

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
LABORATOIRE DE RECHERCHE EN GÉOMATÉRIAUX, ENVIRONNEMENT ET
AMÉNAGEMENT (LGEA)

Filière : Génie civil
Option : Géotechnique



Mémoire de Master

Pour l'obtention d'un diplôme de master en géotechnique

Thème

Evaluation de taux de dégradabilité des roches
schisteuses sous l'effet du phénomène
d'altération

Réalisé par : MEBARKI Manel

Dirigé par : Mr MELBOUCI Bachir

Devant la commission d'évaluation

Mme AIT BACHIR	Samia	Présidente
Melle BELHASSANI	Ouarda	Examinatrice
Mr MELBOUCI	Bachir	Promoteur

Promotion :2019/2020

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été accompli au Laboratoire de recherche en géo-matériaux, environnement et aménagement (LGEA). C'est avec humilité et gratitude que je reconnais ce que je crois devoir.

*Je commence par remercier et rendre grâce à **Dieu** le tout puissant pour m'avoir donné le courage et la volonté de mener à bon terme ce travail.*

*Je tiens à témoigner ma profonde gratitude et adresser mes vifs remerciements à **Mr MELBOUCI**, qui a suivi mon travail avec beaucoup de rigueur et d'efficacité. Merci pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien.*

*Mes vifs remerciements également à **Mr. Lachebi**, pour avoir suivi mon travail au sein du laboratoire et pour sa bienveillance.*

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes du laboratoire, pour leur aide, leur gentillesse et leur chaleureux accueil.

*Je remercie **les membres du jury** pour l'honneur d'examiner mon travail.*

Un grand merci à tous ceux et celles ayant contribué de près comme de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

*Enfin, mes chaleureux remerciements sont adressés à mes **chers parents** qui m'ont toujours encouragé dans mes études, et qui me poussent chaque jour à aller de l'avant.*

*Tous les membres de **ma famille** sont associés à ses remerciements.*

Dédicaces

C'est avec honneur que je dédie ce travail :

À mes très chers parents, pour les nombreux sacrifices qu'ils ont fait, eux qui ont été toujours là pour moi. Merci de m'avoir donné les armes pour affronter la vie ;

À mes petites sœurs et mes cousines pour la joie et la bonne humeur que vous procurez dans nos vies;

À mes grands-parents, présents ou partis, j'espère qu'ils sont fiers de moi ;

À mon amie et collègue Larbi Thiziri;

À Mr MELBOUCI, vous avez été plus qu'un mentor, je ne saurai vous remercier pour votre accueil chaleureux, votre savoir-faire indéfectible et votre bonne humeur quotidienne, merci pour ce que vous êtes ;

À mes amis qui me soutiennent, plus particulièrement : Mohammed Amokrane, Céline, Ramdane, et Housseem

À toute la famille Mebarki, et Ali Ahmed ;

Et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Listes des figures

Figures I.1. Cycles des roches.....	3
Figure I.2. Formation du sol	8
Figure I.3. Altération induite par les racines.....	9
Figure I.4. Altération par variation de température.....	11
Figure I.5. Altération physique	11
Figure I.6. Haloclastie (cristallisation de sel) d'une croûte calcaire en milieu évaporitique.....	12
Figure I.7. Altération chimique des roches provoquée par l'eau et les gaz atmosphériques.....	13
Figure I.8. La dissolution du gypse	14
Figure II.1. Principaux transferts descendant de matière dus à l'eau dans le sol.....	24
Figure II.2. Principaux transferts ascendant de matière dus à l'eau dans un sol	25
Figure II.3. Schéma de synthèse des processus impliqués dans la rétention et le transfert des contaminants dans le sol	27
Figure II.4. Principales sources de composés chimiques dans l'atmosphère	28
Figure II.5. Schéma des transformations possibles de l'azote	30
Figure II.6. Schéma explicatif de la formation des pluies acides.....	30
Figure II.7. Mécanisme de lessivage des sols du calcium par l'acide sulfurique contenu dans les précipitations.....	32
Figure III.1. Classification des eaux souterraines	35
Figure III.2. Représentation schématique de la problématique de l'infiltration des eaux de ruissellement pluvial sur les eaux souterraines	39
Figure III.3. Diagrammes semi-logarithmiques et faciès chimiques des principales sources du Djurdjura.....	43
Figure IV.1. A) Schiste vert ou Chloritoschiste, B) schiste talqueux	46
Figure IV.2. Micaschiste.....	47
Figure IV.3. Schiste ardoisier	47

Figure IV.4. Schiste satiné d'Ain El hammam	49
Figure V.1. Esquisse géologique de la partie Ouest de la Grande Kabylie	53
Figure V.2 .Carte structurale schématique de la chaîne Maghrébide montrant la distribution des zones externes et internes de la grande Kabylie	54
Figure V.3. Les désordres aux niveaux du glissement d'Ain El Hammam.....	56
Figure VI.1. Zone d'extraction du schiste	58
Figure VI.2. Bloc de schiste.....	58
Figure VI.3. Echantillons utilisés au calcul de la teneur en eau	59
Figure VI.4. Essai de calcul de la masse volumique sèche.....	60
Figure VI.5. Matériels utilisés.....	62
Figure VI.6. Appareil d'essai VBS	63
Figure VI.7.Classification du matériau par la valeur VBS	64
Figure.VI.8. Boite de cisaillement.....	65
Figure VI.9. Appareillage automatisé.....	66
FigureVI.10. Courbes de cisaillements du matériau schiste	67
Figure VI.11.Droite intrinsèque du matériau schiste	67
Figure VII.1.Echantillon de l'essai de calcul de l'indice d'altération.....	70
Figure VII.2. a) : produits chimiques utilisées, b) : échantillons de nitrate, c) : poudre (bleu) de sulfate	71
Figures VII.3.Blocs de schiste et leurs masses initiales utilisées dans l'essai d'altération.	72
FigureVII.4. A) Bloc de schiste immergé au nitrate, B) et C) bloc de schiste après immersion du 21 juillet 2020 au 06 septembre 2020.(Les autres images correspondant aux autres échantillons sont représentées en annexe).....	72
Figure VII.5.Mise en place des échantillons dans l'étuve	74
Figure VII.6. Bloc de schiste soumis au nitrate à la fin du 10 ^{ème} cycle.....	74
FigureVII.7.Immersion des quatre échantillons de schiste concassé	79
Figure VII.8. Echantillons concassés de schiste à l'intérieur de l'étuve	80

Figure VII.9. A) :Décoloration des échantillons au cours des cycles, B) : Décoloration de l'échantillon de schiste concassé soumis au mélange de sulfate et nitrate à la fin du 10 ^{ème} cycle	80
FigureVII.10.courbes granulométrique des 10 cycles, subi par le schiste soumis à l'eau déminéralisée	81
Figure VII.11.Courbes granulométriques des 10 cycles, subi par le schiste soumis au sulfate en comparaison avec un schiste non traité	82
Figure VII.12. Courbes granulométriques des 10 cycles, subi par le schiste soumis au nitrate, en comparaison avec la granulométrie d'un schiste non traité	82
Figure VII.13. Courbes granulométriques des 10 cycles, subi par le schiste soumis au mélange de sulfate et nitrate en comparaison avec le schiste non traité	83
Figure VII.14. Comparaison des courbes granulométriques des différents échantillons au 2 ^{ème} cycle.....	84
FigureVII.15. Comparaison des courbes granulométriques du 5 ^{ème} cycle des différents échantillons	84
Figure VII.16.Comparaison des courbes granulométriques des différents échantillons au 10 ^{ème} cycle.....	85
Figure VII.17.Courbes de cisaillement de l'échantillon schiste soumis à l'eau déminéralisée	87
Figure VII.18. Droite intrinsèque du matériau schiste traité à l'eau déminéralisée.....	87
Figure VII.19. Courbes de cisaillement de l'échantillon schiste soumis au sulfate.....	88
Figure VII.20. Droite intrinsèque du matériau schiste soumis au sulfate.....	88
Figure VII.21. Courbes de cisaillement de l'échantillon schiste soumis au nitrate	89
Figure VII.22. Droite intrinsèque du matériau schiste soumis au nitrate	89
Figure VII.23. Courbes de cisaillement de l'échantillon schiste soumis au mélange de sulfate et nitrate	90
Figure VII.24. Droite intrinsèque du matériau schiste soumis au mélange de sulfate et nitrate	90

Liste des tableaux

Tableau.I.1. Groupe de minéraux et leurs usages	5
Tableau I.2. Séries d'altération de Goldich et séries de cristallisation de Bowen	16
Tableau II.1. Concentrations des eaux de ruissellement pluviale en divers polluants	19
Tableau II.2. Contaminants inorganiques	20
Tableau II.3. Contaminants organiques par familles de produits.....	21
Tableau II.4. Evolution des principaux sels dissous lors du processus d'infiltration dans le sol.....	26
Tableau III.1. Perméabilité des matériaux	40
Tableau VI.1. Résultats de l'essai de la teneur en eau	59
Tableau VI.2. Calcul de la masse volumique sèche	61
Tableau VI.3. Calcul de la masse volumique des particules solide	62
Tableau VII.1. Calcul de l'indice d'altération	71
Tableau VII.2. Masse des roches à l'état initial (le 21 juillet 2020) et leurs masses le 06 septembre 2020 après imbibition	73
Tableau VII.3. Masse des échantillons de roches soumis aux 10 cycles, en comparaison avec leurs masses initiales (mi).....	75
Tableau VII.4. Exemple de la classification des roches dures en fonction de l'état d'altération	76
Tableau VII.5. Calcul du pourcentage de perte de masse (A_p)	77
Tableau VII.6. Calcul de l'indice de désagrégation (P)	78
Tableau VII.7. Vitesse de dégradation des schistes soumis au 10 cycles.....	86
Tableau VII.8. Cohésion et angle de frottement	91

Nomenclature

W : teneur en eau

ρ_d : masse volumique sèche par pesé hydrostatique

ρ_s : masse volumique des grains solides

VBS : valeur de bleu de méthylène

σ : contrainte normale

ϕ : contrainte tangentielle

Ap : pourcentage de perte de masse

P : Indice de dégradation de la roche

C : vitesse de dégradation

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Généralité sur l'altérabilité des roches.....2

1. Introduction	3
2. Généralité sur les roches	3
2.1. Le cycle des roches	3
2.2 Les minéraux dans la roche.....	4
2.3. Les différents types de roches	6
2.4. Les minéraux constituant les roches	6
3. L'altération	7
3.1. Définition de l'altération	7
3.2. Types d'altération	8
3.3. L'altération physico-mécanique	8
3.4. L'altération chimique.....	12
3.5. L'altération Biologique	15
3.6. Vulnérabilité des minéraux aux altérations	15
4. Conclusion	16

Chapitre II : Effet des précipitations sur les roches 17

1. Introduction	18
2. La pollution du sol par les eaux usées	18
2.1. Les eaux usées	18
2.2. Le transfert de l'eau dans le sol.....	22
2.3 Le transport de l'eau dans le sol.....	23
2.4. La rétention des particules dans le sol	25
3. La pollution du sol par les pluies acides	27
3.1. Origine de la pollution de la pluie	27
3.2. Effet des précipitations d'acides.....	30

3.3. Effet des précipitations acides sur les roches	31
3.4. Effet de l'infiltration des précipitations d'acide dans le sol.....	31
4. Conclusion	32

Chapitre III : Effet des eaux souterraines sur l'altération des roches.....33

1. Introduction	34
2. L'eau souterraine	34
2.1. Origine de l'eau souterraine	34
2.2 Classification des eaux souterraines	34
2.3. Les types de nappes	35
3. Influence des eaux souterraines sur les roches et les minéraux	36
3.1. L'érosion interne.....	36
3.2. Altération des roches	36
3.3 Altération des minéraux	37
4. La pollution des eaux souterraines	37
4.1 Origine de la pollution des eaux souterraines	37
4.2. Le déplacement des contaminants vers la nappe phréatique.....	39
4.3. Les contaminants physico-chimiques des eaux souterraines et effets sanitaires.....	41
4.4. Réaction des roches par de l'eau souterraine soumise aux acides.....	43
5. Conclusion	44

Chapitre IV : Processus d'altération du schiste 45

1. Introduction	46
2. Définition du matériau schiste.....	46
3. Les différents types de schistes	47
4. La composition minéralogique des schistes	49
5. Processus d'altération du schiste	49
6. Altération des composants minéralogiques du schiste	49
6.1. Altération du quartz	49
6.2. Altération du quartz aux acides	50

6.3. Altération des micas.....	50
6.4. Altération des micas aux acides	50
6.5. Altération des feldspaths.....	50
6.6. Altération des feldspaths aux acides.....	50
7. Conclusion	51

Chapitre V : Caractérisation de la région d’Ain El Hammam 52

1. Introduction.....	53
2. La géologie de la grande Kabylie.....	53
3. Caractérisation du site d’Ain El Hammam.....	54
4. La géologie de la région d’Ain El Hammam.....	54
5. Le cadre climatique de la région	54
6. Aspect Hydrogéologique de la région	55
7. Le glissement de terrain d’Ain El Hammam.....	55
8. Conclusion.....	56

Chapitre VI : Identification du matériau étudié 57

1. Introduction.....	58
2. Localisation du matériau.....	58
3. Teneur en eau NF P94-05059.....	59
4. Masse volumique sèche d’un élément de roche par la méthode de pesée hydrostatique (NF P 94-064)	60
5. Masse volumique des particules solides (ρ_s)(NF P94- 054).....	61
6. Essai au bleu de méthylène (NF P94- 068).....	63
7. Calcul des paramètres physiques du matériau	64
8. Essai de cisaillement à la boîte de Casagrande (NF P94-071-1).....	65
9. Conclusion	68

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité	69
1. Introduction	70
2. Calcul de l'indice d'altération « i »	70
3. Essai d'altérabilité	71
4. Evaluation du taux de dégradabilité des blocs soumis à l'altération.....	77
5. Essai de dégradabilité aux essais d'altérabilité	79
6. Courbes granulométrique des différents échantillons.....	81
7. Vitesse d'évolution de la dégradation.....	85
8. Essai mécanique : cisaillement à la boîte de Casagrande	86
9. Conclusion	91
Conclusion Générale.....	92
Références bibliographiques	94
Annexes	109
Annexe 1 : Altération des blocs de schiste après imbibition	110
Annexe 2 : Altération des blocs de schiste suite aux effets cycliques	112
Annexe 3 : Altération des roches concassés	115
Annexe 4 : Courbes granulométriques des 10 cycles des différents échantillons	116

Introduction

Générale

Introduction Générale

La Kabylie est caractérisée par des terrains en pente constitués de roches schisteuses, et de fortes variations en température et pluviométrie à travers les saisons, notamment dans ses régions montagneuses telle qu'Ain El Hammam. Celle-ci est située sur une zone instable qui regorge d'eaux souterraines et possède un réseau d'assainissement mal raccordé. Elle souffre également d'instabilités et de mouvements de terrain.

Le problème soulevé est donc la relation entre la présence du schiste dans le sol et l'instabilité de la zone. Pour mieux comprendre cette problématique, nous tenterons d'apporter des éléments de réponse aux questions liées à notre étude : Quelles sont les caractéristiques du sol schisteux ? Quels sont les effets des eaux sur ce dernier ? Quel est le degré de dégradabilité du schiste par ces eaux ?

Dans cette étude, nous allons d'abord procéder à une recherche bibliographique afin de consolider nos informations et mieux cerner les effets des eaux sur la roche. Elle sera suivie d'une étude expérimentale où nous allons soumettre le schiste à des cycles de saturation-déshydratation, en immergeant la roche dans de l'eau saine ou polluée, afin de simuler les conditions auxquelles elle est exposée in situ.

Ce mémoire est structuré en sept chapitres, les cinq premiers chapitres sont consacrés à la revue bibliographique.

Dans le premier, nous présenterons quelques généralités sur les roches ainsi que leurs facteurs d'altérabilité.

Le second et le troisième traiteront, respectivement, des effets des eaux de surface et des eaux souterraines sur l'altération des roches.

Le quatrième chapitre portera sur les caractéristiques du schiste et ses processus d'altération. Le cinquième décrira la région de Ain El Hammam en insistant sur la géologie de ce site, son cadre climatique et hydrogéologique.

Les deux derniers chapitres seront consacrés à l'étude expérimentale.

Le chapitre six établira les paramètres d'identification du matériau schisteux. Enfin, dans le chapitre sept, le matériau schisteux sera soumis à série d'essais d'altérabilité afin d'évaluer sa dégradabilité sous l'effet des eaux polluées aux nitrates et aux sulfates.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui récapitulera les résultats importants, suivie de la liste de références bibliographiques et une série d'annexes.

Chapitre I

Généralités sur l'altérabilité

des roches

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

I.2.2. Les minéraux dans la roche

Toutes les roches sont formées de minéraux. Cependant, quelques rares roches sont constituées d'un minéral unique, la plupart contiennent un groupe de minéraux. Les minéraux siliceux forment le groupe le plus courant ; la plupart des roches contiennent plus de 95% de silicates. Ces minéraux sont constitués d'atomes de silicium et d'oxygène, avec des ions tels qu'aluminium, magnésium, fer et calcium. Les minéraux les plus connus contiennent des silicates en proportions importantes tels que les feldspaths, le quartz, l'olivine, le pyroxène, l'amphibole, les grenats et les micas. Un minéral peut être identifié par plusieurs propriétés physiques. Celles qui influencent majoritairement les propriétés des roches sont la structure cristalline, la dureté et le clivage. D'autres propriétés communes incluent l'éclat, la couleur, la fracturation et la densité (Vulliet et al., 2016).

D'après Demange (2009), la plupart des minéraux constitutifs des roches sont des silicates et le nombre de ceux qui appartiennent aux autres classes sont limités, on peut en citer :

- Les éléments natifs : graphite.
- Sulfures et sulfosels : pyrite, pyrrhotite.
- Halogénures : halite, fluorite.
- Oxydes : spinelles, dont magnétite et chromite, hématite, ilménite, rutil, périclase, corindon, pérovskite.
Et hydroxydes : géothite, limonites, gibbsite, diaspore, boehmite, brucite.
- Carbonates : calcite, dolomite.
- Sulfates : gypse, anhydrite, barytine.
- Phosphates : apatite, monazite.

La répartition de ces minéraux sont définis par :

- *Les minéraux natifs* sont des minéraux à un seul élément, tels que l'or, le cuivre, le soufre et le graphite (Earle, 2015).
- *Les sulfures* sont des minéraux avec l'anion (S^{-2}), et ils comprennent la galène (PbS), la sphalérite (ZnS), la chalcopryrite ($CuFeS_2$) et la molybdénite (MoS_2), qui sont les minerais les plus importants de plomb, de zinc, de cuivre et de molybdène respectivement.. Certains autres minéraux sulfurés sont la pyrite (FeS_2), la bornite (Cu_5FeS_4), la stibnite (Sb_2S_3) et l'arsénopyrite ($FeAsS$) (Earle, 2015).
- *Les halogénures* sont ainsi nommés parce que les anions comprennent les éléments halogènes chlore, fluor, brome, etc. Des exemples sont l'halite (NaCl), la cryolite (Na_3AlF_6) et la fluorite (CaF_2) (Earle, 2015).
- *Les carbonates* comprennent des minéraux dans lesquels l'anion est le complexe (CO_3^{-2}). Le carbonate se combine avec +2 cations pour former des minéraux tels que la calcite ($CaCO_3$), la magnésite ($MgCO_3$), la dolomite ($(Ca, Mg) CO_3$) et la

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

sidérite(FeCO_3). Les minéraux de cuivre malachite et azurite sont également des carbonates (Earle, 2015).

- *Les sulfates* (SO_4^{2-}) sont des minéraux constitués d'une combinaison de soufre et d'oxygène avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes. Exemples : gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), barytine (BaSO_4). On inclut dans cette classe les chromates, CrO_4^{2-} les molybdates (MO_4^{2-}) et les tungstates (WO_4^{2-}) (N'golo Togola).
- *Les phosphates* (PO_4^{3-}) sont des minéraux constitués de phosphore et d'oxygène combinés avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes. Exemples : apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$), monazite ((Ce, La, Y, Th) PO_4) On inclut également dans cette classe les arsénates (AsO_4^{3-}) et les vanadates (VO_4^{3-}) (N'golo Togola).

Tableau.I.1. Groupe de minéraux et leurs usages. Source (Cyr M.)

GROUPE	MINÉRAL	FORMULE	USAGE
ÉLÉMENTS NATIFS	Or	Au	échange, joaillerie
	Argent	Ag	joaillerie, photographie
	Cuivre	Cu	conducteurs électriques
	Diamant	C	gemmes, abrasifs
	Graphite	C	mines à crayons, lubrifiants
	Soufre	S	médicaments, produits chimiques
	Platine	Pt	catalyseurs, alliages
OXYDES	Hématite	Fe₂O₃	minerai de fer
	Magnétite	Fe ₃ O ₄	minerai de fer
	Corindon	Al ₂ O ₃	gemme, abrasif
SULFURES	Galène	PbS	minerai de plomb
	Sphalérite	ZnS	minerai de zinc
	Pyrite	FeS ₂	"or des fous"
	Chalcopyrite	CuFeS ₂	minerai de cuivre
	Bornite	Cu ₅ FeS ₄	minerai de cuivre
	Cinabre	HgS	minerai de mercure
SULFATES	Gypse	CaSO₄ ·H ₂ O	plâtre et panneaux
	Anhydrite	CaSO ₄	plâtre et panneaux
	Barite	BaSO ₄	boue de forage
CARBONATES	Calcite	CaCO₃	ciment Portland
	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	ciment Portland
	Malachite	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	minerai de cuivre, joaillerie
	Azurite	Cu ₃ (OH) ₂ (CO ₃) ₂	minerai de cuivre, joaillerie
	Rhodochrosite	MnCO ₃	joaillerie
SILICATES	quartz	SiO₂	verre, horlogerie, calculatrices
	talc	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	poudre pour bébés
	amiante	Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	isolant
	kaolinite	Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	céramique
HALOGÉNURES	Halite	NaCl	sel commun
	Fluorite	CaF ₂	fabrication des aciers
	Sylvite	KCl	fertilisants
HYDROXYDES	Limonite	FeO(OH)·nH ₂ O	minerai de fer, pigment
	Bauxite	Al(OH) ₃ ·nH ₂ O	minerai d'aluminium

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

I.2.3. Les différents types de roches

Les géologues ont coutume de classer les roches constituant le sous-sol en trois grandes catégories, qui sont cités ci-dessous :

a) Les roches magmatiques

Les roches magmatiques résultent de la solidification des magmas. Ceux qui parviennent directement à la surface forment les roches volcaniques ou effusives, les laves, dans lesquelles on n'observe à l'œil nu que très peu de cristaux (en raison d'un refroidissement rapide). Au contraire la solidification en profondeur donne les roches plutoniques dont la lenteur du refroidissement permet la croissance des cristaux, bien visibles donc à l'œil nu. Les minéraux sont essentiellement des silicates : quartz, feldspaths alcalins et plagioclases, amphiboles, micas etc. (Homand et Duffaut, 1998).

b) Les roches sédimentaires

Les roches sédimentaires forment une peau externe de la croûte terrestre, couvrant les trois quarts des zones continentales et la plupart des fonds marins. Ils varient en épaisseur jusqu'à 10 km. Néanmoins, ils ne représentent qu'environ 5% de la croûte terrestre. La plupart des roches sédimentaires sont d'origine secondaire, en ce qu'elles sont constituées de matières détritiques dérivées de la décomposition de roches préexistantes (Bell, 2017).

c) Les roches métamorphiques

Les roches métamorphiques résultent de la transformation profonde de l'état solide de roches sédimentaires ou magmatiques préexistantes sous l'effet d'une augmentation de la température et/ou de la pression. Il y a recristallisation complète des roches primitives. Les roches formées portent en général la trace de l'anisotropie du tenseur des contraintes sous lequel elles ont été cristallisées, ce qui peut se traduire par une schistosité ou une foliation accompagnée de linéation. Les roches les plus communes sont les schistes et les gneiss, beaucoup plus massifs, mais dans lesquels les minéraux apparaissent nettement orientés. Les marbres et les quartzites sont des roches massives entièrement recristallisées dans lesquelles l'orientation des minéraux (calcite ou quartz) n'est que rarement visible à l'œil nu (Homand et Duffaut, 1998).

1.2.4. Les minéraux constituant les roches

a) Les minéraux constituant les roches magmatiques

Les minéraux constituant les roches magmatiques (Javey, 1972) :

- Les minéraux essentiels des roches éruptives sont : le quartz, les feldspaths, les plagioclases, les feldspathoïdes, les micas, les pyroxènes, les péridots, les amphiboles

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

- Les minéraux accessoires sont : la cordiérite, le sphène, le corindon, le rutile, la tourmaline, Apatite, les zéolithes.

b) Les minéraux constituant les roches métamorphiques

De nombreux minéraux sont rencontrés uniquement, ou principalement, dans les roches métamorphiques. Ce groupe comprend les minéraux suivants ; actinote, andalousite, axinite, chlorite, cordiérite, épidote, fassaït grenats, graphite, hébendergite, kernite, disthène, margarite, omphacite, préhnite, pyrophyllite, riébeckite, sépiolite, serpentine, sillimanite, staurotide, talc, trémolite, vésuvianite, wollastonite, zoïsite. D'autres minéraux comme par exemple, le quartz, les feldspaths, les micas, la hornblende, l'augite, l'olivine, de même que la calcite et la dolomite, existent aussi dans les roches métamorphiques, mais se rencontrent principalement dans les roches magmatiques ou les roches sédimentaires (Schuman ,1989).

c) Les minéraux constituant les roches sédimentaires

Certains minéraux se rencontrent uniquement, ou principalement, dans les roches sédimentaires. Ce sont les évaporites, de nombreux carbonates, quelques sulfates et quelques phosphates, ainsi que la plupart des minéraux argileux. La glace fait également partie des minéraux sédimentaires, mais cela n'intéresse que les scientifiques. D'autres minéraux comme par exemple, le quartz, la calcédoine, l'opale, les feldspaths et les micas, existent aussi dans les roches sédimentaires, mais se sont généralement des minéraux des roches magmatiques (Schuman, 1989).

I.3. L'altération

I.3.1. Définition de l'altération

L'altération est un terme utilisé dans différents contextes, de nombreux chercheurs l'ont défini de plusieurs façons. Les auteurs Tricar et Cailleux (1965), ont proposé de remplacer le mot « altération » équivalent de « weathering » en anglais par le terme « météorisation » qui se définit comme « l'ensemble des modifications mécaniques, physiques et chimiques que subit une roche au contact des agents atmosphériques ». Pedro (1984), a proposé le terme « périmorphisme » pour désigner l'aspect géochimique et cristallogénique des phénomènes d'altération. Le dictionnaire de Géologie Foucault et Raoult (2005), définit l'altération de la manière suivante : « modification des propriétés physico-chimiques des minéraux et donc des roches par les agents atmosphériques, par les eaux souterraines ». Les auteurs Whalley et Warke (2005), ont défini l'altération comme « la structure irréversible et/ou dégradation minéralogique de la roche par effets cumulatifs de processus chimiques, physiques et biologiques, qui opèrent à la surface de la terre ou à proximité ». Quant à Arikan et Aydin, (2012), ils définissent l'altération comme étant un processus essentiel qui affecte les

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

propriétés mécaniques de la roche à faible profondeur et en surface par les altérations chimiques et mécaniques.

Martin (2010), montre que ce phénomène complexe qui a pour effet de désagréger et de décomposer plus ou moins toutes les roches, les préparant ainsi à l'ablation, contribue également à la formation du sol en fournissant des particules minérales comme le sable, le limon et l'argile. Le processus d'altération et son résultat dépendent de la nature de la roche mère et de la durée de son exposition à l'agressivité de l'eau et ou de l'air et de la topographie locale.

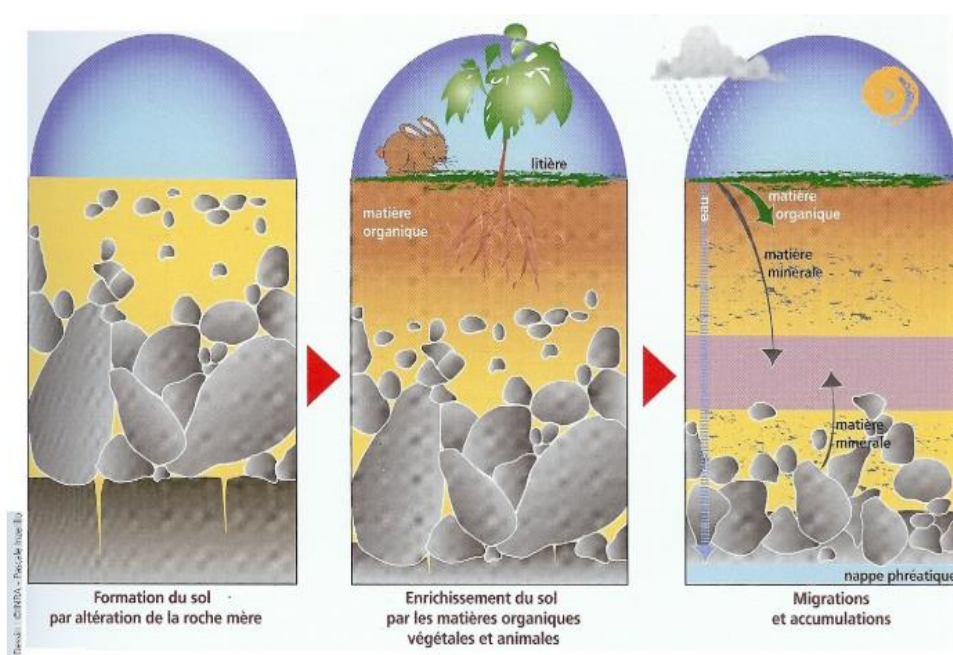


Figure I.2. *Formation du sol.* Source : Dossier INRA. Le sol. [photo] institut français de l'éducation.2009, <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/erosion/alteration>

I.3.2. Types d'altération

L'altération des roches se fait par plusieurs facteurs en effet, une roche affleurant sur un versant n'est pas inaltérable et subit les intempéries par l'action combinée de l'eau, de l'air, des fluctuations thermiques, de la végétation et de tout autre facteur environnemental (Ollier, 1969). L'altération des roches est le résultat d'un double processus de désintégration physique et de décomposition chimique de la matrice rocheuse (Derruau, 1996 ; Javey, 1972 ; Clark et al, 1982 ; Porokhovi, 1995, Le Roux, 2001, Beauchamp, 2004).

I.3.3. L'altération physico-mécanique

L'altération physique ou dite mécanique est la dégradation des minéraux ou des matériaux rocheux par des moyens entièrement mécaniques (Thornbury 1969).

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

Sreepat (2014), explique que dans ce processus, la composition chimique de la roche altérée reste inchangée et que les contraintes (internes et externes) entraînent une déformation accrue qui finit par rompre la roche, cette rupture mécanique est due en grande partie à l'abrasion, à la cristallisation (croissance de cristaux de sel), à l'isolation thermique, au déchargement (relâchement de la pression) et aux cycles de mouillage et de séchage. Les roches se désagrègent d'abord par la disparition des liaisons entre leurs cristaux, puis par la dilatation de leurs pores ou par l'ouverture de leurs fissures potentielles jointes, diaclases. L'altération se produit en surface puis éventuellement de plus en plus en profondeur, selon les lieux et les circonstances. Un certain nombre d'agents sont responsables de la désagrégation de la roche et donc de la modification du relief.

a) Les plantes (les racines)

D'après Sreepat (2014), l'altération physico-mécanique induite par les plantes survient lorsque la racine d'une plante (en particulier les gros arbres et les buissons) commence à pousser en une fissure ou un pore dans une roche. Au fur et à mesure que la plante grandit, sa racine fait de même, jusqu'à séparer la roche. Les racines des plantes peuvent fendre même les roches les plus dures. Ce processus est couramment noté dans les trottoirs et les fondations des villes, où les racines des arbres poussent par en dessous, soulevant le béton et le fissurant par la suite.

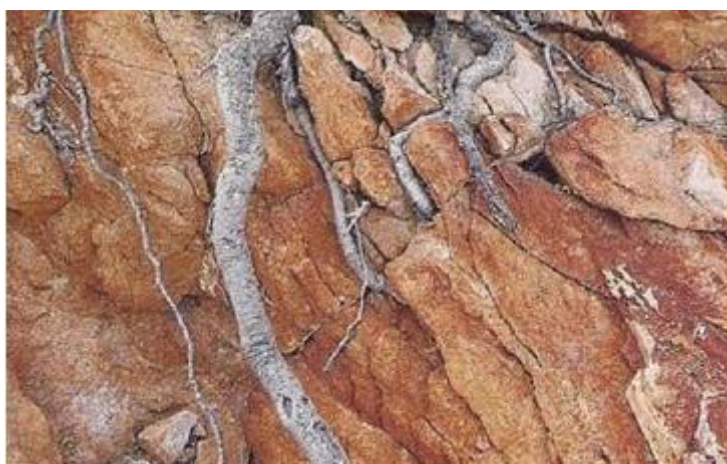


Figure I.3. Altération induite par les racines.

http://raymond.rodriquez1.free.fr/Documents/Organisme-V/Nutrition_plante/index.htm

b) Les précipitations

Les précipitations correspondent à la pluie, la bruine, la grêle, la neige et le grésil (Durand-Dastès, 2008). Les précipitations engendrent l'usure des roches par un transport de matériaux tiers (Andrèn, 2006). D'après Javey (1972), une pluie battante ou des eaux de ruissellement sont capables d'entraîner des fragments de roches. Quand l'eau est le moyen de transport, ce

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

type de lessivage peut jouer un rôle dans l'altération mécanique en surface ou au niveau des joints rocheux dans les réseaux de fractures.

c) Les variations de la température

Les variations de température s'effectuent entre le jour et la nuit, et change aussi par saisons, ces variations engendrent des phénomènes d'altération, ces phénomènes sont cités ci-dessous :

- *Gel dégel* : En cas de températures négatives, avec présence d'eau le phénomène de gel/ dégel se produit, celui-ci dégrade la roche. Les auteurs (Javey, 1972 ; Clark et al, 1982 ; Prick, 1999 ; Andrèn, 2006) affirment que lorsque l'eau gèle dans les pores et le réseau de fissures des roches, elle génère une contrainte qui peut conduire à l'endommagement voire la rupture de la structure de la roche. Ce phénomène affecte préférentiellement les versants pentus qui, en hiver, ne bénéficient pas de la protection thermique d'une couche de neige (Coque, 2002).
- *Dilatation thermique* : En cas de variation de fortes températures, une dilatation thermique se manifeste. D'après les auteurs (Hall et al, 2001 ; Yavuz et al, 2007), la dilatation différentielle des minéraux suite à des variations de température peut donner naissance à une microfissuration irréversible entre les grains (Javey, 1972). En région montagneuse, les fluctuations thermiques journalières font de ce phénomène, un processus à ne pas négliger dans l'altération des roches et en particulier dans la génération d'éboulements rocheux (Ritter et al, 1995 ; Gunzburger, 2004).
- *Mouillage séchage* : En cas de mouillage séchage qui s'opère par la forte variation de température et présence d'eau, une altération par dilatation hydrique se produit. D'après Porokhvoi, (1995), les variations de la température de l'eau à l'intérieur des micropores d'une roche provoquent déjà une certaine désagrégation, parce que le coefficient de dilatation thermique de l'eau est nettement supérieur à celui des roches. D'autre part les variations de l'humidité ont à elles seules, le pouvoir de disjoindre les cristaux par transformation d'un film d'eau inter-granulaires en gouttelette, ce qui modifie les tensions superficielles. Mais le maximum d'effet destructeur sur les roches est obtenu par la combinaison des deux effets de la variation de la température et de l'humidité.

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

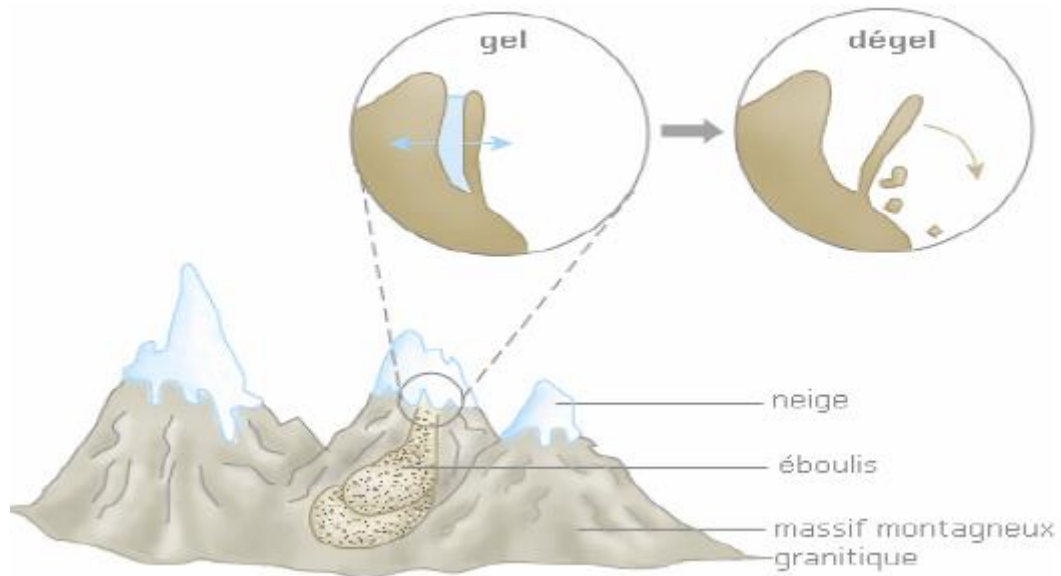


Figure I.4. Altération par variation de température.

<https://www.maxicours.com/se/cours/action-d-autres-agents-d-erosion-et-de-transport/>

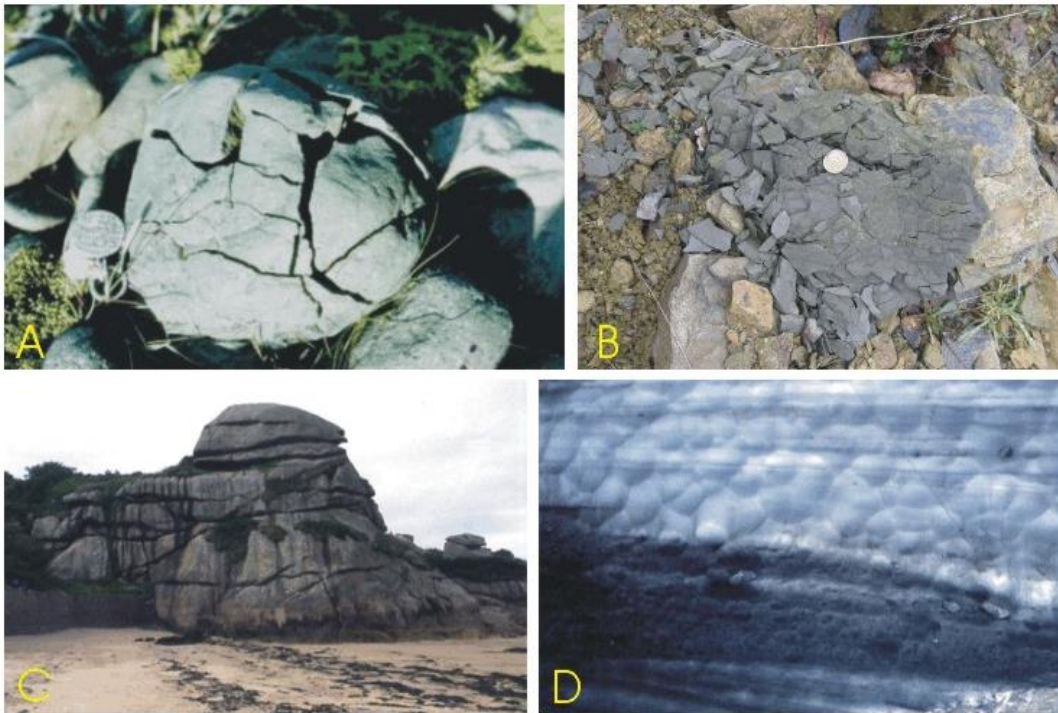


Figure I.5. Altération physique. A: fragmentation des roches (cryoclastie) d'un basalte (roche macrogélive), Islande; B: cryoclastie d'un schiste (roche microgélive), Belgique; C: joints de décompression dans un massif granitique, Ploumanach; D: glace chargée de sable et de graviers, Pyrénées.

<http://www.geolsed.ulg.ac.be/processus/processus.htm#L'ALTERATION%20CHIMIQUE>

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

d) Cristallisation ou croissance de cristaux de sel :

D'après les auteurs (Javey, 1972 ; Prick, 1999; Yavuz et al, 2007), l'eau chargée en sels pénètre dans le réseau poreux des massifs rocheux, les cristaux s'y développent. L'action combinée de la cristallisation des sels, de leur hydratation et de leur dilatation thermique peut produire des fissures au sein de la matrice rocheuse (Clark et al, 1982). Ce type d'altération concerne essentiellement les versants rocheux le long des littoraux ou en milieux urbains pollués mais peut se combiner au gel-dégel en milieu périglaciaire car la solubilité de certains sels diminue avec la température (Goudie, 1999 ; Prick, 1999). On peut avoir cristallisation de sels en zones continentales (thénardite, mirabilite). Des zones d'intense évaporation sont également sujettes à cette altération par l'augmentation de la concentration en sel (Ritter et al, 1995; Pisarenko et al, 1996).



Figure I.6. Haloclastie (cristallisation de sel) d'une croûte calcaire en milieu évaporitique).
www.geolsed.ulg.ac.be/processus/processus.htm#L'ALTERATION%20CHIMIQUE

I.3.4. L'altération chimique

L'altération chimique est un groupe de processus irréversibles de la décomposition chimique des roches, y compris la dissolution, mouvement d'éléments chimiques et précipitation de nouvelles phases. Les processus chimiques les plus importants sont : la dissolution, l'hydratation, l'hydrolyse, l'oxydation, la réduction, la carbonatation (Derwnik et al., 2008). L'altération chimique est plus rapide lorsque les températures sont plus élevées ainsi que la présence d'eau (Sreepat, 2014).

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

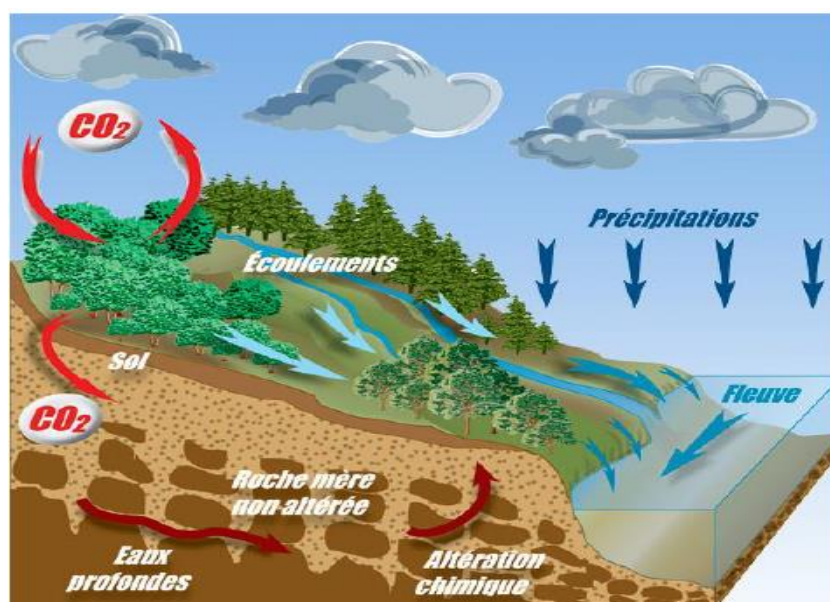


Figure I.7. Altération chimique des roches provoquée par l'eau et les gaz atmosphériques.

<http://www.ipgp.fr/fr/gc/potamologie-chimique>

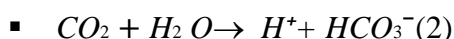
a) La dissolution

La dissolution est une altération qui affecte surtout les roches salines (Sausse et al, 2001) et les roches calcaires. Les ions qui ont été dissous, peuvent soit migrer du fait des circulations d'eau, soit modifier des minéraux existants, soit entrer dans des réactions d'échange avec d'autres minéraux (Carroll, 1970).

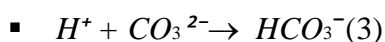
La dissolution du calcaire peut s'exprimer de la façon suivante (Salomon, 2006) :



Le carbonate de calcium ionise pour donner un cation de calcium et un anion de carbonate.

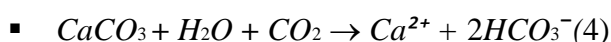


Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau en donnant de l'acide carbonique qui se dissocie en ions bicarbonates et hydrogène.



Les ions hydrogènes (2), carbonates et bicarbonates et le CO_2 constituent un système dont les équilibres se modifient notamment en fonction du pH (3). Ces équilibres chimiques conditionnent donc les proportions relatives des différents ions du système carbonaté.

On peut résumer le processus comme suit :



Les principaux facteurs qui favorisent la dissolution sont (Miserez, 1973) :

- l'abondance de l'eau disponible (et surtout son renouvellement) ;
- la présence d'un couvert végétal dense (ce qui engendre la production de CO_2 et d'acides d'origine biologique) ;

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

- un temps de contact important eau-roche carbonatée (sol jouant le rôle de compresse humide, manteaux neigeux, forte porosité, etc.).



Figure I.8. *La dissolution du gypse.* Source : Pierre Thomas. Dissolution dans du gypse. (2005). [photo]. Institut Français de l'éducation 2008. <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/erosion/alteration>

b) Hydratation /Déshydratation

Dans cette altération, les minéraux s'enrichissent ou perdent une ou plusieurs molécules d'eau. Le gonflement ou la rétraction à l'échelle du minéral assure la destruction de la roche par le développement d'une pression importante dans le réseau poreux (Javey, 1972 ; Clark et al, 1982;Woo, 2003).

c) Oxydation/ réduction

Prokhovoi (1995), explique que l'oxydation provoque la libération du fer qui se trouve fréquemment dans certains silicates et carbonates sous forme réduite de Fe^{2+} et par la suite prend la forme de Fe^{3+} . L'équilibre du réseau cristallin s'en trouve rompu. Les observations montrent que les silicates ferromagnésiens sont les plus sensibles à l'altération météorique. La réduction est plus rare en milieu naturel. Mais les eaux riches en matière organique sont réductrices et peuvent transporter le fer en état ferreux (Fe^{2+}). En milieux oxydant, la matière organique est détruite et le fer précipite à l'état ferrique.

d) L'Hydrolyse

Un autre mécanisme important de l'altération chimique est l'hydrolyse des minéraux. Le suffixe "-olyse" implique la réaction chimique ou la décomposition d'un composé chimique tel qu'un silicate (Depetris et al., 2014). D'après Beauchamp (2004), l'hydrolyse, c'est à dire

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

la destruction des minéraux par l'eau, est la principale réaction d'altération. L'hydrolyse est totale lorsque le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions).

Cas d'un feldspath sodique, l'albite :



albite + eau -----> gibbsite + acide silicique + ions

précipités + solution de lessivage

(*) Al (OH)₃ ou Al₂ O₃, 3 H₂O

Les corps résultants peuvent ensuite réagir entre eux et donner des minéraux argileux (néoformation).

I.3.5. L'altération Biologique

L'organisme biologique participe à l'altération chimique de la roche. Ces organismes sont apportés par les eaux et le vent (Dévigne, 2008). Les organismes adhérant au massif participent à son altération chimique (Saad, 2011) : algues vertes, lichens, champignons, bactéries. Ils produisent une désagrégation et une micro-division de la surface du massif ainsi qu'une attaque chimique par sécrétion d'acide oxalique produit par les lichens comme par les racines des végétaux supérieurs.

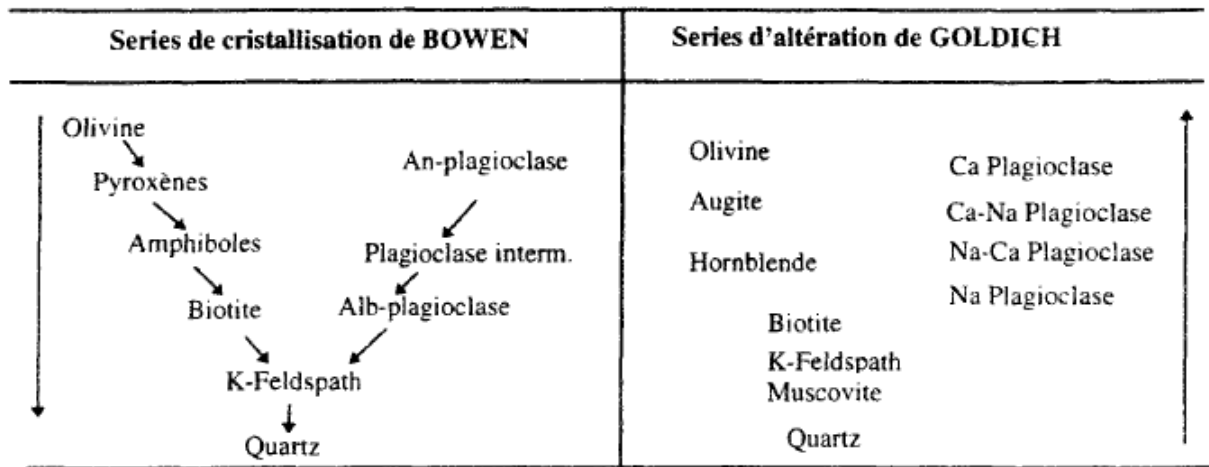
L'activité végétale et microbiologique engendre l'acidification de l'eau contenue dans le massif (respiration des racines, décomposition de la matière organique morte dans les sols, activité microbiologique), c'est ce qu'on appelle le CO₂ biogénique (Vanara, 1998) et les acides organiques. La pression partielle de CO₂ augmente dans les sols, une partie se dissout et l'autre part dans l'atmosphère (IPGP, 2008).

I.3.6. Vulnérabilité des minéraux aux altérations

Tous les minéraux ne s'altèrent pas avec la même rapidité. C'est un fait d'observation très ancien. Goldich a défini l'ordre général de "sensibilité" des principaux minéraux à l'altération (Tableau I.2). Il a fait remarquer que cet ordre d'altérabilité des minéraux est l'inverse des ordres classiques de cristallisation de Bowen. Les séries de l'altérabilité sont en relation directe avec la teneur en SiO₂ du minéral.

Chapitre I : Généralités sur l'altérabilité des roches

Tableau I.2. *Séries d'altération de Goldich et séries de cristallisation de Bowen.*



I.4. Conclusion

Les roches primaires sont transformées en roches métamorphiques et sédimentaires et magmatiques au cours du temps sous l'action de divers agents géologiques. Ces roches sont désintégrées et décomposées par des phénomènes d'altération sous une forme utile, qui est le sol. Cependant, différentes roches sont composées de divers minéraux, ce qui entraîne des taux d'altération différents des roches. L'altération se divise en altération physico-mécanique, altération chimique et altération biologique.

Chapitre II

Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

II.1. Introduction

L'évolution de l'industrie ainsi que les sources de pollution difficilement maîtrisables, les eaux pluviales qui sont généralement mélangées aux eaux usées, ou devenues acides par la pollution de l'atmosphère, se propagent sur le sol et sous-sol. Dans ce chapitre, les divers moyens de transport de polluants dans le sol et leurs conséquences sont présentés.

II.2. La pollution du sol par les eaux usées

Le sol est soumis à la pollution des eaux usées dans les sites urbains et les espaces ruraux par divers produits chimiques et agricoles. Les masses d'eau sont polluées par deux voies : les rejets issus d'une activité humaine et le ruissellement des eaux de pluie sur des surfaces polluées (Baumont et al, 2004).

II.2.1. Les eaux usées

Swadogo, (2018) définit les eaux usées, et leur classement comme suit :

Les eaux rejetées après leurs utilisations pour les activités domestiques, industrielles, artisanales ou agricoles et celles déversées à la suite d'évènements pluvieux constituent les eaux usées. Les eaux usées sont composées d'environ 99% d'eau et 1% de matières solides en suspension, colloïdales et dissoutes. Les conséquences de l'émission d'eaux usées non traitées ou maltraitées peuvent être classées en trois catégories :

- Effets nocifs pour la santé humaine ;
- Impacts négatifs sur l'environnement ;
- Répercussions néfastes sur les activités économiques.

Ces eaux usées proviennent de diverses sources de pollution.

II.2.1.1. Origine des eaux usées

Selon Eckenfelder, (1982), les eaux usées proviennent de quatre sources principales :

- a) Les eaux usées domestiques ;
- b) Les eaux usées industrielles ;
- c) Les eaux usées de pluie de ruissellement dans les villes ;
- d) Le ruissellement dans les zones agricoles.

a) Les eaux usées domestiques :

Les eaux usées domestiques comprennent les eaux ménagères (eaux de toilette, de lessive, de cuisine) et les eaux vannes (urines et matières fécales).

Ces eaux contiennent des matières minérales (chlorures, phosphates, sulfates, etc.) et des matières organiques constituées de composés ternaires, tels que les sucres et les graisses (Vaillant, 1974).

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

b) Les eaux pluviales

Les eaux qui ruissellent sur les toitures, les cours, les jardins, les espaces verts, les voies publiques et les marchés entraînent toutes sortes de déchets minéraux et organiques : de la terre, des limons, des déchets végétaux, etc., et toutes sortes de micropolluants (hydrocarbures, pesticides, détergents etc. (Desjardins, 1997). Le tableau (II.1) résume les concentrations en polluants des eaux pluviales qui ruissellent sur différentes surfaces urbaines.

Tableau II.1. Concentrations des eaux de ruissellement pluviale en divers polluants (Chocat et al., 1997).

	Eau de ruissellement urbain	Eau de ruissellement de toitures	Eau de ruissellement de routes
Plomb ($\mu\text{g/l}$)	20 à 200 (1)	23 à 104 (2)	128 à 311 (2)
Cadmium ($\mu\text{g/l}$)	0,28 à 19,8 (2)	0,7 (2)	1,9 à 6,4 (2)
Zinc ($\mu\text{g/l}$)	468 (2)	24 à 2900 (2)	220 à 603 (2)
Cuivre ($\mu\text{g/l}$)	13 à 28,6 (2)	27 à 235 (2)	62 à 108 (2)
Ammoniac (mg/l)	2,4 (2)	0,7 à 4 (2)	0,2 à 1 (2)
Nitrite (mg/l)	3,8 (2)	0,2 à 0,6 (2)	0,6 à 2,1 (2)
Nitrate (mg/l)	0,14 (2)	0,3 (2)	0,02 (2)
Phosphates (mg/l)	0,5 (2)	0,3 (2)	1,5 (2)
Sels (Cl (mg/l)) (SO_4^{2-})	31 (2)	0,8 (2) 5,6 (2)	6 à 125 (2) 16 à 62,2 (2)
HAP totaux (ng/l)	114 (2)	500 (2)	240 à 3100 (2)
Phénol ($\mu\text{g/l}$)	-	-	-
PCB	-	-	-

c) Les eaux usées industrielles

Les eaux usées industrielles regroupent toutes les eaux qui sont en principe rejetées par l'usine dans le milieu extérieur, après avoir contribué à la fabrication, au nettoyage, au transport, au refroidissement (Woodard, 2001). Selon le rapport de l'agence des nations unies chargée des questions de l'eau (UN water, 2017), l'industrie est l'activité humaine qui génère le plus d'eaux usées. La composition et la concentration des effluents industriels sont extrêmement variables suivant le type d'industrie (Shi, 2000).

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

II.2.1.2. Les composants des eaux usées

Les composés chimiques des eaux usées diffèrent et varient, en plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, en fonction des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques et des hydrocarbures (Mohsen et Jaber, 2003).

a) Les matières en suspension

L'auteur Faby (1997), définit les matières en suspension (MES) que ce sont des matières biodégradables pour la plupart, les micro-organismes sont le plus souvent absorbés à leur surface et sont ainsi « transportés » par les MES. Elles donnent également à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur.

b) Les micropolluants organiques et non organiques

Les micropolluants sont des éléments présents en quantité infinitésimale dans les eaux usées (Baumont et al., 2004). Le tableau (II.2) liste les contaminants inorganiques, quant au tableau (II.3) il liste les contaminants organiques par famille de produits.

Tableau II.2. Contaminants inorganiques (Lemière et al., 2001).

Produit	Polluants types
Métaux lourds	V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Sn, Hg, Tl, Pb, Bi
Non-métaux et métalloïdes associés	As, Se, Sb, Te
Anioniques et autres	Nitrates, Sulfates, Nitrites et Fluorures- Chlorures- Cyanures

Avec : V : vanadium, Cr : chrome, Mn : manganèse, Co: cobalt, Ni : nickel, Cu: cuivre, Zn: zinc, Ag: argent, Cd : cadmium, Hg: mercure, Tl : thallium, Pb : Plomb, Bi : bismuth, As : Arsenic, Se : sélénium, Sb : antimoine, Te : tellurium.

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

Tableau II.3. *Contaminants organiques par familles de produits* (Lemière et al, 2001).

Familles de produits	Polluants types	Molécules chimiques types (abréviations: voir § 2.2.3 et A 1.2)	Familles de comportement
Hydrocarbures ou huiles minérales type carburants, combustibles	Essence, diesel, fuel, naphta, goudrons...	- alcanes (hydrocarbures aliphatiques) - cyclones (hydrocarbures aliphatiques cycliques) -hydrocarbures aromatiques monocycliques -aromatiques polycycliques (HAP)	BTEX, certains CAV (volatils)
Produits organiques industriels	Bases de chimie de synthèse Solvants Traitements	Hydrocarbures aliphatiques et aromatiques halogens (chlorés, fluorés, bromes, iodés) Aromatiques monocycliques, substitués (halogénés, phénolés, nitrates) ou non Aromatiques polycycliques (HAP), Composés Phénoliques, Phtalates PCB, PCT, Dioxine, furanes	COV halogénés (volatils) Certains DNAPL (denses) SVOC halogénés (semi-volatils) La plupart des CFC
Phyto-Sanitaires	Herbicides, Insecticides, acaricides, raticides et fongicides	Amides, urées, sulfonylurées, triazines, acides aryloxyalkanoïques, diphenyl-éther, carbamates... Organophosphorés, organochlorés et pyréthoïdes, azoles, carbamates, dithiocarbamates...	Principale source de pollution diffuse dans l'environnement
Autres	Tensioactifs Militaires	Détergents anioniques et cationiques Substances à usage militaire, explosifs	Tensioactifs PEP

1) Métaux lourds et éléments traces

D'après Baumont et al. (2004), les métaux lourds que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux ; les plus abondants (de l'ordre de quelques µg/l) sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc.) sont présents à l'état de traces. Leur origine est multiple : ils proviennent, selon Cauchi et al. (1996) « des produits consommés au sens large par la population, de la corrosion des matériaux des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels ».

2) Les micropolluants organiques

Les micropolluants d'origine organique sont extrêmement nombreux et variés, ce qui rend difficile l'appréciation de leur dangerosité. Ils proviennent de l'utilisation domestique de détergents, pesticides, solvants, et également des eaux pluviales : eaux de ruissellement sur les terres agricoles, sur le réseau routier, etc. En raison de la faible solubilité de ces éléments organiques, on les retrouvera concentrés dans les boues (Faby, 1997).

Ils peuvent aussi provenir de rejets industriels quand ceux-ci sont déversés dans les égouts ou même des traitements de désinfections des effluents par le chlore (Xanthoulis, 1993).

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

3) *Les substances nutritives*

D'après Faby (1997), l'azote, le phosphore, le potassium, et les oligo-éléments, le zinc, le bore et le soufre, indispensables à la vie des végétaux, se trouvent en quantités appréciables, mais en proportions très variables par rapport aux besoins de la végétation, dans les eaux usées épurées ou non. D'une façon générale, une lame d'eau résiduaire de 100 mm peut apporter à l'hectare :

- de 16 à 62 kg d'azote ;
- de 2 à 69 kg de potassium ;
- de 4 à 24 kg de phosphore ;
- de 18 à 208 kg de calcium ;
- de 9 à 100 kg de magnésium ;
- de 27 à 182 kg de sodium.

II.2.2. Le transfert de l'eau dans le sol

Sous nos climats, l'apport d'eau au sol se fait sous forme de pluie, neige, rosée et brouillard. Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol: une part est évaporée directement pendant et après la pluie; les gouttes peuvent être interceptées en partie par le feuillage. L'eau qui atteint le sol ruisselle, s'infiltre dans le sol. Les racines absorbent cette eau que la tige et les feuilles évaporent par transpiration. Une fraction réduite finalement gagne la profondeur et atteint la nappe (Beauchamp, 2006).

L'eau en s'infiltrant, n'étant pas seulement un agent altérant, mais également un agent de transport des différents produits des ménages, des produits de l'altération sous formes dissoutes ou particulaires (Haddad et Melbouci, 2019).

II.2.2.1. Libération des polluants

La libération des polluants vers l'environnement ne s'effectue pas de façon homogène, et elle dépend aussi bien des polluants que de la nature des solides porteurs et elle s'effectue par les vecteurs suivants (Lemièrre et al., 2001):

- Le Ruissellement des eaux de pluie ou de surface à la surface de la zone polluée, ou du tas de solides pollués : les polluants sont alors convoyés par l'eau de surface, jusqu'à l'infiltration dans le sol ;
- L'infiltration des eaux de pluie ou de surface à travers la surface de la zone polluée, ou du tas de solides pollués, puis dans la zone non saturée sous-jacente ; les polluants sont alors convoyés par l'eau percolant vers les nappes ;
- La dispersion aérienne des polluants (poussières au vent, évaporation des polluants volatils), suivie de retombées sur les sols environnants sous forme de pollution diffuse (contamination des eaux).

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

II.2.3. Le transport de l'eau dans le sol

L'eau est le vecteur principal des matières, capable de transferts en tous sens. En climat tempéré, ou les précipitations surpassent l'évaporation, les migrations descendantes dominent. L'eau transporte les particules dans les deux sens ascendant et descendant (Gobat et al., 2010).

II.2.3.1. Migration descendante

a) Percolation

La percolation est le mouvement de l'eau dans un milieu poreux sous le seul effet de la gravité (Musy et al., 1991), (Richter, 1987).

b) Lixiviation

La lixiviation est le transport convectif des particules dissoutes dans l'eau ou dans la solution de sol (Rivière, 1998).

La difficulté d'identification et quantification des polluants contenus dans les lixiviats, rend difficile le traitement de ces derniers (Chu *et al.*, 1994). Plusieurs critères influencent la formation des lixiviats et par conséquent la charge en polluants. McBean *et al.* (1995) énumèrent cinq principaux facteurs, à savoir la composition des déchets, la quantité de l'eau infiltrée, le taux d'humidité dans les déchets, la hauteur des cellules dans lesquelles les déchets sont enfouis et la température à l'intérieur de ces cellules. L'humidité contenue dans les déchets ainsi que les eaux de filtration vont initier l'hydrolyse des matières complexes, constituants les déchets (El Hassni, 2016).

c) Lessivage : Le lessivage désigne par (Gobat et al., 2010) l'entraînement mécanique des particules fines du sol.

Martinelli (1999), définit le lessivage comme étant le transport convectif des particules ou des colloïdes en suspension, par l'eau ou par la solution de sol. Le terme « colloïde » est utilisé pour caractériser des composés de petite taille, entre la molécule et la particule, c'est à dire d'une taille comprise entre 1 nm et 1 µm. Leur solubilité est très faible mais elles possèdent des propriétés chimiques qui leur confèrent une forte capacité d'adsorption (notamment grâce à leur grande surface spécifique). Elles jouent donc le rôle de transporteur de polluants.

d) La diffusion : Benosman (2012), définit la diffusion comme étant un processus d'entraînement mécanique valable uniquement pour les particules dont la dimension est inférieure au micron.

e) Chéluviation : Gobat et al. (2010), définissent la chéluviation comme étant l'entraînement de complexes organométalliques, les chélates, dans des conditions généralement réductrices et acides.

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

f) La décantation : La décantation est un processus de séparation des phases liquide et solide sous l'action des forces de pesanteur (Martinelli, 1999). Pour qu'il y ait décantation, les particules solides doivent donc être plus denses que l'eau de telle sorte que les forces de gravité et l'entraînement dû au mouvement de l'eau l'emportent sur la résistance due aux frottements de l'eau et aux interactions entre les particules (Gautier, 1998). Il a été établi qu'une grande partie des polluants était fixée sur les matières en suspension (notamment les métaux lourds tels que le plomb, le zinc ou le cuivre ou certains hydrocarbures) d'où l'importance de ce phénomène dans les processus de dépollution (Martinelli, 1999).

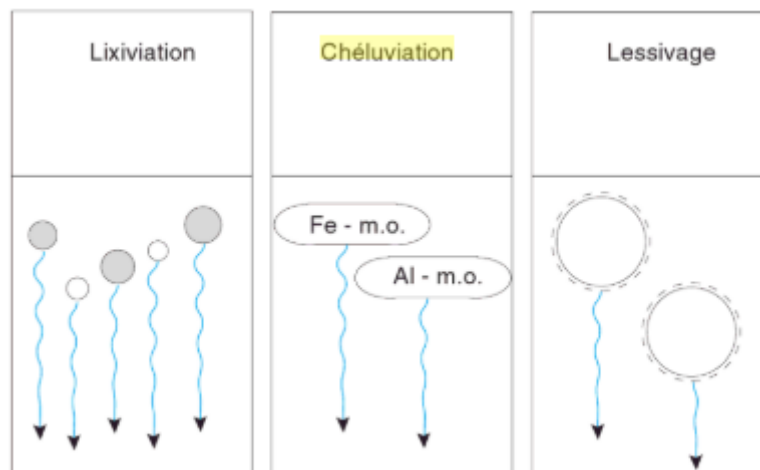


Figure II.1. Principaux transferts descendant de matière dus à l'eau dans le sol (Gobat et al., 2010).

II.2.3.2. Migration ascendante

Trois types de migrations ascendantes où l'eau est le vecteur principal ont été reconnus :

a) Les remontées par évaporation

Gobat et al. (2010), définissent ce processus comme étant une partie de l'eau qui pénètre dans le sol puis s'évapore de nouveau dans l'atmosphère, soit directement soit par l'intermédiaire des plantes: l'ensemble de ces pertes en eau constitue l'évapotranspiration. L'évaporation se fait surtout à la surface du sol. Même pendant la pluie, une partie de l'eau est immédiatement ré-évaporée car l'atmosphère n'est pas saturée en eau. Le départ de l'eau superficielle fait remonter l'eau des zones plus profondes transportant ainsi des particules fines.

b) Les remontées par ascension capillaire et/ou fluctuation d'une nappe phréatique

« En période sèche, le niveau de la rivière baisse et elle n'est plus alimentée que par les eaux souterraines, dont le niveau s'abaisse en conséquence. En période humide, la rivière reçoit les eaux de ruissellement, son niveau remonte transportant ainsi des particules fines »(BRGM, 1993).

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

c) Les remontées par le cycle biologique

Gobat et al. (2010), expliquent que parmi les agents qui assurent les remontées, les plantes vasculaires, en particulier les arbres, sont souvent capables de contrebalancer les migrations descendantes, maintenant ainsi le sol à un certain degré d'évolution. Pour se nourrir, elles pompent les bioéléments par leurs racines et les amènent dans les feuilles ; ces bioéléments retournent ensuite à la surface du sol par pluviolixiviation, bouclant ainsi la partie biologique du cycle biogéochimique.

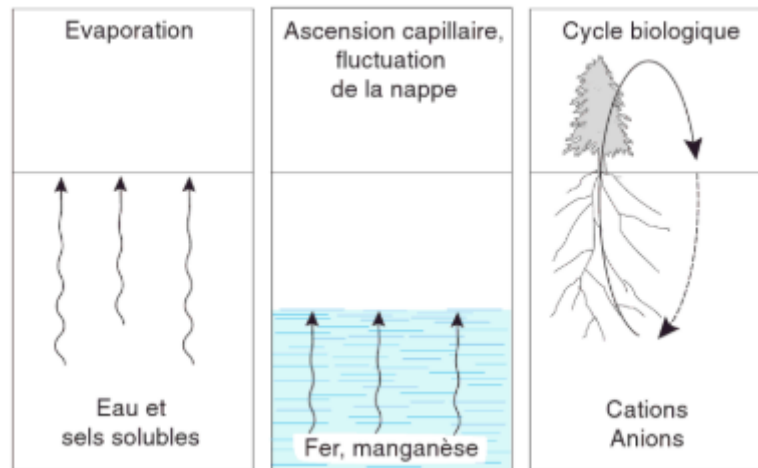


Figure II.2. Principaux transferts ascendants de matière dus à l'eau dans un sol (Gobat et al., 2010).

II.2.4. La rétention des particules dans le sol

Le comportement du sol s'avère souvent difficile à appréhender du fait de la complexité des interactions entre la matrice solide du sol et l'eau qui s'infiltre, ou entre les différentes substances (Vauclin, 1993).

La fraction dissoute des polluants est supposée migrer dans le sol à la même vitesse que l'eau (Martinelli, 1999). Cependant la capacité de rétention ou fonction de filtration, décantation (c'est la capacité du sol à limiter la migration des contaminants vers d'autres horizons) permettent de retenir à la surface des ouvrages ou dans les premiers centimètres de sol l'essentiel des polluants présents dans le ruissellement sous forme particulaire (Sage, 2018).

La décantation affecte les particules les plus grossières qui s'accumulent à la surface du sol tandis que la filtration peut, selon la nature du sol et des dépôts en surface (qui participent également à la filtration), donner lieu à une rétention des particules plus fines (Citeau, 2008 ; Tedoldi, 2017). La capacité de ces particules à migrer vers les horizons plus profonds du sol (sous-sol et nappes) dépend des paramètres cités par (Benosman, 2012) :

- Le milieu poreux : décrit par la porosité le diamètre et la forme des pores, le diamètre et la forme des grains dans le cas d'un filtre granulaire ;
- Les particules présentes dans la suspension : elles sont caractérisées par leur concentration, leur taille, leur forme et leur densité ;

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

- Le fluide : il est caractérisé par le débit d'écoulement, la viscosité, la densité, le pH, la force ionique et la température dans le milieu.

L'évolution de différents paramètres en fonction de la distance de filtration dans le sol est donnée par le tableau (II.4) d'après J.M. Toups cité dans (Detay, 1997). Ce tableau dresse le bilan de l'évolution des principaux sels dissous dans l'eau de recharge lors du processus d'infiltration dans le sol.

Tableau II.4. Evolution des principaux sels dissous lors du processus d'infiltration dans le sol (Detay, 1997).

Eléments dosés	Surface	0.6 m	1.2 m	1.8 m	2.5 m
Eléments inchangés					
Sodium (Na) en mg/l	152	120	142	140	138
Sulfates (SO ₄) en mg/l	164	160	164	161	168
Chlorures (Cl) en mg/l	126	134	131	130	126
PH	8.02	7.69	7.87	7.84	7.78
Eléments qui augmentent					
Calcium (Ca) en mg/l	60.8	132	127	139	138
Magnésium (Mg) en mg/l	19.9	20.9	19.4	17.9	30.1
Bicarbonates (HCO ₂) en mg/l	385	369	336	395	487
Total substances dissoutes	1011	994	1050	1080	1200
Dureté totale (CaCO ₃)	234	411	398	422	520
Eléments qui diminuent					
Potassium (K) en mg/l	14.5	13	15.4	12.6	5.1
Ammonium (NH ₄ ⁺) en mg/l	40	0	0	0	0
Phosphates (PO ₄) en mg/l	5.4	0.6	10	0.3	0.2
Demande chimique en O ₂	39.3	10.4	9.7	17	14.6

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

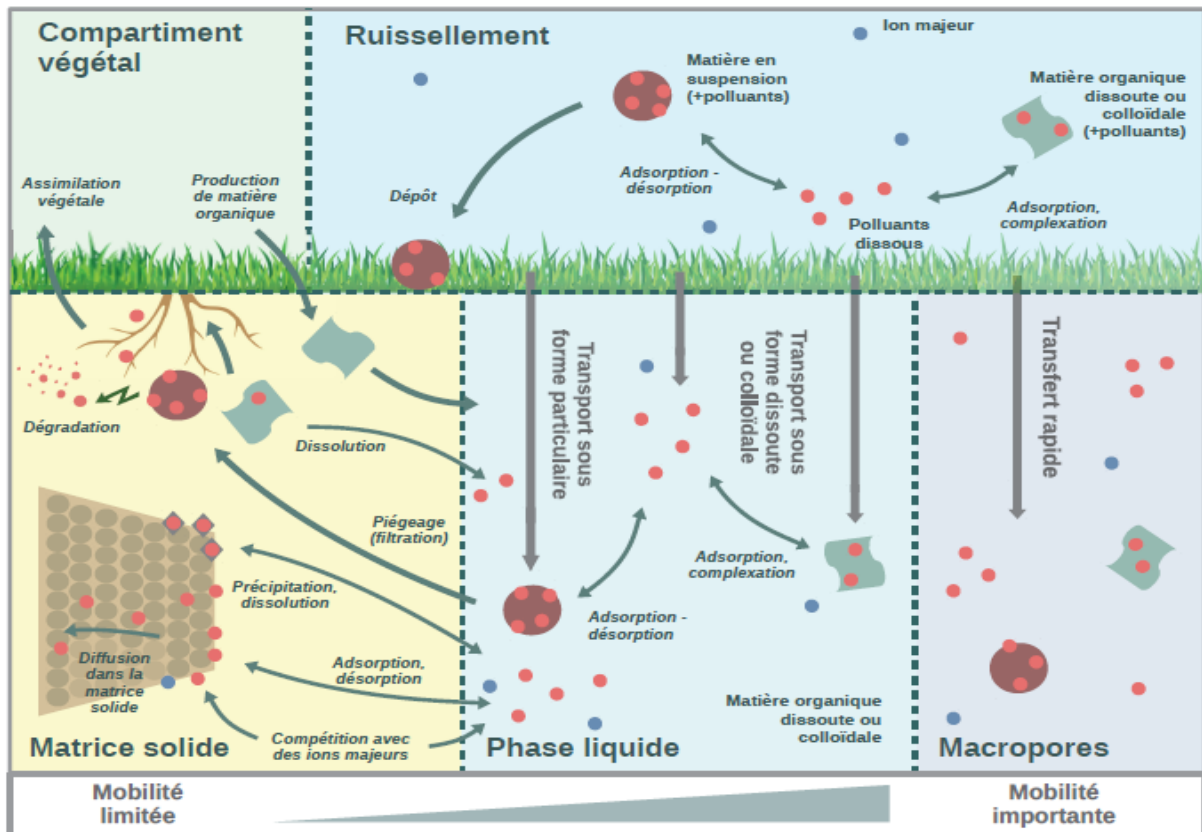


Figure II.3. Schéma de synthèse des processus impliqués dans la rétention et le transfert des contaminants dans le sol (TEDOLDI et al., 2016).

II.3. La pollution du sol par les pluies acides

Les pluies acides sont définies comme la présence d'acide dans l'eau de pluie, dont les excès d'acides naturels résultant des activités humaines. Cette contribution anthropique se compose principalement d'acide sulfurique avec une quantité moindre et plus variable d'acide nitrique (Livingston, 2016). Les pluies acides sont les facteurs les plus dangereux des pollutions locales (Mohajan, 2018).

Les dépôts acides (pluies acides) sont définis comme les acides atmosphériques déposés sur la terre sous forme de dépôts humides (neige, pluie, brouillard de grésil, grêle, rosée, etc.), et les dépôts secs (gaz, particules, vapeur, et aérosols) qui sont créés à partir de la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.) et d'autres processus industriels par le biais de réactions chimiques complexes (Baedecker et al., 1992 ; Kita et al., 2004).

II.3.1. Origine de la pollution de la pluie

La composition des pluies dépend de la nature et de la quantité des composés (gaz, gouttelettes, particules) contenus dans l'atmosphère. Trois sources sont généralement définies : marine, anthropique et terrigène (Loye-Pilot, 1995 ; Klein, 1998 ; Celle, 2000). La figure II-4 résume les différentes sources des éléments.

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

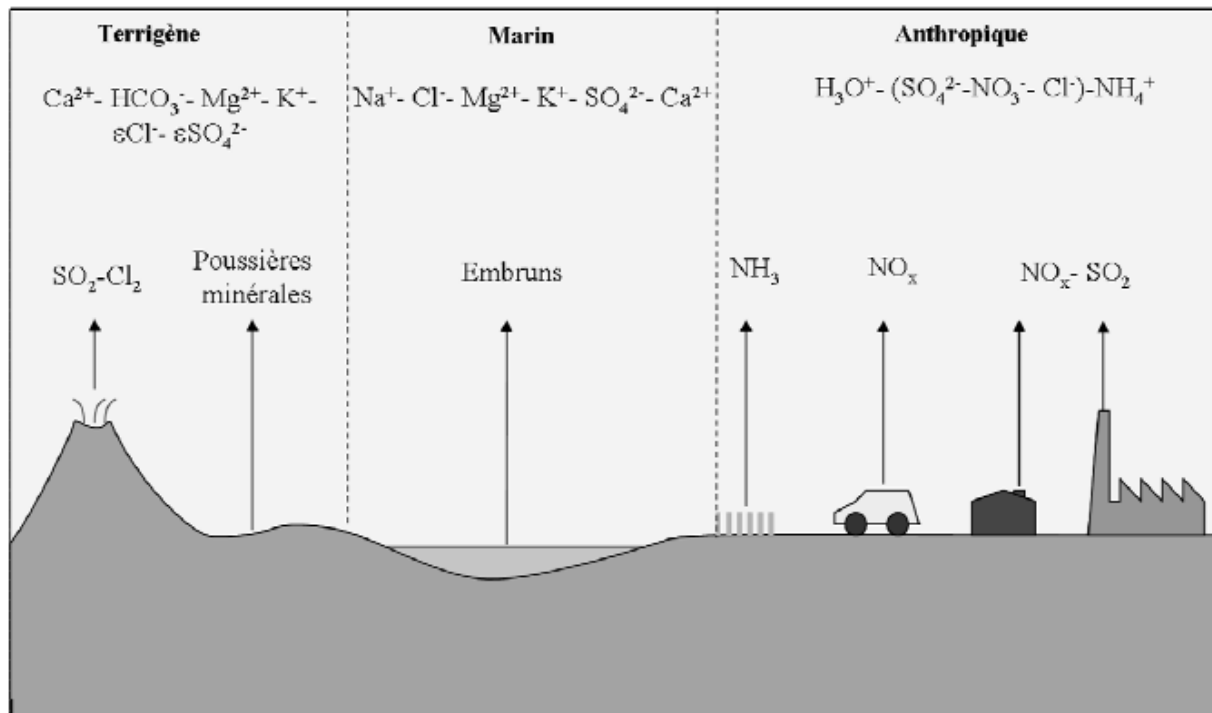


Figure II.4. Principales sources de composés chimiques dans l'atmosphère (Celle, 2000).

a) Eléments terrigènes

Bertrand, (2009) explique ce processus de pollution par l'origine des éléments terrigènes dans l'atmosphère qui résulte d'un processus mécanique, par action du vent sur les surfaces continentales. Ce processus est principalement à l'origine du mode grossier des aérosols (Diamètre $> 1 \mu\text{m}$). Les éléments principalement associés à la source terrigène sont le calcium, le magnésium. A l'échelle du globe, les principales zones de génération de poussières éoliennes sont les zones désertiques, notamment le Sahara, dont les poussières mobilisées peuvent atteindre l'Europe.

b) Eléments liés à la source marine

Bertrand, (2009) explique ce processus de pollution sur les océans, par la génération d'aérosols marins qui résulte du phénomène de bubling (pétilllement) de l'eau de mer. Sous l'action du vent, la crête des vagues se brise entraînant dans l'eau des bulles d'air qui, en éclatant à la surface, projettent des microgouttelettes d'eau de mer. Ces dernières sont emportées par le vent puis desséchées, donnant des aérosols dont la composition chimique est voisine de celle du sel de mer.

c) Elément liés à l'activité anthropique

D'après Oja (2001), les produits chimiques acidifiants les plus souvent présents dans les précipitations acides sont l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide nitrique (HNO_3), Ils sont formés respectivement à partir du dioxyde de soufre (SO_2) et d'oxydes d'azote ($\text{NO}_x = \text{NO}$ et NO_2) émis dans l'atmosphère depuis des sources anthropiques comme des centrales

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

électriques, des fonderies et des véhicules. Ces substances se dispersent dans l'atmosphère et sont transportées dans la direction du vent sur des centaines ou des milliers de

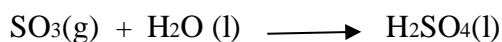
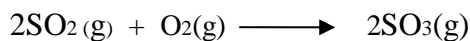
Kilomètres tout en étant transformées en acides par des processus chimiques. Elles finissent par retomber à la surface de la terre sous forme de dépôts humides dans les précipitations ou sous forme de dépôts secs, elles peuvent alors causer des dommages aux écosystèmes sensibles.

Les principaux composés chimiques influant à l'atmosphère sont présentés ci-dessous :

- **Le dioxyde de soufre (SO_2)**

Magdelaine, (2019) explique que dans les régions industrielles, le dioxyde de soufre émis dans l'atmosphère peut se transformer en trioxyde de soufre (SO_3) et acide sulfurique (H_2SO_4) en association avec les particules, le soufre est une impureté contenue dans presque tous les combustibles fossiles, notamment le fuel et le charbon ; leur combustion oxydant le soufre en oxyde de soufre. Les principales sources de ce gaz sont les centrales thermiques, les centres de production de chauffage et les grosses installations de combustion de l'industrie.

La formation de l'acide sulfurique H_2SO_4 est expliquée par les formules suivantes:



- **Les oxydes d'azote (NO_x)**

Ces polluants sont principalement émis par les voitures à motorisation diesel et les éclaircs (Magdelaine, 2019). Les nitrates dérivent des oxydes d'azote présents dans la troposphère qui sont principalement émis sous la forme de monoxyde d'azote NO , lors de la combustion de carburants (source essentielle dans l'hémisphère Nord) ou de la biomasse (Bertrand, 2009).

Le NO se transforme très rapidement en dioxyde d'azote NO_2 (Finlayson-Pitts et Pitts, 1986) et on évalue communément la teneur en oxyde d'azote dans l'atmosphère par la somme $NO_x = NO + NO_2$.

Les NO_x sont éliminés de l'atmosphère par oxydation de NO_2 en acide nitrique HNO_3 (Calvert et Stockwell, 1984). Cet acide nitrique peut réagir ensuite sur différentes particules ou gaz présents dans l'atmosphère et donner des composés solubles dans l'eau selon les réactions suivantes (Klein, 1998 ; Sicard, 2006).

Le schéma dans la figure (II.5) donne les transformations possibles de l'azote.

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

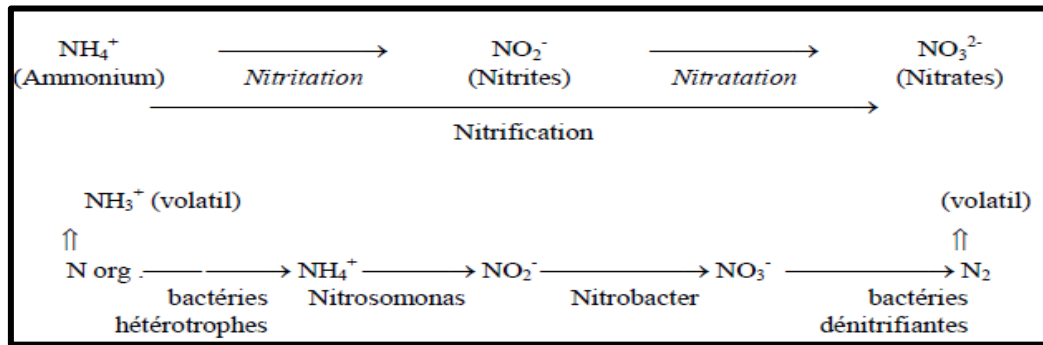


Figure II.5. Schéma des transformations possibles de l'azote (Martinelli, 1999).

- **L'ammonium (NH_4^+)**

Il provient de la réaction entre NH_3 (g) et les acides atmosphériques qui conduit à la formation de sulfates d'ammonium et nitrates d'ammonium (Bertrand, 2009). NH_3 (g) est principalement produit par l'agriculture ou à proximité de sites industriels de production ou d'utilisation d'ammoniaque.

II.3.2. Effet des précipitations d'acides

Quand elles se déposent sur la surface de la terre, les pluies acides peuvent endommager les écosystèmes aquatiques et les bâtiments. Avec les polluants qui leurs sont associés (SO_2 , NO_x , particules de sulfate SO_4 et Ozone), les pluies acides peuvent également dégrader les forêts et les cultures et porter atteinte à la santé des êtres humains (Ferguson et Jeffries, 2013).

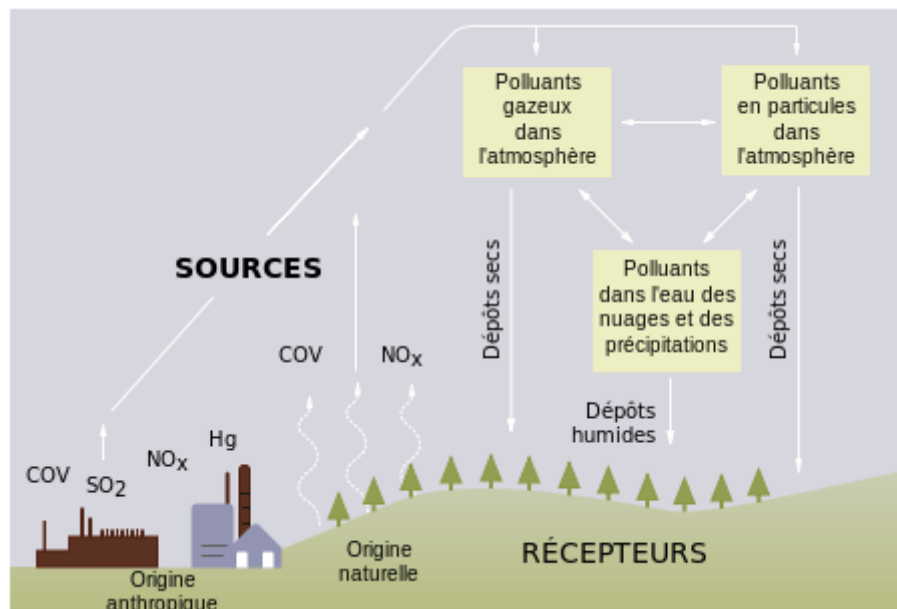


Figure II.6. Schéma explicatif de la formation des pluies acides (EPA, 2007b).

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

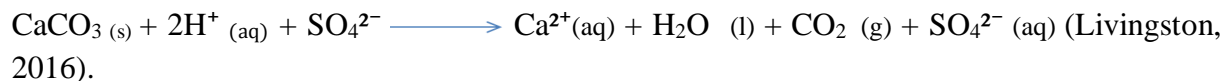
II.3.3. Effet des précipitations acides sur les roches

La roche mère des milieux sensibles aux dépôts acides est composée de granit, de quartz et de schiste, et les sols sus-jacents sont habituellement peu profonds et pauvres en substances chimiques pouvant neutraliser l'acidité (Oja, 2001). L'acide dissout les roches calcaires et carbonatées qui dispersent alors leurs particules alcalines dans les cours d'eau. Ce qui complique ensuite le traitement de l'eau potable (Magdelaine, 2018). Les pluies acides de pH 3 à 5 sont connues sous le nom de cancer des pierres (Mohajan, 2018).

L'eau de pluie mélangée avec du dioxyde de carbone dans l'air forme l'acide carbonique faible (H_2CO_3) avec un PH de 5,6



-Le contact de la pluie acide avec les roches carbonatées (CaCO_3 principale composition du calcaire) neutralise l'acidité par la réaction suivante :



-Le contact de la pluie acide réagit avec les carbonates de calcium (CaCO_3) composant majeur du calcaire, pour former de la poudre de sulfate de calcium (gypse), par la réaction suivante :



-Le dépôt sec a lieu dans les intervalles entre les événements pluvieux. Les gaz acides contenant du soufre sur les particules réagissent de diverses manières avec la surface des roches carbonatées pour produire du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) qui a une solubilité supérieure à celle de la calcite, par la réaction suivante :



-Même en l'absence d'acidité anthropique, les roches carbonatées se dissoudront dans l'eau de pluie, car la calcite a une légère solubilité dans l'eau pure (Livingston, 2016).

Lorsque l'eau de pluie acide tombe sur du calcaire ou de la craie, une réaction chimique se produit, de nouvelles substances solubles se forment dans la réaction. Ceux-ci se dissolvent dans l'eau, puis sont emportés, altérant la roche.

II.3.4. Effet de l'infiltration des précipitations d'acide dans le sol

Giguère (2013), explique le déroulement de la pollution du sol par l'acidité des précipitations qui est due à l'acide sulfurique et à l'acide nitrique qu'elles contiennent. L'acide sulfurique est notamment responsable du lessivage des cations basiques contenus dans le sol. En effet, les colloïdes qui composent le sol ont des charges majoritairement négatives. Ils ont ainsi la propriété de fixer à leur surface et d'échanger des ions positifs notamment, les cations présents dans le sol. Elle se mesure par la capacité d'échange cationique (CEC). Lorsque les

Chapitre II : Effet des eaux polluées sur l'altération des roches

eaux de pluie pénètrent dans le sol, les ions H^+ apportés par les eaux remplacent les cations adsorbés aux sites d'échange autour des particules de sol. Cela est dû au fait que les ions H^+ sont mieux retenus dans les sols que les autres ions. Par la suite, les cations délogés sont pris en charge par des ions sulfate (SO_4^{2-}) également apportés par les précipitations. Ces derniers servent alors d'accompagnateurs de charges positives. Les cations déplacés sont alors en solution dans l'eau des interstices du sol. Au fur et à mesure que l'eau continue son chemin dans le sol, les cations basiques qu'elle contient sont exportés hors des zones racinaires et se dirigent en direction des cours d'eau. En plus d'acidifier des sols, ce mécanisme augmente la biodisponibilité du calcium, du magnésium, du fer, du manganèse et de l'aluminium. Lorsque le pH du sol est inférieur à 5,5 unités, les ions Ca^{2+} sont généralement épuisés et ils ne peuvent plus neutraliser l'apport d'acidité. À ce moment, l'aluminium du sol réagit avec les ions H^+ afin de tamponner l'acidité et de libérer des ions Al^{3+} et de l'eau. Cette réaction se produit selon la formule suivante (Reuss, 1983) :

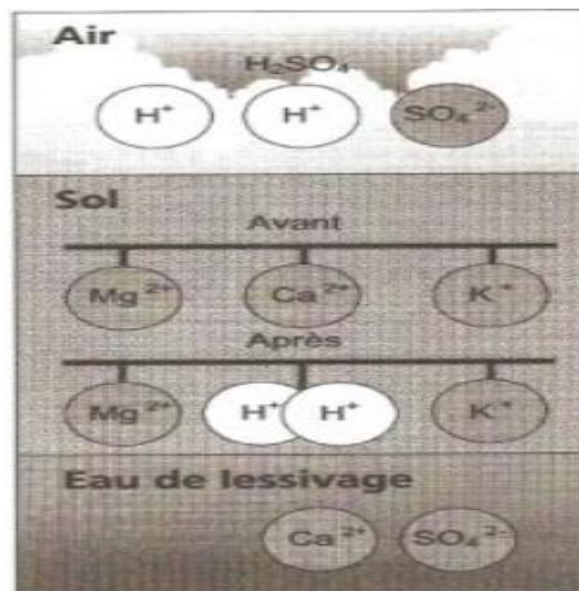


Figure II.7. Mécanisme de lessivage des sols du calcium par l'acide sulfurique contenu dans les précipitations (Houle et al., 2011).

II.4. Conclusion

L'eau est un agent de transport de polluants dans le sol, dégradant les minéraux des roches et transportant les particules fines et lourdes. La pollution de l'eau a l'effet d'accélérer la dégradation du sol, la dissolution des minéraux par les pluies acides ou la contamination des particules et leurs transferts par les eaux usées ainsi que la rétention des particules polluantes dans le sol. Les roches fragiles telles que les roches schisteuses sont sensibles aux acides.

Chapitre III

Effet des eaux souterraines **sur l'altération des roches**

III.1. Introduction

L'eau souterraine est l'eau située dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol. Cette eau est soumise à la pollution par diverses sources. Dans son écoulement, elle interagit avec le sol. Dans ce chapitre, nous avons traité l'effet des eaux souterraines sur l'altération des roches.

III.2. L'eau souterraine

L'eau souterraine est une ressource en eau naturelle essentielle qui approvisionne la population pour différentes utilisations comme à des fins agricoles, industrielles et domestiques. Ces eaux souterraines constituent environ les deux tiers des réserves d'eau douce du monde. Toutefois cette eau a divers origines, types et classifications.

III.2.1. Origine de l'eau souterraine

Les eaux souterraines proviennent essentiellement de l'infiltration des eaux superficielles ainsi que d'eaux d'origine profonde, ces différentes formations d'eau sont définies comme suit (Margat, 1972) :

- **Eau vadose** : c'est toute eau souterraine d'origine météorique, infiltrée à partir de la surface de la terre.
- **Eau juvénile** : c'est toute l'eau constituée à l'intérieur de la terre, n'ayant jamais fait partie, avant son émergence, du cycle de l'eau.
- **Eau fossile** : c'est une eau enfermée dans un terrain sédimentaire au moment de sa formation et conservée depuis, dans une couche aquifère supposée close, sans avoir participé à la circulation générale des eaux souterraines.
- **Eaux géothermales** : c'est une source thermique d'eau d'origine vadose.

III.2.2 Classification des eaux souterraines

Bhandari et al., 2007; Singhal et Gupta, 2010 classent les eaux souterraines en fonction de leurs niveaux de saturation. La zone vadose, non saturée ou d'aération, est seulement partiellement remplie d'eau, tandis que les espaces restants dans le sol sont constitués d'air. Du fait de la présence d'oxygène, les réactions d'oxydation et de lixiviation dominent dans cette région. Ensuite, sous la zone vadose se trouve la zone saturée par de l'eau, d'où l'oxygène est absent. La figure (III.1) donne une représentation visuelle de ces zones. Les processus de réduction et de précipitation sont les plus importants dans la zone saturée. La limite entre les deux zones fluctue du fait des variations saisonnières en matière de recharge et précipitations hydriques.

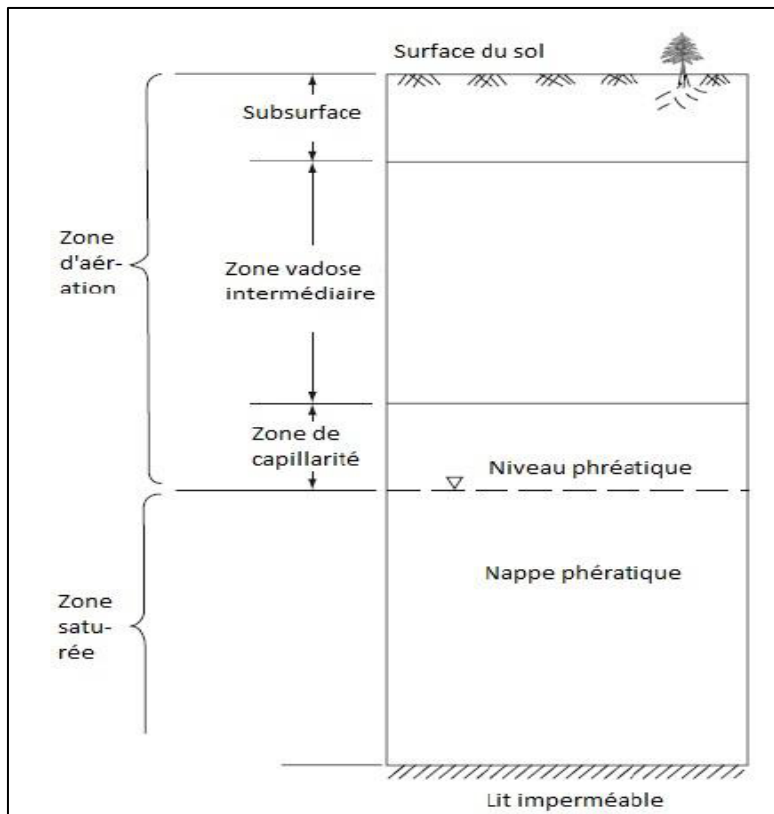


Figure III.1. Classification des eaux souterraines (Singhal et Gupta, 2010).

III.2.3. Les types de nappes

L'aquifère est constitué de différentes nappes qui sont citées ci-dessous.

➤ Nappe libre

Selon Singhal et Gupta, (2010), les nappes libres ne sont pas superposées par une formation imperméable ou semi-perméable. Elles sont exposées directement à l'eau qui ruisselle à travers le sol. Les nappes libres sont les plus vulnérables à la pollution, et les plus susceptibles de devoir subir une décontamination.

➤ Nappe captive

Musy et Higy, (2004) définissent la nappe captive comme étant une nappe d'eau souterraine emprisonnée dans une formation géologique perméable, entre deux formations imperméables. L'eau contenue dans la nappe captive est donc soumise à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

➤ Nappe semi-captive

Une nappe semi-captive appartient à un aquifère dont le toit ou/et le substratum est constitué par une formation semi-perméable.

➤ Nappe perchée

Une nappe perchée est une nappe libre, permanente ou temporaire, formée dans une zone non saturée, et qui surmonte une nappe libre de plus grande extension.

III.3. Influence des eaux souterraines sur les roches et les minéraux

L'interaction des eaux souterraines avec les espèces minérales de l'aquifère contrôle largement la chimie des eaux souterraines (Awadh et al, 2016). La qualité de l'eau est généralement maintenue par la présence de paramètres physico-chimiques, et leur concentration dépend de l'altération et de l'érosion des roches (Kumar et al., 2019).

III.3.1. L'érosion interne

La première source de particules mobiles dans les eaux souterraines est le détachement de ces particules de sol suite aux changements physico-chimiques (exemple ; la force ionique et le PH) et les conditions hydrodynamiques qui règnent dans le milieu poreux (Hammadi, 2016). L'érosion interne est la conséquence du détachement des particules du squelette rigide à cause des contraintes d'infiltration et leur transport en dehors du milieu poreux. Ce phénomène est parmi les causes principales de l'effondrement des ouvrages hydrauliques. Le déplacement de ces particules constituant le milieu poreux favorise des changements importants dans la perméabilité locale du milieu.

III.3.2. Altération des roches

L'eau souterraine participe aux processus d'altération et de dissolution durant l'interaction eau-roche, principalement avec les matériaux sédimentaires tels que les carbonates ou les silicates. Un processus d'échange d'ions se produit lors des interactions entre l'eau et la roche, cet effet se produit principalement lorsque l'eau saturée en sel entre en contact avec les minéraux de la roche, facilitant l'échange et augmentant leurs dissolutions (Morales ; Arredondo et al., 2020).

D'après Ilyas et al. (2016), l'interaction eau-roche peut être considérée comme l'écoulement des eaux souterraines à travers les fractures, les fissures et les failles ainsi que les espaces interstitiels interconnectés, entraînant la dissolution éventuelle des roches environnantes, ce qui entraîne en outre le développement du sol lorsqu'il est impliqué avec des influences d'acides humiques près de la surface du sol. Cette interaction eau-roche à travers les fractures sur une longue durée, avec de grandes quantités potentielles d'eaux souterraines, avance le processus d'altération et par conséquent forme d'épaisses couches de latéralisation (les sols ferrallitiques ou latéritiques se forment par altération des couches superficielles des roches silicatées ou carbonatées sous l'action des agents d'altération).

Les principales roches solubles sont les calcaires, les gypses et les anhydrites. D'après Ginocchio et Viollet, (2012), les calcaires peuvent être affectés de fissures de petites dimensions (calcaires microfissurés), de fractures profondes ouvertes et remblayées ou enfin karstifiées (c'est-à-dire percés de réseaux de puits et de grottes). Quant au gypse et l'anhydrite, ils sont solubles dans certaines eaux ; leur présence est décelée par l'existence de cargneules (roches vacuolaires perméables).

III.3.3. Altération des minéraux

Les différents minéraux sensibles à l'eau (H₂O) sont les suivants : agardite, alunogène, anhydrite, arséniosidérite, autunite, azurite, borax, botryogène, camallite, cérusite, chalcantite, colémanite, copiapite, cyanotriche, dolomite, epsomite, étringite, fibroferite, gaylussite, glauberite, gypse, halite, halotrichite, hydromagnésite, hydrophyllite, jarosite, kaolinite, lanarkite, malachite, mixite, molybdite, natrochalcite, natron, natronite, nitre, nitrobaryte, nitrocalcite, okénite, orpiment, phillipsite, pickéringite, pisanite, prixite, raspite, salmiac, salpêtre, sassolite, sceelite, sélénite, sel gemme, sénarmontite, strontianite, sylvite, thénardite, valentinite, villiaumite, zinkénite,

([https://www.geowiki.fr/index.php?title=Sensibilité des minéraux](https://www.geowiki.fr/index.php?title=Sensibilité_des_minéraux))

III.4. La pollution des eaux souterraines

La plupart des aquifères sont alimentés par l'eau de pluie, dont une partie s'infiltré dans le sol et traverse la zone non saturée pour rejoindre la nappe. L'eau souterraine se déplace dans l'aquifère par gravité, des points hauts vers les points bas. Les nappes offrent des eaux de qualités diverses. Lors de son parcours souterrain, l'eau acquiert une composition chimique caractéristique en fonction de la nature des roches traversées ; c'est le fond géochimique naturel des eaux (Mourey et Vernoux, 2000). A l'inverse, les nappes peuvent être contaminées par des substances chimiques polluantes qui vont s'infiltrer à travers la zone non-saturée pour rejoindre la nappe.

La différence entre eaux superficielles et eaux souterraines est très marquée. Les nappes, par leur écoulement filtrant, disposent d'une certaine capacité d'autoépuration notamment pour certains paramètres tels que la bactériologie et les matières organiques. A l'inverse, une nappe d'eau souterraine est marquée par une certaine inertie, et la régénération d'une nappe dégradée par une pollution est beaucoup plus longue que celle d'un cours d'eau. Bien que les eaux souterraines soient mieux protégées que les eaux superficielles et bien qu'elles soient capables de s'auto-épurer lors de leur trajet souterrain par fixation des polluants sur les particules de la roche, elles peuvent néanmoins être très sensibles aux pollutions. La vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine dépend essentiellement de la nature géologique et de l'épaisseur des terrains situés au-dessus de la couche aquifère.

Cependant les polluants des eaux souterraines sont issus de diverses sources qui sont cités ci-dessous.

III.4.1. Origine de la pollution des eaux souterraines

L'origine de la pollution des eaux peut être naturelle ou anthropique. Les principaux facteurs qui contrôlent la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux sont les activités anthropiques, le contexte hydrogéologique et le climat (Van der Werf, 1996 ; Mfonka et al, 2015).

a) L'influence des conditions climatiques : La variation saisonnière a été le facteur le plus mentionné dans la littérature (Hounsounou et al., 2016). En effet, la saison d'échantillonnage influe sur les concentrations chimique et/ou microbienne des eaux de la

Chapitre III : Effet des eaux souterraines sur l'altération des roches

nappe phréatique. Certains auteurs ont estimé une augmentation du taux de contamination pendant la saison sèche par rapport à la période pluvieuse (Boubakar, 2010 ; Benajiba et al., 2013). L'élévation de la température et le processus évaporatoire pendant la saison sèche peuvent aussi justifier cette augmentation (Boubakar, 2010). Les conditions pluviales peuvent avoir un rôle de dilution dans la nappe phréatique et par conséquent diminuer la concentration bactérienne dans l'eau pendant la saison pluvieuse (Bahir et al., 2002).

Par contre d'autres travaux (Bricha et al., 2007 ; Hounsinou et al., 2015) ont montré que la qualité bactériologique et/ou chimique des eaux souterraines s'est plus détériorée en saison des pluies. Pendant la période hivernale ou pluvieuse, l'augmentation du niveau piézométrique accélère la propagation des polluants qui se trouvent sur le sol ou piégés dans la zone insaturée (Bricha et al., 2007). La pluie réduit la rétention des microorganismes par le sol par l'abaissement de la concentration ionique et l'augmentation de la vitesse d'infiltration du sol (Bitton et Gerba, 1984). Les eaux d'infiltration favorisent la pollution par les fosses septiques, les latrines non étanches (Hounsinou et al., 2015) qui se trouvent en intercommunication avec les puits (Mpakam et al., 2009).

b) Les propriétés intrinsèques ou le contexte géologique et hydrogéologique des milieux traversés : Ces propriétés contrôlent la migration des polluants (Van der Werf, 1996). Le risque de pollution chimique et biologique dépend d'une part des caractéristiques des eaux d'infiltration, et d'autre part, des propriétés naturelles des couches géologiques qui séparent la nappe phréatique de la surface du sol (Nola et al., 2006). Le risque de contamination est plus important avec la perméabilité du sol (ex : sablonneux) recouvrant la nappe, et la faible profondeur de la nappe par rapport à la surface (Degbey et al., 2010 ; El Ouedghiri et al., 2014).

c) La pollution anthropique :

De nombreuses sources de contamination anthropogéniques sont susceptibles de rendre l'eau impropre à la consommation (Cheremisinoff, 1998). Certaines de ces sources sont à la surface du sol, comme les déversements accidentels, les décharges, les activités agricoles et d'élevage, les eaux de ruissellement polluées, les routes (circulation et sels de dégivrage), etc. Les déversements accidentels sont généralement liés aux activités industrielles et concernent souvent des hydrocarbures. Les activités agricoles sont à l'origine de contaminations aux nitrates, phosphore, pesticides et herbicides. Les décharges et les activités d'élevage peuvent véhiculer des bactéries pathogènes. Les pollutions dues à la circulation routière comprennent des hydrocarbures, des métaux lourds et des sels de déglacage. D'autres sources sont situées sous la surface du sol, mais au-dessus de la surface phréatique (water table), telles les fosses septiques, les lieux d'enfouissement, les pipelines ou les réservoirs souterrains et les cimetières. Des fuites d'eau d'origine anthropique provenant des égouts vont aussi parfois alimenter les eaux souterraines et les contaminer.

Enfin, certaines sources de pollution sont sous la couche phréatique, par exemple les mines, responsables de drainages miniers acides, ou les puits abandonnés, par lesquels s'infiltrent des polluants (Druet, 2020).

Chapitre III : Effet des eaux souterraines sur l'altération des roches

d) La pollution organique : La pollution organique est due à l'infiltration des eaux usées et des engrais chimiques (Lagnika et al., 2014).

e) Les pluies acides : Les pluies acides ont une forte concentration de NH_4^+ et NO_3^- . Lors de la recharge dans une rivière ou un système d'eau souterraine, NH_4^+ est nitrifié en NO_3^- dans des conditions oxydantes (Mayer et al., 2001). Comme deux protons d'acidité valent pour chaque NH_4^+ pour former NO_3^- pendant la nitrification, ce processus a tendance à rendre l'environnement plus acide (Breemen, et al 1982). Un environnement acide accélère l'altération des roches, quelle que soit la source de NH_4^+ , que ce soit des engrais azotés ou des précipitations (Appelo et Postma, 2005).

Ces polluants suivent un certain cheminement avant d'atteindre la nappe souterraine, puis se dispersent et se propagent suivant des mécanismes différents.

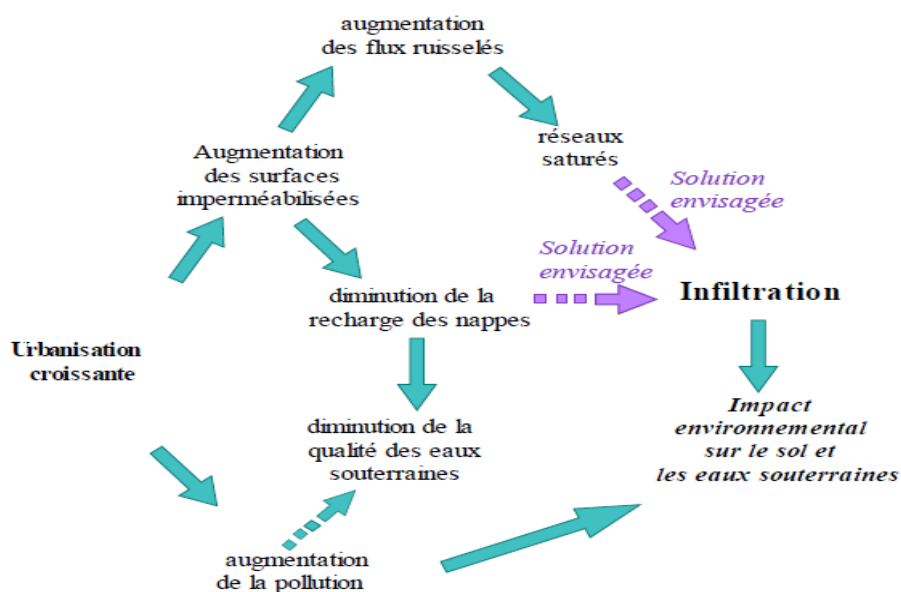


Figure III.2. Représentation schématique de la problématique de l'infiltration des eaux de ruissellement pluvial sur les eaux souterraines (Martinelli, 1999).

III.4.2. Le déplacement des contaminants vers la nappe phréatique

Brusseau, Pepper et Gerba, (2019) ; Singhal et Gupta (2010), constatent que le contaminant va, dans un premier temps, se déplacer verticalement jusqu'à la surface phréatique. En passant par la zone non saturée, des processus d'évaporation, d'adsorption à l'argile et aux matières organiques, d'oxydation, d'absorption par les plantes et de décomposition par les microorganismes vont se produire. Une partie des contaminants ne parviendra donc jamais jusqu'à la zone saturée. Une fois dans la zone saturée, le contaminant va se déplacer avec l'eau souterraine, à un rythme très lent, dans la direction du gradient hydraulique. Dans cette zone, l'absence d'oxygène rend improbable tout processus d'oxydation.

Chapitre III : Effet des eaux souterraines sur l'altération des roches

Brusseau et al., (2019) ; Singhal et Gupta, (2010), commentent le transport des contaminants. Le principal mode de transport des contaminants dans la zone saturée est l'advection, qui réfère au mouvement du contaminant emporté par le flot de l'eau souterraine. L'advection s'accompagne d'une dispersion hydrodynamique, qui signifie que le panache du contaminant s'étend sous l'effet de la dispersion mécanique et de la diffusion moléculaire. La dispersion va dans deux directions, de manière longitudinale (dans la direction du flot) et de manière transversale (dans les pores et fractures).

Singhal et Gupta, (2010) expliquent que le mode de déplacement du contaminant dépend de la perméabilité et de la porosité de la roche. Le déplacement du contaminant dans les aquifères de roche fracturée dépend de deux facteurs, du degré de porosité de la roche et la perméabilité des fractures. Dans le premier cas, si la roche est peu poreuse et imperméable, le contaminant ne va pas pouvoir la pénétrer. Le transport par advection dans les fractures sera dominant. Dans le deuxième cas, si la roche a peu de fractures et une grande porosité, le contaminant va pénétrer dans la matrice par diffusion, ce qui rendra une décontamination plus difficile puisque le polluant sera libéré lentement par la roche. Dans d'autres cas, la roche est poreuse et possède de nombreuses fractures. Le contaminant va alors se déplacer à la fois dans les fractures et dans la matrice. Le tableau (III.1) dresse la perméabilité des différentes roches.

Tableau III.1. Perméabilité des matériaux (Singhal et Gupta, 2010).

Perméabilité	10^5	10^4	10^3	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	
Valeurs relatives	Très haute			Haute		Modérée			Basse			Très basse			
Matériaux															
Dépôts non consolidés															
Gravier	←→														
Sable				←→											
Sable silteux						←→									
Till argileux									←→						
Roches															
Schistes et siltites (non fracturés)												←→			
Schistes & siltites (fracturés)									←→						
Grès									←→						
Grès (fracturé)				←→											
Calcaire & dolomite									←→						
Calcaire & dolomites karstiques				←→											
Basalte massif									←→						
Basalte fracturé				←→											
Roche cristalline fracturée									←→						
Roche cristalline non fracturée												←→			

La propagation d'éléments dissous dans une nappe est sous la dépendance des principaux mécanismes suivants (Lemière et al., 2001) :

1) **La convection**, qui est l'entraînement de l'élément à la vitesse moyenne de l'eau ;

Chapitre III : Effet des eaux souterraines sur l'altération des roches

2) **La dispersion**, qui provoque l'étalement du nuage de pollution sous l'effet de l'hétérogénéité du milieu ;

3) **Les échanges avec la phase solide et la phase eau immobile**. Ces échanges induisent un retard à l'avancement du polluant et atténuent les teneurs ;

4) **La dégradation** ou la **biodégradation** pour certains éléments et, pour les radionucléides, la décroissance radioactive. Ces mécanismes provoquent une diminution de la concentration en élément polluant initial durant le trajet, avec éventuellement apparition d'éléments dérivés (filiation chimique, biochimique ou radioactive).

III.4.3. Les contaminants physico-chimiques des eaux souterraines et effets sanitaires

Les contaminants peuvent se trouver en plusieurs types dans la nature, métaux de formes cationiques (Cs^+ , Cu^{2+} , Ni^{2+} , etc...) de formes anioniques (CrO_4^{2-} AsO_4) des composés organiques non polaires (les hydrocarbures aromatiques polycycliques) et des composés organiques polaires (pesticides et produits cosmétiques) (Orlikowska et al., 2015). Les particules fines peuvent être des minéraux avec surface amphotère (ex : le fer, l'aluminium, les oxydes de manganèse et les carbonates), des revêtements de matière organique sur les phases minérales ou des bactéries (Hammadi, 2016). Plusieurs études ont montré que l'association entre les colloïdes et les contaminants est un mécanisme important dans le transport des polluants dans les aquifères et les eaux souterraines (Karathanasis et al., 2014). Ces paramètres sont regroupés selon les paramètres physico-chimiques, les éléments toxiques et les éléments indésirables.

III.4.3.1 Les paramètres physico-chimiques

Ce sont des paramètres liés à la structure naturelle de l'eau incluant la température, le pH, la conductivité, les ions majeurs : le chlorure, le sulfate, le calcium, le magnésium, et autres, (Burnol et al., 2006). La figure (III.2) illustre les composants chimiques des principales sources de Djurdjura.

a) Les sulfates (SO_4^{2-})

Selon Kerboub et Fehdi (2014), les sulfates proviennent de la dissolution des minéraux contenant du soufre (formations gypseuses triasiques, ou formations plus récentes comme les argiles et les marnes, comme ils peuvent être d'origine anthropique par l'usage d'engrais ou des produits phytosanitaires dans l'agriculture. Ils sont également indicateurs d'une pollution par des eaux usées. La norme de concentration en sulfate pour une eau potable ne doit pas dépasser (200-400mg/L).

b) Les chlorures (Cl^-)

D'après Quevauviller, (2010), les chlorures proviennent de la dissolution des roches et sols ainsi que de l'agriculture par l'utilisation des engrais et pesticides, la norme de L'OMS de potabilité de l'eau concentrée en chlorures est fixée à 250mg/L.

III.4.3.2. Les éléments toxiques

Ce sont des éléments pour lesquels un risque sanitaire important existe (ex cancer au-delà d'une certaine exposition) (Blum et al., 2002). Ils comprennent l'arsenic, le cadmium, le chrome, le nickel, le plomb et le mercure ; ils constituent les éléments traces métalliques et sont généralement définis comme des métaux lourds (Hounsounou et al., 2016). Trois de ces métaux (cadmium, plomb, mercure) ont été identifiés comme des substances dangereuses prioritaires, et sont soumises à un objectif de rejet zéro dans les eaux souterraines (Burnol et al., 2006).

III.4.3.3. Les éléments indésirables

Ce sont des éléments dont la présence est susceptible d'entraîner des réclamations de la part des consommateurs, ou pour lesquels aucune preuve de risque de cancérogénicité n'a pu être démontrée, ou pour lesquels cette éventualité est probablement nulle (Blum et al., 2002). Ils prennent en compte les composés azotés (ammonium, nitrite, nitrate), phosphatés (phosphate) ; les composés organiques (hydrocarbures totaux, l'indice phénol) ; les métaux et autres éléments (Hounsounou et al., 2016).

a) L'ammonium

D'après Kerboub et Fehdi (2014), l'azote ammoniacal se présente dans l'eau sous forme toxique NH_4^+ . Sa présence dans les eaux traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique. La norme de dosage en ammonium est de 0,05 mg/l à 0,5 mg/l.

b) Les Nitrites (NO_2)

D'après Belghiti et al. (2013), Les nitrites dans les eaux souterraines proviennent d'une oxydation incomplète des matières organiques. Comme les nitrates, les nitrites sont très répandus dans l'environnement, les uns et les autres se retrouvent dans la plupart des produits alimentaires, dans l'atmosphère et dans une grande partie des eaux. Le taux normal en nitrites est fixé à 0,1mg/l selon l'OMS.

La présence des nitrites peut également être liée à l'oxydation bactérienne de l'ammoniac (Bengoumi et al., 2004).

c) Les nitrates (NO_3)

Les nitrates dans les eaux souterraines proviennent de l'agriculture par l'utilisation d'engrais riches en azote et de pesticides, et peuvent également provenir de boues résiduelles non traitées et des effluents domestiques, les zones vulnérables pour les eaux souterraines correspondent aux eaux qui ont, ou risquent d'avoir, une teneur en nitrate supérieure à 50mg/L (Quevauviller, 2010).

d) Phosphate

D'après Barbier et Chéry (2000), les phosphates peuvent être d'origine naturelle (produit de décomposition de la matière vivante, lessivage de minéraux contenant du phosphore), mais à

Chapitre III : Effet des eaux souterraines sur l'altération des roches

l'heure actuelle, leur présence dans les eaux est principalement associée à des apports anthropiques (engrais, déjections animales, stations d'épuration, poly-phosphates des détergents, eaux traitées aux phosphates, industrie chimique,). Les phosphates sont rarement dosés dans les eaux souterraines, leur contribution à la balance ionique ; entre cations et anions, est en effet minime, lorsque les phosphates sont dosés, la sensibilité analytique est souvent insuffisante : les concentrations doivent, pour être utilisables, être dosées avant un seuil analytique de 0,05 voire 0,01 mg/l (ou 10 µg/l).

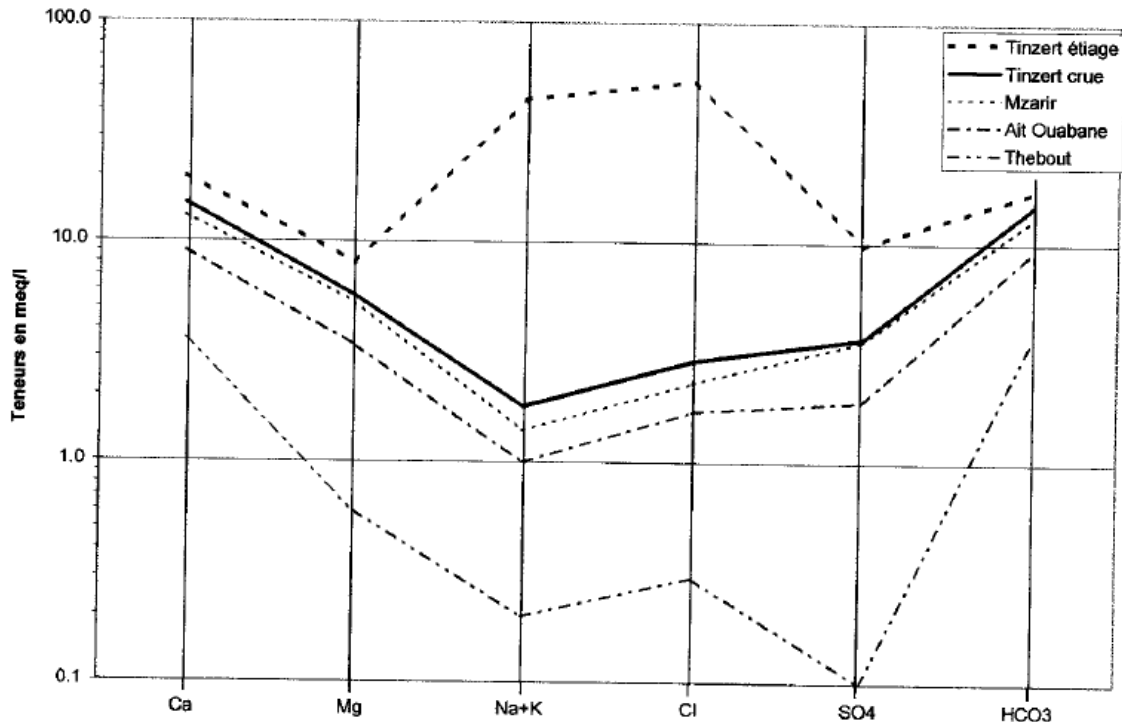


Figure III.3. Diagrammes semi-logarithmiques et faciès chimiques des principales sources du Djurdjura. Source : (Abdesselam et al., 2000)

III.4.4. Réaction des roches par de l'eau souterraine soumise aux acides

La présence d'acides dans les eaux souterraines fait accélérer le phénomène d'altération des roches et minéraux. La dissolution des composés minéralogiques du granite de la source géothermale par injection d'acides HF et HCL accélère le phénomène de dissolution (Portier et Vuataz, 2010) :

Les principaux minéraux facilement solubles dans le HCl sont la calcite et la dolomite.



Chapitre III : Effet des eaux souterraines sur l'altération des roches

Les minéraux siliceux de la source souterraine sont dissous par l'acide fluorhydrique et sa chimie est plus complexe que le HCl lorsqu'il réagit avec les carbonates (Walsh et al., 1982).

(Portier et Vuataz, 2010) ont constaté que le quartz, l'argile et les feldspaths sont les principales particules siliceuses impliquées dans les dommages des grès. Les principales réactions chimiques dans le grès acidulés par l'HF sont :



III.5. Conclusion

L'eau souterraine acquière sa propriété géochimique par l'altération des roches et les minéraux l'environnant, et donc les roches qui sont à proximité des aquifères sont soumis à l'altération qui alimente la source d'éléments chimiques nutritifs, en effet l'eau de source s'écoule à travers les fissures et les pores des roches arrachant les particules du sol et faisant dissoudre les minéraux le constituant. Toutefois la pollution de la source ne fait qu'aggraver et accélérer le phénomène d'altération des roches.

Chapitre IV

Processus d'altération du schiste

Chapitre IV : Processus d'altération du schiste

IV.1. Introduction

L'altérité est la « *formation superficielle résultant de l'altération et de la fragmentation sur place de roches antérieures sans transformations pédologiques notables* » (Foucault et Raoult, 2000). Dans ce chapitre, nous présentons les différents types de schistes, la constitution minéralogique de la roche schisteuse ainsi que son processus d'altération.

IV.2. Définition du matériau schiste

Le mot schiste est dérivé du mot grec schízein qui signifie «fendre», qui fait référence à la facilité avec laquelle les schistes peuvent être divisés le long du plan dans lequel les minéraux lamellaires se trouvent. Le schiste est une roche métamorphique cristalline fortement foliée à grain moyen, formée par métamorphisme, qui peut être facilement divisée en fines lamelles ou plaques en raison du parallélisme bien développé de plus de 50% des minéraux présents, en particulier ceux de lamellaire, par exemple mica et amphiboles. Ses grains minéraux individuels sont discernables à l'œil nu. Il existe de nombreuses variétés de schistes et ils sont nommés pour le minéral dominant comprenant la roche, par ex. micaschiste, schiste vert (vert en raison de sa forte teneur en chlorite).

Le terme "schiste argileux" désigne les roches sédimentaires argileuses fissiles.

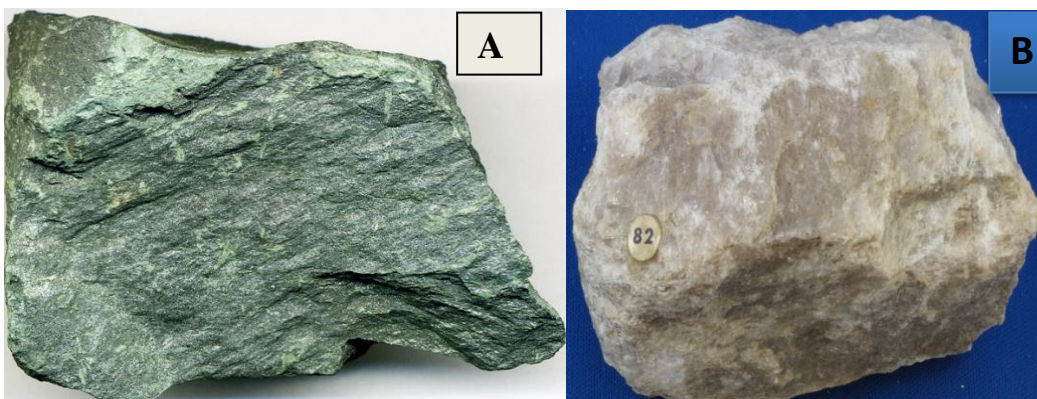


Figure IV.1. A) Schiste vert ou Chloritoschiste, B) schiste talqueux.

Source : <https://www.flickr.com/search/?text=schist>

Chapitre IV : Processus d'altération du schiste

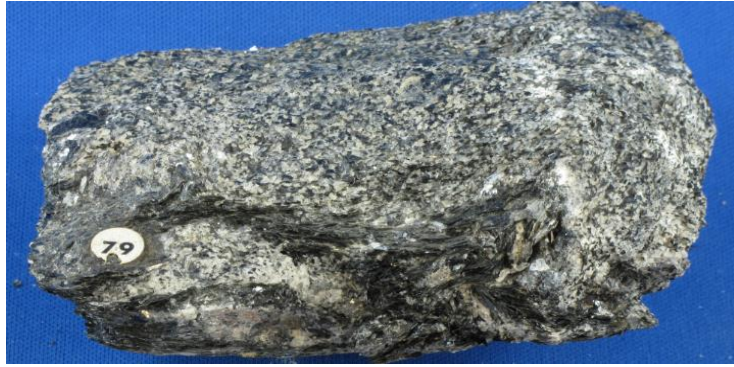


Figure IV.2. *Micaschiste.*

Source : <https://www.flickr.com/search/?text=schist>



Figure.IV.3. *Schiste ardoisier.*

Source : <https://www.flickr.com/search/?text=schist>

IV.3. Les différents types des schistes

Le métamorphisme est l'ensemble des transformations et des réactions que subit une roche initialement solide, lorsqu'elle est portée dans des conditions de pression et de température différentes de celles ayant présidé à sa genèse, les modifications liées au métamorphisme sont les modifications chimiques, les modifications minéralogiques et structurales (Beneito, 1985).

Ainsi il existe différents types de schiste selon la modification liée au métamorphisme, on en distinguera :

Chapitre IV : Processus d'altération du schiste

A)- Schistes du métamorphisme général très faible

Dans ce métamorphisme, il est créé les schistes suivants :

- ❖ **Schistes bitumineux** : C'est une roche sédimentaire contenant des matériaux bitumineux solides (appelés Kérogènes), qui sont libérés sous une forme liquide proche du pétrole.
- ❖ **Schistes ardoisiers** : Ce sont des roches ayant acquis une schistosité à grains fins et homogènes à parois légèrement satinées : noir, grise ou violacée dont le constituant principal est l'argile. Les schistes ardoisiers sont plus durs et peuvent se débiter en plaquettes. Ils sont utilisés comme matériaux de couverture.

B)- Schiste du métamorphisme général faible

Dans ce métamorphisme, on distinguera les schistes satinés et les schistes talqueux :

- ❖ **Schistes satinés** : Ce sont des roches ayant acquis une schistosité sous l'influence de contraintes tectoniques, de teinte généralement grise à surface blanchâtre, satinées due à la présence de feuillets serristes (Melbouci, 2006).
- ❖ **Schistes talqueux** : Ce sont des schistes contenant surtout du talc accompagné de micas et de quartz.

C)-Schiste de métamorphisme général plus fort

C'est dans ce métamorphisme que se crée le micaschiste.

- ❖ **Micaschiste** : C'est une roche métamorphique à base de quartz et de micas.

D) Schistes du métamorphisme de contact et quelconque

- ❖ **Schistes tachetés** : Ce sont des schistes dans lesquels le métamorphisme de contact (haute température et basse pression) a développé des minéraux néoformés qui se concentrent en agrégats ayant l'aspect de tâches (Melbouci, 2006).
- ❖ **Schistes ampélites** : Ce sont des schistes noirs alunifères et charbonneux, riches en pyrite et en matières organiques.
- ❖ **Schistes marneux** : Ce sont des mélanges de schiste argileux et des marnes.
- ❖ **Schistes houillers** : Ce sont des pélites Psammétique, c'est-à-dire riches en micas d'étriques, en général blanches.

Chapitre IV : Processus d'altération du schiste

➤ Schiste de la région de la grande Kabylie

Dans la région de la grande Kabylie, il existe quatre types de schiste : le schiste tacheté, le schiste argileux, le schiste satiné et le schiste ardoisier.



Figure IV.4. *Schiste satiné d'Ain El hammam.*

IV.4. La composition minéralogique des schistes

Le schiste est généralement composé de quartz, de micas et de feldspaths (Lo et al., 2016). Parmi les minéraux accessoires du schiste, on en distinguera les micas, la pyrite, le talc, la chlorite, la biotite, le graphite et des minéraux argileux, etc.

IV.5. Processus d'altération du schiste

La première manifestation de l'altération porte sur la schistosité, l'eau s'infiltré dans les diaclases du schiste et sépare les feuillettes qui ont tendance à déliter la roche en plaques plus épaisses et à perdre sa coloration (Pereira-Barreto, 1960). En même temps, une fine structure microgrenue apparaît. Ensuite la roche se colore intensément en brun rouille ; c'est le phénomène d'oxydation du fer provenant des éléments ferromagnésiens contenus dans la roche. La dernière phase fait apparaître un ciment argileux englobant les éléments de roches plus au moins altérés et de plus en plus méconnaissable.

IV.6. Altération des composants minéralogiques du schiste

L'altération des principaux composés minéralogiques du schiste est décrite ci-dessous.

IV.6.1 Altération du quartz

Le quartz a longtemps été considéré comme un indicateur de l'intensité de l'altération (Ruhe, 1956). Chaque minéral est mesuré par rapport au quartz pour estimer sa vitesse de dissolution (Lo et al., 2016). Il ne présente aucun point faible qui puisse donner lieu à une hydrolyse ou à

Chapitre IV : Processus d'altération du schiste

une oxydation, ainsi seule la dissolution pourra intervenir, le quartz pourra donc disparaître, mais avec une extrême lenteur, la plupart du temps, il subsistera dans le sol (Segalen, 1966).

IV.6.2. Altération du quartz aux acides

C'est le minéral le plus résistant à la dissolution à l'acide en laboratoire et dans la nature (Segalen, 1966).

IV.6.3. Altération des micas

Le mica blanc dit muscovite résiste longtemps à l'altération en raison de l'absence de fer et de l'obliquité des OH, quant au mica noir aussi appelé biotite contrairement à la muscovite, il se détruit très rapidement, c'est un des premiers minéraux à subir les phénomènes d'altérations en raison de sa riche teneur en oxyde de magnésium et en fer (Segalen, 1966).

IV.6.4. Altération des micas aux acides

D'après Razzaghe- Karimi et Robert, (1975), les trois acides : l'acide malonique, l'acide quinique et l'acide lactique provoquent une extraction moyenne de l'aluminium. L'acide malonique provoque la destruction des micas alors que les deux autres provoquent une vermiculitisation faible (acide quinique) ou forte (acide lactique). Viennent ensuite toute une autre série d'acides ou l'extraction est faible, ainsi que la formation de vermiculites.

IV.6.5. Altération des feldspaths

Les feldspaths sont les constituants majeurs des roches ignées. Lorsqu'un feldspath s'altère, une partie de ses éléments passe en solution, une autre partie donne des minéraux néoformés, une dernière partie peut rester inaltérée (Martine Lagache, 1965).

D'après Segalen, (1966), l'altération des feldspaths est obtenue par hydrolyse : par élimination des bases et rupture des liaisons le constituant Al - O - Si. L'absence de fer dans le réseau limite l'intervention des phénomènes d'oxydo-réduction, et il est très facile d'obtenir des minéraux argileux par les feldspaths en combinant l'action de température élevée et d'agents chimiques énergiques.

IV.6.6. Altération des feldspaths aux acides

Les feldspaths s'altèrent à tout PH, G Millot (1949) : cet auteur insistait sur le rôle du PH :

- Un milieu acide favorise la formation de Kaolinite ;
- Un milieu neutre verra apparaître l'illite qui est un minéral argileux non gonflant ;
- Un milieu alcalin favorisera l'apparition de montmorillonite.

Chapitre IV : Processus d'altération du schiste

IV.7. Conclusion

Le schiste est une roche métamorphique dont le métamorphisme fait varier sa composition minéralogique, et donc sa nomination. Le schiste est composé de minéraux primaire (quartz, micas et feldspath) et de minéraux accessoires (talc, pyrite, chlorite, ...). L'altération des minéraux du schiste font ressurgir les minéraux argileux. L'altérité de la roche schisteuse est l'argile.

Chapitre V

Caractérisation de la région

d'Ain El Hammam

Chapitre V : Caractérisation de la région d'Ain El Hammam

V.1. Introduction

Plusieurs régions de la grande Kabylie sont réputées pour des pathologies de mouvement de terrains, de gonflement et affaissement...etc., comme la région d'Ain El Hammam fait partie. Dans ce chapitre nous présentons les caractéristiques de cette région.

V.2. La géologie de la grande Kabylie

Le littoral algérien est jalonné par un certain nombre de massifs cristallophylliens, d'étendue variable, qui sont d'Ouest en Est (hormis le primaire oranais) : l'îlot de Berinhsel, près de Cherchell, et les massifs d'Alger, de Grande Kabylie, de Petite Kabylie et de l'Edough. Orienté Est-Ouest, le massif de Grande Kabylie s'allonge sur 65 km pour une largeur moyenne de 15 km. Il est pris en écharpe à son extrémité Est par la chaîne calcaire du Djurdjura, tandis que sa partie Ouest est affectée par un épisode blastomylonitique (Bossière, 1977). Ce massif, qui n'a pas été affecté par le métamorphisme alpin, se compose de plusieurs ensembles lithologiques et structuraux (Bossière 1975) : on distingue un socle gneissique surmonté d'une couverture de séricitoschistes, correspondant à la série des schistes satinés (Thiébaud, 1951), sur laquelle reposent localement des schistes ordoviciens datés du Llanvirn (Barbier et al., 1948). La figure (V.1) nous renseigne sur la géologie de la partie Ouest de la grande Kabylie.

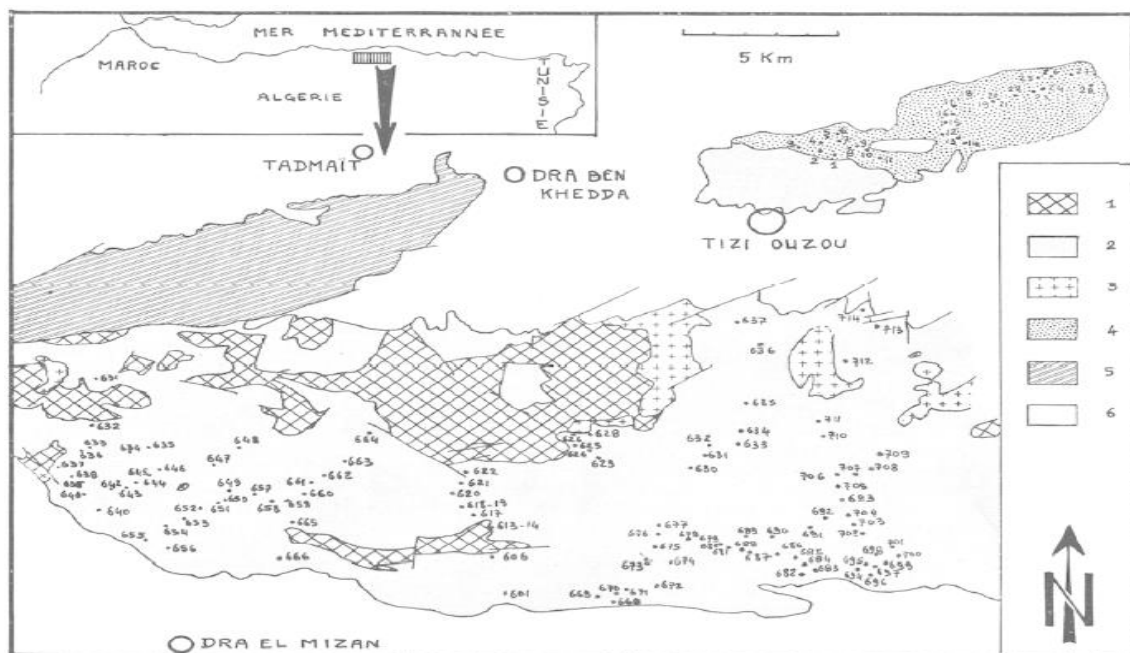


Figure V.1. Esquisse géologique de la partie Ouest de la Grande Kabylie (Bossière 1975, Cartographe: Vuillecot)

- 1 : socle ;
- 2 : couverture antéLlanvirn, = schistes satinés ;
- 3 : granite tardif de type Taboudrist ;
- 4 : schistes ordoviciens ;
- 5 : blastomylonites, roches cataclasées et granite ;
- 6 : miocène.

Chapitre V : Caractérisation de la région d'Ain El Hammam

V.3. Caractérisation du site d'Ain El Hammam

La région d'Ain El Hammam est rattachée au massif de la Grande Kabylie qui s'étale sur une longueur de 70 km, une largeur de 20km et qui occupe une position centrale dans les Maghrébides (figure V.2). Il domine le bassin de Tizi-Ouzou au Nord et assure une transition avec la chaîne de montagne de Djurdjura vers le Sud. Il est limité à l'Est par l'affleurement des flyschs du haut Sebaou et à l'Ouest par les flyschs supra-kabyles. Les hauteurs maximales qui culminent entre les côtes de 1000 m et 1300 m sont situées dans la région orientale de ce massif (Djeral et Melbouci, 2012).

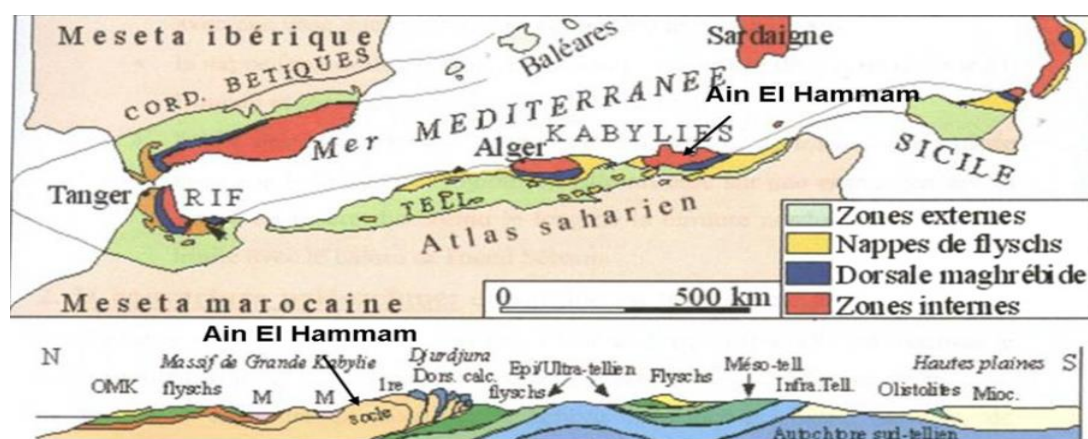


Figure V.2. Carte structurale schématique de la chaîne Maghrébidienne montrant la distribution des zones externes et internes de la grande Kabylie (Durand-Delga 1980).

V.4. La géologie de la région d'Ain El Hammam

Les études géologiques, menées par le laboratoire GEOMICA (de 2006 à 2009) dans la zone d'Ain El Hammam, montrent l'existence d'un schiste satiné et altéré ainsi que la présence dans cette région des niveaux lithologiques suivants :

- Un ensemble schisteux constitué de schistes satinés et de micaschistes ;
- Un ensemble gneissique contenant des gneiss ocellés et des gneiss fins ;
- Un ensemble intrusif formé de granites, de pegmatites et d'aplitites ;
- Un ensemble de roches basiques représentées par des amphiboles.

V.5. Le cadre climatique de la région

Le climat de Ain El Hammam est de type méditerranéen, continental, relativement froid et humide en hiver, chaud et sec en été. Les précipitations moyennes annuelles oscillent autour de 1,050 mm avec un extremum en 1974 atteignant 1,559 mm. La période de fortes pluies s'étend du mois de novembre au mois de mars. L'étude des données climatiques de la centrale météorologique d'Ain El Hammam montre aussi que le mois le plus pluvieux de l'année est le mois de décembre, avec une pluviométrie moyenne qui oscille autour de 175 mm, et le mois

Chapitre V : Caractérisation de la région d'Ain El Hammam

le plus sec est le mois de juillet, avec une pluviométrie moyenne de l'ordre de 5 mm (Djeral et Melbouci, 2012).

V.6. Aspect Hydrogéologique de la région

Le régime hydrographique au niveau de la région étudiée est caractérisé par (Kechidi, 2010) :

- La présence de plusieurs sources d'eau dans le versant instable ;
- Des cours d'eau de type torrentiels et semi-permanent ;
- La présence éventuelle de nappe phréatique

Quant au réseau d'assainissement, les eaux usées issues du réseau d'assainissement principal de la ville d'Ain El Hammam est un réseau non raccordé, elles se déversent directement dans les lignes de rupture apparentes dans le versant instable (Haddad et Melbouci, 2019).

V.7. Le glissement de terrain d'Ain El Hammam

Le glissement d'Ain El Hammam est localisé sur une pente collinaire d'une inclinaison de 30 à 40° composée de terrains métamorphiques essentiellement schisteux et micacés. La première apparition de cette instabilité a été recensée en décembre 1969 suite à de fortes précipitations. Les réactivations du mouvement de terrain durant 2009, 2012 et 2013 ont été marquées par une nette évolution en surface et en profondeur de la zone instable. L'étude géotechnique et géophysique du versant, menée en 2009, a montré que ce dernier est composé de schistes satinés altérés sur une importante épaisseur surmontée par un recouvrement superficiel composé de débris de schiste emballés dans une matrice argileuse. Le glissement s'étale sur une superficie supérieure à 23 ha et mobilise une couche de sol d'une épaisseur de 45m et plus. Plusieurs indices d'instabilité ont été observés au niveau de la ville et du versant ce qui a causé la démolition de plusieurs immeubles gravement endommagés par le mouvement pour alléger le versant instable en 2010 (Bouaziz et Melbouci., 2015).

Chapitre V : Caractérisation de la région d'Ain El Hammam



Figure V.3. *Les désordres aux niveaux du glissement d'Ain El Hammam* (Bouaziz et Melbouci., 2015).

V.8. Conclusion

La région de Ain El Hammam est caractérisée par une dominance de roches schisteuses (schiste satiné). Son climat varie considérablement, les étés étant chauds et secs et les hivers froids et humides, marqués par de fortes précipitations. Elle abrite plusieurs sources d'eau (d'où son nom « Ain El Hammam »). Son réseau d'assainissement est non raccordé et les eaux usées se déversent directement dans le versant instable. Cette région connaît des mouvements de terrain périodiques. A chaque réactivation, ils sont marqués par une évolution de la zone instable en surface et profondeur.

Chapitre VI

Identification du matériau étudié

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

VI.1. Introduction

L'identification du matériau schiste étudié dans ce travail nécessite la détermination d'un ensemble de paramètres qui nous permettront de mieux connaître les caractéristiques de la roche. Après concassage manuel des blocs de schiste et l'obtention de granulats schisteux, une étude d'identification a été réalisée au laboratoire de recherche en géo-matériaux, environnement et aménagement (LGEA) de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou afin de déterminer les caractéristiques physiques de la roche schisteuse.

VI.2. Localisation du matériau

Le matériau schisteux étudié est extrait en mois de juillet 2020 à Ain El hammam, sur la route N71 en allant vers Ait Yahia. Le schiste est ramené dans des sacs, au niveau du laboratoire, sous forme de blocs de différentes tailles.



Figure VI.1. *Zone d'extraction du schiste.*



Figure VI.2. *Bloc de schiste.*

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

VI.3. Teneur en eau NF P94-050

VI.3.1. Définition

Elle est exprimée en pourcentage, c'est le rapport entre la masse de l'eau évaporée par séchage d'un volume de sol ramené à la masse sèche de ce sol. L'essai permet de renseigner sur l'état d'humidité du matériau, de savoir la quantité d'eau existante dans un volume de sol donné relativement à la quantité des grains solides de ce même volume de sol.

VI.3.2. Exécution de l'essai

La détermination de cette teneur consiste à peser des échantillons de schiste humide puis les passer à l'étuve à 105°C pendant 24h et le peser à sec.

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100, \quad \text{avec } M_w : \text{masse de l'eau, et } M_s : \text{masse sèche du matériau}$$



Figure VI.3. Echantillons utilisés au calcul de la teneur en eau.

VI.3.3. Présentation des résultats

Les résultats d'essai sont présentés dans le tableau (VI.1).

Tableau VI.1. Résultats de l'essai de la teneur en eau.

Echantillon	1	2	3
Masse de la tare (g)	172,62	173,12	140,67
Masse humide + masse de la tare (g)	280,75	274,76	303,46
masse sèche + masse de la tare (g)	280,55	274,46	303,26
masse de l'eau (g)	0,2	0,3	0,2
masse sèche (g)	107,93	101,34	162,54
Teneur en eau w%=	0,18	0,3	0,12
w% moyen =	0,20%		

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

VI.3.4. Interprétation

La teneur en eau moyenne de l'échantillon après étuvage à 105°C pendant 24h est de **0,2%** qui est une valeur très faible. La roche est sèche.

VI.4. Masse volumique sèche d'un élément de roche par la méthode de pesée hydrostatique (NF P 94-064)

VI.4.1. Définition

La masse volumique sèche ρ_d d'un sol est un paramètre d'état représentant le quotient de sa masse M_s par le volume V qu'il occupe y compris l'air et l'eau qu'il contient.

VI.4.2. Exécutions de l'essai

L'essai consiste à prendre quatre échantillons de schiste sous forme de petits blocs d'abord brossés pour éliminer les particules facilement détachables, ils sont ensuite séchés totalement à l'étuve et immédiatement pesés (M_r), et sont paraffinés aussitôt après. Une fois revenus à la température de la salle d'essai, ils sont pesés à l'air libre (M_{rp}), puis sont placés dans le panier suspendus à l'étrier de la balance et sont immergés afin d'être pesés (M_{rp}^*) avec la balance hydrostatique.

VI.4.3. Présentation des résultats

La masse volumique sèche de la roche est calculée par la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{Mr}{\frac{Mrp - Mrp^*}{\rho_w} \frac{Mrp - Mr}{\rho_p}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$



Figure VI.4. Essai de calcul de la masse volumique sèche.

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

Tableau VI.2. Calcul de la masse volumique sèche.

Échantillon	1	2	3
Masse sèche de la roche (M_r) (g)	108	101,3	162,5
Masse de la roche sèche + paraffine à l'air libre : (M_{rp}) (g)	118,1	114,8	169
Masse de la roche sèche + paraffine dans l'eau (M_{rp}^*) (g)	63,6	61,6	100,1
Masse volumique de l'eau (ρ_w) (g/cm ³)	1	1	1
Masse volumique de la paraffine : (ρ_p) (g/cm ³)	0,88	0,88	0,88
Masse volumique sèche de la roche (ρ_d) (g/cm ³)	2,51	2,68	2,64
Masse volumique sèche moyenne (ρ_d moy) (g/cm ³)	2,61		

VI.4.4. Interprétation

La masse volumique sèche moyenne de l'échantillon est donc **2,61 g/cm³**. Ce résultat montre que la masse volumique du schiste étudié est importante, c'est-à-dire, ce dernier se trouve dans un état très dense.

VI.5. Masse volumique des particules solides (ρ_s) (NF P94- 054)

VI.5.1. Définition

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

VI.5.2. Exécution de l'essai

L'essai consiste à :

- Prendre environ 25 g de 0/2 mm du matériau étudié, puis le mettre dans une étuve ;
- Peser l'éprouvette vide du pycnomètre et son bouchon (**m1**) ;
- Peser l'échantillon sec et l'introduire dans l'éprouvette, peser le pycnomètre contenant le sol (**m2**), y ajouter (**V1**) = 50 ml d'eau distiller en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air ;
- Peser l'éprouvette contenant le sol + l'eau (**m3**) ;
- Lire le volume de l'échantillon sur l'éprouvette graduée (**V2**).

Chapitre VI : Identification du matériau étudié



Figure VI.5. Matériels utilisés.

Tableau VI.3. Calcul de la masse volumique des particules solides.

masse de l'éprouvette vide (m1)	432,45 g
masse de l'éprouvette +sol (m2)	457,6 g
masse de l'éprouvette + sol +eau (m3)	509,25g
volume de l'eau (v1)	50 ml
volume de +eau+ sol (v2)	59,5 ml
volume du sol (vs)= v2-v1	9,5g
masse sèche du sol (ms) =m2-m1	25,15g
$\rho_s = m_s/v_s$	2,65g/cm ³

VI.5.3. Interprétation

La masse volumique des particules solides de notre échantillon est donc égale à **2,65 g/cm³**.

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

VI.6. Essai au bleu de méthylène [NF P94- 068]

VI.6.1. Définition

L'essai au bleu de méthylène a pour objectif la détermination de la quantité de particules argileuses présentes dans un échantillon de matériau.



Figure VI.6. Appareil d'essai VBS.

VI.6.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à procéder à des injections successives par pas de 5 cm³ à 10 cm³ (selon l'argilosité du matériau) de solution de bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation (vitesse 400 tr/min ± 100 tr/min) et à prélever périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique.

Les injections sont poursuivies jusqu'à ce qu'apparaisse une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tache. Il est alors considéré que l'adsorption du bleu sur les particules d'argile est terminée et que c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole. L'essai est dit alors positif.

IV.6.3. Valeur de bleu

- Le schiste étant un matériau rocheux il faudra prélever une masse de **60g** de classe **0/5**
- Le matériau est introduit dans un récipient avec **500 ml** d'eau déminéralisée.
- Pour les matériaux dont D_{\max} est inférieure à 5 mm : $VBS = \frac{B}{m_0} \cdot 100$

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

m_0 : masse sèche de la prise d'essai ;

B : masse de bleu introduite (solution à 10g/l) = $V \cdot 0,01$

Dans cette essai, il a été trouvé que $m_0 = 60$ g et $B = 75$ cm³

Alors VBS du matériau = **0.58**

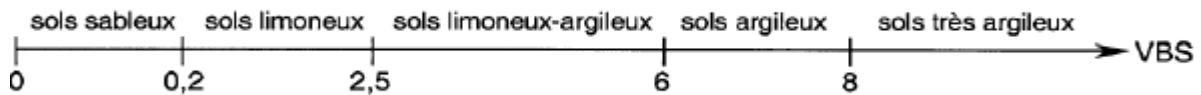


Figure VI.7. Classification du matériau par la valeur VBS.

VI.6.4. Interprétation

On constate que l'argile contenu dans ce schiste est sous forme limoneuse.

VI.7. Calcul des paramètres physiques du matériau

VI.7.1. Porosité

La porosité permet de connaître l'importance des vides, c'est-à-dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré. Elle est définie comme étant le rapport du volume des vides au volume total, il est possible de calculer (n) à partir de l'équation suivante :

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = 1 - \frac{2,61}{2,65} = 0,015$$

VI.7.2. Indice des vides et degré de saturation

- L'indice des vides noté (e), dont la signification est analogue à celle de la porosité, est calculé comme suit :

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 = \frac{2,65}{2,61} - 1 = 0,015$$

- La formule du degré de saturation (S_r) est donnée en fonction des paramètres physiques déjà déterminés par la formule suivante :

$$S_r = \frac{W \times \gamma_s}{e \times \gamma_w} = \frac{0,2 \times 26,5}{0,015 \times 10} = 35,33\%$$

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

VI.7.3. Interprétation des résultats

Les résultats du calcul précédent, montrent bien que la proportion des vides est faible, ceci est corrélatif à l'état de densité du matériau étudié.

VI.8. Essai de cisaillement à la boîte de Casagrande (NF P94-071-1)

L'essai a pour objet de déterminer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante.

VI.8.1. Mode opératoire

L'essai consiste (selon la norme NF P94-071-1) à :

- Consolider l'éprouvette de section **S** dans une première phase en appliquant sur la face supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai (contrainte $\sigma_n = N/S$).
- La phase de consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle doit être cisailé l'échantillon.
- Cisailier ensuite le long du plan de séparation des 2 demi-boîtes en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante.
- L'effort de cisaillement horizontal (**T**) est mesuré et la contrainte $\tau = T/S$ est calculée.
- Les résultats de l'essai sont exprimés en termes de contrainte tangentielle moyenne (τ) et de contrainte normale moyenne (σ_n), avec **S** représentant la surface de la discontinuité.

VI.8.2. Description du dispositif d'essai

La grande boîte de Casagrande est constituée de deux demi boîtes dont l'une, la boîte supérieure, peut glisser sur l'inférieure le long d'un plan de cisaillement horizontal.

Le boîtier inférieur a des dimensions supérieures aux dimensions du boîtier supérieur, ceci afin de conserver la même section de cisaillement durant le déroulement de l'essai.



Figure.VI.8. Boite de cisaillement.

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

VI.8.3. Composition de l'appareillage

L'appareillage se compose en outre :

- d'une centrale hydraulique qui permet la stabilisation et la régulation des efforts de confinement et de cisaillement à partir des servo-valves de régulation ;
- d'un bâti métallique rigide support des vérins hydrauliques asservis, qui transmettent les efforts de compression verticale et de cisaillement horizontal ;
- d'un ensemble micro-ordinateur qui pilote les essais de cisaillement.



Figure VI.9. Appareillage automatisé.

VI.8.4. Exécution de l'essai

Afin de connaître les caractéristiques mécaniques de la roche étudiée, quatre échantillons ont été pris concassés et tamisés à 0/6,3 mm. Les boîtes ont été placées au fur et à mesure sur le bâti de la machine, l'échantillon a été drainé puis soumis aux contraintes normales. Nous avons commencé par le premier essai à une contrainte normale $\sigma = 1 \text{ bar}$, et à la fin de cet essai, nous récupérons les résultats automatiquement à l'ordinateur. La même procédure a été suivie pour les essais suivants où la contrainte normale a été augmentée à **2 bars, 3 bars et 4 bars**.

VI.8.5. Résultat de l'essai

La courbe de cisaillement du matériau schiste (figure VI.10) et la courbe intrinsèque donnant la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (ϕ) (figure VI.11) sont représentées ci-dessous.

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

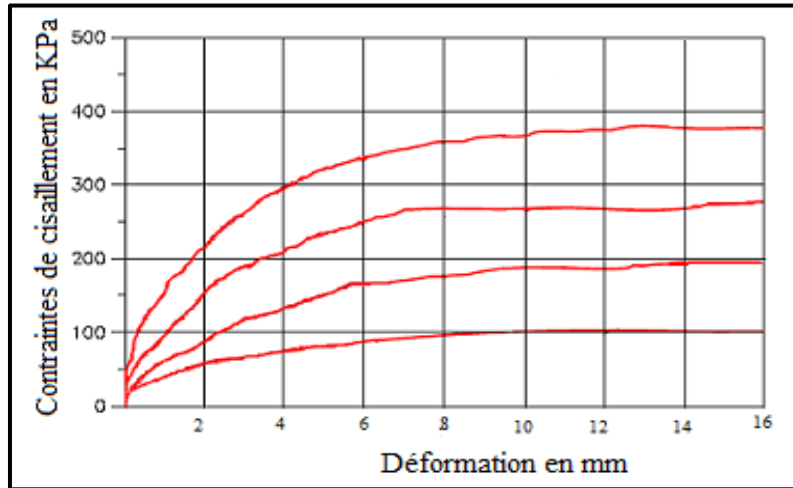


Figure VI.10. Courbes de cisaillements du matériau schiste.

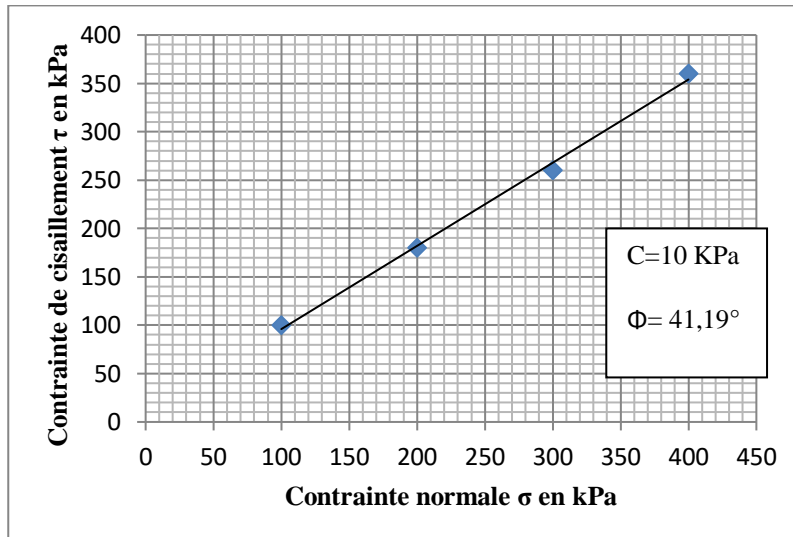


Figure VI.11. Droite intrinsèque du matériau schiste.

VI.8.6. Interprétation

Les caractéristiques déduites de la courbe intrinsèque sont la cohésion $C= 10$ KPa, et l'angle de frottement $\varphi=41,19^\circ$.

Chapitre VI : Identification du matériau étudié

VI.9. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude des paramètres d'identification réalisés au laboratoire afin de mieux présenter les aspects physiques du matériau étudié. Les essais d'identification permettent de mieux connaître le matériau schiste étudié.

Chapitre VII
Evaluation de
la dégradabilité aux essais
d'altérabilité

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

VII.1. Introduction

Pour mieux évaluer la dégradation causée par l'altération du matériau schisteux, des essais d'altérabilité et de dégradabilité ainsi qu'un essai mécanique ont été réalisés sur les roches contaminées par les acides : nitrate, sulfate et le mélange des deux, ainsi que la roche sous l'effet de l'eau.

VII.2. Calcul de l'indice d'altération « i »

VII.2.1. Définition

L'indice d'altération est exprimé en pourcentage, il est utilisé pour démontrer l'impact du climat sur les roches.

VII.2.2. Exécution de l'essai

L'essai consiste à :

- immerger des échantillons de roches dans de l'eau ;
- peser les échantillons après saturation totale ;
- Sécher les échantillons à l'étuve ;
- peser les roches sèches.

Le calcul de l'indice d'altération est donné par la formule suivante (Porokhovoi, 1995)

$$i = \frac{\text{Masse saturée} - \text{Masse sèche}}{\text{Masse sèche}} \times 100$$



Figure VII.1. *Echantillon de l'essai de calcul de l'indice d'altération.*

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

Tableau VII.1. Calcul de l'indice d'altération.

Echantillon	1	2	3
Masse de la roche (g)	166,9	141,4	92,6
Masse saturée (g)	168,5	143,4	94,1
Masse sèche (g)	166,8	141,4	92,4
indice d'altération (%)	1	1,4	1,8
indice d'altération moyen (%)	1,4		

VII.2.3. Interprétation

L'indice d'altérabilité (**i**) de la roche est de **1.4%**, **i < 5%** donc la roche schisteuse a subi une faible altération.

VII.3. Essai d'altérabilité

VII.3.1. Préparation de l'essai

Dans cet essai, 5 blocs de schiste de masse presque identique ont été pris, dont quatre blocs ont été mis à saturation dans de l'eau polluée à l'acide (un bloc mis dans de l'eau polluée au sulfate, un bloc est mis dans de l'eau polluée au nitrate et un autre mis dans de l'eau polluée au mélange de sulfate et nitrate) et un bloc à l'eau minérale, le cinquième bloc a été mis dans de l'eau minérale sans saturation. Les roches sont restées dans cet état pendant 48 jours, depuis le 21 juillet 2020 jusqu'au 06 septembre 2020.

La concentration d'acide utilisée :

- 800mg/l de sulfate de cuivre
- 250mg/l de nitrate de zinc

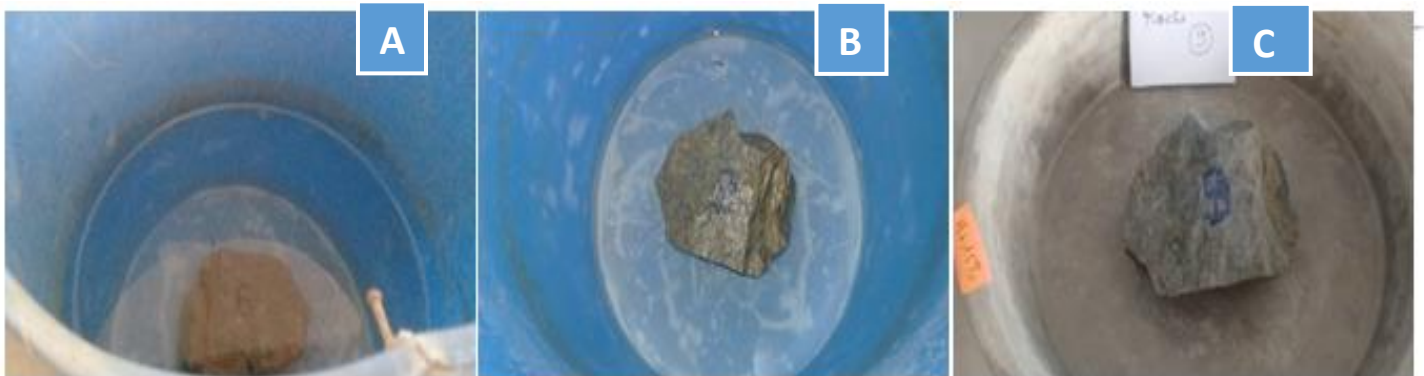


Figure VII.2. a) : produits chimiques utilisées, b) : échantillons de nitrate, c) : poudre (bleu) de sulfate.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité



Figures VII.3. Blocs de schiste et leurs masses initiales utilisées dans l'essai d'altération.



FigureVII.4. A) Bloc de schiste immergé au nitrate, B) et C) bloc de schiste après immersion du 21 juillet 2020 au 06 septembre 2020. (Les autres images correspondant aux autres échantillons sont représentées en annexe).

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

Tableau VII.2. Masse des roches à l'état initial (le 21 juillet 2020) et leurs masses le 06 septembre 2020 après imbibition.

La roche	Masse de la roche à l'état initial (g)	Masse de la roche après 48jours (g)	Etat d'imbibition
Schiste+ sulfate	591,55	608,83	imbibition totale
Schiste+ nitrate	544,73	554,21	imbibition totale
Schiste+ sulfate+nitrate	575,98	591,15	imbibition totale
Schiste saturé en eau	548,92	562,8	imbibition totale
Schiste + 1/4 d'eau	528,36	528,36	imbibition partielle

VII.3.2. Interprétation

Après 48 jours, nous avons constaté les faits suivants :

Que la masse des échantillons a augmenté, à l'exception du bloc imbibé partiellement. L'augmentation de la masse est due à l'absorption par capillarité de l'eau ou de l'eau acidifiée. Quant à la masse de la roche inchangée, ceci est certainement dû à l'évaporation de l'eau contenue dans la roche.

La coloration en bleu, des roches soumises au sulfate et au mélange de sulfate et nitrate, est due à l'effet du sulfate de cuivre doté de couleur bleue.

VII.3.3. Essai d'altérabilité au mouillage - séchage

Après les 48 jours d'imbibition et d'imbibition partielle, les échantillons ont été pesés puis mis à l'essai d'altérabilité à l'enceinte climatique, pour 10 cycles. Chaque cycle correspond à 16 heures dans l'étuve à 105° et 7 heures à l'air libre.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité



Figure VII.5. *Mise en place des échantillons dans l'étuve.*



Figure VII.6. *Bloc de schiste soumis au nitrate à la fin du 10^{ème} cycle.*

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

Tableau VII.3. Masse des échantillons de roches soumis aux 10 cycles, en comparaison avec leurs masses initiales (m_i).

cycle	Masse (g) de schiste+sulfate ($m_i=591,55g$)	Masse (g) de schiste+nitrate ($m_i=544,73g$)	Masse (g) de schiste + sulfate +nitrate ($m_i=575,98g$)	Masse (g) de schiste + eau ($m_i=548,92g$)	Masse (g) de schiste+1/4 eau ($m_i=528,36g$)
cycle1	592,15	544,03	575,38	547,52	527,86
cycle 2	606,03	545,33	588,16	551,42	527,76
cycle 3	595,55	545,23	589,26	547,03	527,66
cycle 4	606,43	545,43	583,57	547,13	527,66
cycle 5	590,46	546,23	578,38	547,42	527,56
cycle 6	591,05	546,53	577,08	547,82	527,56
cycle 7	593,35	545,83	577,38	547,03	527,56
cycle 8	593,85	548,02	580,57	546,93	527,66
cycle 9	590,56	546,03	577,18	546,93	527,56
cycle 10	591,65	546,83	589,36	548,42	527,66

VII.3.4. Interprétation

Il est à remarquer dans ce tableau que la masse des 5 échantillons varie, elle augmente par le phénomène d'absorption et diminue par le séchage au cours de ces 10 cycles. Les plus grandes variations sont celles mises dans l'eau polluée au sulfate et au mélange de sulfate et nitrate. Pour les échantillons mis dans l'eau polluée au nitrate ainsi que ceux imbibés d'eau totalement ou partiellement, leur masse n'a pas beaucoup varié, notamment celle de l'échantillon mis dans $\frac{1}{4}$ d'eau qui a varié uniquement de 0.1g.

- Il a été observé au fil des cycles une décoloration des échantillons à l'exception de la roche imbibée partiellement en eau.
- Le bloc de schiste non mis à saturation à l'eau déminéralisée, garde sa couleur de schiste satiné mais faisant apparaître quelques tâches blanchâtres, et des discontinuités. Par contre le bloc de schiste saturé à l'eau minéralisée se couvre d'une couche cimentée couvrant les fissures, et perd sa couleur de schiste satiné. Néanmoins les deux blocs sont fragilisés et s'effritent facilement.
- Pour le bloc traité au nitrate, sa partie superficielle se teint en blanc, laissant apparaître des fissures et des discontinuités.
- Pour le bloc traité au sulfate ainsi que celui traité au mélange de sulfate et nitrate, leur couleur bleue se laisse dominée par les couleurs blanchâtres et verdâtres. Plusieurs discontinuités ont été également observées.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

VII.3.5. Commentaire

Au cours des cycles une décoloration est remarquée dans cet essai. Sous le terme « roche décolorée » il faut comprendre « roche ayant perdu sa couleur d'origine », et parfois colorée par des oxydes et des hydroxydes de fer (rubéfaction) (Prokhovoi, 1995). De nombreuses classifications de l'état d'altération ont été proposées. Toutes sont plus ou moins qualitatives et se basent sur la description de l'état général de la roche soumise à l'altération par comparaison avec la même roche dans un état dit "sain". Presque toutes les classifications proposées (Baynes et al., 1978, Dearman, 1978, Price, 1993) divisent l'altération en six degrés, du sol résiduel à la roche saine. Une de ces classifications descriptives pour l'état d'altération des roches, proposée par (Fookes et al., 1971) est présentée dans le Tableau (VII.4).

Tableau VII.4. Exemple de la classification des roches dures en fonction de l'état d'altération (D'après Fookes, 1971).

Classe	Degrés d'altération	Description
VI	Sol résiduel	Roche décolorée, sol avec texture originelle complètement détruite, changement de volume important.
V	Roche complètement altérée	Roche décolorée, sol avec texture originelle majoritairement conservée.
IV	Roche fortement altérée	Roche décolorée, discontinuités ouvertes, forte altération de la texture à proximité des discontinuités.
III	Roche modérément altérée	Roche décolorée, discontinuités ouvertes avec début de l'altération de la texture à proximité, roche notablement moins résistante que la roche saine.
II	Roche légèrement altérée	Roche un peu décolorée, surtout au niveau des discontinuités, perte de résistance non significative.
I	Roche saine	Aucune décoloration ni perte de résistance.

Il a été remarqué sur les 5 blocs ayant subi les cycles d'altérabilité des fissures et microfissures. Dans cet essai et celui d'altération de schistes concassés, le matériau schiste a été mis au cycle de saturation/déshydratation à l'étuve dans de l'eau acide et eau seine. D'après Wang et al. (2017), les défauts tels que des trous et microfissures dans les roches se propagent inévitablement sous l'effet de facteurs externes tels que les cycles de saturation déshydratation. Les endommagements des roches signifient aussi le développement de microfissuration à l'intérieur des roches (Liu et al., 2016). En effet L'alternance d'humidification et de dessiccation crée des tensions superficielles au sein du réseau poreux. Cette altération se manifeste soit par une désagrégation granulaire pour les roches à grains grossiers, soit par un élargissement irréversible du réseau poreux dans des matériaux plus fins (Marion, 2008).

A partir du tableau (VII.4), les blocs de schistes altérés aux acides peuvent être classés en classe III et les blocs de schiste mis dans l'eau minéralisée peuvent être en classe II.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

VII.4. Evaluation du taux de dégradabilité des blocs soumis à l'altération

Pour pouvoir estimer quantitativement des paramètres décrivant le processus d'altération, on utilise les relations semi - empiriques proposées ci-dessous :

VII.4.1. Le pourcentage de perte de masse (A_p)

Le pourcentage de perte de masse (A_p) de la caractéristique quelconque (F) de la roche. (Tchurinov M.V.(red.) 1981) donne la valeur de dégradation d'une caractéristique quelconque au cours de l'altération. Cette caractéristique peut être utilisée pour la description de l'état d'altération in situ et pour l'estimation de l'altérabilité des roches en laboratoire.

$$A_p = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100$$

Où F_1 est une valeur de la caractéristique F de la roche saine,
 F_2 est une valeur de la même caractéristique pour le moment de l'estimation.

Les valeurs du paramètre A_p sont présentées dans le tableau suivant (VII.5).

Tableau VII.5. Calcul du pourcentage de perte de masse (A_p).

cycle	AP de Schiste+sulfate	AP de schiste+nitrate	AP de Schiste+sulfate+nitrate	AP de Schiste+eau	AP de schiste+1/4 eau
cycle1	0,10%	0,13%	0,10%	0,26%	0,09%
cycle 2	2,55%	0,24%	2,21%	0,71%	0,20%
cycle 3	3,23%	0,33%	4,52%	1,06%	0,33%
cycle 4	5,75%	0,46%	5,84%	1,39%	0,46%
cycle 5	5,93%	0,74%	6,26%	1,67%	0,61%
cycle 6	6,01%	1,07%	6,45%	1,87%	0,76%
cycle 7	6,31%	1,27%	6,69%	2,22%	0,91%
cycle 8	6,70%	1,87%	7,49%	2,58%	1,04%
cycle 9	6,87%	2,11%	7,70%	2,94%	1,19%
cycle 10	6,88%	2,50%	10,02%	3,03%	1,32%

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

VII.4.2. Calcul de la dégradation de la roche suivant les cycles (P)

L'indice de la résistance des roches à l'altération atmosphérique ou artificielle (en laboratoire) est donné par Sergeev (1978). Il permet d'estimer la vitesse de dégradation de différents paramètres des roches au cours des cycles de l'altération.

La dégradation de la roche est évaluée au cours des cycles d'altération par la formule suivante :

$$P = \frac{Ri' - Ri''}{n}$$

Où Ri' et Ri'' représentent une valeur du paramètre de la roche avant et après n nombre de cycles d'altération artificielle.

Les valeurs du paramètre P sont présentées dans le tableau suivant VII.6.

Tableau VII.6. Calcul de l'indice de désagrégation (P).

cycle	P de Schiste+ sulfate	P de Schiste+ nitrate	P de schiste + sulfate + nitrate	P de schiste + eau	P de schiste +1/4 eau
cycle1	0,6	0,7	0,6	1,41	0,5
cycle 2	7,84	1	6,69	2,66	0,8
cycle 3	9,17	1,2	11,12	3,29	1,03
cycle 4	12,89	1,38	13,02	3,74	1,21
cycle 5	13,11	1,68	13,5	4,04	1,37
cycle 6	13,19	1,98	13,68	4,23	1,5
cycle 7	13,45	2,14	13,88	4,5	1,61
cycle 8	13,74	2,55	14,45	4,75	1,7
cycle 9	13,85	2,69	14,58	4,97	1,79
cycle 10	13,86	2,9	15,92	5,02	1,86

VII.4.3. Interprétation et commentaire

Les tableaux (VII.5) et (VII.6), montrent que la valeur la plus élevée d'altération A_p et de dégradation P est obtenue pour l'échantillon soumis au mélange de sulfate et nitrate, suivie par les valeurs de l'échantillon soumis au sulfate, puis par les valeurs de l'échantillon saturé en eau, puis par les valeurs de l'échantillon soumis au nitrate et enfin par les valeurs de l'échantillon partiellement immergé dans l'eau.

Les indices A_p et P sont plus élevés pour les échantillons traités au sulfate, et au mélange de sulfate et nitrate, cela est dû éventuellement aux réactions entre les acides et les minéraux schisteux. D'après Boukoffa et al. (2017), les degrés d'altération favorisent la dégradation des minéraux primaires de la roche et se poursuivent jusqu'à la disparition quasi complète de ces minéraux et leurs remplacement par des minéraux néoformés. Les degrés d'altération (A_p)

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

et (P) de l'échantillon saturé en eau minérale sont plus élevés, par rapport à l'échantillon immergé dans les nitrates, en effet les nitrates ont tendance à moins altérer le matériau schisteux.

VII.5. Essai de dégradabilité aux essais d'altérabilité

L'essai consiste à reproduire la dégradation du schiste sous effet de mouvement, les roches étant entraînées par l'eau de ruissellement ou l'eau souterraine. Elles se fragmentent entre elles et avec l'effet du climat elles subissent de la saturation et déshydratation aussi appelés mouillage et séchage.

VII.5.1. Exécution de l'essai

- Prendre 4 échantillons d'un 1 kg d'une fraction 10/20 de schiste concassé et verser chaque échantillon dans un récipient à fond plat ;
- Mettre les échantillons à imbibition : un échantillon est imbibé à l'eau déminéralisée et les autres aux acides (nitrate, sulfate, sulfate et nitrate) ; pendant 7 heures.
- Séchage des échantillons pendant 24 h à l'étuve à 105°C, sans siphonage.
- Tamisage à sec sur une série de tamis : 16- 12.5-10-8-5-4-2-1 (mm)

L'ensemble de ces opérations constitue 1 cycle, l'essai s'est poursuivi jusqu'à 10 cycles, et une courbe granulométrique a été tracée après chaque cycle.



Figure VII.7. *Immersion des quatre échantillons de schiste concassé.*

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité



Figure VII.8. Echantillons concassés de schiste à l'intérieur de l'étuve.

1) : échantillon soumis au sulfate, 2) : échantillon soumis au mélange sulfate et nitrate, 3) : échantillon acidulé au nitrate, 3) : schiste traité à l'eau déminéralisée.



Figure VII.9. A) : Décoloration des échantillons au cours des cycles, B) : Décoloration de l'échantillon de schiste concassé soumis au mélange de sulfate et nitrate à la fin du 10^{ème} cycle.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

VII.5.2. Commentaire

Dans cet essai il a été observé :

- que les échantillons soumis au nitrate se sèchent plus rapidement comparés aux autres échantillons (figure VII.8).
- que pour tous les grains, une décoloration a été observée, signe d'altération chimique. Les schistes concassés soumis au nitrate et ceux soumis à l'eau déminéralisée ont pris une couleur brune laissant apparaître quelques taches blanches. Les schistes concassés soumis au sulfate et ceux soumis au mélange de sulfate et nitrate se colorent en vert avec de grandes tâches blanches.

VII.6. Courbes granulométrique des différents échantillons

Les figures ci-dessous regroupent les courbes granulométriques obtenues pour chaque cycle du matériau schisteux soumis aux cycles de dégradabilité au mouillage séchage.

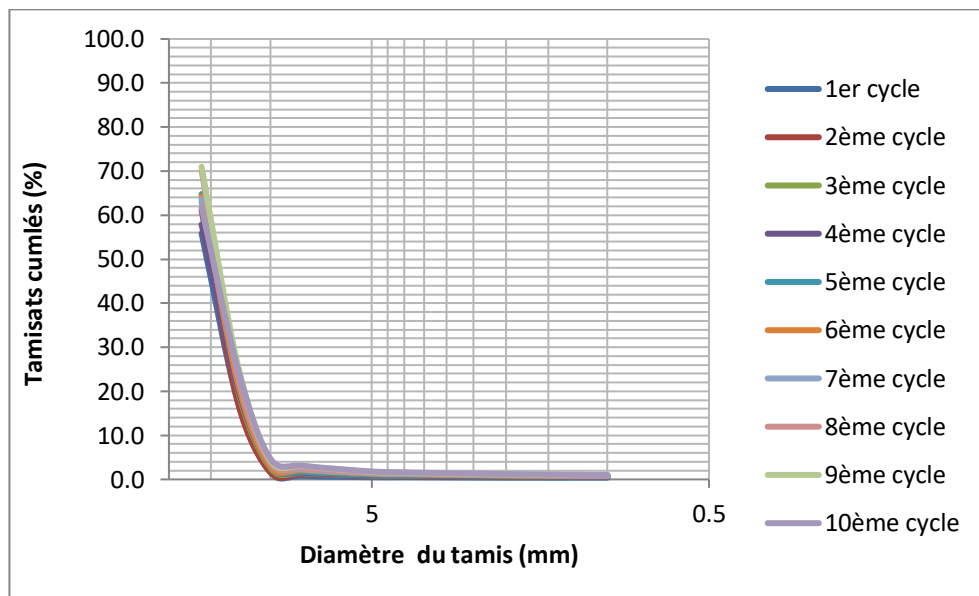


Figure VII.10. Courbes granulométrique des 10 cycles, subi par le schiste soumis à l'eau déminéralisée.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

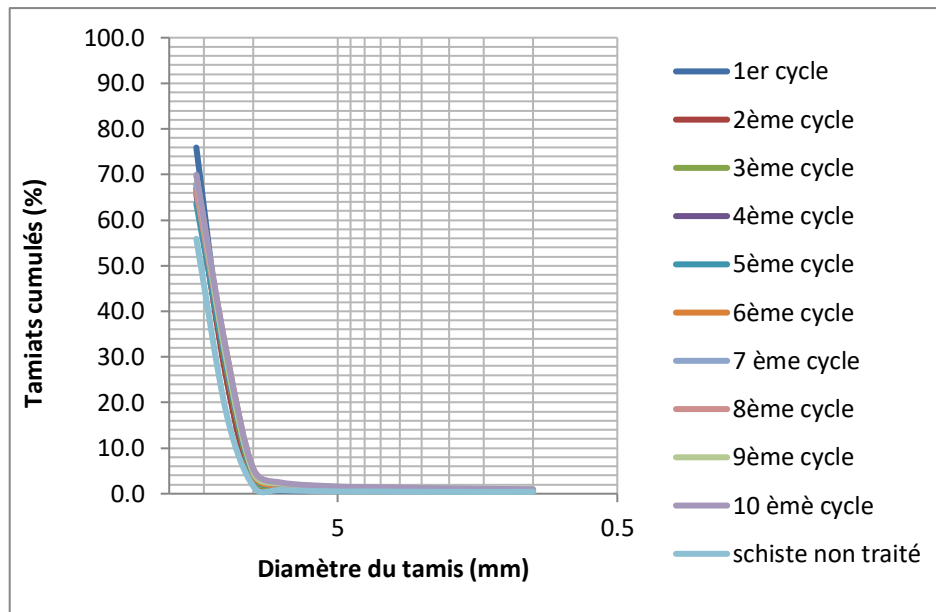


Figure VII.11. Courbes granulométriques des 10 cycles, subi par le schiste soumis au sulfate en comparaison avec un schiste non traité.

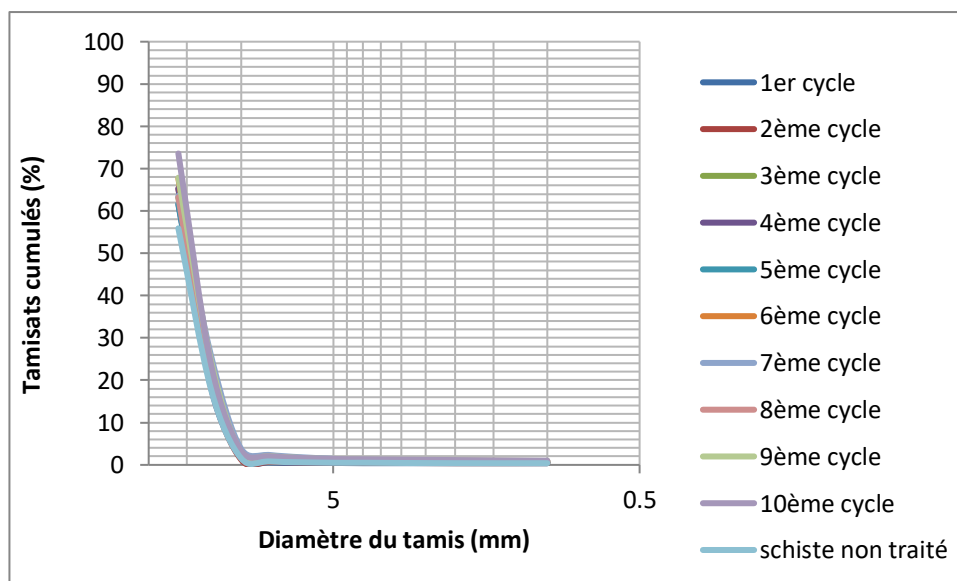


Figure VII.12. Courbes granulométriques des 10 cycles, subi par le schiste soumis au nitrate, en comparaison avec la granulométrie d'un schiste non traité.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

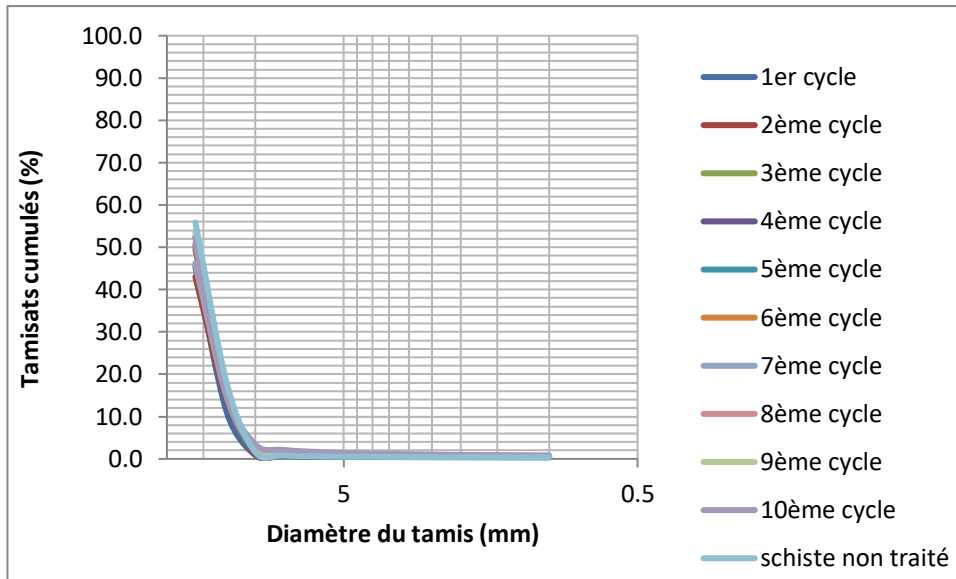


Figure VII.13. Courbes granulométriques des 10 cycles, subi par le schiste soumis au mélange de sulfate et nitrate en comparaison avec le schiste non traité.

VII.6.1. Interprétation

Au cours des 10 cycles, la granulométrie de chaque échantillon s'étale et se décale vers la droite, avec formation de particules fines par rapport au schiste non altéré. La présence des eaux acidifiées ainsi que l'effet de séchage mouillage dégradent la roche schisteuse. L'échantillon soumis au mélange de sulfate nitrate se dégrade un peu moins comparativement aux autres échantillons étudiés.

VII.6.2. Courbes granulométriques des 10 cycles des différents échantillons

Les figures ci-dessous regroupent les courbes granulométriques obtenues au 2^{ème}, 5^{ème} et 10^{ème} cycle du matériau schisteux soumis aux cycles de dégradabilité au mouillage séchage.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

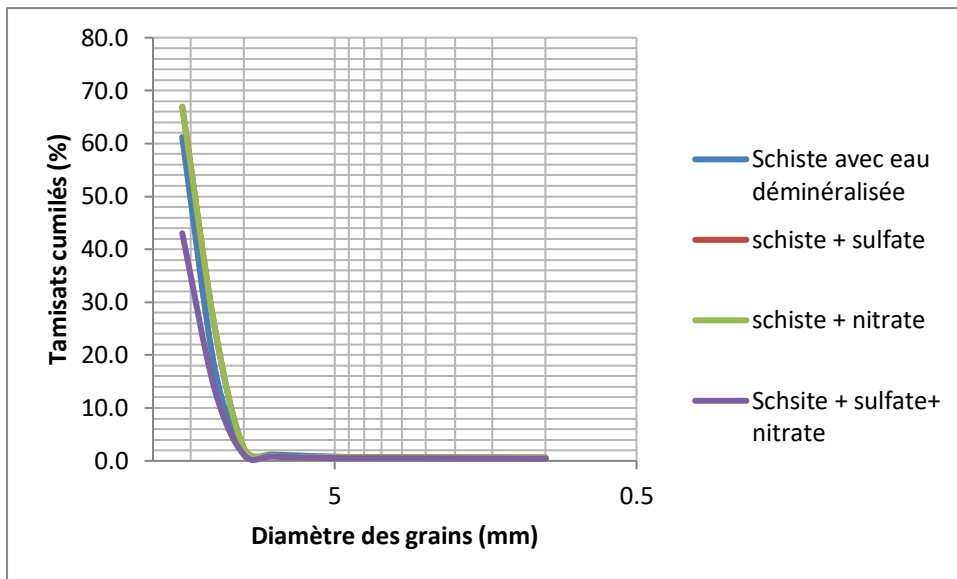


Figure VII.14. Comparaison des courbes granulométriques des différents échantillons au 2^{ème} cycle.

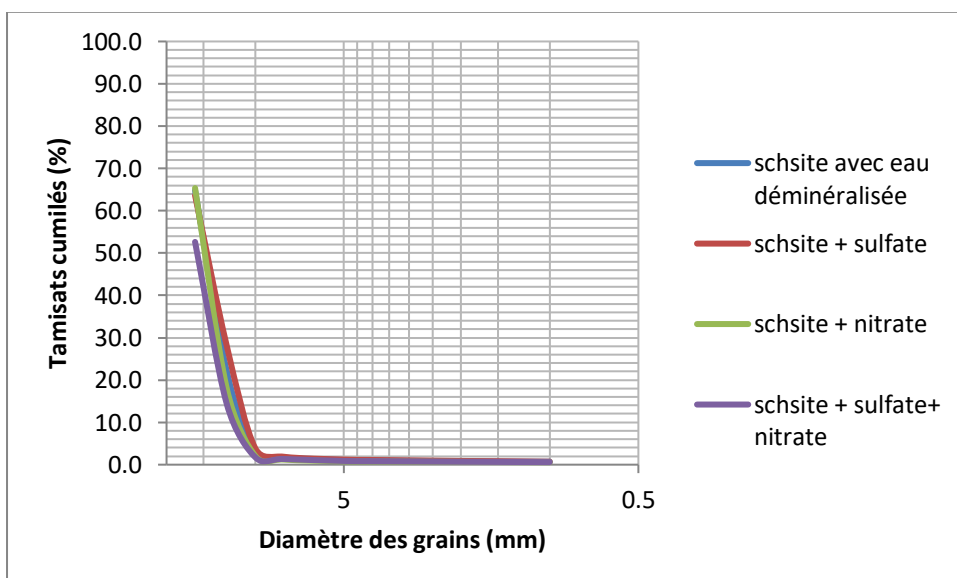


Figure VII.15. Comparaison des courbes granulométriques du 5^{ème} cycle des différents échantillons.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

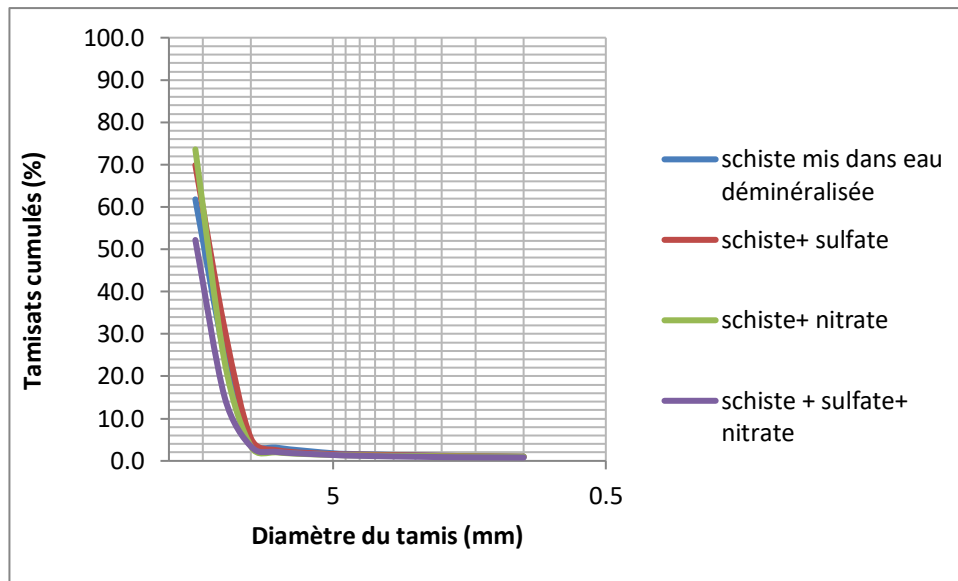


Figure VII.16. Comparaison des courbes granulométriques des différents échantillons au 10^{ème} cycle.

VII.6.3. Interprétation

Au Cours des 10 cycles, il a été observé que l'échantillon soumis au sulfate est le plus décalé vers la droite par rapport aux autres échantillons. L'échantillon acidifié au nitrate au cours des cycles se confond avec l'échantillon soumis à l'eau déminéralisée. Quant à l'échantillon acidifié au mélange de sulfate + nitrate, sa courbe granulométrique au fil des cycles est la plus décalée vers la gauche par rapport à tous les échantillons.

VII.6.4. Commentaire

- Le sulfate est l'acide qui dégrade le plus l'échantillon de schiste.
- L'effet de dégradation du nitrate tend à se confondre au fil des cycles avec les effets de l'eau déminéralisée.
- Le mélange de sulfate et nitrate est celui qui dégrade le moins l'échantillon de schiste, créant même une certaine stabilisation de la roche.

VII.7. Vitesse d'évolution de la dégradation

L'observation des courbes granulométriques obtenues à partir des essais d'altérabilité permet de porter une appréciation qualitative portant sur la cinétique d'évolution du matériau.

Nous avons retenu deux critères d'appréciation de l'altérabilité du schiste :

- Tamisât 5 mm entre chaque cycle
- Vitesse de l'évolution jugée par la cinétique d'évolution du matériau entre chaque cycle (tableau VII.7)

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

La vitesse d'évolution de la dégradation du schiste concassé précédemment est déduite par la formule suivante (Porokhovoi, 1995) :

$$C = \frac{P_{n+1} - P_n}{P_{n+1}}$$

P étant le % cumulé du tamisât à 5mm au cycle n

C : Cycles [(n+1)-n]

Tableau VII.7. Vitesse de dégradation des schistes soumis au 10 cycle.

Cycles d'altération	C1,2	C2,3	C3,4	C4,5	C5,6	C6,7	C7,8	C8,9	C9,10
C schiste + eau distillée	37,5	11,11	10	9,09	15,38	7,14	6,67	11,76	5,56
C schiste+ nitrate	0	28,57	12,5	20	0	28,57	7,69	0	7,14
C schiste + sulfate	14,29	22,22	18,18	8,33	7,69	0	7,14	6,66	6,25
C schiste+ sulfate+ nitrate	20	16,66	25	11,11	10	0	9,09	8,33	14,28

VII.7.1 Interprétation des résultats

L'examen du tableau (VII.7) montre que :

- Il existe une dégradation au fil des cycles d'imbibition séchage aux différents environnements.
- La vitesse de dégradation est la plus élevée entre le 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} cycle
- Le sulfate est l'acide qui dégrade le plus la roche schisteuse.

VII.8. Essai mécanique : cisaillement à la boîte de Casagrande

L'essai a été réalisé sur les quatre échantillons de 0/6,3mm ayant subi les 10 cycles de séchage et mouillage à l'eau déminéralisée et à l'eau acidifiée au nitrate, au sulfate et au mélange de sulfate + nitrate. Quatre essais de cisaillement ont été réalisés pour différentes contraintes normales : $\sigma_1=100$ kPa, $\sigma_2=200$ kPa, $\sigma_3= 300$ kPa, $\sigma_4= 400$ kPa pour chaque type d'échantillons soumis aux acides et traités à l'eau distillée.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

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

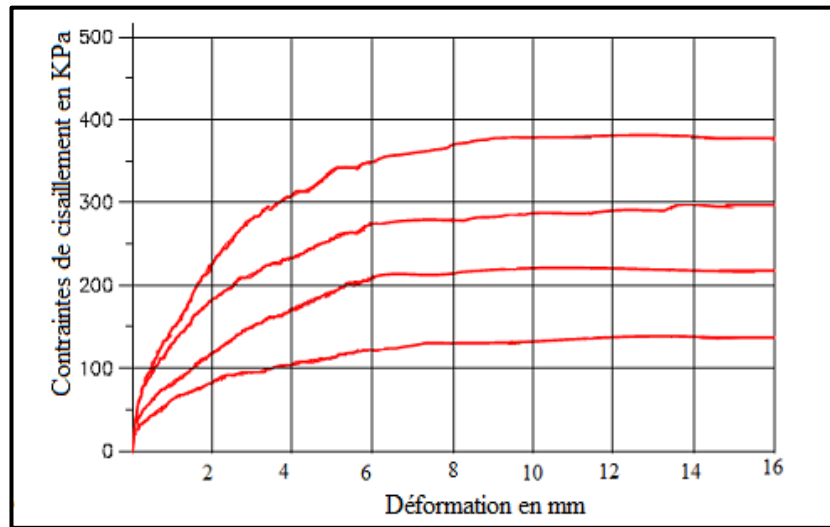


Figure VII.17. Courbes de cisaillement de l'échantillon schiste soumis à l'eau déminéralisée.

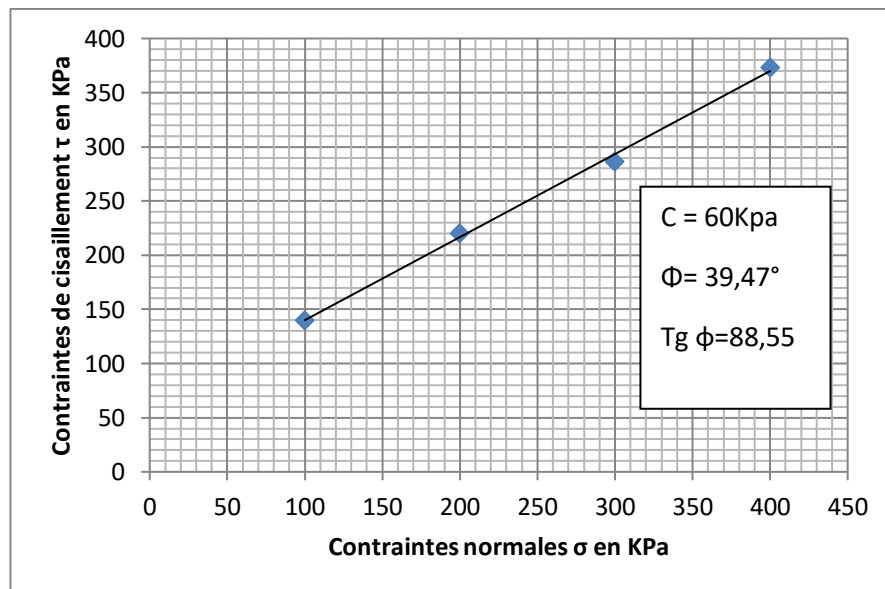


Figure VII.18. Droite intrinsèque du matériau schiste traité à l'eau déminéralisée.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

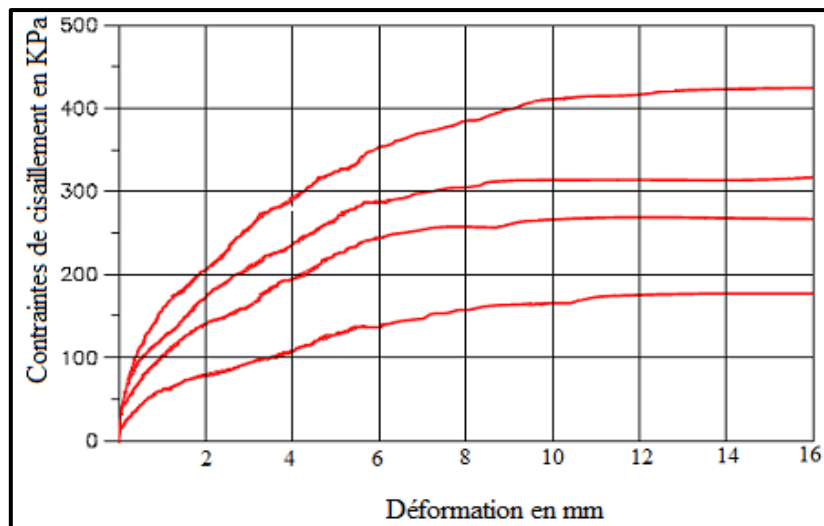


Figure VII.19. Courbes de cisaillement de l'échantillon schiste soumis au sulfate.

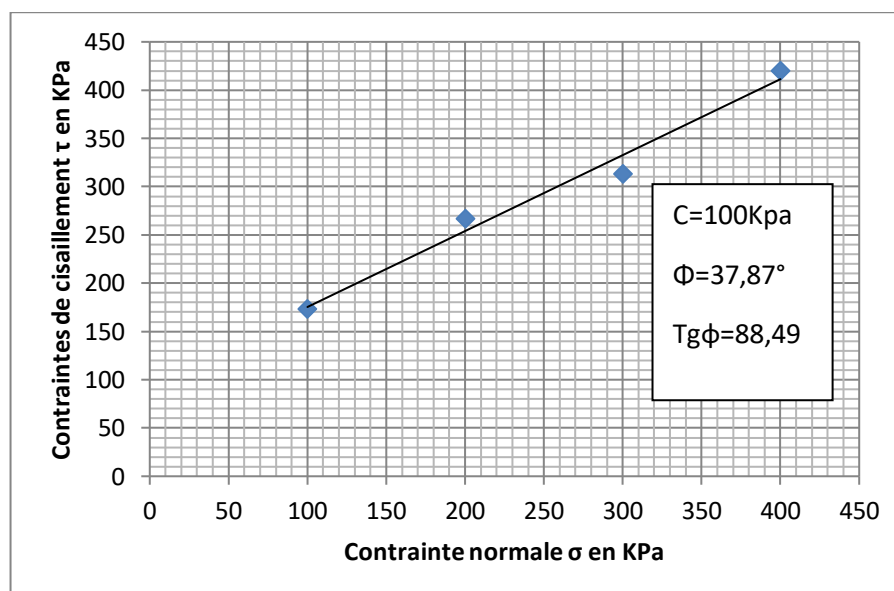


Figure VII.20. Droite intrinsèque du matériau schiste soumis au sulfate.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

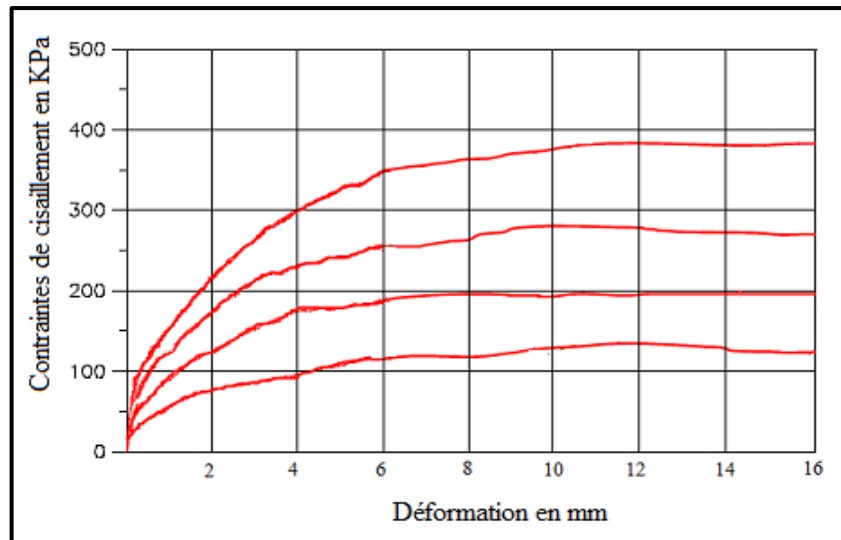


Figure VII.21. Courbes de cisaillement de l'échantillon schiste soumis au nitrate.

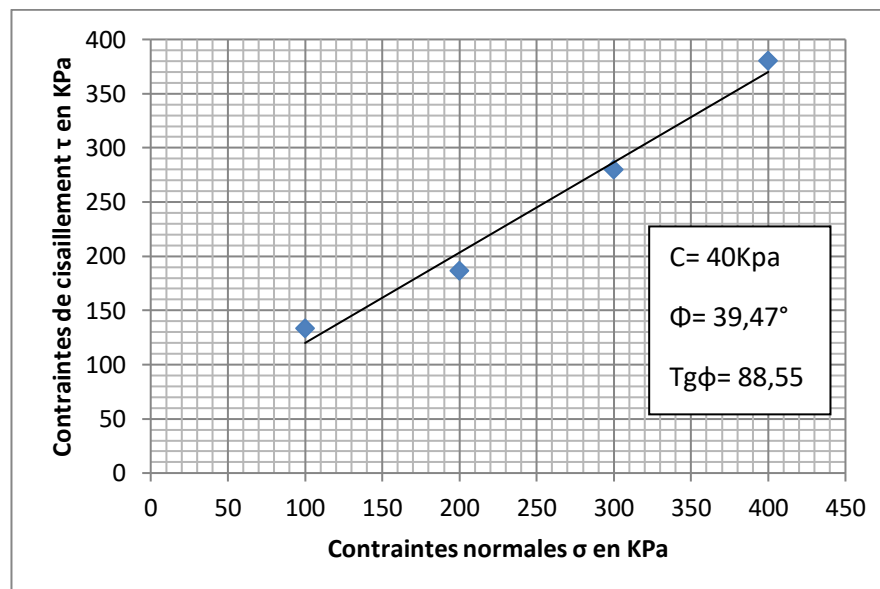


Figure VII.22. Droite intrinsèque du matériau schiste soumis au nitrate.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

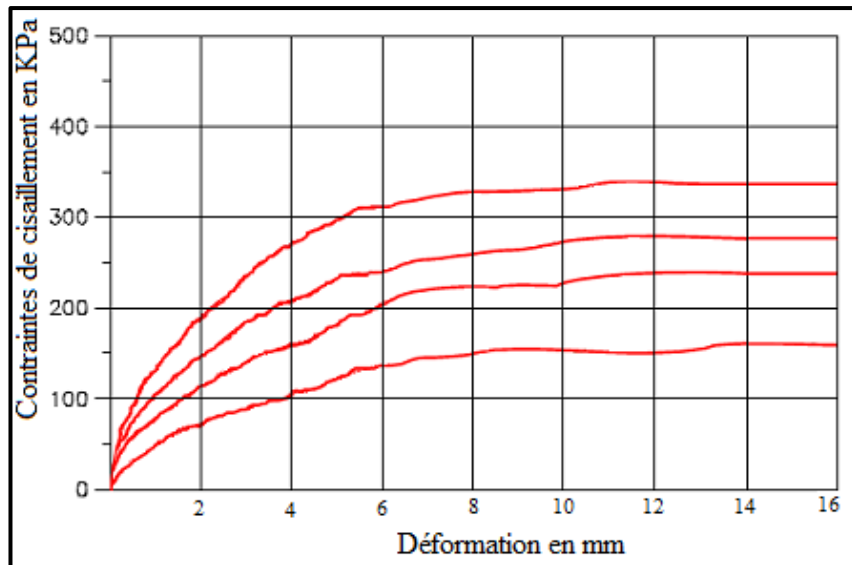


Figure VII.23. Courbes de cisaillement de l'échantillon schiste soumis au mélange de sulfate et nitrate.

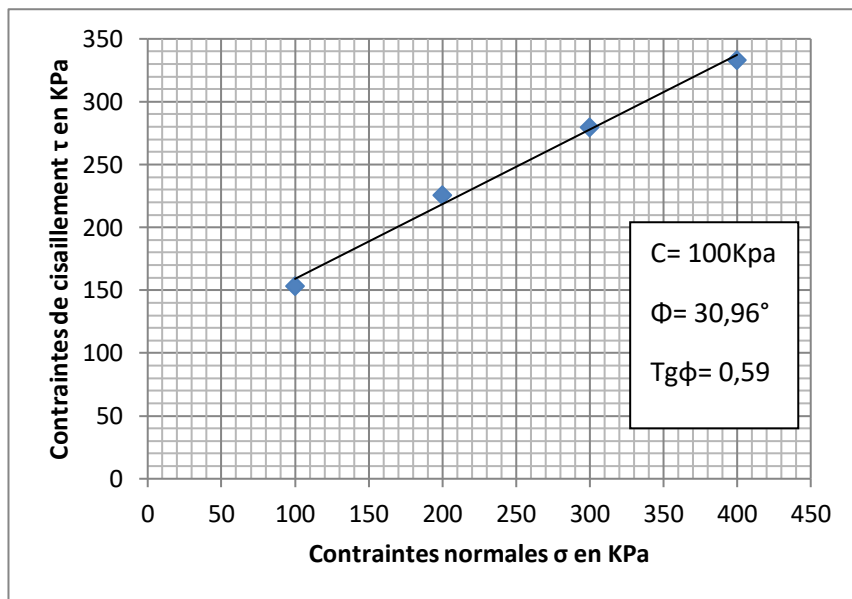


Figure VII.24. Droite intrinsèque du matériau schiste soumis au mélange de sulfate et nitrate.

Chapitre VII : Evaluation de la dégradabilité aux essais d'altérabilité

Tableau VII.8. Cohésion et angle de frottement.

Schiste reconstitué	Cisaillement	
	C (Kpa)	φ°
Intacte	10	41,19
Affecté par l'eau déminéralisée	60	37,57
Pollué au sulfate	100	37,87
Pollué au nitrate	40	39,47
Pollué au mélange sulfate et nitrate	100	30,96

VII.8.1. Commentaire

- L'influence des acides sur le schiste a tendance à diminuer l'angle (φ), et à augmenter la cohésion (C).
- L'eau déminéralisée a un effet proche de celui des nitrates.
- La dégradation du matériau schiste par les acides a accéléré le phénomène de transformation du matériau schisteux à un matériau argileux, d'où l'augmentation de la cohésion et cette augmentation est d'autant plus importante lorsque la quantité d'acide est importante.
- Le sulfate a accéléré la transformation plus que le nitrate.

VII.9. Conclusion

De cette étude, nous avons retenu que dans un milieu acide (pollué au sulfate, nitrate, et le mélange des deux) ou neutre (eau saine), la dilatation hydrique à l'étuve engendre une dégradation de la roche schisteuse. L'altération et la dégradation sont plus élevées dans le milieu acide que dans le milieu avec eau saine, et les effets des sulfates sont plus importants que les effets des nitrates.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le schiste est une roche métamorphique schisteuse, présent dans la lithologie d'Ain El Hammam. Cette région abrite plusieurs sources d'eau et des réseaux d'assainissement mal pris en charge.

L'objectif de ce travail était d'étudier expérimentalement le taux de dégradabilité du matériau schisteux, en bloc et en fraction, lorsqu'il est soumis aux cycles de saturation et déshydratation sous l'effet des eaux acides et eaux naturelles.

Les essais ont permis d'une part de comparer l'altération du schiste immergé dans de l'eau saine et celle du schiste immergé dans des acides, puis soumis aux cycles de saturation et déshydratation et d'autre part d'évaluer la dégradation du schiste par les courbes granulométriques, les indices de dégradation et d'altération, et l'essai mécanique au cisaillement. Ces expériences ont permis de tirer les conclusions suivantes :

L'altération des blocs de schiste et les indices de dégradation calculés supposent une réaction chimique produite entre les minéraux de la roche schisteuse et les acides.

La décoloration et la fragilisation ont permis de classer les roches altérées dans le tableau de Fookes : les roches acidifiées en classe III et les roches altérées à l'eau déminéralisée en classe II.

Les courbes granulométriques tracées confirment la sensibilité de la roche aux acides et montrent une dégradation dans le milieu acide et neutre, cette dégradation est plus élevée chez l'échantillon soumis au sulfate. Quant au nitrate, son influence se confond avec l'effet de l'eau déminéralisée. Concernant le mélange, les deux acides dégradent moins le matériau schisteux, créant une certaine stabilité.

Les essais de cisaillement ont permis de conclure que les acides ont tendance à augmenter la cohésion et à diminuer l'angle de frottement. Le sulfate étant l'acide qui fait réagir le plus les minéraux argileux du schiste. Ceci est vérifié par la vitesse de dégradation.

Cette étude confirme les caractéristiques faibles à moyennes du schiste et sa sensibilité aux effets des eaux qu'elles soient pures ou polluées. Ceci a affaibli la couche imperméable du schiste engendrant ainsi le glissement de terrain à Ain El Hammam.

Nous suggérons donc en perspective à ce travail ce qui suit :

- Mieux connecter et gérer les réseaux d'assainissement ;
- Mettre en place un réseau fiable de drainage des eaux de pluies.

Bibliographie

A

ABDESSELAM M., MANIA J., MUDRY J., GÉLARD J-P., CHAUVE P., LAMI H., AIGOUN C. (2000), Arguments hydrogéochimiques en faveur de Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (dorsale kabyle, élément des Maghrébides). Revue des sciences de l'eau, Rev.Sci, Eau 13/2(2000) 155-166.

ANDREN A. (2006), Degradation of Rock and Shotcrete due to Ice Pressure and Frost Shattering.a review Lulea TekniskaUniversitet:Research report 2006:19.

APPELO, C.A.J., POSTMA D. (2005), Geochemistry, Groundwater and Pollution.2nd Edition. A.A. Balkema. Amsterdam, the Netherlands.

ARIKAN F., AYDIN N. (2012), Influence of weathering on the Engineering Properties of Dacites in Northeastern Turkey. International Scholarly Research Network ISRN Soil Science. Volume 2012, Article ID 218527, 15 pages doi: 10.5402/2012/2/218527

AWADH S.M., ABDULHUSSEIN F.M., Al-KILABI J.A.(2016),Hydrogeochemical processes and water-rock interaction of groundwater in AL-Dammam aquifer at Bahr al-Najaf, Central IRAQ. Iraqi Bulletin of Geology and MiningVol.12, No.1, p 1-15.

B

BAEDECKER P.A., REDDY M.M., REIMANN K.J., & SCIAMMARELLA, C. A. (1992).Effects of Acidic Deposition on the Erosion of Carbonate Stone Experimental Results from the United States National Acid Precipitation Assessment Program (NAPAP). AtmosphericEnvironment, 26(2), 147–158.

BAHIR M., MENNANI A., JALAL M., FAKIR Y. (2002), Impact de la sécheresse sur les potentialités hydriques de la nappe alimentant en eau potable la villed'Essaouira (Mogador, Maroc). Notes méthodologiques. Science et Changements Planétaires/Sécheresse, 13-19.

BARBIER A., TERMIER H. et TERMIER G. (1948), Présence du Llanvirn en Grande Kabylie. C. R. Acad. Sci., Paris, 226, 17, 1385-1386.

BARBIER J.CHERY L., (2000) , Le phosphore dans les eaux souterraines de France. Etat des connaissances. Rapport BRGM, /RP 408576-FR, p63.

BAUMONT S. CAMARD J-P. LEFRANC A. FRANCONIE A. (2004), Réutilisation des eaux usées:risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS, 220p.

BAYNES F.J., DEARMAN W.R., MAN Y.,(1978):Practical assessment of grade in a weathered granite Bull. AiGl, vol 18, p 101-109, Paris.

BEAUCHAMP J. (2004), Cours sur « L'altération des roches ». Université de Picardie Jules Verne. 16p.

- BEAUCHAMP J. (2006), L'eau et le sol. Université Jules Verne. <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm>
- BELGHITI M.L, CHAHLAOUI A, BENGOUMI D, EL MOUSTAINE R. (2013), Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe Plio-quaternaire dans la région de Meknès (Maroc). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°14, Juin 2013, pp. 21-36.
- BELL F.G. (2017), Engineering geologie. Edition Elsevier. 2e édition.
- BENAJIBA MH., SAOUD Y., LAMRIBAH A., AHRIKAT M., AMAJOURD N., OULED-ZIAN O. (2013), Evaluation de la qualité microbienne des eaux de la nappe phréatique de Martil au Maroc. Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science, 26(3): 223-233.
- BENEITO J. (1985), Minéralogie-pétrographie. BRGM 82.SGN.537.CO.
- BENOSMAN G. (2012), Migration de particules fines dans un milieu poreux : Application au phénomène de colmatage. Thèse de doctorat de l'école centrale de Paris, 201p.
- BERTRAND G. (2009), De la pluie à l'eau souterraine. Apport du traçage naturel (ions majeurs, isotopes) à l'étude du fonctionnement des aquifères volcaniques. (Bassin d'Argnat, Auvergne, France). Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- BHANDARI A., SURAMPALLI R.Y., CHAMPAGNE P., ONG K. S., TYAG R. D. et LO I. M.C. (2007), Remediation Technologies for soils and groundwater. Reston, Virginie, États-Unis : American Society of civil Engineers.
- BITTON G., GERBA C.P.(1984), Groundwater Pollution Microbiology. John Wiley and Sons, NY.
- BLUM A., CHER L., BARBIER J., BAUDRY D., PETELET-GIRAUD E. (2002), Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport final, Rapport BRGM, RP-51549-FR, 5 volumes, p519.
- BOSSIERE G.(1977), Sur l'existence d'une bande blastomylonitique au nord-ouest de la Grande Kabylie (Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr., 5, sous presse.
- BOSSIERE, G. (1975)- — Une phase tectonique de haute pression en Grande Kabylie (Algérie) les blastomylonites de Sidi Ali bou Nab. 3e Réunion annuelle des sciences de la terre. Montpellier, p59.
- BOST M. (2008), Altération par le gel des massifs rocheux : Etude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures. Matériaux et structures en mécanique. Thèse de doctorat de l'Ecole des Ponts et Chaussées. ParisTech.
- BOUBAKAR H. (2010), Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER). Thèse de doctorat de l'Université, Abdou Moumouni de Niamey (Niger), p. 198.

BREEMEN N.van., BURROUGH P. A., VELTHORST E.J. (1982), Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall. *Nature*, vol. 299, no. 5883, pp. 548–550.

BRGM. (1993), La remontée des nappes d'eau souterraine en site urbain, rapport synthèse RR-30288, 52p.

BRICHA S., OUNINE K., OULKHEIR S., EL HALOUI N., ATTARASSI B. (2007), Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Revue Afrique Science*, 03(3): 391-404.

BRUSSEAU M.L., PEPPER I. et GERBA, C. (2019), *Physical Processes Affecting Contaminant Transport and Fate*, in *Environmental and Pollution Science*. (3e ed.), Burlington, Massachusetts, États-Unis : Elsevier.

BURNOL A., DURO L., GRIVE M. (2006), *Eléments traces métalliques. Guide méthodologique, recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines. Rapport final*, N° INERIS-DRC-06-66246/DESP-R01a, 23-54.

C

CALVERT J.G., STOKWELL W.R. (1984), The mechanisms and rates of the gas phase oxidations of sulphur dioxide and the nitrogen oxides in the atmosphere. in "SO₂, NO₂, oxidations mechanisms – Atmospheric considerations", Calvert J.G editors, Butterworth, Boston: 1-62.

CARROLL D. (1970), *Rock weathering*. Monographs in geosciences. Ed Rhodes W: Fairbridge, 203 p.

CAUCHI, HYVRARD, NAKACHE, SCHWARTZBROD, ZAGURY, BARON, CARRE, COURTOIS, DENIS, DERNAT, LARBAIGT, DERANGERE, MARTIGNE, SEGURET.(1996), Dossier : la réutilisation des eaux usées après épuration. *Techniques, Sciences et Méthodes*, 1996, 2 : 81-118.

CELLE H. (2000), *Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée occidentale, approche isotopique et chimique*. Thèse de Doctorat de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, France, 222p.

CHEREMISINOFF N.P. (1998), *Groundwater Remediation and Treatment Technologies*. Ed. William Andrew.

CHOCAT, B. (1997), *Eurydice 92 Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Paris : Tec et Doc Lavoisier.

CHU, L., CHEUNG, K. et WONG, M. (1994), Variations in the chemical properties of landfill leachate. *Environmental Management*, vol. 18, n°1, p. 105-117

CITEAU L. (2008), Transfert eaux-sols-plantes de micropolluants : état des connaissances et application aux eaux de ruissèlement urbaines. Rapport de synthèse. Agence de l'Eau seine Normandie. Nanterre.

CLARK M., SMALL J. (1982), Slopes and weathering. Cambridge University Press, 12 p.

COQUE R. (2002) : *Géomorphologie*. 6e édition : Edition : Armand Colin.

CYR M. La géologie appliquée dans le génie civil. Cour de l'INSA de Toulouse.
<http://www.unicem.org/>

D

DÉGBEY C., MAKOUTODÉ M., OUENDO E.M, DeBrouwer C. (2010), Pollution physicochimique et microbiologique de l'eau des puits dans la Commune d'Abomey-Calavi au Bénin. International journal of Biological and Chemical Sciences. Volume 4 (6).

DEMANGE M. (2009), Les minéraux des roches: caractères optiques, composition chimique, gisement. Collection Sciences de la terre et de l'environnement. Presses des Mines, 173p.

DEPETRIS P.J. PASQUINI A.I., LECOMTE K. L. (2014), Weathering and Riverine Denudation of continents. Springer Brief in Earth System Sciences, Doi: 10.1007/978-94-007-7717-0, Springer India.

DERRUAU M. (1996), Les formes du relief terrestre. Notion de géomorphologie. 8e édition : Armand Colin. 119p.

DESJARDINS R. (1997), Le traitement des eaux. 2^{ème} édition. Ed. Ecole polytechnique.

DETAY M. (1997), Gestion active des aquifères. Edition Masson, Paris.

DÉVIGNE J. P. (2008), Geomicrobiologie. Encyclopaedia Universalis.

DJERBAL L., MELBOUCI B. (2012), Le glissement de terrain d'Ain El Hammam (Algérie). Bull. Eng. Geol. Environ. 71:587–597.

DREWNIK M., FELISIAK I., JERZYKOWSKA I., MAGIERA J. (2008), The Tatra Mts-rocks, Landsforms, weathering and soils. Revue Geoturystyka 2 (13), 51-74pp.

DRUET C. (2020), Développement d'un outil d'aide à la décision pour le choix d'une technique de remédiation des nappes phréatiques. Mémoire maître en environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada., 67p.

DURAND-DASTÈS F. (2008), Climatologie. Encyclopaedia Universalis. 10p.

DURAND-DELGA M. (1980), La Méditerranée occidentale: étapes de sa genèse et problèmes structuraux liés à celle-ci. Mém h Sér Soc Géol de France, no 10, livre jubilaire de la société géol. De France, 1830–1980:203–224.

E

EANET–Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (2019), EANET data on the acid deposition in the East Asian region. <https://www.eanet.asia>

EARLE S.(2015), Physical Geology. PressBooks (<https://pressbooks.com>).

ECKENFELDER W.W. (1982), Gestion des eaux usées urbaines et industrielles. Ed. Lavoisier. Paris.

EI HASSNI A. (2016), Perturbateurs endocriniens dans une station de traitement biologique de lixiviats d'un site d'enfouissement sanitaire : cas du Bisphénol-A., Mémoire maître en environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 91p.

EI OUEDGHIRI K., EI OUALTI A., EI OUCHYM., ZERROUQ F., OUAZZANI CHAHDI F, EI OUALILALAMI A. (2014), Risques sanitaires liés aux composés chimiques contenus dans l'eau de boisson dans la ville de Fès : Cas des ions nitrates et nitrites). J. Mater. Environ. Sci., 5 (S1): 2284-2292.

EPA (2007b). What is Acid Rain?. In U.S. Environmental Protection Agency. Acid Rain. <http://www.epa.gov/acidrain/what/index.html>.

F

FABY J.A.(1997), L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Documentation technique FNDA (Fond National pour le Développement des Adductions d'eau). Hors-Série N°11.

FERGUSON H.I., JEFFRIES D.S. (2013), Pluies acides. [en ligne] In : L'encyclopédie canadienne. <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/pluies-acides>

FINLAYSON-PITTS B.J., PITTS J.N. (1986), Atmospheric chemistry-Fundamentals and experimental techniques. Wiley Ed., New-York, USA.

FOOKES P.G., DEARMAN W.R., FRANKLIN J.A. (1971), Some engineering aspects of rock weathering. Quat.Journ. of Eng. Geol., vol.4. London.

FOUCAULT A., RAOULT J.F.(2000), Dictionnaire de géologie, 5ème édition, 379 p

FOUCAULT A., RAOULT J. P.(2005), Dictionnaire de géologie. 6e éd. Paris : Dunod, 2005. 382 p.

G

GAUTIER, A. (1998), Contribution à la connaissance du fonctionnement d'ouvrage d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial. Thèse de Doctorat. Villeurbanne. INSA de Lyon. 207 p.

GEOMICA (2006) Etude géotechnique de la zone de tassement d'Ain El Hammam (phase I). Rapport interne, p 51.

GEOMICA (2009) Etude géotechnique de la zone de glissement et de tassement de Ain El Hammam (phase II). Rapport interne, p 93.

GIGUERE M. (2010), Ecotoxicologie actualisée des précipitations acides au Québec., Mémoire maître en environnement. Université de Sherbrooke, 75p.

GINOCCHIO R., VIOLLET P.L. (2012), L'énergie hydraulique. Edition Lavoisier.

GOBAT J M , MICHEL ARAGNO, Willy Matthey. (2010), Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols. PPUR Presses polytechniques.

GOLDICH S.S. (1938), A study of rock weathering. Journ.Geol. vol. 46. London.

GOUDIE A.S. A (1999), Comparison of the relative resistance of limestones to frost and salt weathering. Permafrost Periglacial Process: vol. 10, pp. 309-316

GUNZBURGER Y. (2004), Rôle de la thermique dans la prédisposition, la préparation et le déclenchement des mouvements de versants complexes – Exemples des rochers de Valabres Alpes-Maritimes. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 142 p.

H

HADDAD S., MELBOUCI B. (2019), Influence de la pollution des eaux sur la dégradation des roches schisteuses. Revue Algérie équipement, N° 61 : 11-18.

HALL K., ANDRE M-F. (2001), New insights into rock weathering from high-frequency rock temperature data: an Antarctic study of weathering by thermal stress. *Geomorphology*. vol. 41, 23-35 pp.

HAMMADI A. (2016), Transport et dépôt de particules en suspension dans un milieu poreux saturé: effets du milieu et de la polydispersivité des particules. Thèse de doctorat de l'Université du Havre, p139.

HOMAND F., DUFFAUT P. (1998), Mécanique des roches. Edition Ecole des mines de Paris.

HOULE D., OUMET R. et DUCHESNE L. (2011). Les pluies acides et la forêt québécoise. Le naturaliste canadien, Vol. 125, n° automne 2011, p. 208-212.

HOUNSINOU P., MAMAD., DOVONOU F., ALASANE A. (2015). Seasonal evolution of the quality microbiological of the natural waters in the township of Abomey-Calavi (South Benin). British Journal of Earth Sciences Research, 3(1): 30-41.

HOUNSOUNOU E-O., AGASSOUNON DJIKPO TCHIBOZO M., KELOME N.C., VISSIN E.W., MENSAH G.A., AGBOSSOU E., (2016), Pollution des eaux à usages domestiques dans les milieux urbains défavorisés des pays en développement : synthèse bibliographique. International Journal of Biological and Chemical Sciences, p21.

I

ILYAS A., KASHIWAYA K., KOIKE K. (2016), Ni grade distribution in laterite characterized from geostatistics, topography and the paleo-groundwater system in sorowako, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration* 165 : 174–188.

Institut Français de l'éducation (2008) : l'eau, agent d'altération des roches. <http://eduterre.enslyon.fr/thematiques/hydro/erosion/alteration>

IPGP. (2008) : Climat et surfaces continentales.

J

JAVEY C. Bull. (1972): BRGM, vol. 2, III, 1. 40-66 pp.

K

KARATHANANIS A.D., GHEZZIJ.L., WENDROTH O., MATOCHA C.J., UNRINE J., THOMPSON YL.(2014), Subsurface Transport of As , Se , Cu , and Pb Contaminants in Association with Soil and Biosolid Nano- and Macro- Colloid Fractions Austin. *Journal of Hydrology*. 1(1), 1–13.

KECHIDI Z (2010) Application des études minéralogiques et géotechniques du schiste au glissement de terrain d'Ain El Hammam. Mémoire Master, université de Tizi-Ouzou (Algérie), 152p.

KERBOUB Dj., FEHDI Ch. (2014), Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux souterraines : cas de la région d'El Kantar, Cheikh El Arbi. *Afrique SCIENCE* 10(1) 127 – 138.

KITA I., SATO T., KASE Y., et MITROPOULOS, P. (2004), Neutral Rains at Athens, Greece: A Natural Safeguard against Acidification of Rains. *Science of the Total Environment*, 327(1-3), 285–294.

KLEIN C. (1998), Apports atmosphériques en azote inorganique dissous en Méditerranée N-O : dépôt sec par les aérosols et effet des précipitations sur le réseau microbien. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 95 p.

KUMAR P., KUMAR MAHAJANA., KUMAR A. (2019), Groundwater geochemical facie: implications of rock-water interaction at the Chamba city (HP), northwest Himalaya India.

L

LAGACHE M. (1965), Contribution à l'étude de l'altération des feldspaths, dans l'eau, entre 100 et 200° C, sous diverses pressions de CO₂, et application à la synthèse des minéraux argileux. Bull. Soc. franç. Minér. Crist. LXXXVIII, 223-53.

LAGNIKA M., IBIKOUNLE M., MONTCHO J-PC., WOTTO VD., SAKITI NG.(2014), Caractéristiques physico-chimique de l'eau de puits dans la commune de Pobè, Bénin. Journal of Applied Biosciences, 79: 6887-6897.

LE ROUX A. (2001), Dégradations des pierres en œuvre. Rapport interne LCPC. 36 p.

LEMIERE B, J.J SEGUIN J.J, Le GUERN C, D. GUYONNET, BARANGER P H. (2001), Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes : Applications dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau. BRGM/RP-50662FR, p177.

LEMIÈRE B., SEGUIN J.J., LE GUERN C., GUYONNET D., BARANGER PH. (2001), Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes : Applications dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau. BRGM/RP-50662FR, p177.

LIU X., WANG Z., FU Y., YUAN W., MIAO L.(2016): Macro/microtesting and damage and degradation of sandstones under dry-wet cycles. Adv. Mater. Sci. Eng. 1, 1–16.

LIVINGSTON R.A. (2016), Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective. Atmospheric Environment-journal-Elsevier, vol.146, 332-345.

LO F.L., CHEN H.F, et FANG J.N. (2016), Discussion of Suitable Chemical Weathering Proxies in Sediments by Comparing the Dissolution Rates of Minerals in Different Rocks. The Journal of Geology, 2017, volume 125, p. 83–99, by The University of Chicago.

LOYE-PILLOT M.D. (1995), Impact géologique, géochimique et écologique des apports atmosphériques. Bulletin pédagogique trimestriel, n°1, fasc. 295

M

MAGDELAINE C. (2019), Les pluies acides : définition et conséquences. Notre-planet.info.https://www.notre-planete.info/environnement/pollution_air/pluies_acides.php

- MARGAT J. (1972), dictionnaire : Terminologiehydrogéologique. BRGM.
- MARTIN P. (2010), Géologie appliquée au BTP. Edition Eyrolles.
- MARTINELLI I. (1999), Infiltration des eaux de ruissèlement pluvial et transfert de polluants associés dans le sol urbain, vers une approche globale et pluridisciplinaire. Thèse de Doctorat de l'institut National des sciences appliquées de Lyon, 203p.
- MAYER B., BOLLWERK S.M., MANSFELDT T., HUTTER B., and VEIZER J.(2001), The oxygen isotope composition of nitrate generated by nitrification in acid forest floors, *Geochimica et CosmochimicaActa*, vol. 65, no. 16, pp. 2743–2756.
- McBEAN, E. A., ROVERS, F. A. et FARQUHAR, G. J. (1995), *Solide waste landfill engineering and design*. New Jersey, United States of America : Prentice Hall PTR.
- MELBOUCI B. (2006), Etude du phénomène d'écrasement des grains de schiste au compactage. *Revue française de géotechnique* N° 117.
- MFONKA Z., NDAM NGOUPAYOU JR, NDJIGUI PD., ZAMMOURI M., KPOUMIE A, RASOLOMANANA E.(2015), Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 9(4): 2200-2218.
- MISEREZ J.-J.(1973), *Géochimie des eaux du karst jurassien (Contribution physico-chimique à l'étude des altérations)*. Thèse de doctorat de l'université de Neuchâtel,319 p.
- MOHAJAN H-K.(2018), Acid Rainis Local Environment pollution but Global Concern. *MPRA.Open Science Journal of Analytical Chemistry*, Vol. 3, No. 5, pp. 47-55.
- MOHSEN M.S., JABER J.O.(2003),Potential of industrial waste water reuse. *Journal: Desalination* 152, 281–289. DOI : 10.1016/S0011-9164(02)01075-5.
- MORALES-ARRENDONDO J.I., ARMIENTA HERNANDEZ MA., ORTEGA-GUTIERREZ J. E., FLORES-OCAMPO I.Z., FLORES-VARGAS R. (2020), Evaluation of the carbon dioxide behavior in thermal aquifer located at central Mexico and its relation to silicate weathering. *International Journal of Environment Science and Technology*.<https://doi.org/10.1007/s13762-020-02683-3>.
- MOUREY V., VERNOUX J.F. (2000), Agence de l'eau Seine- Normandie, BRGM., Les risques pesant sur les nappes d'eau souterraines d'Iles- de- France.
- MPAKAM H.G., KOUAM KENMOGNE G.R., TAMO TATIETSE T., MAIRE E., BOEGLIN J.L., EKODECK G.E, DUPRE B.(2009),Etude des facteurs de pollution des ressources en eau en milieu urbain : cas de Bafoussam (Ouest- Cameroun). Actes du colloque international sur le thème « changements climatiques et évaluation environnementale », Niamey (Niger) du 26 au 29 Mai 2009, p. 27.
- MUSY A. SOUTTER M. (1991),*Physique du sol*. Collection Gérer l'environnement. Lausanne. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 337 p.

MUSY A., HIGY C. (2004), Hydrologie: Une science de la nature. PPUR presses polytechniques.

N

N'GOLO TOGOLA. Les minéraux et les roches. <https://mern.gouv.qc.ca>

NOLA M, NJINÉ T, KEMKA N, ZÉBAZÉ TOGOUET SH, SERVAIS P, MESSOULI M, BOUTIN CI, MONKIEDJE A et FOTO MENBOHAN S. (2006), Transfert des bactéries fécales vers une nappe phréatique à travers une colonne de sol en région équatoriale : influence de la charge en eau appliquée en surface. Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science, 19(2): 101-112.

NF P94-050 (1995) : Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux-Méthode par étuvage.

NF P94-054 (1991) : Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.

NF P94-068 (1998) : Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.

NF P94-053 (1991) : Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire. Méthode de trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.

Norme AFNOR essai de cisaillement [NF P94- 71-1].

O

OJA E J.(2001), PAC : Pluie acide. In : Environnement Canada.

OLLIER C.D. (1969): Weathering. American Elsevier Publishing Co.

ORLIKOWSKA A., FISCH K., SCHULZ-Bull D.E. (2015), Organic polar pollutants in surface waters of inland seas. Marine Pollution Bulletin, 101(2), 860–866.

P

PEDRO G. (1984), La genèse des argiles pédologiques. Ses implications minéralogiques Physico-chimiques et hydriques. Bull. Sc. Géol., Strasbourg. 37(4), 333-347p.

PEREIRA- BARRETO S. (1960), Altération des roches et mise en place des principaux types de sol dans le GUIDIMAKA, rapport de stage, Centre de Pédologie de HANN- DAKAR.

PISARENKO D., MORAT P., LE MOUËL J-L.(1996), On a possible mechanism of sandstone alteration : evidence from electric potential measurements. *C.R. Acad. Sci.Paris*, t. 322, série II, 17-24 pp.

POROKHOVOI E. (1995), Stabilité à long terme des talus de mines à ciel ouvert dans les massifs de roches basiques et ultrabasiques. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 225p.

PORTIER S., VUATAZ D-F. (2010), Modelling acid-rock interactions and mineral dissolution during RMA stimulation test performed at the soultz –sous-Forets EGS site, France. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*, 25-29 April.

PRICE D.G. (1993), A suggested method for the classification of rock mass weathering by a rating system. *Quat. Jour, of Eng. Geol.* vol. 26, p 69-76. London.

PRICK A. (1999), Etude de la cryoclastie et de l'haloclastie par méthode dilatométrique, Ed Classe des Sciences. Académie Royale de Belgique, 311 p.

Q

QUEVAUVILLER P. (2010), Protection des eaux souterraines- législation européenne et avancées scientifiques. Edition Lavoisier.

R

RAZZAGHE-KARIMI M., ROBERT M. (1975), Altération des micas et géochimie de l'aluminium : rôle de la configuration de la molécule organique sur l'aptitude à la complexation. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences. Sciences naturelle Elsevier*, 280, pp 2645-2648.

REUSS J.O,(1983). Implications of the calcium-aluminium exchange system for the effect of acid precipitation on soil. *Journal of environmental quality*, Vol. 12, n° 4, p. 591-595.

RICHTER J.(1987),The soil as a reactor. *Modelling processes in the soil*. Hannover Allemagne. Catena,192 p.

RITTER D.F., KOCHER R.C., MILLER J.R. (1995), *Process Geomorphology*.Brown Publishers, 54p.

RIVIÈRE, J.L.(1998),Evaluation du risque écologique des sols pollués. Association RE.CO.R.D. Paris : Tec et Doc Lavoisier , 230 p.

RUHE R. V. 1956. Geomorphic surfaces and the nature of soils. *SoilSci.* 82:441–445.

SAAD A. (2011), Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fractures. Rôle des fluides dans leur processus d'altération. Thèse de doctorat de l'Université de Paris Est, 285p.

SAGE J. (2018), L'infiltration des eaux pluviales et son impact sur la ressource souterraine. Cerema, 48p.

SALOMON J.-N. (2006), Précis de Karstologie. 2e éd. Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux. 285 p. ISBN : 2-86781-411-1.

SAUSSE J., JACQUOT E., FRITZ B., LEROY J., LESPINASSE M. (2001), Evolution of crack permeability during fluid-rock interaction. Example of the Brézouard granite (Vosges, France). Tectonophysics, vol. 336, 199-214pp.

SCHUMAN W. (1989), Guide des pierres et minéraux. Edition Delachaux et Nestlé. Paris, 11-92pp.

SEGALEN P. (1966), Altération des minéraux primaires, synthèse des minéraux secondaires au cours de la ferrallitisation. Les sols ferrallitiques, cahiers ORSTOM. Série Pédologie, 1966, 4 (4), p. 5-13. ISSN 0029-7259.

SERGEEVE.M. (1978), Ingenernaiageología (La Géologie del'Ingénieur). En russe .Ed. MGU. Moscou.

SHI H.(2000), Industrial wastewater types, amounts and effects, in : point sources of pollutions : local effects and it's control. Encyclopedia of Life Support Systems, Paris, France, 4 p.

SICARD P. (2006), Caractérisation des retombées atmosphériques en France en zone rurale sous forme de précipitations, gaz et aérosols. Analyses des tendances spatiotemporelles et des séries chronologiques. Thèse de doctorat Université de Lille, 332 p.

SINGHAL B.B. S. GUPTA R. P. (2010), Applied Hydrogeology of Fractured Rocks (2e éd.) Springer.

SREEPAT J. (2014), Fundamentals of physicalGeology. Springer India 2014

SWADOGO.B (2018). Traitement des eaux usées industrielles par des procédés membranaires sous climat sahélien : cas des eaux usées de brasserie au Burkina Faso. Génie des procédés. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier.

T

TANGUY J. (2007), Initiation à la Géologie. Club CPN des Sittelles. Connaître et Protéger la Nature.

TCHURINOV M.V.(red.) (1981), Spravotchnikpoingenernoïgeologii (Le manuel de Géologie de l'Ingénieur). En russe, 290 p. Nedra. Moscou.

TEDOLDI D. (2017), Mesure et modélisation de la contamination du sol dans les ouvrages de gestion à la source du ruissellement urbain. Thèse de doctorat de l'Université de Paris-Est.

TEDOLDI D., CHEBO G., PIERLOT D., KOVACS Y., and GROMAIRE M-C.(2016), Impat of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: a literature review.Science of the total environment, 569-570, 904-926.

THIEBAUT, J. (1951), Étude géologique des terrains métamorphiques de Grande Kabylie. Bull. serv. Carte Géol., Algérie, 5e série, 6, 175 p.

THORNBURY WD. (1969), Principles of geomorphology. 2nd ed. Wiley, New York, 594 p.

TRICART J., CAILLEUX A. (2007),Traité de géomorphologie. Cours de l'Université Paris Diderot VII , 53 p.

U

UN WATER. (2017), Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2017. Paris 07-SP.

V

VAILLANT J.R.(1974), Perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux résiduaires : eaux usées urbaines et eaux résiduaires industrielles. Ed. Eyrolles. Paris.

VAN DER WERF H. (1996), Assessing the impact of the pesticides on the environment. Agriculture. Ecosystems and Environment, 60: 81-96.

VANARA N. (1998), Le karst des Arbailles (Pyrénées occidentales, France). Contrôles tectonique, climatique, hydrogéologique et anthropique de la morphogénèse. Thèse de doctorat de l'Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3.

VAUCLIN, M. (1993), Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol : revue et état de l'art. Actes du séminaire Eaux - Environnement : Modélisation du comportement des polluants dans les hydro systèmes. Paris. Ministère de l'environnement, pp 57-76.

VULLIET L., LALOU L., ZHAO J. (2016), Mécanique des sols et des roches : avec écoulements souterrains et transferts de chaleur. PPUR presses polytechniques, 624p.

W

WALSH M.P., LAKE, L.W., and SCHECHTER, R.S. (1982), A description of chemical precipitation mechanisms and their role in formation damage during stimulation by Hydrofluoric acid, Journal of Petroleum Technology, 34, 2097-2112.

WANG Z., LIU X., YANG X., FU Y. (2017), An Improved Duncan–Chang Constitutive Model for Sandstone Subjected to Drying–Wetting Cycles and Secondary Development of the Model in FLAC3D. Arab. J. Sci. Eng., 42, 1265–1282.

WHALLEY W. B., WARKE P. A., (2005), Wethering. Encyclopedia of geology. Elsevier, 581-590pp.

WOO I. (2003), Altérabilité de granites et gneiss de Corée du Sud. Conséquences sur la stabilité à long terme des talus rocheux. Thèse en géologie : Ecole des Mines de Paris, 205 p.

WOODARD, F. (2001), Industrial Waste Treatment Handbook. Butterworth–Heinemann.

X

XANTHOULIS D. (1993), Valorisation agronomique des eaux usées des industries agroalimentaires. Article périodique, n° :563/3. Ed. CEBEDOC, pp: 27-32.

Y

YAVUZ A.B., TOPAL T. (2007), Thermal and salt crystallization effects on marble deterioration: Examples from Western Anatolia, Turkey. Engineering Geology: 2007: vol. 90, 30-40pp.

Annexes

Annexe 1 : Altération des blocs de schistes après imbibition



Figure 1.1. A) :Bloc de schiste immergé au sulfate, B) et C) : bloc de schiste soumis au sulfate après immersion du 21 juillet 2020 au 06 septembre 2020.

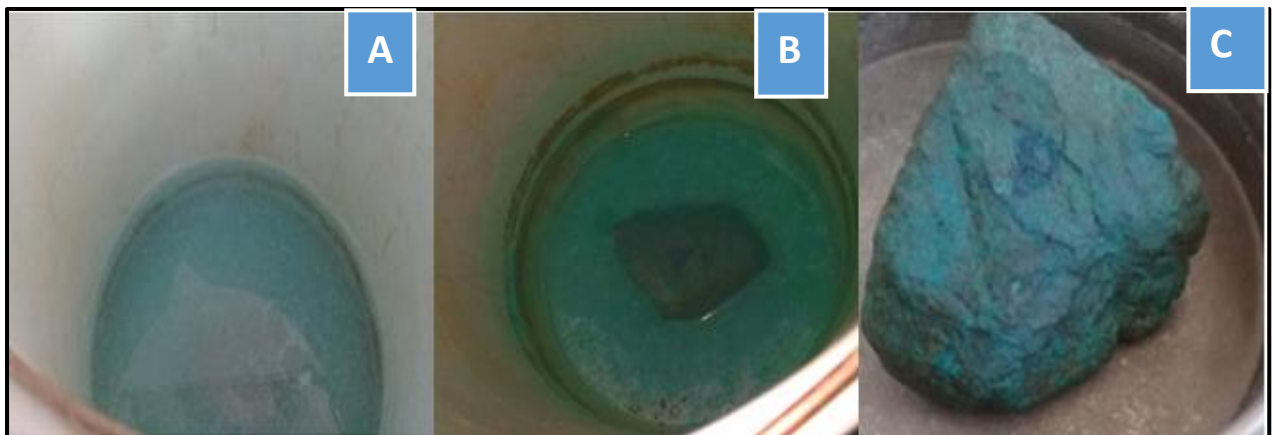


Figure 1.2. A) : Bloc de schiste immergé au sulfate et nitrate, B) et C) : bloc de schiste soumis au mélange de sulfate et nitrate après immersion du 21 juillet 2020 au 06 septembre 2020.



Figure 1.3. A) : Bloc de schiste immergé dans de l'eau minéralisée, B) et C) : bloc de schiste saturé dans de l'eau minéralisée après immersion du 21 juillet 2020 au 06 septembre 2020.

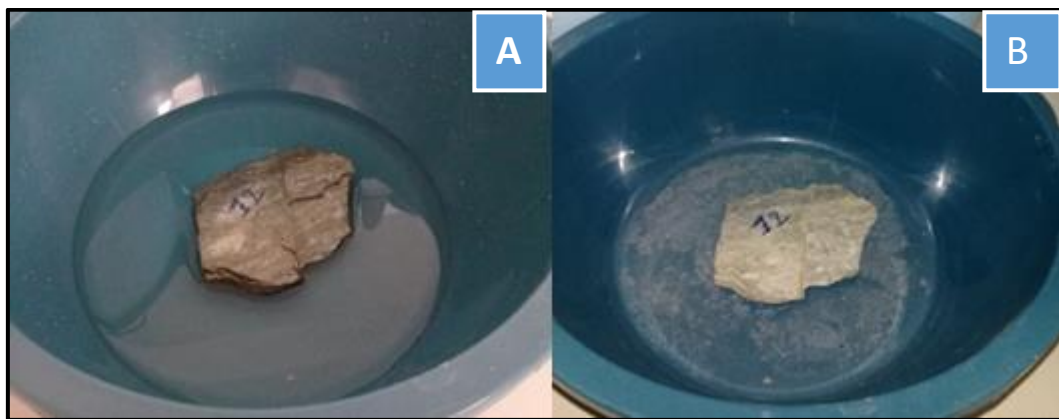


Figure 1.4. A) :Bloc de schiste partiellement imbibé d'eau minéralisée, B):Bloc de schiste après imbibition partiel dans l'eau du 21 juillet 2020 au 06 septembre 2020.

Annexe 2 : Altération des blocs de schistes suite aux effets cycliques

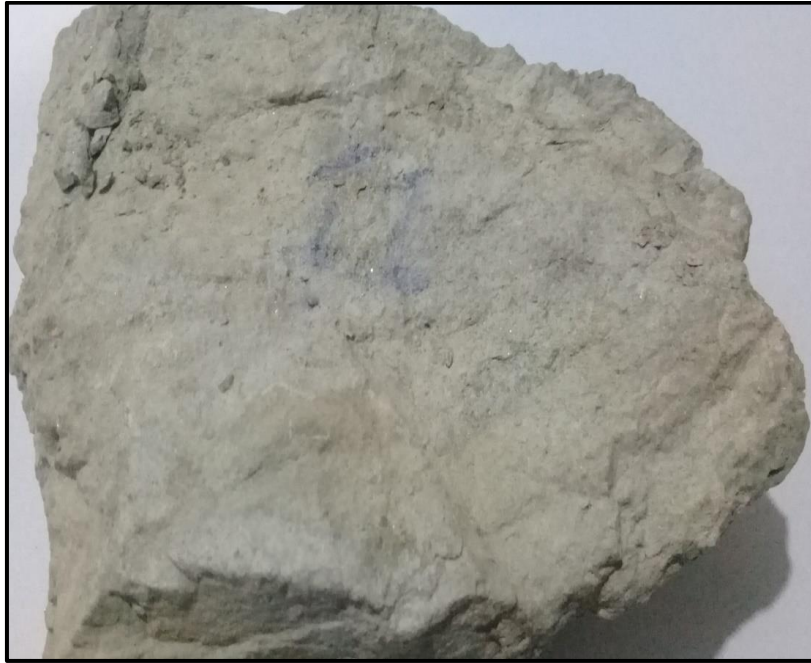


Figure 2.1. Bloc de schiste imbibé d'eau minéralisée, à la fin du 10^{ème} cycle.

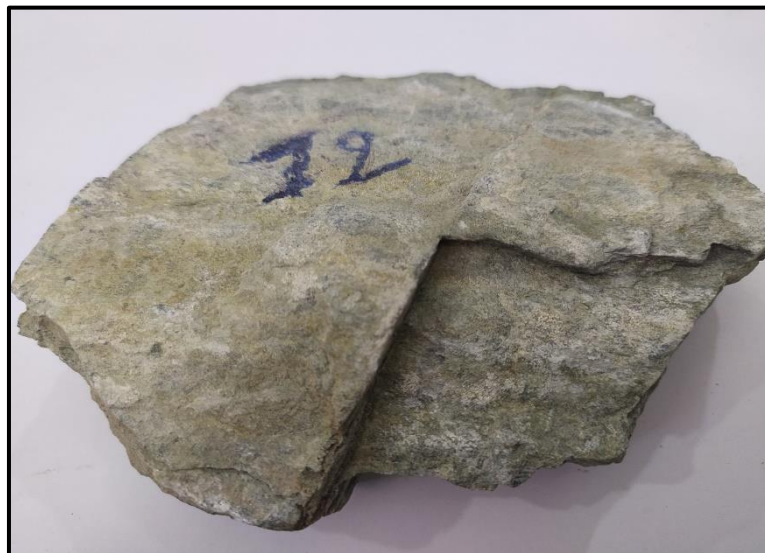


Figure 2.2. Bloc de schiste partiellement imbibé d'eau minéralisée, à la fin du 10^{ème} cycle.



Figure 2.3. Fissuration et décoloration du bloc de schiste soumis au mélange de sulfate et nitrate à la fin du 10^{ème} cycle.



Figure 2.4. Fissuration et décoloration du bloc de schiste soumis au sulfate, à la fin du 10^{ème} cycle.

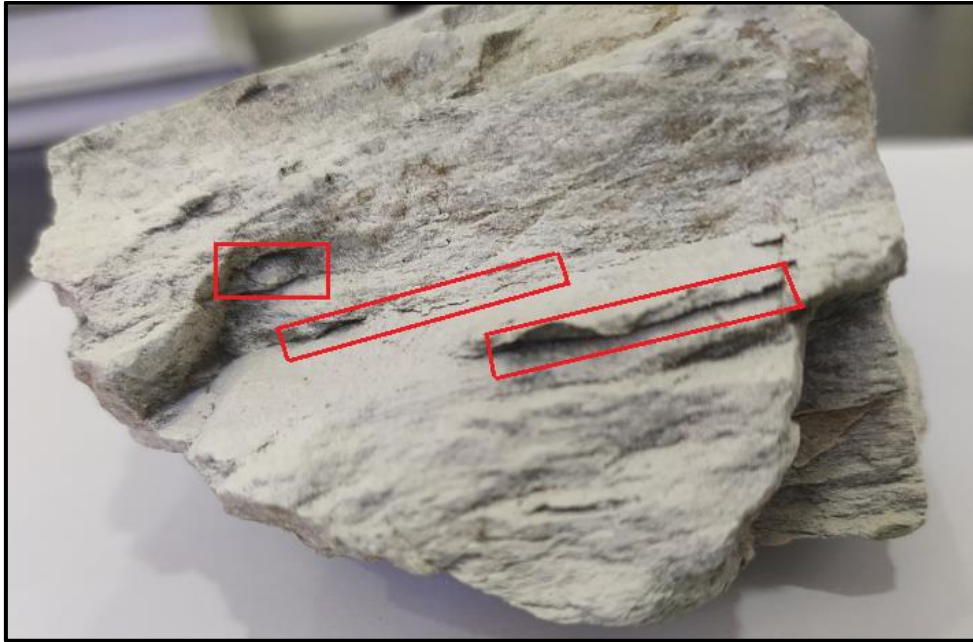


Figure 2.5. Décoloration, *fissuration et dilatation des joints* du bloc de schiste soumis au nitrate à la fin du 10^{ème} cycle.

Annexe 3 : altération de roches concassées



Figure 3.1. Echantillon de schiste concassé immergé dans de l'eau déminéralisée à la fin du 10^{ème} cycle.



Figure 3.2. Echantillon de schiste concassé immergé dans de l'eau polluée au nitrate à la fin du 10^{ème} cycle.

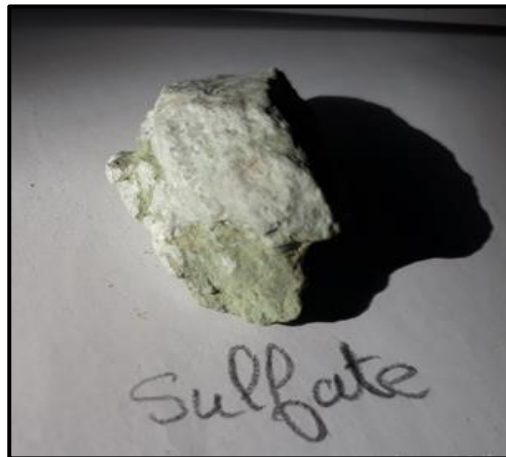


Figure 3.3. Echantillon de schiste concassé immergé dans de l'eau polluée au sulfate à la fin du 10^{ème} cycle.

Annexe 4 : Courbes granulométriques des 10 cycles des différents échantillons

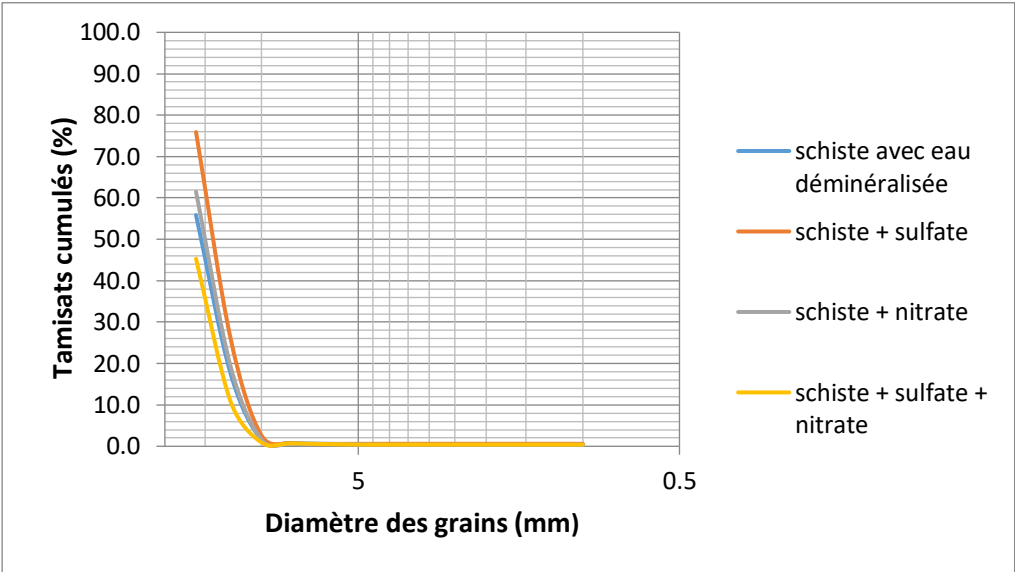


Figure 4.1. Comparaison des courbes granulométriques du 1er cycle des différents échantillons.

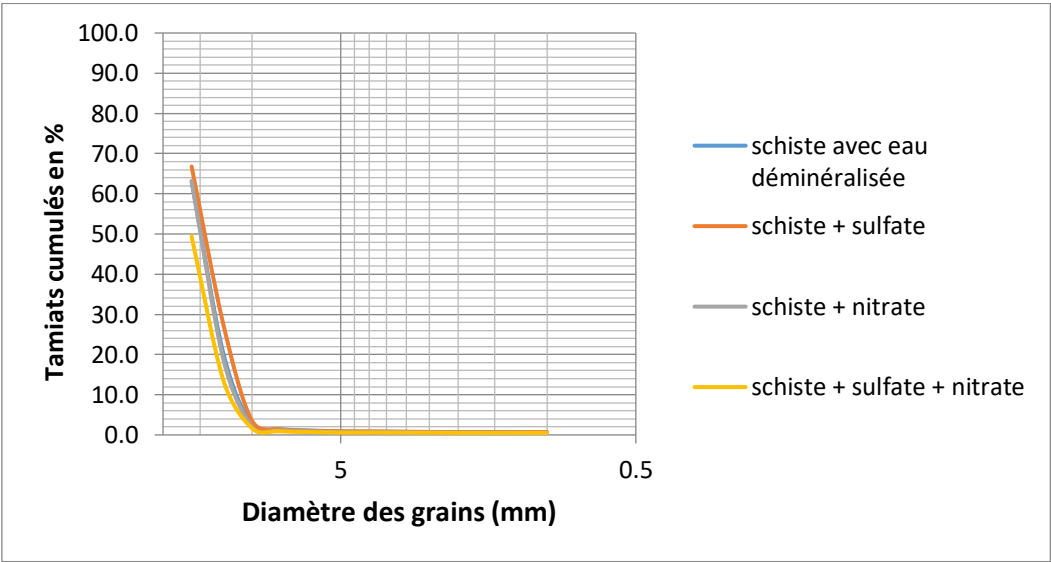


Figure 4.2. Comparaison des courbes granulométriques du 3^{ème} cycle des différents échantillons.

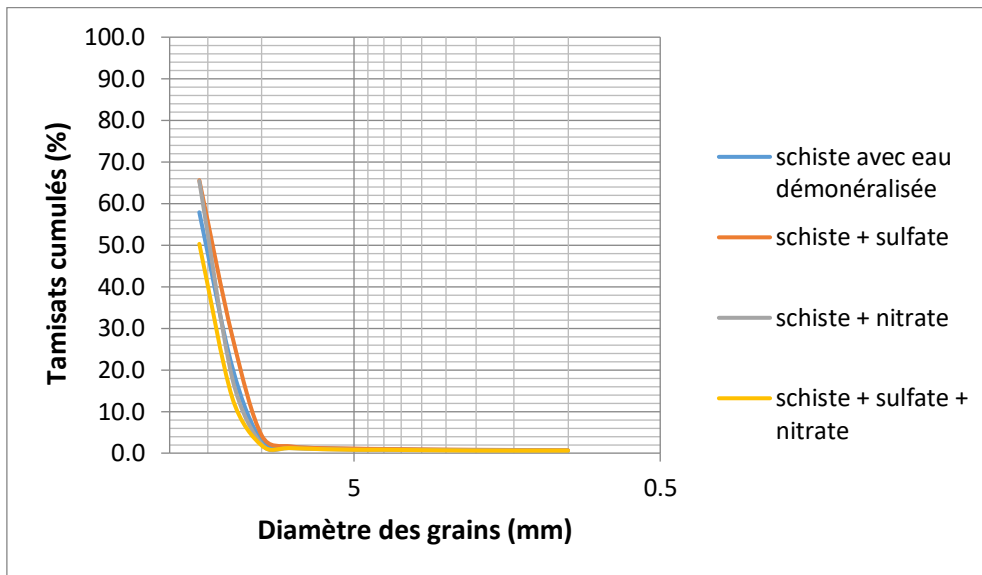


Figure 4.3. Comparaison des courbes granulométriques du 4^{ème} cycle des différents échantillons.

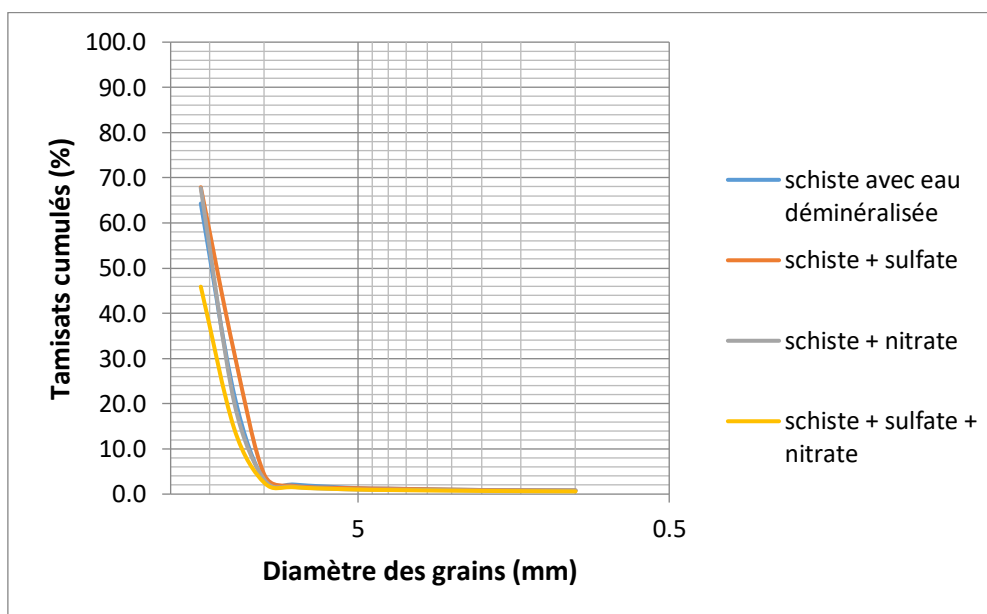


Figure 4.4. Comparaison des courbes granulométriques du 6^{ème} cycle des différents échantillons.

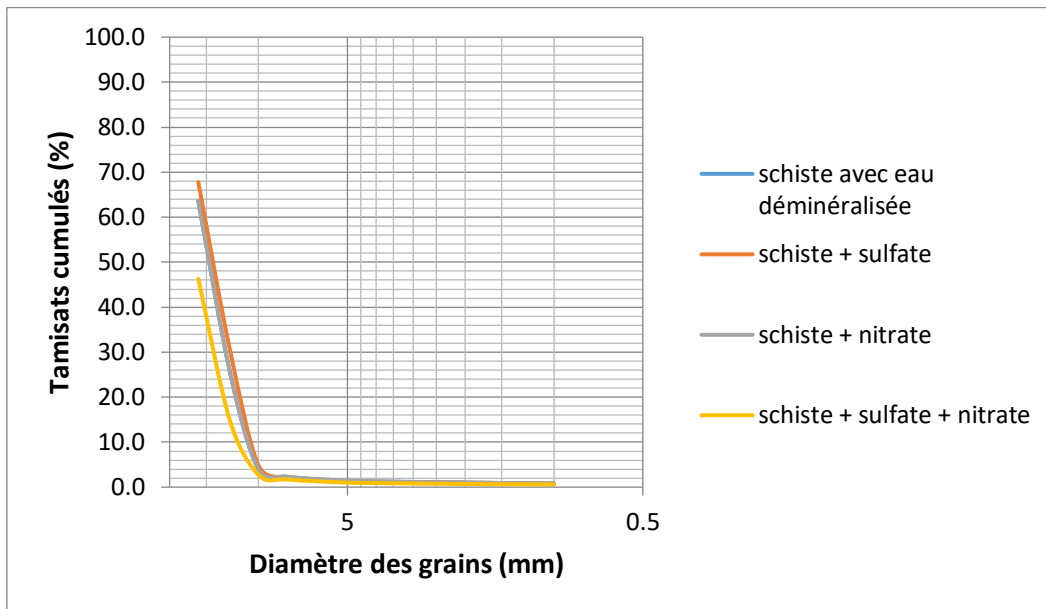


Figure 4.5. Comparaison des courbes granulométriques du 7^{ème} cycle des différents échantillons.

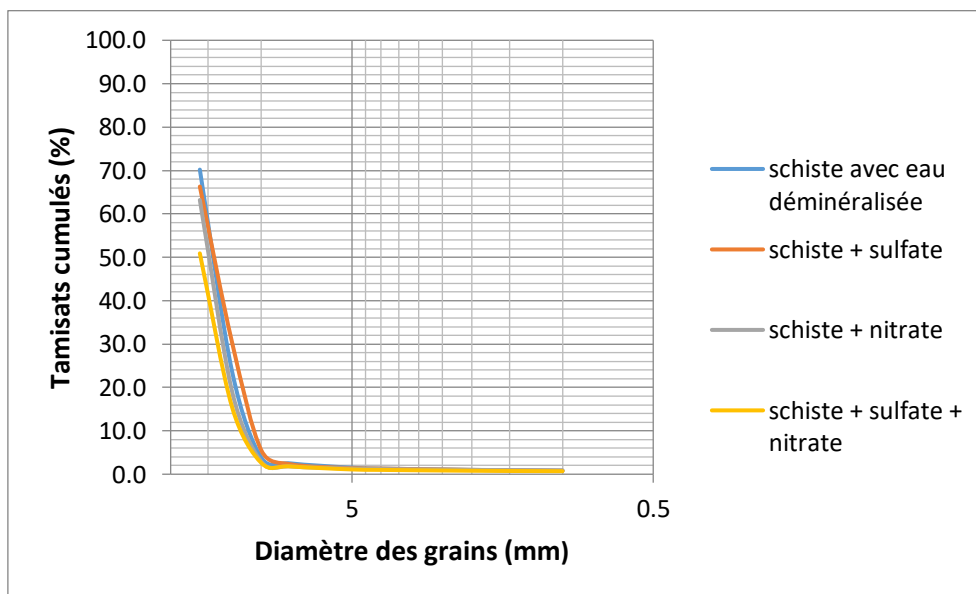


Figure 4.6. Comparaison des courbes granulométriques du 8^{ème} cycle des différents échantillons.

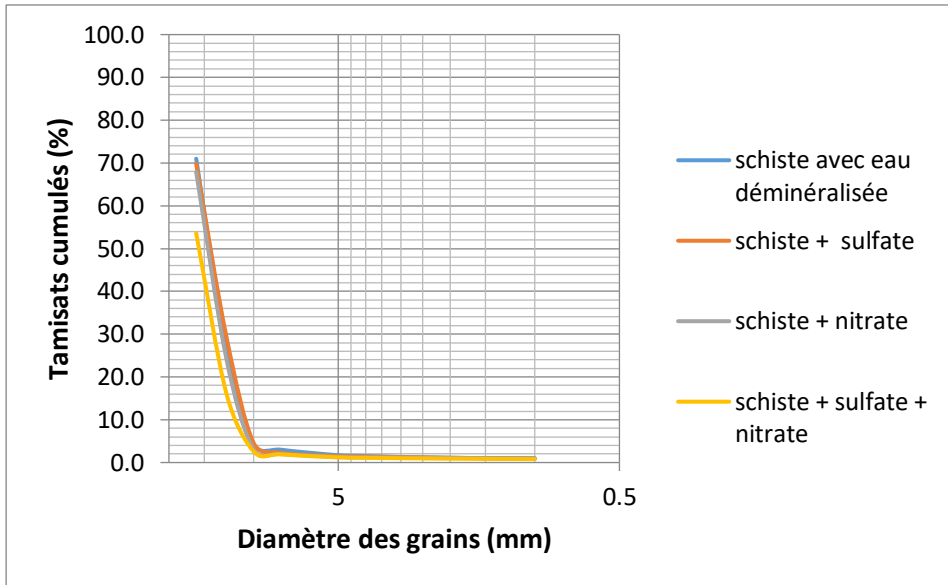


Figure 4.7. Comparaison des courbes granulométriques du 9^{ème} cycle des différents échantillons.