-la-cc.html

I.6 L'altération chimique

C'est la modification de la composition initiale de la roche mère par la mise en solution ou la précipitation d'éléments. Ces réactions s'accompagnent de l'apparition de nouveaux assemblages minéralogiques.

L'eau est l'agent fondamental de l'altération chimique. La molécule d'eau (H_2O) est dipolaire, elle peut se dissocier pour former des ions H^+et OH^+pouvant se substituer par la suite à certains ions des minéraux. Il y'a donc dissolution de la roche par l'eau.

L'eau agit de deux façons. Par hydratation, l'eau peut se glisser entre les feuillets du minéral, provoquer son gonflement, ce qui va peu à peu désolidariser les grains de la roche. Mais la principale réaction chimique responsable d'une altération est l'hydrolyse, c'est-à-dire la destruction des minéraux par l'eau.



L'action de l'eau est favorisée par différents facteurs notamment :

- La température qui augmente le pouvoir de solvatation et de dissociation de la molécule d'eau.
- L'acidité de l'eau, plus l'eau est acide plus celle-ci attaque la roche. La teneur en CO_2 dissout (généralement dans les eaux de pluies). Le CO_2 dissout dans l'eau agit comme un acide fable. Plus l'eau est riche en CO_2 dissout, plus elle sera agressive vis-à-vis de la roche, ce qui favorise l'altération de celle-ci.

6

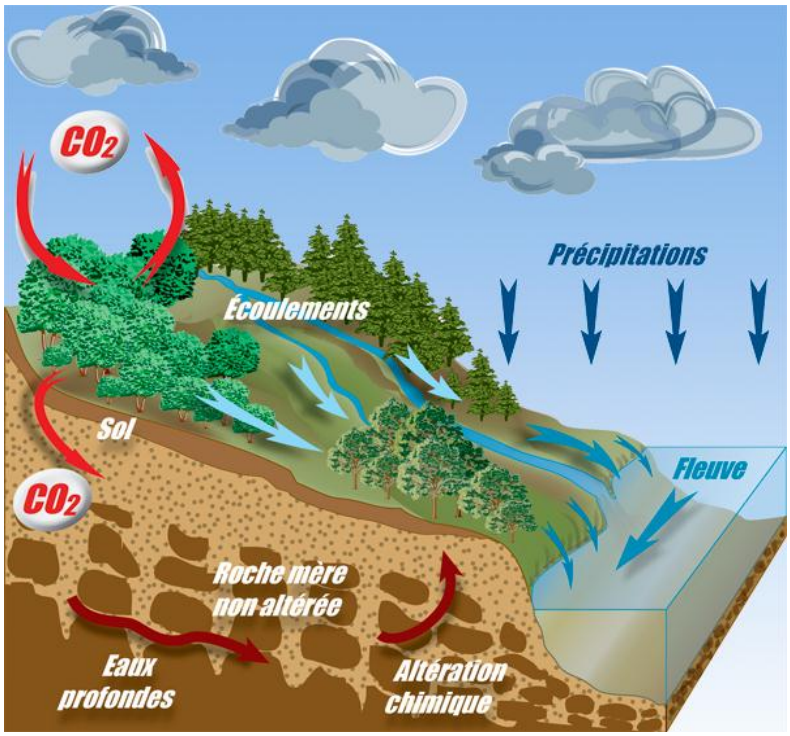


Figure 05: Altération chimique des roches provoquée par l'eau et les gaz atmosphériques.

I.7 Conclusion

L'objectif de notre travail est de voir comment l'altération chimique de la roche se produit lors de la mise en contact de celle-ci avec des polluants. Pour cela, il est nécessaire, avant d'entamer notre travail, de connaitre les caractéristiques phtisique et chimique de la roche intacte. C'est ce que nous allons voir dans le chapitre suivant.

[6] Source : http://www.ipgp.fr/fr/gc/potamologie-chimique

Chapitre I

Généralités

Chapitre II
Essais d'identifications sur la roche marneuse

Chapitre II

Essais d'identification sur la roche marneuse

II.1 Introduction

Le mélange intime de l'argile avec du carbonate de chaux donne naissance, dès que la proportion de ce dernier élément atteint 20%, aux marnes, c'est-à-dire à des roches qui, perdant la plasticité habituelle des dépôts franchement argileux, peuvent se présenter compactes, avec un toucher gras enctueux, et sans trace de stratification apparente ou d'autres fois fissiles. Leur compacité est d'autant mieux accentuée qu'elles sont plus calcarières.

Inversement, une proportion plus forte d'argile les rend grasse et propre à la fabrication des tuiles.

Plus souvent marquée de coloration claire, grisâtres, il en est de très calcarifères qui peuvent atteindre, avec l'aspect, la blancheur de la craie. Par contre les teintes brunes sont le signe le signe caractéristique de la prédominance de l'élément argileux

« LA ROCHE : constitue toute les grandes masses pierreuses, salines, combustibles ou métalliques qui entrent dans la structure de la terre » ***ALEXANDRE BROGNIART***

Les roches sont constituées d'un ensemble chimique et minéralogique variée, c'est un mélange souvent hétérogène et anisotrope formé à partir de liaison de plusieurs minéraux.

L'identification géologique d'une roche (ou d'un sol) consiste en la détermination ou à la définition des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques et leurs applications en construction civile à partir d'essais de laboratoire.

L'identification physique d'un sol se réalise à l'aide d'essais simples de laboratoire qui permettent de classer le sol et d'avoir une idée sur le comportement mécanique de celui-ci. Ils comportent généralement les essais suivants :

II.2 Détermination de la teneur en eau (optimale) NFP 94-093

L'essai Proctor est un essai qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire par compactage à énergie fixe (dame de poids).

Il a pour but de déterminer la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum.

L'essai Proctor exécuté suivant la norme **NFP 94-093**, consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer le teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (6% ,7% ,9%,10% ,12%). On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau **optimum Proctor** », et l'ordonnée « la densité sèche maximum **Proctor** ».

La teneur en eau et la densité sèche sont calculées par les équations suivantes :

$$w = \frac{M_h - M_S}{M_S} x\ 100 \gamma_d = \frac{M_S}{V}$$

Le tableau 01 contient les teneurs en eau et masses volumiques correspondantes et mets en évidence la teneur en eau optimale.

Tableau 01 : teneur en eau optimale du matériau marne.

Me	Mh	Ms	w	w%	Volume du moule	masse volumique
6%	1892,1	1732,1	0,09	9,24	944	1,835
7%	1908	1740,5	0,10	9,62	944	1,844
9%	2000,3	1814,3	0,10	10,25	944	1,922
10%	2010,1	1801,8	0,12	11,56	944	1,909
12%	2000,05	1754,4	0,14	14,00	944	1,858

Teneur en eau optimale

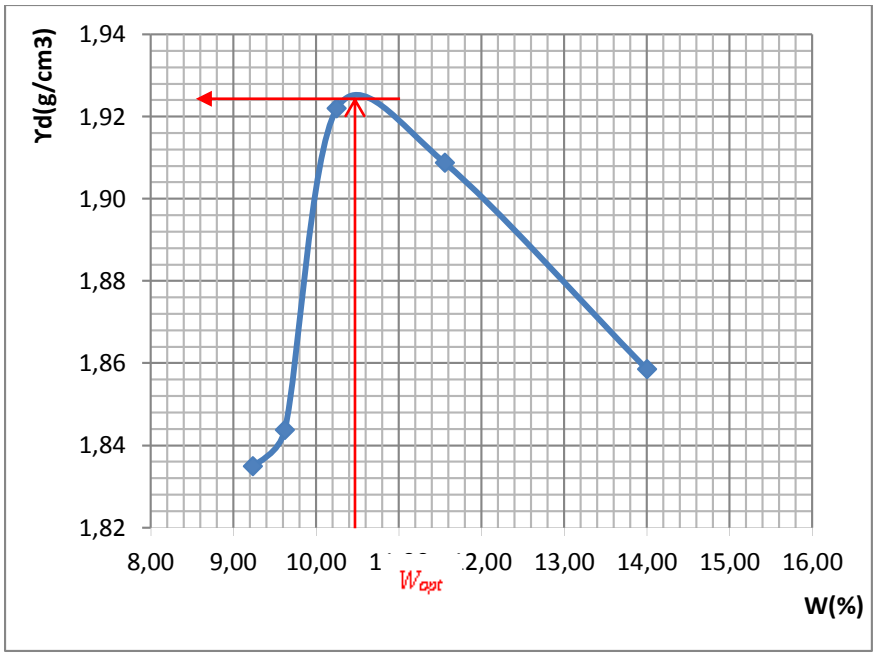


Figure 06 : Courbe densité sèche- teneur en eau du matériau marne étudié.

II.3 Détermination de la masse volumique des particules solides NFP 94-054

La masse volumique d'un corps est la quantité de matière qu'il possède par rapport à l'espace qu'il occupe.

La masse volumique des grains solides du sol (ρs) est le quotient de la masse de ces grains solides (ms) par leur volume (vs).

$$\rho s = ms / vs$$

L'essai détermine la masse volumique moyenne d'un échantillon, parfois de nature différente. La masse volumique d'un sol est utilisée pour connaitre l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

- **Principe de l'essai**

Le principe de l'essai consiste à sécher un échantillon de sol à l'étuve puis déterminer sa masse sèche par pesée (masse des particules solides)

Le volume des particules et des éléments solides est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre. Il permet de déterminer le volume des échantillons de forme irrégulière et de masse connue. Le principe repose sur le remplacement d'une certaine quantité de liquide du pycnomètre (eau) par l'échantillon à étudier (plongé dans le pycnomètre).

Figure 07 : Essai du pycnomètre à eau sur la roche marne étudiée.

Le tableau 02 donne les valeurs relevées lors de l'essai du pycnomètre.

Tableau 02 : Essai du pycnomètre

Masses	Valeurs (g)
M_1 (masse du pycnomètre)	207
M_2 (masse pycnomètre+sol)	255
M_3(masse pycnomètre+sol+eau)	796
M_4(masse pycnomètre+eau)	767
ρ_w (g/cm^3) (masse volumique de l'eau distillée)	1

$$\rho_s = \rho_w (m_2 - m_1) / (m_4 - m_1 + m_2 - m_3)$$

Application numérique :

$$\rho_S = \frac{1*(256-206)}{(767+256-206-796)} \Longrightarrow \boxed{\rho_s = 2.53}$$

II.4 Détermination de la masse volumique sèche d'un élément de roche NFP 94-064

La masse volumique sèche ρ_d d'un échantillon de roche est le quotient de sa masse (m_s) sèche par le volume (v) qu'il occupe (y compris l'air qu'il contient).

$$\rho_d = m_s/v$$

La masse volumique des roches est un paramètre utilisé notamment pour classer certaines roches calcaires ainsi que les craies, et éventuellement pour déterminer la compacité et la porosité d'une roche.

L'essai consiste à sécher puis à mesurer la masse et le volume d'un échantillon.

La masse de l'chantillon est obtenue par pesage, apres sechage dans une étuve à 105° , et son volume déduit de pesée dont une est hydrostatique.

.

Eléments de roche brossés puis pesés

Eléments de roche paraffinés

Figure 08 : Essai de pesé hydrostatique sur le matériau marne étudiée.

Le tableau 03 contient les pesées des quatre (04) échantillons avant et après paraffine, ainsi que les densités sèches obtenues pour chacun d'entre eux.

Tableau 03 : Mesures de l'essai de pesé hydrostatique.

Ech N°	Ms	M_{rp}	M_{rp}	ρ_p	ρ_w	V_p	V_{rp}	V	ρ_d
1	217,3	239,2	118,5	0,88	1	24,89	120,7	95,81	2,27
2	210,6	240,6	112,2	0,88	1	34,09	128,4	94,31	2,23
3	159,6	176,9	86,6	0,88	1	19,66	90,3	70,64	2,26
4	87,7	100,3	46,8	0,88	1	14,32	53,5	39,18	2,24

Nous calculons ainsi la masse volumique sèche qui est la moyenne arithmétique des quatre mesures effectuées :

$$\rho_d = \frac{\sum_{i=1}^{4} \rho_{si}}{4} \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\boldsymbol{\rho_d = 2.25}}$$

On déduit à partir cela l'indice des vide et le degré de saturation

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \; S_r(\%) = \frac{\rho_s * w}{\rho_w * e} * 100$$

Application numérique :

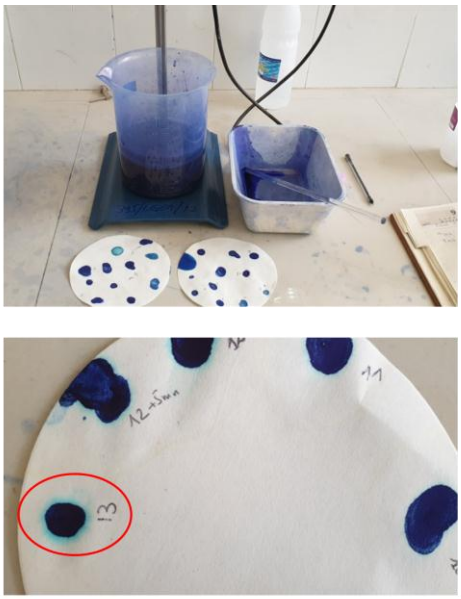
$$\boxed{\boldsymbol{e = 0.12}} \qquad \boxed{\boldsymbol{S_r}(\%) = \mathbf{58.4}\,\%}$$

II.5 Taches aux Bleu de Méthylène NFP 94-068

L'essai au bleu de méthylène dit A LA TACHE permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de "bleu" et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure. Une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre. L'essai consiste à

déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante.

Dispositif de dosage



Apparition de l'auréole bleue autour de la tache

Agitateur mécanique

Figure 09 : Essai au bleu de Méthylène sur la marne.

Nous avons procédé au calcul suivant la norme **NFP 94-068** comme suit :

La teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai :

$w = \frac{M_{h2} - M_{s2}}{M_{s2}}$ **AN°** : $w = \frac{51.3 - 50.4}{50.4} = 0.018$

Masse sèche de la prise d'essai

$M_0 = \frac{M_{h1}}{1+w}$ **AN°** : $M_0 = \frac{30}{1+0.018} = 29.47g$

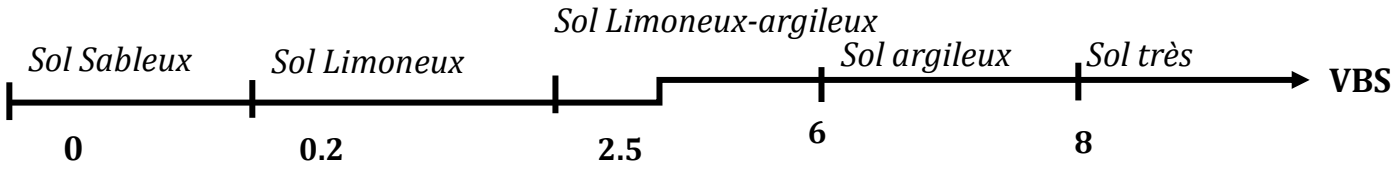
Masse de solution de bleu introduite

$B = V * 0.01$ **AN°** : $B = 125 * 0.01 = 1.25g$

La valeur au bleu VBS (en gramme de bleu pour 100g de matériau sec) est exprimée comme suit :

$VBS = \frac{B}{M_0} * 100$ *Pour* $D_{max} < 5mm$

AN° : $VBS = \frac{125}{29.47}$ $\boldsymbol{VBS = 4.24.}$



Nous concluons d'après le VBS obtenu, que notre sol est **limoneux-argileux.**

Avec :

$\boldsymbol{M_{h2}}$: masse humide ; ***Ms2*** : masse sèche ;W : teneur en eau du matériau ;$\boldsymbol{M_0}$: masse sèche de la prise d'essai ;$\boldsymbol{V}$: volume de la solution du bleu nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

II.6 Limites d'Atterberg NFP 94-051 (limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau)

L'objectif de l'essai d'Atterberg est d'obtenir des informations sur le sol utilisé pour estimer les caractéristiques de résistance aux déformations. Il est la principale forme de classification des sols cohésifs.

Les limites d'Atterberg sont déterminées uniquement pour les éléments fins (fraction passant au tamis de 0.4mm), car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol.

La limite de liquidité notée W_L est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

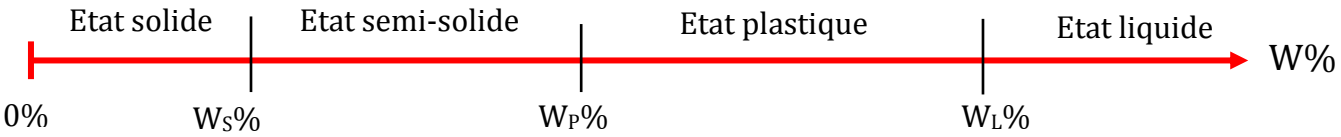
La limite de plasticité notée W_p est la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges.

L'indice de plasticité Ip donne l'étendue du domaine de plasticité **$I_P = W_L - W_P$.**

L'indice de constance Ic caractérise l'aptitude du sol à supporter des charges

$I_C = (W_L - W)/IP$.

L'indice de liquidité L_L donne une indication de l'influence du remaniement sur sa consistance **$I_L = I - I_C\,(W-W_p)/I_P$**



L'essai consiste, dans le cas de la limite de liquidité à déterminer le teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme à 25 coups, lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés.

<u>Figure 10</u> : Essai d'Atterberg - Détermination de la limite de plasticité et liquidité de la marne en bloc.

Le tableau 04 donne les valeurs des teneurs en eau relative à chaque essai.

Tableau 04 : Essai d'Atterberg

Nbre de choc	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
17	12.7	21	18,3	8,3	5,6	0,48	48,2
22	13.1	22,2	19,3	9,1	6,2	0,47	46,8
28	12.8	20,5	18,1	7,7	5,3	0,45	45,3
31	7.1	15,8	13,12	8,7	6,02	0,45	44,5

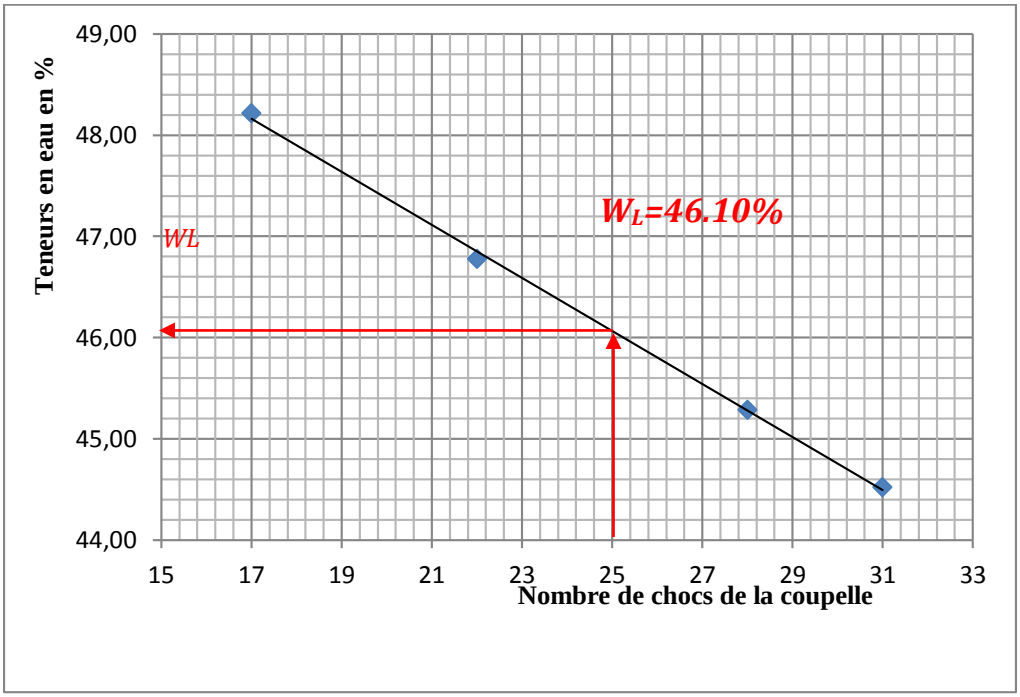


Figure 11: Graphique de détermination de la limite de liquidité de la marne en bloc.

Dans le cas de la limite de liquidité, l'essai consiste à déterminer la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure au moment où son diamètre atteint 3.0mm ± 0.5mm.

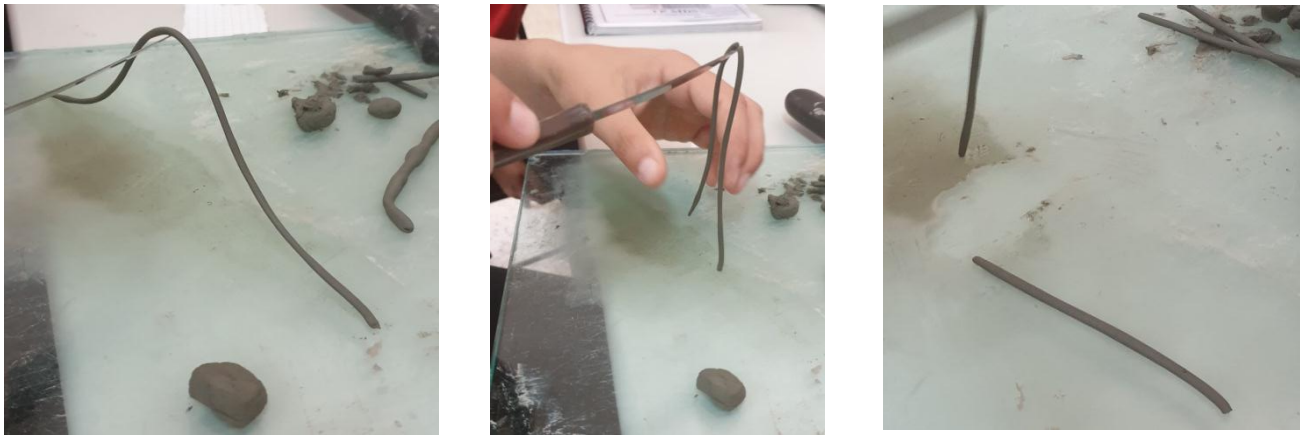


Figure12: Confection des rouleaux de pate (Limite de plasticité marne en bloc).

Le tableau 05 récapitule les données et les résultats de l'essai, et mets en évidence la valeur de la limite de plasticité qui est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues.

Tableau 05 : Essai de la limite de plasticité

Essai N°	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
1	8,4	9	8,9	0,6	0,5	0,2000	20,00
2	8,4	9,1	8,9	0,7	0,5	0,4000	40,00
						Somme	60,00
					Limite de plasticité →	***Wp(%)***	***30,00***

On déduit par ces deux résultats la valeur de l'indice de plasticité

$I_p = W_L - W_P$ → ***IP= 16.10%***

En faisant référence à la norme NF EN-206-1 et selon le résultat obtenu, nous concluons que l'échantillon de sol est argileux peu plastique.

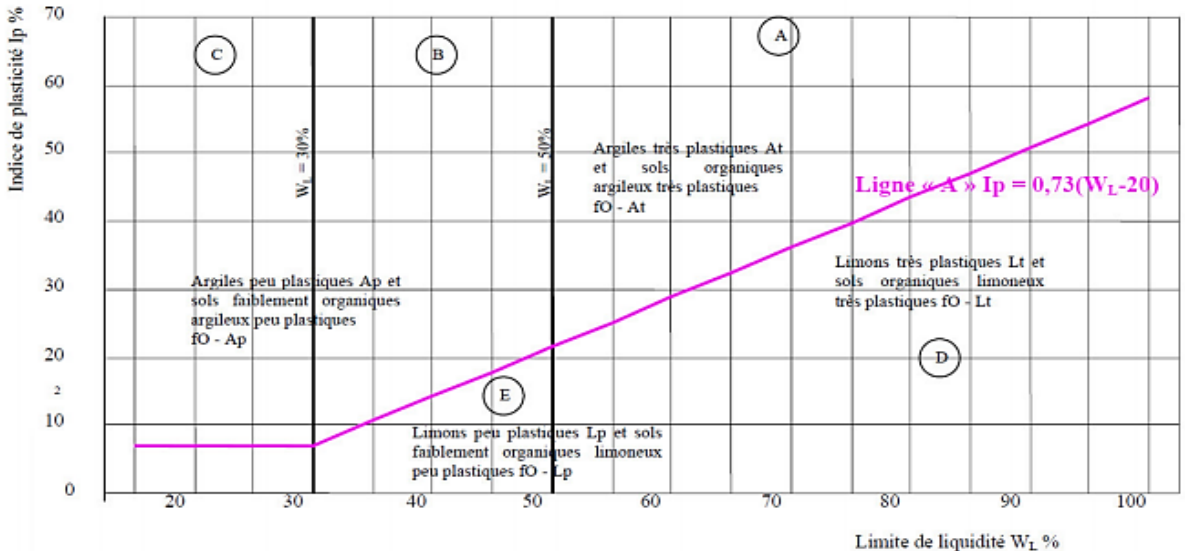


Figure 13 : Classification des sols fins Diagramme de plasticité (Selon L.C.P.C.NF EN-206-1).

II.7 Analyse granulométrique par Sédimentation NFP 94-057

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer quantitativement la distribution des particules de sol par classes de diamètres. Le nombre et la grandeur des classes de diamètres dépendront de l'objectif pour suivi et, éventuellement, de l'importance de l'échantillon dont on dispose.

L'analyse granulométrique d'un sol est un essai qui fait l'objet de deux normes :

L'analyse granulométrique par tamisage à sec après lavage NF P 94-056. Elle concerne les sols dont la dimension des éléments est supérieure à 0.08mm.

L'analyse granulométrique par sédimentation NF P 94-057 concerne les sols dont la dimension des particules est inférieure à 0.08mm (80µm).

Pour notre roche marneuse, l'analyse granulométrique par tamisage fut impossible à réaliser en raison de la désintégration totale de la roche au contact de l'eau. Tous les éléments sont passés au tamis de 0.08mm.

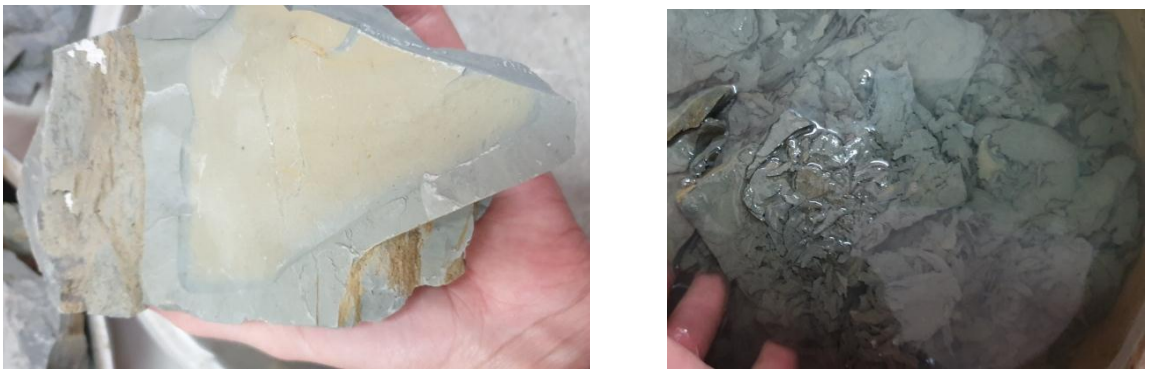


Figure14 : Illustration de la dégradation du matériau au contact de l'eau lors de l'essai de la granulométrie par tamisage.

Nous avons procédé directement à l'analyse granulométrique par sédimentation

- **Principe de l'essai**

L'essai se base sur le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins est fonction de leur dimension. La loi de Stokes donne, dans le cas de grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer les diamètres équivalents des particules.

Les particules passant au tamis de 80µm au cours de l'analyse granulométrique par tamisage, sont recueillies et mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un dé floculant. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre immergé dans la solution est mesurée l'évolution de la masse volumique de cette dernière en fonction du temps et de la profondeur d'immersion. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données.

Agitateur mécanique

Densimètre en suspension

Figure 15 :Granulométrie par sédimentation marne en bloc.

Le tableau 06 donne les valeurs relevées lors de l'essai de sédimentation de la roche marneuse.

Tableau 06 : Essai de sédimentation sur la roche marneuse

Passant à 80µ : 100

Date et Heure	Temps (min)	Lecture. R	Température C° (degrès)	Correction. Temp	Lecture Corrigée	Diamètre (µ)	% PASSANTS
	0,5	27,5	26	+1,260	28,76	80,0	100,0
	1	27	26	+1,260	28,26	75,0	98,26
	2	26,5	26	+1,260	27,76	55,0	96,52
	5	25,5	26	+1,260	26,76	38,0	93,05
	10	24	26	+1,260	25,26	25,0	87,83
	20	22,5	26	+1,260	23,76	17,0	82,61
	40	20,5	26,5	+1,385	21,885	12,0	75,77
	80	17,5	26,5	+1,385	18,885	8,0	65,38
	240	14	27	+1,510	15,51	5,0	53,46
	1440	10	25,5	+1,140	11,14	2,0	38,9

Copier | Effacer | Coller | CALCULER | < Retour

Nous avons tracé par la suite (sur logiciel) la courbe granulométrique.

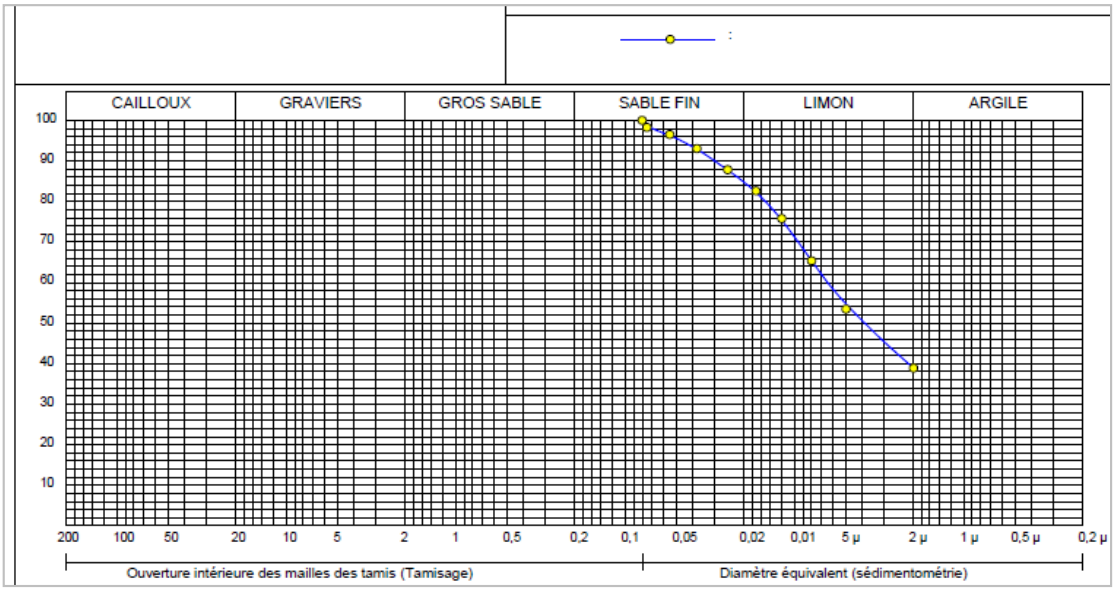


Figure 16 : Courbe granulométrique du matériau marne en bloc.

Le sol présente une granulométrie continue à grains fins

II.8 Essai chimique et minéralogique

Les essais chimiques sur la marne étudiée ont été réalisés au niveau du **CETIM** « Centre d'études et de Service Technologique » de BOUMERDES. Ils sont donnés comme suit :

Principe

Verser une prise d'essai de sable et une petite quantité de solution floculante dans un cylindre gradué et agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de la prise d'essai.

«Irriguer» alors le sable en utilisant le reste de solution floculante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable.

Après 20 min, calculer l'équivalent de sable (SE) comme la hauteur de sédiment, exprimée en pourcentage de la hauteur totale de matériau floculé dans le cylindre.

Réactifs

Solution concentrée, composée des éléments suivants :

a) chlorure de calcium cristallin, CaCl2.6H2O ou chlorure de calcium anhydre, CaCl2 ;

b) glycérine à 99 % de glycérol, de qualité de réactif pour laboratoire ;

c) formaldéhyde en solution, 40 % en volume, de qualité de réactif pour laboratoire ;

d) eau distillée ou déminéralisée.

Dissoudre (219 ± 2) g de chlorure de calcium cristallin dans (350 ± 50) ml d'eau distillée ou déminéralisée, laisser refroidir à température ambiante et si nécessaire, filtrer à l'aide d'un papier à filtrer à grosses ou moyennes mailles.

Ajouter (480 ± 5) g de glycérine et (12,5 ± 0,5) g de formaldéhyde en solution et diluer à 1 l de solution avec de l'eau distillée ou déminéralisée. Mélanger vigoureusement.

NOTE1 219 g de CaCl2.6H2O équivalent à 111 g de chlorure de calcium anhydre CaCl2.

NOTE 2 Il est recommandé de stocker la solution concentrée à l'abri de la lumière dans des flacons en verre ou en plastique contenant (125 ± 1) ml.

5.2 Solution lavante, préparée en diluant (125 ± 1) ml de solution concentrée (voir 5.1) à (5,00 ± 0,01) l avec de l'eau distillée ou déminéralisée.

NOTE Lors de la préparation de la solution lavante, il convient tout d'abord d'agiter vigoureusement la solution concentrée puis de rincer le récipient qui la contenait à plusieurs reprises avec de l'eau distillée ou déminéralisée, en versant l'eau de rinçage dans le flacon de 5 l avant de diluer le contenu de ce dernier à 5 l.

La solution lavante ne doit pas être utilisée plus de 28 jours après sa préparation ou si elle est trouble ou si un précipité ou de la moisissure apparaissent.

L'analyse élémentaire roche par spectrométrie de fluorescence X est réalisée selon les modalités de la norme NF EN 196-2.

Tableau 07 : Composition chimique de la roche marneuse.

Composition chimique	Teneurs %										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2	P_2O^5	PF
Echde marne	***57.75***	19.81	6.42	1.41	1.72	3.03	0.89	0.31	0.79	0.10	7.780

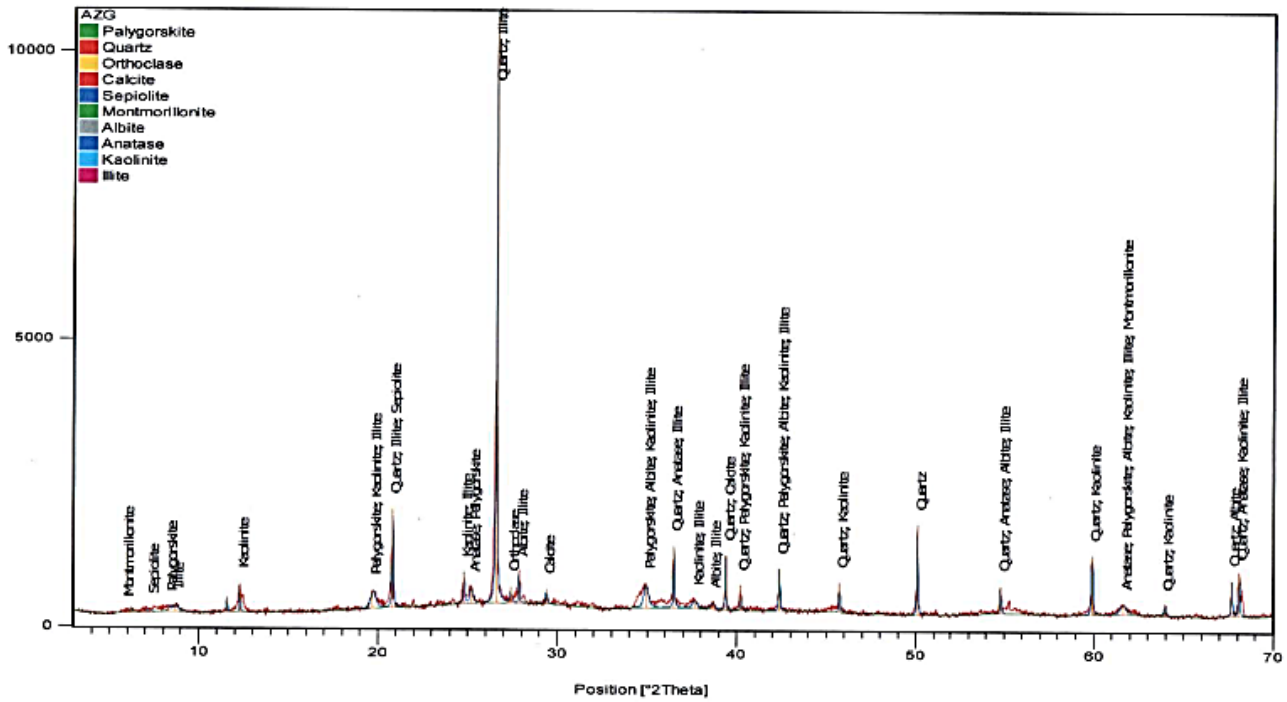


Figure 17 : Résultats de l'essai minéralogique sur le matériau marne.

Un sol calcaire c'est un sol contenant du CaCO3 libre en quantité suffisante pour présenter une effervescence visible sous l'action d'HCl dilué à froid. Selon la teneur en calcaire, il y a cinq classes de sols calcaires (Loz et Mathieu, 1990), résumés dans le tableau suivant :

Tableau 08 : Normes d'interprétation du taux du Calcaire du sol d'après Loz et Mathieu, 1990.

Taux de $CaCO_3$	**< 2%.**	**2à10%**	**10à25%**	**25à50%**	**> 50%.**
Appréciation	Sols très faiblement calcaires	Sols faiblement calcaires	Sols moyennement calcaires	Sols fortement calcaires	Sols très fortement calcaires

D'après les résultats obtenues, $CaCO_3$=1.41% appartient aux sols très faiblement calcaires.

II.9 Essai de cisaillement rectiligne (consolidé drainé) à la boite de Casagrande (NF P 94-071-1)

L'essai a pour but de déterminer les caractéristiques mécaniques de la roche en cisaillement, à savoir, la cohésion et l'angle de frottement interne.

Qu'est-ce que la cohésion (c) ?

La cohésion est l'ensemble des forces d'attraction que développent les sols fins, due pour partie aux liaisons mécaniques pouvant exister entre les grains et créer par la cimentation (particules fines argileuses). Elle est également due aux ménisques d'eau existants aux points de contact entre les grains (grains). Cette dernière composante disparait dès que la teneur en eau du sable augmente. La cohésion est indépendante de la contrainte normale, ainsi un sol cohérent peut développer une résistance au cisaillement même s'il n'est pas soumis à aucune contrainte normale.

Qu'est-ce que l'angle de frottement (φ) ?

C'est une caractéristique, généralement spécifique aux sols pulvérulents, mais qui peut aussi apparaitre dans le cas des sols fins surconsolidés. Il est régi par le frottement des grains les uns contre les autres aux cours de leurs mouvements suite aux efforts de cisaillement. Ce

paramètre est lié directement à la rugosité des éléments du sol et à la contrainte normale appliquée. Un sol pulvérulent peut ne pas développer une résistance au cisaillement s'il n'est soumis à aucune contrainte normale.

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à placer un échantillon de sol (intact, remanié ou reconstitué) entre deux demi-boites indépendantes, qui peuvent se déplacer l'une par rapport à l'autre suivant un plan horizontal imposé. L'échantillon est soumis à une contrainte normale **σ** bien déterminée. La boite inférieure est entrainée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement T est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boite supérieure. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon au cours du cisaillement. L'échantillon est d'abord consolidé sous la même contrainte normale appliquée, ensuite cisaillé lentement (et drainage) avec une vitesse de cisaillement très faible relativement à la perméabilité du sol, de telle sorte à dissipation des pressions interstitielles au cours du cisaillement (les pressions interstitielles sont nulles tout le long du cisaillement).

Afin de connaitre les caractéristiques mécaniques de la roche étudiée, nous avons pris un échantillon de sol que nous avons concassé et passé au tamis 0/5mm. Nous avons préparé 3 boîtes de cisaillement identiques après compactage à l'optimum Proctor. Nous avons placé les boites au fur et à mesure sur le bâti de la machine, nous avons drainé l'échantillon puis procéder à l'essai n°1 avec une contrainte normale **σ= 1bar**. L'essai est arrêté automatiquement et les résultats sont transmis sur le PC. De la même manière, nous avons procéder par la suite aux essais sur les boîtes n°2 (**2 bars**) et n°3 (**3 bars**)

Les courbes contraintes déplacement horizontale et la courbe intrinsèque sont représentées ci-dessous.

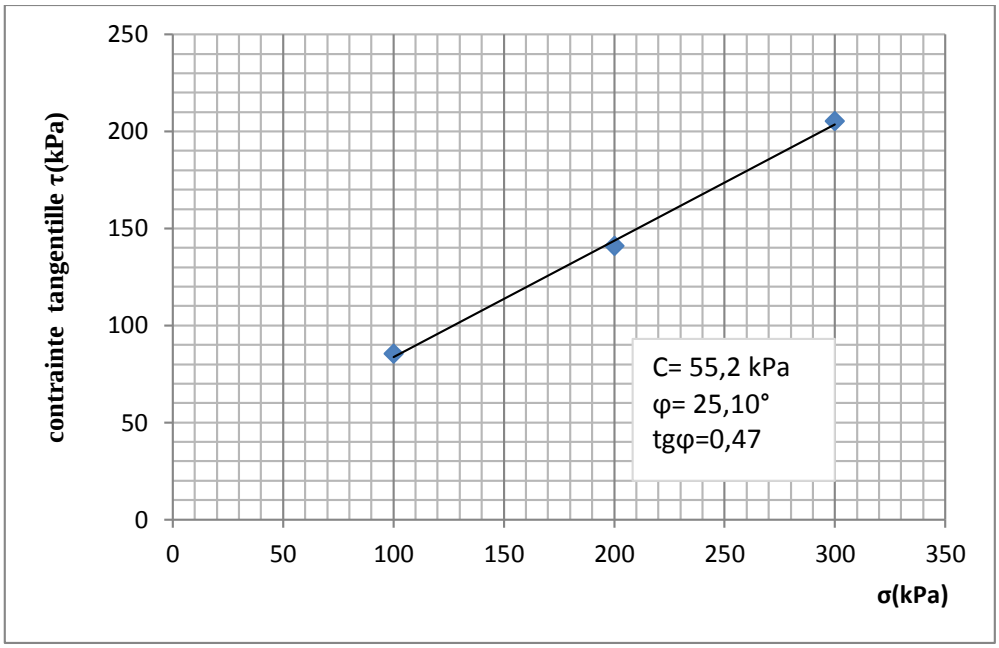


Figure 18 : Droite intrinsèque du matériau marne.

Nous pouvons lire sur la courbe les valeurs de la cohésion **C=55.2 kPa** et de l'angle de frottement **φ= 25.1°**.

II.10 Classification du sol

La classification des sols concerne le regroupement des sols ayant une gamme similaire de propriétés (chimiques, physiques et biologiques) dans des unités qui peuvent être géo-référencées et cartographiées. Les sols sont une ressource naturelle très complexe, En 1947, le Professeur A. Casagrande écrivait que les deux chapitres les plus controversés de l'étude géotechnique des sols étaient :

- La classification des sols - Chapitre le plus confus ;
- La résistance au cisaillement des sols – Chapitre le plus difficile.

Toutefois, plutôt que de voir chaque ingénieur appeler les sols à «sa manière » et utiliser un système de classification plus ou moins personnel, il apparaît indispensable que nous adoptions un système de classification unique.

Il existe de nombreuses classifications dans plusieurs pays, il ne peut donc être question de les décrire ici. Indiquons simplement qu'il en existe plusieurs, nous avons retenu la classification U.S.C.S. (UnifiedSoil Classification System) établie par Casagrande et basée à la fois sur la granulométrie et la plasticité des matériaux, et le GTR.

Essais d'identification sur la roche marneuse

Nous allons dans cette partie classer l'échantillon marne en bloc suivant les résultats obtenus lors des essais, et en faisant référence aux normes en vigueur.

Pour ce faire, il a été plus judicieux pour nous de récapituler les résultats comme suit :

Le tableau 9 récapitule les essais de laboratoire réalisés sur la marne d'Azazga.

Tableau 09 : Essais de laboratoire réalisés sur la marne d'Azazga

Paramètres physiques			Poids spécifique	Valeurs au Bleu	Limites d'atterberg	
W(%)	ρ_d(g/cm^3)	Sr	ρ_s (g/cm ^{3})	VBS	WL	IP
10.25	2.25	58.4	2.53	4.24	46.10	16.10

Analyse granulométrique			Analyse chimique			Cisaillement	
<2mm(%)	<80µ(%)	<2µ(%)	Carbonate CaCO3(%)	MO(%)	Sulfate(%)	C	Φ
100	100	38.9	1.41	1.72	0.31	55.2	25.1

II.11 Interprétation des résultats

- **Selon la teneur en eau w(%)**

10% <W <20% le sol est légèrement humide

Selon granulométrie :

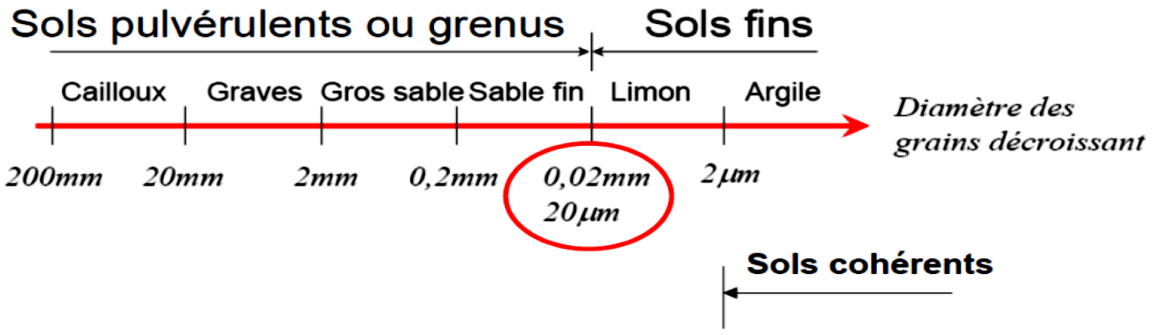


Figure 19 : Classification des particules solides d'un sol.

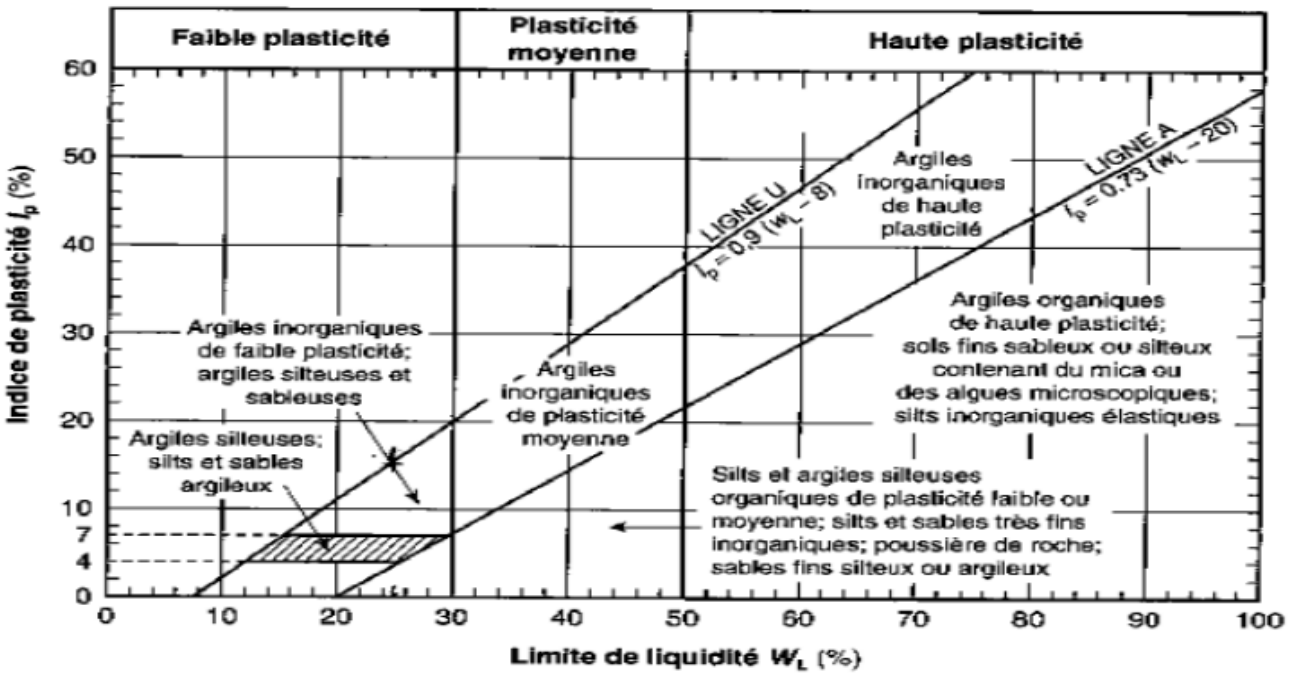
Tous les passant sont < 80µm donc notre sol est un sol fin.

- **Selon les limites d'Atterberg**

Le tableau 10 donne le degré de plasticité des sols selon Ip

Tableau 10 : Degré de plasticité des sols selon Ip.

Indice de plasticité **Ip**	0-5%	5-15%	15-40%	>40%
Degré de plasticité	Non plastique	Peu plastique	Plastique	Très plastique



<u>Figure 20</u> : Diagramme de plasticité (d'après Casagrande 1948).

D'après les résultats obtenus 15<IP= 16.1<40% donc sol plastique

- **Teneur en matières organiques**

Pour les sols organiques, on détermine la teneur en matières organiques CMO qui détermine 3 classes :

- ✓ 3 % < CMO < 10 % : sols faiblement organiques (FO) ;
- ✓ 10 < CMO < 30 % : sols moyennement organique (mo) ;
- ✓ CMO < 30 % : sols très organique (to).

Dans notre cas, la teneur en matières organique CMO=1,72% ce qui fait que notre sol est faiblement organique.

- **Selon l'agressivité du sol**

Tableau 11 : Classification des sols selon l'agressivité (NF P18-011)

		Calcium Ca+2(mg/l)	Magnesium Mg+2 (mg/l)	Sulfates SO-2 (mg/l)	pH	CO2 (mg/l)	Amonium NH+ (mg/l)
A1	**Milieu chimique faiblement agressif**	100-300		250 - 600	6,5 - 5,5	15-30	15 -30
A2	**Milieu chimique moyennement agressif**	300-1500		600 – 1500	5,5 - 4,5	30-60	30-60
A3	**Milieu chimique fortement agressif**	1500-3000		1500 - 6000	4,5 - 4,0	60-100	60-100
A4	**Milieu chimique très fortement agressif**	>3000		>6000	<4	>100	>100

Tableau 12: Normes d'interprétation du taux du Calcaire du sol d'après Loz et Mathieu, 1990.

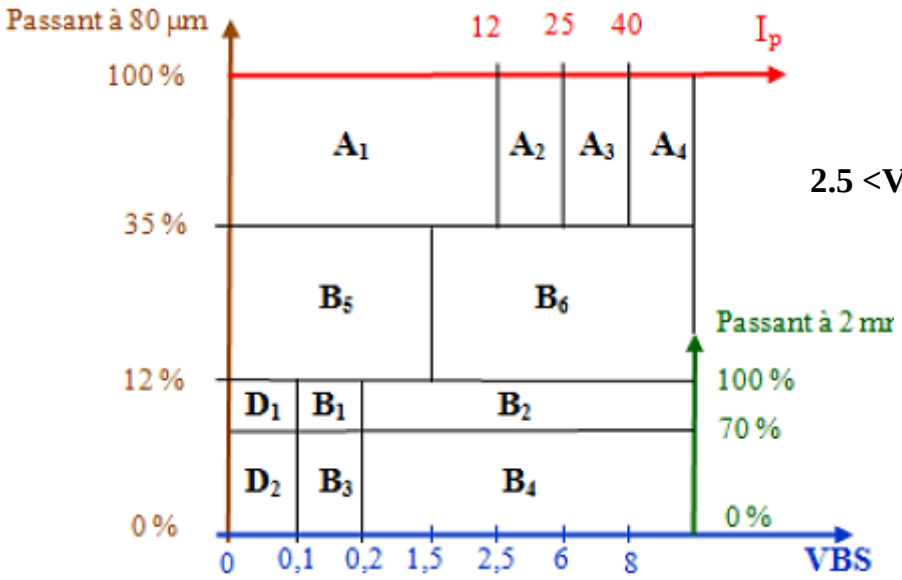
Taux de $CaCO_3$	**< 2%.**	**2à10%**	**10à25%**	**25à50%**	**> 50%.**
Appréciation	Sols très faiblement calcaires	Sols faiblement calcaires	Sols moyennement calcaires	Sols fortement calcaires	Sols très fortement calcaires

Notre échantillon est très faiblement calcaire.

Selon la norme NF EN-206-1, plus récente, la catégorie du matériau étudié, en respect à l'agressivité des sulfates, est **A1(Milieu chimique faiblement agressif).**

En résumé de tous les résultats, en référence à la norme LCPC notre sol est argileux inorganique de plasticité moyenne.

- **Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)**



2.5 <VBS= 4.25< 6

D_{max}	Classe	Sous classe	Nature
≤ 50 mm	A Sols fins	A_1	Limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques, …
		A_2	Sables fins argileux, limons argileux et marnes peu plastiques, arènes, …
		A_3	Argiles et argiles marneuses, limon très plastiques, ….
		A_4	Argiles et argiles marneuses très plastiques, ….
	B Sols sableux et graveleux avec fines	B_1	Sables silteux, …
		B_2	Sables argileux (peu argileux), ….
		B_3	Graves silteuses,….
		B_4	Graves argileuses (peu argileuse), …
		B_5	Sables et graves très silteux,…
		B_6	Sables et graves argileux à très argileux

Figure 21 : Classification des sols selon GTR (AFNOR NF P 11-300 cf. paragraphe 2.6).

II.12 Conclusion

La classification GTR, indique que notre sol est de classe **A (sol fin)** et de sous classe **A2 : sable fin argileux, limon argileux et marne peu plastique.**

Nous avons identifié dans ce chapitre la nature de la roche étudiée. Nous connaissons désormais ses caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques. Nous allons poursuivre notre recherche, et voir comment l'altération affecte la roche marneuse ? Comment les eaux polluées dégradent le matériau et changent ses caractéristiques ? C'est ce que nous allons essayer de comprendre dans le chapitre suivant.

Chapitre III
Altérabilité de la roche marneuse sous l'effet d'eaux acides

Chapitre III

Altérabilité de la roche marneuse sous l'effet d'eaux acides

III.1 Introduction

Les roches s'altèrent physiquement et chimiquement pour former des produits d'altération de plusieurs types, soit des particules à l'état solide, soit des éléments en solution à l'état ionique. Ces ions ne sont pris en charge que par un seul agent de transport qui est l'**eau**.

Dans cette partie de ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'effet de l'eau polluée (Acide) sur la roche marneuse étudiée. Pour cela, nous avons soumis notre échantillon en bloc et reconstitué aux essais d'altérabilité effectués comme suit :

- 1er cas : essais d'altérabilité sur la marne en bloc ;
- 2eme cas : essais d'altérabilité sur la marne reconstituée ;
- 3eme cas : caractérisation de l'altérationdu matériau marneux au contact de polluants.

III.2 Essais d'altération sur la marne en bloc

Nous avons choisi trois blocs plus ou moins identiques, pour lesquels nous avons supprimé les arêtes et nous les avons disposés dans trois récipients comme le montre la figure ci dessous :

Figure 22: Echantillons de marne à soumettre à l'essai d'altération.

L'essai d'altération consiste à soumettre les échantillons à des cycles thermiques en les mettant dans l'étuve à 105° pendant 16 heures. On retire les roches par la suite et on les laisse à l'air libre pendant 7 heures. Cette étape constitue le premier cycle. Les roches sont soumises

aux conditions suivantes : le premier échantillon est sec, le deuxième à moitié imbibé d'eau et le troisième complètement mouillé.

L'essai est répété par la suite dix (10) fois.

Figure 13: Illustration de l'essai d'altération sur les roches de marne sélectionnées.

Après 16 heures dans l'étuve à 105°, les échantillons mis en contact de l'eau se sont complètement décomposés en tous petits éléments.

Figure 24 : Mise en évidence de la dégradation du matériau marne au contact de l'eau.

Nous avons réservé l'échantillon effrité pour l'essai de sédimentation et poursuivi l'essai d'altération sur la roche sèche pendant 10 cycles. Ensuite, nous avons soumis cette dernière à l'essai de compression simple que nous avons comparé avec la roche naturelle (marne naturelle n'ayant subi aucun essai au préalable).

Figure 25: Essai de compression simple sur la roche marne.

Le tableau 13 donne les valeurs de la résistance à la compression simple de la roche marneuse avant et après altérabilité.

Tableau 13 : Essai de résistance à la compression simple.

	Force (KN)	**Rc (Mpa)**
Echantillon non soumis à l'essai d'altérabilité	**9,75**	**6,1**[1]
Echantillon soumis à l'essai d'altérabilité	**8,4**	**5,21**

Nous constatons que **l'effet de la variation de la température diminue la résistance** du matériau.

En faisant référence à la classification des roches selon la résistance à la compression, nous concluons que la roche intacte est de faible résistance et la roche soumise à l'essai d'altération (variation de température) s'est dégradée et sa résistance est devenue plus faible que celle de la roche intacte.

[1]Moyenne arithmétique obtenue à partir de deux essais sur des roches naturelles

Tableau 14: Qualification de la résistance d'une roche en fonction de la valeur de la résistance en compression simple Rc [2].

Classe	Résistance Rc(Mpa)	Description
R1	>200	Résistance tres élevée
R2	200 à 60	Résistance élevée
R3	60 à 20	Résistance moyenne
R4	20 à 6	Résistance faible
R5	<6	Résistance très faible[3]

On peut évaluer dans ce cas le taux de baisse de résistance **ARc** comme suit :

$$\boldsymbol{ARc} = \frac{\boldsymbol{Rc1} - \boldsymbol{Rc2}}{\boldsymbol{Rc1}} \times \mathbf{100}\%$$

$$\boldsymbol{ARc} = \frac{6.1 - 5.21}{6.1} \times 100\% = 14.59\ \% \boldsymbol{ARc} = \mathbf{14.59}\%$$

On peut aussi évaluer la dégradation de la roche au cours de ces 10 cycles comme suit :

$$P = \frac{R_c - R'_c}{n}$$

Tel que R_c et R'_c représente la valeur de la résistance à la compression de la roche avant et après n=10 cycles.

$$P = \frac{6.1 - 5.21}{10} = 0.089 MPa\ .$$

L'effet de la température a donc réduit la résistance de la marne de l'ordre de 15%, ce qui représente 0.1MPa.

[2] Source : Faculté Polytechnique De Mons Service de Génie Minier.53, rue du Joncquois 7000 Mons Belgique.

III.3 Essais d'altérabilité sur la marne reconstituée

L'essai consiste à prendre 1kg d'une fraction de 10/20 du matériau obtenu par concassage de blocs. Puis on le verse dans un récipient à fond plat, puis on verse dessus de l'eau déminéralisée jusqu'à imbibition totale.

On laisse le récipient imbibé pendant 7 heures à l'air libre, puis on sèche pendant 16 heures dans l'étuve à 105°C sans siphonage préalable.

On tamise à sec sur une série de tamis 10, 8, 5, 4, 2, 1mm puis on trace la courbe granulométrique.

La réaction du matériau reste inchangée, la marne au contact de l'eau se décompose en éléments très fins, celle-ci s'effrite totalement. Nous n'avons pas pu poursuivre l'essai d'altération pour déterminer la vitesse d'évolution de la dégradation du matériau. De ce fait, nous n'avons pas pu tracer la courbe granulométrique pour les fractions supérieures à 80µm.

Pour poursuivre notre travail, nous avons pris huit (08) échantillons de sol. Quatre en bloc (y compris l'échantillon d'identification) et quatre en fraction 10/20.

Nous avons mis chaque échantillon en contact avec de l'eau potable et de l'eau polluée.

Nous avons considéré les cas suivants :

Marne (provenance Azazga)	
Marne en bloc	**Intact**
	Polluée de H2PO4
	Polluée de H2SO4
	Polluée de H2PO4 et H2SO4
Marne reconstituée	**Intact**
	Polluée de H2PO4
	Polluée de H2SO4
	Polluée de H2PO4 et H2SO4

Nous avons poursuivi ainsi les essais pour tracer la courbe granulométrique par sédimentation et calculé les limites de liquidité et de la plasticité de chaque cas considéré.

Le cheminement de notre travail est comme suit :

III.3.1 Analyse granulométrique par Sédimentation (NFP 94-057) sur la marne fractionnée

L'essai est exécuté en faisant référence à la norme **NFP 94-057**

Le tableau 15 donne les valeurs relevées lors de l'essai de sédimentation au cours de 24 heures.

Tableau 15 : Essai de sédimentation marne intacte sur la fraction 10/20.

Passants à 80µ : 100,00

Date et Heure	Temps (min)	Lecture. R	Température C° (degrès)	Correction. Temp	Lecture Corrigée	Diamètre (µ)	% PASSANTS
	0,5	22,5	28	+1,770	24,27	80	100,0
	1	22	28	+1,770	23,77	75	97,94
	2	21	28	+1,770	22,77	55	93,82
	5	20	28	+1,770	21,77	38	89,7
	10	18,5	28	+1,770	20,27	25	83,52
	20	16,5	28	+1,770	18,27	17	75,28
	40	14	28	+1,770	15,77	12	64,98
	80	12,5	27	+1,510	14,01	8	58,35
	240	8,5	28	+1,770	10,27	5	42,32
	1440	5	28	+1,770	6,77	2	27,89

Copier Effacer Coller Calculer

Ensuite nous avons tracé la courbe granulométrique.

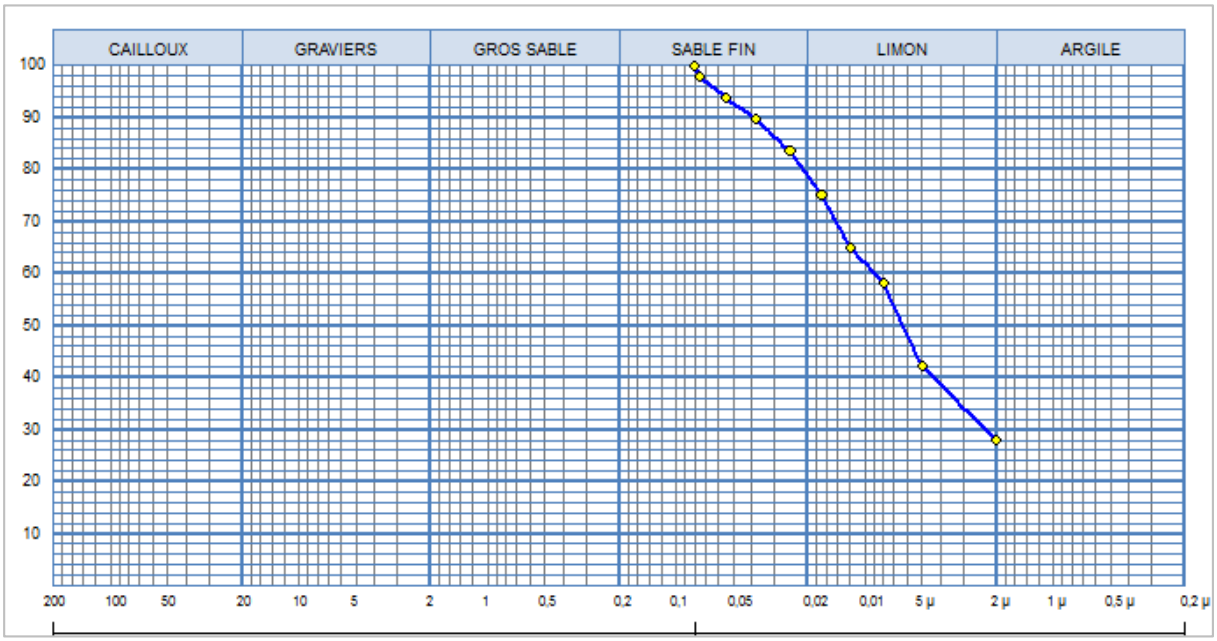


Figure 26 : Courbe granulométrique de la roche reconstituée sur la fraction 10/20.

III.3.2 Limites d'Atterberg (NF P 94-051) sur la marne reconstituée

Le Tableau 16 donne les valeurs des teneurs en eau relative à chaque essai d'Atterberg réalisé sur la marne reconstituée (fraction10/20).

Le Tableau 16 : Essai d'Atterberg réalisé sur la marne reconstituée (fraction10/20).

Nbre de choc	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
16	6.7	13.9	11.5	7.2	4.8	0,500	50.00
24	9	13.43	12	4.43	3	0,476	47,67
27	16.5	20,61	19.3	4.11	2.8	0,467	46.78
35	8.6	13.5	12	4.9	3.4	0,441	44,11

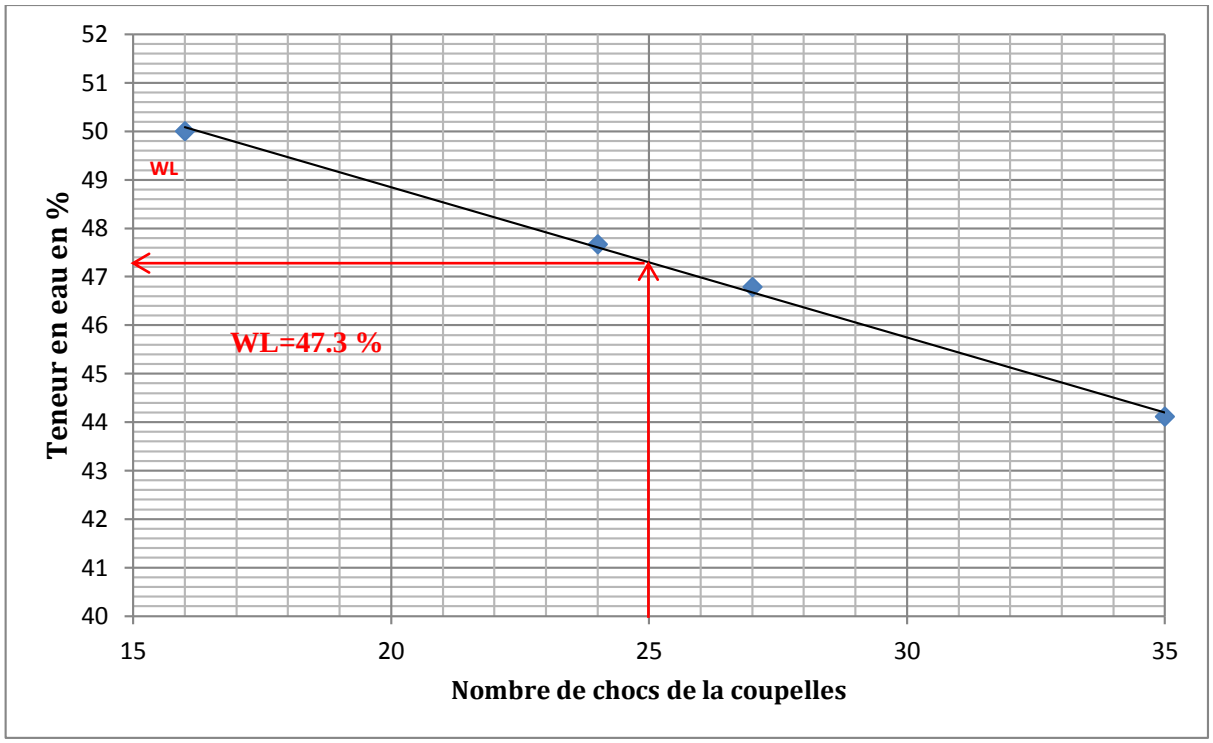


Figure 27 : Graphique de détermination de la limite de liquidité roche reconstituée (fraction 10/20).

Le tableau17 récapitule les données et les résultats de l'essai, et met en évidence la valeur de la limite de plasticité qui est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues.

Tableau 17 : limite de plasticité de la marne fractionnée 10/20.

Essai N°	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W (%)
1	63,5	64,4	64,2	0,9	0,7	0,2857	28,57
2	22,2	22,7	22,6	0,5	0,4	0,2500	25,00
						Somme	53,57
					Limite de plasticité →	***Wp(%)***	***26,79***

On déduit par ces deux résultats la valeur de l'indice de plasticité

$I_p = W_L - W_P$ → ***IP= 20.51%***

Nous concluons que le sol est plastique.

III.4 Caractérisation de l'altération du matériau en contact d'eau polluée

La pollution de la ressource en eau se caractérise par la présence de micro-organismes, de substances chimiques ou encore de déchets industriels. Elle peut concerner les cours d'eau, les nappes d'eau, les eaux saumâtres mais également l'eau de pluie, la rosée, la neige et la glace polaire.[4]

Cette pollution peut avoir des origines diverses :

- La pollution industrielle : avec les rejets de produits chimiques comme les hydrocarbures ou le PCB (polychlorobiphényles) rejetés par les industries ainsi que les eaux évacuées par les usines.
- La pollution agricole : avec les déjections animales mais aussi les produits phytosanitaires/pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) contenus dans les engrais et utilisés dans l'agriculture. Ils pénètrent alors dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines.
- La pollution domestique : avec les eaux usées provenant des toilettes, les produits d'entretien ou cosmétiques (savons de lessives, détergents), les peintures, solvants, huiles de vidanges, hydrocarbures…
- La pollution accidentelle : avec le déversement accidentel de produits toxiques dans le milieu naturel et qui viennent perturber l'écosystème.
- La pollution organique : Elle concerne les microorganismes pathogènes présents dans l'eau comme les bactéries et les virus. Cette pollution bactériologique se caractérise par un taux élevé de coliformes fécaux[5].La pollution organique provient principalement des excréments, des ordures ménagères et des déchets végétaux.
- La pollution chimique : Elle concerne les nitrates et les phosphates contenus dans les pesticides, les médicaments humains et vétérinaires, les produits ménagers, la peinture, les métaux lourds (mercure, cadmium, plomb, arsenic…), les acides, ainsi que les hydrocarbures utilisés dans l'industrie.

L'urbanisation a pris de l'ampleur au cours des dernières années dans la ville d'Azazga, en raison de l'accroissement de sa population, et par conséquent l'augmentation de

[4] Source :https://www.cieau.com/connaitre-leau/pollution-ressource-eau-comment-reduire/
[5]Les **coliformes** décrivent des bactéries à coloration de Gram négative fermentant le lactose avec production de gaz à 35-37°C en 48h.

la consommation et la diversification des activités dans la région. La sur-utilisation d'engrais et de produits détergents est l'une des causes à effet directe sur l'altération des sols dans cette région.

III.5 Essais sur roche en bloc polluée

Le sol représente une interface entre les différents milieux, il est un lieu de transfert de particules et de polluants vers les hydrosystèmes. C'est un lieu très réactif au plan biologique (présence des êtres vivants) et physicochimique par l'intervention de constituants spécifiques ayant des propriétés colloïdales. Le type de transfert (dissous ou particulate) dépend du type de polluant et de sa réaction avec les constituants du sol. On peut envisager successivement le cas des phosphates (très réactifs fixés sur les particules) et des sulfates (peu réactifs donc présents à l'état dissous). Ces eaux polluées participent à l'altération chimique de la roche en modifiant sa composition chimique et minéralogique.

Les essais concernent la roche en bloc et reconstituée en fraction 10/20mm.

[6]

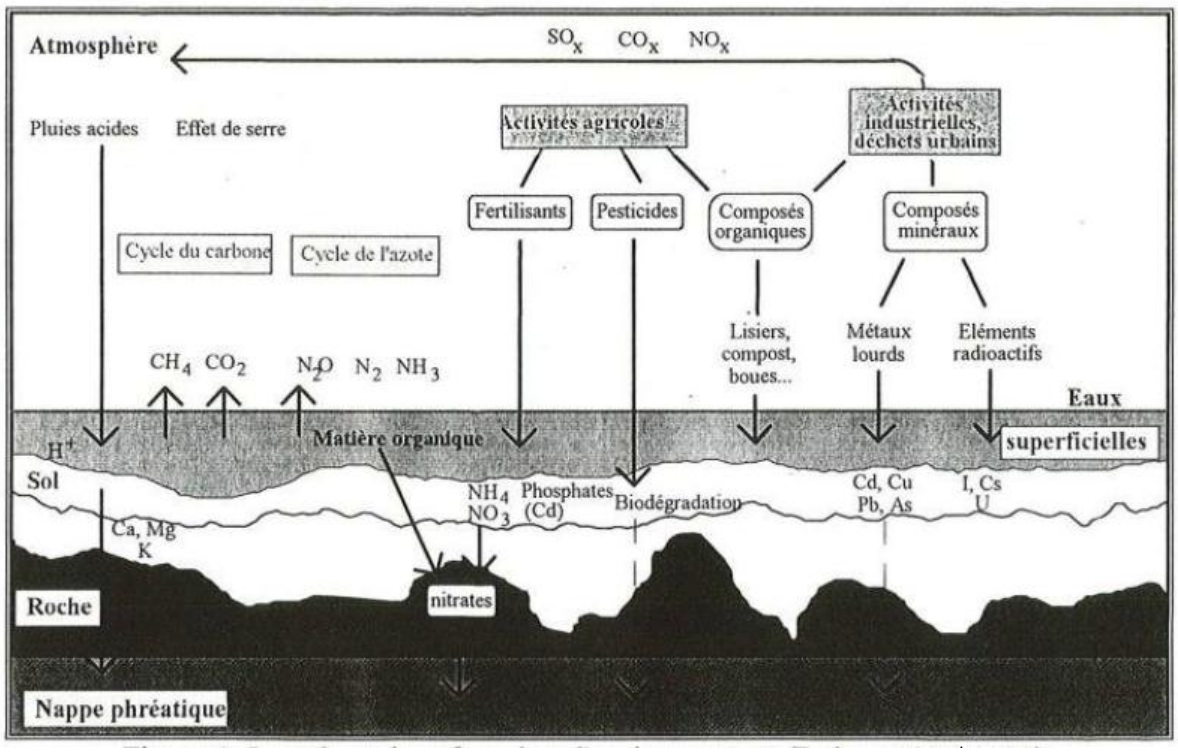


Figure 28: Le sol une interface dans l'environnement (Robert 1992-1995).

[6]Source : Transfert des polluants dans les hydrosystèmes

III.5.1 Essai sur roche en bloc polluée de phosphates PO_4

Les orthophosphates (ions PO4) sont la forme la plus simple et la plus répandue des phosphates dans l'eau. Les phosphates (appelés aussi orthophosphates) correspondent à une forme minérale oxydée du phosphore. Les phosphates se présentent sous forme dissoute, colloïdale ou solide.[7]

Le phosphore n'est naturellement présent qu'en très faible quantité dans le sol et dans les eaux. Une concentration importante de phosphates peut entraîner la prolifération des algues puisqu'il s'agit d'un élément nutritif pour les végétaux. Or, les algues sont responsables de l'eutrophisation[8] des eaux stagnantes. Ce phénomène d'eutrophisation est alors plus ou moins important selon la teneur en phosphates dans les eaux usées. Cependant, le phosphore est le facteur limitant sur lequel il est possible de jouer efficacement pour réduire l'eutrophisation.

Comme tous les êtres vivants, l'homme a besoin de phosphore. Sa ration quotidienne alimentaire est de l'ordre de 1,5 g de phosphore. L'augmentation de la population mondiale a considérablement accru les besoins alimentaires. Pour nourrir l'humanité, l'agriculture a connu une large croissance au siècle dernier et s'est progressivement intensifiée et industrialisée. Pour maintenir élevée la productivité des systèmes agricoles dans ce contexte, le phosphore du sol prélevé par les cultures doit être renouvelé.

L'utilisation du guano[9] puis la découverte au cours du 20^{e} siècle de procédés de production industrielle d'**engrais phosphatés** à partir des roches riches en phosphore ont conduit à une expansion de l'utilisation de cette ressource à l'échelle mondiale. L'utilisation d'engrais phosphatés s'est largement répandue dans notre pays et partout dans le monde, avec des apports largement en excès par rapport aux besoins des plantes cultivées.

L'utilisation du phosphate minéral s'est généralisée dans des produits usuels industriels (agroalimentaire, allumettes, métallurgie, détergents sous forme de polyphosphates dans les lessives). L'utilisation des polyphosphates dans les lessives a entrainé une très forte augmentation de la quantité de phosphore dans les eaux usées domestiques. Introductions récentes et massives de phosphore dans l'environnement, érosion des terres cultivées (**sources**

[8]L'eutrophisation est le processus par lequel des nutriments s'accumulent dans un milieu ou un habitat.
[9] Guano : Engrais à base d'excréments d'oiseaux de mer, *ou par extension* de débris animaux.

diffuses) et augmentation des eaux usées domestiques (**sources ponctuelles**) contribuent à l'accroissement rapide des concentrations en phosphore dans le sol.[10]

Figure 29: Composition en phosphore de certains détergents.

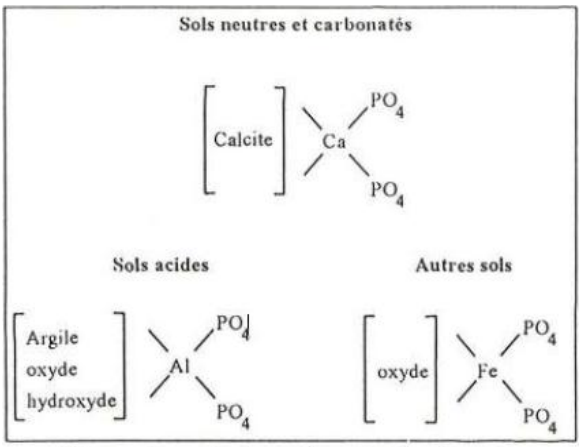


Figure 30: Phénomènes de fixation du phosphate sur différents constituant dans le sol.

Nous allons essayer de voir dans cette partie, l'effet de l'eau polluée par des phosphates sur l'altération de la roche.

III.5.1.1 Essai de sédimentation sur roche en bloc polluée de phosphates

Nous avons considéré dans notre essai un cas défavorable d'un sol pollué dosé de 1mg/l de PO4 (selon les données du service d'hygiène et sécurité de la ville d'Azazga). Pour lequel nous avons tracé la courbe granulométrique et déterminé la limite de plasticité et l'indice de plasticité. Les essais sont comme suit :

Le tableau 18 suivant donne les valeurs relevées pour l'essai de sédimentation de la roche polluée de PO4.

[10] Source : **Transfert des polluants dans les hydro systèmes.**

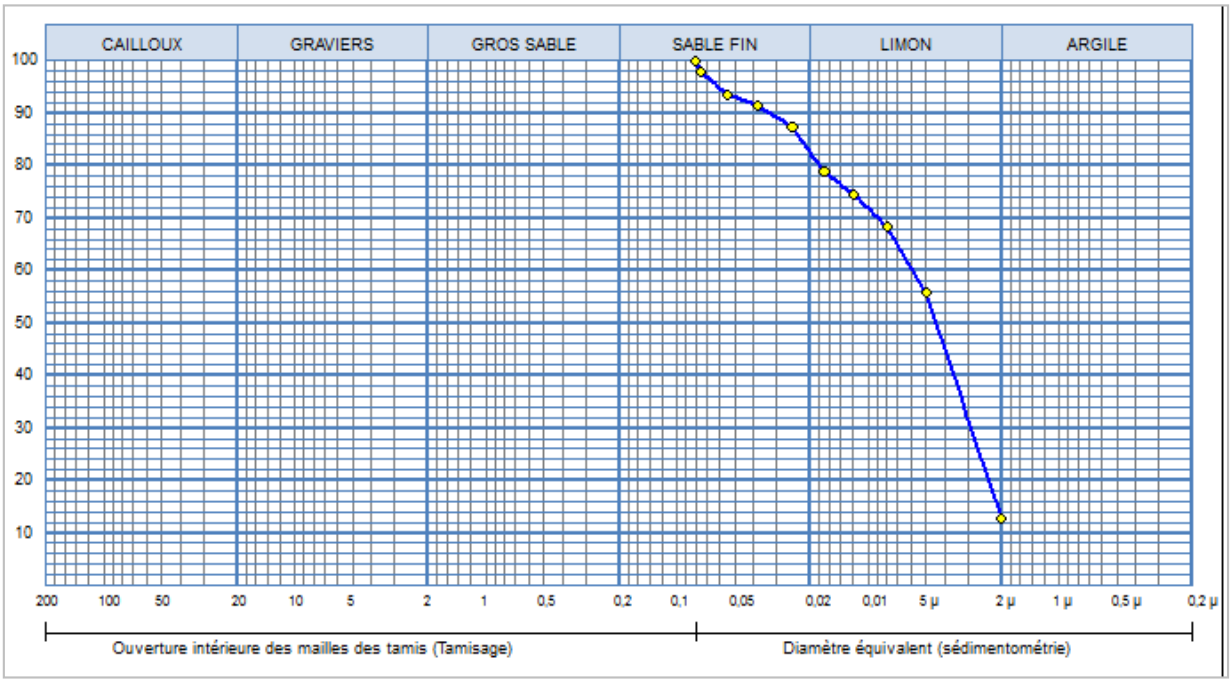
Tableau 18 : Essai de sédimentation de la marne en bloc, polluée de PO4.

Passants à 80µ : 100

Date et Heure	Temps (min)	Lecture. R	Température C° (degrès)	Correction. Temp	Lecture Corrigée	Diamètre (µ)	% PASSANTS
	0,5	22	27	+1,510	23,51	80	100,0
	1	21,5	27	+1,510	23,01	75	97,87
	2	20,5	27	+1,510	22,01	55	93,62
	5	20	27	+1,510	21,51	38	91,49
	10	19	27,5	+1,640	20,64	25	87,31
	20	17	27,5	+1,640	18,64	17	78,85
	40	16	27,5	+1,640	17,64	12	74,62
	80	14,5	28	+1,770	16,27	8	68,45
	240	11,5	28	+1,770	13,27	5	55,83
	1440	1,5	27	+1,510	3,01	2	12,8

Copier | Effacer | Coller | Calculer

Nous avons tracé par la suite la courbe granulométrique relative à l'essai.



<u>Figure 31</u>:Courbe granulométrique de la roche en bloc polluée de phosphates PO4.

III.5.1.2 Essai d'Atterberg sur roche en bloc polluée de phosphates PO4

Dans cet essai, nous avons déterminé la limite de liquidité, la limite de plasticité et déduit l'indice de plasticité de la roche polluée de phosphates.

Le tableau 19 donne les valeurs des teneurs en eau relative à chaque essai d'Atterberg réalisé sur la marne en bloc polluée d'acide PO4.

Tableau 19 : Essai d'Atterberg réalisé sur la marne en bloc polluée d'acide PO4.

Nbre de choc	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
17	63.5	72.03	69.2	8.53	5.7	0,496	49.6
23	48.35	59.3	55.7	10.95	7.35	0,489	48.9
29	20.6	28.9	26.2	8.3	5.6	0,482	48.2
34	10.19	17	14.8	6.81	4.61	0,477	47.7

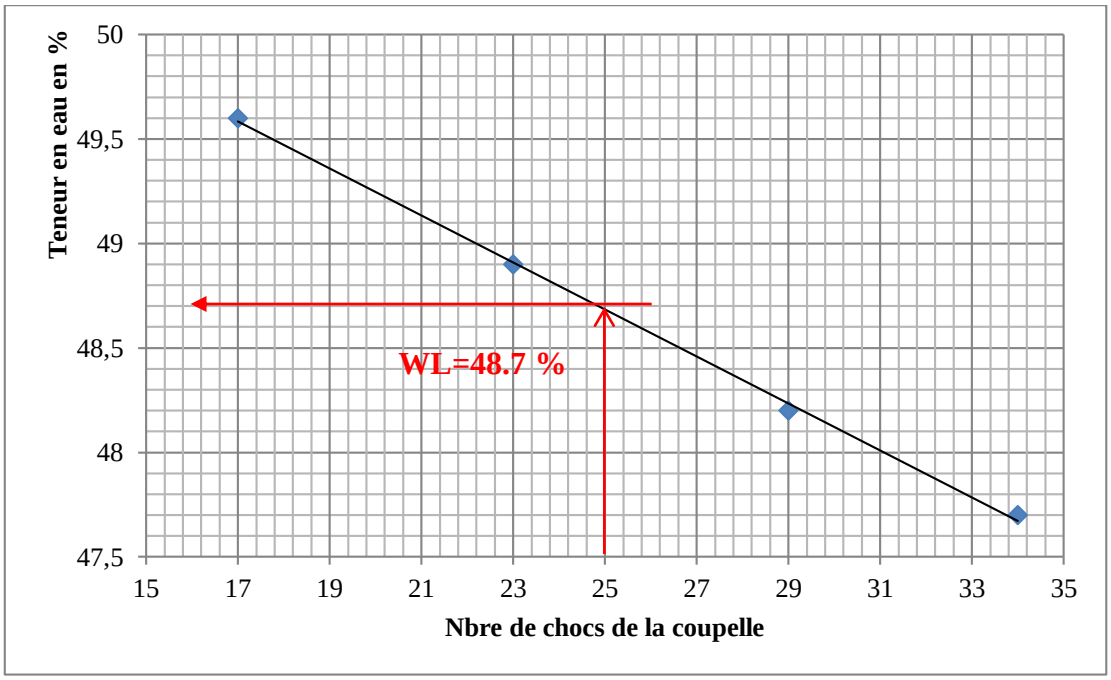


Figure 32: Graphique de détermination de la limite de liquidité roche en bloc polluée de phosphates PO4.

Le tableau 20 récapitule les données et les résultats de l'essai, et met en évidence la valeur de la limite de plasticité qui est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues.

Tableau 20 : Limites de plasticité marne en bloc polluée de PO4.

Essai N°	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W(%)	W(%)
1	10,1	10,9	10,7	0,8	0,6	0,3333	33,33
2	9,2	10,1	9,9	0,9	0,7	0,2857	28,57
						somme	61,90
					Limite de plasticité →	***Wp(%)***	***30,95***

On déduit par ces deux résultats la valeur de l'indice de plasticité

$I_p = W_L - W_P$ → ***IP= 17.75%***

Nous concluons que le sol est plastique.

III.5.2 Essai sur roche en bloc polluée de phosphates SO_4

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de polluants domestiques et industriels. Le sulfure d'hydrogène (H_2S, qui se trouve dans le gaz naturel et le pétrole brut) et les sulfures métalliques comme la pyrite de fer. En se combinant à l'oxygène, le soufre hexavalent donne l'ion sulfate, qui est bivalent (SO_4^{2-}). Les sulfates existent à l'état naturel dans de nombreux minéraux, dont la baryte ($BaSO_4$), l'epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) et le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). L'interconversion réversible des sulfates et des sulfures dans le milieu naturel est appelée «cycle du soufre».Le soufre, principalement sous la forme d'acide sulfurique, est l'un des produits chimiques les plus utilisés dans les sociétés industrialisées. La majeure partie du soufre est transformée en acide sulfurique, dont près de 60 % sert à la production d'engrais au phosphate et au sulfate d'ammonium.

III.5.2.1 Essai de sédimentation sur roche en bloc polluée de phosphates SO_4

Nous avons considéré dans cet essai un cas défavorable d'un sol pollué dosé de 250mg/l de SO4. Pour lequel nous avons tracé la courbe granulométrique et déterminé la limite de plasticité et l'indice de plasticité. Les essais sont comme suit :

Le tableau 21 donne les valeurs relevées lors de l'essai de sédimentation.

Tableau 21 : Essais de sédimentation de la marne en bloc polluée de SO4.

Passants à 80µ : 100

Date et Heure	Temps (min)	Lecture. R	Température C° (degrès)	Correction. Temp	Lecture Corrigée	Diamètre (µ)	% PASSANTS
	0,5	21,5	27	+1,510	23,01	80	100,0
	1	21	27	+1,510	22,51	75	97,83
	2	20,5	27	+1,510	22,01	55	95,65
	5	20	27	+1,510	21,51	38	93,48
	10	19	27	+1,510	20,51	25	89,14
	20	17	27	+1,510	18,51	17	80,44
	40	15	27,5	+1,640	16,64	12	71,91
	80	13	27,5	+1,640	14,64	8	63,27
	240	11	28	+1,770	12,77	5	54,88
	1440	5,5	27	+1,510	7,01	2	30,47

Copier | Effacer | Coller | Calculer

Nous avons tracé par la suite la courbe granulométrique relative à l'essai.

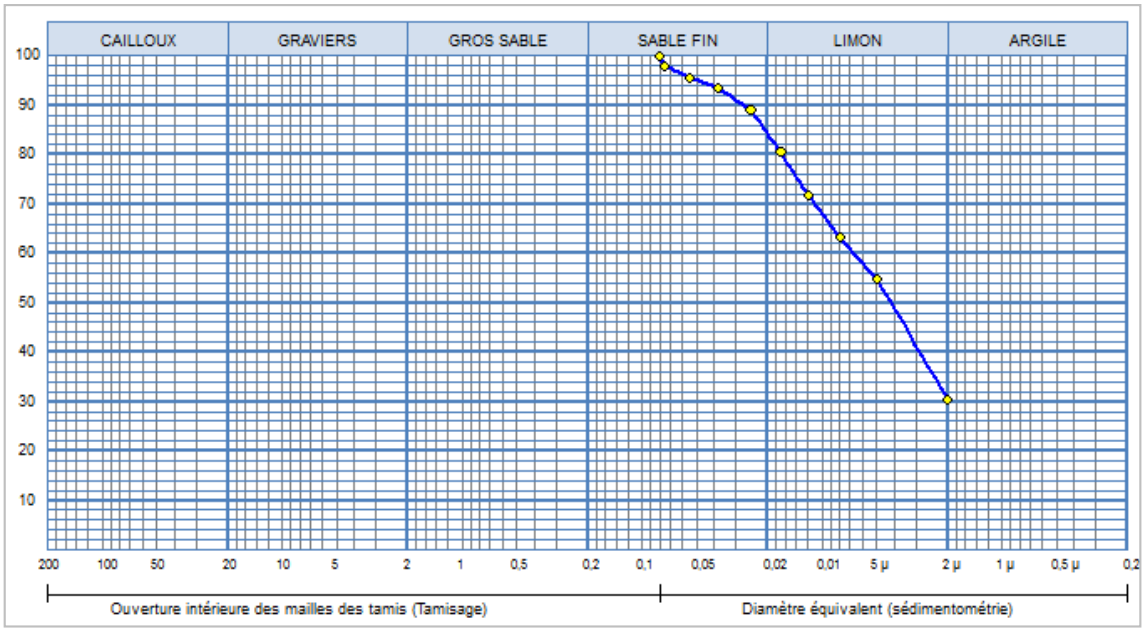


Figure 33 : Courbe granulométrique de la roche en bloc polluée de sulfates SO4.

III.5.2.2 Essai d'Atterberg sur roche en bloc polluée de sulfates SO_4

Dans cet essai, nous avons déterminé la limite de liquidité, la limite de plasticité et déduit l'indice de plasticité de la roche polluée de sulfates.

Le tableau 22 donne les valeurs des teneurs en eau relative à chaque essai d'Atterberg réalisé sur la marne en bloc polluée d'acide SO4.

Tableau 22 : Essai d'Atterberg sur la marne en bloc polluée d'acide SO4

Nbre de choc	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
19	9	17,3	14,6	8,3	5,6	0,4821	48,21
23	9	16,5	14,125	7,5	5,125	0,4634	46,34
27	7	15,6	12,95	8,6	5,95	0,4454	44,54
33	9	17,2	14,8	8,2	5,8	0,4138	41,38

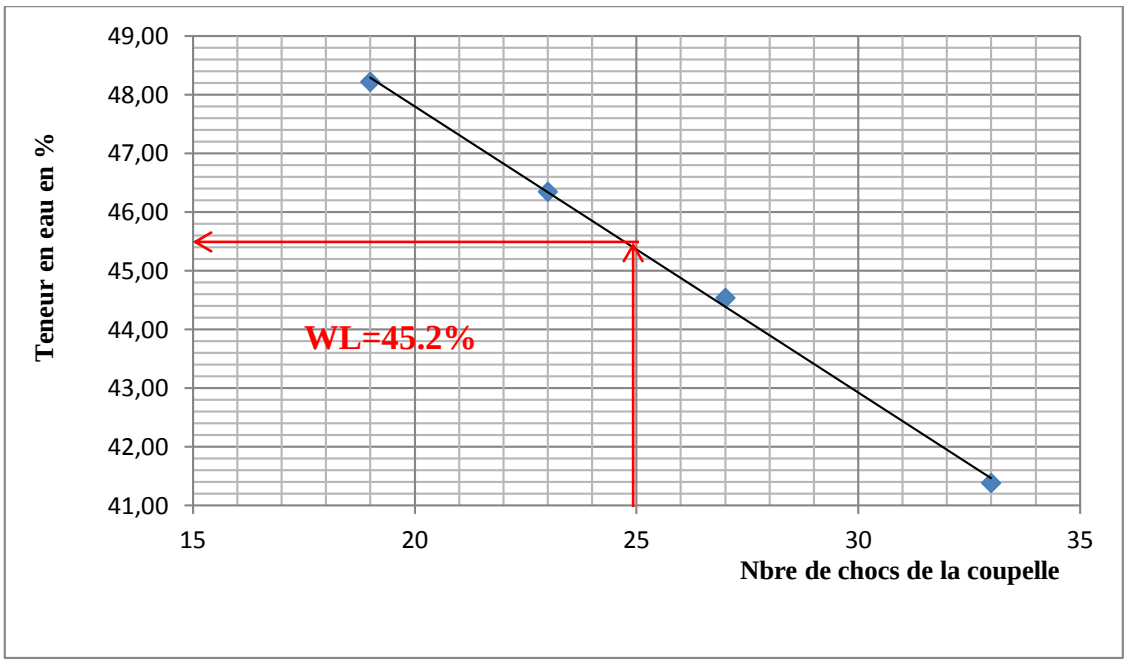


Figure 34 : Graphique de détermination de la limite de liquidité roche en bloc polluée.

Le tableau 13 récapitule les données et les résultats de l'essai, et met en évidence la valeur de la limite de plasticité qui est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues

Tableau 23 : **Limites de plasticité marne en bloc polluée de SO4.**

Essai N°	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
1	22,2	22,7	22,6	0,5	0,4	0,2500	25,00
2	10,1	10,5	10,4	0,4	0,3	0,3333	33,33
						Somme	58,33
					Limite de plasticité →	***Wp(%)***	***29,17***

On déduit par ces deux résultats la valeur de l'indice de plasticité

$I_p = W_L - W_P$ → ***IP= 16.03%***

Nous concluons que le sol est plastique

III.5.3 Essai sur roche en bloc polluée de sulfates SO_4 et phosphates PO_4

Nous avons associé dans cet essai les deux acides SO4 et PO4 pour la pollution d'une roche en bloc. Nous avons tracé la courbe granulométrique et déterminé la limite de plasticité et l'indice de plasticité. Les essais sont comme suit :

III.5.3.1 Essai de sédimentation sur roche en bloc polluée de sulfate SO_4 et phosphates PO_4

Le tableau 24 donne les valeurs relevées lors de l'essai de sédimentation.

Tableau 24 : Essais de sédimentation de la marne en bloc polluée de PO4+SO4.

Passants à 80µ : 100,00

Date et Heure	Temps (min)	Lecture. R	Température C° (degrès)	Correction. Temp	Lecture Corrigée	Diamètre (µ)	% PASSANTS
	0,5	22,5	27,5	+1,640	24,14	80	100,0
	1	22	27,5	+1,640	23,64	75	97,93
	2	21	27,5	+1,640	22,64	55	93,79
	5	19	27,5	+1,640	20,64	38	85,5
	10	17	27,5	+1,640	18,64	25	77,22
	20	16	27,5	+1,640	17,64	17	73,07
	40	14	27,5	+1,640	15,64	12	64,79
	80	11	27,5	+1,640	12,64	8	52,36
	240	8	28,5	+1,905	9,905	5	40,59
	1440	5	27	+1,510	6,51	2	27,11

Copier | Effacer | Coller | Calculer

Nous avons tracé par la suite la courbe granulométrique relative à l'essai.

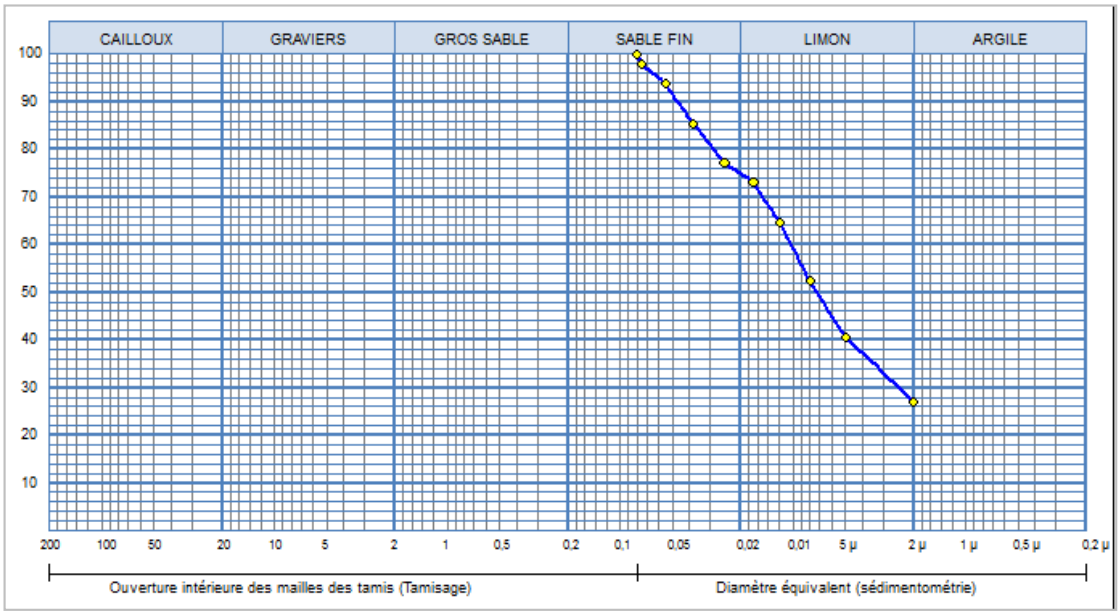


Figure 35: Courbe granulométrique de la roche en bloc polluée de sulfates SO4 et phosphates PO4.

Essai d'Atterberg sur roche en bloc polluée de de sulfate SO_4 et phosphates PO_4

Dans cet essai, nous avons déterminé la limite de liquidité, la limite de plasticité et déduit l'indice de plasticité de la roche polluée de sulfates et phosphates.

Le tableau 25 donne les valeurs des teneurs en eau relative à chaque essai d'Atterberg réalisé sur la marne en bloc polluée d'acides PO4 et SO4.

Tableau 25 : Essai d'Atterberg sur la marne en bloc polluée d'acide SO4+PO4

Nbre de choc	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
18	9,5	17,3	14,9	7,8	5,4	0,4444	44,44
22	10,1	16,15	14,3	6,05	4,2	0,4405	44,05
28	9,3	15,889	13,9	6,589	4,6	0,4324	43,24
32	10,1	17,8	15,5	7,7	5,4	0,4259	42,59

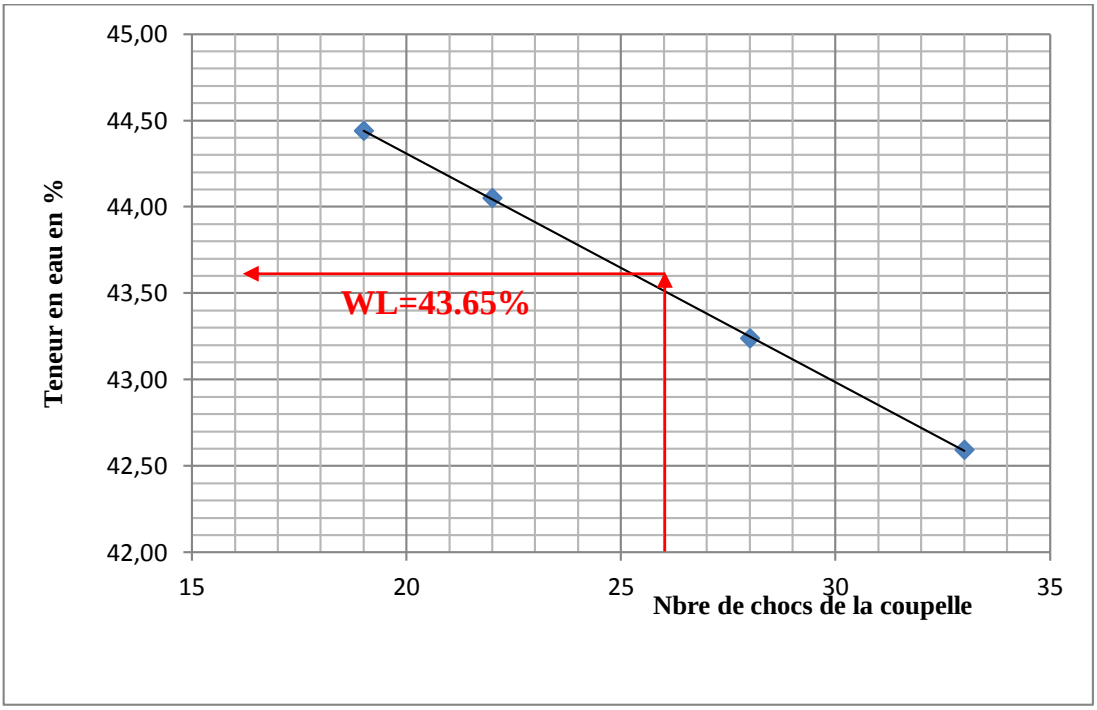


Figure 36 : Graphique de détermination de la limite de liquidité roche en bloc polluée.

Le tableau 26 récapitule les données et les résultats de l'essai, et met en évidence la valeur de la limite de plasticité qui est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues.

Tableau 26 : Limites de plasticité marne en bloc polluée de SO4 et PO4.

Essai N°	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
1	9,6	10,2	10,1	0,6	0,5	0,2000	20,00
2	8,5	9	8,9	0,5	0,4	0,2500	25,00
						Somme	45,00
					Limite de plasticité →	***Wp(%)***	***22,50***

On déduit par ces deux résultats la valeur de l'indice de plasticité

$I_p = W_L - W_P$ → ***IP= 21.15%***

Nous concluons à partir du résultat obtenu que le sol est plastique

III.6 Essai sur roche fractionnée (fraction10/20) polluée

L'idée est issue de l'essai d'altérabilité que nous n'avons pas pu finaliser, nous montrons dans ce qui suit l'évolution de la granulométrie de la roche fractionnée. Pour cela, nous avons considéré la fraction de la roche 10/20 concassée manuellement, polluée de phosphates et sulfates. Nous avons tracé les courbes granulométriques et calculé l'indice de plasticité. Les essais sont comme suit :

III.6.1 Essai sur roche fractionnée polluée de phosphates PO_4

Nous avons mis l'échantillon de sol (fraction 10/20) en contact d'eau polluée de PO4, puis nous avons procédé à la réalisation des essais :

III.6.1.1 Essai de sédimentation sur roche fractionnée polluée de phosphates PO_4

L'essai de sédimentation sur la fraction de la roche est réalisé conformément à la norme NF P 94-057(voir chapitre II).

Le Tableau 27 donne les valeurs relevées lors de l'essai.

Tableau 27 : Essai de sédimentation sur marne fraction 10/20 polluée de PO4.

Passants à 80µ : 100,00

Date et Heure	Temps (min)	Lecture. R	Température C° (degrès)	Correction. Temp	Lecture Corrigée	Diamètre (µ)	% PASSANTS
	0,5	22,5	28	+1,770	24,27	80	100,0
	1	22	28	+1,770	23,77	75	97,94
	2	20,5	28	+1,770	22,27	55	91,76
	5	19	28	+1,770	20,77	38	85,58
	10	17,5	28	+1,770	19,27	25	79,4
	20	16	27	+1,510	17,51	17	72,93
	40	13	27	+1,510	14,51	12	60,43
	80	11	27	+1,510	12,51	8	52,1
	240	8	28	+1,770	9,77	5	40,26
	1440	3,5	26,5	+1,385	4,885	2	20,45

Copier | Effacer | Coller | Calculer

Nous avons tracé par la suite la courbe granulométrique correspondante.

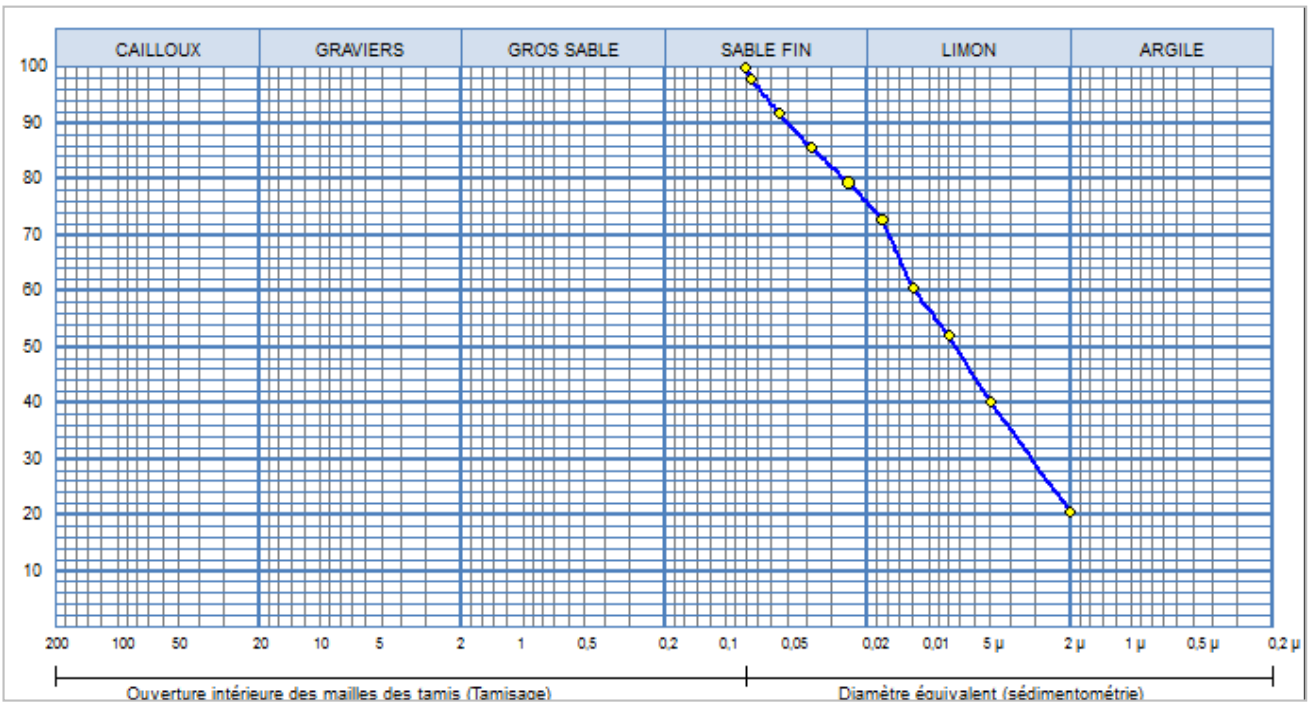


Figure 37 : Courbe granulométrique de la roche en fraction polluée de phosphates PO4.

III.6.1.2 Essai de sédimentation sur roche fractionnée polluée de phosphates PO_4

Dans cet essai, nous avons déterminé la limite de liquidité, la limite de plasticité et déduit l'indice de plasticité de la roche polluée de phosphates.

Le tableau 28 donne les valeurs des teneurs en eau relative à chaque essai d'Atterberg réalisé sur la marne fractionnée polluée d'acide PO4.

Tableau 28 : Essai d'Atterberg sur marne fractionnée polluée d'acide PO4.

Nbre de choc	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
17	8,4	15,4	13	7	4,6	0,5217	52,17
24	8,6	16	13,6	7,4	5	0,4800	48,00
29	8,4	15,1	13	6,7	4,6	0,4565	45,65
35	8,4	15,5	13,4	7,1	5	0,4200	42,00

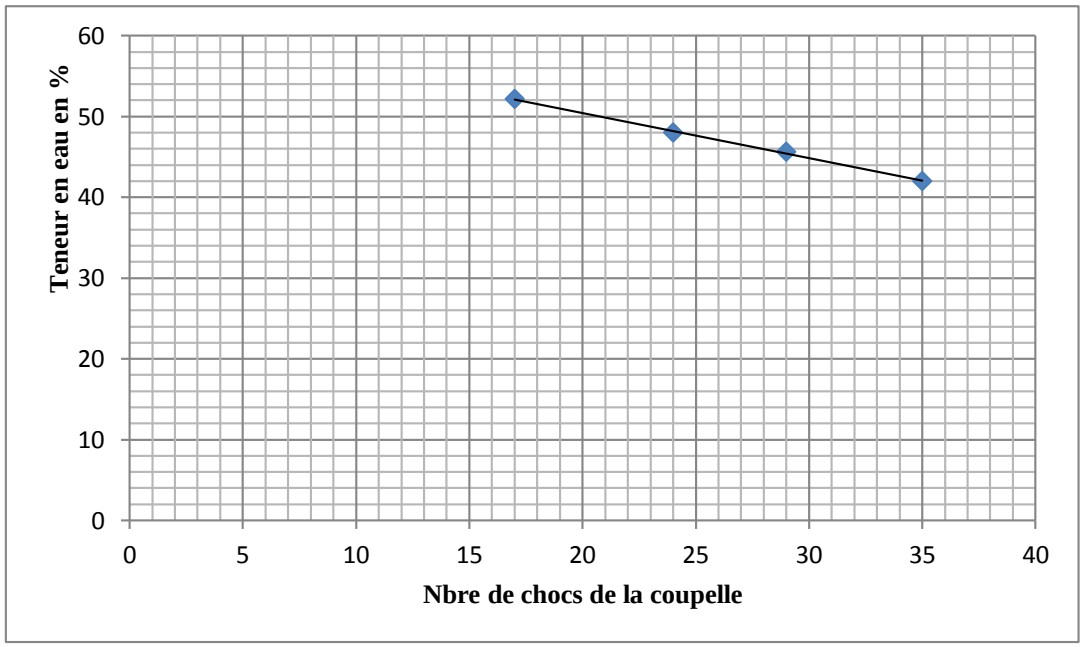


Figure 38: Graphique de détermination de la limite de liquidité de la roche fractionnée polluée PO4

Le tableau 29 récapitule les données et les résultats de l'essai, et met en évidence la valeur de la limite de plasticité qui est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues.

Tableau 29 : Limite de plasticité de la roche en fraction polluée de phosphates PO4.

Essai N°	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
1	8,4	8,9	8,8	0,5	0,4	0,2500	25,00
2	6,7	7,7	7,5	1	0,8	0,2500	25,00
						Somme	50,00
					Limite de plasticité →	***Wp(%)***	***25,00***

On déduit par ces deux résultats la valeur de l'indice de plasticité

$I_p = W_L - W_P$ → ***IP= 22.0%***

Nous concluons que le sol est plastique.

III.6.2 Essai sur roche fractionnée polluée de sulfates SO_4

Nous avons mis l'échantillon de sol (fraction 10/20) en contact d'eau polluée de SO4, puis nous avons procédé à la réalisation des essais :

III.6.2.1 Essai de sédimentation sur roche reconstituée polluée de sulfates SO_4

L'essai de sédimentation sur la fraction de la roche est réalisé conformément à la norme NF P 94-057(voir chapitre II).

Le Tableau 30 donne les valeurs relevées lors de l'essai.

Tableau 30 : Essai de sédimentation sur marne fractionnée 10/20 polluée de SO4.

Passants à 80µ : 100,00

Date et Heure	Temps (min)	Lecture. R	Température C° (degrès)	Correction. Temp	Lecture Corrigée	Diamètre (µ)	% PASSANTS
	0,5	21,5	28	+1,770	23,27	80,0	100,0
	1	21	28	+1,770	22,77	75,0	97,85
	2	20	28	+1,770	21,77	55,0	93,55
	5	18,5	28	+1,770	20,27	38,0	87,11
	10	17,5	28	+1,770	19,27	25,0	82,81
	20	16	28	+1,770	17,77	17,0	76,36
	40	14	28	+1,770	15,77	12,0	67,77
	80	12,5	28	+1,770	14,27	8,0	61,32
	240	09	29	+2,040	11,04	5,0	46,9
	1440	06	27,5	+1,640	7,64	2,0	33,02

Copier | Effacer | Coller | Calculer

En suite nous avons tracé la courbe granulométrique.

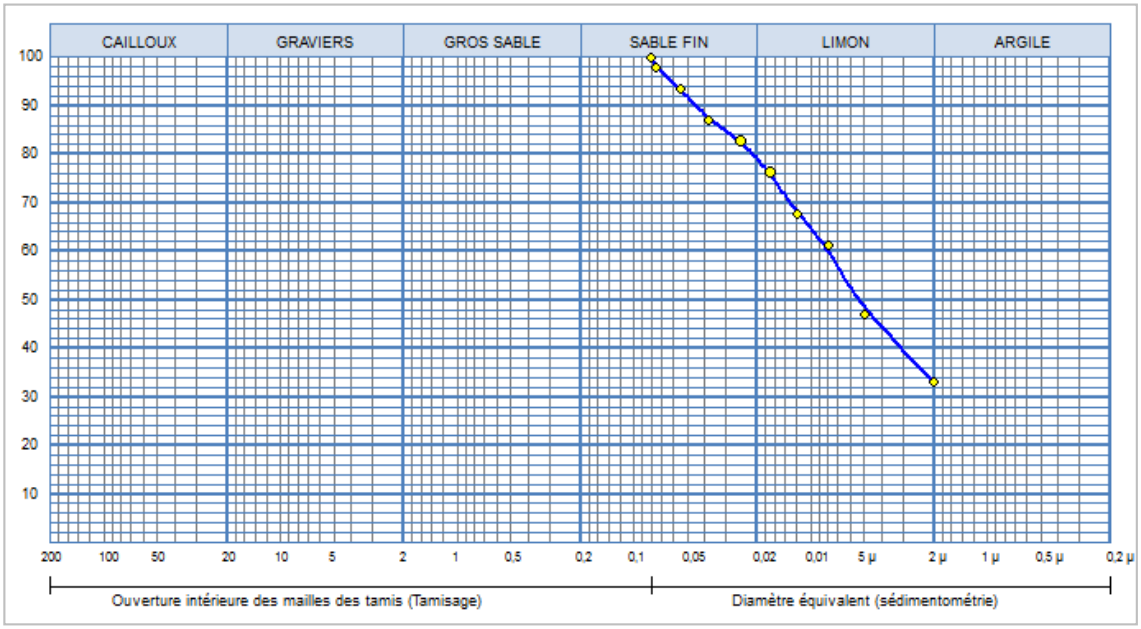


Figure 39 : Courbe granulométrique de la roche en fraction polluée de sulfates SO4.

III.6.2.2 Essai d'Atterberg sur roche fractionnée polluée de sulfates SO_4

Dans cet essai, nous avons déterminé la limite de liquidité, la limite de plasticité et déduit l'indice de plasticité de la roche polluée de sulfates.

Le tableau 31 donne les valeurs des teneurs en eau relative à chaque essai d'Atterberg réalisé sur la marne en bloc polluée d'acides SO4.

Tableau 31 : Essai d'Atterberg réalisé sur marne fractionnée polluée d'acide SO4

Nbre de choc	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
19	8,6	15,38	13,15	6,78	4,55	0,4901	49,01
23	8,4	17,6	14,6	9,2	6,2	0,4839	48,39
26	7,1	15,5	12,8	8,4	5,7	0,4737	47,37
28	6,7	14,9	12,3	8,2	5,6	0,4643	46,43

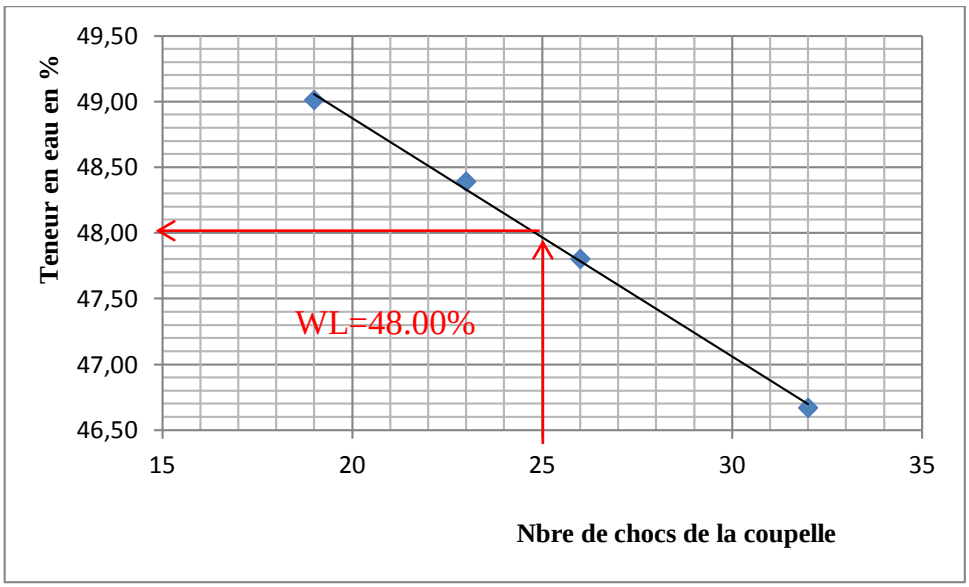


Figure 40 : Graphique de détermination de la limite de liquidité roche fractionnée polluée d'acide SO4.

Le tableau 32 récapitule les données et les résultats de l'essai, et met en évidence la valeur de la limite de plasticité qui est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues.

Tableau32 : Limite de plasticité de la roche en fraction polluée de sulfates SO4

Essai N°	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
1	9,6	10,8	10,7	1,2	1,1	0,0909	9,09
2	21,5	22,2	22	0,7	0,5	0,4000	40,00
						Somme	49,09
					Limite de plasticité →	***Wp(%)***	***24,55***

On déduit par ces deux résultats la valeur de l'indice de plasticité

$I_p = W_L - W_P$ → ***IP= 23.45%***

Nous concluons que le sol est plastique.

III.6.3 Essai sur roche fractionnée polluée de sulfates SO_4 et phosphates PO_4

Dans cet essai, nous avons associé les deux acides, qui peuvent être présents en même temps dans les eaux souterraines. Nous avons mis l'échantillon de sol (fraction 10/20) en contact d'eau polluée d'acide PO4 et SO4, puis nous avons procédé aux essais de sédimentation et limites d'Atterberg.

III.6.3.1 Essai de sédimentation sur roche fractionnée polluée de sulfates SO_4 et phosphates PO_4

L'essai de sédimentation sur la fraction de la roche est réalisé conformément à la norme NF P 94-057(voir chapitre II).

Le tableau 33 donne les valeurs relevées lors de l'essai sur le matériau pollué d'acide SO4 et PO4 (association des deux acides)

Tableau 33:Essai de sédimentation sur marne fractionnée polluée de SO4+PO4

Passants à 80µ : 100

Date et Heure	Temps (min)	Lecture. R	Température C° (degrès)	Correction. Temp	Lecture Corrigée	Diamètre (µ)	% PASSANTS
	0,5	23	27,5	+1,640	24,64	80	100,0
	1	22,5	27,5	+1,640	24,14	75	97,97
	2	22	27,5	+1,640	23,64	55	95,94
	5	21	27,5	+1,640	22,64	38	91,88
	10	19	27,5	+1,640	20,64	25	83,77
	20	17	27,5	+1,640	18,64	17	75,65
	40	15	27,5	+1,640	16,64	12	67,53
	80	12,5	27,5	+1,640	14,14	8	57,39
	240	9	28,5	+1,905	10,905	5	43,79
	1440	5	27	+1,510	6,51	2	26,56

Copier | Effacer | Coller | Calculer

Nous avons tracé ensuite la courbe granulométrique y correspondant.

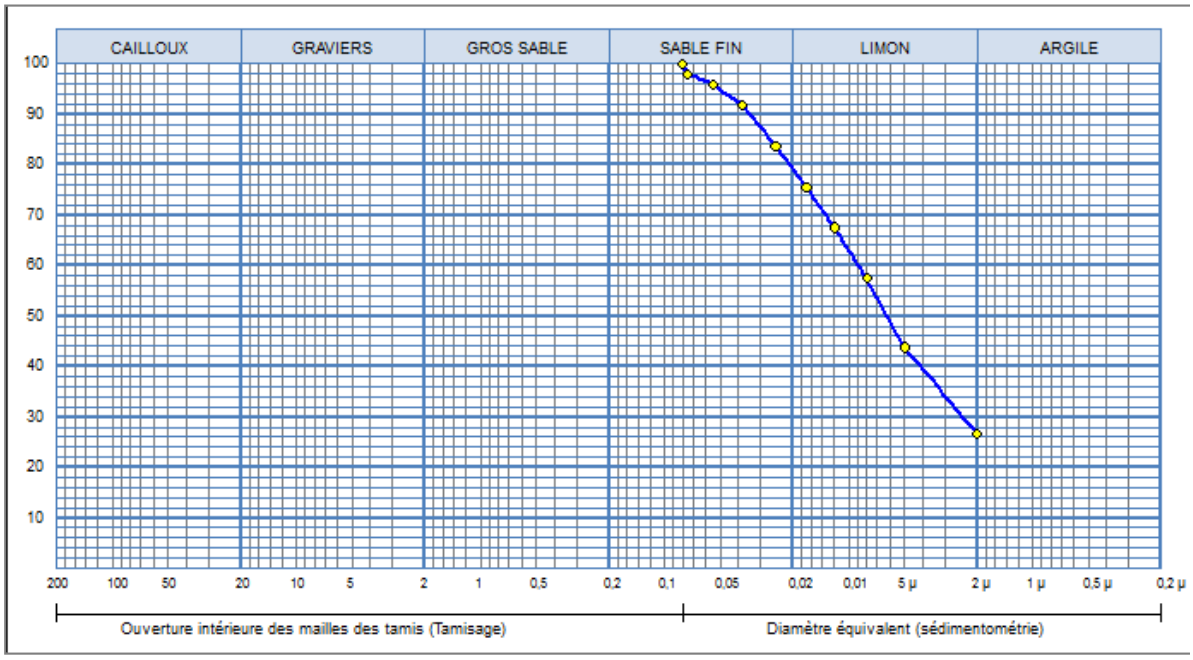


Figure 41 : Courbe granulométrique de la roche fractionnée polluée de phosphates PO4 et sulfates SO4.

III.6.4. Essai d'Atterberg sur roche fractionnée polluée de sulfates SO_4 et phosphates PO_4

Le tableau 34 donne les valeurs des teneurs en eau relative à chaque essai d'Atterberg réalisé sur la marne fractionnée polluée d'acide SO4 et PO4.

Tableau 34 : Essai d'Atterberg réalisé sur la marne fractionnée polluée d'acide SO4 et PO4

Nbre de choc	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
16	6,7	13,9	11,5	7,2	4,8	0,5000	50,00
24	9	13,43	12	4,43	3	0,47667	47,67
27	16,5	20,61	19,3	4,11	2,8	0,4678	46,78
35	8,6	13,5	12	4,9	3,4	0,4411	44,11

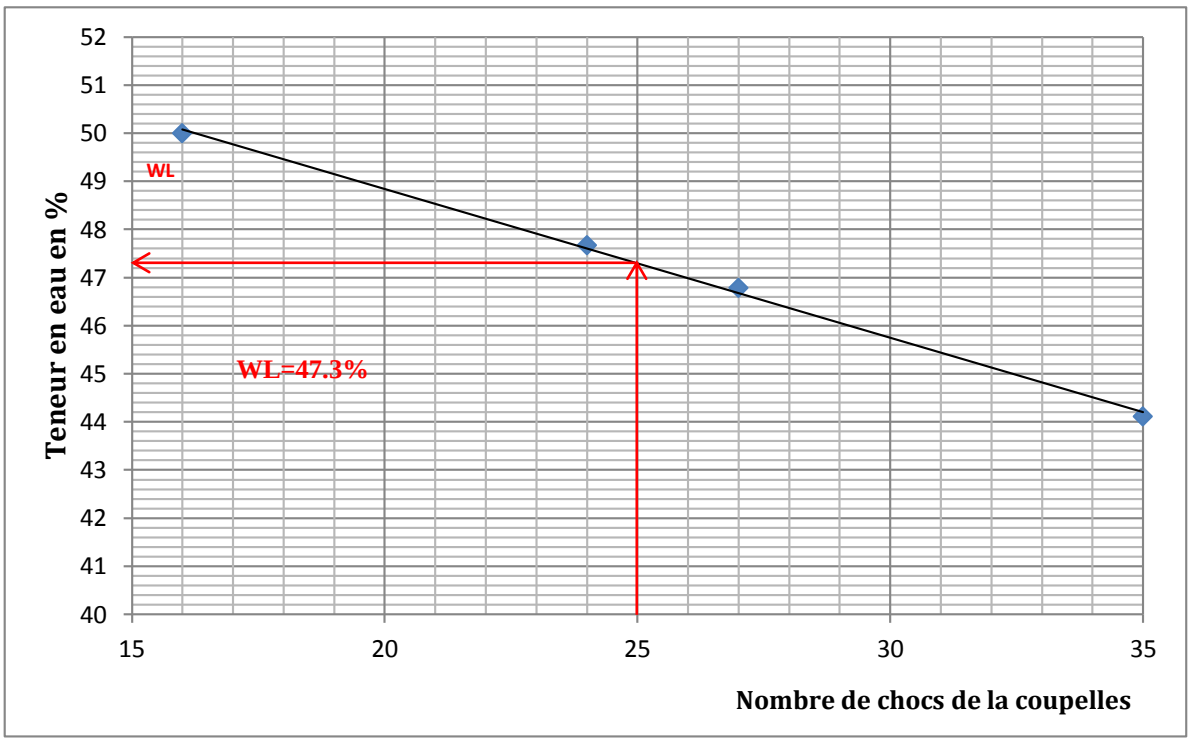


Figure 42: Graphique de détermination de la limite de liquidité roche fractionnée polluée.

Le tableau 35 récapitule les données et les résultats de l'essai, et met en évidence la valeur de la limite de plasticité qui est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues.

Tableau 35 : Limite de plasticité de la roche en fraction polluée de sulfates SO4 et phosphates PO4.

Essai N°	Mt	Mh	Ms	Mh'	Ms'	W	W(%)
1	63,5	64,4	64,2	0,9	0,7	0,2857	28,57
2	22,2	22,7	22,6	0,5	0,4	0,2500	25,00
						Somme	53,57
					Limite de plasticité →	***Wp(%)***	***26,79***

On déduit par ces deux résultats la valeur de l'indice de plasticité

$I_p = W_L - W_P$ → ***IP= 20.5%***

Nous concluons que le sol est plastique.

III.7 Classification de la marne fractionnée et en bloc, polluée et non polluée

Pour ce faire, il a été plus judicieux pour nous de récapituler tous les résultats obtenus lors des essais de laboratoire comme suit :

Le tableau 36 récapitule tous les résultats obtenus lors des essais laboratoire sur le matériau marne dans les différents cas considérés.

Tableau 36: Résultats des essais laboratoire.

Sol		Paramètres physiques			Poids spécifique	Valeurs au Bleu	Limites d'atterberg	
		W(%)	ρ_d(g/cm^3)	Sr	ρ_s(g/cm^3)	VBS	WL	IP
Marne en bloc	**Intact**	10.25	2.25	58.4	2.53	4.24	46.10	16.10
	Bloc+PO4	/	/	/	/	/	48.7	17.75
	Bloc+SO4	/	/	/	/	/	45.2	16.03
	Bloc+PO4+SO4	/	/	/	/	/	43.65	21.15
Marne reconstituée	**Intact**	/	/	/	/	/	47.3	20.51
	Avec PO4	/	/	/	/	/	47.0	22.0
	Avec SO4	/	/	/	/	/	48	23.45
	Avec PO4+SO4	/	/	/	/	/	47.3	20.5

Sol		Analyse granulométrique			Analyse chimique		
		<2mm(%)	<80µ(%)	<2µ(%)	Carbonate CaCO3(%)	MO(%)	Sulfate(%)
Marne en bloc	Intact	100	100	38.9	1.41	1.72	0.31
	Bloc+PO4	100	100	12.8	0.51	1.73	0.06
	Bloc+SO4	100	100	30.47	0.44	1.74	0.02
	Bloc+PO4+SO4	100	100	27.11	0.38	1.75	0.07
Marne fractionnée	Intact	100	100	27.89	/	/	/
	Avec PO4	100	100	20.45	/	/	/
	Avec SO4	100	100	33.02	/	/	/
	Avec PO4+SO4	100	100	26.56	/	/	/

III.8 Interprétation des résultats

- Selon la granulométrie :

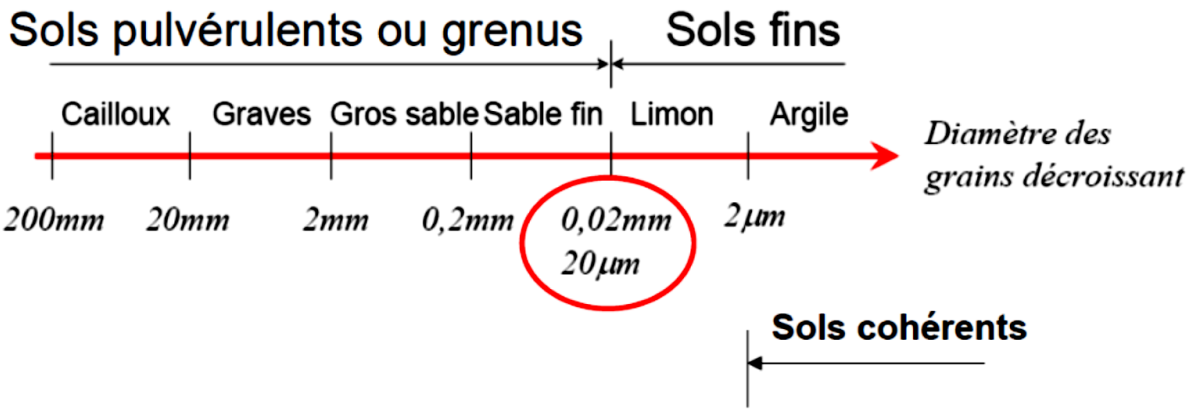


Figure 43: Classification des particules solides d'un sol.

Tous les passants sont < 80µm pour tous les cas de sol étudiés, donc le sol est un sol fin.

- Selon les limites d'Atterberg

Le tableau 37 donne le degré de plasticité des sols selon l'indice de plasticité Ip.

Tableau 37 : degré de plasticité des sols selon Ip.

Indice de plasticité	0-5%	5-15%	15-40%	>40%
Degré de plasticité	Non plastique	Peu plastique	Plastique	Très plastique

D'où la classification suivante :

Sol		**Limites d'atterberg**		
		WL	**IP**	**Nature du sol**
Marne en bloc	**Intact**	46.10	16.10	plastique
	Bloc+PO4	48.7	17.75	plastique
	Bloc+SO4	45.2	16.03	plastique
	Bloc+PO4+SO4	43.65	21.15	plastique
Marne reconstituée	**Intact**	47.3	20.51	plastique
	Avec PO4	47.5	22.5	plastique
	Avec SO4	48	23.45	plastique
	Avec PO4+SO4	47.3	20.5	plastique

En tenant compte des résultats obtenus et en faisant référence à la norme LCPC, notre sol est argileux inorganique de plasticité moyenne.

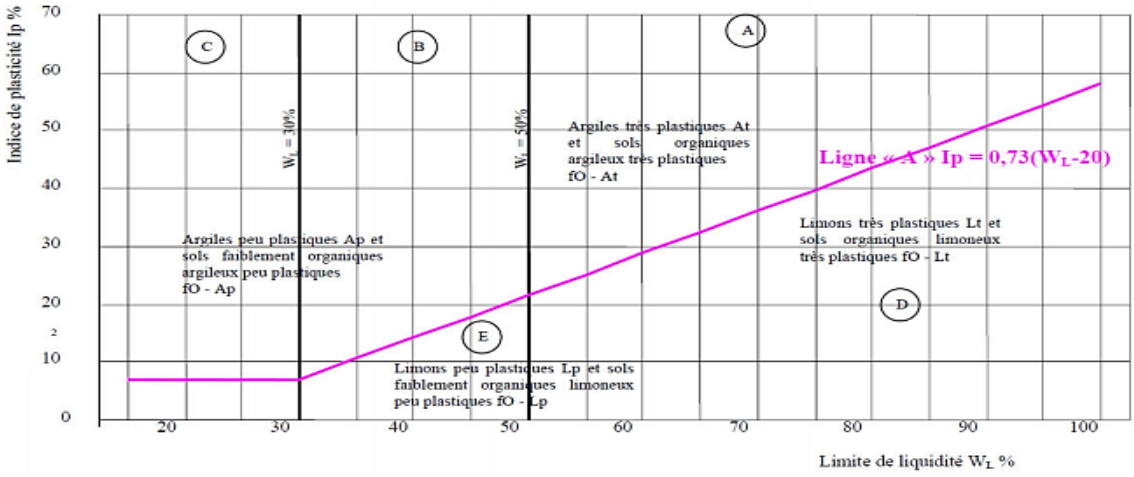


Figure 44 : Classification des sols fins Diagramme de plasticité

En référence à la norme LCPC, les échantillons de sol sont classés comme suit :

Sol		Limites d'atterberg		
		WL	IP	Nature du sol
Marne en bloc	Intact	46.10	16.10	Sol faiblement organique peu plastique
	Bloc+PO4	48.7	17.75	
	Bloc+SO4	45.2	16.03	
	Bloc+PO4+SO4	43.65	21.15	
Marne reconstituée	Intact	47.3	20.51	
	Fraction+ PO4	47.5	22.5	
	Fraction+SO4	48	23.45	
	Fraction+ PO4+SO4	47.3	20.5	

III.9. Conclusion

D'après les résultats obtenus l'effet de la pollution causée par les eaux acides agit négativement sur la résistance et sur la plasticité de la roche. Les essais mécaniques confirmeront dans le chapitre IV ces résultats.

Chapitre IV
Essais mécaniques et interprétation des résultats

IV.1 Introduction

Afin de mieux évaluer l'altération causée par les polluants, nous avons réalisé des essais mécaniques et chimiques sur la roche contaminée de H2PO4, H2SO4, et l'association des deux acides.

Nous avons procédé comme suit :

IV.2 Essais mécaniques sur matériau pollué

Nous avons considéré trois échantillons de sol **reconstitué** (concassé et broyé), passés au tamis 0/5mm, et compactés à l'optimum Proctor avec de l'eau polluée. Trois boites de cisaillement identiques sont utilisées pour exécuter l'essai sous les contraintes **σ= 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa**.

Les courbes intrinsèques donnant la cohésion et l'angle de frottement interne de chaque cas sont représentées ci-dessous.

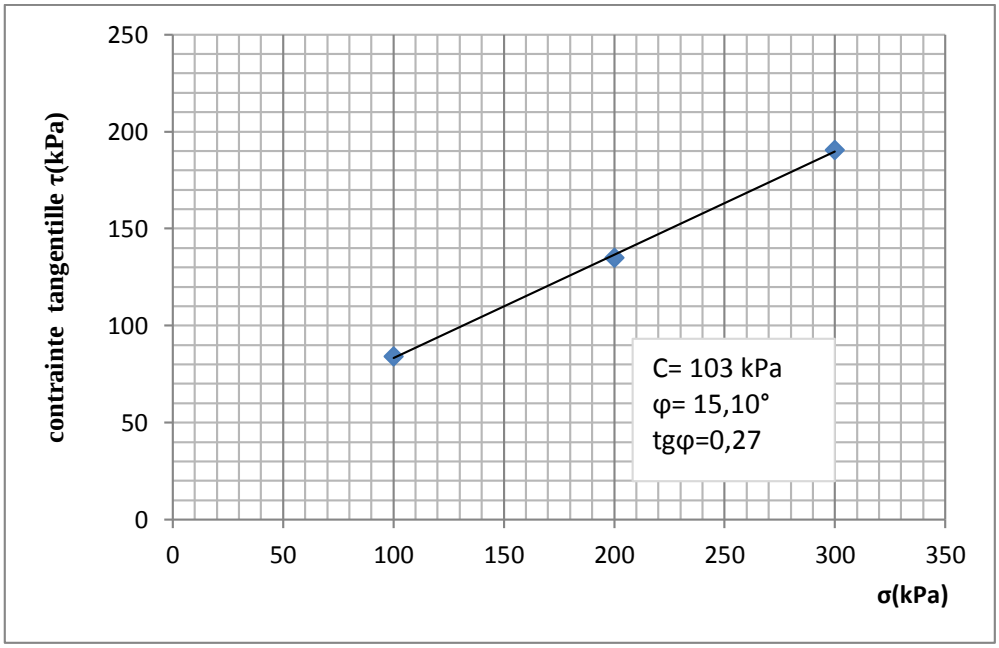


Figure 45:Droite intrinsèque du matériau marne pollué de phosphates PO4.

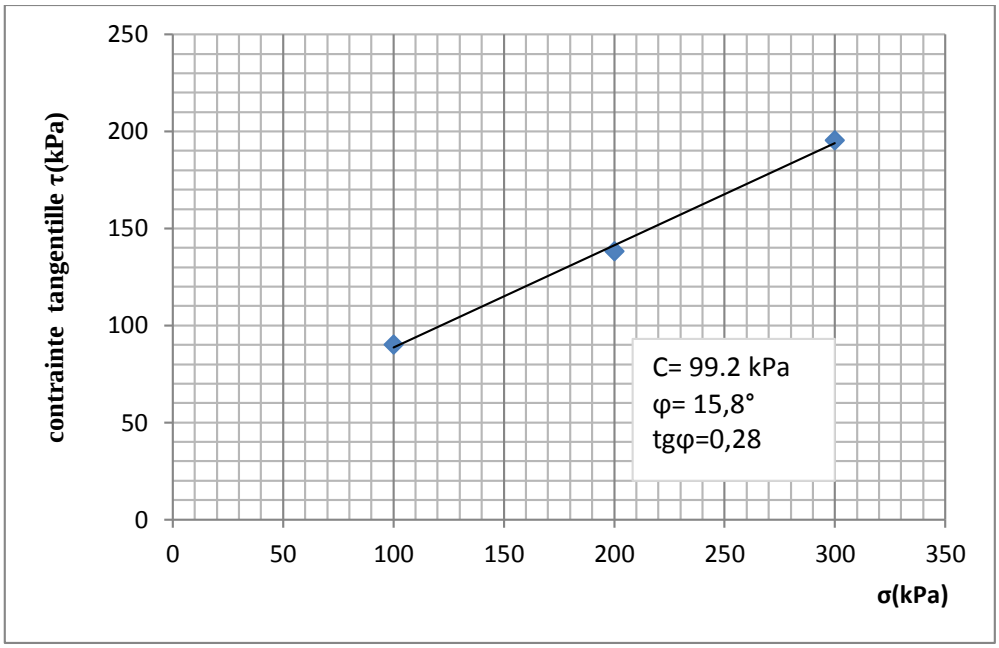


Figure 46:Droite intrinsèque du matériau marne pollué de sulfates SO4.

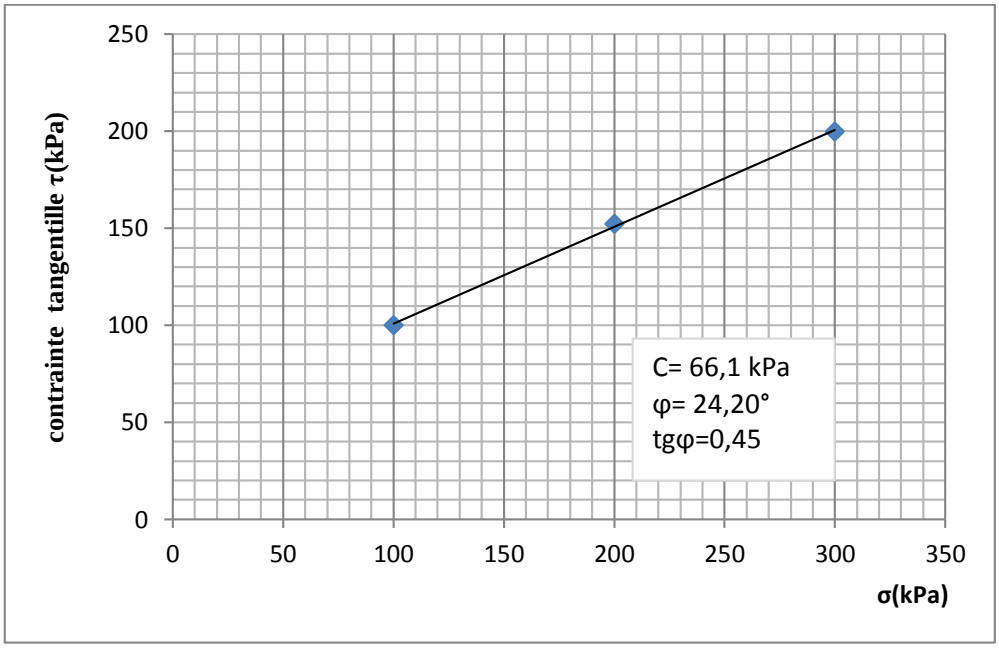


Figure 47:Droite intrinsèque du matériau marne pollué de phosphates et sulfates.

Tableau 38 : Cohésion et angle de frottement.

Sol		Cisaillement	
		C	**Φ**
Marne reconstituée	**Intact**	55.2	25.1
	Polluée PO4	103	15.1
	Polluée SO4	99.2	15.8
	Polluée PO4+SO4	66.1	24.2

Nous pouvons constater à partir des résultats obtenus que la cohésion a augmenté de presque de moitié en présence de sulfates ou de phosphates dans la marne séparément. En effet, la présence de l'un ou de l'autre produit a créé de nouvelles liaisons ; ce qui a pour conséquence des valeurs assez élevées de la cohésion. Par contre, l'association des deux acides ne change pas beaucoup les caractéristiques du matériau intact ;ceci a été confirmé par les essais chimiques.

IV.3 Essai chimique sur le matériau pollué

Les essais chimiques sur la marne étudiée ont été réalisés au niveau du **CETIM** « Centre d'études et de Service Technologique » de BOUMERDES. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci dessous comme suit :

Tableau 39: Essais chimique sur marne polluée

Composition chimique	**Teneurs %**										
	SiO_2	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**K_2O**	**Na_2O**	**SO_3**	**TiO_2**	**P_2O^5**	**PF**
So4+po4	59.60	20.73	5.67	0.38	1.75	3.14	0.86	0.07	0.82	0.08	6.90
So4	60.00	20.61	5.78	0.44	1.74	3.06	0.77	0.02	0.80	0.07	6.70
Po4	59.93	20.37	5.71	0.51	1.73	3.03	0.82	0.06	0.81	0.09	6.95

En faisant référence à la norme NF P 18-011, le sol peut être classé dans la classe A1 à A3 dû à la présence des sulfates. De ce fait, les échantillons étudiés sont de classe A1 (milieu chimique faiblement agressif).

Tableau 40:Classification du sol selon l'agressivité (NF P18-011).

		Calcium Ca+2(mg/l)	Magnesium Mg+2 (mg/l)	Sulfates SO-2 (mg/l)	pH	CO2 (mg/l)	Amonium NH+ (mg/l)
A1	**Milieu chimique faiblement agressif**	100-300		250 - 600	6,5 - 5,5	15-30	15 -30
A2	**Milieu chimique moyennement agressif**	300-1500		600 – 1500	5,5 - 4,5	30-60	30-60
A3	**Milieu chimique fortement agressif**	1500-3000		1500 - 6000	4,5 - 4,0	60-100	60-100
A4	**Milieu chimique très fortement agressif**	>3000		>6000	<4	>100	>100

IV.4 Interprétation des résultats

En général, les résultats obtenus montrent que la qualité des eaux souterraines agit sur l'altération chimique de la roche qu'elle soit en bloc ou en fraction. Ceci se traduit par l'augmentation de l'indice de plasticité qui passe de 16% pour la roche intacte jusqu'à 23.4% pour une roche polluée.La cohésion qui augmente et l'angle de frottement qui diminue indiquent la défragmentation des minéraux et la création de nouvelles liaisons au contact des acides. Ce qui a été confirmé par les essais chimiques.

Par contre, les valeurs observées lors des essais relatifs à l'association des deux acides (phosphates et sulfates) montrent un état proche du matériau intact (non pollué), ceci peut être

interprété par l'interaction des acides (action chimique entre les deux acides) et qui n'affecte que très peu le matériau.

Par ailleurs, pour le même matériau, les résultats changent clairement de l'état rocheux à l'état fractionné. On peut dire que la roche fractionnée s'altère plus par rapport à la roche en bloc, car la roche fractionnée a déjà subi une altération mécanique (ou physique) qui a fragilisé et fragmenté certains de ses minéraux, par conséquent elle devient plus sensible, et au contact de polluants, celle-ci est moins résistante par rapport à la roche en bloc.

Nous pouvons justifier ces résultats par l'étalement granulométrique et cela en comparant les courbes granulométriques des différents cas étudiés. Ceci permettra de mieux analyser l'évolution granulaire sous l'effet de l'altération.

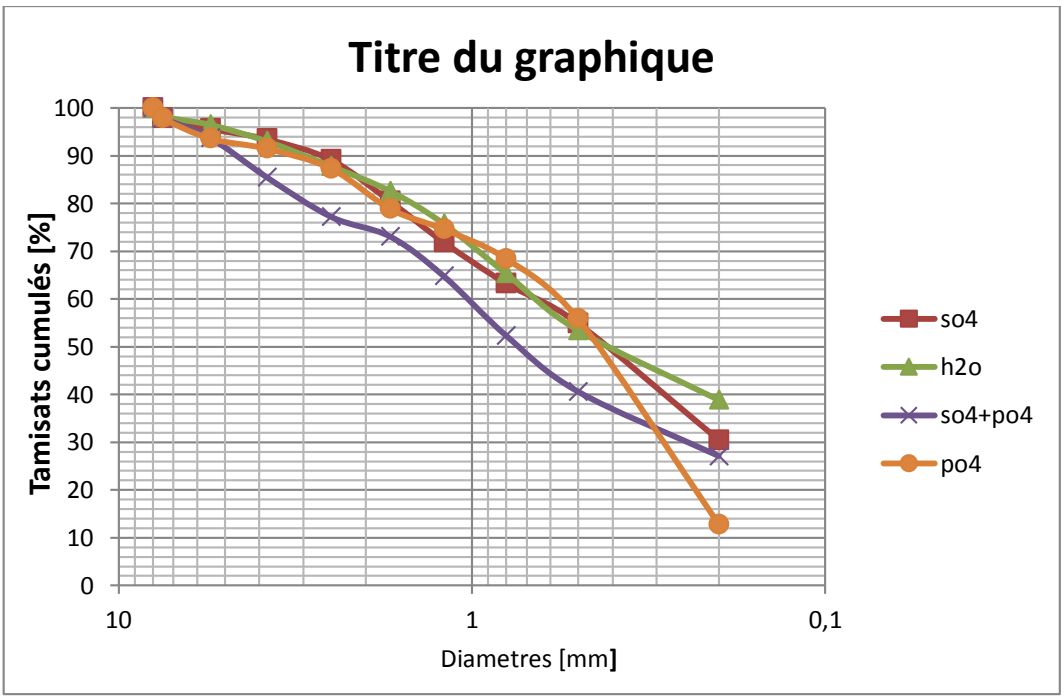


Figure 48: Superpositions des granulométries de la marne en bloc intacte et polluée.

La courbe de la marne en bloc polluée avec PO4 est la plus étalée et c'est celle qui s'est effritée le plus ,

La figure 49 montre la décontation des particules de la marne polluée de PO4.

Figure 49:Décantation des particules de la roche polluée de PO4.

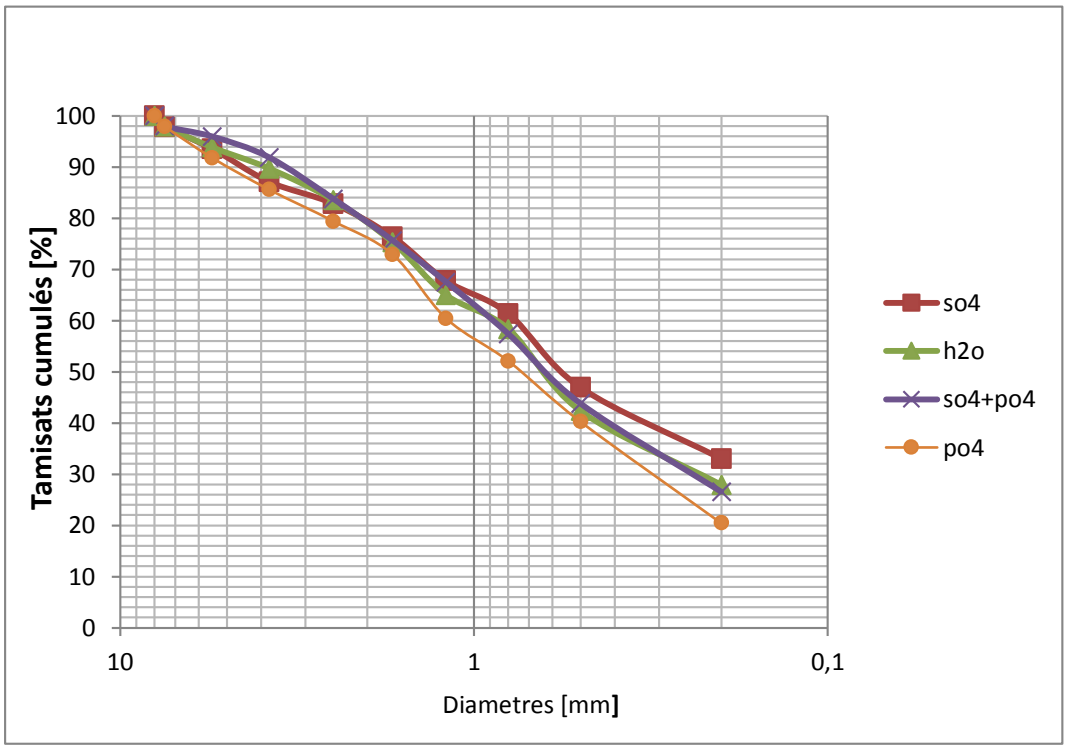


Figure 50 : Superpositions des granulométries de la marne fractionnée intacte et polluée.

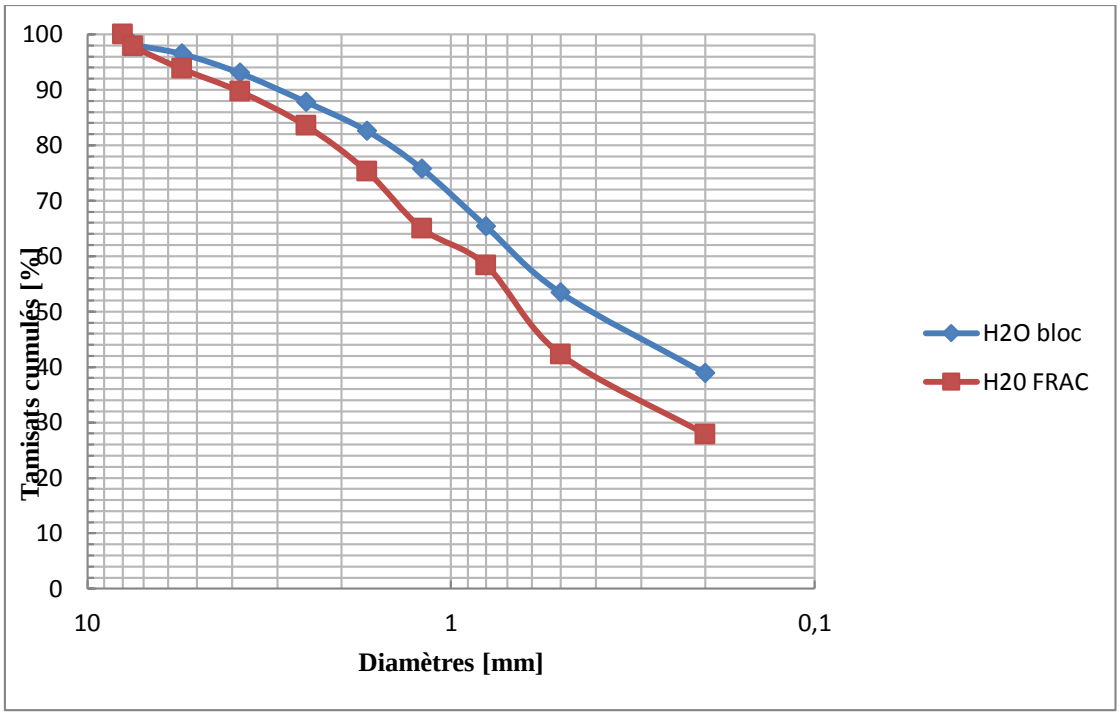


Figure 51 :**Superpositions des granulométries de la marne en bloc et reconstituée non polluée.**

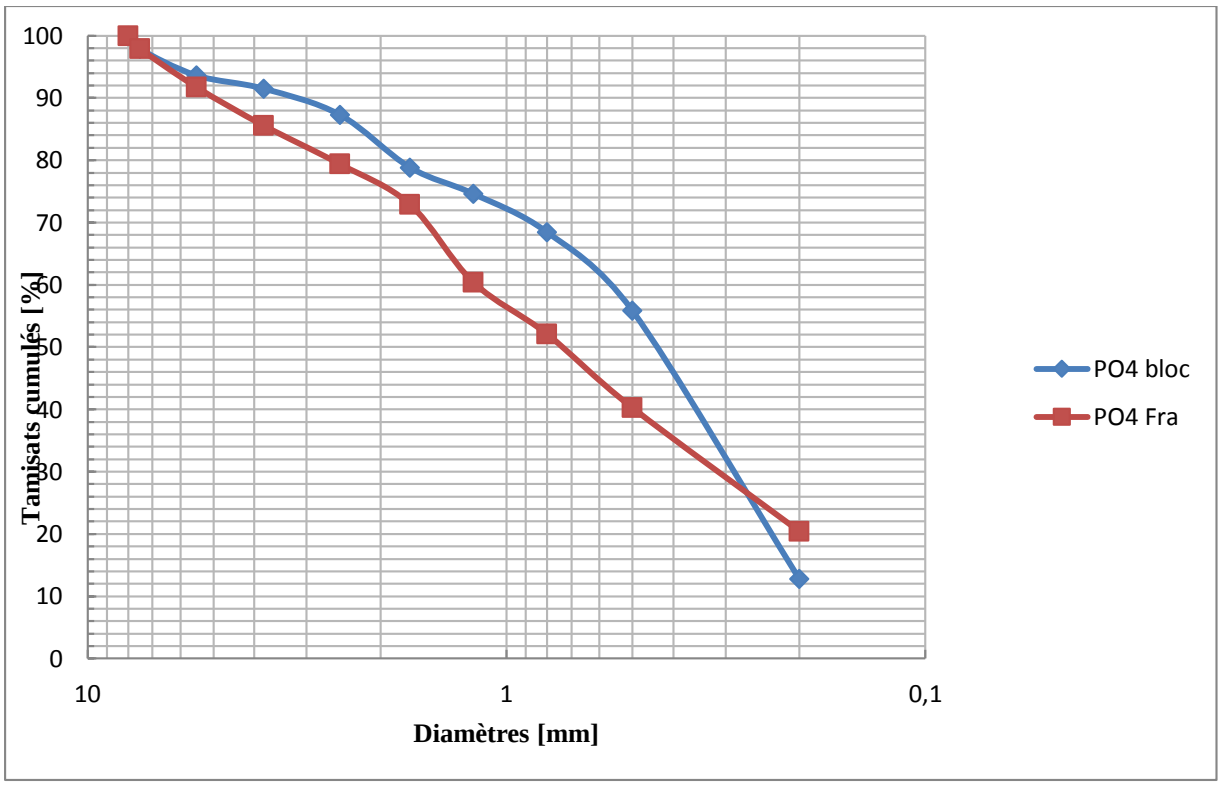


Figure 52 : **Superposition des granulométries de la marne en bloc et en fraction, polluée de PO4.**

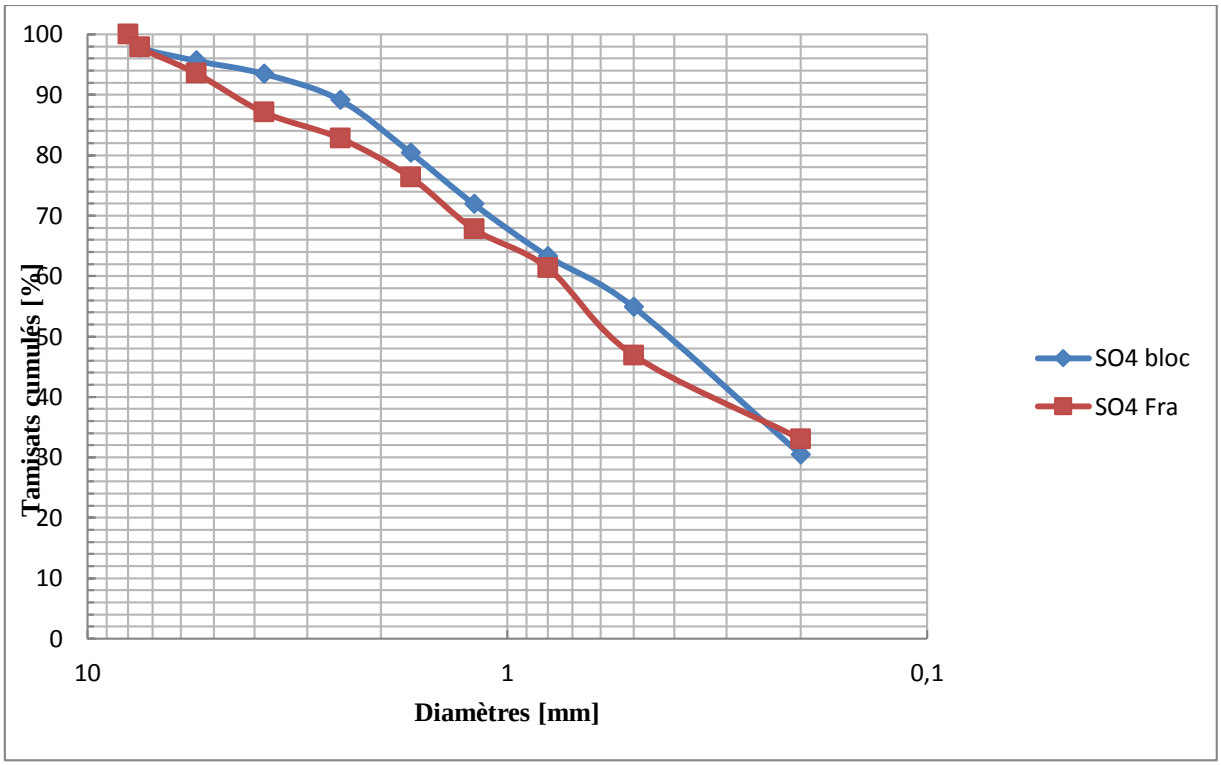


Figure 53:Superposition des granulométries de la marne en bloc et en fraction, polluée de SO4.

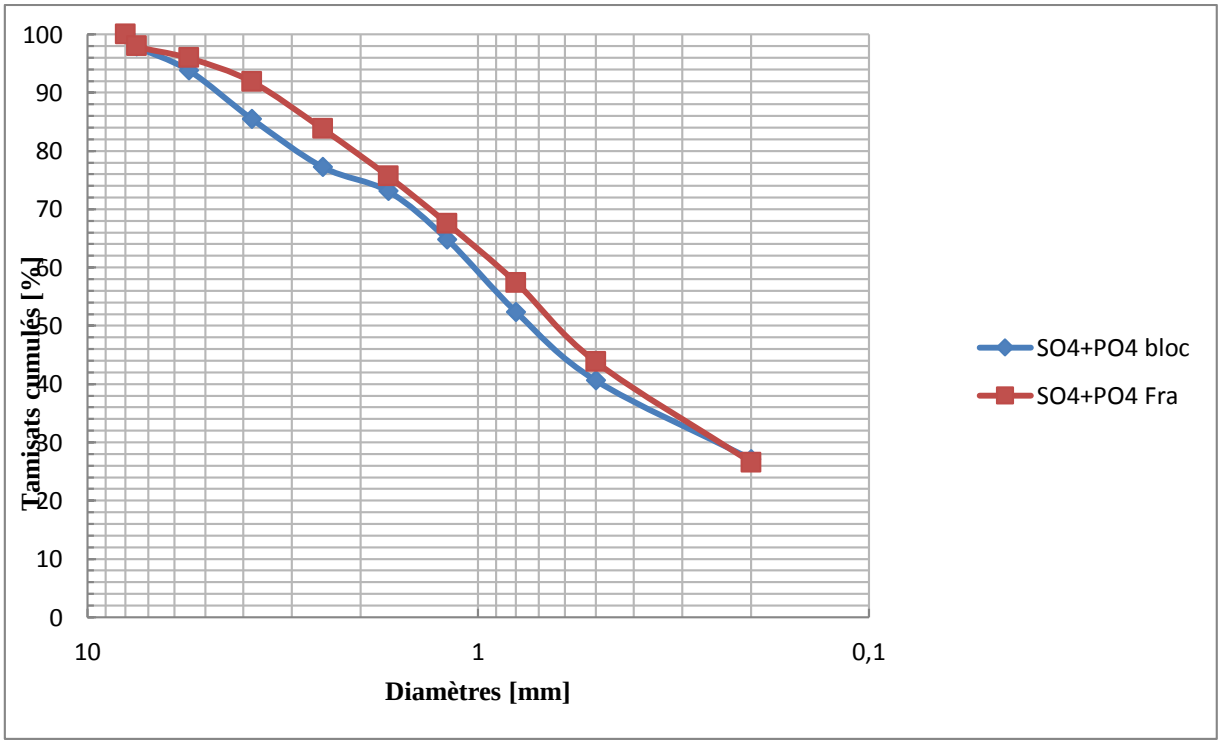


Figure 54: Superposition des granulométries de la marne en bloc et en fraction, polluée de SO4 et PO4.

Pour la marne fractionnée, la courbe la plus étalée est celle de la marne polluée avec le produit SO4. Concernant les échantillons soumis à l'eau, c'est la marne fractionnée qui s'est étalée le plus ; ceci confirme qu'un matériau fractionné est plus sensible qu'un matériau en bloc.

IV.5 Conclusion

Nous constatons que l'effet des polluants (phosphates, sulfates) agit négativement sur les caractéristiques mécaniques de la roche. Cependant, l'association des deux polluants (sulfates+phosphates) sur la marne agit de telle sorte à s'approcher des caractéristiques initiales de la roche.

Conclusion

Conclusion

L'objectif de ce travail était d'étudier expérimentalement l'altération du matériau marne, en bloc et en fraction, sous l'effet d'eaux acides.

Les résultats de cette étude ont montré que les eaux polluées d'acides (phosphates et sulfates) agissaient directement sur les minéraux de la roche qui manifeste un comportement différent vis-à-vis de l'altération. Certains minéraux sont facilement altérables et d'autres résistent à l'altération. A degré d'altération égale, certains minéraux se solubilisent plus facilement que d'autres, notamment les sulfates (très solubles). Ces minéraux après altération donnent des minéraux argileux qui, par conséquent fragilisent la roche.

L'intensité de l'altération dépend principalement de la composition minéralogique de la roche mère. Plus la roche mère est constituée de minéraux résistants plus celle-ci sera difficilement altérable, et moins les minéraux constituant la roche mère sont résistants plus l'altération de ces derniers est facile.

D'autres facteurs peuvent aussi contribuer à son altération, notamment la variation des températures qui fragilise la roche et qui réduit sa résistance, de même que le climat (altération mécanique) par le cycle du gel dégel qui fragmente la roche et qui la rend plus altérable qu'une roche en bloc ; comme cela a été montré lors de notre travail. Lorsque la roche est fractionnée il ya plus de surfaces touchées et qui subissent l'altération par rapport à la roche en bloc ; ceci a été confirmé par l'étalement granulométrique des échantillons pollués.

Plus la pollution des eaux de surfaces est importante, plus l'altération chimique et mécanique de la roche sera grande ; ce qui risque d'engendrer des dégâts conséquents sur les terrains instables de la région. En effet, ces altérations chimiques subies par la roche génèrent une roche argileuse ; par conséquent un matériau riche en argile est sujette aux altérations mécaniques, comme les glissements, les effondrements, les éboulements …etc.

L'intensité de l'altération chimique va définir l'intensité de l'altération mécanique, plus l'altération chimique est grande plus l'altération mécanique est importante.

Néanmoins, pour donner suite à cette étude préliminaire, une étude plus approfondie, qui pourrait faire l'objet d'une thèse de doctorat, devrait être menée pour étudier les différents aspects de l'altération tels que l'effet des eaux polluées sur les résistances mécaniques de la roche fractionnée et en bloc, l'effet du degré de la pollution et le contrôle de la qualité des eaux. Par ailleurs, une considération particulière devrait être attribuée aux facteurs économique et écologique qui sont le plus souvent les facteurs les plus déterminants sur l'utilisation d'engrais et de produits détergents utilisés dans les ménages et dans l'agriculture.