

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL  
LABORATOIRE DE RECHERCHE EN GÉOMATÉRIAUX, ENVIRONNEMENT ET AMÉNAGEMENT  
(LGEA)



## MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL  
OPTION : GÉOTECHNIQUE ET ENVIRONNEMENT

THÈME

### ÉVALUATION DE LA DÉGRADATION CHIMIQUE DES GRANULATS SCHISTEUX À L'ESSAI PROCTOR



PRÉSENTÉ PAR :

**Mr AIT MALEK ABDERRAHIM**

Devant le jury d'examen suivant :

Mme <i>BELHASSANI Ouarda</i>	<i>Maitre-assistant</i> à l'UMMTO	Présidente.
Mr <i>MELBOUCI Bachir</i>	Professeur à l'UMMTO	Rapporteur.
Mme <i>BOUZBOUDJA Aldjia</i>	<i>Maitre de conférences B</i> à l'UMMTO	Examinatrice.

Promotion : 2016/2017.

Soutenu le : 30/ 09 /17.

---

## REMERCIEMENTS

---

Mes premiers remerciements sont adressés à mon directeur de thèse **Mr Melbouci Bachir**, professeur l'Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour son encadrement, sa disponibilité et sa patience durant la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.

Mes chaleureux remerciements sont adressés à **M<sup>me</sup> BELHASSANI Ouarda**, maitre-assistant de classe A à l'UMMTO, qui m'a fait l'honneur de présider le jury, ainsi pour sa clairvoyance, sa disponibilité durant mon cursus master.

Je tiens également à exprimer mes chaleureux remerciements à **M<sup>me</sup> BOUZBOUDJA Aldjia**, Maitre de conférences B, qui m'a fait l'honneur d'examiner ce travail, et pour son aide et ses conseils.

Je remercie vivement **Mr Boudlal Omar**, Maitre de conférences A à l'UMMTO, pour ses conseils et ses motivations, qui m'ont beaucoup aidé tout le long de mon cursus universitaire.

Merci à **Mr Khlellifa Sid Ali** responsable du laboratoire pédagogique de MDS du département de génie civil de Tizi-Ouzou, et pour sa disponibilité durant ma partie expérimentale de ce travail.

Mes chaleureux remerciements sont adressés à **Mr BOUKHERROUB Med Ameziane**, ancien ingénieur du laboratoire pédagogique de mécanique des sols de département du génie civil de l'UMMTO, pour sa disponibilité, et ses conseils.

Je remercie ma chère famille, pour leurs encouragements. Et je tiens enfin à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail en particulier Menana Binor, Djefel dihia, Ait taleb A/Kader, Ouali litécia.

## DÉDICACE

---

*Je dédie ce modeste travail:*

*À mes chers parents.*

*À mon frère nassim et mes sœur (Nouara, Farida, Salima).*

*À mon beau-frère hocine et mon adorable nièce thiziri.*

*À tout mes amis (binor, hakim, ali, qadouche, el hachimi, hocine, lyes, baouz ,tina G , oumsaad, dîhia , et tous les autres )*

*À l'adorable sou*

*Toute la promotion Géotechnique et environnement -2016-2017-*

*Toute la promotion structure 2016-2017.*

# SOMMAIRE

---

Liste des figures

Liste des tableaux.

Listes des principales notations et indices.

**Introduction générale** .....pages 1-2

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES ROCHES.

1. INTRODUCTION.....	page -3-
2. FORMATION DES ROCHES.....	page -4-
3. DU MINÉRAL À LA ROCHE.....	page -4-
3.1.Minéraux constitutifs des roches.....	page -4-
3.1.1.Minéraux des roches magmatiques.....	page-5-
3.1.2.Minéraux des roches sédimentaires.....	page -6-
3.1.3.Minéraux des roches métamorphiques.....	page -7-
3.1.4.Structure cristalline.....	page -8-
4. CYCLE DE FORMATION DES ROCHES.....	page -8-
4.1 La roche ignée.....	page- 8,9-
5. La roche sédimentaire.....	page -9-
5.1 La roche métamorphique.....	page -9-
6. PROPRIÉTÉS DES ROCHES.....	page -9-
6.1 Propriétés physiques.....	page -10-
6.2 Propriétés chimiques.....	page -11-
7. Désagrégation mécanique et altération chimique des roches.....	page -11-
7.1. Désagrégation physique ou mécanique.....	page -11,12-
7.1.1.Agents de désagrégation mécanique.....	page -12-
7.2. Altération chimique.....	page -12,13-
7.1.2.L'approche de Goldschmidt.....	page -13-
7.1.3.Les réactions chimiques d'altération.....	page -13,14-
8. CONCLUSION.....	page -14-

## **CHAPITRE II : ESSAI PROCTOR ET L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE.**

1. INTRODUCTION.....	page-15-
2. ESSAI PROCTOR (NF P94-093) .....	page-15-
2.1. Généralités sur l'essai Proctor.....	page-15-
2.2. Principe de l'essai .....	page-15-
2.3. Appareillage.....	page-16-
2.4. Mode opératoire .....	page-17-
2.4.1 Préparation d'échantillons .....	page-17-
2.4.2. Exécution de l'essai.....	page-18,19-
2.5. Expression des résultats .....	page-20-
3. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR VOIE SÈCHE (NF P 94-056).....	page-21-
3.4. But de l'essai.....	page-21-
3.5. Équipements nécessaires.....	page-22-
3.6. Principe du tamisage .....	page-22-
3.7. Mode opératoire .....	page-22,23-
3.8. Expression des résultats .....	page-24-
4. CONCLUSION.....	page-25-

## **CHAPITRE III :IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX.**

1. INTRODUCTION .....	page-26-
2. MATÉRIAUX.....	page-26-
2.1. Localisation du site .....	page-26-
2.2. Matériaux utilisées .....	page-26,27-
3. LES SCHISTES .....	page-27-
3.1. Définition des schistes .....	page-27-
3.2. Les schistes de la Grande Kabylie .....	page-28-
3.3. Contexte régional .....	page-28-
4. LES DIFFÉRENTS TYPES DE SCHISTE .....	page-29-
4.1. Les schistes du métamorphisme général très faible .....	page-29-
4.2. Les schistes du métamorphisme général faible (epizonale) .....	page-29-
4.3. Les schistes du micaschiste général plus fort (catazonal).....	page-29-
4.4. Les schistes du métamorphisme de contact .....	page-29-
5. ESSAIS D'IDENTIFICATION .....	page-29-
5.1. Teneur en eau NF P94-050 .....	page-29-
5.1.1. Les masses volumiques.....	page-30-

5.1.2. Masse volumique sèche d'un élément de roche : « Méthode par pesée hydrostatique » : NF P94-064 .....	page-30-
5.1.3. Masse volumique des particules solides (pycnomètre) NF P94-054 .....	page-31,32-
5.2. Limites d'Atterberg NF P94-051 .....	page-33-
5.3. Essai VBS NF P94-068.....	page-33-
5.4. Calculs des paramètres physiques du matériau.....	page-34-
6. ANALYSE MINÉRALOGIQUE .....	page-34,35-
7. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE.....	page-35,37-
8. CONCLUSION.....	page-37-

#### **CHAPITRE IV : ESSAIS DE LABO, RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.**

1. INTRODUCTION .....	page-38-
2. CONCASSAGE ET PRÉPARATIONS DES ÉCHANTILLONS.....	page-38-
3. ESSAIS PROCTOR.....	page-39-
3.1. Essai Proctor normal (grand moule), Résultats et interprétations.....	page- 39,40-
3.2. Essai Proctor normal (petit moule), Résultats et interprétations.....	page-40,41-
3.3. Commentaires et comparaison des résultats .....	page-41-
4. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE L'ÉNERGIE DE COMPACTAGE AUX ESSAIS PROCTOR .....	page-41-42-
5. Analyses granulométriques avant la dégradation à l'enceinte climatique .....	page-43-
6. ESSAI DE DÉGRADATION .....	page-44-
6.1. Essai de dégradation à l'enceinte climatique (gel-dégel).....	page-44-
6.2. Essais avec des produits chimiques.....	page-44,45-
7. Essais Proctor après dégradation.....	page-45-47
7.1. Influence des cycles climatiques sur le poids volumique .....	page-48-
8. Analyses granulométriques après les essais climatiques.....	page-49-
8.1. Évaluation de la dégradation du schiste aux cycles climatiques.....	page-49,53-
8.2. Évaluation de la dégradation du schiste en fonction des polluants en fixant l'énergie de compactage .....	page-54,59-
8.3. Influence de l'énergie de compactage sur le matériau schiste imbibé de produits chimiques et soumis aux cycles climatiques .....	page-59,66-
9. CONCLUSION.....	page-67-

## CHAPITRE V : GÉNÉRALITÉS SUR LA DIMENSION FRACTAL.

1. INTRODUCTION .....	page-68-
2. DÉFINITION .....	page-68-
3. NOTION DE FRACTAL.....	page-69-
3.1. Types de fractals .....	page-69-
3.1.1. Fractals déterministes .....	page-69-
3.1.2. Fractals non déterministes .....	page-69-
4. NOTION DE DIMENSION FRACTALE.....	page-70-
4.1. Dimension fractale .....	page-70-
4.2. Dimension euclidienne (topologique).....	page-71,72-
4.3. Définition mathématique de la dimension fractale .....	page-73-
4.4. Vérification avec la dimension classique.....	page-73-
5. MÉTHODE DE CALCUL.....	page-73-
5.1. Méthode des boîtes.....	page-74-
5.2. Méthode des lignes parallèles .....	page-74-
5.3. Méthode des masses.....	page-75-
6. CONCLUSION .....	page-76-

## CHAPITRE VI : CALCUL DE LA DIMENSION FRACTAL

1. INTRODUCTION .....	page-77-
2. MÉTHODE DE CALCUL (MÉTHODE DES MASSES).....	page-77-
2.1. Résultats de la dimension fractale avant la dégradation .....	<sup>2</sup> page-77,79-
2.2. Résultats de la dimension fractale après la dégradation.....	page-79-
3. INFLUENCE DE L'ÉNERGIE DE COMPACTAGE SUR LA DIMENSION FRACTALE .....	page-79,81-
4. INFLUENCE DES PRODUITS CHIMIQUES SUR LA DIMENSION FRACTALE ....	page-81,82-
5. ÉVALUATION DE LA DIMENSION FRACTALE POUR TOUS LES CYCLES CLIMATIQUES .....	page-83,85-
6. CONCLUSION.....	page-85-

**Conclusion générale.....** page-86-

**Références bibliographiques**

**Annexes**

## Liste des figures

---

### *CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES ROCHES.*

<b>Figure I.1:</b> roches magmatiques .....	3
<b>Figure I.2:</b> roches sédimentaires .....	3
<b>Figure I.3:</b> roches métamorphiques .....	3
<b>Figure I.4:</b> Groupe de quartz .....	4
<b>Figure I.5:</b> Groupe des feldspaths .....	4
<b>Figure I.6:</b> Groupe de micas .....	4
<b>Figure I.7:</b> Groupe des pyroxènes .....	5
<b>Figure I.8:</b> Plagioclase.....	5
<b>Figure I.9:</b> Groupe des amphiboles .....	5
<b>Figure I.10:</b> Groupe des carbonates .....	5
<b>Figure I.11:</b> Groupe des évaporites .....	5
<b>Figure I.12:</b> Cristaux isolés .....	6
<b>Figure I.13:</b> Groupe des amphiboles .....	6
<b>Figure I.14:</b> Groupe des grenats.....	6
<b>Figure I.15:</b> Structures de quelques minéraux silicatés.....	7
<b>Figure I.16:</b> Cycle de formation des roches .....	8
<b>Figure I.17:</b> Échelle de dureté .....	9
<b>Figure I.18 :</b> Cycle d'évolution d'une roche .....	11

<b>Figure I.19</b> : Diagramme de Goldschmidt (seuls les cations rencontrés le plus fréquemment dans les minéraux ont été représentés) .....	12
--	----

## ***CHAPITRE II : ESSAI PROCTOR ET L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE.***

<b>Figure II.1</b> : Exemple d'une courbe Proctor .....	16
<b>Figure II.2</b> : Appareillages Proctor [moule (PM, GM), dames de compactage (P Dame, G dame) .....	16
<b>Figure II.3</b> : Extracteur d'éprouvettes .....	16
<b>Figure II.4</b> : Compacteur automatique .....	16
<b>Figure II.5</b> : Diagramme des quantités minimales de matériau sec nécessaires à l'essai.....	17
<b>Figure II.6</b> : Choix du type de moule .....	18
<b>Figure II.7</b> : Répartition des coups de compactage dans les moules Proctor et CBR.....	19
<b>Figure II.8</b> : Conduite de l'essai .....	20
<b>Figure II.9</b> : Exemple de procès-verbal d'essai Proctor [Courbe Proctor et courbes de saturation]. (NF P94-093).....	21
<b>Figure II.10</b> : Outillages nécessaires pour l'analyse granulométrique .....	22
<b>Figure II.11</b> : résultat du tamisage .....	22
<b>Figure. II.12</b> : courbe granulométrique correspondante au tableau II.2 .....	23

## ***CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX.***

<b>Figure. III.2</b> : Site d'extraction du schiste (Ain El Hammam [source Google Map]).....	26
<b>Figure. III.2</b> : Schiste satiné d'Ain el hammam .....	27
<b>Figure. III.3</b> : Produits chimiques utilisés.....	27

<b>Figure. III.4 :</b> Famille des Schiste (1-schiste phyliteux, 2- schiste sériciteux, 3-micaschiste à grenats, 4- micaschiste) .....	27
<b>Figure. III.5 :</b> Carte structurale schématique de la chaîne Maghrébide montrant la distribution des zones externes et internes de la grande Kabylie.....	28
<b>Figure. III.6 :</b> Échantillons de l'essai de la teneur en eau .....	29
<b>Figure. III.7 :</b> Équipements pour pesée hydrostatique.....	30
<b>Figure. III.8 :</b> Matériels utilisés .....	32
<b>Figure. III.9 :</b> La mise en suspension des particules et la prise .....	33
<b>Figure. III.10 :</b> Diffractogramme du schiste étudié .....	35
<b>Figure. III.11 :</b> courbe granulométrique initiale .....	36

#### ***CHAPITRE IV : ESSAIS DE LABO, RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.***

<b>Figure IV.1 :</b> Concassage des matériaux.....	38
<b>Figure IV.2 :</b> Echantillons confectionnés imbibés dans l'eau ou dans les produits chimiques	39
<b>Figure IV.3 :</b> Essai Proctor normal (grand moule).....	39
<b>Figure IV.4 :</b> Courbe de l'essai .....	40
<b>Figure IV.5 :</b> Essai Proctor normal (moule normal).....	40
<b>Figure IV.6 :</b> courbe de l'essai .....	41
<b>Figure IV.7 :</b> Échantillons de schiste sans polluant et modes de compactage .....	42
<b>Figure IV.8 :</b> Courbe référentielle de densité sèche à différentes énergies de compactage .....	42
<b>Figure IV.9 :</b> Étapes de déroulement de l'essai (séchage des éprouvettes, concassage, analyse granulométrique).....	43
<b>Figure IV.10 :</b> Courbes granulométriques de référence à différentes énergies de compactage	43

<b>Figure IV.11</b> : Enceinte climatique .....	44
<b>Figure IV.12</b> : Mise en place des échantillons dans l'enceinte climatique .....	44
<b>Figure IV.13</b> : extraction des échantillons de l'enceinte climatique .....	45
<b>Figure IV.14</b> : exemple réalisation des essais Proctor pour une série.....	45
<b>Figure IV.15</b> : Courbes de Variation du poids volumique pour la 1ère série .....	46
<b>Figure IV.16</b> : Courbes de Variation du poids volumique pour la 2ème série.....	46
<b>Figure IV.17</b> : Courbes de Variation du poids volumique pour la 3ème série.....	46
<b>Figure IV.18</b> : Courbes de Variation du poids volumique pour la 4ème série.....	47
<b>Figure IV.19</b> : Courbes de Variation du poids volumique pour la 5ème série.....	47
<b>Figure IV.20</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais compactage à 25 coups du matériau (schiste + eau) .....	49
<b>Figure IV.21</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 55 coups du matériau (schiste + eau).....	50
<b>Figure IV.22</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 75 coups du matériau (schiste + eau).....	50
<b>Figure IV.23</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 25 coups du matériau (schiste + détergents).....	50
<b>Figure IV.24</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 55 coups du matériau (schiste + détergents).....	51
<b>Figure IV.25</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 75 coups du matériau (schiste + détergents).....	51
<b>Figure IV.26</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 25 coups du matériau (schiste + phosphates) .....	51

<b>Figure IV.27</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 55 coups du matériau (schiste + phosphates) .....	52
<b>Figure IV.28</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 75 coups du matériau (schiste + phosphates) .....	52
<b>Figure IV.29</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 25 coups du matériau (schiste + sulfates).....	52
<b>Figure IV.30</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 55 coups du matériau (schiste + sulfates).....	53
<b>Figure IV.31</b> : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 75 coups du matériau (schiste + sulfates).....	53
<b>Figure IV.32</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 1ère série .....	54
<b>Figure IV.33</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 1ère série .....	54
<b>Figure IV.34</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 1ère série.....	55
<b>Figure IV.35</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 2ème Série.....	55
<b>Figure IV.36</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 2ème Série.....	55
<b>Figure IV.37</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 2ème Série.....	56
<b>Figure IV.38</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 3ème Série.....	56
<b>Figure IV.39</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 3ème Série.....	56

<b>Figure IV.40</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 3ème Série.....	57
<b>Figure IV.41</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 4ème Série.....	57
<b>Figure IV.42</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 4ème Série.....	57
<b>Figure IV.43</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 4ème Série.....	58
<b>Figure IV.44</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 5ème Série.....	58
<b>Figure IV.45</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 5ème Série.....	58
<b>Figure IV.46</b> : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 5ème Série.....	59
<b>Figure IV.47</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 10 cycles de dégradation.....	59
<b>Figure IV.48</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 10 cycles de dégradation.....	60
<b>Figure IV.49</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 10 cycles de dégradation .....	60
<b>Figure IV.50</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 10 cycles de dégradation .....	60
<b>Figure IV.51</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 20 cycles de dégradation.....	61
<b>Figure IV.52</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 20 cycles de dégradation.....	61

<b>Figure IV.53</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 20 cycles de dégradation .....	61
<b>Figure IV. 54</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 20 cycles de dégradation .....	62
<b>Figure IV.55</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 30 cycles de dégradation.....	62
<b>Figure IV.56</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 30 cycles de dégradation .....	62
<b>Figure IV.57</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 30 cycles de dégradation .....	63
<b>Figure IV.58</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sukfates après 30 cycles de dégradation .....	63
<b>Figure IV.59</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 40 cycles de dégradation.....	63
<b>Figure IV.60</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 40 cycles de dégradation.....	64
<b>Figure IV.61</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 40 cycles de dégradation .....	64
<b>Figure IV.62</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 40 cycles de dégradation .....	64
<b>Figure IV.63</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 50 cycles de dégradation.....	65
<b>Figure IV.64</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 50 cycles de dégradation.....	65
<b>Figure IV.65</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 50 cycles de dégradation .....	65

<b>Figure IV.66</b> : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 50 cycles de dégradation .....	66
--	----

### ***CHAPITRE V : GÉNÉRALITÉS SUR LA DIMENSION FRACTAL.***

<b>Figure .V.1</b> : fractals naturels irréguliers .....	69
<b>Figure .V.2</b> : Fractales déterministes d'un milieu granulaire (Ouaaz. 2014). .....	69
<b>Figure .V.3</b> : Fractals aléatoires.....	70
<b>Figure .V.4</b> : Pavages des lignes, surfaces ou volumes .....	70
<b>Figure .V.5</b> : Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne (Achir Mourad ,2011).....	71
<b>Figure .V.6</b> : Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien .....	72
<b>Figure .V.7</b> : Les 3 dimensions entières .....	72
<b>Figure .V.8</b> : Méthode des lignes parallèles (Kevin P. Hammer, 2005) .....	75
<b>Figure .V.9</b> : détermination de la dimension fractale DFr par la méthode des masses à l'aide du logiciel Excel .....	76

### ***CHAPITRE VI : CALCUL DE LA DIMENSION FRACTAL***

<b>Figure VI. 1</b> : Valeur de la DF du matériau sain pour une énergie de compactage égale à 25 coups .....	78
<b>Figure VI. 2</b> : Valeur de la DF du matériau sain pour une énergie de compactage égale à 55 coups .....	78
<b>Figure VI. 3</b> : Valeur de la DF du matériau sain pour une énergie de compactage égale à 75 coups .....	78

<b>Figure VI. 4:</b> Evaluation de la DF en fonction de l'énergie de compactage, échantillons (schiste + eau).....	80
<b>Figure VI. 5:</b> Evaluation de la DF en fonction de l'énergie de compactage, échantillons (schiste + détergents).....	80
<b>Figure VI. 6:</b> Evaluation de la DF en fonction de l'énergie de compactage, échantillons (schiste + phosphates).....	81
<b>Figure VI. 7:</b> Evaluation de la DF en fonction de l'énergie de compactage, échantillons (schiste + sulfates) .....	81
<b>Figure VI. 8:</b> Evaluation de la DF en fonction des produits chimiques pour une énergie de compactage égale 25 coups .....	82
<b>Figure VI. 9:</b> Evaluation de la DF en fonction des produits chimiques pour une énergie de compactage égale 55 coups .....	82
<b>Figure VI. 10:</b> Evaluation de la DF en fonction des produits chimiques pour une énergie de compactage égale 75coups .....	83
<b>Figure VI.11:</b> Évaluation de la dimension fractale de l'échantillon schiste + l'eau pour tous les cycles climatiques .....	83
<b>Figure VI. 12:</b> Évaluation de la dimension fractale de l'échantillon schiste + détergents pour tous les cycles climatiques.....	84
<b>Figure VI. 13 :</b> Évaluation de la dimension fractale de l'échantillon schiste + phosphates pour tous les cycles climatiques.....	84
<b>Figure VI. 14 :</b> Évaluation de la dimension fractale de l'échantillon schiste + sulfates pour tous les cycles climatiques. ....	85

## Liste des Tableaux

---

<b>Tableau II.1</b> : Modalités d'exécution des essais proctor normale et modifié .....	19
<b>Tableau. II.2</b> : Exemple de résultats de l'analyse granulométrique par tamisage .....	23
<b>Tableau II.3</b> : classification des sols en fonction du diamètre équivalent des particules .....	24
<b>Tableau III.1</b> : Résultats de l'essai de la teneur en eau .....	30
<b>Tableau III.2</b> : Résultats de l'essai .....	31
<b>Tableau III.3</b> classification du sol selon la masse volumique sèche .....	31
<b>Tableau.III.4</b> : Résultats des pesées au pycnomètre .....	32
<b>Tableau III.5</b> : Résultats de l'essai VBS .....	33
<b>Tableau III.6</b> : Tableau donnant la désignation du sol en fonction de son VBS .....	34
<b>Tableau III.7</b> : Résultat du diffractogramme pour le schiste .....	35
<b>Tableau III.8</b> : Tableau de résultats d'analyse granulométrique .....	36
<b>Tableau IV.1</b> : Résultats de l'essai Proctor normal en utilisant le grand moule .....	39
<b>Tableau IV.2</b> : Résultats de l'essai Proctor normal en utilisant le moule normal .....	40
<b>Tableau IV.3</b> : Calcul de la densité sèche moyenne en fonction des cycles climatiques et de l'énergie de compactage .....	48
<b>Tableau VI. 1:</b> Exemple de calcul de la DF pour un échantillon sain compacté à 25 coups ....	77
<b>Tableau VI. 2</b> : Résultats de la dimension fractale après la dégradation .....	79

## LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

---

<b>w</b>	Teneur en eau naturelle ;
<b>e</b>	Indice des vides ;
<b>Sr</b>	Degré de saturation ;
<b>n</b>	Porosité ;
<b><math>\rho</math></b>	Masse volumique total ;
<b><math>\rho_w</math></b>	Masse volumique de l'eau ;
<b><math>\rho_s</math></b>	Masse volumique des grains solide ;
<b><math>\rho_h</math></b>	Masse volumique humide ;
<b><math>\rho_d</math></b>	Masse volumique sèche ;
<b>Ms</b>	Masse des grains solides ;
<b>Mh</b>	Masse humide ;
<b>M</b>	Masse totale ;
<b>Vw</b>	Volume de l'eau ;
<b>Vs</b>	Volume des particules solides ;
<b>Va</b>	Volume de l'air ;
<b>Vv</b>	Volume des vides ;
<b>Vt</b>	Volume total ;
<b>VBS</b>	Valeur au bleu de méthylène ;
<b>Mb</b>	Masse au bleu de méthylène ;
<b>Ms</b>	Masse sèche de la prise d'essai ;
<b>V</b>	Volume de solution de bleu utilisée ;
<b>Wopt</b>	Teneur en eau optimale de l'essai Proctor ;
<b><math>\rho_{dopt}</math></b>	Masse volumique optimale ;
<b>DF</b>	Dimension Fractale ;
<b>M</b>	masse totale de l'échantillon ;

<b><math>M_T</math></b>	Masse totale des grains ;
<b><math>r</math></b>	taille de l'ouverture des passoires ;
<b><math>r_L</math></b>	dimension des particules maximal définie par la plus grande ouverture des passoires ;
<b><math>M(R &lt; r)</math></b>	masse des grains d'un diamètre considéré.

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Les mouvements de terrain, qu'ils soient lents ou brutaux constituent une menace permanente pour les personnes, les biens et l'environnement. Quelle que soit la nature des roches à la surface du globe, elles subissent les actions conjuguées des fluides atmosphériques et océaniques, des organismes vivants (animaux et végétaux) et des conditions climatiques, résultant ainsi des problèmes d'instabilités de terrains.

La région de la Kabylie connaît ces dernières années une activité intense de cet aléa. Principalement dans la région d'Ain el hammam, le glissement de terrain s'étale sur une surface d'ordre de 23.5 ha, bouleversant les habitants et les autorités locales. En effet plusieurs recherches ont été menées afin d'évaluer la stabilité de cette zone qui a connue d'important mouvements de terrains.

La problématique qui peut être aussi posée est la susceptibilité des terrains à se désagréger sous l'infiltration des eaux dans les fissures des roches qui accélère leur détérioration suite aux surcharges urbanistiques, aux diverses circulations routière et aux variations climatiques (de températures ; gel-dégel), ce qui a engendré une dégradation de la roche schisteuse (essais de carottage ont confirmé cet état de fait), celle-ci a-t-elle amplifié ce mouvement ? Est-elle la source de la propagation de la zone du glissement ?

Pour mieux analyser cette instabilité, nous allons tenter d'apporter des éléments de réponses principalement aux questions liées à notre étude : quelle est l'influence des différentes charges (trafic ; surcharges des structures...) ? Quelles sont les facteurs d'accélération et déclenchant de ce mouvement ? Les eaux polluées ont-elles un effet ? Afin de permettre une bonne simulation du comportement du versant d'Ain el hammam et d'évaluer la dégradation physico-chimique des granulats schisteux il convient de partir sur une base expérimentale vaste c.-à-d. avoir une connaissance préalable de la structure granulaire du matériau local de cette région (identification du matériau schisteux, composition minéralogique, essais climatiques, influence des polluants, essais Proctor...) paramètres qui nous permettront de mieux interpréter les résultats des essais de simulation.

Pour mener à bien notre étude, nous avons réparti le présent mémoire en six (6) chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les roches, leurs formations, leurs caractéristiques physiques et chimiques ainsi que leurs modes d'altérations. En effet, ces processus d'altération introduit par la nature peuvent être désastreux : les variations de température et l'action de l'eau constituent les deux principaux facteurs à l'origine de ces processus de dégradation.

Dans le deuxième chapitre sont regroupées toutes les informations nécessaires à la compréhension des principes de fonctionnement des essais de laboratoire (Essais d'identification et essais Proctor).

Le chapitre trois est consacré principalement à l'identification des matériaux utilisés à savoir le schiste extrait d'Ain El Hammam et les différents produits chimiques.

Dans le chapitre quatre nous nous sommes intéressés à la partie expérimentale pour simuler l'effet de la nature. Dans celui-ci est présenté l'essentiel de cette étude, les résultats obtenus et leurs interprétations.

En cinquième chapitre, quelques notions de la dimension fractale et les méthodes de calcul utilisées en génie civil sont ainsi décrites. Ce chapitre nous permet d'une part de comprendre cette notion de dimension fractale et d'autre part d'évaluer le degré d'écrasement des grains du matériau (schiste) soumis aux essais Proctor sous les différents ajouts chimiques.

Et sixième et dernier chapitre, nous s'intéresserons aux calculs de la dimension fractale en utilisant la méthode des masses, ainsi qu'à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus après les essais de dégradations.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale qui synthétise cette étude expérimentale des grains de schistes soumis aux essais chimiques et climatiques.

# **CHAPITRE I:**

## **GÉNÉRALITÉS SUR LES ROCHES**

## 1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, la dégradation des sols contribue non seulement à l'appauvrissement des écosystèmes, mais elle met en danger la qualité de vie, voire même la survie, de certaines populations vulnérables. En effet cette dégradation peut être l'une des principales causes d'un glissement de terrains ou d'un tassement... ou bien un autre phénomène destructif.

Dans ce chapitre, nous souhaitons vous donner une vue globale sur les roches : leurs formations, les minéraux constitutifs de ces roches et leur comportement physico-chimique.

## 2. FORMATION DES ROCHES

Par définition, la roche est un assemblage de minéraux lesquels sont définis par leur composition chimique, autrement dit par les matières composant la roche qui sont qualifiées de matières minérales.

Classiquement, les roches sont classées en trois grandes familles :

- **Roches magmatiques**, issues du magma et formées par sa cristallisation.
- **Roches sédimentaires**, qui provient de l'accumulation et la consolidation de sédiments.
- Enfin, **Les roches métamorphiques**, elles résultent de la transformation des roches sédimentaires soumises à des conditions de température  $T^\circ$  et/ou de pression, qui règnent aux grandes profondeurs.

Toutes ces roches sont différentes dans leur structure, et chacune d'entre elles a ses propriétés physiques particulières ; ceci peut être expliqué par leur composition minérale. En effet, pour caractériser une roche, il faut définir l'ensemble des minéraux qui la compose. Certaines se constituent d'un seul minéral et d'autres renferment plusieurs minéraux dans une texture propre.



**Figure I.1: roches magmatiques.**



**Figure I.2: roches sédimentaires.**



**Figure I.3: roches métamorphiques.**

### 3. DU MINÉRAL À LA ROCHE

La détermination des minéraux est la base de la pétrographie ou de la minéralogie. Les méthodes minéralogiques sont devenues ainsi d'usage commun pour les géologues. Principalement la composition chimique permet de distinguer deux grandes familles de roche [Guillemot 1986]:

Les roches silicatées, ce sont les roches éruptives et métamorphiques les plus fréquentes, et aussi des roches sédimentaires constituées de minéraux silicatés issus de l'altération des précédentes dont la moitié seulement est formée par des carbonates, des sulfates, etc.

Les roches non silicatées sont principalement représentées par les roches carbonatées (calcaires). D'autres sont les roches salines contenant de la halite Na Cl, du gypse ou encore les roches carbonatées de type charbon et pétroles (roche à l'état liquide).

#### 3.1. Minéraux constitutifs des roches

Parmi les 3000 minéraux connus, seulement quelques douzaines ont une importance en tant qu'éléments constitutifs des roches. D'après leur quantité relative on distingue :

Les constituants essentiels qui composent la majeure partie d'une roche.

Les constituants accessoires et accidentels qui jouent un rôle secondaire dans la composition d'une roche.

##### 3.1.1. Minéraux des roches magmatiques

Les constituants essentiels des roches éruptives sont le quartz, les feldspaths, les feldspathoïdes, les micas, l'augite, la hornblende et l'olivine [W.Schuman 1989].

Les constituants accessoires sont, entre autres, l'apatite, l'hématite, l'ilménite, la magnétite, la natrolite, la néphéline, le sphène, le zircon....



Figure I.4: Groupe de quartz.



Figure I.5: Groupe des feldspaths.



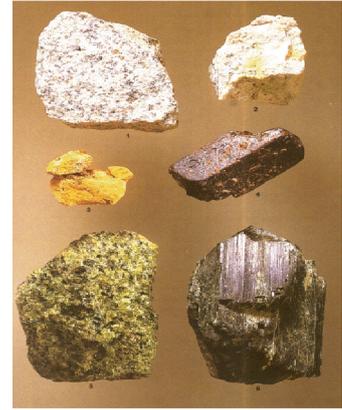
Figure I.6: Groupe de micas.



**Figure I.7: Groupe des pyroxènes.**



**Figure I.8: Plagioclase.**



**Figure I.9: Groupe des amphiboles.**

### 3.1.2. Minéraux des 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 des roches 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 ce sont généralement des minéraux des roches magmatiques. [W.Schuman 1989]



**Figure I.10: Groupe des carbonates.**



**Figure I.11: Groupe des évaporites.**

### 3.1.3. Minéraux des 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, hédénbergite, 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 dans les roches sédimentaires. [W.Schuman 1989].



**Figure I.12: Cristaux isolés. Figure I.13: Groupe des amphiboles.**



**Figure I.14: Groupe des grenats.**

3.1.4. Structure cristalline

La structure cristalline correspond à l'arrangement des atomes dans le cristal selon un espacement et une symétrie bien définis. [P. Peycru ;2008].

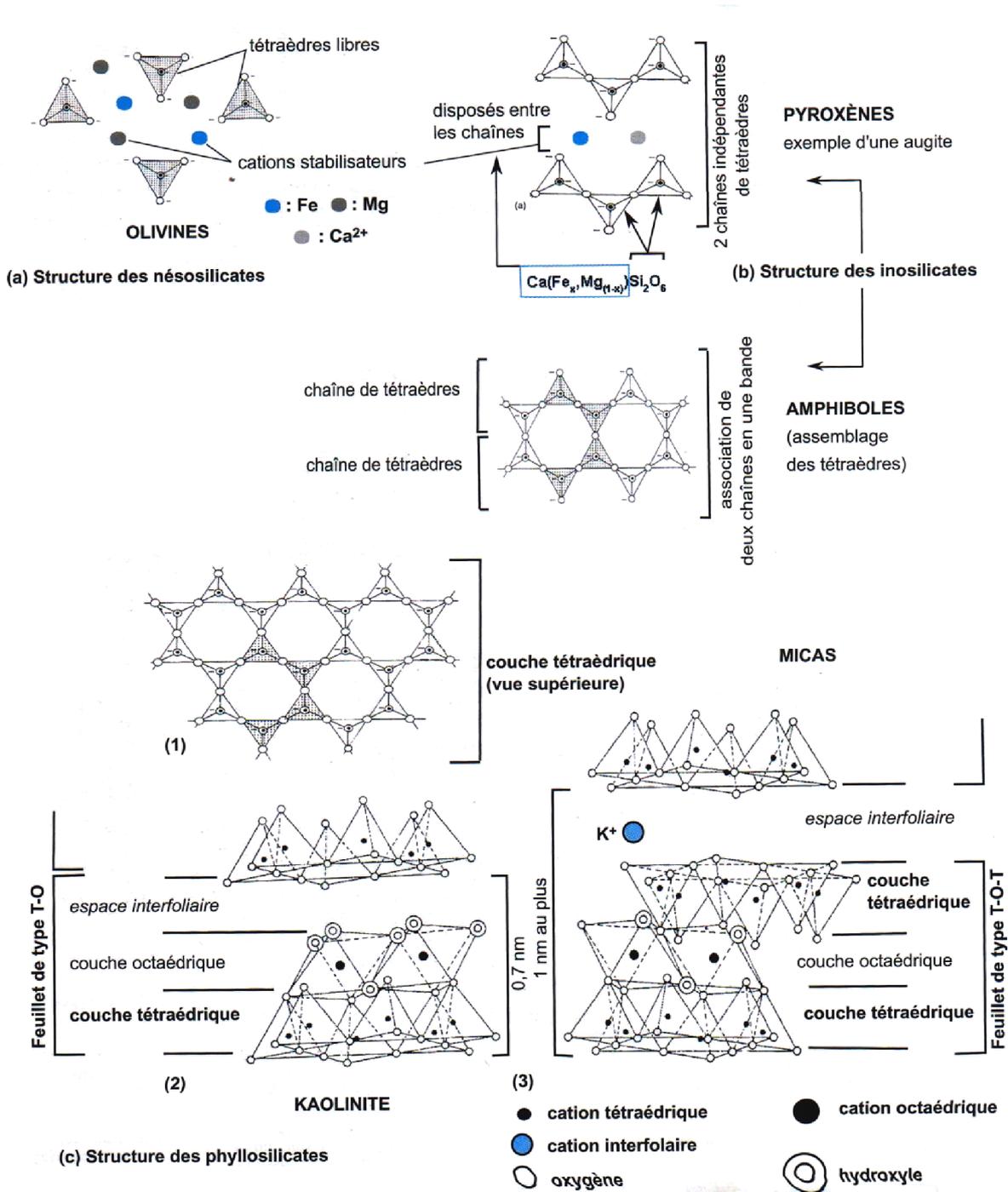


Figure I.15: Structures de quelques minéraux silicatés [Dercourt, J et al].

## 4. CYCLE DE FORMATION DES ROCHES

Une roche est une matière constitutive de l'écorce terrestre, formée d'un agrégat de minéraux et présentant une homogénéité de composition, de structure et de mode de formation, **On peut admettre ainsi que la matière constitutive des roches parcourt le cycle schématisé ci-dessous (Figure I.16), dont on peut comprendre l'origine et les liens entre les différentes familles de roches.**

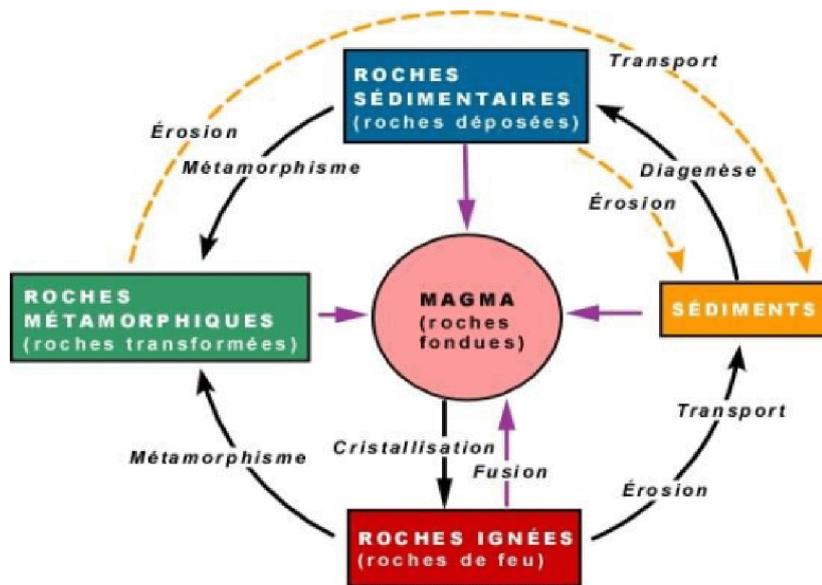


Figure I.16: Cycle de formation des roches.

**Le magma, c'est le point de départ, une roche fondue (de 700 °C à 1300 °C) qui est dans les entrailles de la Terre.**

### 4.1. La roche ignée

Elle vient d'un volcan, c'est de la lave, mais elle peut avoir plusieurs formes. Elle est légère et friable quand la lave refroidit rapidement, ou quand le vent et le gel l'attaquent rapidement. Un autre type de roche ignée mais plus dur : c'est de la lave qui est dans une cavité et qui a refroidi tranquillement avant de trouver la surface en ayant le temps de former des cristaux.

### 4.2. La roche sédimentaire

**Les sédiments :** c'est de la matière déposée mais qui ne s'est pas encore liée ensemble. Donc la terre cultivable est formée de sédiments. Le vent, le gel et le dégel ont fragmenté la roche en dépôts de matières organiques.

La roche sédimentaire peut être de la boue, de la poussière (matière organique, roche broyée par le vent ou les vagues) qui s'accumulent au fond de l'eau et qui, avec la pression, se lient pour créer une roche. On reconnaît les roches sédimentaires par leurs couches superposées l'une à l'autre. La formation de cette roche se fait à de faibles températures et pressions.

### 4.3. La roche métamorphique

C'est une roche transformée par la pression et la température, mais qui n'a pas fondu. Il peut y avoir une réaction chimique qui crée les minéraux. Ce sont aussi les roches qui se font broyer et mélanger par le mouvement des plaques tectoniques, mais qui ne présentent pas de plis comme dans la roche sédimentaire.

## 5. PROPRIÉTÉS DES ROCHES

### 5.1. Propriétés physiques

Les roches possèdent diverses propriétés physiques caractéristiques, elles dépendent de l'organisation interne et de la composition minéralogique.

Voici quelques critères qui sont régulièrement utilisés en pétrographie :

- La couleur : blanc, blanc taché de rouille, ocre, gris, noir, ...
- La structure : on dit qu'une roche est homogène lorsqu'elle est constituée d'éléments tous semblables. Si la roche contient des éléments de taille, de couleurs ou de formes différentes, on dit que la roche est hétérogène.
- La cohérence : on dit qu'une roche est cohérente si les éléments qui la composent sont liés les uns aux autres. On ne peut pas les séparer avec les doigts.  
Exemple : le sable est une roche non cohérente, les grains ne sont pas liés les uns aux autres.
- La dureté : on estime la dureté d'une roche en comparant celle-ci à celle d'autres matériaux. Tester les matériaux en suivant l'ordre de l'échelle (voir Figure I.17).

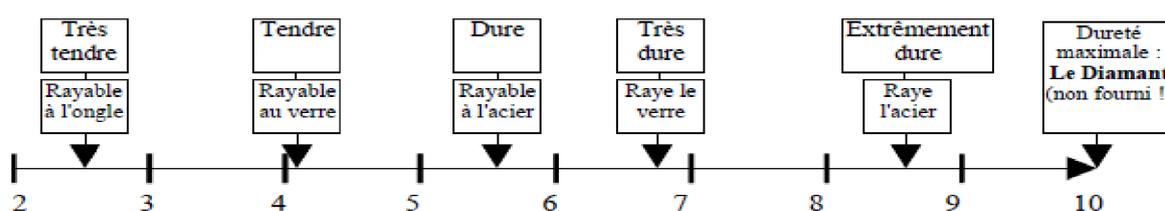


Figure I.17: Échelle de dureté.

- La porosité : elle est facile à mesurer. Il suffit de mettre quelques gouttes d'eau dans le trou percé sur la roche :
  - Si l'eau est absorbée immédiatement, on dit que la roche est très poreuse
  - Si l'eau est absorbée lentement, on dit que la roche est moyennement poreuse
  - Si l'eau ne rentre pas, on dit que la roche est non poreuse
- La perméabilité : si la roche est poreuse, on continue à verser de l'eau par petites quantités jusqu'à saturation.
  - Si l'eau traverse la roche, on dit qu'elle est perméable
  - Si l'eau ne traverse pas la roche, on dit qu'elle est imperméable

**Remarque :** Une roche non poreuse est forcément imperméable mais une roche poreuse n'est pas forcément perméable.

## 5.2. Propriétés chimiques

Elles influencent la destruction de la roche et la formation de nouveaux minéraux au cours de l'altération superficielle.

Selon la nature chimique des roches, on retrouve deux grands groupes de roche : roches siliceuses et silico-alumineuses et les roches carbonatées. Il est à noter qu'à partir d'une analyse chimique, on peut calculer divers paramètres conventionnels qui caractérisent ces groupes de roches.

Souvent, on utilise des réactions chimiques simples qui permettent de déterminer ou d'identifier la présence d'un élément chimique ou d'une molécule caractéristique.

- Roches siliceuses (Si O<sub>2</sub>)

Roche acide si teneur en silice > 70 % Exemple : le granite.

Roche basique si teneur en silice < 50 % Exemple : le basalte.

- Roches carbonatées : base ion carbonaté : ion (CO<sub>3</sub>)<sup>2-</sup>

L'acide carbonique (CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>) joue un rôle important.

Avec Ca { Calcite : CaCO<sub>3</sub>. Stalagmite, stalactites.  
Calcaire si teneur en calcite > 50%.

Avec Mg { Dolomite si présence de magnésium (Ca Mg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>).

D'une façon générale, on peut considérer trois propriétés chimiques :

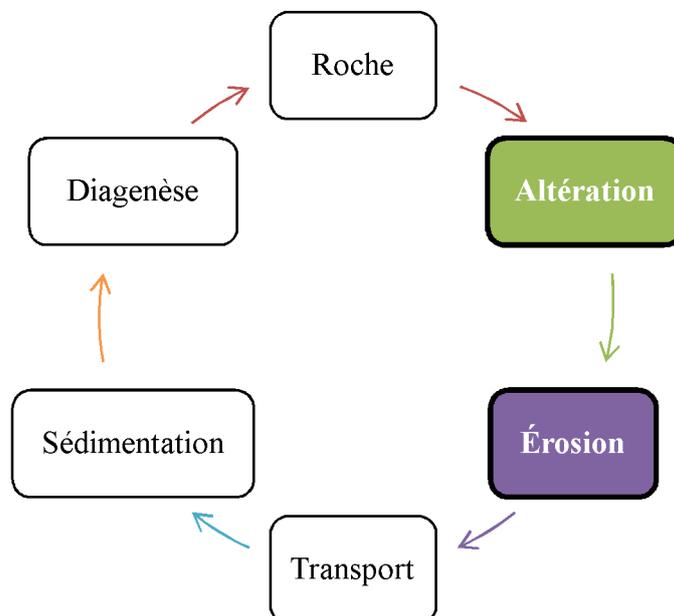
**Composition chimique** : types de minéraux, structure de cristallisation... etc.

**Solubilité** : propriété des minéraux à se dissoudre dans l'eau ou dans un autre liquide.

**Effervescence** : propriété des minéraux de la classe carbonatée à réagir avec certains acides (ex : calcite (Ca CO<sub>3</sub>) réagit au HCL à 10% en donnant du CO<sub>2</sub> effervescent, Pyrite (FE S<sub>2</sub>) : chauffé au rouge en présence d'air dégage du SO<sub>2</sub>).

## 6. DÉSAGRÉGATION MÉCANIQUE ET ALTÉRATION CHIMIQUE DES ROCHES

Le cycle d'évolution d'une roche est résumé sur le schéma de la figure suivante :



**Figure I.18 : Cycle d'évolution d'une roche.**

Au cours de l'altération, deux types de mécanismes pouvant être éventuellement développés :

### 6.1. Désagrégation physique ou mécanique

Une roche qui affleure n'est généralement ni homogène ni continue. Elle offre des discontinuités qui sont des plans de faiblesse mécanique. Ces dernières permettent la formation des fragments sous l'effet de différents facteurs.

#### 6.1.1. Agents de désagrégation mécanique

**L'action de l'eau :** l'eau est l'agent fondamental qui provoque l'altération et l'érosion des roches. Ce sont les eaux de pluies qui ont un effet dévastateur. Le ruissèlement cause une dénudation des terrains et cela peut aboutir à un véritable ravinement ce qui favorise la fissuration des roches.

**L'action du vent :** les courants d'air exercés sur les roches peuvent contenir des particules en suspension qui, par impact sur la roche, la fragilisent et facilitent leur fragmentation.

**L'action du gel-dégel :** dans les régions où l'eau subit des phénomènes du gel-dégel, elle peut entraîner la fracturation des roches. En effet, en passant de l'état liquide à l'état solide, le volume de l'eau augmente d'environ de 10%. Ainsi, quand l'eau infiltrée dans les fissures (diaclasses) d'une roche gèle, l'augmentation du volume d'eau provoque l'éclatement de la roche. Ceci forme des éboulis qui sont entraînés par les glaciers et les eaux de ruissèlement.

**L'action des variations des températures :** les variations brutales de température (jour/nuit) peuvent entraîner la désagrégation d'une roche, surtout si celle-ci est composée de minéraux n'ayant pas le même coefficient de dilatation (par exemple ; le coefficient de dilatation thermique du quartz est deux fois > à celui de l'orthose). Ce phénomène est particulièrement important en haute montagne et dans les déserts, appelé aussi thermoclastie.

**L'action des végétaux :** le développement des racines peut entraîner l'agrandissement des fissures au sein des roches et donc faciliter leur altération. De plus, les racines peuvent également favoriser l'altération chimique.

**La cristallisation des sels :** engendre l'haloclastie qui est un processus de désagrégation de la roche, en particulier dans les zones côtières ainsi que dans les déserts (milieux très riches en sels). Les solutions salines pénètrent dans la roche via les fissures, les diaclases et surtout le réseau de pores. Lorsqu'il y a évaporation de cette eau, les sels cristallisent. Les cristaux de sels exercent alors une pression importante sur les parois des pores pouvant entraîner une rupture des cloisons rocheuses ou la désolidarisation des assemblages minéraux. Une répétition de ce cycle entraîne une rupture mécanique de la roche.

## 6.2. Altération chimique

L'altération chimique des roches se fait en présence d'eau; elle a lieu essentiellement en climat humide. Les modes de l'altération chimique s'expliquent par l'approche géochimique de Goldschmidt et par les différents types de réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux [Xavier.D, 2009].

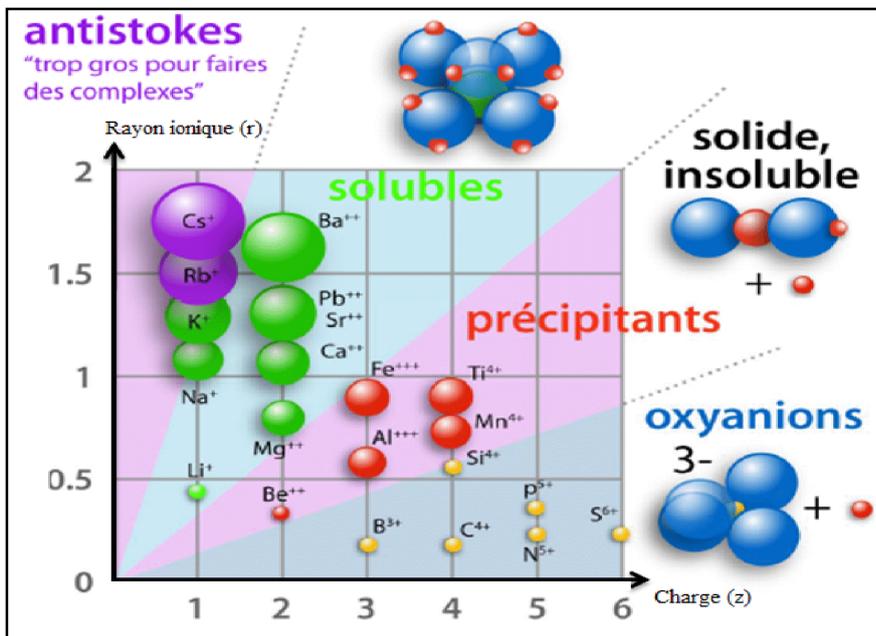


Figure I.19:

Diagramme de Goldschmidt (seuls les cations rencontrés le plus fréquemment dans les minéraux ont été représentés).

### 6.2.1. L'approche de Goldschmidt.

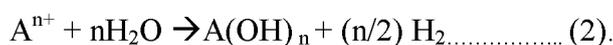
Dès 1934, Goldschmidt montra que l'attraction des éléments chimiques pour la molécule d'eau était en fonction de leur potentiel ionique, soit le rapport de la charge ionique (z)/ et le rayon ionique (r). Trois grandes catégories d'ions peuvent être distinguées :

**Les ions à potentiel ionique faible ( $z/r < 3$ ) :** c'est le domaine des cations solubles, on distingue deux classes (antistokes et stokes).

- Les ions dont le potentiel ionique  $z/r < 1$  : leurs tailles est trop grande par rapport à leur charge. Ils n'ont pas d'attraction pour l'eau et ne sont pas hydratés lors de leur mise en solution (Cs, Rb, K) → on les appelle cations antistokes.
- Les ions ayant un potentiel ionique  $1 < z/r < 3$  : Les ions sont hydratés et donnent des solutions alcalines (Na, Ba, Sr, Mn, Fe<sup>+</sup>) selon la formule chimique :  
$$A^{n+} + nH_2O \rightarrow (A, nH_2O)^{n+} \quad (\text{avec } n = \text{valence de } A) \dots\dots(1).$$
→ On les appelle stokes.

**Les ions à potentiel ionique moyen ( $3 < z/r < 10$ ) :** c'est le domaine des hydrolysats (insolubles). Les ions ont un diamètre moyen et forment des hydroxydes dont la stabilité en solution est faible (Al, Fe<sup>3+</sup>, U, Zr, ...)

Les ions sont hydratés et donnent des solutions selon la formule chimique ci dessous :



**Les ions à potentiel ionique fort ( $z/r > 10$ ) :** c'est le domaine des oxyanions (solubles)

Les ions sont de petits diamètres et de charge élevée (B, C, P, S), l'oxygène est annexé et l'ion H<sup>+</sup> est libéré (SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>) selon la formule chimique suivante :



A partir des éléments chimiques constitutifs d'une roche, l'altération chimique conduit à une subdivision avec les cations et oxyanions soluble qui sont évacués par les circulations d'eaux et que l'on appelle la phase migratrice par opposition aux hydrolysats insolubles[Xavier.D, 2009].

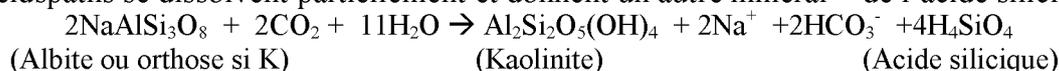
### 6.2.2. Les réactions chimiques d'altération

Les réactions sont des hydrolyses, accessoirement des oxydations, des hydratations, des décarbonatations pour les roches calcaires. Les éléments solubles sont lessivés en partie, parfois en totalité sous les climats très agressifs. Les parties insolubles restent sur place telles quelles, ou se recombinaient avec les ions disponibles (phénomène d'héritage). Des composés intermédiaires mal cristallisés (gels), des tronçons de chaînes silicatées et des ions en solution se recombinaient en minéraux de néoformation, principalement des argiles. Les organismes peuvent intervenir à tous les stades de ce processus. Ils fournissent en particulier des matériaux minéraux ou organiques [BEAUCHAMP. J.2003].

**A. Hydrolyse[Hydrolysis] :** C'est à dire la destruction des minéraux par l'eau,

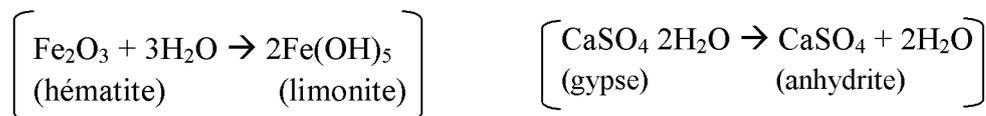
L'hydrolyse est l'une des principales réactions d'altération. Elle est totale lorsque le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions).

Les feldspaths se dissolvent partiellement et donnent un autre minéral + de l'acide silicique :



Les olivines et les pyroxènes se dissolvent totalement :  $MgSiO_4 + 4H^+ \rightarrow 2Mg^{++} + H_4SiO_4$

**B. Hydratation/déshydratation**[Hydration/Dehydration] : Gain de molécules d'eau pour former un minéral hydraté ou le processus inverse (un minéral hydraté donne un autre minéral + de l'eau).



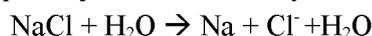
**C. Dissolution ou simple solution**[Dissolution] : c'est la décomposition d'un minéral en ses ions constitutifs, réaction simple faisant intervenir de l'eau et / ou un acide.



Le quartz est très peu soluble – 6 ppm dans les eaux de surface

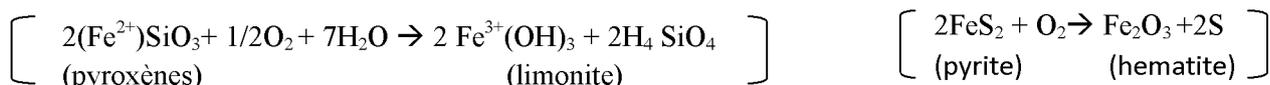


La calcite est très soluble et se dissout sous l'eau de pluie qui agit comme un acide faible par adjonction de dioxyde de carbone

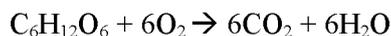


La halite est extrêmement soluble et se dissout complètement dans l'eau

**D. Oxydation/Réduction**[Oxidation/Reduction] : L'oxydation est le processus par lequel un ion perd un de ses électrons, la réduction est le processus inverse. Le meilleur agent d'oxydation est l'oxygène. Et les éléments les plus facilement oxydables sont le fer et le manganèse



**Oxydation de la matière organique** : L'oxydation de la matière organique produit de l'eau et du dioxyde de carbone. Rappelons que ces deux éléments sont impliqués dans les processus de dissolution.



## 7. CONCLUSION

Le sol continental est constitué de roches magmatique, métamorphique et sédimentaire juxtaposées ou superposées.

Nous avons vu, dans ce chapitre la relation génétique existante entre ces trois grandes catégories de roches, ainsi que leurs formations et les principaux minéraux constitutifs de chaque famille. Suivant ces éléments constitutifs, chaque roche adopte des propriétés mécaniques et/ ou chimiques particulières. La modification de ces propriétés entraîne l'altération de la roche

Les mécanismes responsables de l'altération des roches se divisent en deux : **l'altération chimique** [chemical weathering] et **l'altération mécanique** [physical weathering]. Cette altération se manifeste en présence de plusieurs facteurs et l'eau est l'agent principal d'altération des roches.

**CHAPITRE II:**

**ESSAI PROCTOR ET L'ANALYSE  
GRANULOMÉTRIQUE**

## 1. INTRODUCTION

Pour simuler le comportement du sol en laboratoire, il convient de procéder à des essais qui se rapprochent de la réalité qui permettent de le caractériser et de faciliter la compréhension de son comportement sous différentes sollicitations mécaniques.

Ce chapitre porte sur la description des essais réalisés dans cette étude : l'essai Proctor et l'analyse granulométrique. Ces essais nous permettent d'étudier conjointement, le comportement mécanique du matériau sous compactage, ainsi qu'évaluer la dégradation chimique de ce dernier sous l'influence de quelques produits chimiques.

## 2. ESSAI PROCTOR (NF P94-093)

### 2.1. Généralités sur l'essai Proctor

En 1933 l'ingénieur américain Proctor présentait un essai de compactage en laboratoire qui consiste à mesurer la masse volumique sèche d'un sol disposé en couches dans un moule appelé moule Proctor.

L'essai Proctor est un essai de compactage en laboratoire. Il a pour objectif de déterminer la teneur en eau optimale permettant d'atteindre la densité maximale du matériau.

Avant l'utilisation d'un matériau sur chantier, il faudra d'abord déterminer ces caractéristiques mécaniques au laboratoire afin de voir s'il vérifie les seuils exigés par les normes, lui permettant ainsi de résister correctement aux différents efforts exercés sur chantier.



Ralph Roscoe Proctor (1894-1962)

**Ralph Roscoe Proctor**  
1894-1962

Une fois que les caractéristiques du matériau sont déterminées et s'avèrent satisfaisantes par rapport aux normes en vigueur, ce dernier est ensuite mis en application sur chantier.

L'énergie de compactage ainsi que les teneurs en eau sont alors reproduites respectivement par les différents engins de compactage et d'arrosage.

### 2.2. Principe de l'essai

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau, cette courbe est appelée courbe Proctor (Figure II.1). Elle présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui correspond à une teneur en eau

optimale. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié.

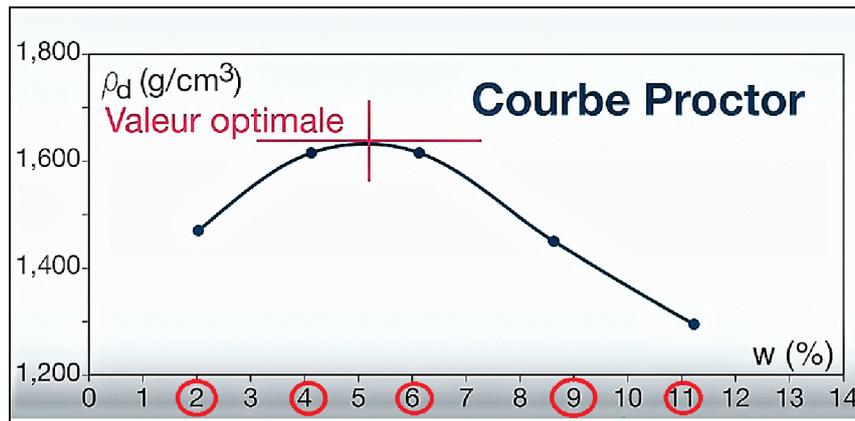


Figure II.1 : Exemple d'une courbe Proctor.

## 2.3.Appareillage

### 2.3.1. Appareillage spécifique

L'appareillage spécifique comporte :

- ▶ Un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale.
- ▶ deux modèles de moules :  
Moule Proctor.  
Moule CBR.
- ▶ Dames Proctor (dame Proctor normale, dame Proctor modifié).



Figure II.2 : Appareillages Proctor [moule (PM, GM), dames de compactage (P Dame, G dame)].



Figure II.3 : Extracteur d'éprouvettes.



Figure II.4 : Compacteur automatique

**Note :** Dans le cas échéant on utilise les machines de compactage mécanisées et un dispositif d'extraction des éprouvettes hors du moule, (voir figure II.2, et II.3).

### 2.3.2. Appareillage d'usage courant

- Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm et 20 mm ;
- balances sensible de précision de 1/1000.
- une enceinte thermique ou un appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des matériaux.
- des récipients (ou des sacs) hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons.
- un pulvérisateur à eau ;
- éventuellement un malaxeur-désagrégateur mécanique, une règle à araser.
- matériels et outillages divers. (Pinceau, louche... etc.).

## 2.4. Mode opératoire

### 2.4.1. Préparation d'échantillons

La masse totale de matériau nécessaire à l'exécution d'un essai Proctor doit permettre de faire un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor, car il n'est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor. Le diagramme représenté sur la (Figure II.5) précise ces masses. Il s'agit des quantités minimales nécessaires à la détermination de la courbe Proctor en cinq points.

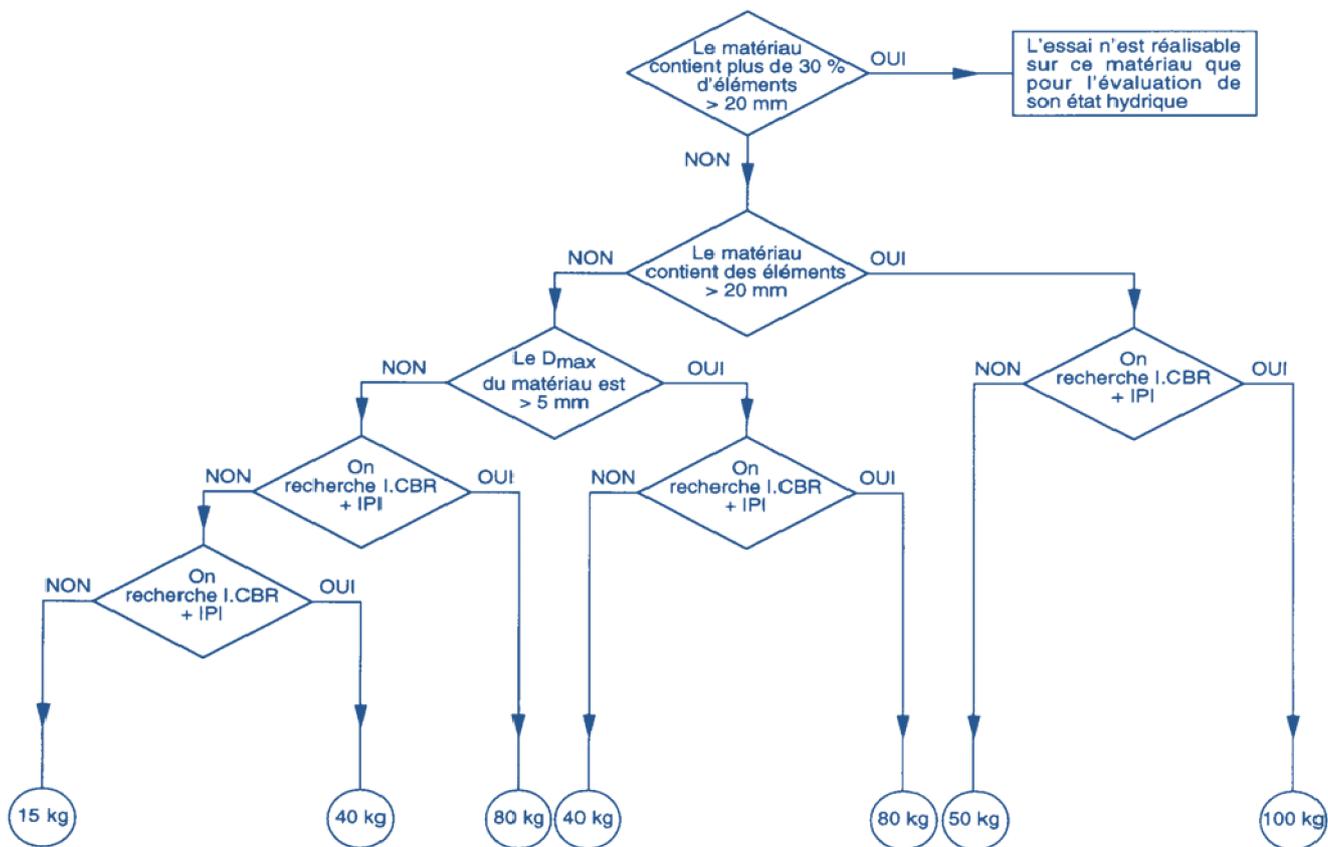


Figure II.5 : Diagramme des quantités minimales de matériau sec nécessaires à l'essai.

L'ensemble du matériau nécessaire est séché à l'air ou dans une étuve réglée à 50 °C jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai. Après séchage, le matériau est tamisé à 20 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai.

### 2.4.2. Exécution de l'essai

En fonction de l'application à laquelle le matériau est destiné, il faut choisir entre deux types d'essai : Proctor normal ou modifié.

Pour l'essai normal, l'énergie de compactage est relativement faible et correspond à un compactage modéré. Il convient pour l'étude des sols de type remblai non ou peu chargé. Le compactage a alors pour but de limiter les tassements ultérieurs.

Et dans le cas de l'essai Proctor modifié, l'énergie de compactage est plus importante. Il est utilisé pour l'étude des sols de fondation (routes, pistes d'aérodromes,...). On fait référence au Proctor modifié pour les couches de chaussée (pistes d'aérodrome). Le compactage effectué avec une énergie supérieure à celle du Proctor normale vise une augmentation de la résistance mécanique de la couche compactée.

#### 2.4.2.1. Choix du type du moule

Après avoir fixé le type d'essai, on sélectionne le moule avec lequel les essais seront réalisés (moule Proctor normale ou moule CBR). Ce choix du type de moule est imposé par la granularité du matériau (diamètre  $D_{max}$  du plus grand grain) et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur le diagramme (Figure II.6).

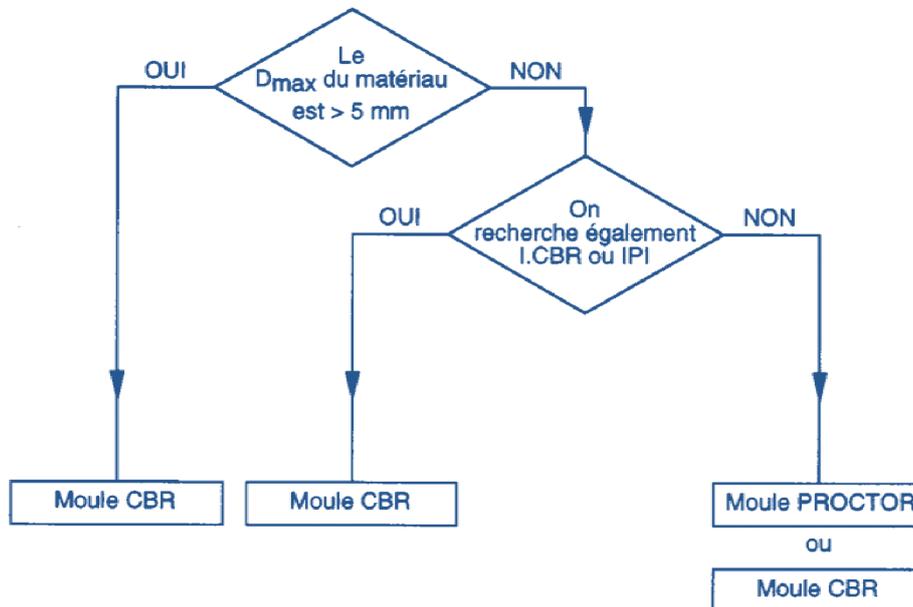
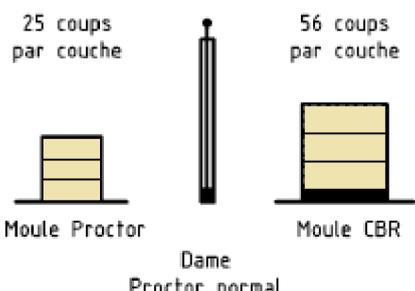
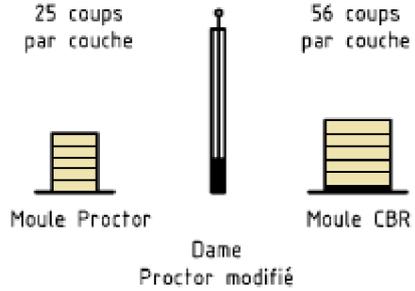


Figure II.6 : Choix du type de moule.

**2.4.2.2. Conduite de l'essai**

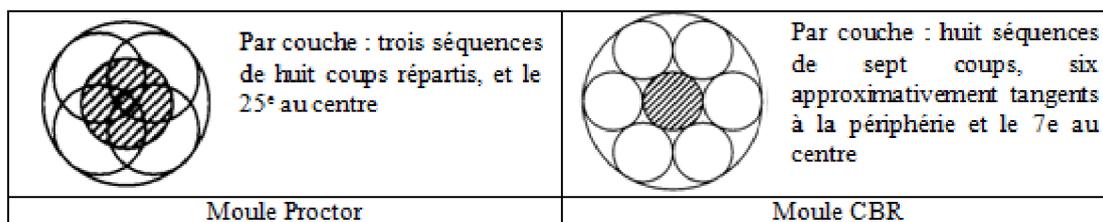
Les choix du type de moule et de la nature de l'essai à exécuter étant faits, on procède au compactage des éprouvettes humidifiées en respectant les modalités indiquées dans le Tableau II.1 suivant :

**Tableau II.1 : Modalités d'exécution des essais proctor normale et modifié.**

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p align="center">3 couches, à raison de :</p> <p align="center">25 coups par couche      56 coups par couche</p>  <p align="center">Moule Proctor      Dame Proctor normal      Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p align="center">5 couches, à raison de :</p> <p align="center">25 coups par couche      56 coups par couche</p>  <p align="center">Moule Proctor      Dame Proctor modifié      Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

Pour la mise en œuvre de l'essai on procède comme suit :

- solidariser le moule : embase et rehausse ;
- lubrifier le cas échéant les parois du moule ;
- placer le disque d'espacement au fond du moule CBR lorsqu'il est utilisé ;
- placer éventuellement un papier-filtre ou un film plastique au fond du moule Proctor ou sur le disque d'espacement du moule CBR pour faciliter le démoulage.
- prendre le premier échantillon humidifié et le diviser en 3 ou 5 couches (en fonction du type d'essai)
- Compacter chaque couche avec la dame correspondante en appliquant respectivement 25 coups ou 56 coups suivant le schéma suivant.



**Figure II.7 : Répartition des coups de compactage dans les moules Proctor et CBR**

—après avoir compacté la dernière couche, et retirer la rehausse, le matériau doit dépasser le bord du moule de 1 à 2 cm au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant avec la règle à raser radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des grains sont arrachés en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins et lisser la surface de l'éprouvette.

—Démouler l'éprouvette, déterminer le poids humide et la mettre à l'étuve pour déterminé le poids sec, Ces opérations sont répétées sur tous les échantillons compacté.



**Figure II.8 : Conduite de l'essai.**

1-préparation de l'échantillon et répartition en couches. 2-compactage du matériau et rasage de l'éprouvette. 3-extraction de l'éprouvette . 4- pesage de l'éprouvette.

## 2.5. Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée il convient de déterminer :

La masse de l'éprouvette humide  $M_h$ (pesé humide).

La masse de l'éprouvette sèche  $M_s$ (pesé sèche).

La teneur en eau  $w = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$ .

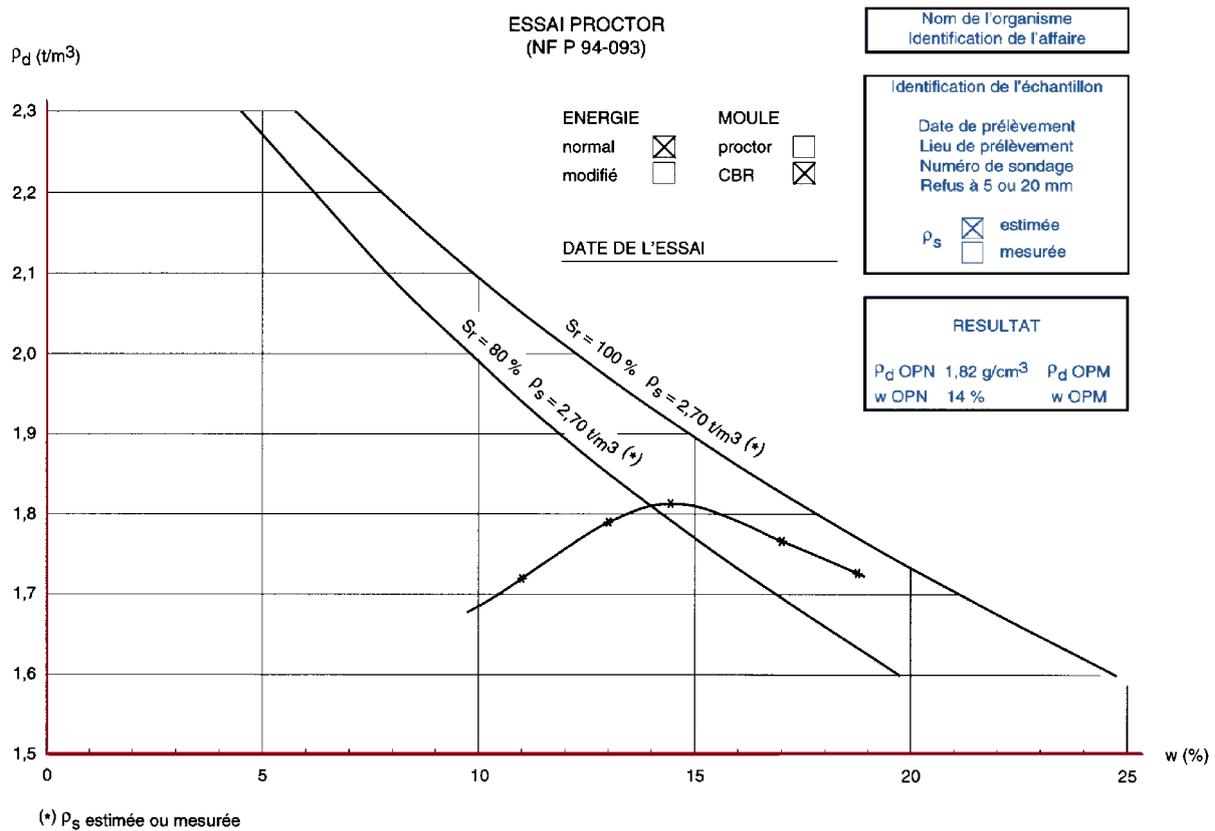
La masse volumique sèche, en tenant compte du volume réel utilisé  $\rho_s = \frac{M_s}{V}$  ( $g/cm^3$ ).

Les valeurs des masses volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique  $\rho_d = f(w \%)$  tel que celui présenté sur la figure II.9.

Il convient de faire figurer également sur le graphique  $\rho_d = f(w \%)$  les courbes d'équation :

$$\rho_d = \frac{S_r \rho_s}{S_r + w \frac{\rho_s}{\rho_w}} \text{ avec } \rho_w = 1 t/m^3$$

Établie pour  $S_r = 100$  et  $80 \%$  et pour  $\rho_s = 2.7 t/m^3$ , si l'on ne dispose pas de la valeur mesurée de  $\rho_s$  du matériau considéré.



**Figure II.9 : Exemple de procès-verbal d'essai Proctor [Courbe Proctor et courbes de saturation]. (NF P94-093).**

### 3. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR VOIE SÈCHE (NF P 94-056)

La granulométrie est l'étude des dimensions de particules de matières qui constituent un échantillon.

L'analyse granulométrique par tamisage est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant un échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

#### 3.1. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon, également cet essai contribue à apprécier les qualités drainantes et la sensibilité à l'eau des matériaux et leur aptitude au compactage.

### 3.2.Équipements nécessaires

L'appareillage utilisé dans cet essai est illustré en (Figure II.10) et comprend :

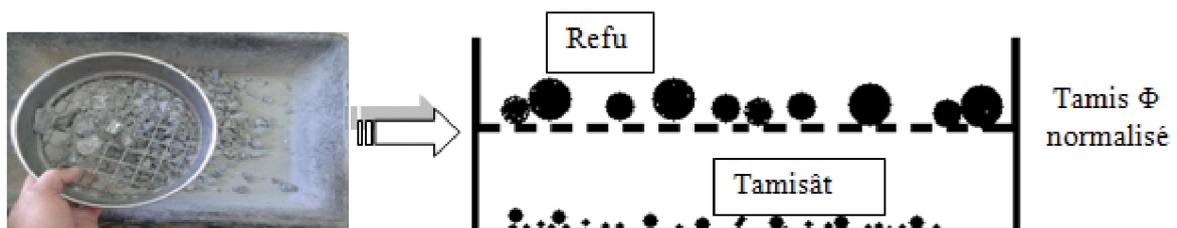
- Un dispositif de lavage (arroseur, bacs, brosses,... etc.).
- Une série de tamis à mailles d'ouverture carrées.
- Sol, Balance sensible, étuve de dessiccation à température réglable à 50 °C et à 105°C.



**Figure II.10 : Outillages nécessaires pour l'analyse granulométrique (tamiseuse électrique, Série de tamis, balance, étuve).**

### 3.3.Principe du tamisage

L'essai consiste à séparer les grain agglomérés d'une masse connue de matériaux par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est reportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.



**Figure II.11 : résultat du tamisage.**

### 3.4.Mode opératoire

#### 3.4.1. Prélèvement d'échantillons

Le prélèvement se fait par échantillonnage au laboratoire, on peut procéder par quartage un essai classique ou à l'aide d'un échantillonneur

### 3.4.2. Exécution de l'essai

Dans une première phase, le matériau est lavé puis séché à l'étuve à une température adéquate afin d'éviter toute influence sur sa structure granulaire

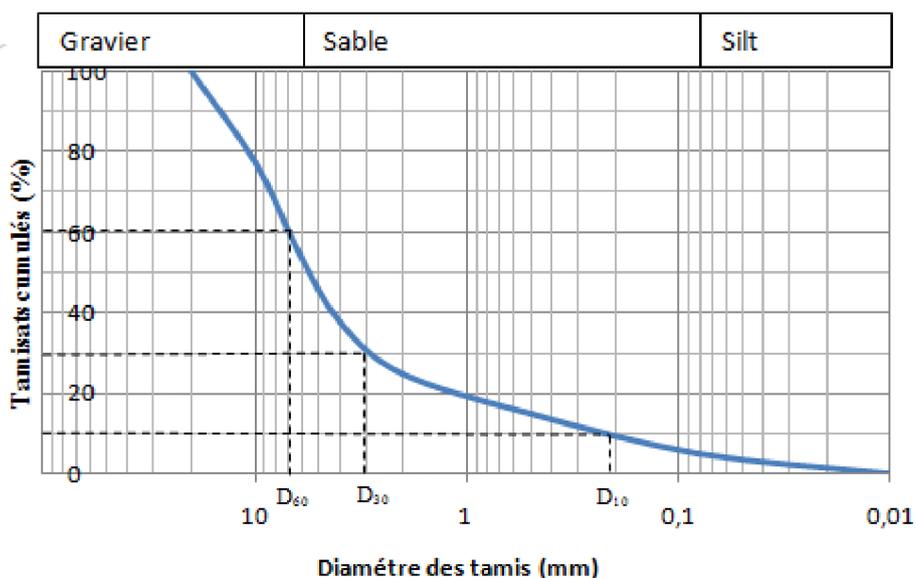
En seconde phase, on met le matériau séché et pesé, au sommet de la colonne de tamis de maille décroissante du haut vers le bas ayant à sa base un fond de tamis. Par la suite, cette colonne est agitée mécaniquement par l'intermédiaire d'une tamiseuse électrique.

En dernier, il y a lieu de recueillir le refus de chaque tamis, le peser et noter la valeur sur un tableau (voir, Tableau.II.2). Ces résultats sont présentés sous forme de courbe dite courbe granulométrique (Figure II.12).

Comme exemple, on présente les résultats du tamisage d'une masse de 4000 [gr] de matériau, tamisé sur une série de tamis (0/20), dans le tableau II.2 suivant :

**Tableau. II.2 : Exemple de résultats de l'analyse granulométrique par tamisage**

Tamis [mm]	Refus [g]	Refus cumulés [g]	Refus cumulés(%)	Tamisats cumulés (%)
20	000.00	000.00	00.00	100.00
10	900.00	900.00	22.50	77.50
6.3	900.00	1800.00	45.00	55.50
4	700.00	2500.00	62.50	37.50
2	500.00	3000.00	75.00	25.00
0.5	400.00	3400.00	85.00	15.00
0.08	400.00	3800.00	95.00	5.00
Fond	200.00	4000.00	100.00	0.00



**Figure.II.12 : courbe granulométrique correspondante au tableau II.2.**

### 3.5.Expression des résultats

Les résultats sont fournis sous forme de graphiques, éventuellement accompagnés du tableau des résultats.

La courbe granulométrique nous renseigne sur le type du sol qui compose l'échantillon analysé, et peut être classé selon les valeurs de référence données par le tableau II.3.

**Tableau II.3 : classification des sols en fonction du diamètre équivalent des particules.**

Type de sol	Diamètre équivalent (mm)
Blocs	> 300
Cailloux	80 à 300
Gravier grossier	20 à 80
Gravier fin	5 à 20
Sable grossier	2 à 5
Sable moyen	0.4 à 2
Sable fin	0.08 à 0.4
Silt	0.002 à 0.08
Argile	<0.002

#### 3.5.1. Calcul des facteurs de courbure et d'uniformité

Ce calcul n'est effectué que si le matériau passant au tamis 6.3 mm présente plus de 50 % de refus au tamis de 80 µm.

Les dimensions des tamis correspondant à  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$  sont interpolées sur la courbe

Le facteur d'uniformité à partir de :  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

- Si  $Cu > 2$  : la granulométrie est dite étalée.
- Si  $Cu < 2$  : la granulométrie est dite étroite.

Le facteur de courbure est calculé à partir de :  $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$

- Si  $Cu > 2$  et  $1 < Cc < 3$  ; le sol est dit bien gradué.

Avec :

$D_{10}$  : Diamètre correspondant à 10% des tamis cumulé ;

$D_{30}$  : Diamètre correspondant à 30% des tamis cumulé.

$D_{60}$  : Diamètre correspondant à 60% des tamis cumulé.

#### **4. CONCLUSION**

Les essais de labo demeurent indispensables pour l'identification des sols et la détermination de leurs caractéristiques physiques ou mécaniques.

L'essai Proctor et l'analyse granulométrique sont deux essais normalisés qui permettent d'étudier le comportement mécanique d'un matériau sous compactage.

**CHAPITRE III:**

**IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX**

### III.1. INTRODUCTION

Plusieurs versants naturels du massif de la grande Kabylie ont connus des mouvements de terrain très actifs comme le cas d'Ain el hammam (ex Michelet), d'Azazga ou de Tizirt. Le contexte géologique, morphologique et climatique de la région D'Ain El Hammam permet de mieux cerner la problématique.

Avant d'étudier le comportement mécanique du matériau naturel, il est essentiel de l'identifier pour pouvoir évaluer correctement son comportement physico-chimique sous les différentes sollicitations mécaniques auxquelles il sera soumis.

Ce chapitre, sera consacré essentiellement à l'identification du matériau naturel schiste

### III.2. MATÉRIAUX

#### III.2.1. Localisation du site

Le site d'extraction du matériau se situe à Ain El Hammam sur la route N71 en allant vers Ait Yahia, le lieu est approximatif de siège de la daïra d'AEH,



Figure. III.1: Site d'extraction du schiste (Ain El Hammam [source Google Map]).

#### III.2.2. Matériau utilisé

Le matériau utilisé dans cette étude est extrait sous forme de bloc (Figure III.2), dans la commune de Ain El Hammam, une localité située à 50 km au sud-est de la wilaya de TiziOuzou, ensuite concassée par des moyens mécaniques selon la granulométrie désirée. Les rares affleurements existant montrent que les terrains en place sont constitués de schiste satinés grisâtre surmontés généralement d'une épaisse couverture argilo-limoneuse.

Ces dernières années la zone d'Ain el hammama connu un glissement de terrain très actif sur une surface qui est de l'ordre de 23.5 ha, ce dernier a bouleversé les habitants et les autorités locales.

Les produits chimiques ont été fournis par le laboratoire de chimie de l'université Mouloud Mammeri (figures.III.3). Les mélanges (schiste + polluant) ont pour but de simuler le comportement du massif d'Ain El Hammam où une grande quantité des eaux d'assainissement se déversent dans la zone instable.



Figure. III.2 : Schiste satiné d'Ain el hammam.

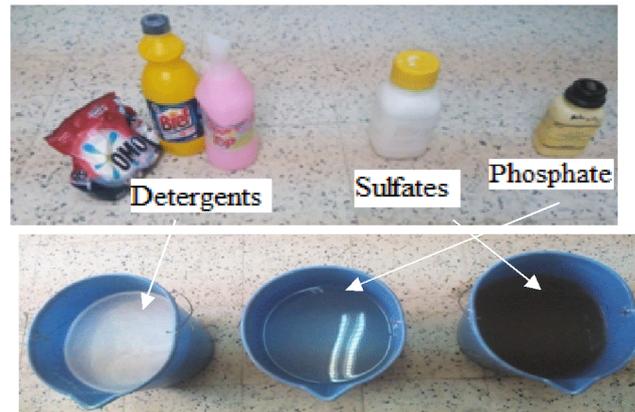


Figure. III.3 : Produits chimiques utilisés.

### III.3. LES SCHISTES

#### III.3.1. Définition des schistes

Les schistes ont en commun une structure à grain fin à moyen, une schistosité très nette et une proportion de feldspaths inférieure à 20%, ils présentent un aspect feuilleté. Ils peuvent s'agir d'une roche sédimentaire argileuse, ou bien d'une roche métamorphique.

Les schistes se forment généralement dans des conditions de faible température et de fortes pressions, donc à des profondeurs variant entre 4000 et 6000 m. Leur composition chimique ou pétrographique peut être très diverse [Guillemot, 1976].

Parmi les schistes importants figurent les micaschistes, les schistes chlorites et les talcschistes.

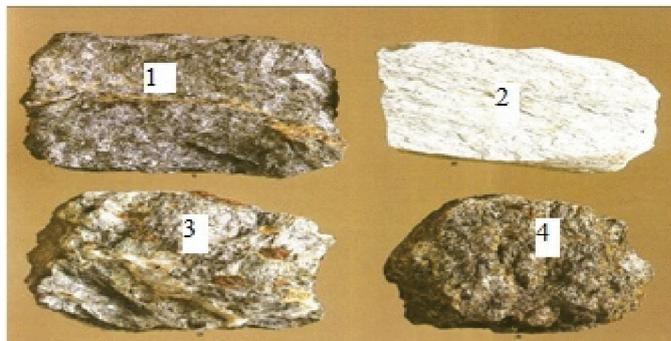


Figure. III.4 : Famille des Schiste

(1-schiste phyliteux, 2- schiste sériciteux, 3-micaschiste à grenats, 4- micaschiste).

### III.3.2 Les schistes de la Grande Kabylie

Le massif ancien de la Grande Kabylie est constitué d'un socle gneissique fortement métamorphique et d'une couverture schisteuse épimétamorphique (Brossiere, 1971) ; ces deux ensembles sont eux même recouverts en discordance par une série peu ou non métamorphique (Brossiere et Raymond, 1972). Cette couverture est constituée essentiellement d'un ensemble de sericitoschistes et de chloritoschistes présentant des passées gréseuses.

### III.3.3. Contexte régional

La région d'Ain El Hammam est liée au massif de la Grande Kabylie qui constitue un ensemble homogène (Figure. III.5). Ce massif s'étale sur une longueur de 70 km et une largeur de 20 km occupant une position centrale dans les Maghrebides. Il domine le bassin de Tizi-Ouzou au nord et assure une transition avec la chaîne de montagnes de Djurdjura vers le sud (Figure. III.5). 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 cotes 1,000 m et 1,300 m sont situées dans la région orientale de ce massif (Djeral et Melbouci, 2012). Les zones internes du massif de la Grande Kabylie comportent trois ensembles géologiques (GEOMICA 2009):

- Le premier est métamorphique; il est composé de terrains anciens cristallins et surtout cristallophylliens du Paléozoïque.
- Le second est de nature sédimentaire, peu ou pas métamorphique, d'âge cambrien à carbonifère.
- Le troisième forme la dorsale ou chaîne calcaire d'âge mésozoïque à cénozoïque.

Les études géologiques, menées par le laboratoire GEOMICA (en 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'aprites.
- Un ensemble de roches basiques représentées par des amphiboles.

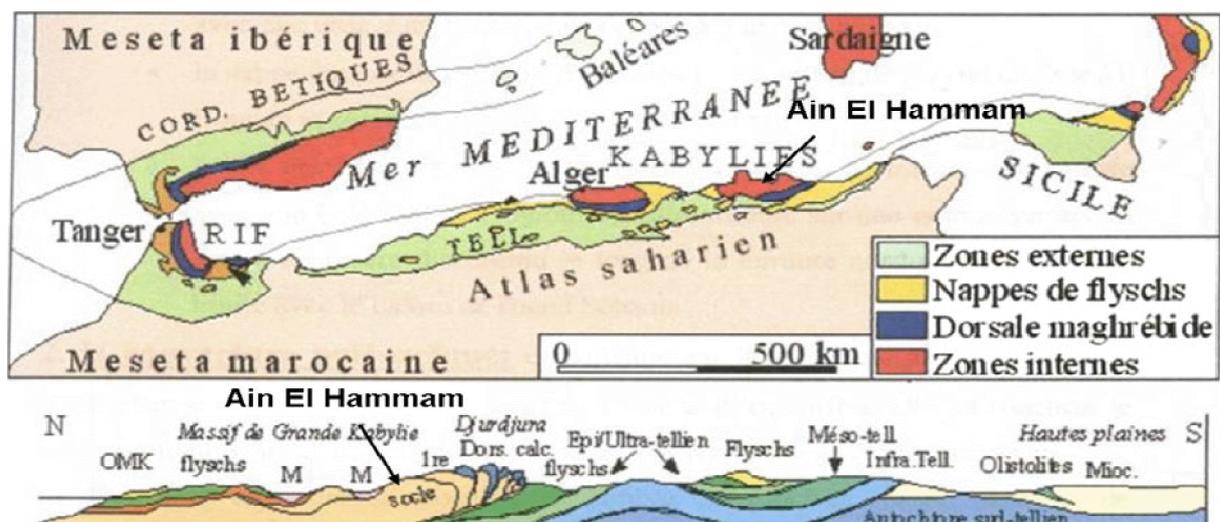


Figure. III.5 : Carte structurale schématique de la chaîne Maghrébide montrant la distribution des zones externes et internes de la grande Kabylie

## **III.4. LES DIFFÉRENTS TYPES DE SCHISTE**

### **III.4.1. Les schistes du métamorphisme général très faible**

Ils sont à la limite du domaine du métamorphisme ; Ils sont souvent considérés encore comme des roches sédimentaires, par exemple :

- schiste bitumineux
- les schistes ardoisés

### **III.4.2. Les schistes du métamorphisme général faible (epizonale)**

Ces schistes montrent des recristallisations minérales plus nettes, par exemple :

- schistes sericiteux ou satinés
- schiste talqueux
- schiste cloriteux
- schiste lustres

### **III.4.3. Les schistes du micaschiste général plus fort (catazonal)**

- les micaschistes

### **III.4.4. Les schistes du métamorphisme de contact**

- les schistes tachetés : la schistosité est en générale acquise antérieurement à l'intrusion des roches magmatiques, de couleur grise à noir à petites tâches de 0,5 à 3 mm.

## **III.5. ESSAIS D'IDENTIFICATION**

Après concassage manuel des blocs de Schiste et l'obtention des granulats schisteux, une étude d'identification a été réalisée au laboratoire pour déterminer ses caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques.

### **III.5. 1. Teneur en eau NF P94-050**

La teneur en eau est le quotient de la masse de l'eau interstitielle ( $M_w$ ) par la masse des grains solide ; est déterminée selon la norme NF P94-050 (méthode par étuvage).

L'essai consiste à peser un échantillon humide puis le passer à l'étuve à 75°C pendant 24h, le peser une autre fois à sec. De ce fait, la teneur en eau pondérale est calculée comme suit :

$$w = (M_h - M_s) / M_s$$



**Figure. III.6 : Échantillons de l'essai de la teneur en eau.**

### III. 5.1.1. Présentation des résultats et interprétation

Les résultats de l'essai sont présentés en tableau III.2.

**Tableau III.1: Résultats de l'essai de la teneur en eau.**

Échantillon	01	02	03	04
Poids de la tare [gr]	20.4	27.4	24.2	24.8
Poids humide + poids de la tare[gr]	302.6	385.3	298.7	407.4
Poids sec +poids de la tare[gr]	301.5	384.3	298.7	406.1
Poids de l'eau[gr]	1.1	1	0.6	1.3
Poids sec[gr]	281.1	356.9	273.9	381.3
Teneur en eau $w(\%) = \frac{Mw}{Ms} * 100$	0.39	0.28	0.22	0.34
w(%) moy = 0.3	Date de l'essai : 21/03/2017			

Le schiste étudié est faiblement humide, présente une faible teneur en eau ; ceci peut être expliqué par l'influence de la température et le non conditionnement du matériau.

### III.5.2. Les masses volumiques

#### III.5.2.1. Masse volumique sèche d'un élément de roche : « Méthode par pesée hydrostatique » : NF P94-064

L'élément de roches est brossé, ensuite séché à l'étuve et pesé, puis paraffiné totalement sur sa surface extérieure une fois revenue à la température de la salle d'essai, l'échantillon est pesé à nouveau à l'aire libre ensuite dans l'eau.



**Figure. III.7 : Équipements pour pesée**

### III.5.2.1.1. Présentation des résultats et interprétation

Le résultat de la masse volumique est calculé en tableau III.3

**Tableau III.2 : Résultats de l'essai.**

Échantillon	1	2	3	4
Poids de la tare	26.8	25.1	26.1	24.7
Masse de la roche sèche + tare Mr[gr]	224	176.7	174.7	132.8
Masse roche + paraffine à l'air libre + tare Mrp[gr]	227.1	179.9	179.1	136.7
Masse roche sèche paraffinée dans l'eau M'rp[gr]	123.8	92.5	95.6	68.2
Volume de la paraffine Vp (Vp= MP/Pp) [cm <sup>3</sup> ]	3.52	3.64	5.00	4.43
Volume total de la roche sèche V [cm <sup>3</sup> ]	72.98	58.66	52.4	39.37
Masse volumique de l'eau ρ <sub>w</sub> (gr/ cm <sup>3</sup> )	1	1	1	1
Masse volumique de la paraffine (ρ <sub>p</sub> )	0.88	0.88	0.88	0.88
Masse volumique sèche de la roche (ρ <sub>d</sub> )	2.7	2.58	2.8	2.7
$\rho_d = \frac{Mr}{\frac{Mrp - M'rp}{\rho_w} - \frac{Mrp - Mr}{\rho_p}} \text{ (gr/cm}^3\text{) : 2.65}$			Date de l'essai : 20/03/2017	

**Tableau III.3 : classification du sol selon la masse volumique sèche.**

ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Appréciation
< 1.6	Faible
1.6 - 1.8	Moyenne
> 1.8	Dense

Suivant la classification donnée par le Tableau III.4 on peut conclure que notre matériau est dense.

### III.5.2.2. Masse volumique des particules solide p<sub>s</sub> (pycnomètre) NF P94-054

La détermination de la masse volumique des particules solides est effectuée selon la norme NF P94-054. Elle consiste à mesurer le volume des particules solides par un pycnomètre en utilisant l'eau distillée. p<sub>s</sub> est utilisée pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides



**Figure. III.8 : Matériels utilisés.**

La masse volumique des particules solides est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1 + M_2 - M_3)}$$

Avec

$M_1$  : Masse du pycnomètre vide ;

$M_2$  : Masse du pycnomètre avec particules solides ;

$M_3$  : Masse du pycnomètre avec particules solides et eau ;

$M_4$  : Masse du pycnomètre avec eau ;

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau (1g/cm<sup>3</sup>).

### III.5.2.2.1. Présentation des résultats et interprétation

**Tableau.III.4 : Résultats des pesées au pycnomètre.**

Paramètre	valeur
<b>M1</b>	202.1 [g]
<b>M2</b>	252.1 [g]
<b>M3</b>	786.5 [g]
<b>M4</b>	754.9 [g]
<b>Masse de l'eau de même volume que les particules solides (M4-M1+M2-M3)</b>	18.45 [g]
<b>Masse volumique de l'eau <math>\rho_w</math></b>	1g/cm <sup>3</sup>
<b>Masse volumique des particules solide <math>\rho_s = \frac{\rho_w(M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1 + M_2 - M_3)}</math></b>	$\rho_s = \frac{1(252.1 - 202.1)}{18.45}$ = 2.71 g/cm <sup>3</sup>

La masse volumique sèche après calcul est donc égale à 2.71 g/cm<sup>3</sup>. Ce résultat montre que la masse volumique du schiste étudié est importante, c.-à-d, ce dernier se trouve dans un état dense.

#### **Commentaire :**

Le résultat obtenu de la masse volumique des particules solides  $\gamma_s$  reste adéquat et acceptable.

### III.5.3. Limites d'Atterberg NF P94-051

Les limites sont non mesurables -----> et donc notre matériau ne comporte pas de particules argileuses, ceci peut être vérifié par l'essai VBS.

### III.5.4.Essai VBS NF P94-068

L'essai consiste à mesurer la capacité d'absorption du bleu de méthylène dans un échantillon de sol mis en suspension dans l'eau, cette valeur permet de classer le sol étudié.

L'essai à la tâche s'effectuera conformément à la norme NF P 94-068. Ayant un matériau rocheux (sans limite de plasticité). Pour cela il faudra prélever une masse d'échantillon supérieure à 60g de classe 0/5.

Le matériau sera alors introduit dans un récipient avec 500 ml d'eau distillée, puis agité à 700t/mn pendant 15 mn. Une fois l'opération terminée, on introduira dans le mélange à 400t/mn des volumes de bleu de méthylène de l'ordre de  $5\text{cm}^3$  à  $10\text{cm}^3$  progressivement, et à l'aide d'une tige en verre on effectue des tâches sur un papier filtre pour évaluer nos résultats.

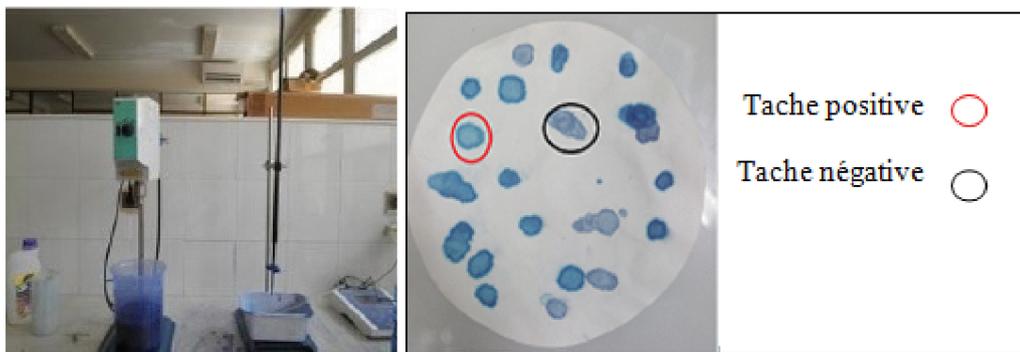


Figure. III.9 : La mise en suspension des particules et la prise.

#### III.5.4.1. Présentation des résultats et interprétation

Tableau III.5 : Résultats de l'essai VBS.

Paramètre	valeur
Teneur en eau du matériau $w(\%)$	0.3
Masse humide de la prise d'essai $M_{h1}$	100
Masse sèche de a prise d'essai $M_0 = \frac{M_{h1}}{1+w}$	99.70
Volume de la solution du bleu nécessaire pour atteindre l'adsorption totale	$25\text{cm}^3$
Masse de bleu introduite $B= V* 0.01$	0.25
Valeur au bleu $VBS = \frac{B}{M_0} * 100$	0.02

**Tableau III.6 : Tableau donnant la désignation du sol en fonction de son VBS.**

<b>VBS (gr de bleu pour 100 g de sol)</b>	<b>Désignation du sol</b>
<b><math>VBS \leq 0.2</math></b>	Sableux
<b><math>0.2 &lt; VBS &lt; 2.5</math></b>	Limoneux
<b><math>2.5 &lt; VBS &lt; 6</math></b>	Limoneux-argileux
<b><math>6 &lt; VBS &lt; 8</math></b>	Argileux
<b><math>VBS &gt; 8</math></b>	Très argileux

$VBS < 0.1 \rightarrow$  Sol insensible ou peu sensible à l'eau.

D'après l'échelle de classement basée sur le VBS, donnée par ARVOR géotechnique (Tableau III.7), le matériau utilisé est classé comme un sol sableux c-à-d ne comporte pas de particules argileuses.

### **III.5.5. Calculs des paramètres physiques du matériau**

#### **III.5.5.1. 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 calculé « n » à partir de l'équation suivante :

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = 1 - \frac{2.65}{2.76} = 0.03$$

#### **III.5.5.2. Indice des vides**

L'indice des vides noté « e », dont la signification est analogue à celle de la porosité. « e » peut être calculé comme suit :

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.76}{2.65} - 1 = 0.04$$

#### **III.5.5.3. 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.

## **III.6. ANALYSE MINÉRALOGIQUE**

Les analyses minéralogiques sont réalisées au diffractomètre et les principaux résultats sont portés sur la figure.III.10 suivante :

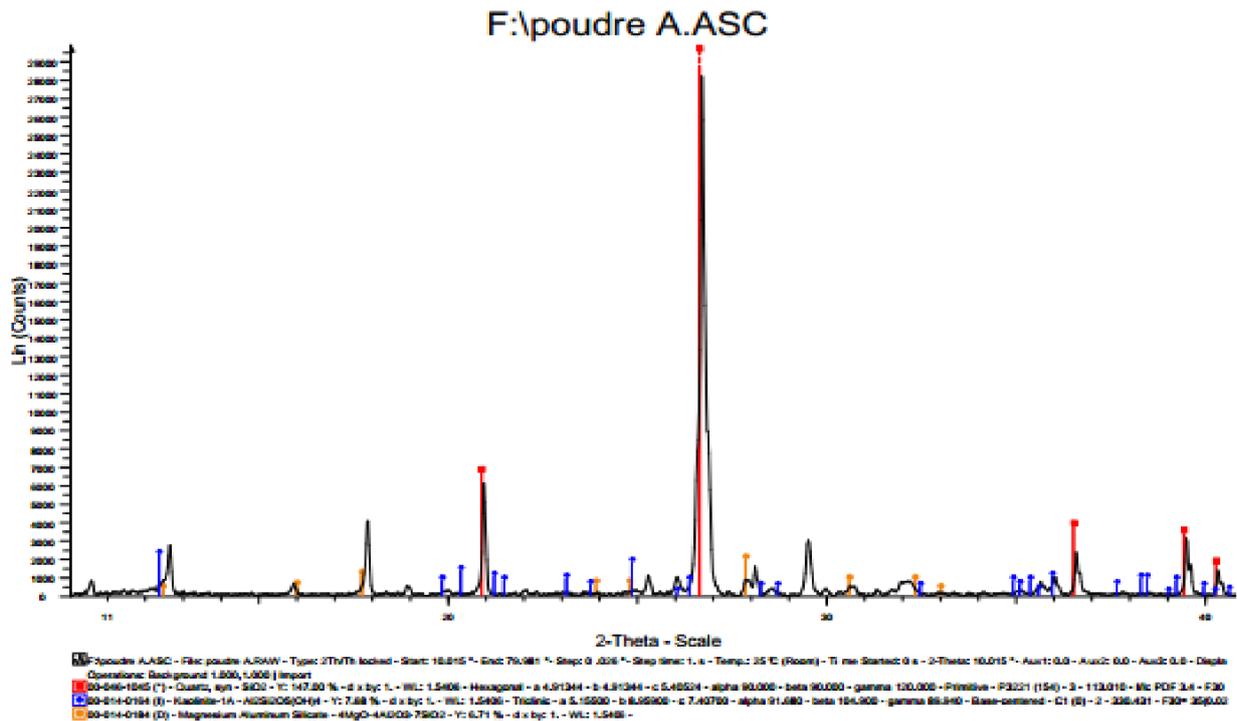


Figure. III.10 : Diffractogramme du schiste étudié.

Tableau III.7 : Résultat du diffractogramme pour le schiste.

Éléments	Quartz, syn - SiO <sub>2</sub>	Kaolinite-1A Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Magnésium Aluminium Silicate 4MgO·4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·7SiO <sub>2</sub>
Quantité (%)	147.00 %	3.68 %	2.71 %

L'analyse minéralogique réalisée par diffraction des rayons X sur l'échantillon de schiste montre le caractère prédominant du quartz et la présence de Magnésium, Aluminium Silicate à faible proportions

L'essai révèle l'existence de minéraux argileux (la kaolinite) qui peuvent présenter une certaine sensibilité à l'eau. Cependant, la présence en faibles proportions de ces éléments, ne peut influencer fortement le comportement mécanique du matériau.

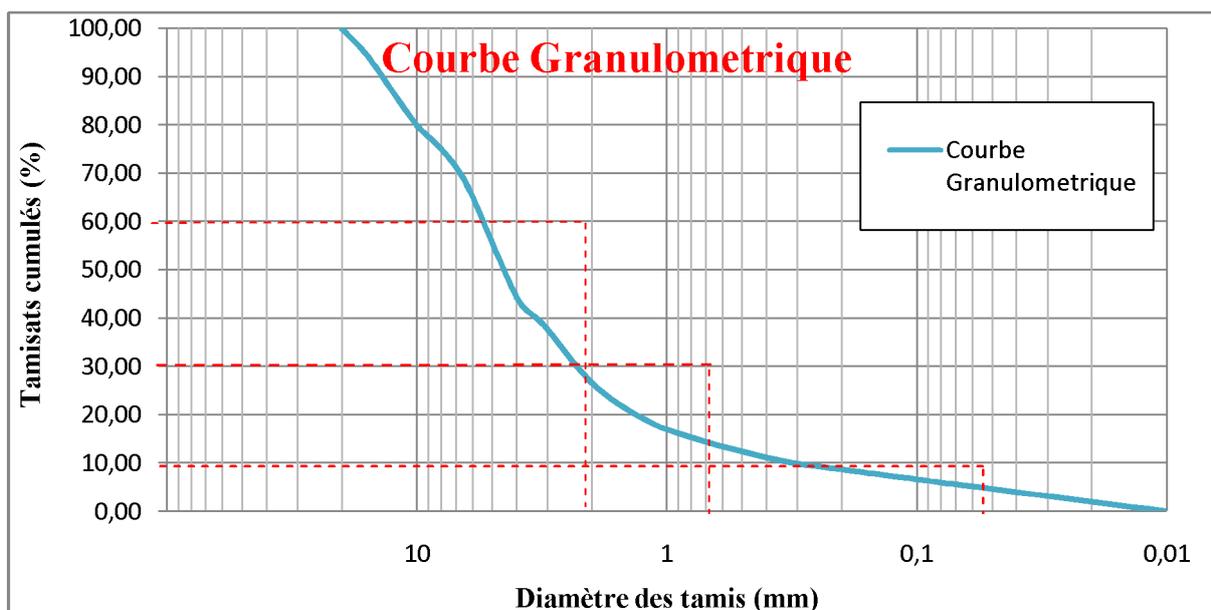
### III.7. ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Après concassage du matériau (granulaire), une courbe granulométrique est réalisée sur la fraction 0/20 mm. Cette courbe est déterminée à l'état initial dont lequel se trouve le matériau c-à-d le matériau n'est pas encore mélangé avec des produits chimiques.

**III.7.1. Résultats et interprétation**

**Tableau III.8 : Tableau de résultats d'analyse granulométrique.**

Tamis (mm)	Refus [gr]	Refus Cumulés	Refus Cumules(%)	Tamisâts Cumules (%)
20	0,00	0,00	0,00	100,00
16	116,71	116,71	5,31	94,70
12,5	173,47	290,18	13,19	86,81
10	150,37	440,55	20,03	79,98
8	108,24	548,79	24,95	75,06
6,3	165,44	714,23	32,47	67,54
4	508,86	1223,09	55,60	44,41
3,15	120,78	1343,87	61,09	38,92
2	271,26	1615,13	73,42	26,59
1,25	162,91	1778,04	80,82	19,18
0,8	84,26	1862,30	84,65	15,35
0,5	64,13	1926,43	87,57	12,44
0,315	51,26	1977,69	89,90	10,11
0,2	30,58	2008,27	91,29	8,71
0,125	31,46	2039,73	92,72	7,28
0	160,27	2200,00	100,00	0,00
totale	2200	/	/	/



**Figure. III.11 : courbe granulométrique initiale.**

La granulométrie imposée comporte sur toutes les classes de sol (grave, sable, silt) sur une fraction 0/20 mm, les calculs des coefficients d'uniformité et de courbure nous renseignent d'avantage sur l'analyse effectuée :

De la courbe les diamètres  $d_{60}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{10}$  sont les suivant :

$$D_{60} = 5.3 \text{ mm} \quad ; \quad D_{30} = 2.3 \text{ mm} \quad ; \quad D_{10} = 0.34 \text{ mm} .$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 15.6 \rightarrow C_u > 2 : \text{ la granulométrie choisie est une granulométrie étalée.}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = 2.3 \rightarrow 1 < C_c < 3 : \text{ la désignation du sol obtenue est un grave bien gradué GW}$$

### III.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents essais d'identification, qui nous ont permis une meilleure interprétation des résultats.

En effet, ce sol naturel est sableux, dense et insensible à l'eau. Ces informations nous aideront à mieux évaluer le comportement physico-chimique de notre matériau et d'étudier son aptitude simultanément au climat et au compactage sous l'influence des produits chimiques, tels que les détergents, phosphates et les sulfates.

Dans le chapitre qui suit sera entamé les essais de dégradations selon le fuseau granulométrique imposé.

**CHAPITRE IV:**

**ESSAIS DE LABO, RÉSULTATS ET  
INTERPRÉTATIONS**

## IV.1. INTRODUCTION

Différents processus d'altération mènent à la dégradation des matériaux rocheux. Cette dégradation est lente et peut se manifester par une perte des performances mécaniques et/ou une évolution des propriétés physiques de la roche. La dissolution, l'hydrolyse, l'hydratation, l'échange d'ions, l'oxydation, ainsi que les mécanismes physiques comme la dilatation, la contraction des minéraux, le gel-dégel de l'eau et la cristallisation sont les principaux mécanismes qui interviennent dans l'altération des roches. Les variations de température et l'action de l'eau constituent les deux principaux facteurs à l'origine de ces processus de dégradation.

Dans ce chapitre, on tient à représenter l'effet de la nature, pour cela nous effectuerons des essais sur notre matériau à l'état naturel ; les résultats obtenus seront considérés comme des résultats de référence.

## IV.2. CONCASSAGE ET PRÉPARATIONS DES ÉCHANTILLONS

Pour notre étude, le matériau utilisé (schiste satiné) était sous forme de bloc puis concassé manuellement pour obtenir un matériau granulaire de fraction granulométrique 0/20mm.



**Figure IV.1 : Concassage des matériaux.**

### IV.2.1. Confection des échantillons

Deux types d'essais Proctor ont été réalisés :

- Proctor normal avec un matériau naturel sain
- Proctor normal avec un matériau naturel + des produits chimiques (sulfates, phosphates, détergents).

Pour chaque essai Proctor, on prélève une masse de 2 kg selon la granulométrie définie dans le chapitre III pour avoir des échantillons identiques, réparties en 5 séries. Chaque série contient 12 échantillons immergés dans l'eau ou dans des produits chimiques.

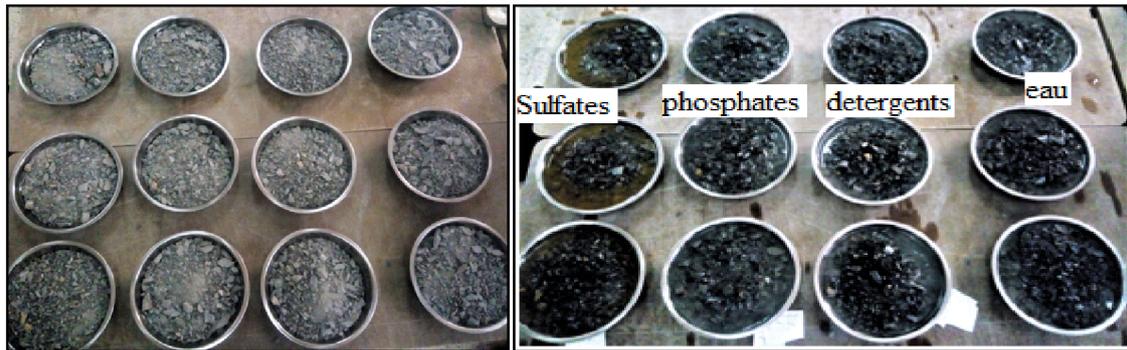


Figure IV.2 : Échantillons confectionnés imbibés dans l'eau ou dans les produits chimiques.

### IV.3. ESSAIS PROCTOR

Les essais ont été réalisés selon la norme [NF-P94-093], tout en respectant le fuseau granulométrique défini auparavant (voir chapitre d'identification).

#### IV.3.1. Essai Proctor normal (grand moule), Résultats et interprétations



Figure IV.3 : Essai Proctor normal (grand moule).

Tableau IV.1 : Résultats de l'essai Proctor normal en utilisant le grand moule.

Teneur en eau	Essais			
	à 4 %	à 6 %	à 8 %	à 12 %
sol humide + poids de la tare	5193,000	5280,000	5496,000	6135,000
poids du sol sec	4541,000	4558,000	4637,000	4577,000
teneur en eau	4,338	5,836	7,203	8,783
volume du moule $V = (\pi \times \varnothing^2) / 4 \times L \text{ cm}^3$	2124,000			
poids volumique $\gamma_{dgr}/\text{cm}^3$	<b>2,138</b>	<b>2,146</b>	<b>2,183</b>	<b>2,155</b>

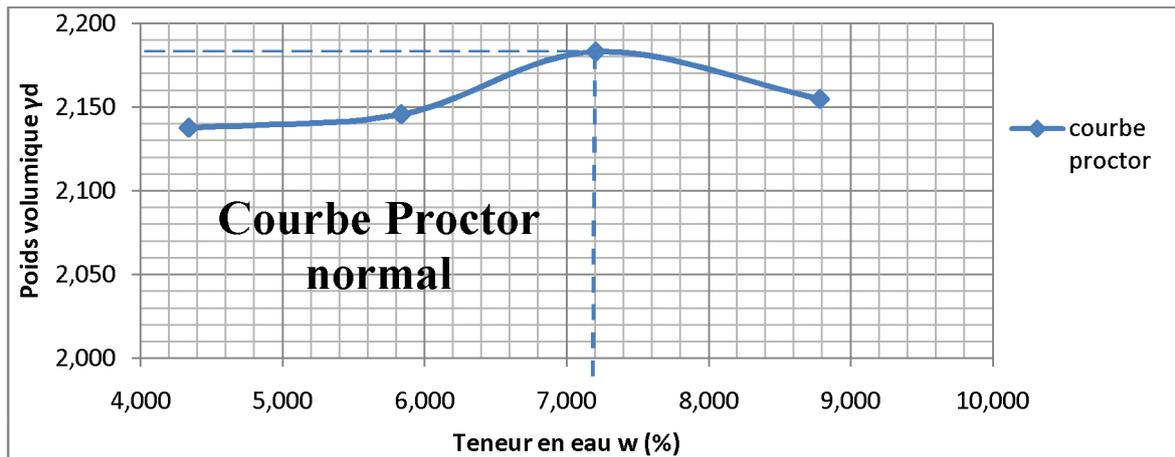


Figure IV.4 : Courbe de l'essai.

Les caractéristiques Proctor obtenues sont : ( $w_{(%)}$  = 7.2 ;  $\gamma_d$  = 2.18).

### IV.3.2. Essai Proctor normal(moule normal), Résultats et interprétations



Figure IV.5 : Essai Proctor normal (moule normal).

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai Proctor normal en utilisant le moule normal.

Teneur en eau	Essais				
	à 2 %	à 4 %	à 6 %	à 8 %	à 10 %
pois tare + sol humide	2718	2440,2	2554,4	2542,4	2629,3
pois du sol sec	1917	1923,8	1948,4	1941,2	1932,7
Teneur en eau	1,97	3,09	5,68	7,50	8,36
volume du moule $V = (\pi \times \varnothing^2) / 4 \times L$	948,08				
pois volumique $\gamma_d = P_{ss} / V$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	2,02	2,03	2,06	2,05	2,04

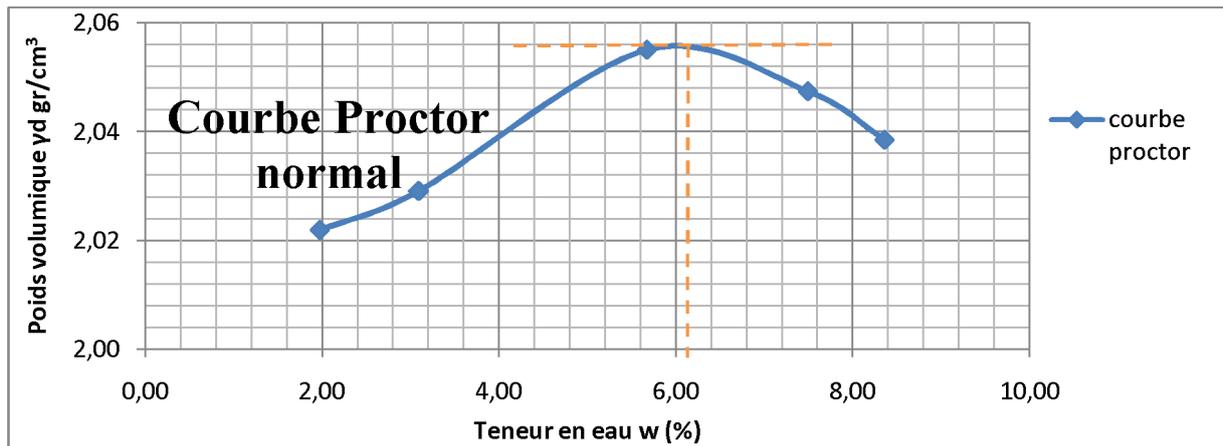


Figure IV.6 : courbe de l'essai.

Les caractéristiques Proctor obtenues sont : ( $w_{(0)} = 6.1$  ;  $\gamma_d = 2.056$ ).

### IV.3.3. Commentaires et comparaison des résultats

Dans une première étape, l'optimum Proctor est identifié en utilisant le grand moule (figure IV.4). Les résultats montrent que le sol est compacté pour une teneur en eau égale à 7.2% qui correspond à une densité maximale de 2.18  $\text{gr/cm}^3$ . En seconde étape, le matériau est compacté dans le moule Proctor normal tout en gardant le même fuseau granulométrique, les résultats obtenus sont présentés dans la (figure IV.6) montrent un changement dans le comportement du matériau, l'optimum Proctor obtenue dans le deuxième essai est d'une teneur en eau de 6.1% et qui correspond a une densité maximale de 2,056  $\text{gr/cm}^3$ .

A partir des deux courbes obtenues nous pouvons constater ce qui suit :

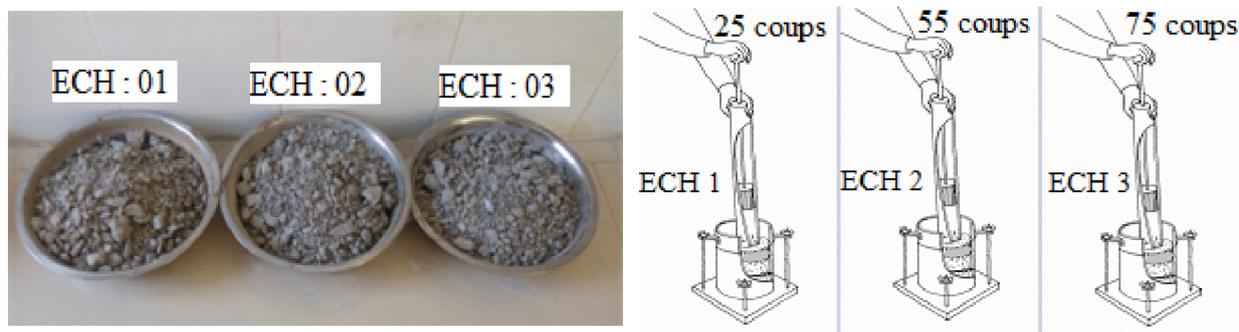
- Les deux courbes présente une même allure peu aplaties.
- La densité sèche du matériau passe de 2.18  $\text{gr/cm}^3$  à 2.056  $\text{gr/cm}^3$  mais elle reste toujours élevée.

## IV.4. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE L'ÉNERGIE DE COMPACTAGE AUX ESSAIS PROCTOR

La réalisation des essais Proctor sur le matériau sain nous permet de faire une observation sur son comportement mécanique, et principalement de suivre l'évolution de la densité sèche en variant l'énergie de compactage. On identifie alors une courbe de référence  $\gamma_d = f(E)$ , (Avec E : énergie de compactage égale à 25, 55 et 75 coups par couche) qui permet par la suite d'évaluer la dégradation physico-chimique du matériau sous l'effet de l'eau ou des produits chimiques.

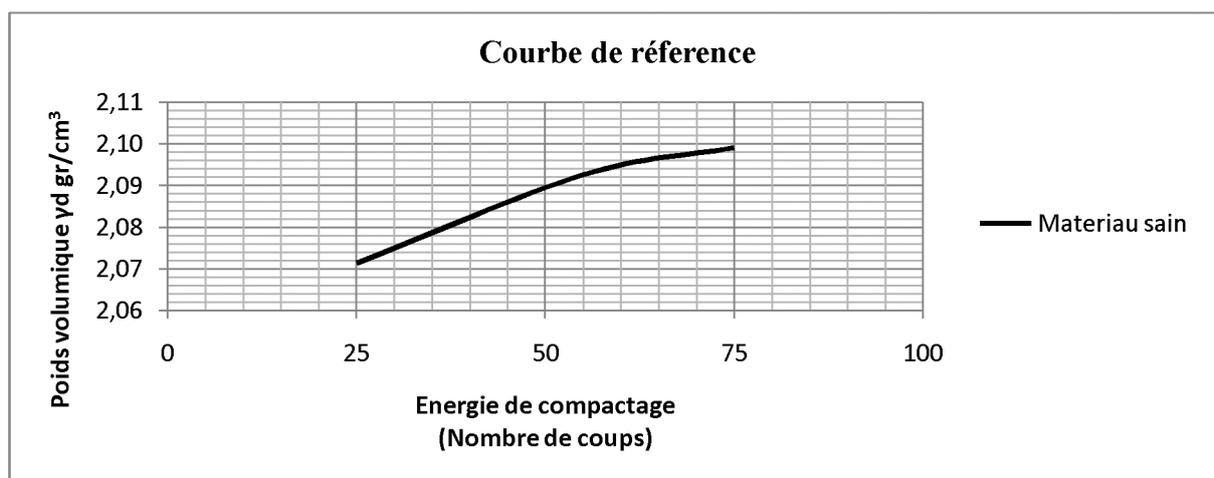
### Déroulement des essais

À partir des caractéristiques Proctor à l'état optimum, trois essais Proctor normal ont été réalisés sur des échantillons du matériau schiste à l'état sain sous 25,55 et 75 coups par couche (voir Figure IV.7).



**Figure IV.7 : Échantillons de schiste sans polluant et modes de compactage.**

### Résultats et interprétation



**Figure IV.8 : Courbe référentielle de densité sèche à différentes énergies de compactage**

En augmentant l'énergie de compactage, nous constatons une augmentation logique dans la densité sèche du matériau (figure IV.8), autrement dit plus l'énergie de compactage augmente plus la densité sèche augmente.

Pour chaque énergie de compactage, nous faisons une analyse granulométrique et nous soumettons l'échantillon aux conditions de l'enceinte climatique pour apprécier la dégradation du matériau.

## IV.5. Analyses granulométriques avant la dégradation à l'enceinte climatique

A partir de la courbe granulométrique de référence, trois échantillons ont été confectionnés pour les soumettre aux trois énergies de compactage. Les courbes granulométriques obtenues après les trois essais Proctor seront considérées comme des courbes de référence avant les essais de dégradation à l'enceinte climatique. Ceci nous permettra d'évaluer correctement la dégradation chimique du matériau et son comportement physique.

### Déroulement des essais

Une analyse granulométrique a été réalisée pour chaque éprouvette testée à l'essai Proctor. Cependant, les échantillons seront séchés, concassés puis soumis à l'essai d'analyse granulométrique.



Figure IV.9 : Étapes de déroulement de l'essai (séchage des éprouvettes, concassage, analyse granulométrique).

### Résultats et interprétation

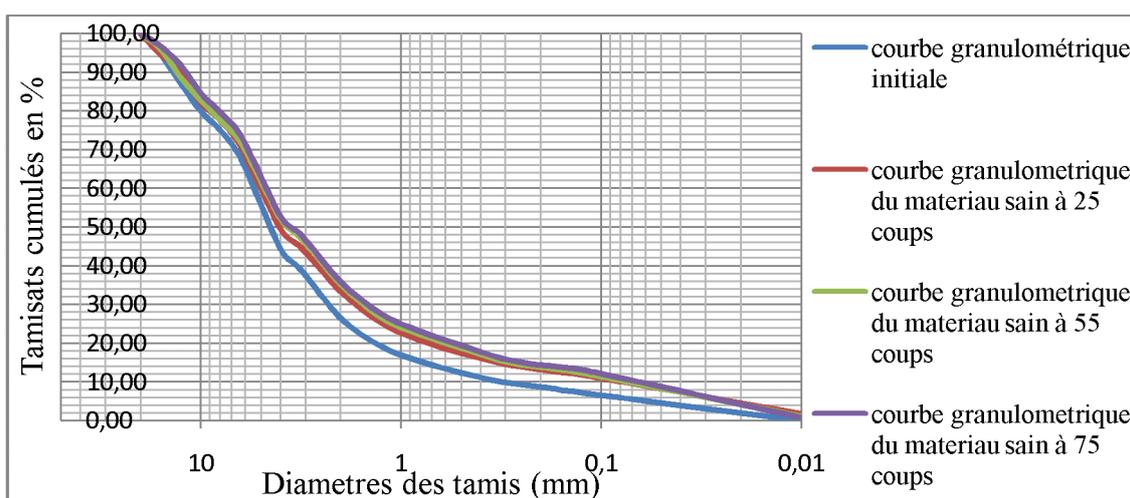


Figure IV.10 : Courbes granulométriques de référence à différentes énergies de compactage.

La figure précédente présente des courbes étalées, très rapprochées et ont les mêmes allures. Ceci traduit une légère fragmentation des grains du matériau schiste et avec une faible influence de l'énergie de compactage.

Le principal facteur de désagrégation de ces grains est dû à l'augmentation de l'énergie de compactage.

## **IV.6. ESSAI DE DÉGRADATION**

### **IV.6.1. Essai de dégradation à l'enceinte climatique (gel-dégel)**

L'essai est appliqué selon la norme [NF EN 1367-1].

#### **But de l'essai**

L'essai consiste à représenter l'effet de la nature et/ou l'influence du climat existant dans la région d'Ain el hammam.

#### **Déroulement de l'essai**

On place tous les échantillons confectionnés dans l'enceinte climatique par série de 12 échantillons. Au total 5 séries sont obtenues 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> puis placer respectivement pendant une durée de 10 j, 20j, 30j, 40j et 50 jours, selon le programme suivant :

- 5 cycles 18h à 45°C et 6h à -2°C
  - 5 cycles 6h à 45°C et 18h à -2°C
- } Les 10 cycles présentent une série avec une température max de 45°C et la température min de -2°C.

Des essais Proctor ont été réalisés et des analyses granulométriques ont été effectuées pour chaque série.



**Figure IV.11 : Enceinte climatique.**



**Figure IV.12 : Mise en place des échantillons dans l'enceinte climatique.**

### **IV.6.2. Essais avec des produits chimiques**

L'ajout des produits chimiques tel que le sulfate [ $\text{FeSO}_4$ ], le phosphate [ $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ] et les détergents [eau de javel, sanibon, Omo], ont pour but d'évaluer la sensibilité et la réaction des

composants du matériau granulaire utilisé, ainsi que reproduire l'effet des eaux usées naturelles qui affleurent la roche de schiste.

### Déroulement de l'essai

L'essai porte un mode opération très simple et consiste à immerger les échantillons préparés dans les différents produits chimiques avant la mise en place des échantillons dans l'enceinte climatique.

## IV.7. Essais Proctor après dégradation

### Déroulement des essais

On retire une série soumise à l'action cyclique de l'enceinte climatique. Après avoir séché l'ensemble des échantillons à l'étuve à 50°C, nous réalisons des essais Proctor en maintenant les caractéristiques optimales initiales de l'essai Proctor.

Rappelons qu'une série contient 12 échantillons répartie en 4 séries secondaires. Chaque série est immergée dans un produit chimique. Les essais Proctor sont effectués comme suit :

03 Échantillons Schiste + sulfate	Le premier échantillon est compacté pour une énergie de compactage égale à 25 coups par couche	Le deuxième échantillon est compacté pour une énergie de compactage égale à 55 coups par couche	Le troisième échantillon est compacté pour une énergie de compactage égale à 75 coups par couche
03 Échantillons d Schiste + sulfate			
03 Échantillons Schiste + sulfate			
03 Échantillons Schiste + sulfate			

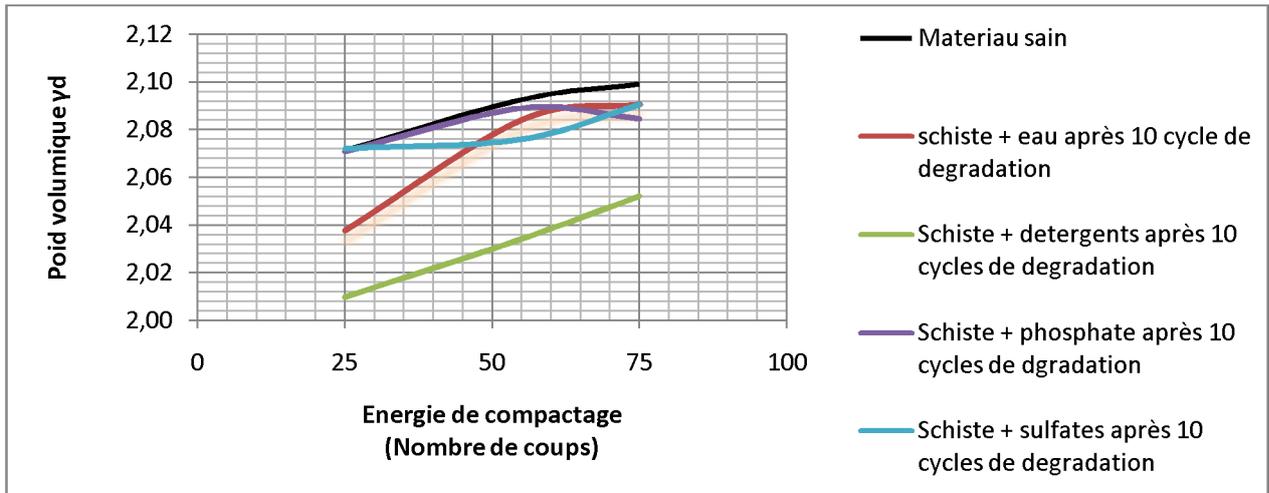


**Figure IV.13 : extraction des échantillons de l'enceinte climatique.**

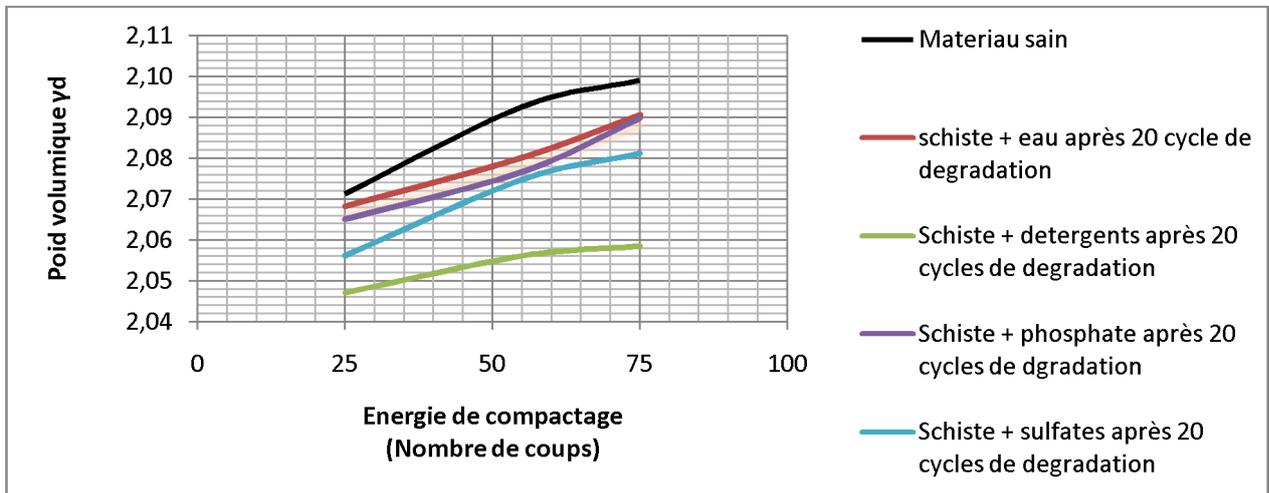


**Figure IV.14 : exemple réalisation des essais Proctor pour une série.**

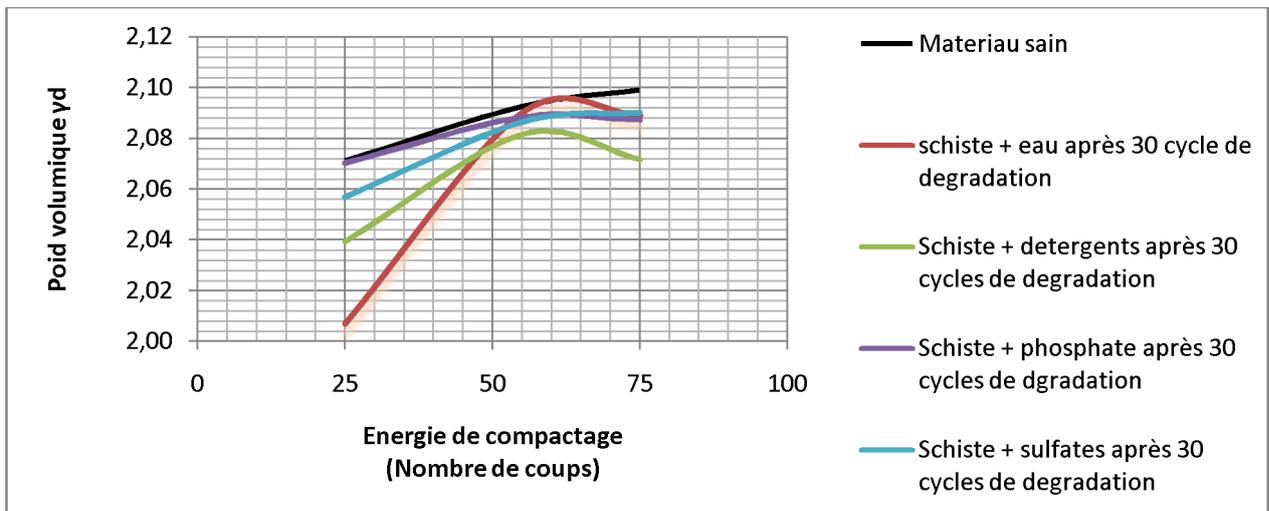
**Résultats et interprétation**



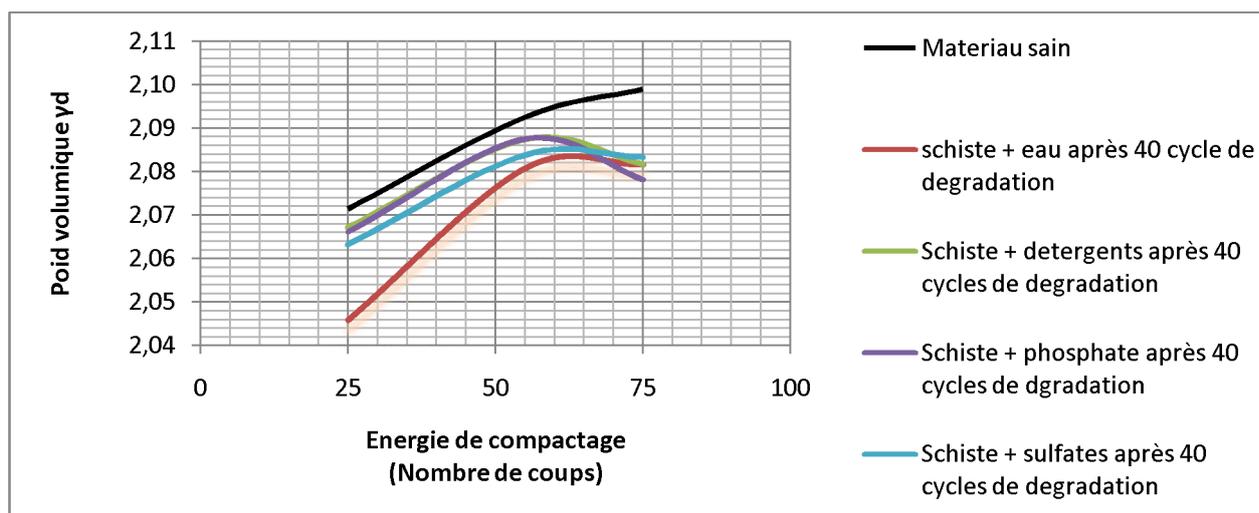
**Figure IV.15 :** Courbes de Variation du poids volumique pour la 1ère série.



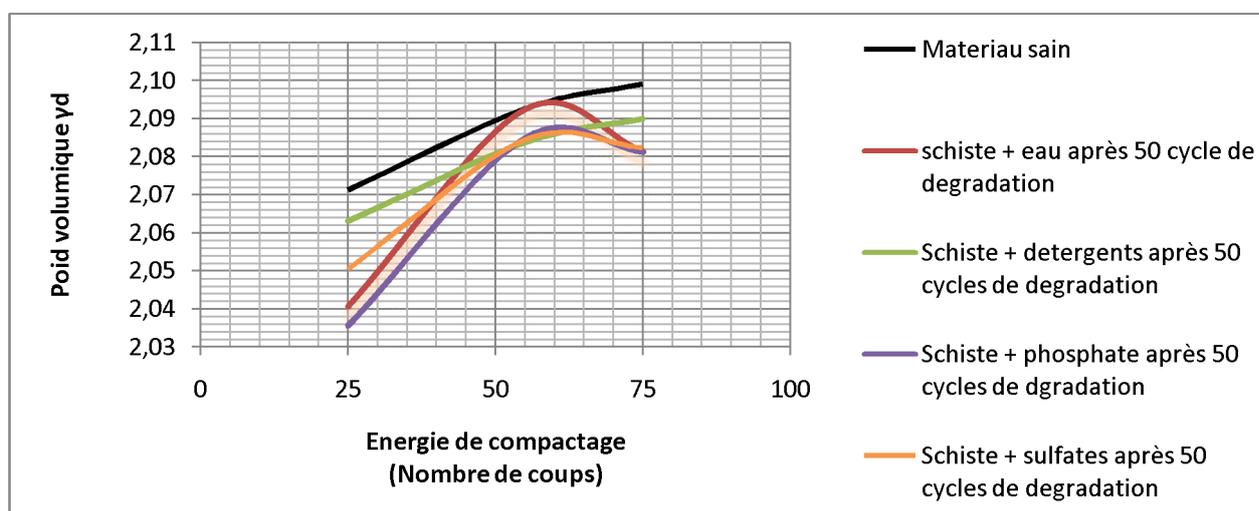
**Figure IV.16 :** Courbes de Variation du poids volumique pour la 2ème série.



**Figure IV.17 :** Courbes de Variation du poids volumique pour la 3èmesérie.



**Figure IV.18 :** Courbes de Variation du poids volumique pour la 4èmesérie.



**Figure IV.19 :** Courbes de Variation du poids volumique pour la 5èmesérie.

Dans les trois premières figures (IV.15; IV.16 ; IV.17), nous apercevons une diminution flagrante de la densité sèche des échantillons immergés respectivement dans l'eau et les détergents, par rapport à la courbe de référence du matériau sain. Cet abaissement est continu tout au long des cycles de dégradation, néanmoins au bout de la 4ème série un changement de comportement apparait où on constate une atténuation de la densité sèche des matériaux immergé dans le phosphate ou les sulfates.

Ceci dit, que l'eau et les détergents influents à court terme sur la densité sèche du matériau par ailleurs les phosphates et/ou les sulfates n'influents qu'à long terme.

### IV.7.1. Influence des cycles climatiques sur le poids volumique

#### Résultats.

Les résultats sont présentés dans l'annexe A. la densité sèche moyenne est déterminée en fonction du polluant le plus influent dans chaque série de dégradation. Les résultats sont présentés dans le Tableau IV.3.

**Tableau IV.3 : Calcul de la densité sèche moyenne en fonction des cycles climatiques et de l'énergie de compactage.**

Types de polluant	Numéro de série	Énergie de compactage	$\gamma_{dmoy} \text{ gr/ cm}^3$
<b>Eau</b>	1ère, 2ème et 3ème série	25 coups	2,03
		55 coups	2,05
		75 coups	2,06
<b>Détergents</b>		25 coups	2,04
		55 coups	2,08
		75 coups	2,08
<b>phosphates</b>	4ème et 5ème série	25 coups	2,05
		55 coups	2,08
		75 coups	2,08
<b>sulfates</b>		25 coups	2,05
		55 coups	2,08
		75 coups	2,08

#### Interprétation

D'après les comparaisons établies dans l'annexe A et le calcul de la densité sèche moyenne du matériau, nous constatons que :

- Dans les 30 premiers cycles pour une énergie de compactage égale à 25 coups, la densité moyenne est 2.03 gr/ cm<sup>3</sup> pour les détergents et de 2.04 gr/ cm<sup>3</sup> pour l'eau. Ces résultats sont inférieurs à la densité sèche du matériau sain qui est de 2.06 gr/ cm<sup>3</sup>.
- De même, on obtient des résultats inférieurs pour une énergie de compactage égale à 55 ou 75 coups. La densité sèche moyenne pour l'eau est 2.08 gr/ cm<sup>3</sup>, qui est < 2.09 et < 2.1 gr/ cm<sup>3</sup>. Et pour les détergents la valeur de la densité sèche moyenne égale à 2.06 gr/cm<sup>3</sup> respectivement inférieure à 2.09 et 2.1 gr/cm<sup>3</sup>.
- Au 40ème et 50ème cycle, la densité sèche moyenne de chaque énergie de compactage est plus faible dans les échantillons placés dans les phosphates et les sulfates, elle reste inférieure aux densités calculées avant les essais climatiques. Les résultats de la densité sèche moyenne pour une énergie de compactage égale à 25,55 et 75 coups sont respectivement 2.05 ; 2.08 gr/cm<sup>3</sup>.

Les produits chimiques ajoutés jouent un rôle très important sur le comportement mécanique des grains du schiste, notamment les détergents qui influent fortement sur la

densité sèche du matériau, celle-ci se dégrade très rapidement et continuellement sous les actions cycliques du gel –dégel.

## **IV.8. Analyses granulométriques après les essais climatiques**

### **Déroulement des essais**

Les essais sont réalisées selon la norme [NF P 94-056], les éprouvettes obtenues dans l'essai Proctor après les cycles climatiques sont séchées à l'étuve à 50°C, puis elles sont concassées et soumises à une analyse granulométrique.

### **Résultats et interprétation**

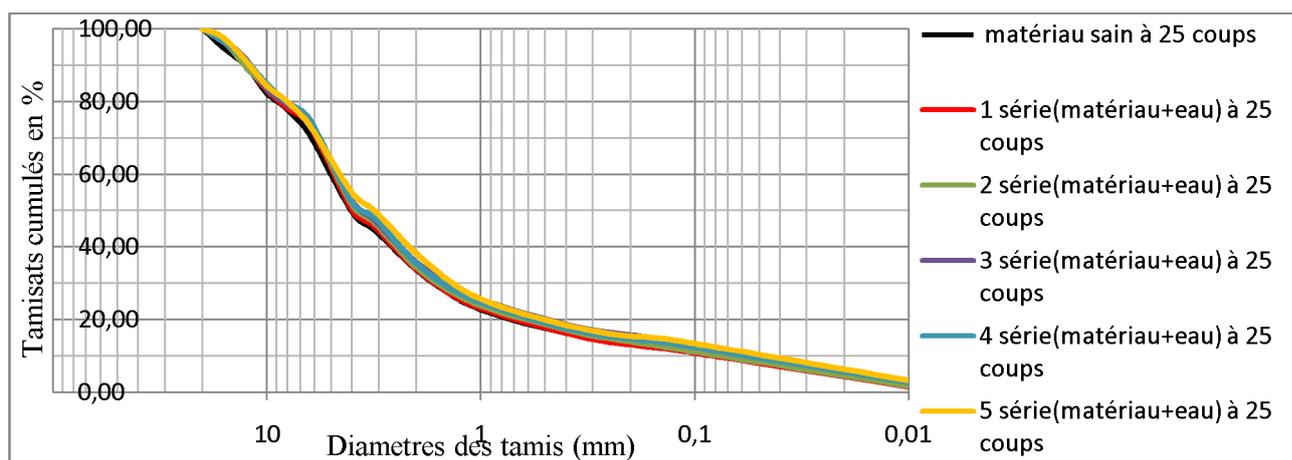
Dans l'Annexe B, on présente les résultats des analyses granulométriques effectuées après les essais climatiques.

Après comparaison des courbes granulométriques de chaque échantillon soumis aux cycles climatiques avec celles obtenues sans les cycles climatiques, on aperçoit un balayage progressif des courbes obtenues après les cycles gel dégel par rapport à la courbe initiale, cette évolution est due aux réactions chimiques et aux sollicitations cycliques que les matériaux ont subies.

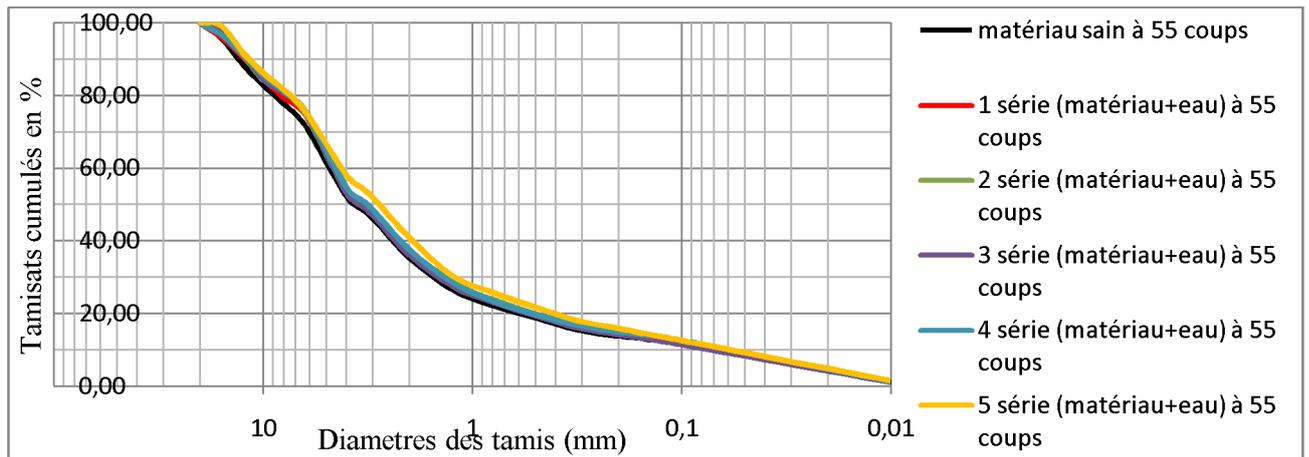
#### **IV.8.1. Évaluation de la dégradation du schiste aux cycles climatiques**

En faisant référence aux résultats obtenus dans les essais granulométriques de chaque échantillon (Annexe B), nous pouvons évaluer la dégradation des matériaux aux cycles climatiques (gel dégel) et aux produits chimiques utilisés.

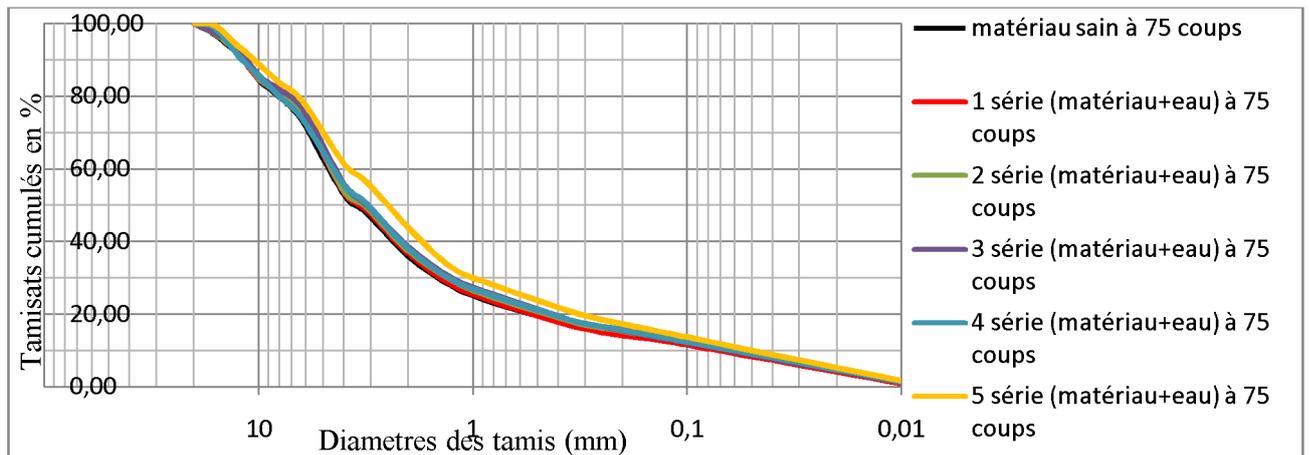
### **Résultats**



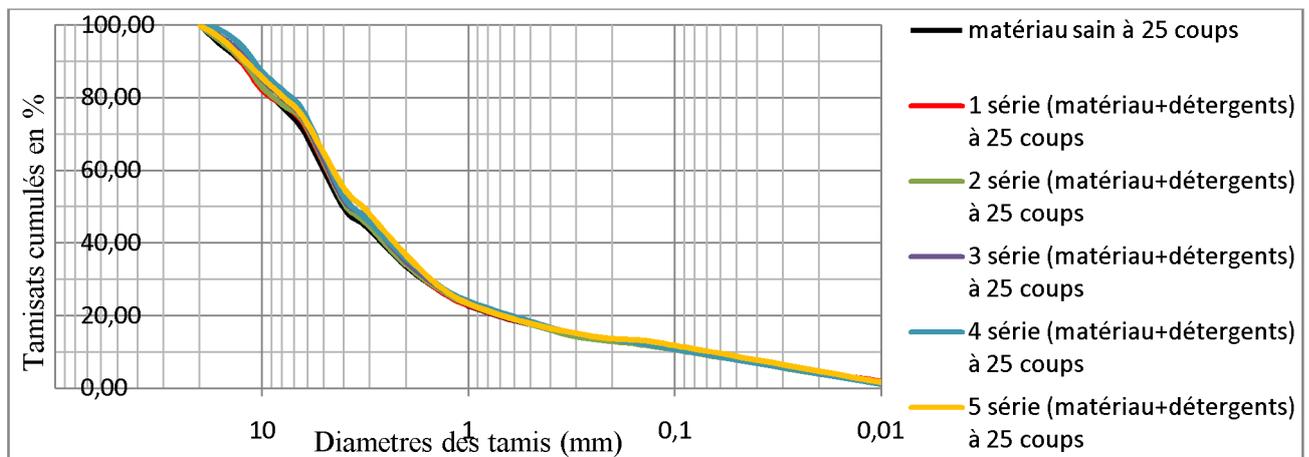
**Figure IV.20 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 25 coups du matériau (schiste + eau).**



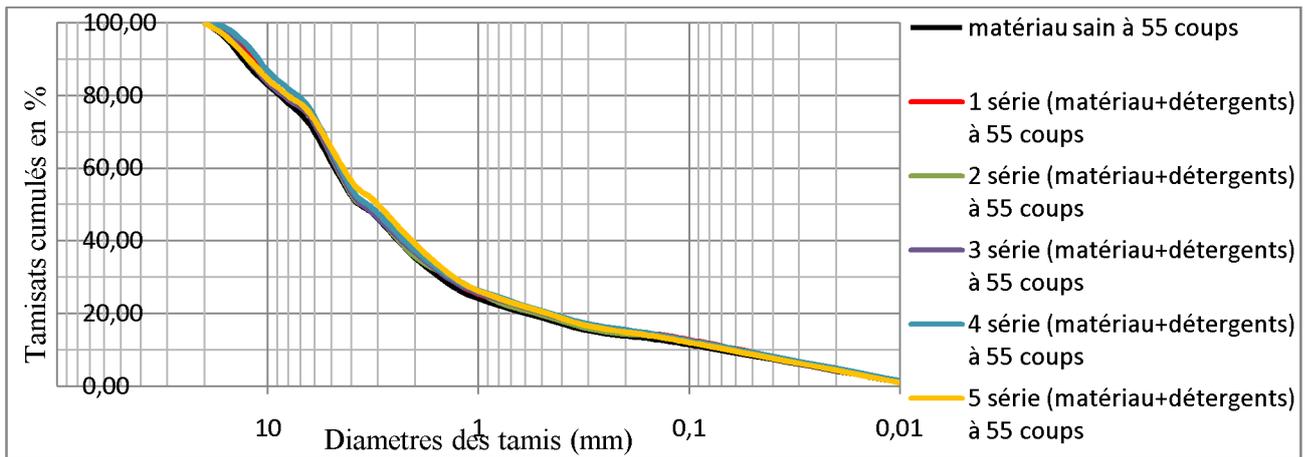
**Figure IV.21 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 55 coups du matériau (schiste + eau).**



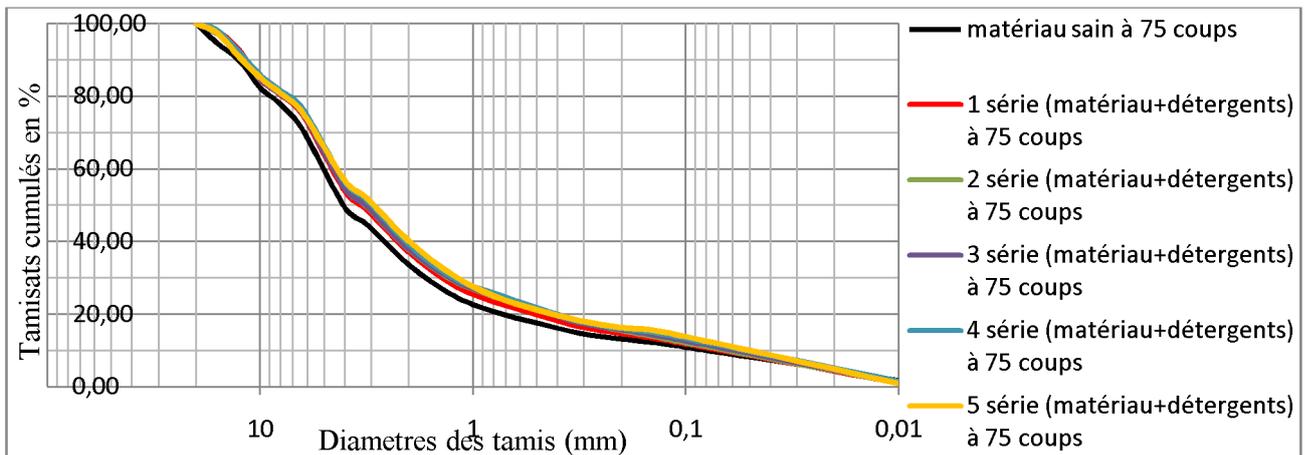
**Figure IV.22 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 75 coups du matériau (schiste + eau).**



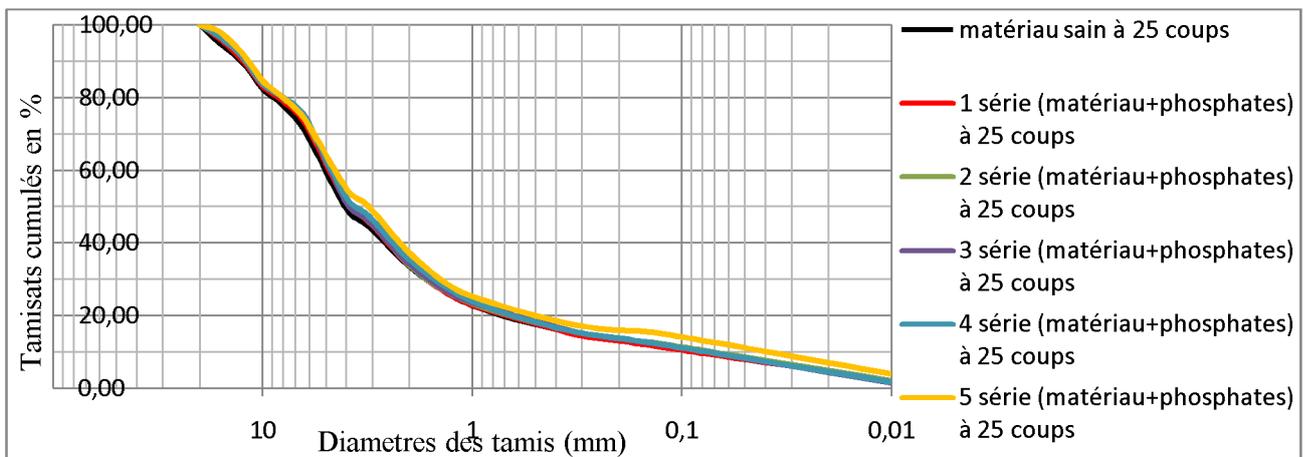
**Figure IV.23 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 25 coups du matériau (schiste + détergents).**



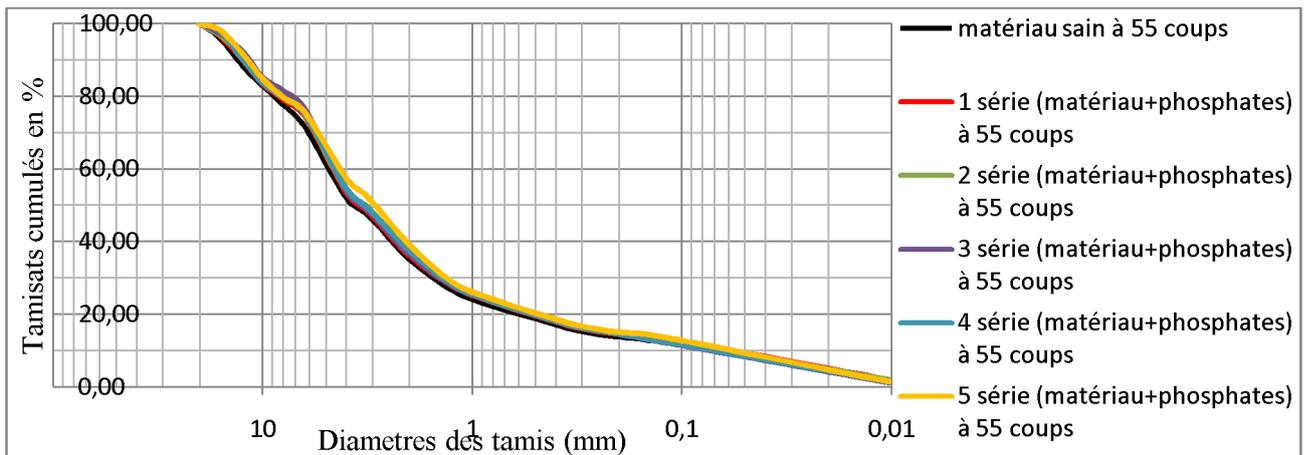
**Figure IV.24 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 55 coups du matériau (schiste + détergents).**



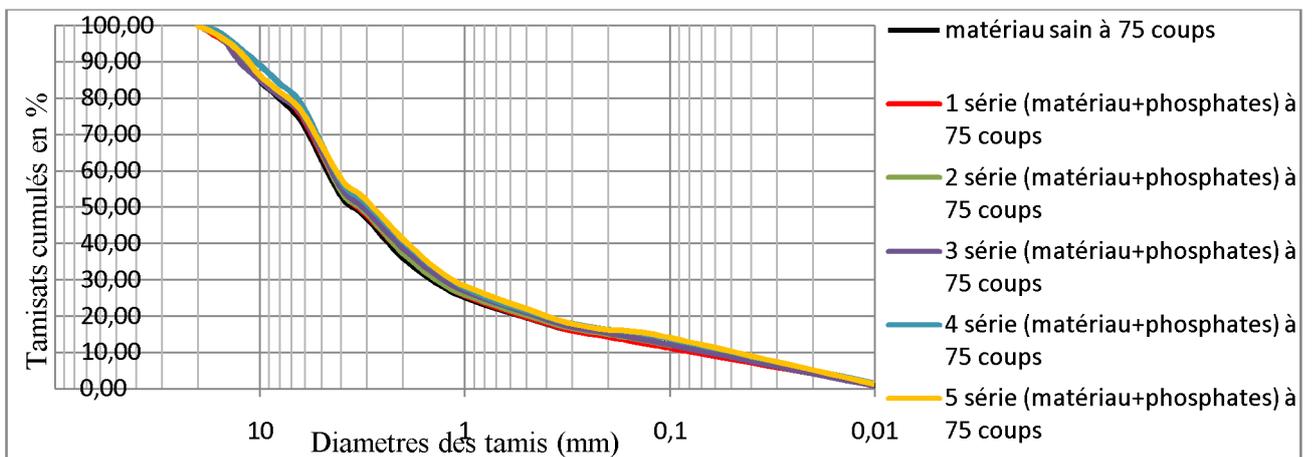
**Figure IV.25 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 75 coups du matériau (schiste + détergents).**



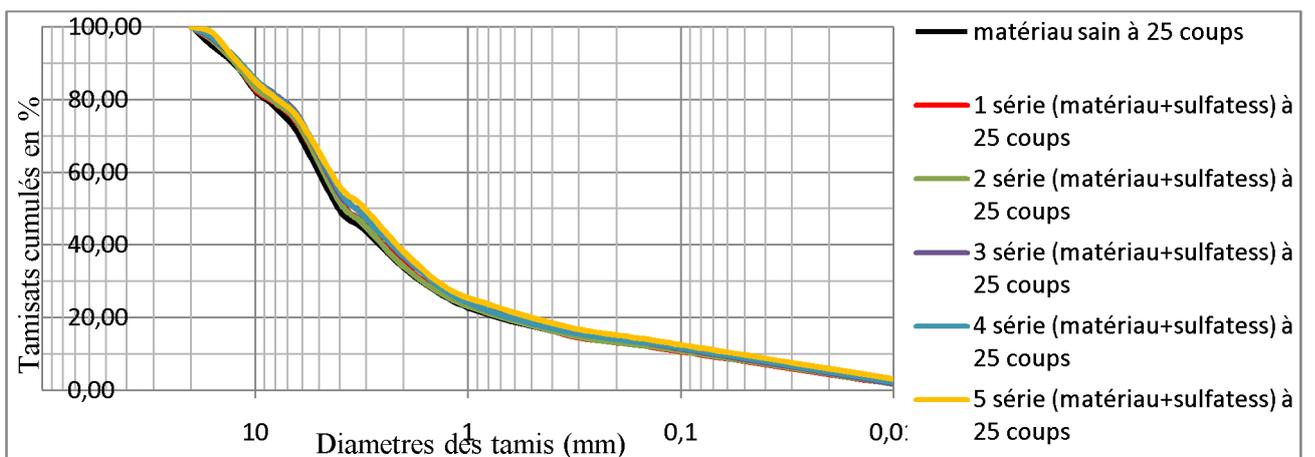
**Figure IV.26 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 25 coups du matériau (schiste + phosphates).**



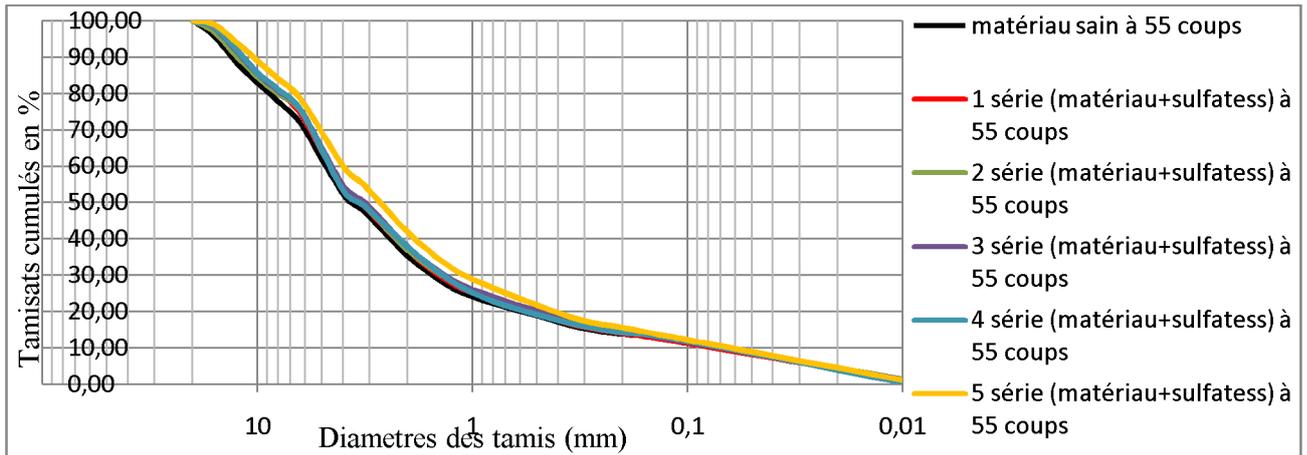
**Figure IV.27 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 55 coups du matériau (schiste + phosphates).**



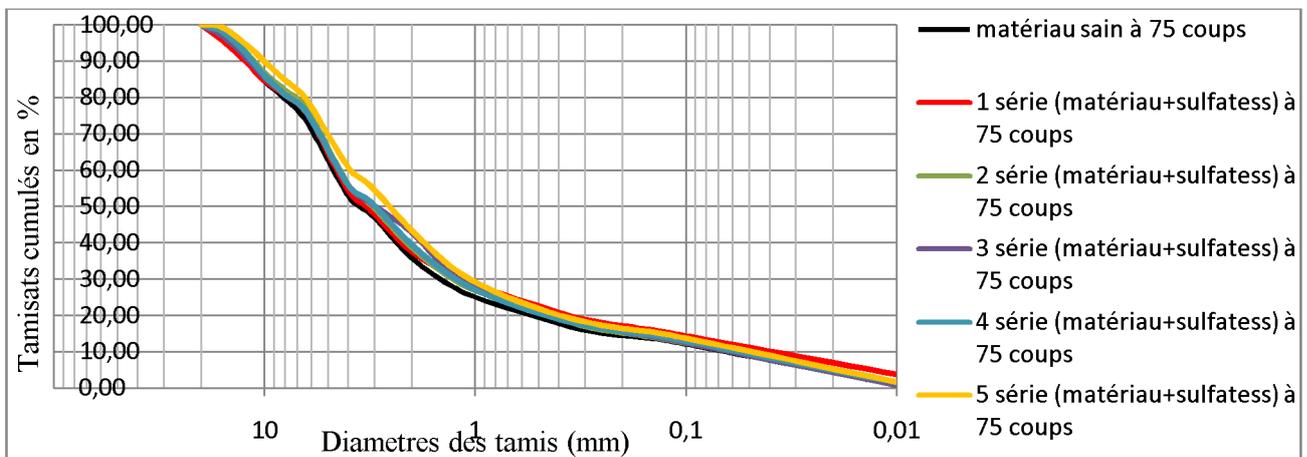
**Figure IV.28 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 75 coups du matériau (schiste + phosphates).**



**Figure IV.29 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 25 coups du matériau (schiste + sulfates).**



**Figure IV.30 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 55 coups du matériau (schiste + sulfates).**



**Figure IV.31 : Comparaison des courbes granulométriques pour tous les cycles après les essais de compactage à 75 coups du matériau (schiste + sulfates).**

### **Interprétation**

Pour une énergie de compactage fixée, l'étalement granulométrique n'est très important en fonction du nombre de série de cycles climatiques. Toutefois, le fuseau est plus ouvert pour une énergie de 75 coups que pour une énergie de 25 coups.

Ce fuseau est plus ouvert pour les échantillons de (schiste +sulfates) que pour les échantillons (schiste + phosphates) ou (schiste + détergents) ou (schiste+ eau).

### IV.8. 2 Évaluation de la dégradation du schiste en fonction des polluants en fixant l'énergie de compactage

Pour évaluer la dégradation chimique du schiste, l'énergie de compactage est fixée pour pouvoir effectuer une comparaison des courbes granulométriques des échantillons pollués pour chaque cycle de dégradation.

#### Résultats

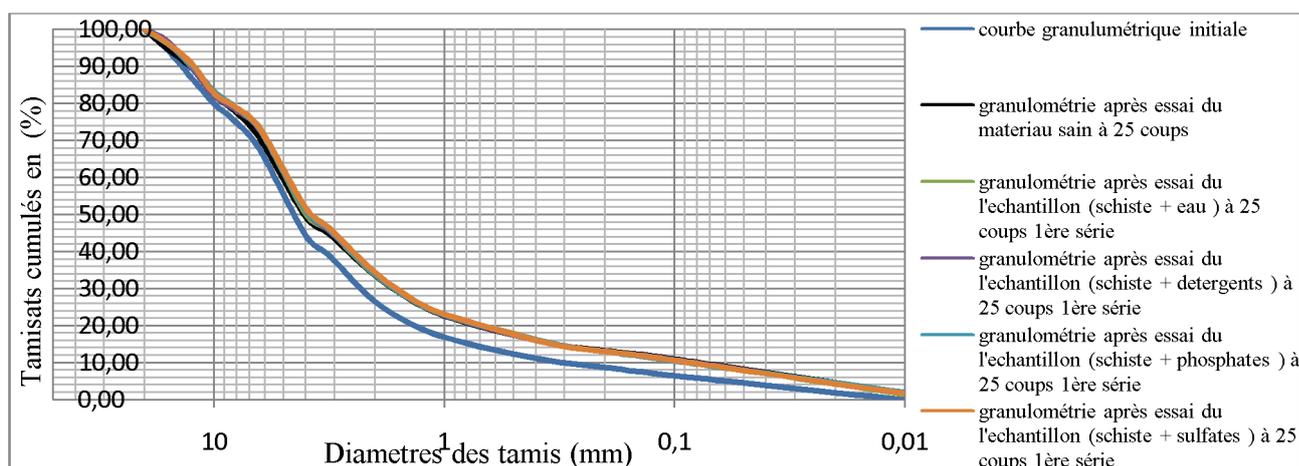


Figure IV.32 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 1<sup>ère</sup> série.

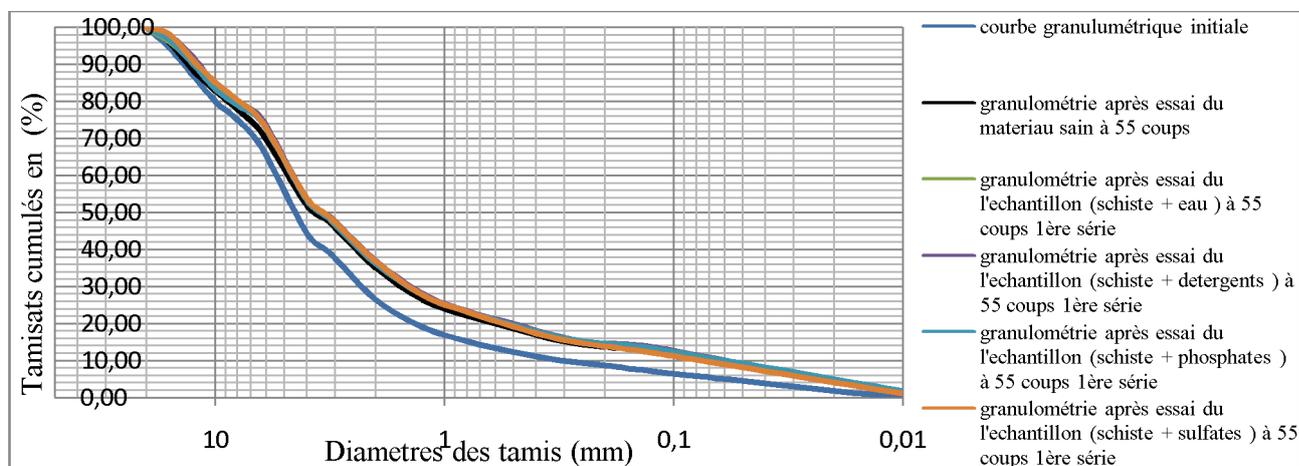
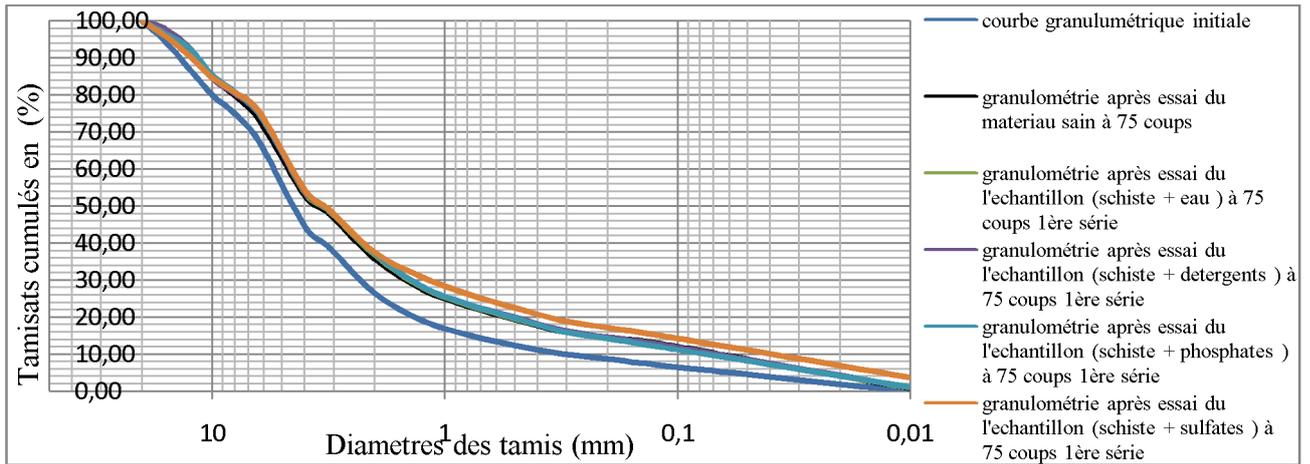
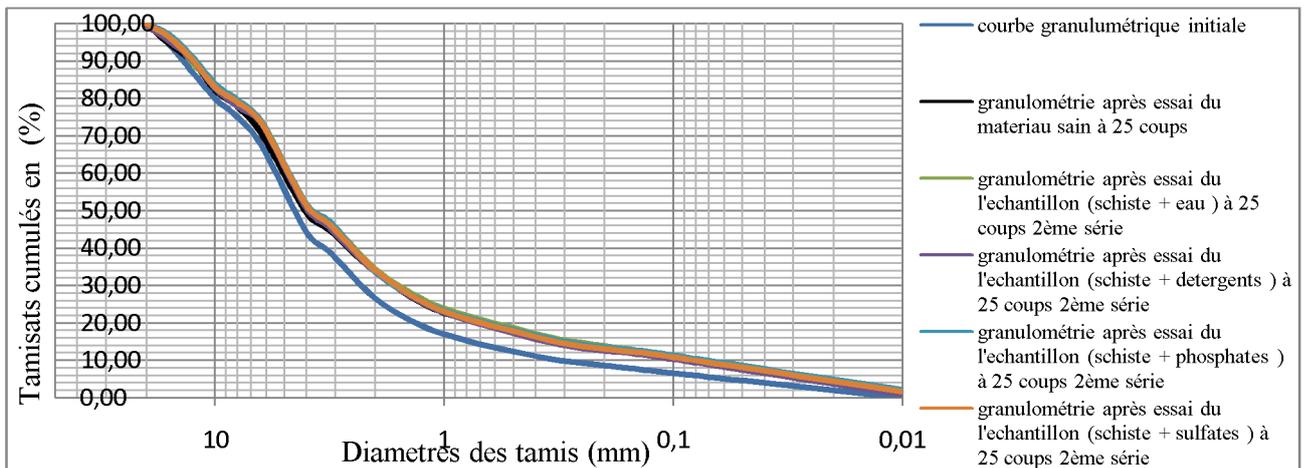


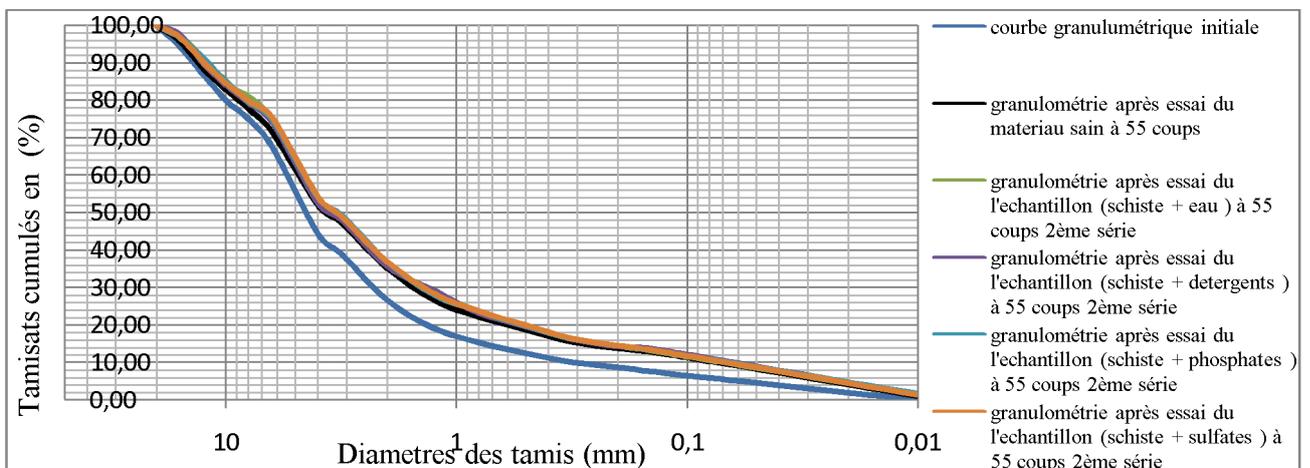
Figure IV.33 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 1<sup>ère</sup> série.



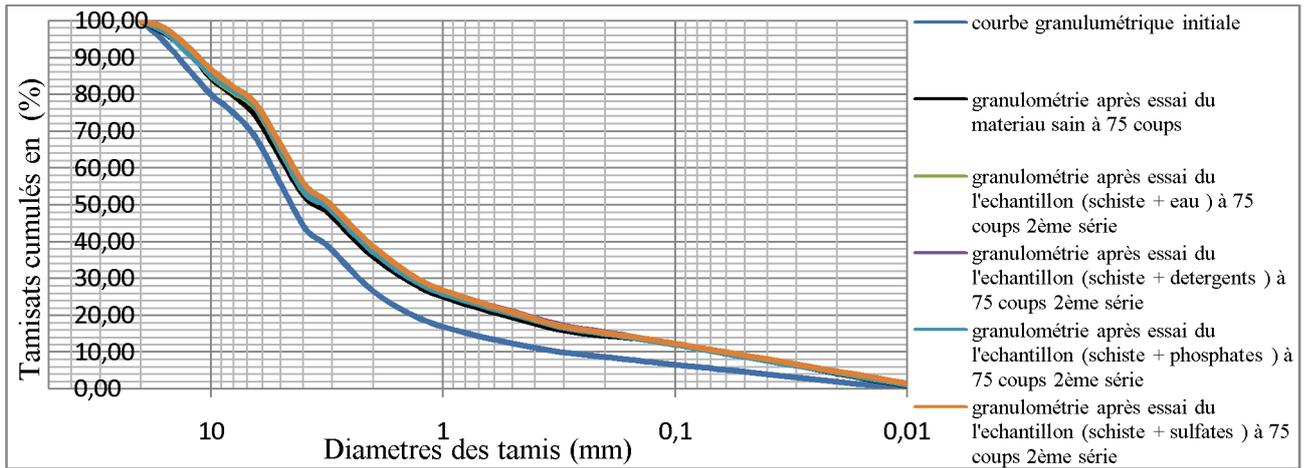
**Figure IV.34 : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 1<sup>ère</sup> série.**



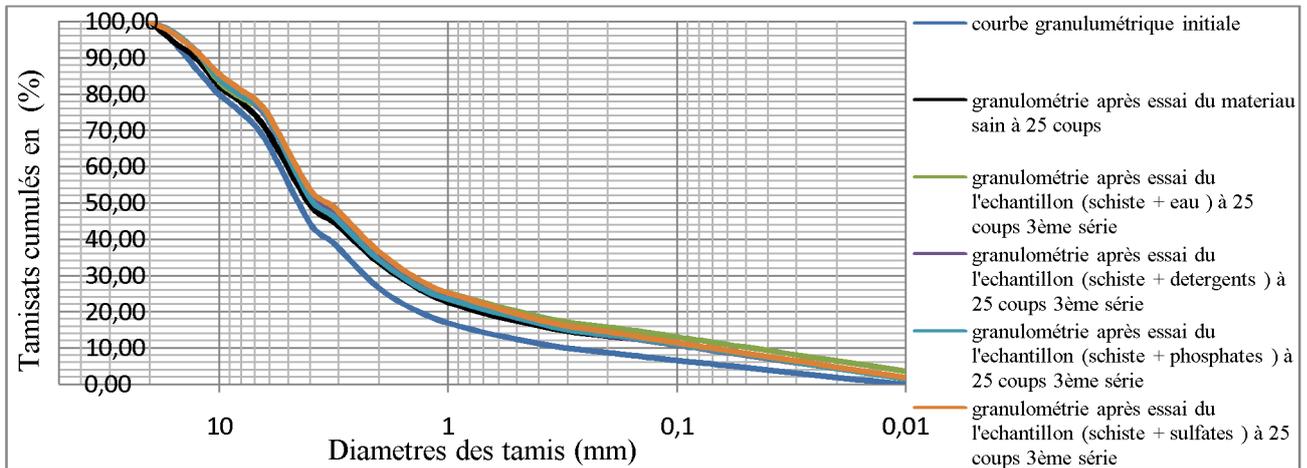
**Figure IV.35 : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 2<sup>ème</sup> Série.**



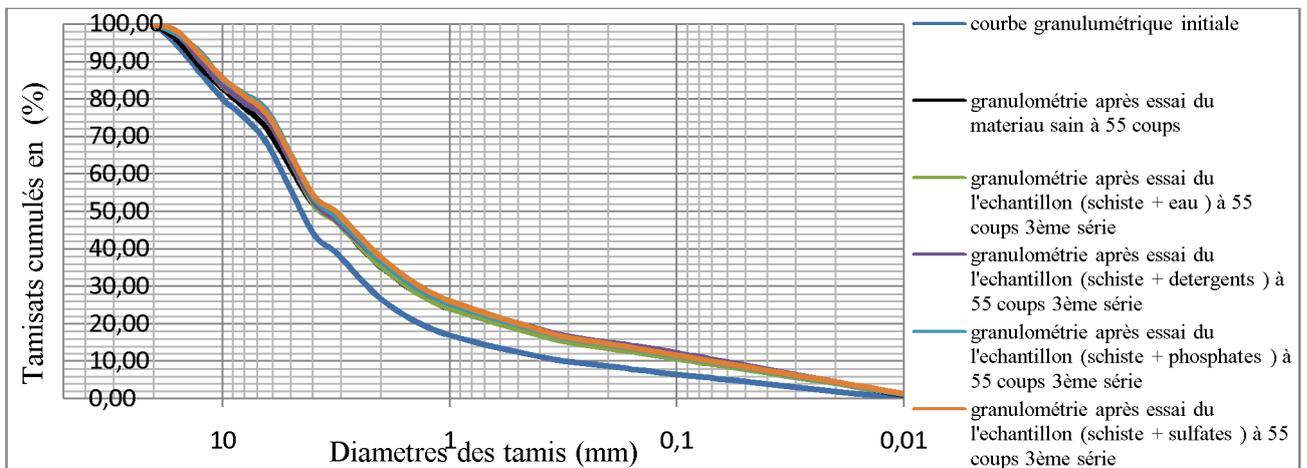
**Figure IV.36 : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 2<sup>ème</sup> Série.**



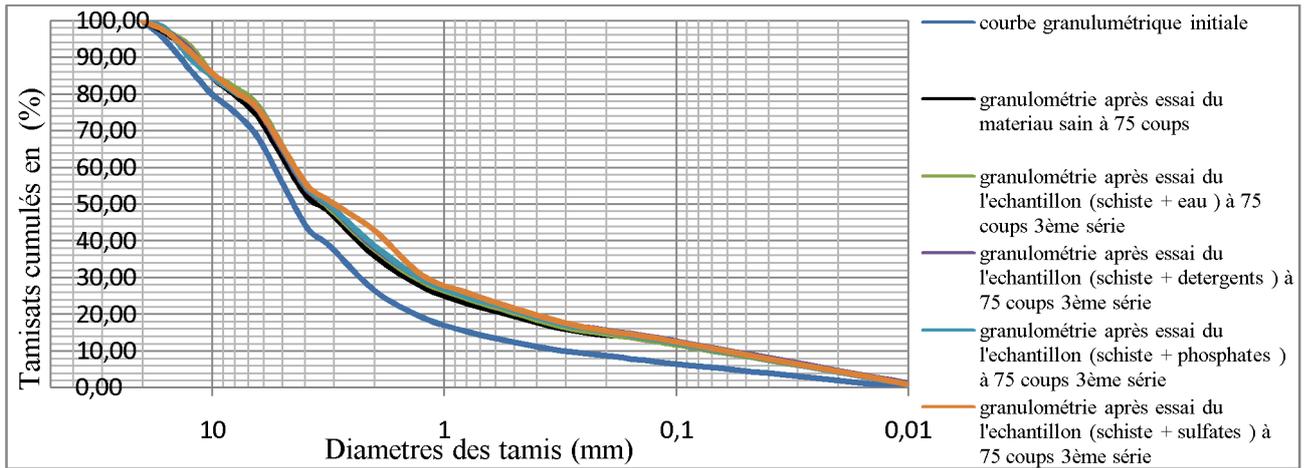
**Figure IV.37 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 2<sup>ème</sup> Série.**



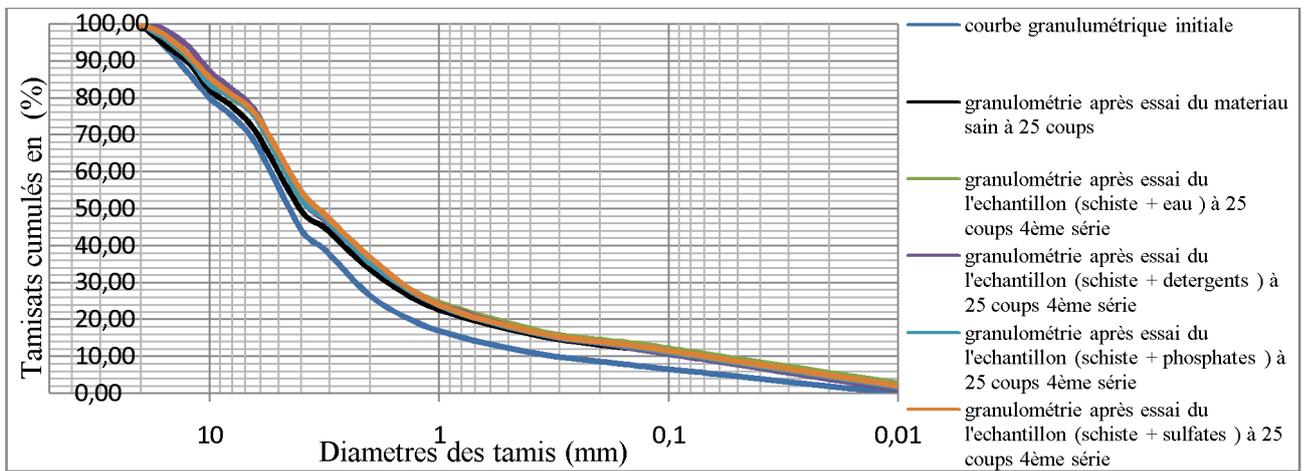
**Figure IV.38 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 3<sup>ème</sup> Série.**



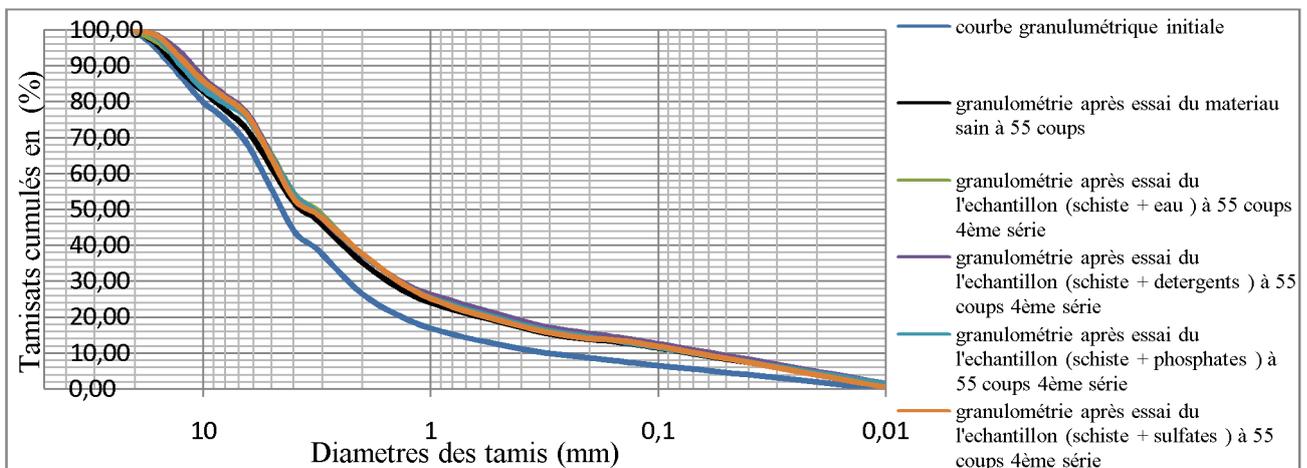
**Figure IV.39 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 3<sup>ème</sup> Série.**



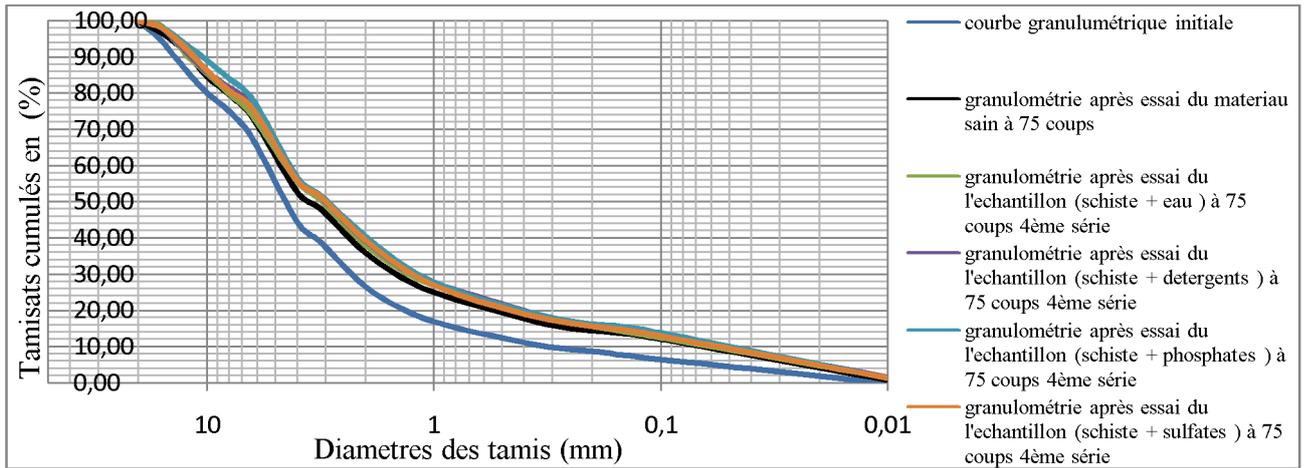
**Figure IV.40 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 3<sup>ème</sup> Série.**



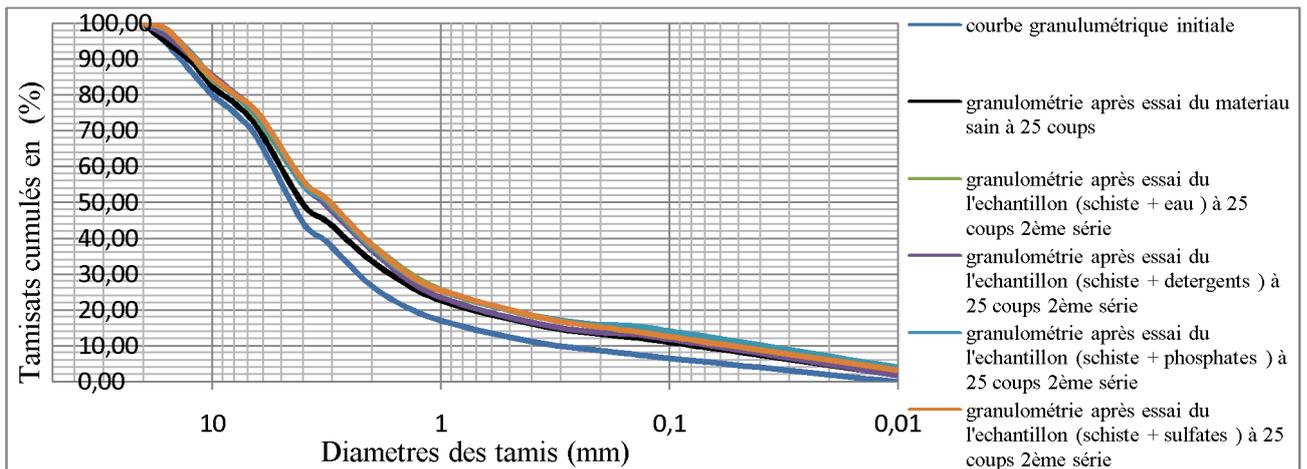
**Figure IV.41 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 4<sup>ème</sup> Série.**



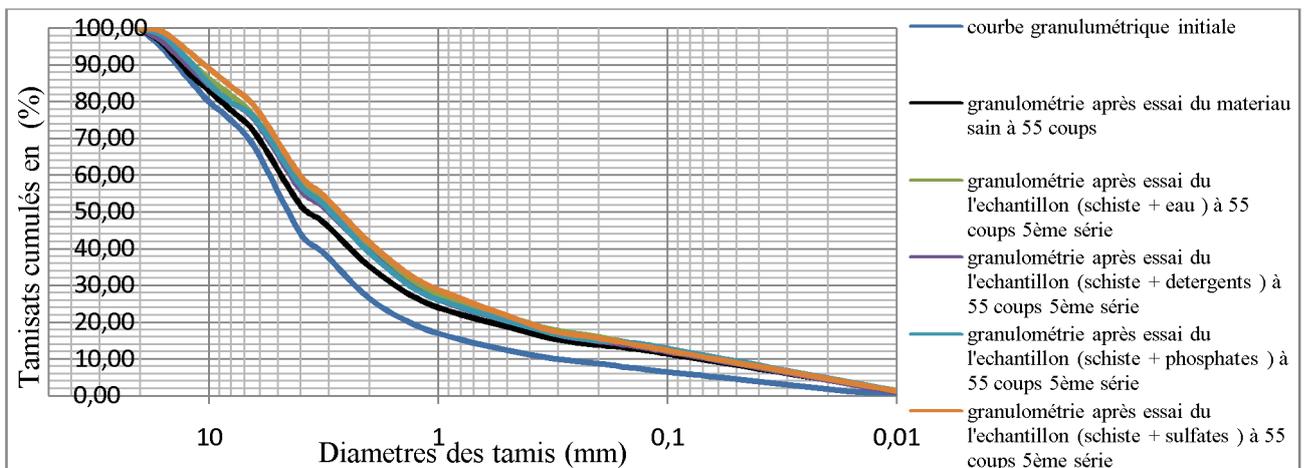
**Figure IV.42 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 4<sup>ème</sup> Série.**



**Figure IV.43 : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 4<sup>ème</sup> Série.**



**Figure IV.44 : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 25 coups 5<sup>ème</sup> Série.**



**Figure IV.45 : Comparaison des courbes granulométrique en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 55 coups 5<sup>ème</sup> Série.**

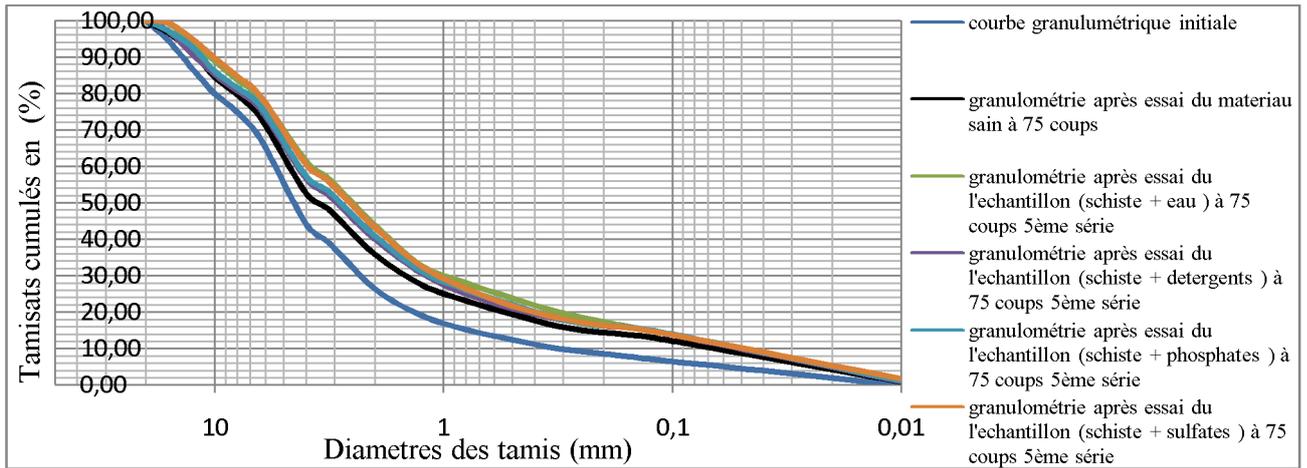


Figure IV.46 : Comparaison des courbes granulométriques en fonction des polluants pour une Énergie de compactage = 75 coups 5<sup>ème</sup> Série.

### Interprétation

L'étalement des courbes granulométriques augmente avec le nombre de série des cycles climatiques (de la première à la cinquième série) et en fonction de l'augmentation de l'énergie de compactage (le nombre de coups : 25, 55 et 75).

Globalement, l'effet des détergents, les phosphates et les sulfates ajoutés au schiste a provoqué des étalements des courbes granulométriques importants qui sont circonscrits dans un fuseau très restreint (les courbes granulométriques obtenues sont presque confondues).

Pour une énergie de compactage fixée, l'échantillon (schiste + sulfates) a présenté une courbe granulométrique la plus étalée par rapport aux phosphates, aux détergents et à l'eau.

### IV.8. 3 Influence de l'énergie de compactage sur le matériau schiste imbibé de produits chimiques et soumis aux cycles climatiques.

Les résultats de cette analyse comparative sont présentés dans les figures suivantes :

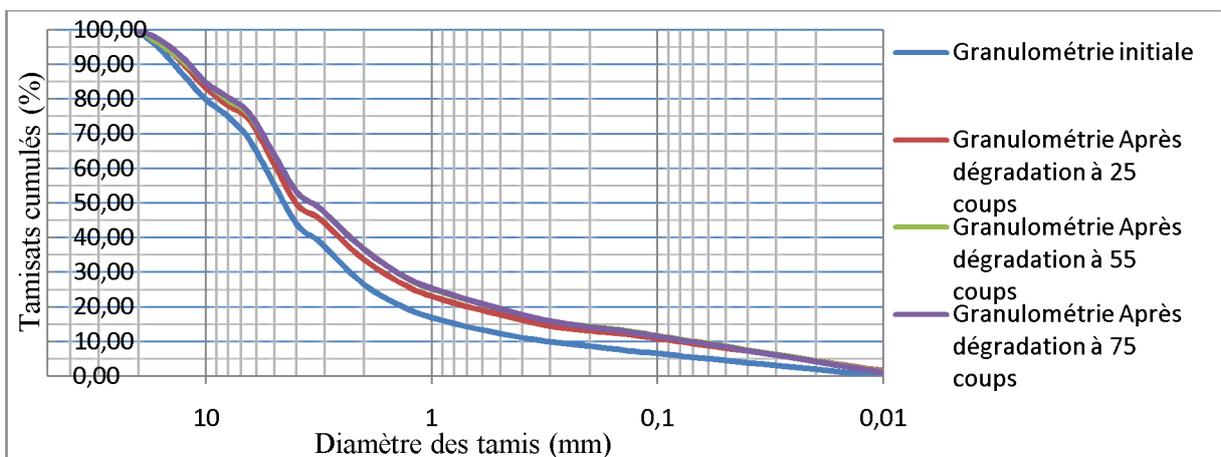
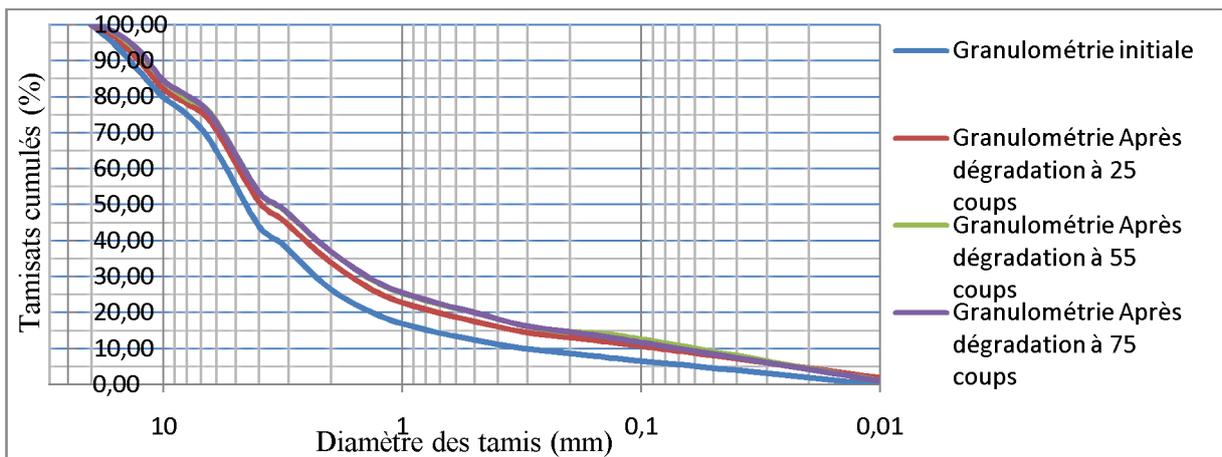
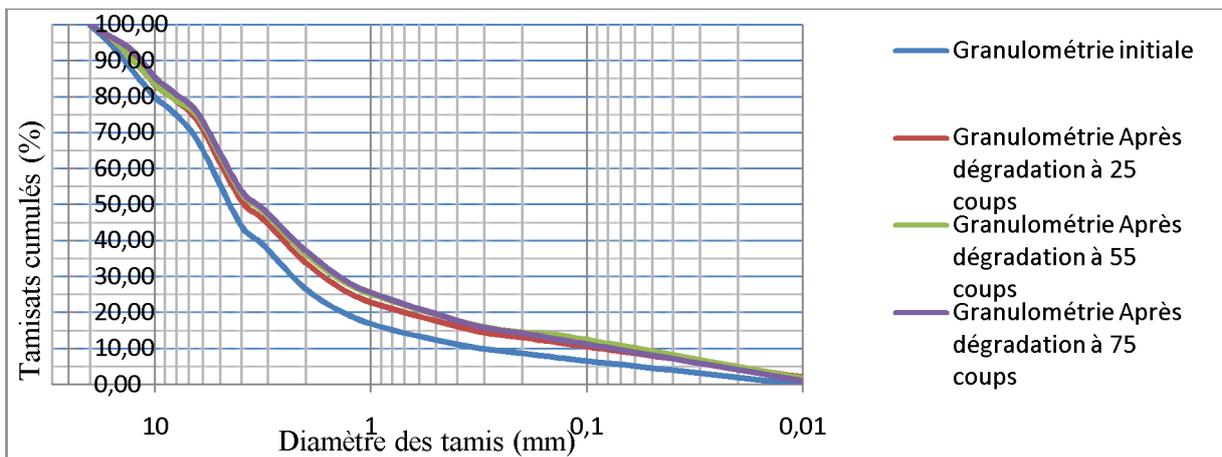


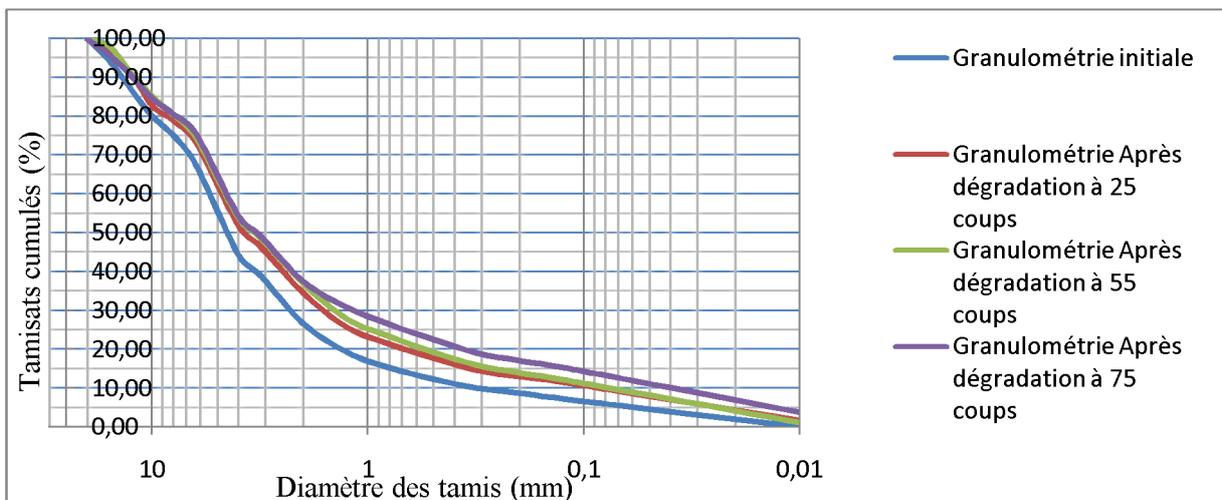
Figure IV.47 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 10 cycles de dégradation.



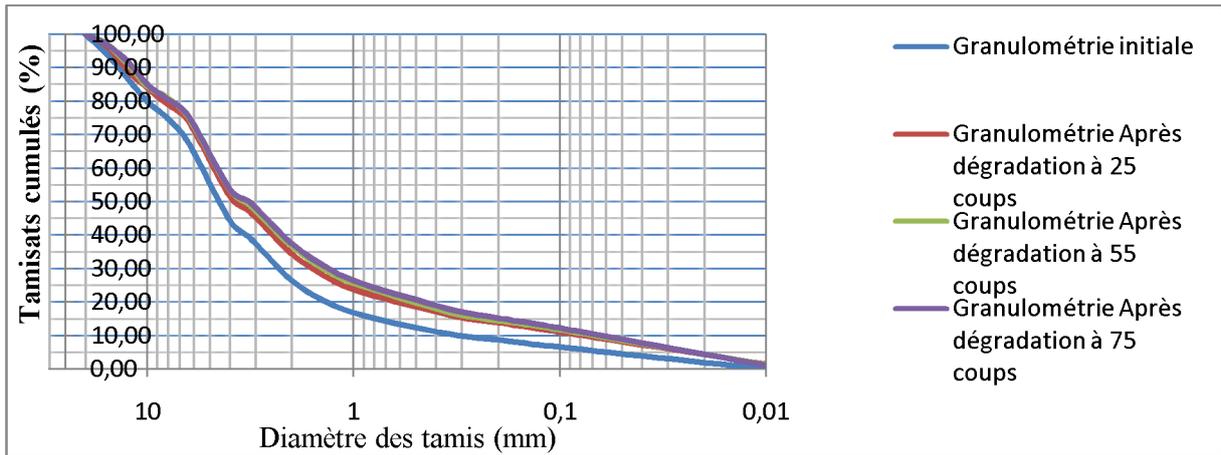
**Figure IV.48 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 10 cycles de dégradation.**



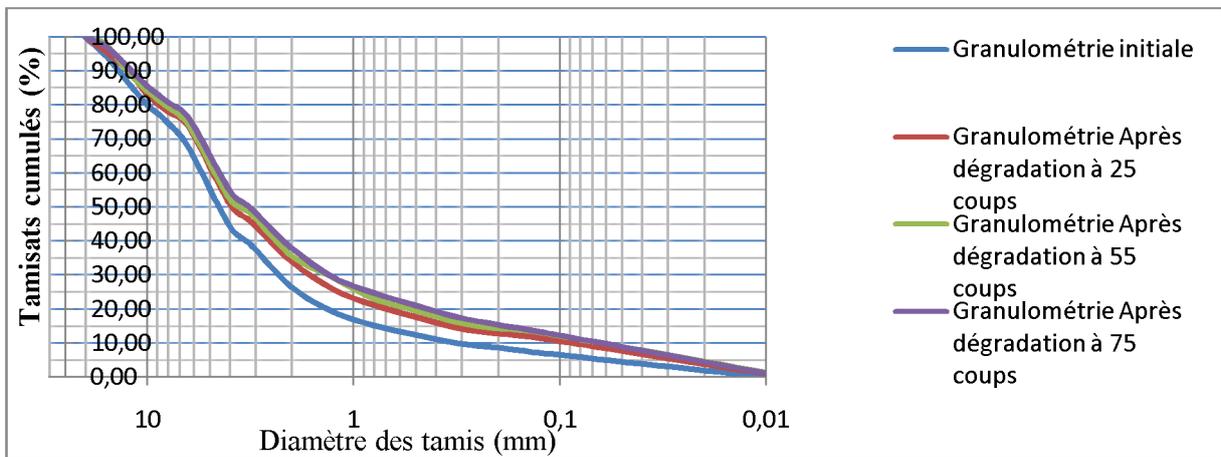
**Figure IV.49 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 10 cycles de dégradation.**



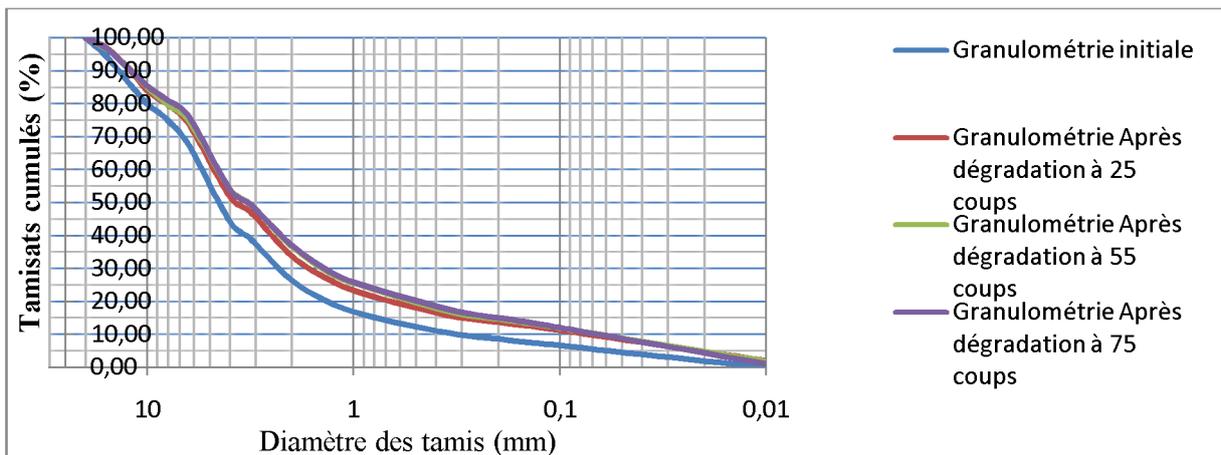
**Figure IV.50 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 10 cycles de dégradation.**



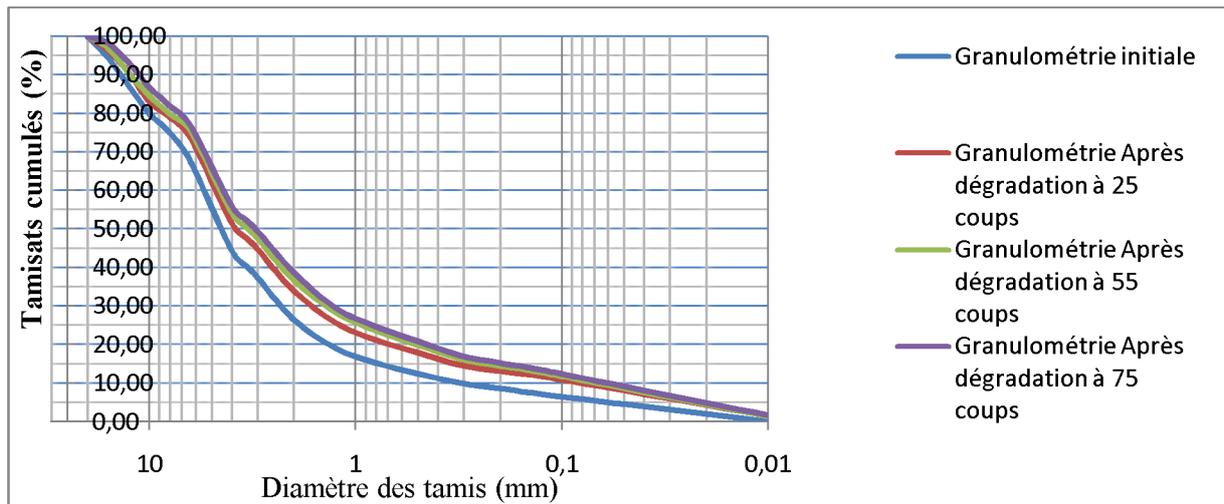
**Figure IV.51 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 20 cycles de dégradation.**



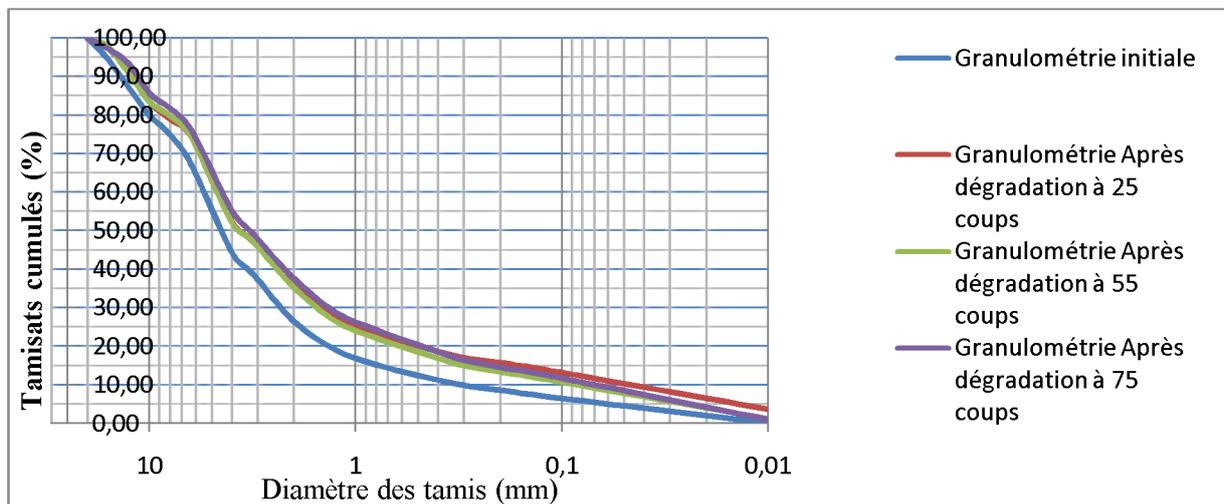
**Figure IV.52 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 20 cycles de dégradation.**



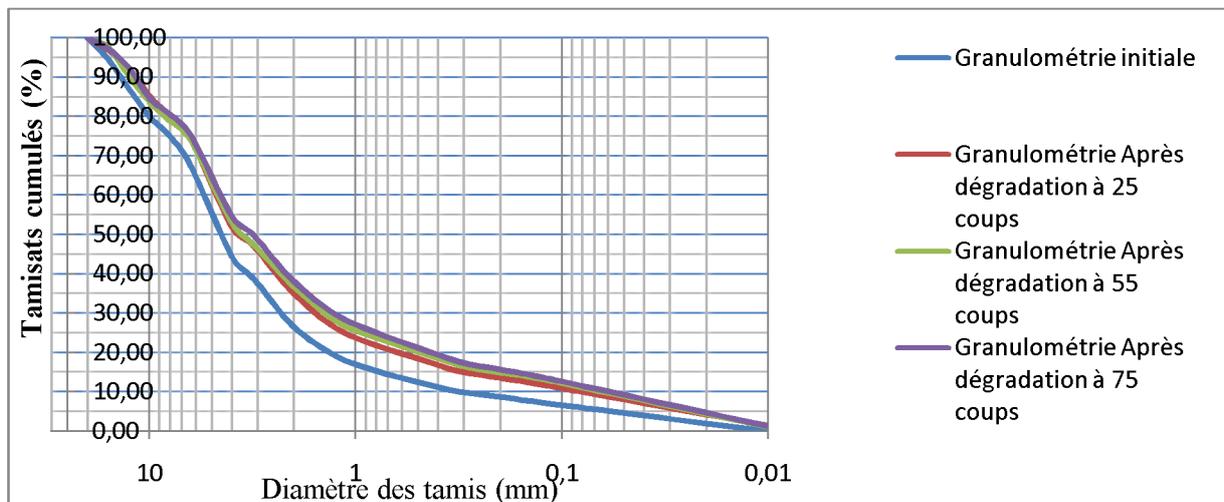
**Figure IV.53 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 20 cycles de dégradation.**



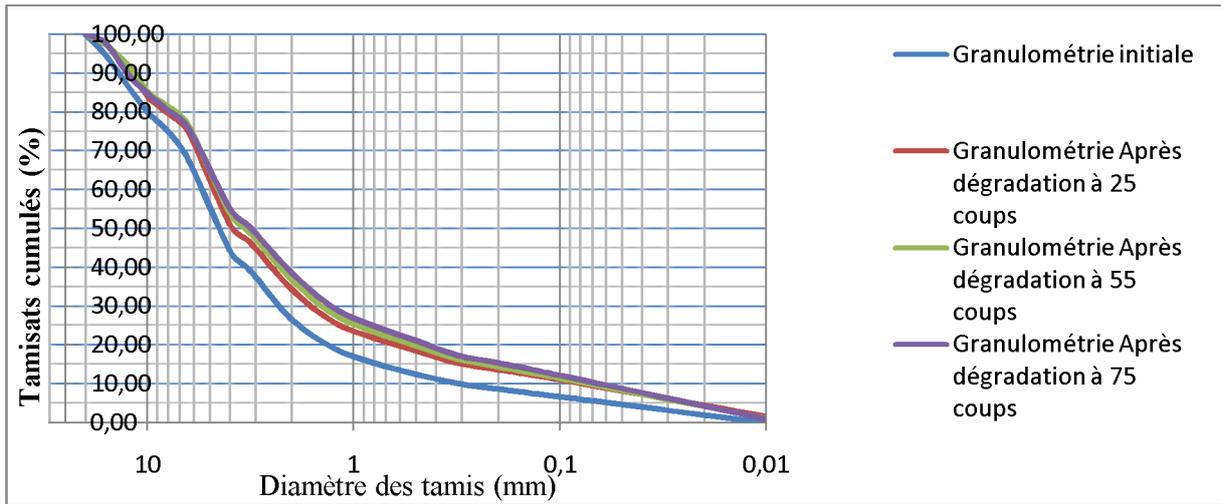
**Figure IV.54 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 20 cycles de dégradation.**



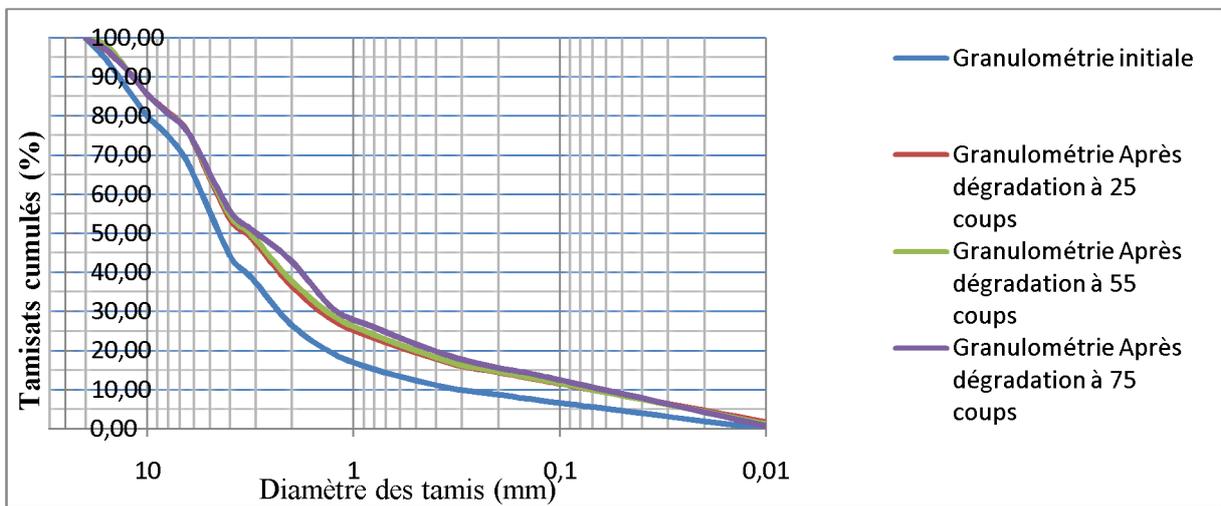
**Figure IV.55 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 30 cycles de dégradation.**



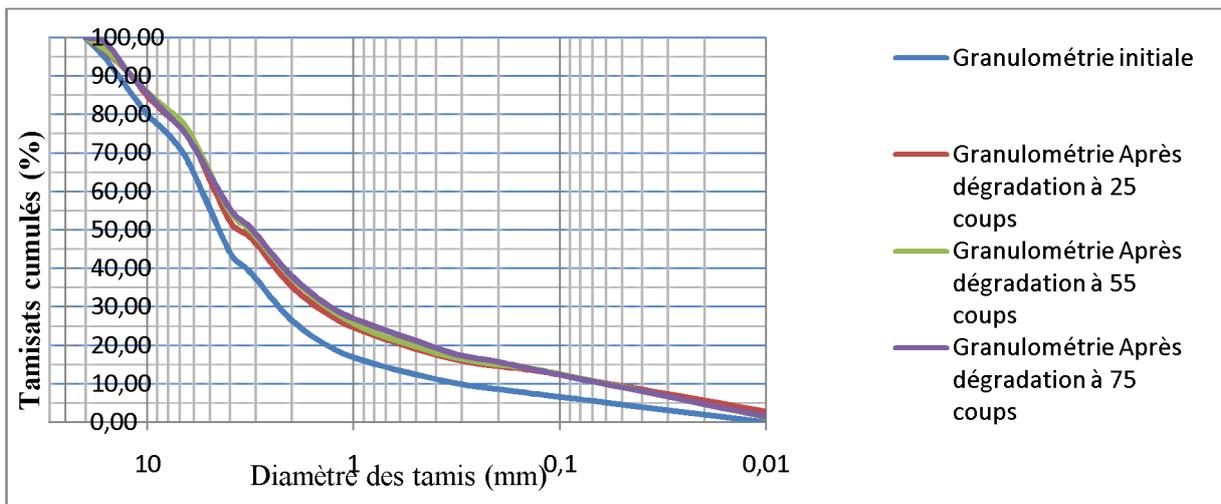
**Figure IV.56: Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 30 cycles de dégradation.**



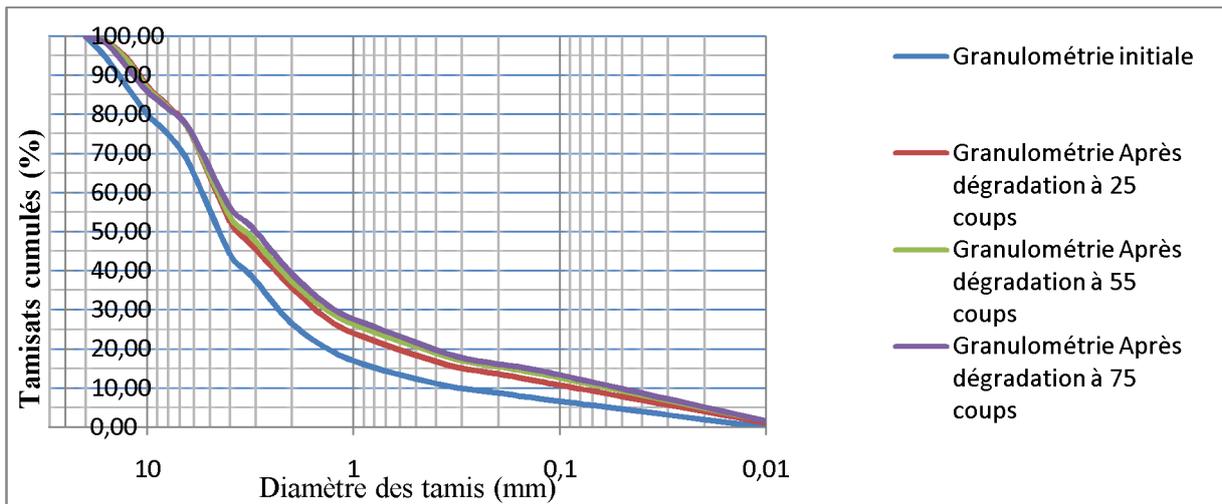
**Figure IV.57 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 30 cycles de dégradation.**



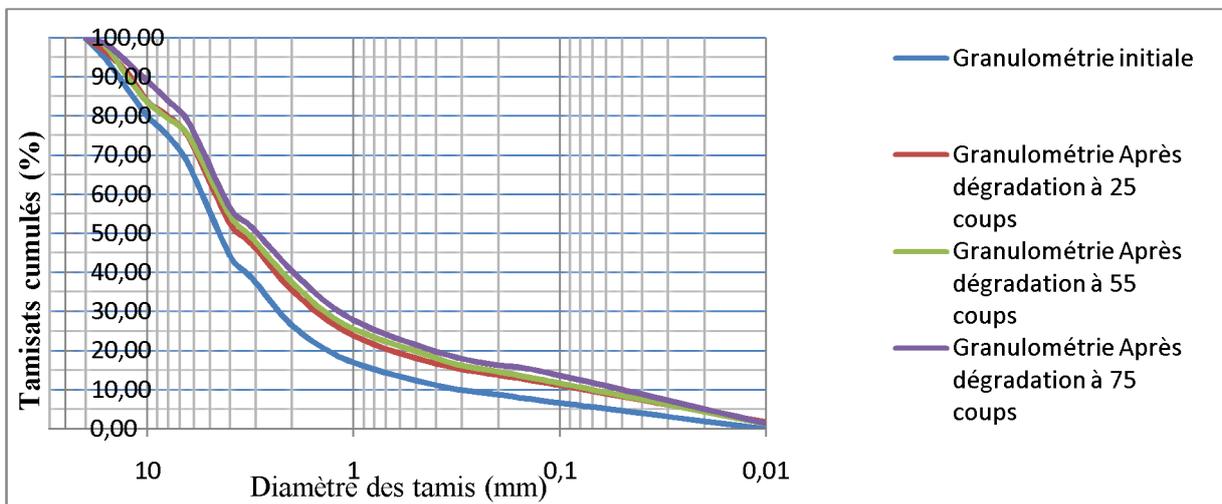
**Figure IV.58 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 30 cycles de dégradation.**



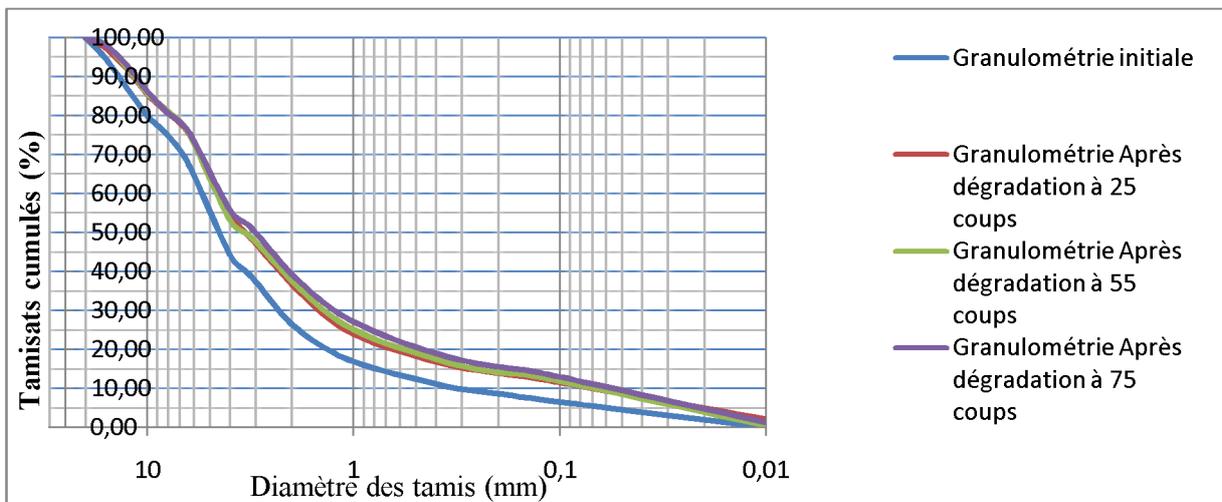
**Figure IV.59 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 40 cycles de dégradation.**



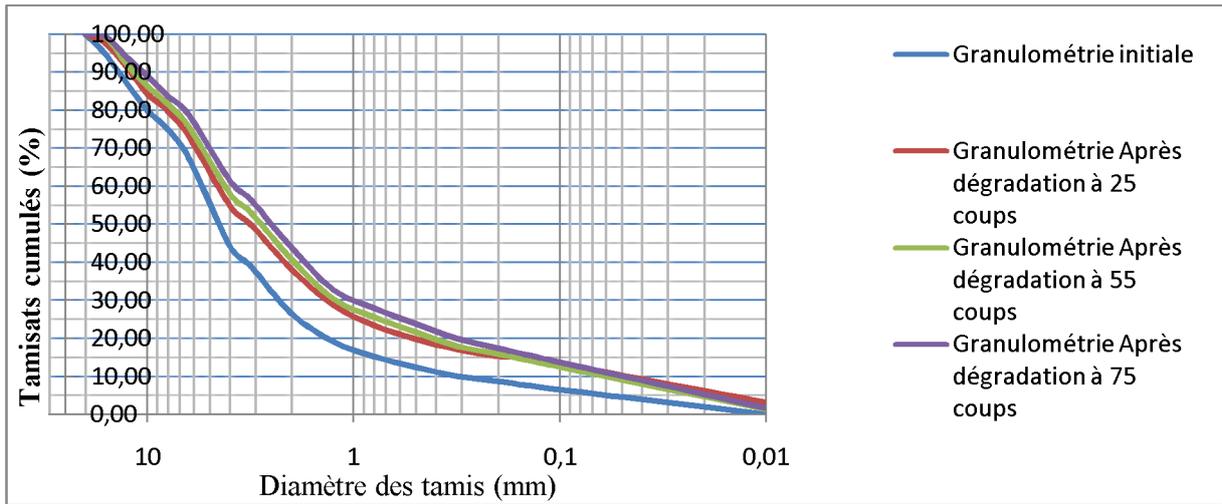
**Figure IV.60 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 40 cycles de dégradation.**



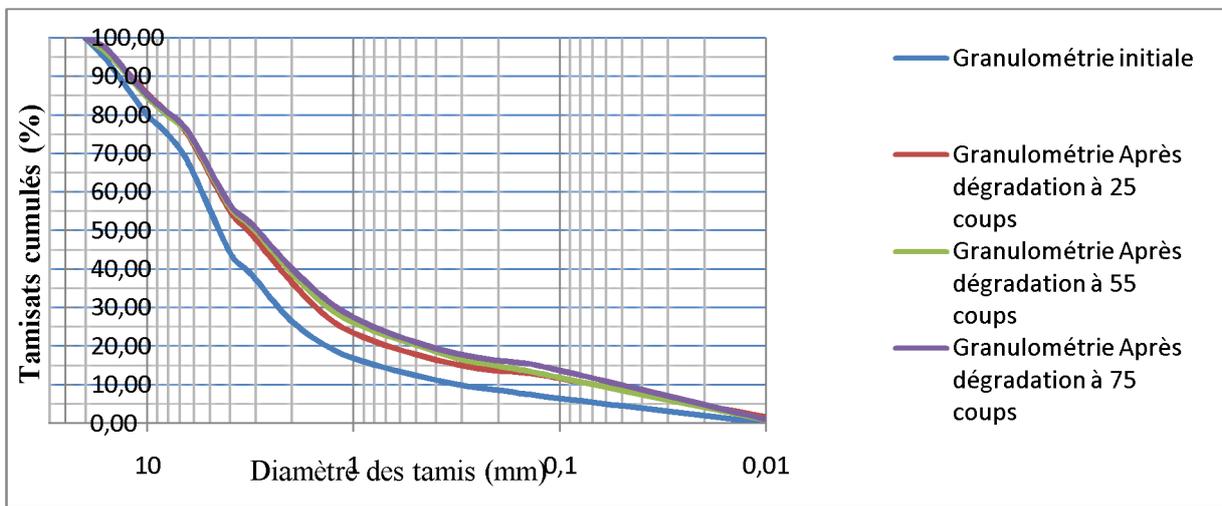
**Figure IV.61 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 40 cycles de dégradation.**



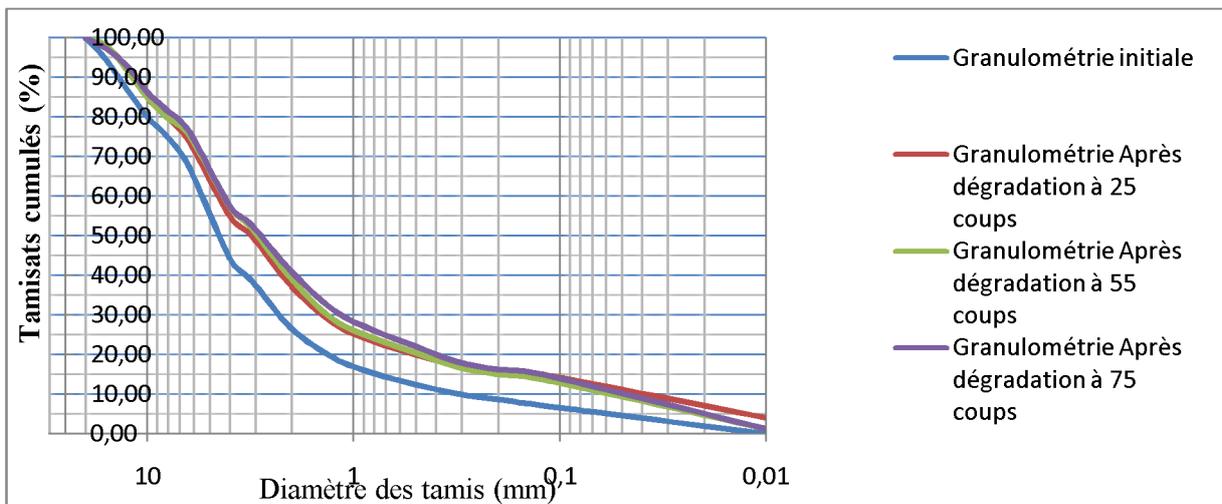
**Figure IV.62 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 40 cycles de dégradation.**



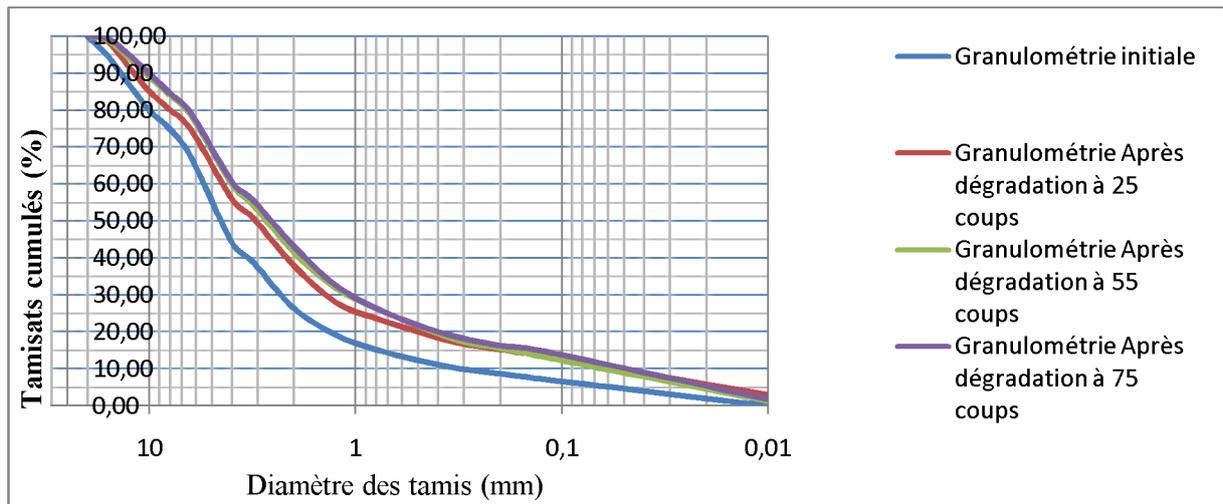
**Figure IV.63 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + eau après 50 cycles de dégradation**



**Figure IV.64 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + détergents après 50 cycles de dégradation**



**Figure IV.65 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + phosphates après 50 cycles de dégradation**



**Figure IV.66 : Influence de l'énergie de compactage pour l'échantillon du schiste + sulfates après 50 cycles de dégradation**

### **Interprétation**

L'étalement granulométrique augmente avec l'énergie de compactage en passant de 25 à 55 à 75 coups. Cet étalement est d'autant plus important que le nombre de cycles est important de 10 à 50 cycles.

L'ajout de détergents, de sulfates ou de phosphates au schiste a augmenté l'étalement granulométrique comparativement à l'ajout de l'eau (figures IV-48, 49 et 50) et ceci est valable quelque soit le nombre de cycles.

Le sulfate est le produit qui a engendré l'étalement le plus élevé des courbes granulométriques.

## **IV.9.CONCLUSION**

L'étalement granulométrique augmente avec l'augmentation de l'énergie de compactage et du nombre de cycles climatiques. L'échantillon (schiste + sulfate) a présentée la courbe la plus étalée et cela quelque soit l'énergie de compactage. L'étalement provoqué par les trois produits (détergents, phosphates et sulfates) est presque identique, mais plus important que celui provoqué par l'eau dans le schiste.

**CHAPITRE V :**

**GÉNÉRALITÉS SUR LA DIMENSION  
FRACTALE**

## V.1. INTRODUCTION

La dimension fractale est une valeur non entière ( $1 < D < 3$ ) qui mesure le degré d'irrégularité ou de la fragmentation d'un objet, ou la mesure de la rugosité d'une surface.

Elle est donc un nombre réel positif caractérisant la manière dont la masse ou la forme de l'objet est répartie dans l'espace. Généralement, plus la dimension fractale d'un objet est élevée, plus l'objet est irrégulier.

Dans les milieux granulaires, les matériaux sont soumis aux conditions environnementales dures et aux fortes contraintes de compression. Ce qui conduit à une fragmentation des grains : c'est-à-dire une modification de la granulométrie (dimension, forme) des grains et de la porosité de ces matériaux, induisant alors à une variation de leurs caractéristiques mécaniques.

Le but est d'utiliser cette notion de dimension fractale pour évaluer le degré d'écrasement des grains du matériau (schiste) soumis aux essais Proctor sous les différents ajouts chimiques.

## V.2 DÉFINITION

« Un fractal » est un objet dont la forme est extrêmement irrégulière ou interrompue. Selon **Benoit Mandelbrot**, le concept fractal est simple : on part d'une figure unique pour obtenir une autre figure composée de la figure de départ ou figure initiale, qui doit être soit réduite soit simplifiée.

Un objet fractal est une « figure géométrique ou un objet naturel qui indique certaines caractéristiques suivantes :

- les parties de l'objet ont la même structure que le tout ; elles sont à une échelle différente et peuvent être légèrement déformées [*propriété d'autosimilarité*] ;
- sa forme peut être irrégulière, ou bien extrêmement interrompue ou fragmentée, quelle que soit son échelle ;
- l'objet contient des 'éléments distinctifs' dont les échelles sont très variées et couvrent une très large gamme. Ainsi, une fractale serait un objet mathématique se caractérisant par son irrégularité et son autosimilarité.

De multiples exemples apparaissent dans la nature rendant ainsi le concept de fractal opérationnel. En effet, de nombreux objets illustrent le concept de fractal ; comme les montagnes, les nuages, les amas galactiques, la taille des cratères sur la Lune et Mars, la forme des arbres ou des coraux etc...



Figure .V.1 : fractals naturels irréguliers.

### V.3. NOTION DE FRACTAL

Le terme « fractal » (c'est à-dire qui a été fractionné à l'infini) vient du latin « *fractus* » dérivé du verbe « *frangere* », briser. Le concept de géométrie fractale, introduit par B.Mandelbrot (1975), fournit en effet un cadre solide pour l'analyse des phénomènes naturels dans divers secteurs de la science [N. Zekri et al,(2005)]. Par exemple, en physique, Des modèles fractals sont désormais fréquemment utilisés pour décrire la percolation, les milieux poreux, les polymères, la diffusion des particules dans un matériau, etc.

#### V.3.1 TYPES DE FRACTALS

##### V.3.1.1. Fractals déterministes

On parle des fractals déterministes lorsque les grains résultant d'une agrégation ou de la fragmentation d'un milieu granulaire ayant presque la même forme (c'est un cas rare) ou le mode de répllication ne fait pas intervenir de composante aléatoire.

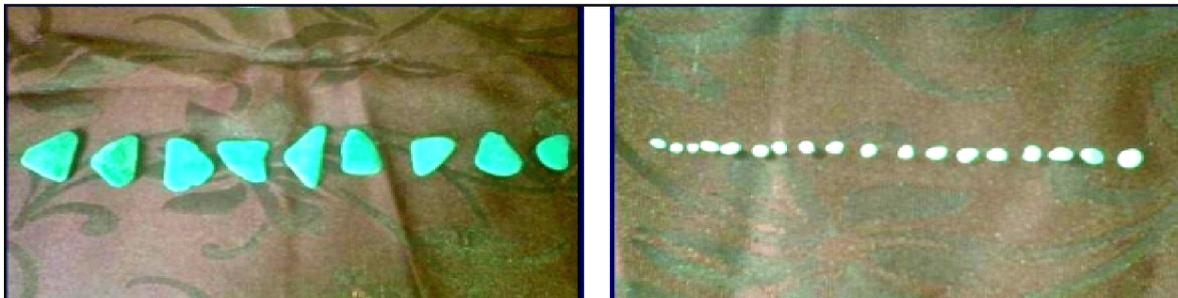


Figure .V.2 : Fractales déterministes d'un milieu granulaire (BelmihoubHacene 2013).

##### V.3.1.2 Fractals non déterministes

Par opposition aux fractales déterministes, on appelle fractals non déterministes les grains résultant d'une agrégation ou de la fragmentation d'un milieu granulaire aboutissant à des formes extrêmement irrégulières et des grains très anguleux (c'est le cas le plus fréquent).

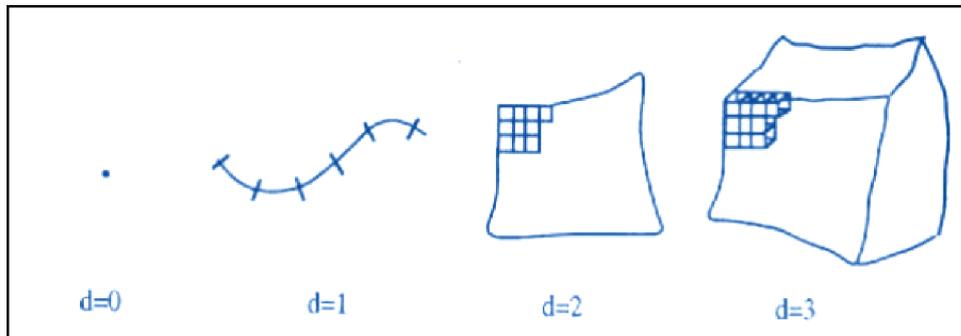


**Figure .V.3 : Fractals aléatoires.**

## **V.4 NOTION DE DIMENSION FRACTALE**

Pour mesurer une longueur, une surface ou un volume, une méthode usuelle consiste à recouvrir ces ensembles de pavés dont la longueur, la surface ou le volume sont pris comme unité de mesure.

Pour un point on a une dimension 0, pour un segment : 1, pour une surface 2 et pour un volume 3.

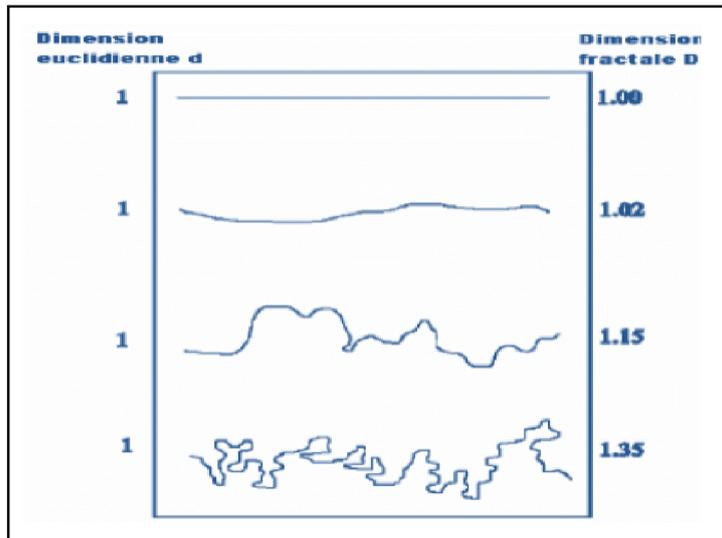


**Figure .V.4 : Pavages des lignes, surfaces ou volumes.**

### **V.4.1. Dimension fractale**

La dimension fractale est un nombre qui mesure le degré d'irrégularité ou de la fragmentation d'un objet, ou la mesure de la rugosité d'une surface, et cette notion de dimension fractale est appliquée aux objets invariants d'échelle.

Pour introduire la notion de la dimension fractale, il est indispensable de parler d'abord de la dimension euclidienne.



**Figure .V.5 : Illustration du rapport entre dimensions fractale et euclidienne (Achir Mourad ,2011).**

**V.4.2 Dimension euclidienne (topologique)**

En géométrie euclidienne, on travaille avec des dimensions entières 0, 1, 2, 3,... Exemple : La dimension d'un point est zéro (0), une ligne droite a pour support un espace de dimension un (1), un plan est un espace de dimension deux (2), un volume est inscrit dans un espace de dimension trois (3). On remarque qu'il existe un lien direct entre la dimension de l'objet étudié et son unité de mesure. Un objet de dimension deux se mesure en m<sup>2</sup> et un objet de dimension trois en m<sup>3</sup> et ce n'est pas forcément le cas pour une courbe fractale. Ces différents espaces obéissent à une loi, dite de mesure par comptage de boîtes (boxcounting), qui est de la forme :

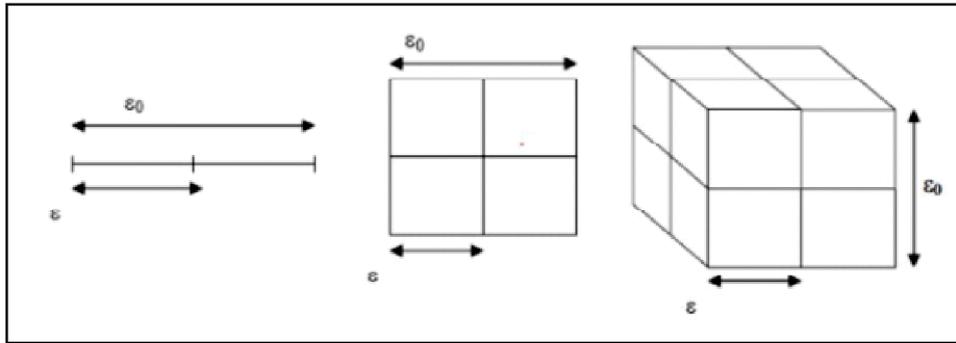
$$P(\varepsilon) = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^D$$

$p(\varepsilon)$  : nombre d'éléments de longueur  $\varepsilon$ , nécessaires pour diviser le segment de longueur  $\varepsilon_0$ .

$\varepsilon_0$  : longueur total de l'élément.

$\varepsilon$  : longueur de l'élément divisé.

$D$  : dimension du support de l'espace dans lequel est inscrit l'élément de taille  $\varepsilon_0$ .

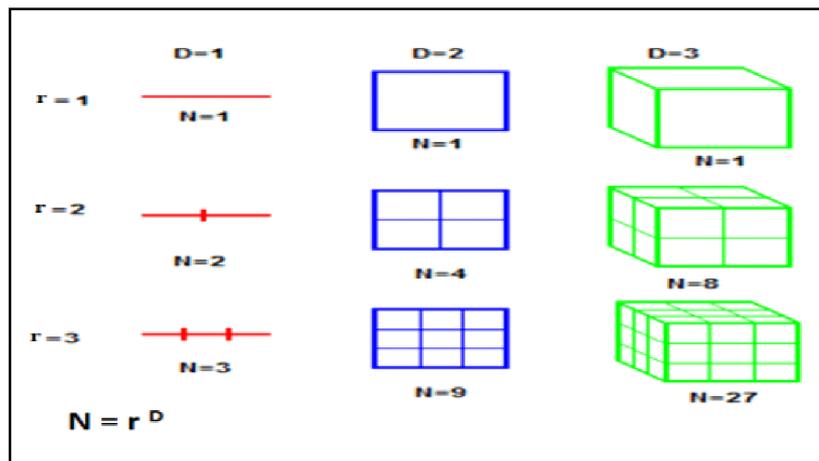


**Figure .V.6 : Mesure par comptage des boîtes dans un espace euclidien.**

**Approche didactique**

Si nous prenons un objet qui réside dans la dimension euclidienne  $D$  et nous réduisons sa taille linéaire de  $1/r$  dans chaque direction spatiale, sa mesure (longueur, surface, ou volume) augmenterait à  $N = r^D$  fois l'original. Ceci est illustré dans la (Figure V.7).

$D = \log(N) / \log(r)$  et il doit être entier, car c'est le cas de la géométrie euclidienne. Ce traitement généralisé de dimension est nommé d'après le mathématicien allemand Félix Hausdorff. Il s'est avéré utile pour décrire les objets naturels et d'évaluation des trajectoires des systèmes dynamiques.



**Figure .V.7 : Les 3 dimensions entières.**

Si  $D = 1$ , le support de  $\epsilon_0$  est une droite.  $p(\epsilon)$  est le nombre de segments de longueur  $\epsilon$ .

Si  $D = 2$ , l'élément (un carré) de côté  $\epsilon_0$  a pour support un plan.  $p(\epsilon)$  est le nombre de carré, de côté  $\epsilon$ .

Si  $D = 3$ , l'élément (un cube) de côté  $\epsilon_0$  a pour support un espace de dimension 3.  $p(\epsilon)$  est le nombre de cubes, de côté  $\epsilon$ .

### V.4.3 Définition mathématique de la dimension fractale

Appelons  $L(l)$  la longueur mesurée avec un étalon de longueur  $l$  ;  $D$  la dimension fractale de l'objet étudié ;  $AB$  est la taille macroscopique de l'objet, c'est-à-dire la distance entre les deux bouts de l'objet. On a alors :

$$L(l) = \left(\frac{AB}{l}\right)^D$$

Autrement dit, le nombre  $n$  d'éléments de taille  $l$  dans une fractale de taille globale  $L$  et de dimension  $D$  s'obtient avec :

$$n = \frac{L^D}{l^D} \quad \text{D'où} \quad D = \frac{\ln n}{\ln \frac{L}{l}}$$

### V.4.4 Vérification avec la dimension classique

Si on prend un carré de côté  $c$ , alors ce carré se divise en 4 carrés de longueur  $c/2$ .

Si  $D$  est la dimension fractale du carré, alors on a :

$$n = \frac{c^2}{\left(\frac{c}{2}\right)^2} = 4$$

$$L = c \text{ et } l = c/2$$

Selon la formule,  $D = \ln 4 / \ln 2$  d'où  $D = 2$

De même, un cube de côté  $c$  se divise en 8 cubes de côté  $c/2$ . La dimension est alors égale à  $\ln 8 / \ln 2$ , qui est égale à 3.

On retrouve bel et bien la dimension classique définie par Euclide.

## V.5. MÉTHODE DE CALCUL

Le calcul de la dimension fractale est l'une des caractéristiques principales de la géométrie fractale, elle a été utilisée entre autres dans le domaine de génie civil. Elle décrit bien l'irrégularité d'un grain du matériau granulaire.

Les méthodes de calcul de la dimension fractale les plus courantes sont :

- Méthode de comptage des boîtes (box counting)
- Méthode des lignes parallèles
- Méthode des masses

Il existe aussi d'autres méthodes comme celle de la Surface-Périmètre (Area-Perimeter) et la Méthode du diviseur (Line Divider), qui sont utilisées en génie civil.

### V.5.1 MÉTHODE DES BOITES

Cette méthode est la plus fréquemment utilisée et la plus populaire en pratique. Cette méthode consiste à diviser l'image d'un grain en petits carrés et de dimensions identiques (faire un maillage), ainsi le contour du grain qui passe par ces boîtes est compté, et on refait la même opération mais cette fois avec des boîtes de tailles décroissantes, ainsi de suite... Cette méthode est basée sur le principe que l'image du grain correspond au nombre de boîtes en fonction de ses tailles, et cette relation est représentée par la formule suivante :

$$N(X>x) = kx^{-DF}$$

$x$  : dimension des boîtes

$N(X>x)$  : nombre des boîtes

$k$  : constante

$DF$  : dimension fractale

En traçant dans un graphe logarithmique le nombre de boîtes en fonction de leur dimension, la dimension fractale est obtenue suivant la pente la mieux adaptée à la ligne et peut être recalculée par l'équation suivante :

$$DF = -m$$

$m$  : la pente de la droite la mieux adaptée à l'équation.

### V.5.2 MÉTHODE DES LIGNES PARALLÈLES

La mesure de la dimension fractale par la méthode des lignes parallèles consiste à superposer l'image du grain sur un ensemble de lignes parallèles à l'espacement constant  $\lambda$ , et joindre à l'aide d'un segment de droite les points d'intersections du contour du grain avec ces lignes. On fait la mesure du périmètre ainsi obtenu  $P(\lambda)$ . En diminuant de plus en plus le pas entre les lignes, on se rapproche au fur à mesure du contour réel du grain [B.Melbouci, S.Yezli, 2012]. Une unité de mesure est employée en fonction de toute la longueur du périmètre des grains pour le traçage des courbes.

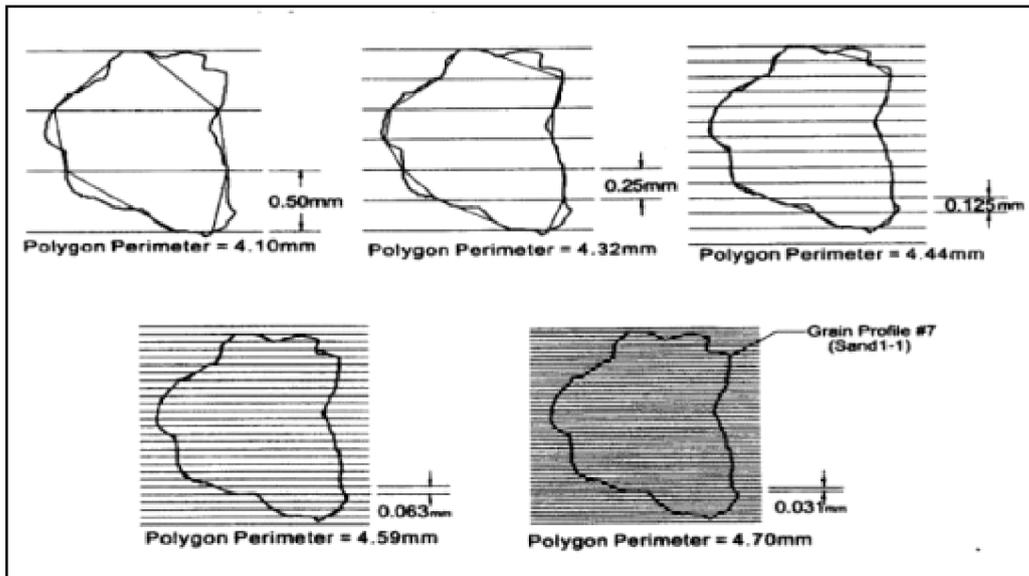


Figure .V.8 : Méthode des lignes parallèles (Kevin P. Hammer, 2005).

### V.5.3 MÉTHODE DES MASSES

La définition classique de la dimension fractale des masses est déduite de la masse de l'agrégat  $M$ , et de sa taille  $L$ . Cette méthode est basée sur la distribution des grandeurs des grains de l'échantillon, après avoir choisie une granulométrie bien définie d'un échantillon de matériau.

Tyler et wheatcraft (1992) ont développé une formule en utilisant l'analyse granulométrique pour le calcul de la dimension fractale de fragmentation. Cette méthode de calcul emploie la masse retenue en passoire et son diamètre correspondant. Cette équation est définie comme suite :

$$\frac{M(R < r)}{M_T} = \left(\frac{r}{r_L}\right)^{3-D_{FR}}$$

$M(R < r)$  : masse cumulative des particules avec la taille  $R$  plus petite qu'un comparatif donnée de classer.

$M_t$  : masse totale des particules.

$r$  : taille de l'ouverture des passoires.

$r_L$  : dimension des particules maximale définie par la plus grande ouverture de la taille des passoires.

$D_{FR}$  : dimension fractale de fragmentation.

La dimension fractale est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$D_{FR} = 3 - m$$

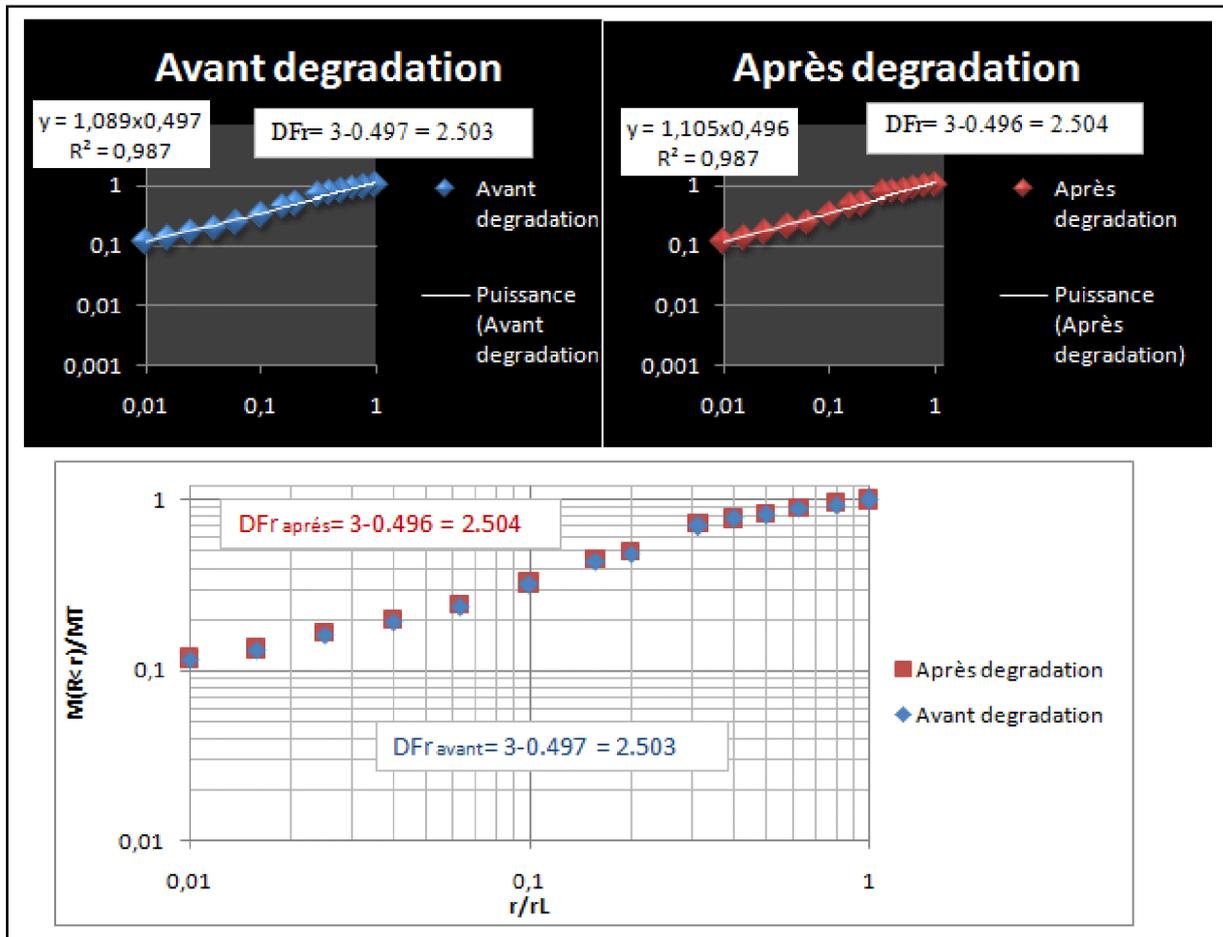


Figure .V.9 : détermination de la dimension fractale DFr par la méthode des masses à l'aide du logiciel Excel.

## V. 6. CONCLUSION

Les fractals sont des figures invariantes par changement d'échelle et sont la représentation graphique de suites récurrentes.

Une dimension fractale est une valeur non entière ( $1 < D < 3$ ) contrairement aux dimensions euclidiennes (1, 2 et 3 qui désignent respectivement une ligne, un plan et un volume). Ainsi, un objet de dimension fractale  $D = 2$  est parfaitement plan, donc plus une surface est rugueuse et plus cette dimension  $D$  est grande.

D'une manière générale, un objet fractal est un objet qui ne peut être complètement décrit par la géométrie euclidienne car il comporte une infinité de détails. La dimension fractale est donc un nombre réel positif caractérisant la manière dont la masse ou la forme de l'objet est répartie dans l'espace.

## **CHAPITRE VI :**

# **CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE**

## VI.1. INTRODUCTION

La méthode la plus commode qui lie la dimension fractale à l'écrasement est la méthode des masses, elle prend en compte la distribution granulaire et la masse des grains de chaque diamètre.

Dans ce Chapitre, nous présenterons les résultats des différentes mesures de la dimension fractale appliquées à notre matériau avec les différents polluants.

Les résultats des simulations obtenues sont présentés en fonction de la nature du matériau et des différentes sollicitations.

## VI.2. Méthode de calcul (méthode des masses).

Le principe du tracé des courbes granulométrique théoriques, consiste à introduire les données numériques à savoir les pourcentages cumulés ( $qn$ ), le diamètre maximum ( $D_{max}$ ) ; d'autre part des graphes logarithmiques avec application des lois en puissance seront représentés pour le calcul de la dimension fractale par les masses des échantillons en fonction des diamètres des tamis. Ce calcul est résumé dans Tableau VI. 1

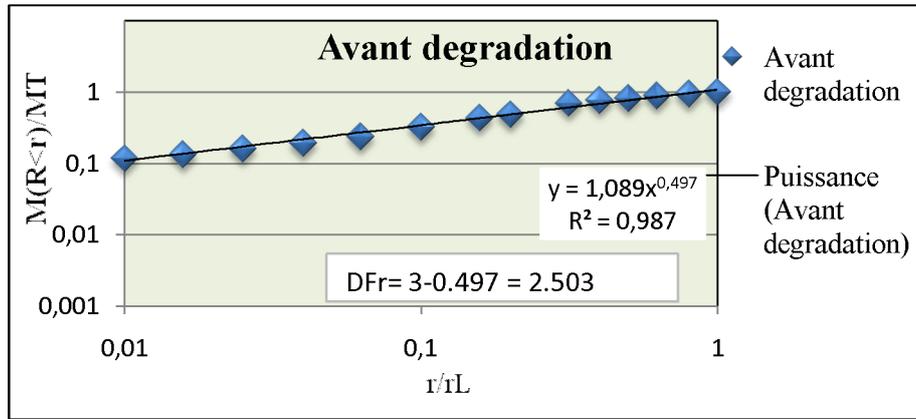
### VI.2.1. Résultats de la dimension fractale avant la dégradation

Après la série d'essais à l'essai Proctor sous les énergies de compactage de 25, 55 et 75 coups, on procédera à des analyses granulométriques puis au calcul de la dimension fractale avec la méthode des masses.

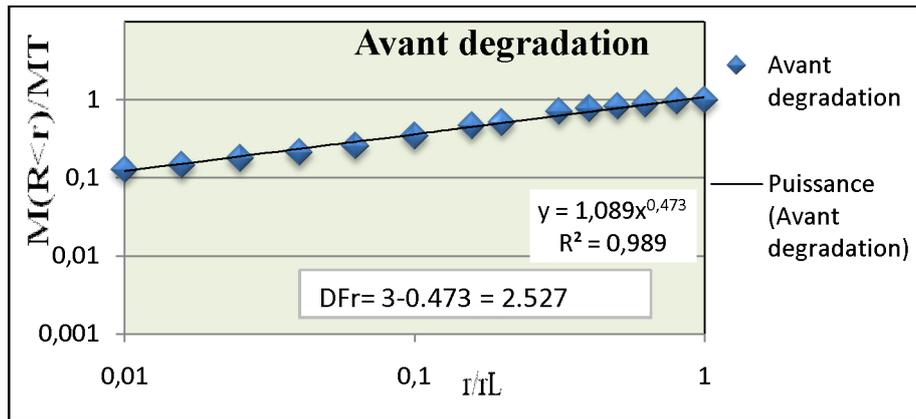
**Tableau VI. 2: Exemple de calcul de la DF pour un échantillon sain compacté à 25 coups.**

Ø mm	Refus g	refus cumulés g	tamisât cumulés(g)	r/rL	M(R<r)/MT
20	0,00	0	1982,7	1	1
16	62,00	62	1920,7	0,8	0,96872951
12,5	105,70	167,7	1815	0,625	0,91541837
10	140,10	307,8	1674,9	0,5	0,84475715
8	96,90	404,7	1578	0,4	0,7958844
6,3	128,00	532,7	1450	0,315	0,73132597
4	411,80	944,5	1038,2	0,2	0,52362939
3,15	94,00	1038,5	944,2	0,1575	0,4762193
2	243,00	1281,5	701,2	0,1	0,35365915
1,25	166,40	1447,9	534,8	0,0625	0,26973319
0,8	89,90	1537,8	444,9	0,04	0,22439098
0,5	72,30	1610,1	372,6	0,025	0,18792556
0,315	65,60	1675,7	307	0,01575	0,15483936
0,2	35,90	1711,6	271,1	0,01	0,13673274
0,125	24,90	1736,5	246,2	0,00625	0,12417411
0	246,20	1982,7	0	0	0

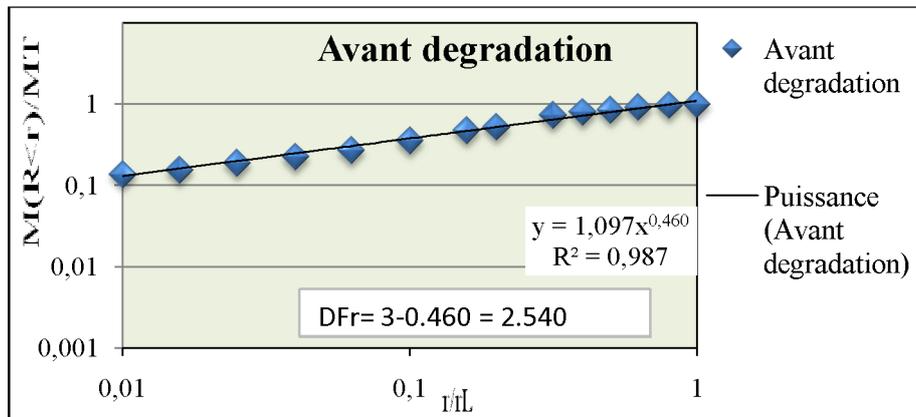
Les principaux résultats obtenus de DF en fonction du nombre de coups sont présentés sur les figures VI-1, 2 et 3.



**Figure VI. 3: Valeur de la DF du matériau sain pour une énergie de compactage égale à 25 coups.**



**Figure VI. 2 : Valeur de la DF du matériau sain pour une énergie de compactage égale à 55 coups.**



**Figure VI. 3 : Valeur de la DF du matériau sain pour une énergie de compactage égale à 75 coups.**

## Chapitre VI: Calcul la dimension fractale.

Le calcul précédent est effectué pour des échantillons sains (sans polluants). Pour chaque énergie de compactage de 25, 55 et 75 coups par couche, nous obtenons respectivement une valeur de DF égale à 2.503 ; 2.527 et 2.540. Ces valeurs de référence vont nous permettre de comparer les écrasements ou la dégradation des grains du schiste sous l'influence simultanée des produits chimiques et des cycles climatiques (gel-dégel).

### VI.2.2. Résultats de la dimension fractale après la dégradation

Les résultats de la dégradation du matériau schiste sous l'influence simultanée des produits chimiques et des cycles climatiques sont présentés sous forme de Tableau VI. 2. Les différentes courbes obtenues de DF sont présentées en Annexe C.

Tableau VI. 2 : Résultats de la dimension fractale après la dégradation.

Produits utilisés	Dimension Fractale DF			
	Série	Energie de compactage		
		25 coups	55 coups	75 coups
<b>Sans produits</b>		<b>2,503</b>	<b>2,527</b>	<b>2,54</b>
<b>Eau</b>	1ère Série	2,504	2,531	2,532
	2ème Série	2,515	2,532	2,546
	3ième Série	2,515	2,514	2,537
	4ième Série	2,509	2,538	2,547
	5ième Série	2,519	2,551	2,568
<b>Sulfates</b>	1ère Série	2,498	2,524	2,543
	2ème Série	2,502	2,533	2,537
	3ième Série	2,52	2,532	2,56
	4ième Série	2,504	2,539	2,548
	5ième Série	2,513	2,546	2,552
<b>Phosphates</b>	1ère Série	2,49	2,53	2,529
	2ème Série	2,501	2,526	2,542
	3ième Série	2,51	2,53	2,553
	4ième Série	2,509	2,533	2,556
	5ième Série	2,513	2,545	2,565
<b>Détergents</b>	1ère Série	2,496	2,542	2,537
	2ème Série	2,496	2,534	2,55
	3ième Série	2,508	2,545	2,552
	4ième Série	2,51	2,541	2,556
	5ième Série	2,508	2,545	2,567

### VI.3. Influence de l'énergie de compactage sur la dimension fractale

*Cas de l'ajout de l'eau* : La dimension fractale augmente avec l'énergie de compactage et elle est d'autant plus importante que le nombre de cycles climatiques est élevé. Ce n'est qu'à partir de la 5ième série que les valeurs de DF sont les plus importantes (comprises entre 2.51 et 2.57) et se décalent largement des résultats des 4 premières séries (comprises entre 2.505 et 2.545) (Figure VI.4).

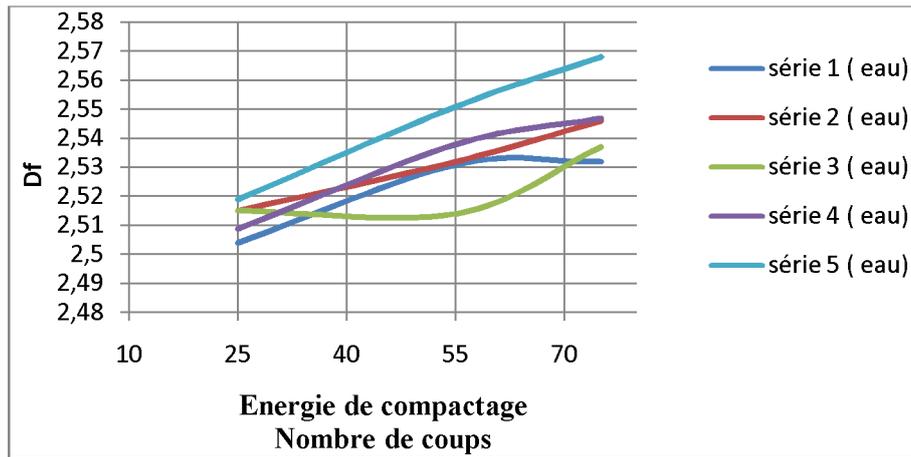


Figure VI.4 : Évaluation de la DF en fonction de l'énergie de compactage, échantillons (schiste + eau).

**Cas de l'ajout de détergents :** La dimension fractale augmente avec l'énergie de compactage et elle est d'autant plus importante que le nombre de cycles climatiques est élevé. On constate un écart important à 25 coups entre la première série et les 4 autres séries qui présentent une valeur identique. A 75 coups l'écart est visible d'une série à une autre (Figure VI.5).

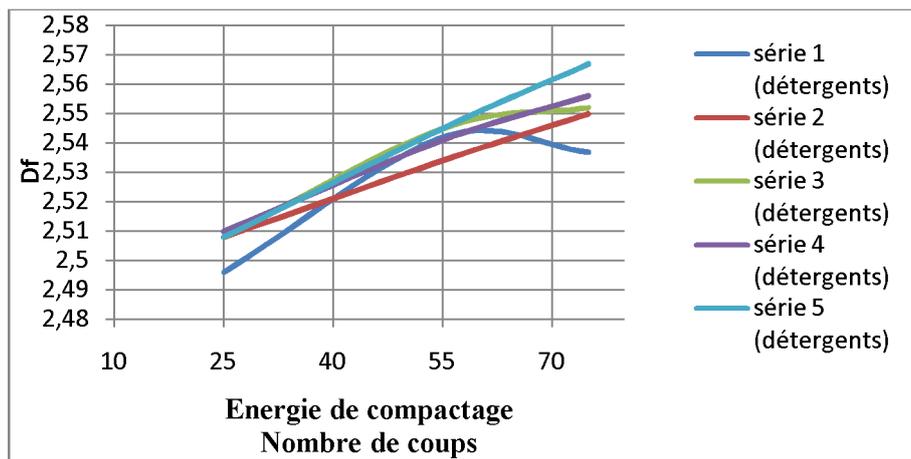
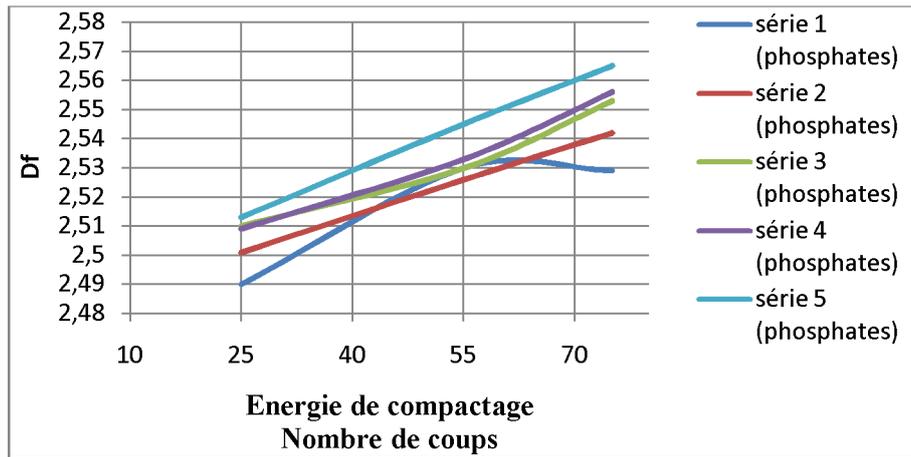


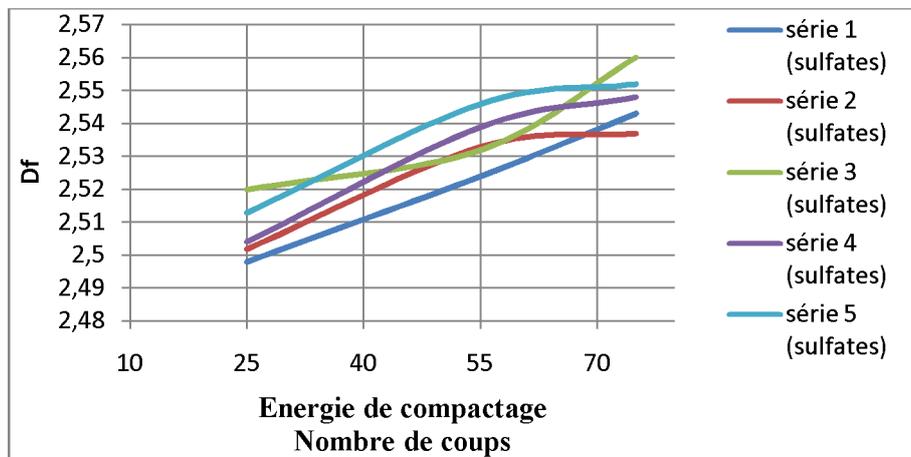
Figure VI.5 : Évaluation de la DF en fonction de l'énergie de compactage, échantillons (schiste + détergents).

**Cas du phosphate :** La dimension fractale augmente avec l'énergie de compactage et elle est d'autant plus importante que le nombre de cycles climatiques est élevé. Ce n'est qu'à partir de la 5ième série que les valeurs de DF sont les plus importantes (comprises entre 2.515 et 2.565) et se décalent largement des résultats des 4 premières séries (comprises entre 2.49 et 2.565) (Figure VI.6). On a constaté que les résultats du 2ième et 3ième cycle sont presque confondus.



**Figure VI.6 :** Évaluation de la DF en fonction de l'énergie de compactage, échantillons (schiste + phosphates).

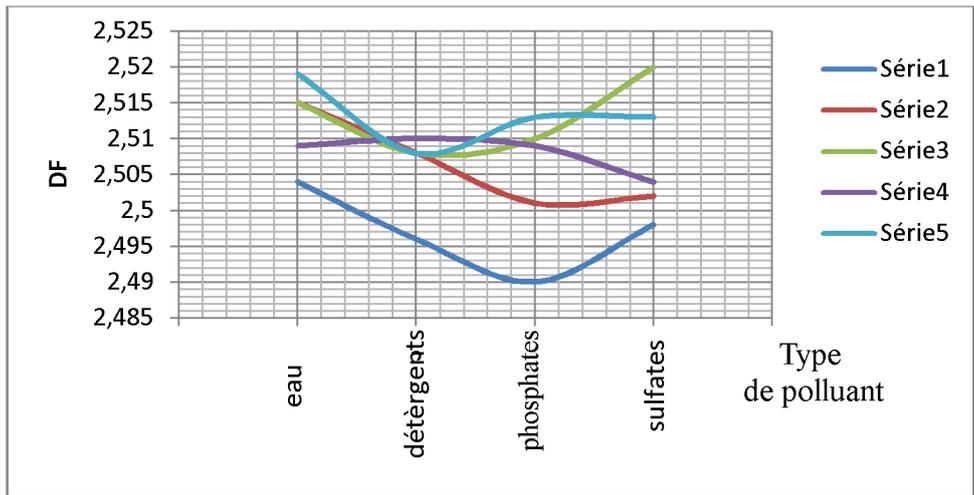
*Cas de l'ajout des sulfates :* La dimension fractale augmente avec l'énergie de compactage et elle est d'autant plus importante que le nombre de cycles climatiques est élevé à l'exception de la troisième série. Les courbes de DF ont tendance à s'atténuer à partir de l'énergie de 55 coups. Les valeurs de DF pour les 4 derniers cycles sont dans un fuseau très étroit comprises entre 2.505 et 2.55 (Figure VI.7).



**Figure VI.7 :** Évaluation de la DF en fonction de l'énergie de compactage, échantillons (schiste + sulfates).

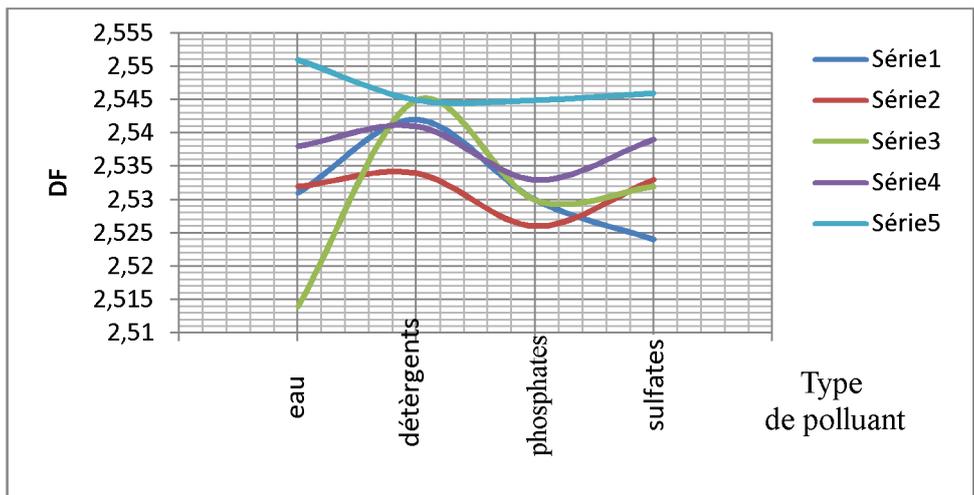
#### **VI.4. Influence des produits chimiques sur la Dimension fractale**

Les résultats sur la figure VI. 8 montrent bien qu'il y a un grand écart entre la première série et les quatre suivantes séries. A 25 coups, les valeurs de DF pour le détergent sont très proches pour les quatre dernières séries. L'écart est important d'une série à une autre pour les sulfates et avec un degré moindre pour les phosphates.



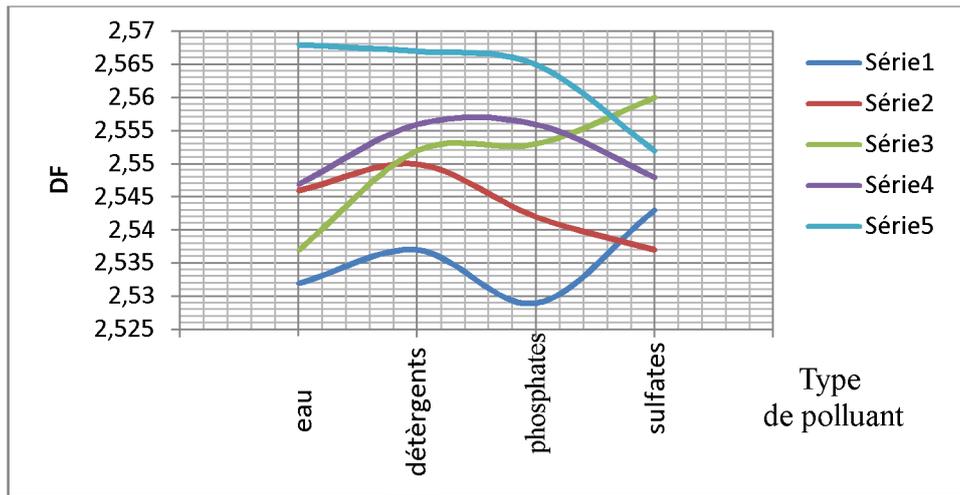
**Figure VI.8 : Évaluation de la DF en fonction des produits chimiques pour une énergie de compactage égale 25 coups.**

A 55 coups, l'écart pour les détergents se creuse par rapport à 25 coups et reste toutefois petit. On constate un même écart pour les sulfates et les phosphates, mais un grand écart pour l'eau entre les différentes séries (Figure VI. 9).



**Figure VI.9 : Évaluation de la DF en fonction des produits chimiques pour une énergie de compactage égale 55 coups**

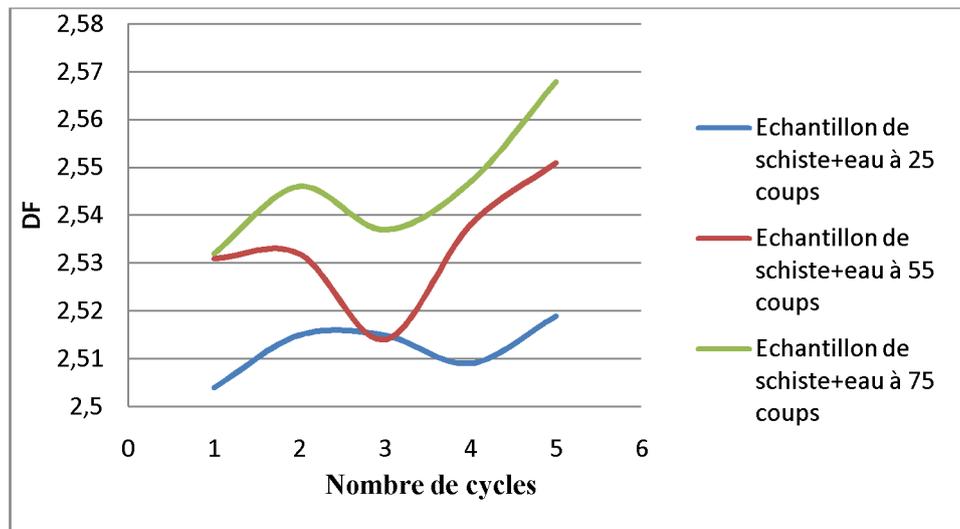
A 75 coups, l'écart de DF se réduit pour les sulfates et se creusent pour les phosphates, les détergents et l'eau (Figure VI.10).



**Figure VI.10 : Évaluation de la DF en fonction des produits chimiques pour une énergie de compactage égale 75 coups**

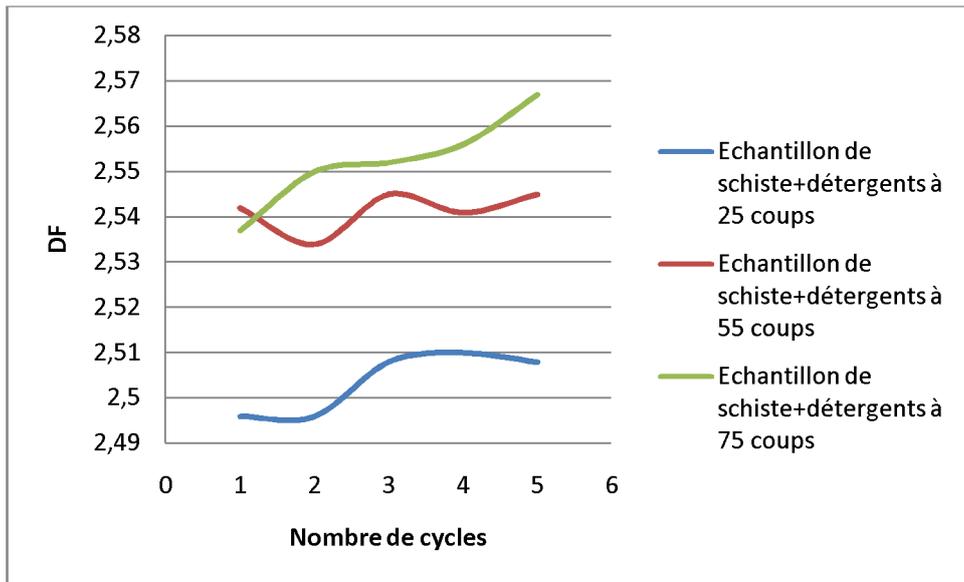
### VI.5. Évaluation de la dimension fractale pour tous les cycles climatiques

*Avec l'ajout de l'eau :* La dimension fractale augmente avec l'énergie de compactage (Figure VI. 11) et sa valeur est maximale au cinquième cycle (2.57).



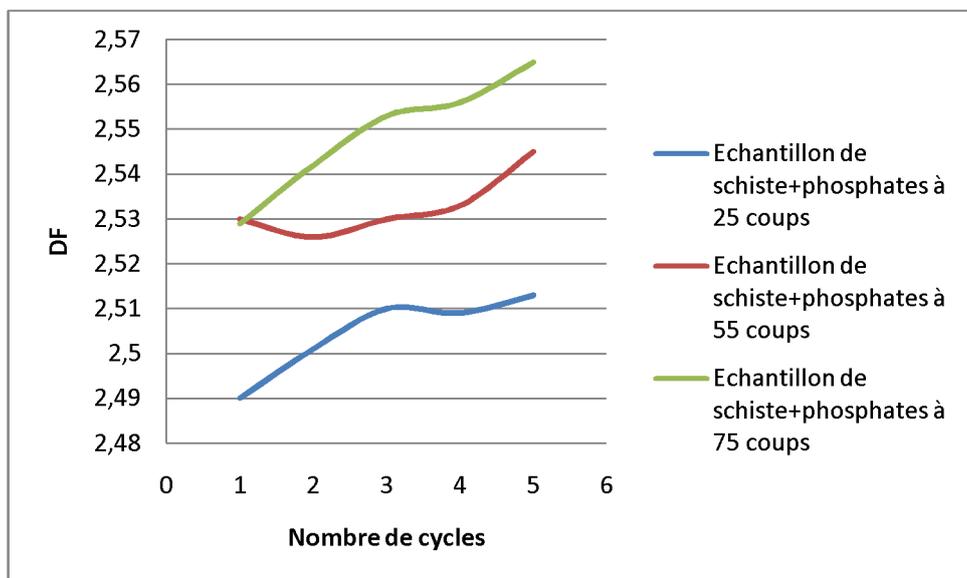
**Figure VI. 11 : Évaluation de la dimension fractale de l'échantillon schiste + l'eau pour tous les cycles climatiques.**

*Cas de l'ajout des détergents :* La dimension fractale augmente avec l'énergie de compactage (Figure VI. 12) et sa valeur est maximale au cinquième cycle à 75 coups (2.567). La figure N° montre un écart significatif entre DF obtenue à 25 coups et celles obtenues à 55 et 75 coups.



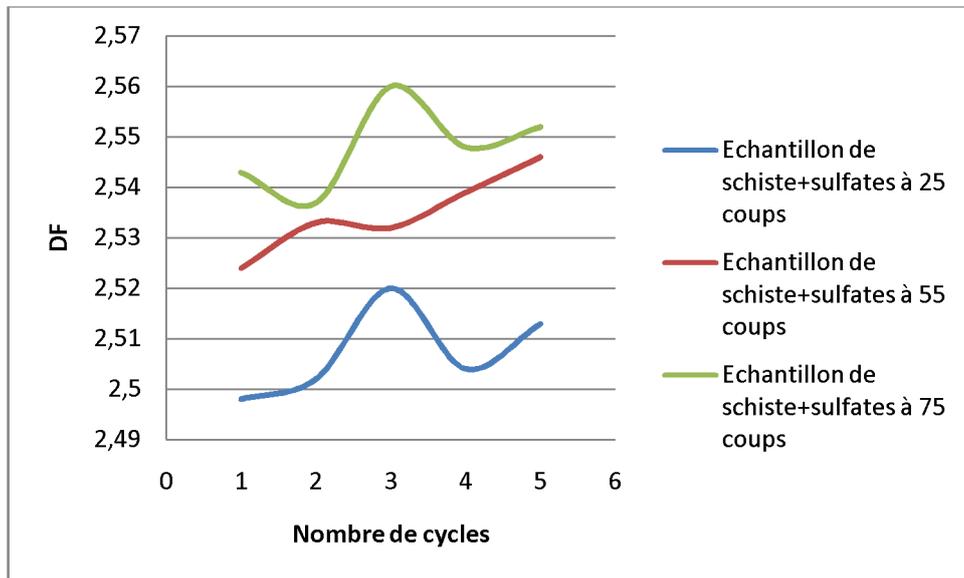
**Figure VI. 12 :Évaluation de la dimension fractale de l'échantillon schiste + détergents pour tous les cycles climatiques.**

**Cas de l'ajout du phosphate :** La dimension fractale augmente avec l'énergie de compactage (Figure VI. 13) et elle d'autant plus importante que la série est la plus élevée. sa valeur est maximale au cinquième cycle à 75 coups (2.565). La figure N° montre un écart significatif entre DF obtenue à la première série et celle obtenue à la cinquième série, particulièrement à 75 coups.



**Figure VI. 13 Évaluation de la dimension fractale de l'échantillon schiste + phosphates pour tous les cycles climatiques.**

**Cas de l'ajout des sulfates :** Dans le cas des sulfates, la figure VI. 14 montre que la DF oscille en fonction du nombre de cycles climatiques, tantôt elle est élevée et tantôt elle est basse. Toutefois les valeurs obtenues à 75 coups sont plus élevées que celles obtenues à 55 ou 25 coups.



**Figure VI. 14 : Évaluation de la dimension fractale de l'échantillon schiste + sulfates pour tous les cycles climatiques.**

## **VI.6. CONCLUSION**

Les résultats obtenus montrent clairement que la dimension fractale augmente avec l'énergie de compactage et elle est d'autant plus importante que le nombre de cycles climatiques est élevé. L'ajout du sulfate ou du phosphate au schiste a joué un grand rôle dans la dégradation des grains du schiste et cette dégradation est plus significative à partir de la cinquième série d'essai de cycles climatiques. En effet, la dimension fractale obtenue est plus élevée pour ces deux polluants que pour l'eau et les détergents.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

L'étude expérimentale menée a mis en évidence l'influence des agents climatiques (variations de température, gel dégel..) et celle des paramètres chimiques (eaux) sur la dégradation de grains de schiste extrait sur le versant instable d'Ain El Hammam.

Cette étude a permis d'une part de comparer les résultats des essais réalisés sur le schiste sain et sur le matériau schiste immergé dans des polluants puis soumis aux cycles climatiques et d'autre part d'évaluer la dégradation des grains avec la dimension fractale. Les résultats obtenus restent fiables pour la simulation du comportement des granulats schisteux sous l'influence des différents cycles climatiques et les réactions chimiques. Ceci nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Sous les cycles climatiques, le matériau schisteux a tendance à se fragmenter, une abrasion des grains s'est produite lors des essais de dégradation à l'enceinte et la quantité d'éléments fins augmente proportionnellement en fonctions des cycles climatiques.

Au cours des essais Proctor, la dégradation des grains de schiste est appréciable sous une grande énergie de compactage. Les produits chimiques ajoutés au schiste ne font qu'accélérer cette dégradation. Nous constatons alors, un abaissement de la densité sèche du matériau, ceci confirme que le matériau perd des caractéristiques physiques et il se dégrade continuellement.

Les résultats de l'étalement d'analyses granulométriques ont confirmé que la dégradation est de plus en plus évolutive sous l'ajout des différents produits chimiques (détergents, phosphates, sulfates). Toutefois, ce matériau local présente une grande sensibilité à l'ajout des sulfates, où les proportions des particules fines sont plus importantes. Ce qui montre que le phénomène d'écrasement des grains de schiste est important. L'évaluation de la dégradation des grains des différents échantillons a été mise en évidence par la notion de dimension fractale avec la méthode des masses qui a mis en exergue que les cycles climatiques ont facilité la rupture des angularités et des aspérités et que la forme des grains obtenus est presque arrondie avec une surface lisse.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographiques

- [1]**RENARD .M.**Éléments de géologie collection Masson sciences. Edition Dunod, aout 2010.
- [2]**SCOTES .C.** Document synthèse animation « Détermination des roches », Universités du Texas. Edition Eyrolles 2012.
- [3]**GUILLEMOT .J.**Élément de géologie publication de l'institut française du pétrole. Edition TECHNIP Paris 1986, pages [21-76].
- [4]**PEYCRU .P.**Géologie tout-en-un 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> années BCPST. Edition Dunod. Paris 2008, pages ([8-30], [154-172]).
- [5]**DERCOURT .J, PAQUET. J, PIERRE .T**Géologie objets, méthodes et modèles 12<sup>ème</sup> Edition, Dunod. Paris 2006, pages ([91-193], [301-349]).
- [6]**SCHUMAN. W.**Guide des pierres et minéraux. Edition Delachaux et Nestlé. Paris 1989, Traduction Térése Dorsaz, pages [11-92].
- [7]**XAVIER .D.**Altération chimique, Cours de sédimentologie, département des sciences de la terre et de l'environnement. Université libre du Bruxelles, Université d'Europe 2008-2009.
- [8]**N'GOLO.T.**Les minéraux et les roches, Québec mines pour tous. (date non mentionnée).
- [9]**CAMPYM.** Géologie de la surface 3e édition : Érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux. Edition Dunod. Paris 2013.
- [10]**BORIE J.L.**Collection Tavernier: Biologie et géologie 1<sup>er</sup>S.Edition bordas, paris 1982, pages [177-230].
- [11] **BEAUCHAMP. J.** L'altération des roches. Université de Picardie Jules Verne, 2003.
- [12]**OUTAYEB S.**Mémoire de master en Géotechnique et environnement : Évaluation de la dégradation chimique des grains de schiste à l'aide de la notion de la dimension fractale. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou 2016.
- [13]**DAHOUANE K.**Mémoire de magister en Géotechnique et environnement : Détermination du taux d'écrasement des grains à partir des caractéristiques des courbes granulométriques. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou
- [14]**MELBOUCIB.**Influence de la dimension fractale des grains sur les caractéristiques de l'essai œdométrique, Laboratoire Géo Matériaux Environnement et Aménagement, 11<sup>ième</sup> congrès de mécanique-Agadir, du 23 au 26 avril 2013.

[15]**DJERBAL L.** Thèse de doctorat en géotechnique : Analyse des mécanismes de déformation de la rupture progressive du versant instable d'Ain el hammam, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou 2013.

[16]**MELBOUCI. B.** Étude de la dégradation des grains sous des conditions climatiques simulées : calcul de leur dimension fractale, revue Algérie équipement, janvier 2017.

[17]**BOUZEBODJA. A.** Thèse de doctorat en géotechnique : influence de la dimension fractale en 3D sur les caractéristiques mécaniques des matériaux, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou 23 mai 2016.

[18]**OUAAZ. O.** Mémoire de master en Géotechnique et environnement : Étude de la dégradation des grains sous les conditions climatiques : calcul de leur dimension fractal. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou 2014.

[19]**DEMAILLY. J-P.** Ensembles fractals, mesure et dimension Institut Fourier, Université de Grenoble I, France & Académie des Sciences de Paris 19 novembre 2012.

[20]**ACHIR. M.** Thèse de magister : Caractérisation du phénomène d'écrasement par l'étude de la dimension fractale des grains, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou 22 juin 2011.

[21]**MANDELBROT .B.B.** Les objets fractals forme, hasard et dimension. Edition Flammarion, paris 1975.

[22] Norme AFNOR densité volumique des grains solides (NF P 94 - 054).

[23] Norme AFNOR densité volumique humide (NF P 94 - 053).

[24] Norme AFNOR densité volumique sèche (NF P 94 - 064).

[25] Norme AFNOR la teneur en eau (NF P 94 – 050).

[26] Norme AFNOR limite d'Atterberg (NF P 94-051).

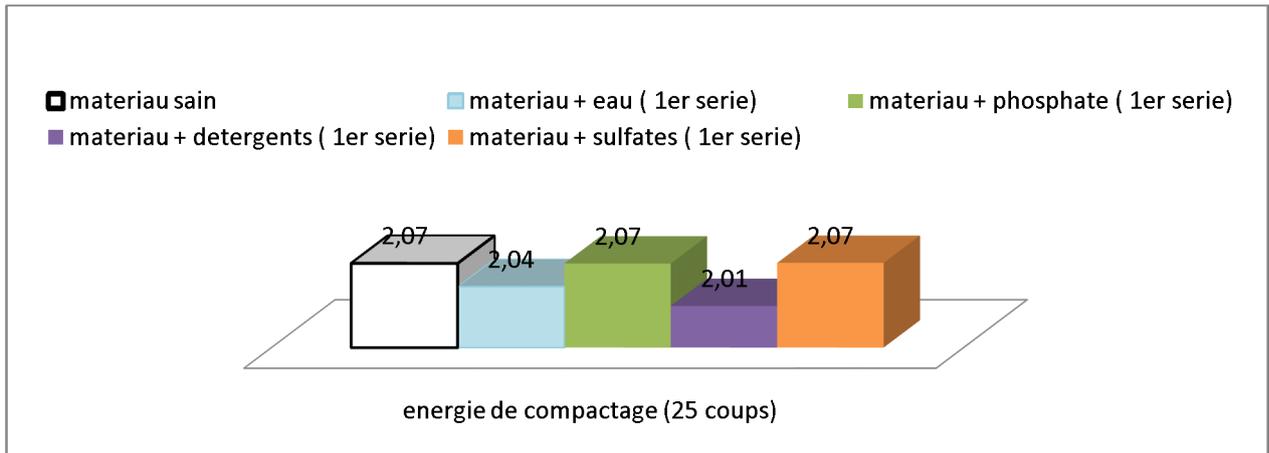
[27] Norme AFNOR valeur au bleu de méthylène (NF P 94 - 068).

[28] Norme AFNOR compactage de sol (NF P 94 - 093).

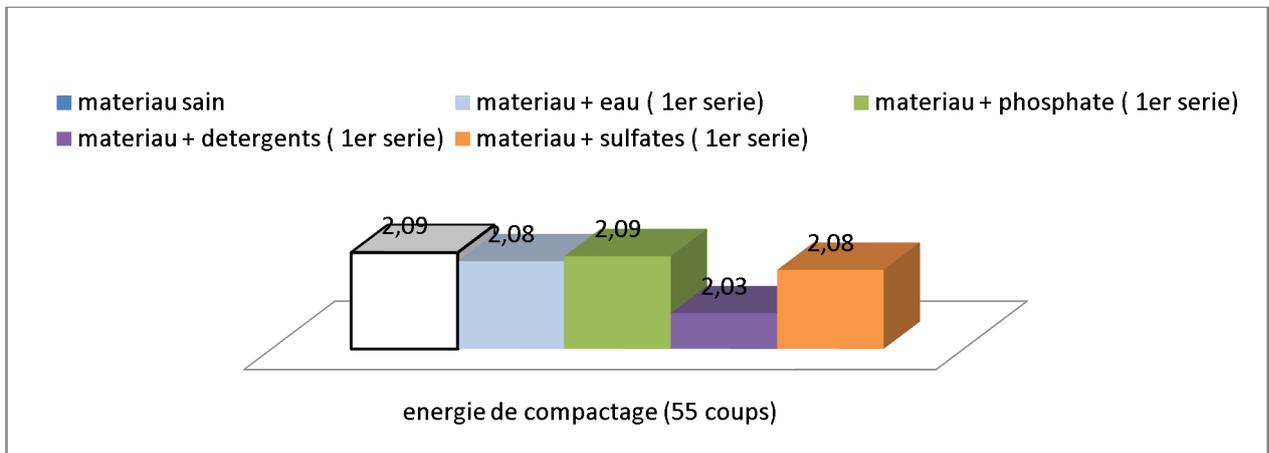
[29] Norme AFNOR analyse granulométrique à sec après lavage (NF P 94-056).

# **ANNEXES**

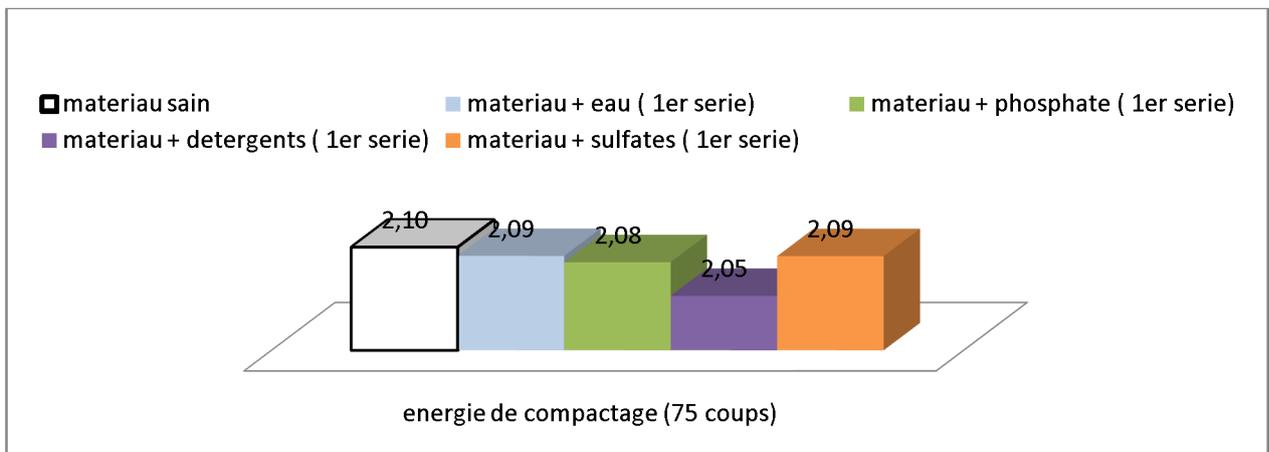
## ANNEXE A



**Fig.1** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 25 coups en fonction des produits chimiques (1ère série après 10 cycles de dégradation).

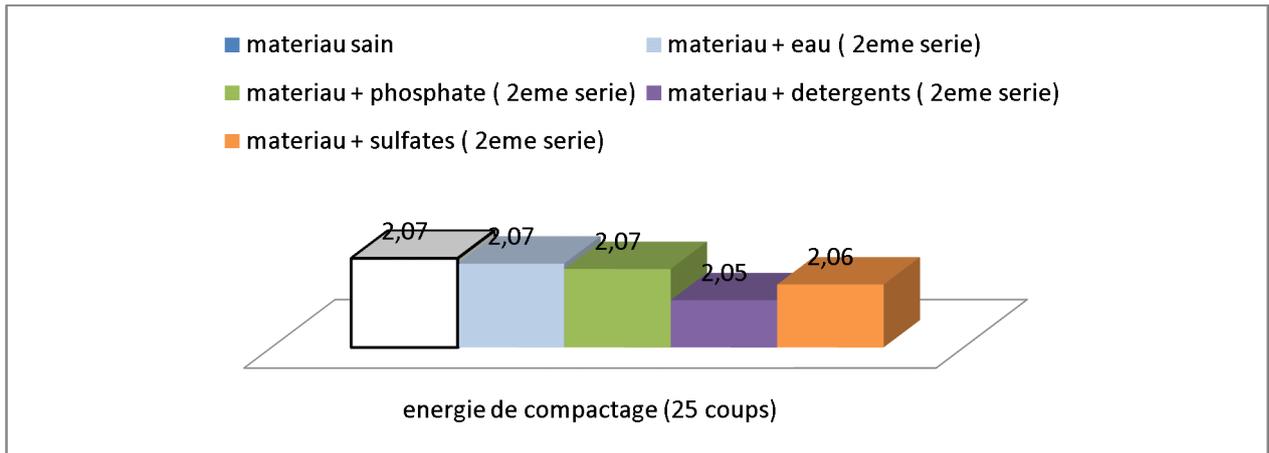


**Fig.2** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 55 coups en fonction des produits chimiques (1ère série après 10 cycles de dégradation).

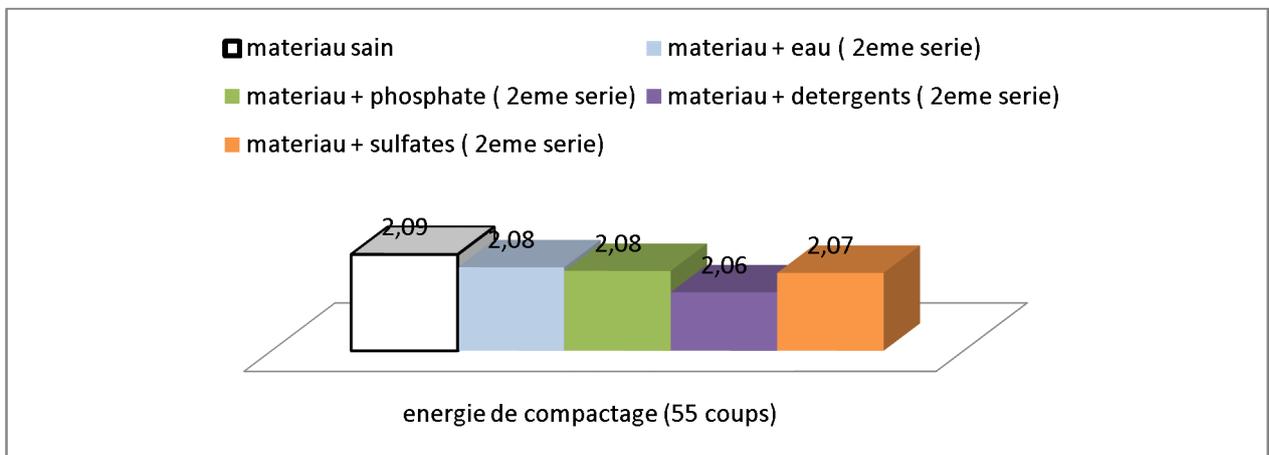


**Fig.3** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 75 coups en fonction des produits chimiques (1ère série après 10 cycles de dégradation).

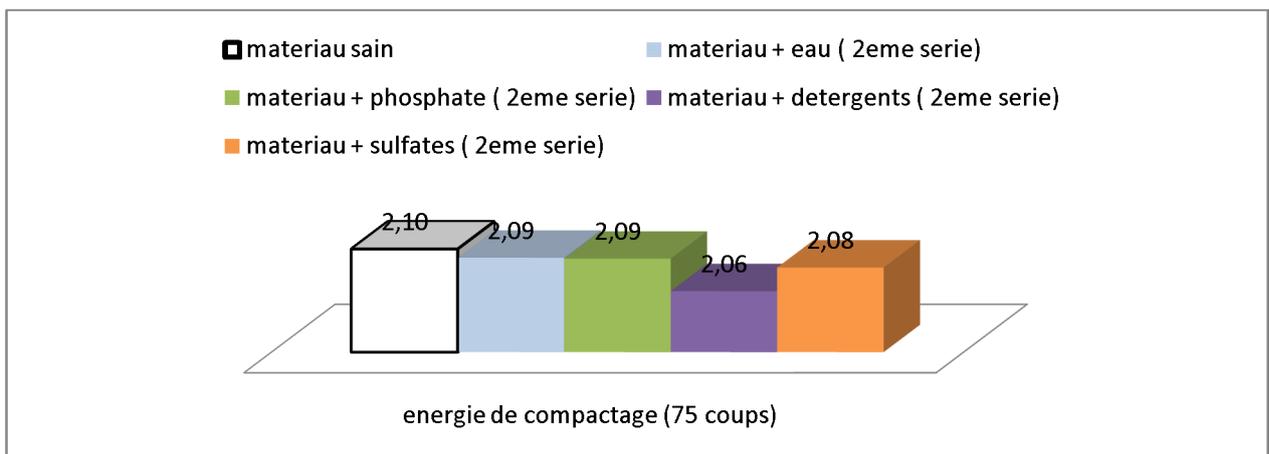
## ANNEXE A



**Fig.4** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 25 coups en fonction des produits chimiques (2ème série après 20 cycles de dégradation).

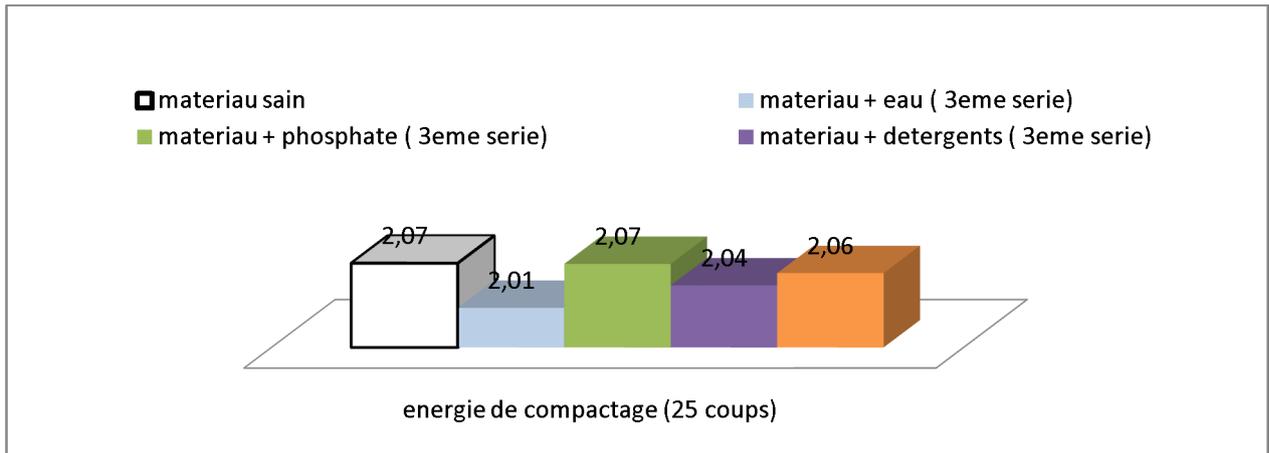


**Fig.5** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 55 coups en fonction des produits chimiques(2ème série après 20 cycles de dégradation).

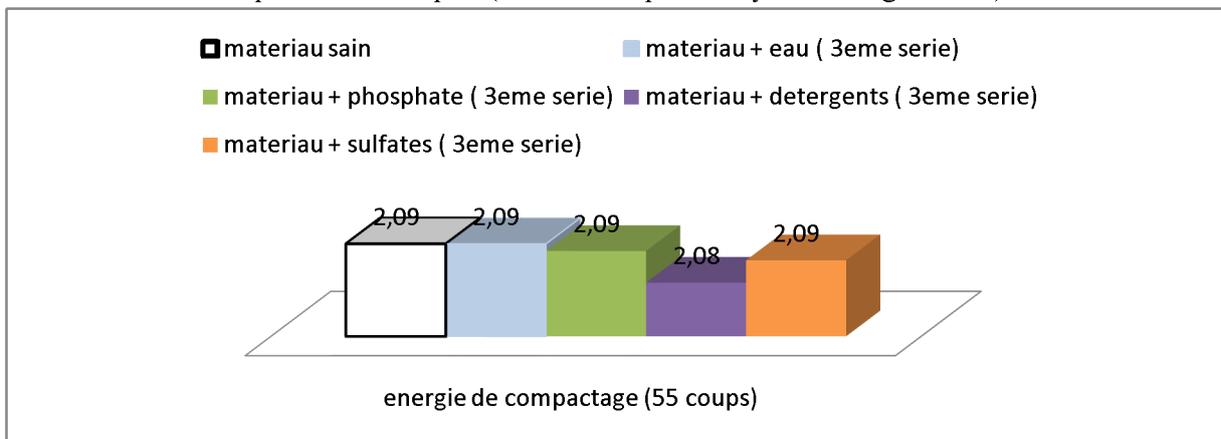


**Fig.6** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 75 coups en fonction des produits chimiques (2ème série après 20 cycles de dégradation).

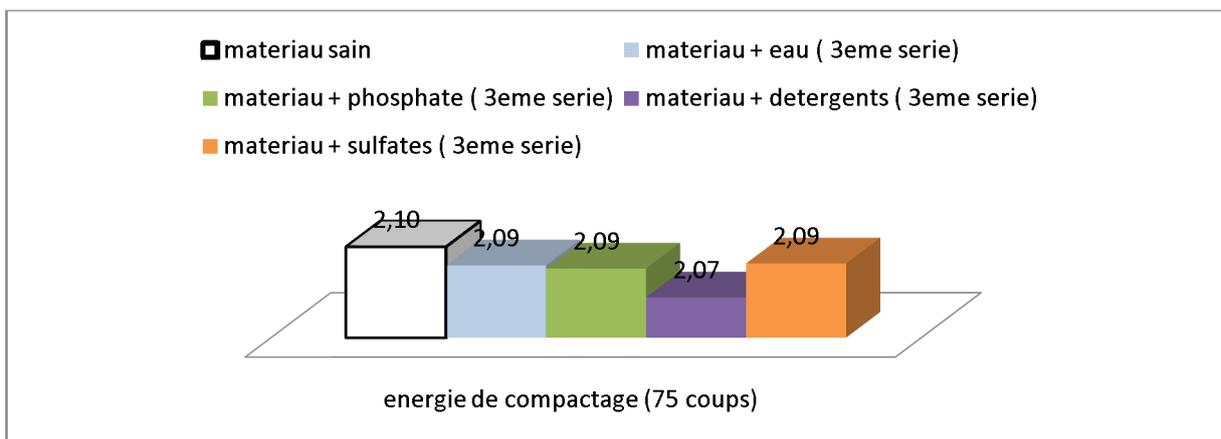
## ANNEXE A



**Fig.7 :** Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 25 coups en fonction des produits chimiques (3ème série après 30 cycles de dégradation).

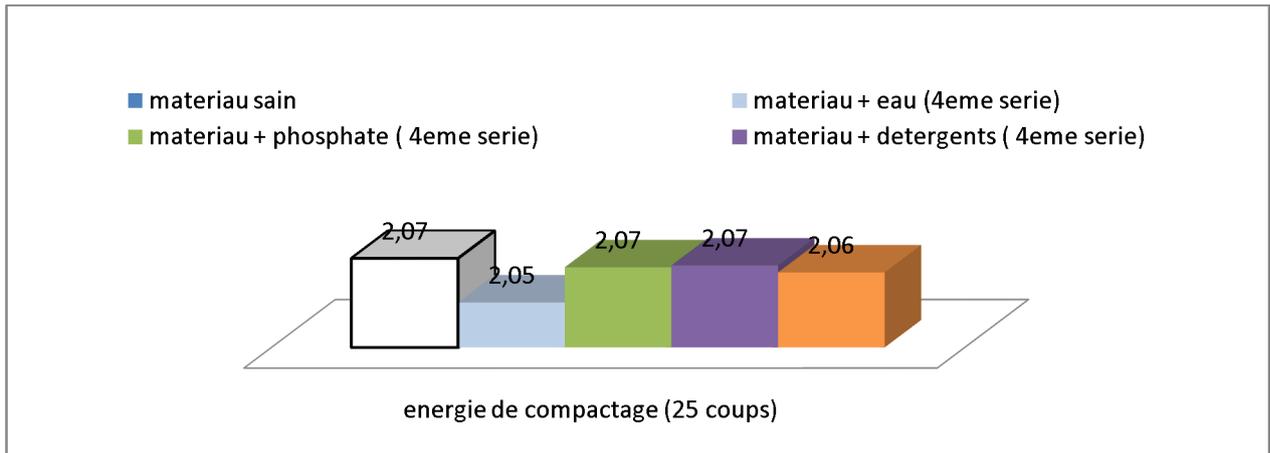


**Fig.8 :** Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 55 coups en fonction des produits chimiques (3ème série après 30 cycles de dégradation).

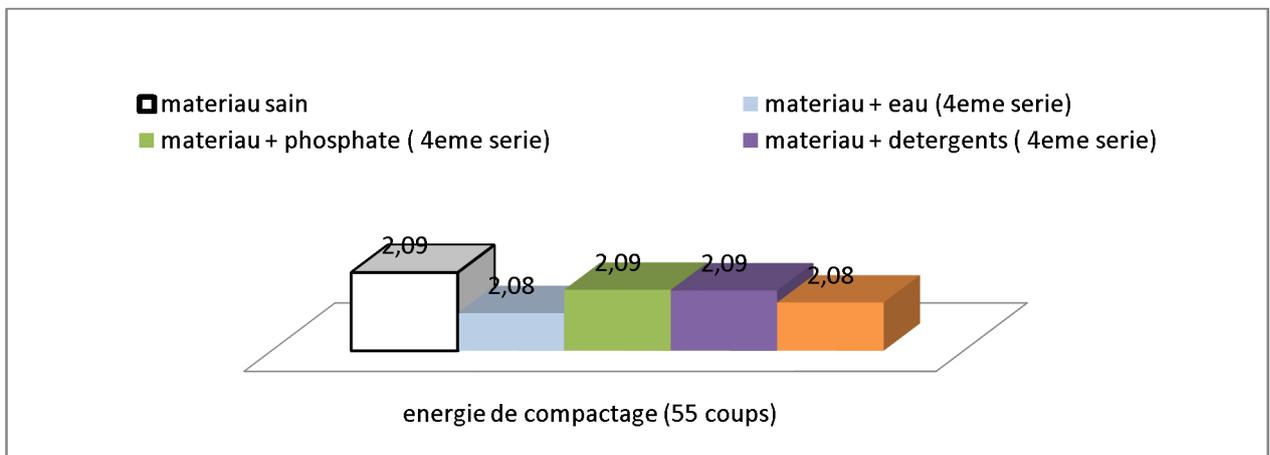


**Fig.9 :** Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 75 coups en fonction des produits chimiques (3ème série après 30 cycles de dégradation).

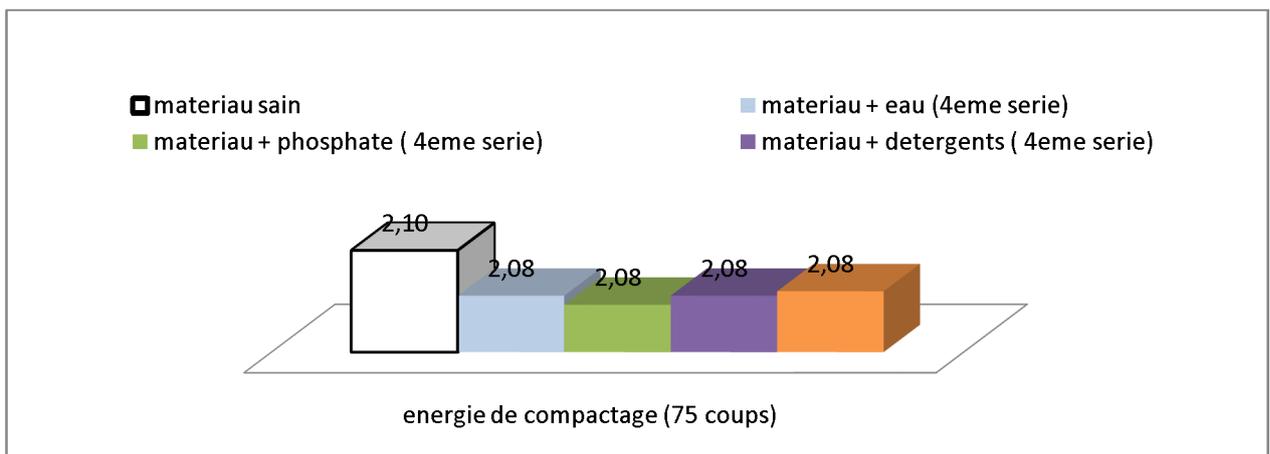
## ANNEXE A



**Fig.10 :** Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 25 coups en fonction des produits chimiques (4ème série après 40 cycles de dégradation).

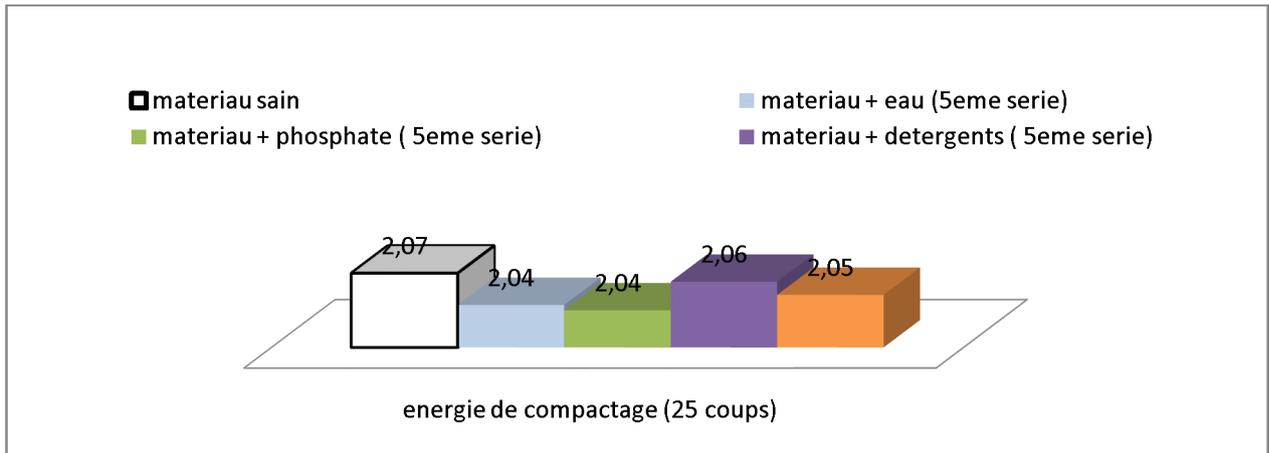


**Fig.11 :** Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 55 coups en fonction des produits chimiques (4ème série après 40 cycles de dégradation).

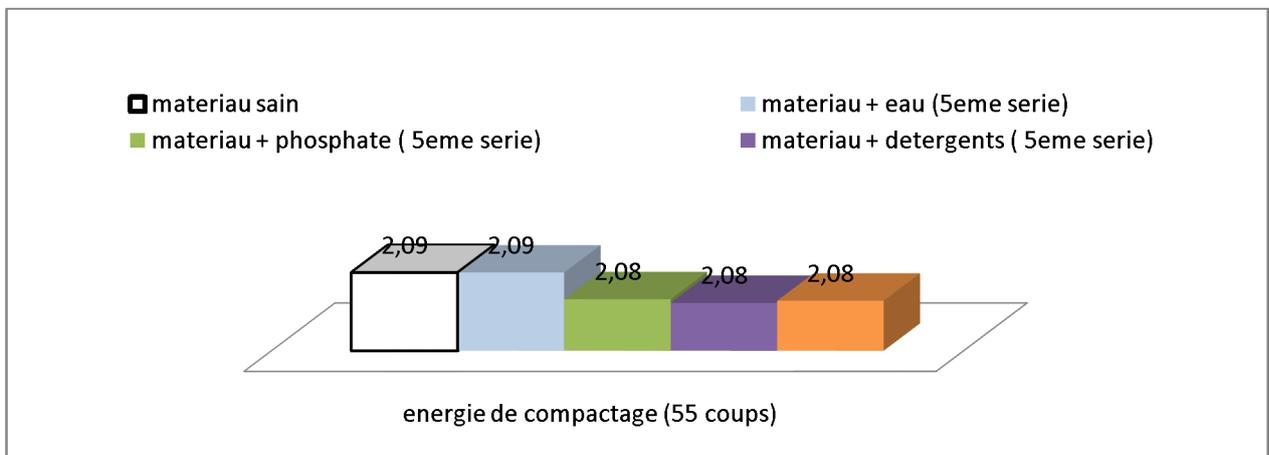


**Fig.12 :** Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 75 coups en fonction des produits chimiques (4ème série après 40 cycles de dégradation).

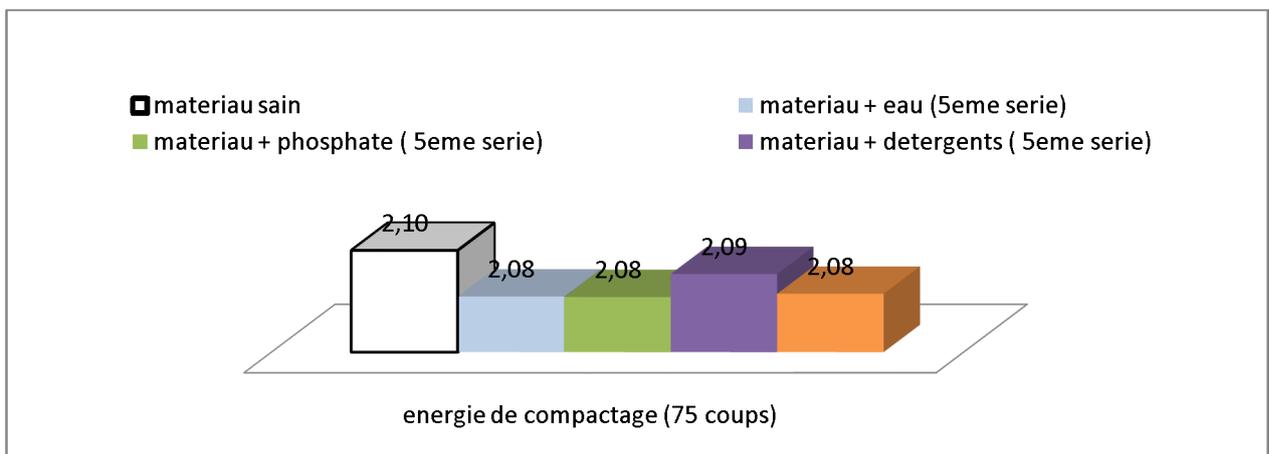
## ANNEXE A



**Fig.13** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 25 coups en fonction des produits chimiques (5ème série après 50 cycles de dégradation).



**Fig.14** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 55 coups en fonction des produits chimiques (5ème série après 50 cycles de dégradation).



**Fig.15** : Variation du poids volumique pour une énergie de compactage égale à 75 coups en fonction des produits chimiques (5ème série après 50 cycles de dégradation).

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 1ère série schiste +eau

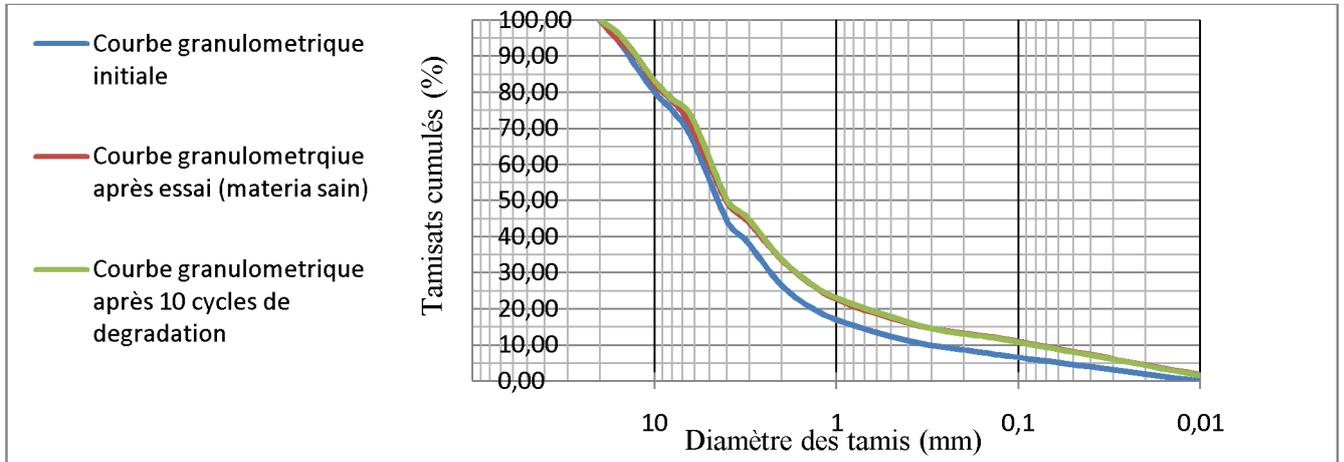


Fig1 : Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 25 coups 1ère série.

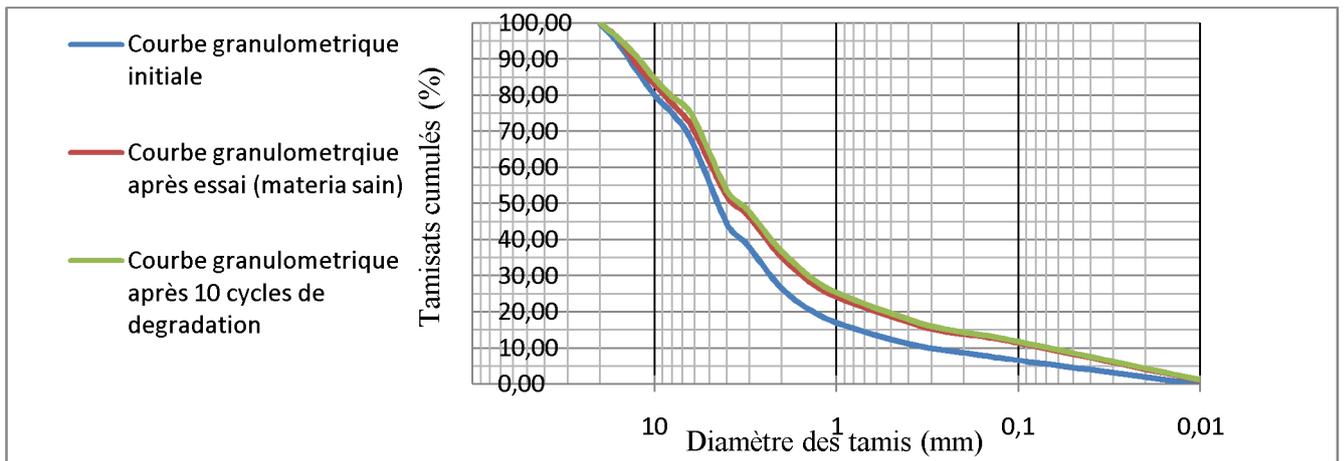


Fig2 : Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 55 coups 1ère série.

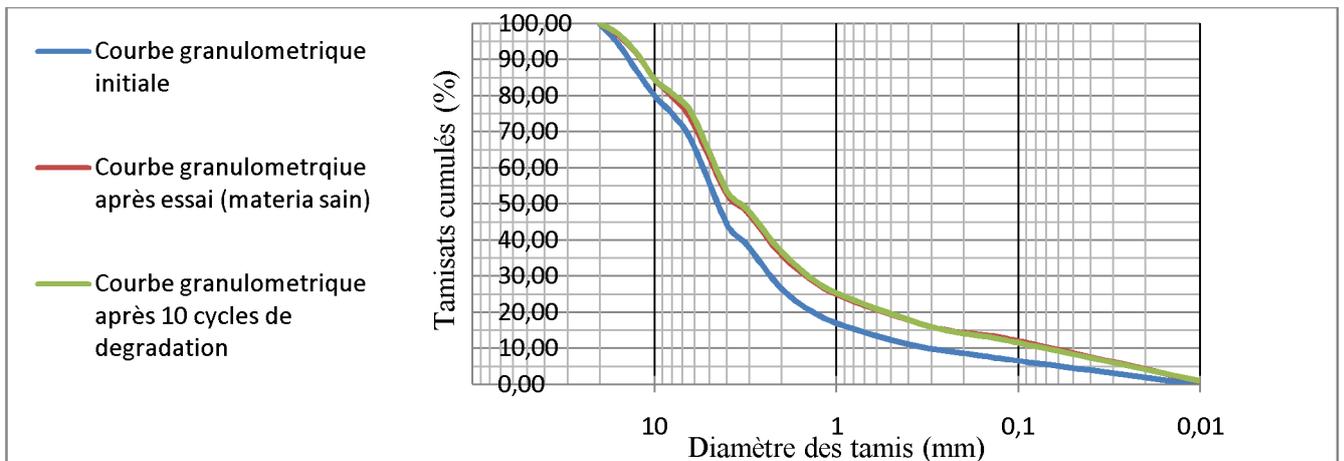


Fig3 : Courbe granulométrique schiste + eau, Énergie de compactage 75 coups 1ère série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 1ère série schiste +détergents

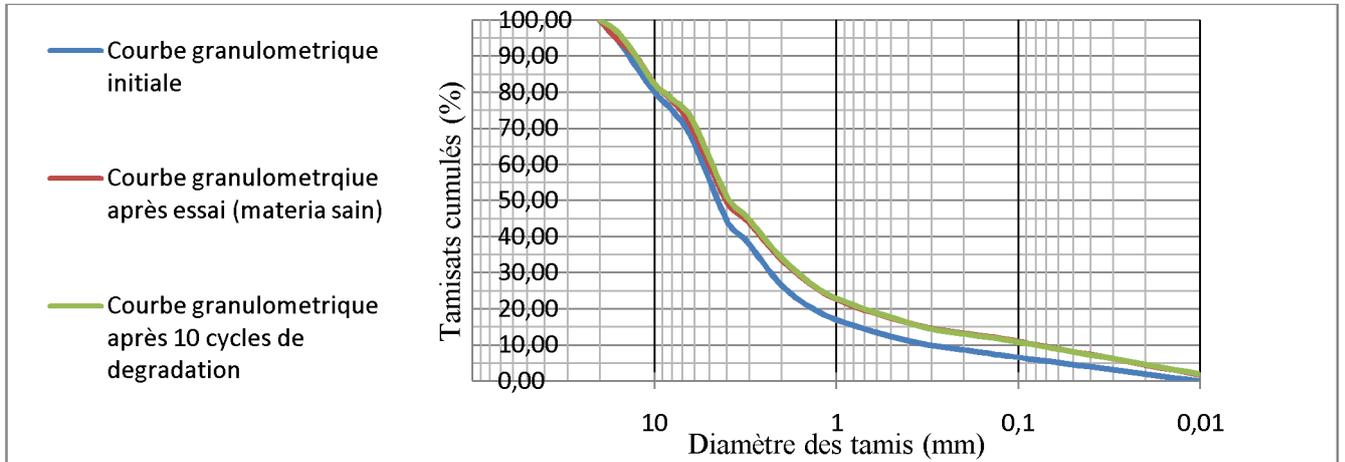


Fig4: Courbe granulométrique schiste +détergents Énergie de compactage 25 coups 1ère série.

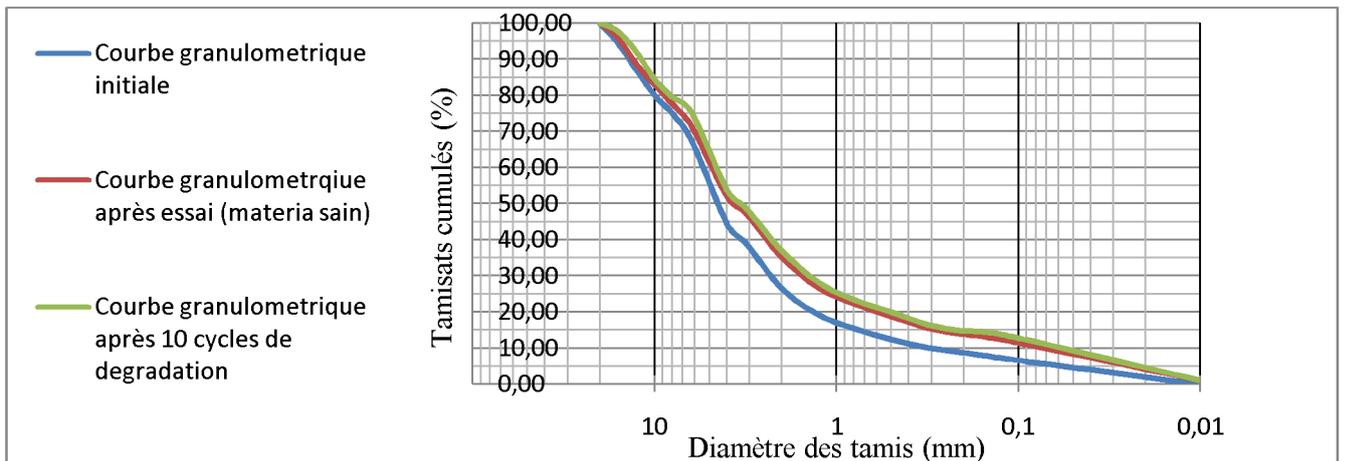


Fig5: Courbe granulométrique schiste +détergents Énergie de compactage 55 coups 1ère série.

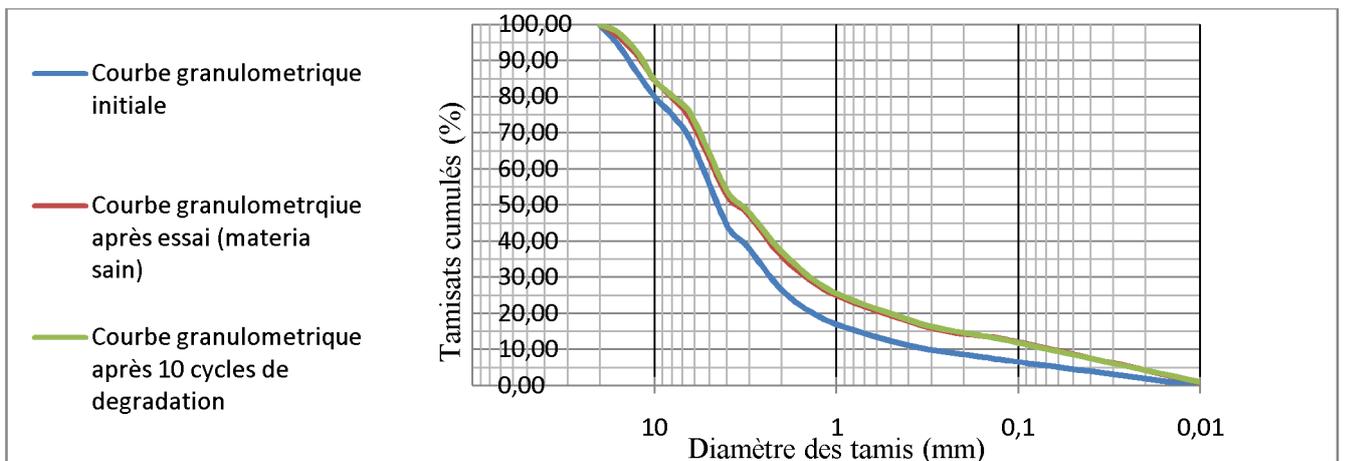


Fig6: Courbe granulométrique schiste +détergents Énergie de compactage 75 coups 1ère série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 1ère série schiste + phosphates

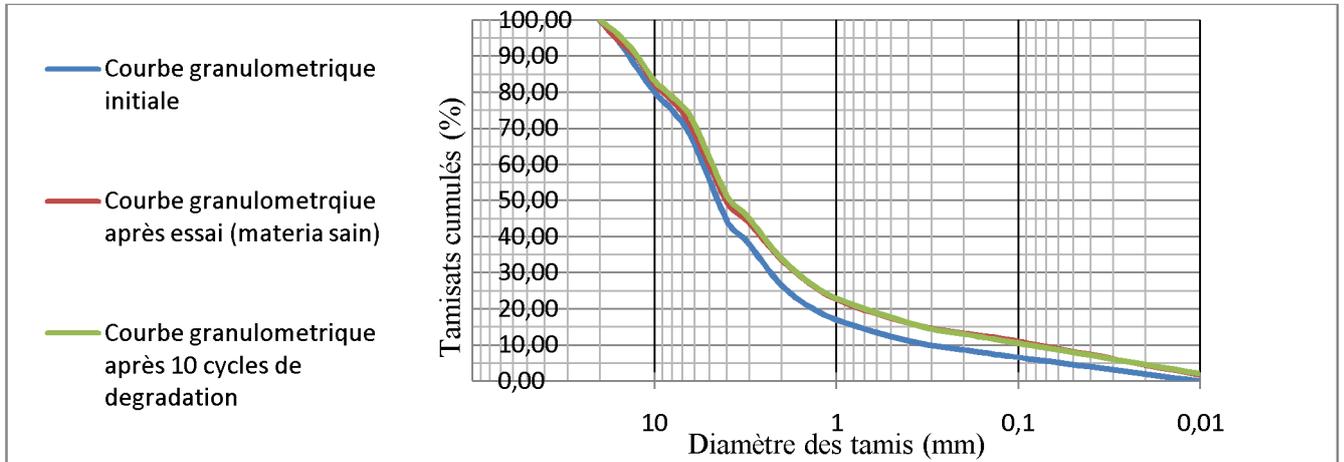


Fig7: Courbe granulométrique schiste + phosphates, Énergie de compactage 25 coups 1<sup>ère</sup> série.

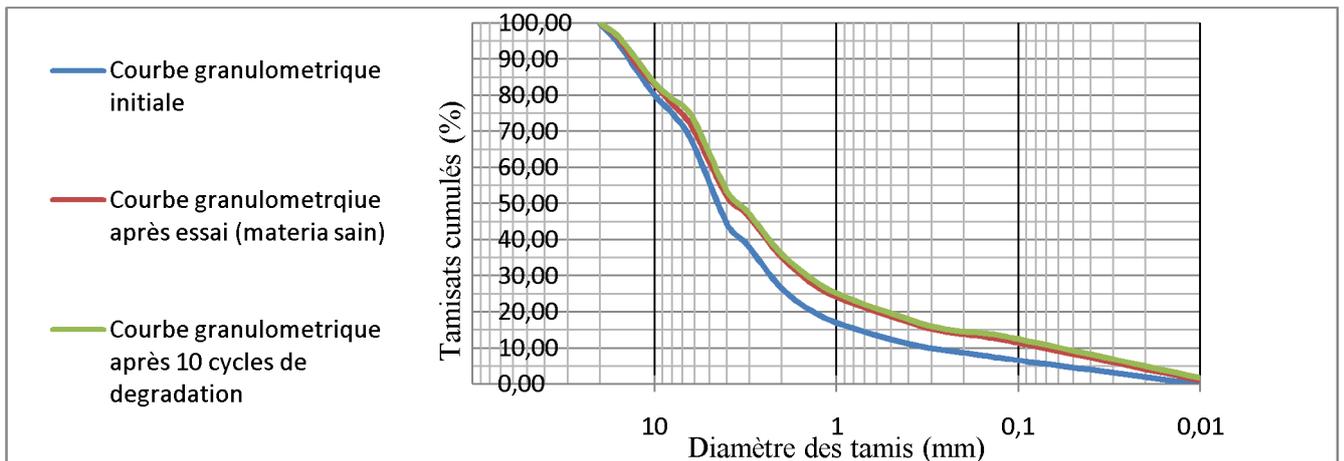


Fig8: Courbe granulométrique schiste + phosphates, Énergie de compactage 55 coups 1<sup>ère</sup> série.

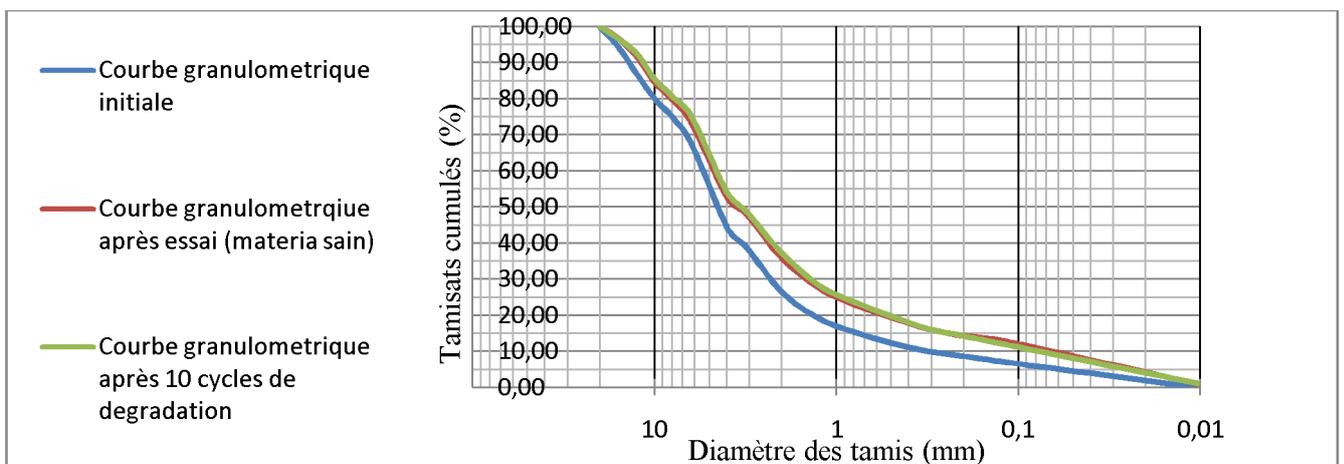


Fig9: Courbe granulométrique schiste + phosphates, Énergie de compactage 75 coups 1<sup>ère</sup> série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 1ère série schiste + sulfates

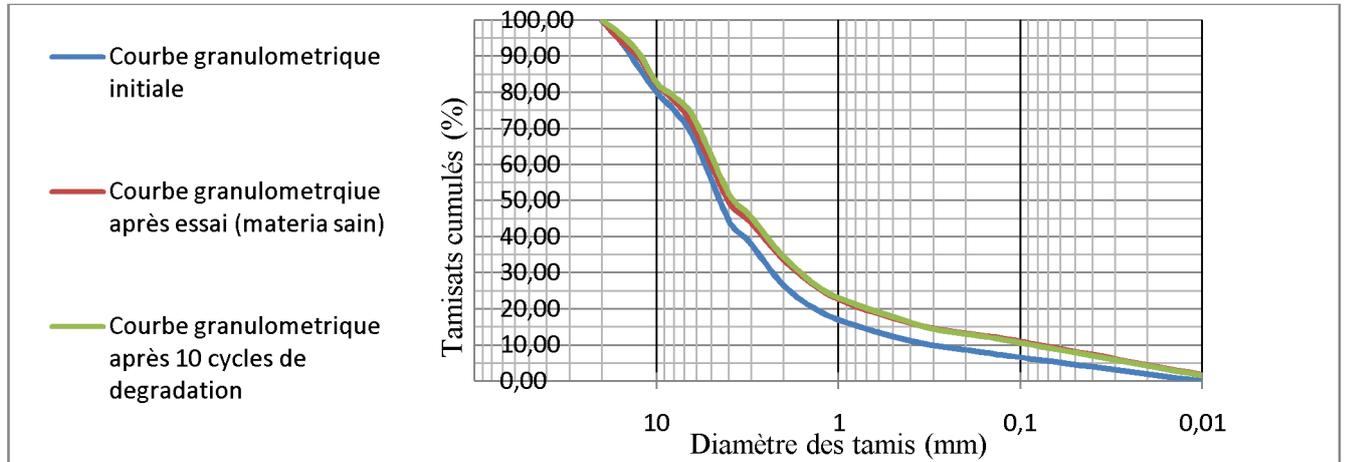


Fig10: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 25 coups 1<sup>ère</sup> série.

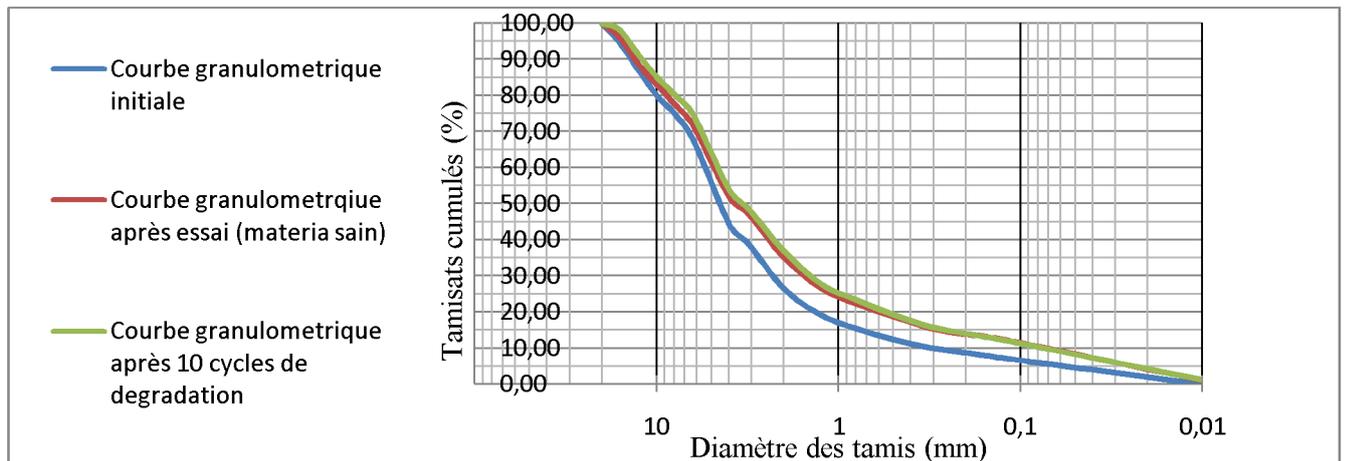


Fig11: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 55 coups 1<sup>ère</sup> série.

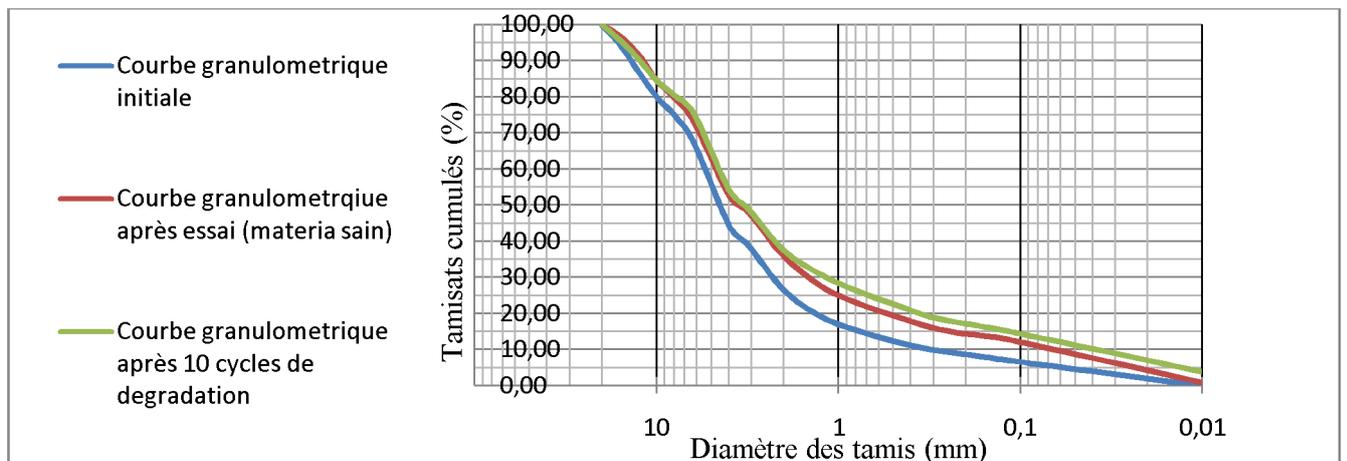


Fig12: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 75 coups 1<sup>ère</sup> série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 2ème série schiste +eau

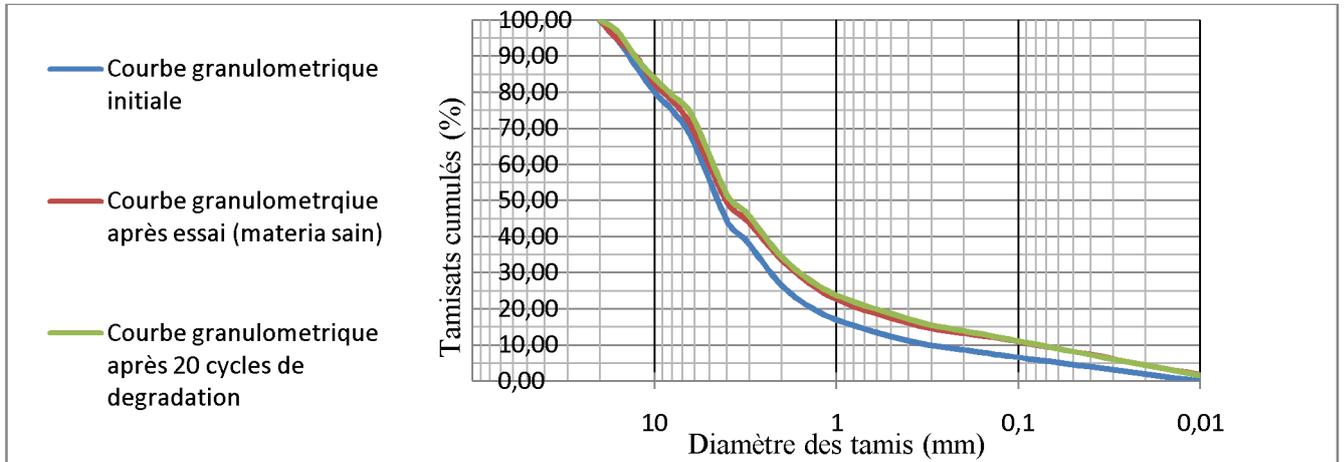


Fig13: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 25 coups 2ème, Série

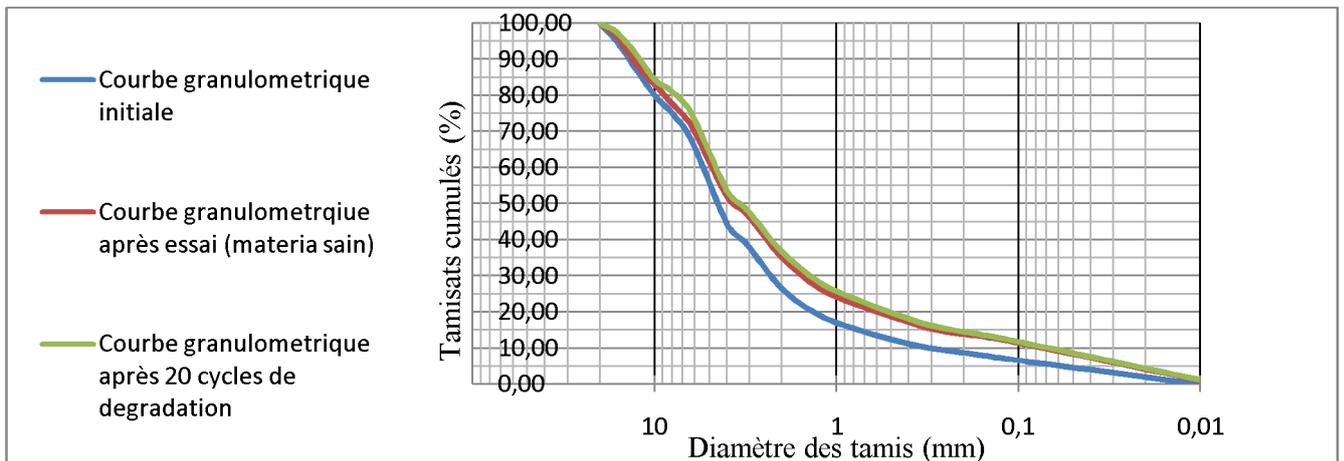


Fig14: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 55 coups 2ème, Série

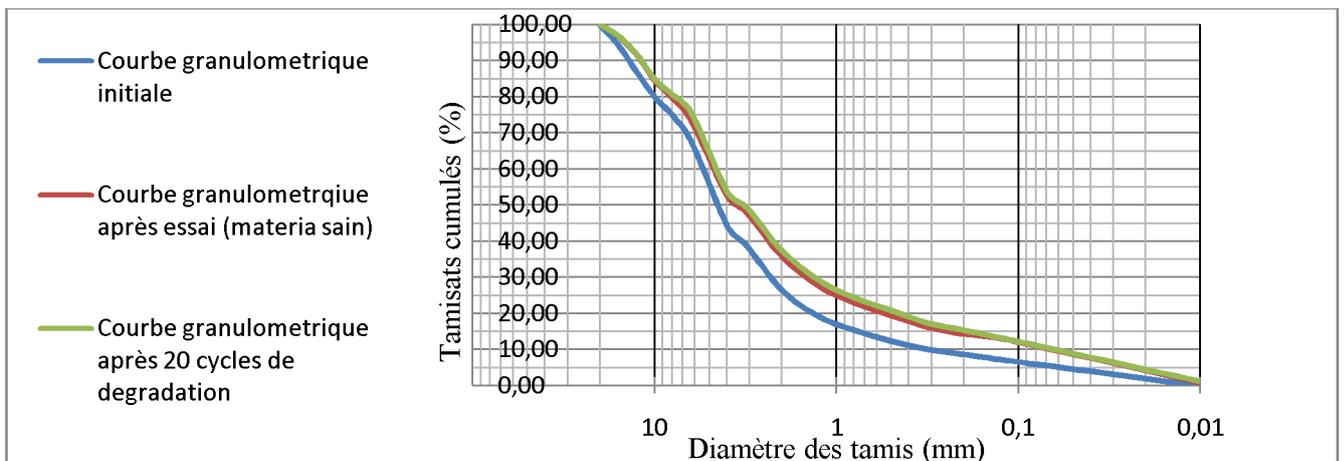


Fig15: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 75 coups 2ème, Série

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 2ème série schiste +détergents

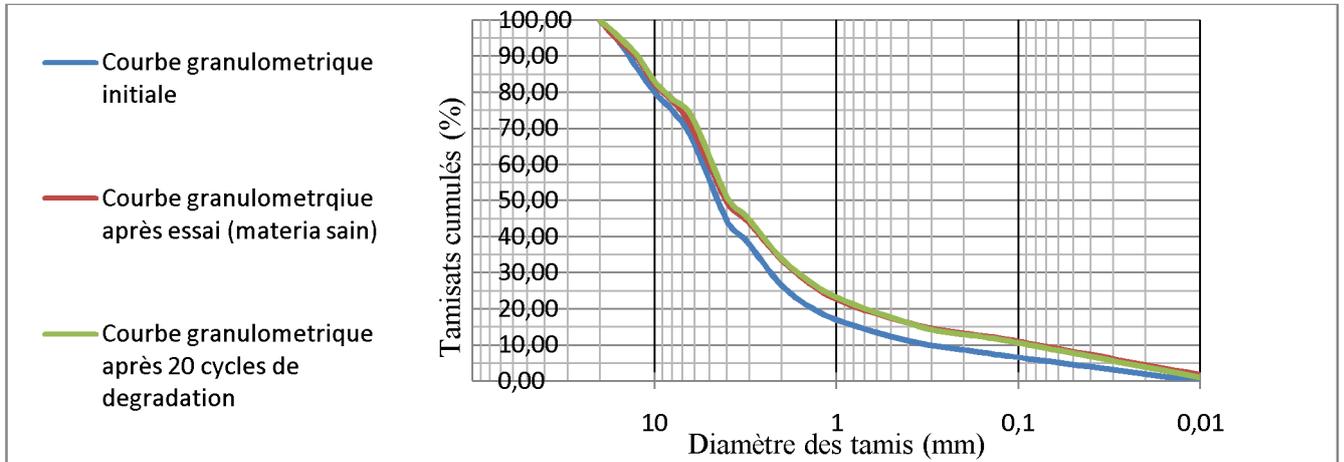


Fig16: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 25 coups 2ème, Série

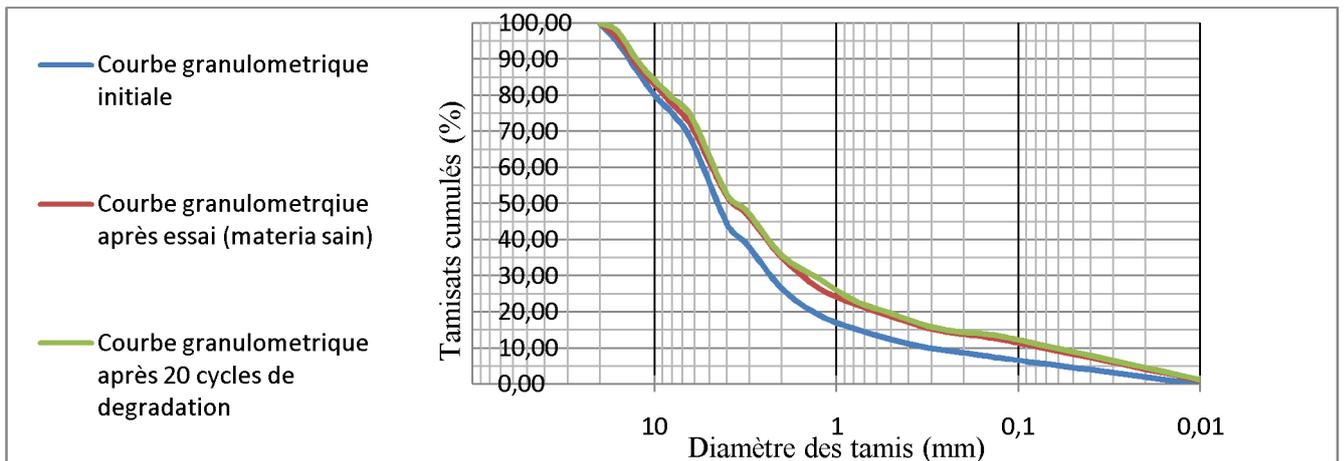


Fig17: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 55 coups 2ème, Série

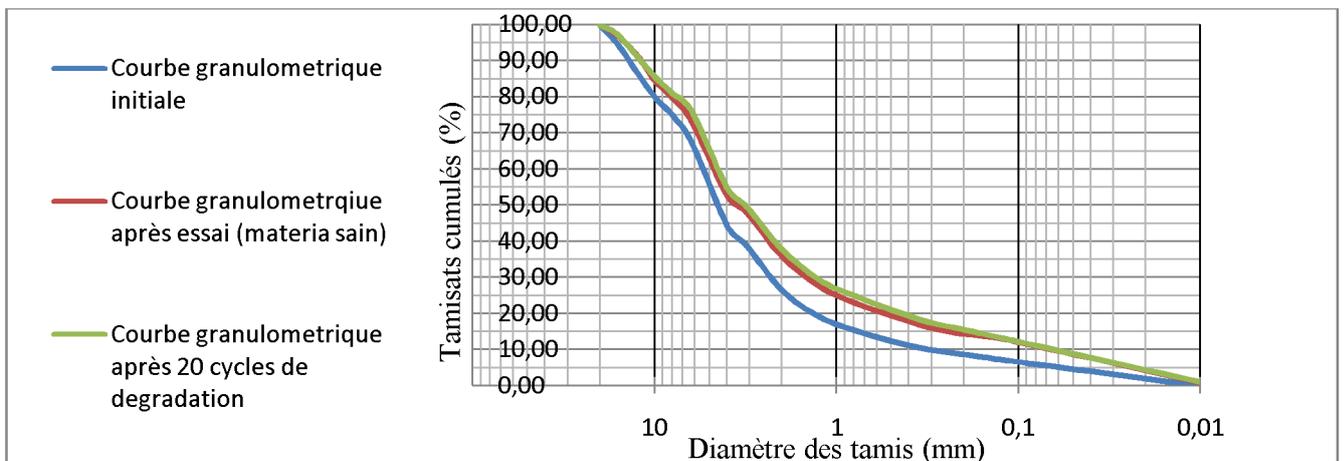


Fig18: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 75 coups 2ème, Série

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 2ème série schiste + phosphates

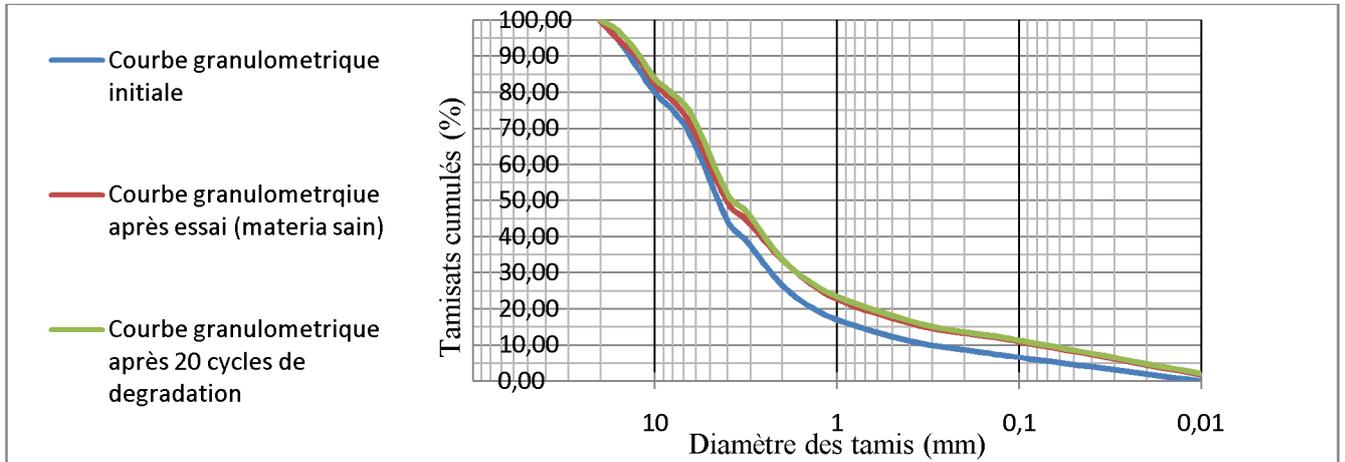


Fig19: Courbe granulométrique schiste + phosphates, Énergie de compactage 25 coups 2ème, Série

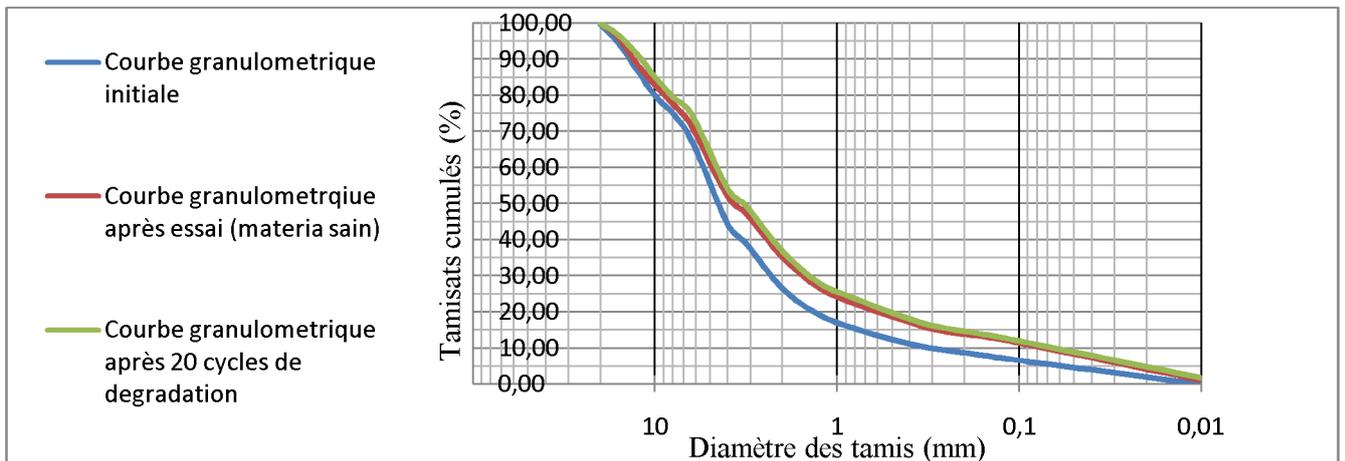


Fig20: Courbe granulométrique schiste + phosphates, Énergie de compactage 55 coups 2ème, Série

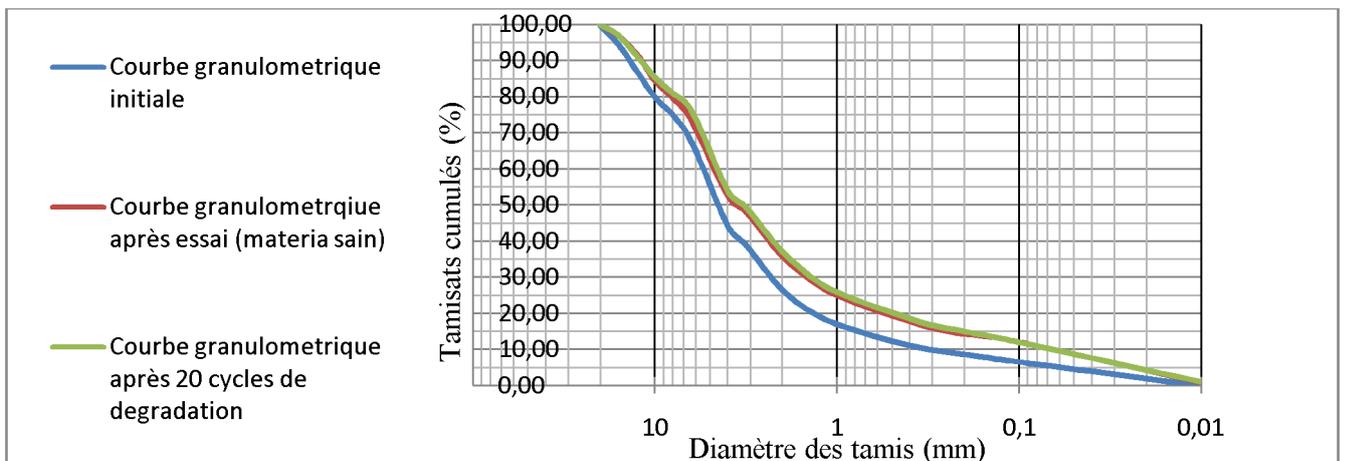


Fig21: Courbe granulométrique schiste + phosphates, Énergie de compactage 75 coups 2ème, Série

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 2ème série schiste + sulfates

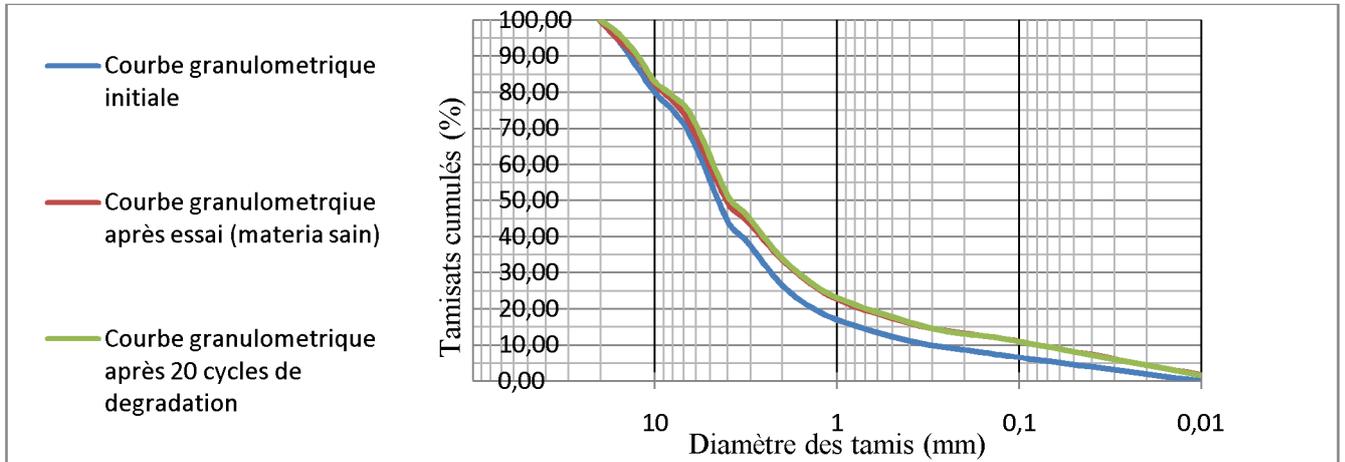


Fig22: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 25 coups 2ème, Série

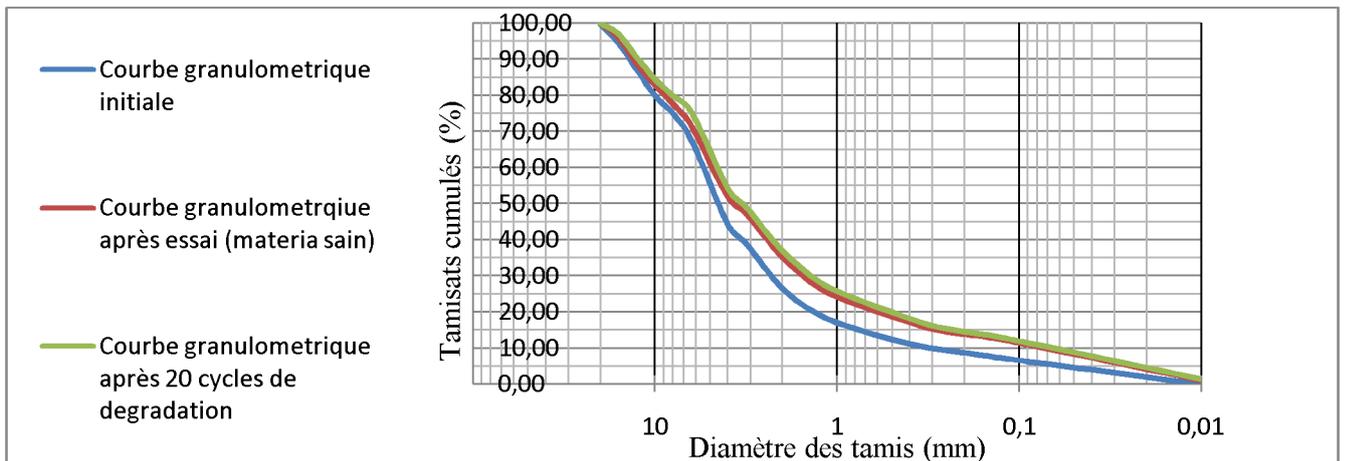


Fig23: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 55 coups 2ème, Série

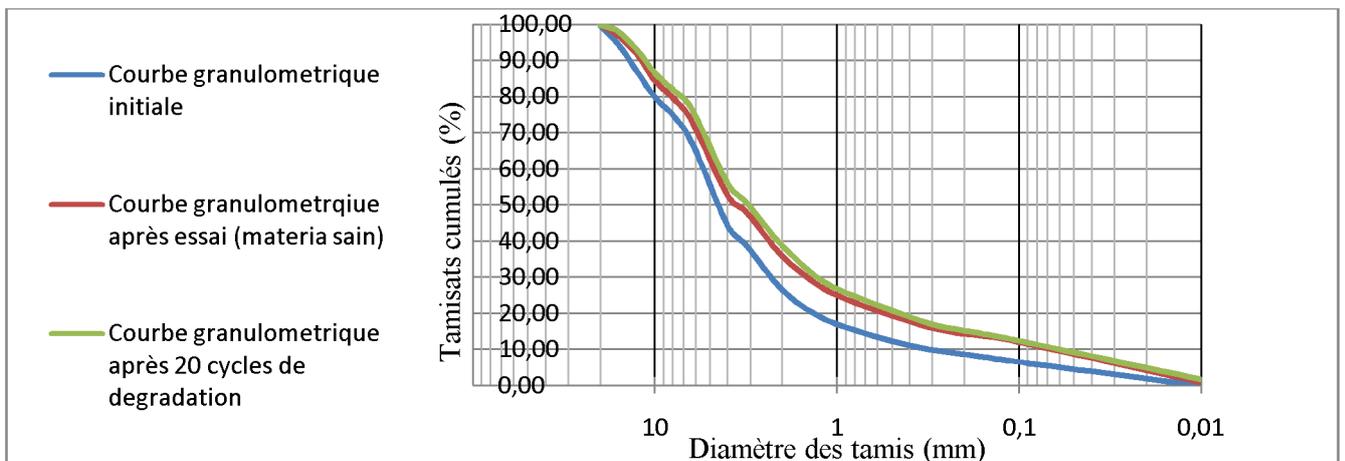


Fig24: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 75 coups 2ème, Série

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 3ème série schiste +eau

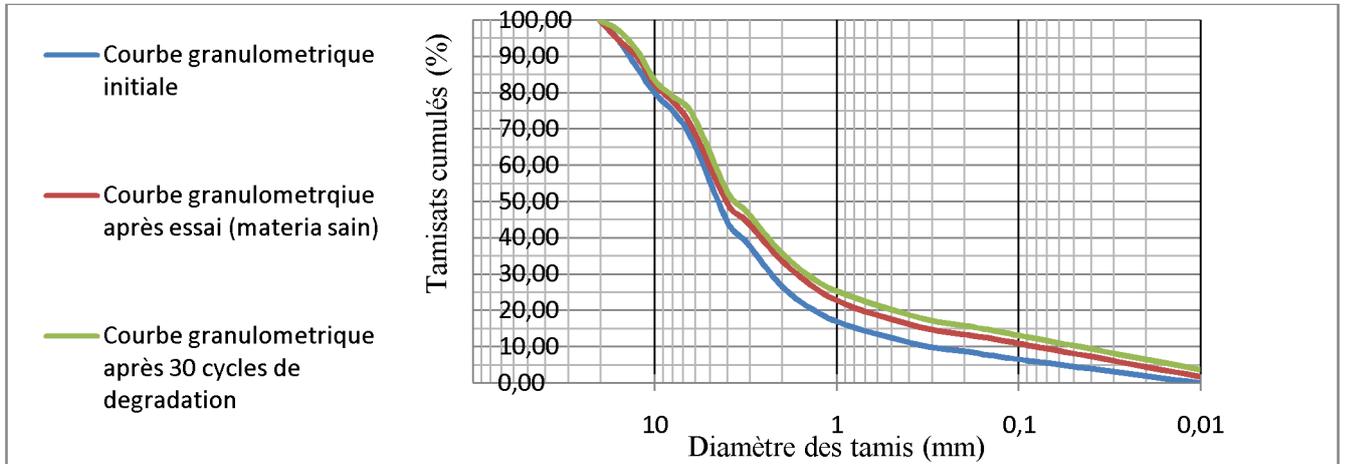


Fig 25: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 25 coups 3ème, Série.

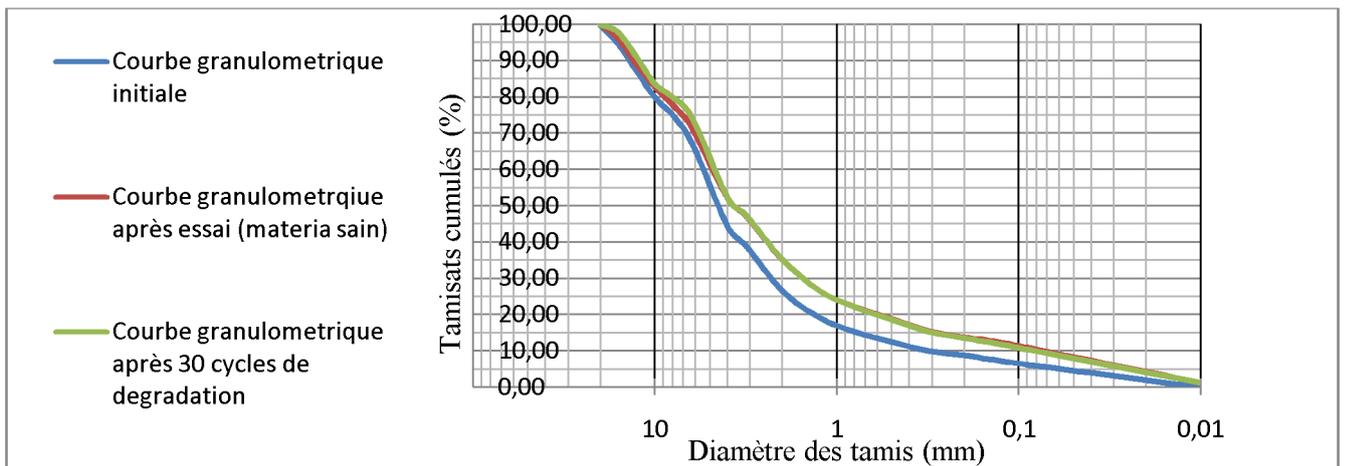


Fig26 : Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 55 coups 3ème, Série.

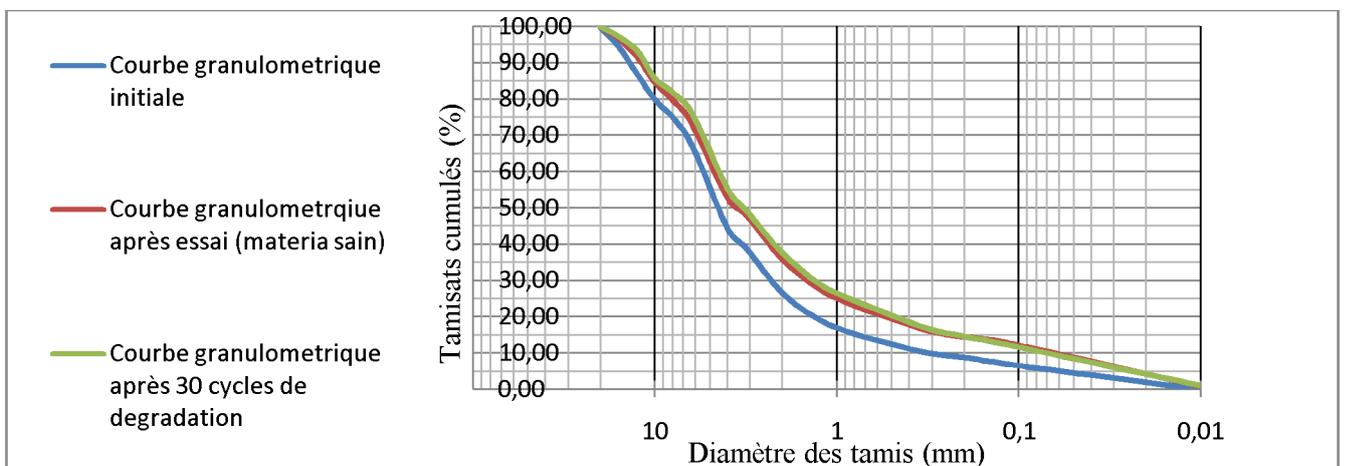


Fig 27: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 75 coups 3ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 3ème série schiste +détergents

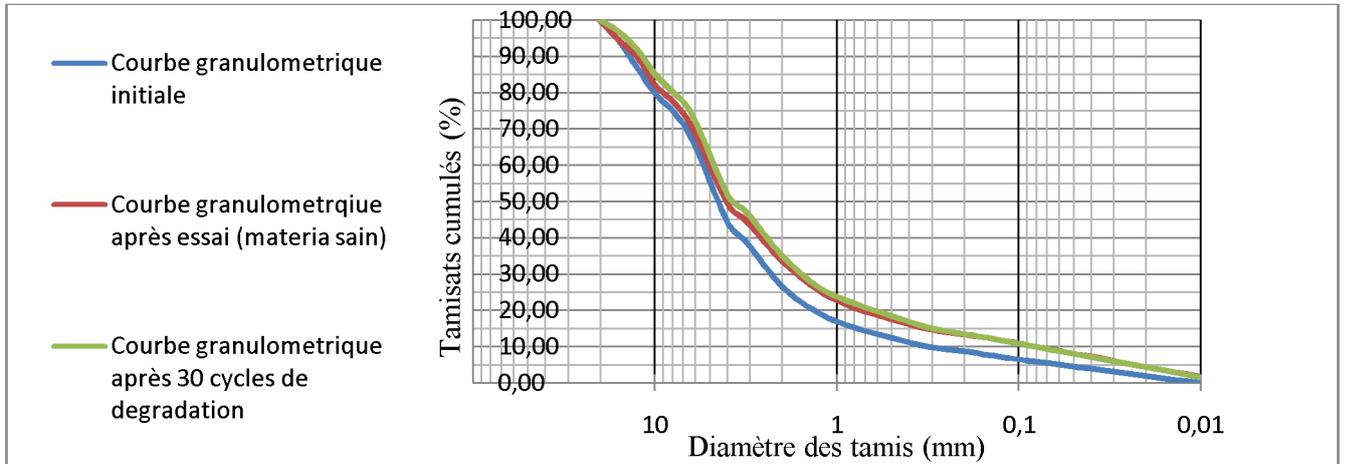


Fig 28: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 25 coups 3ème, Série.

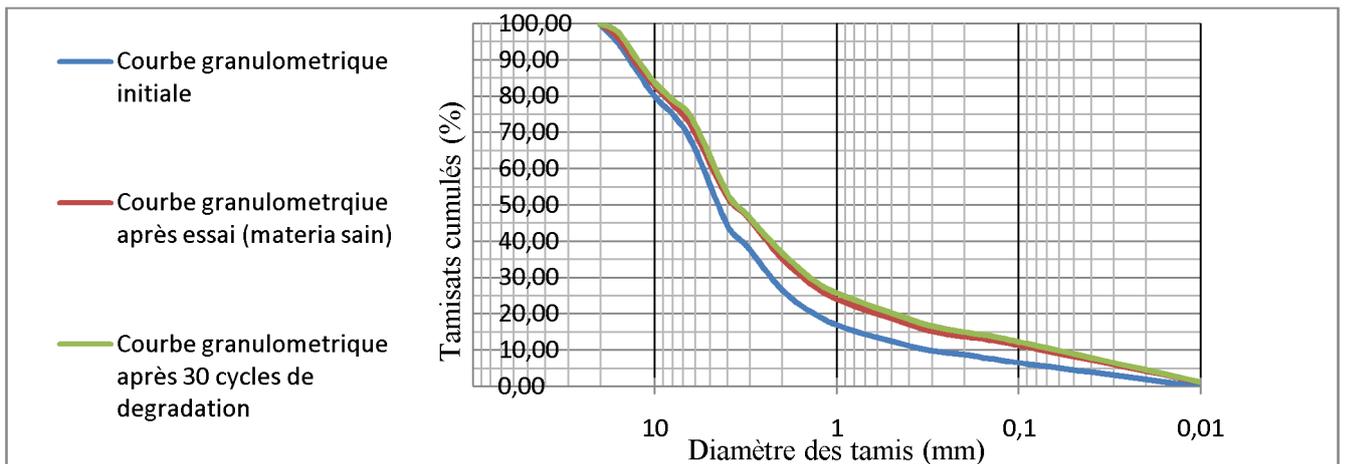


Fig 29: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 55 coups 3ème, Série.

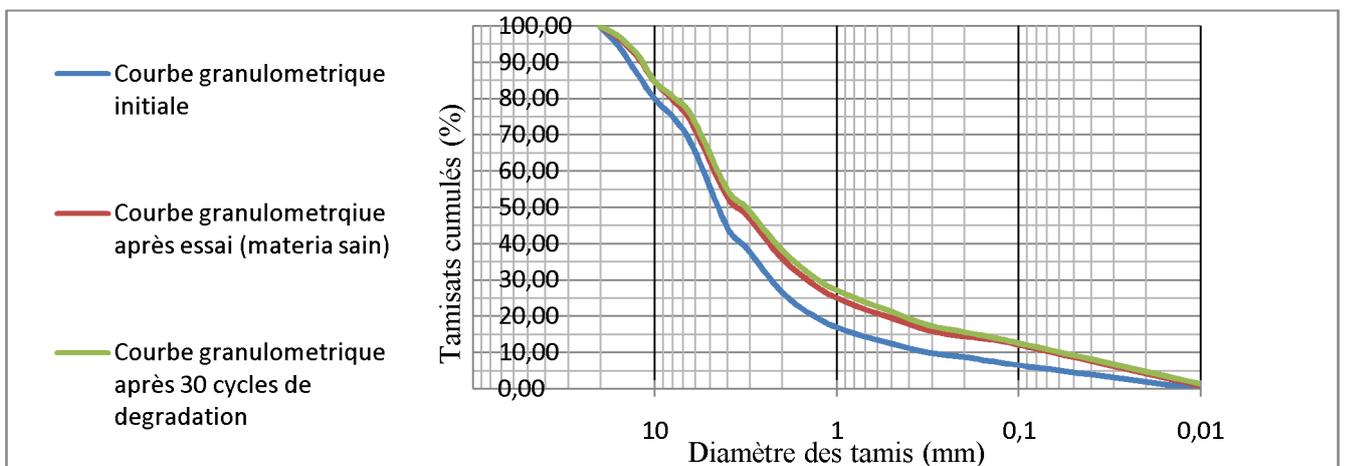


Fig 30: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 75 coups 3ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 3ème série schiste + phosphates

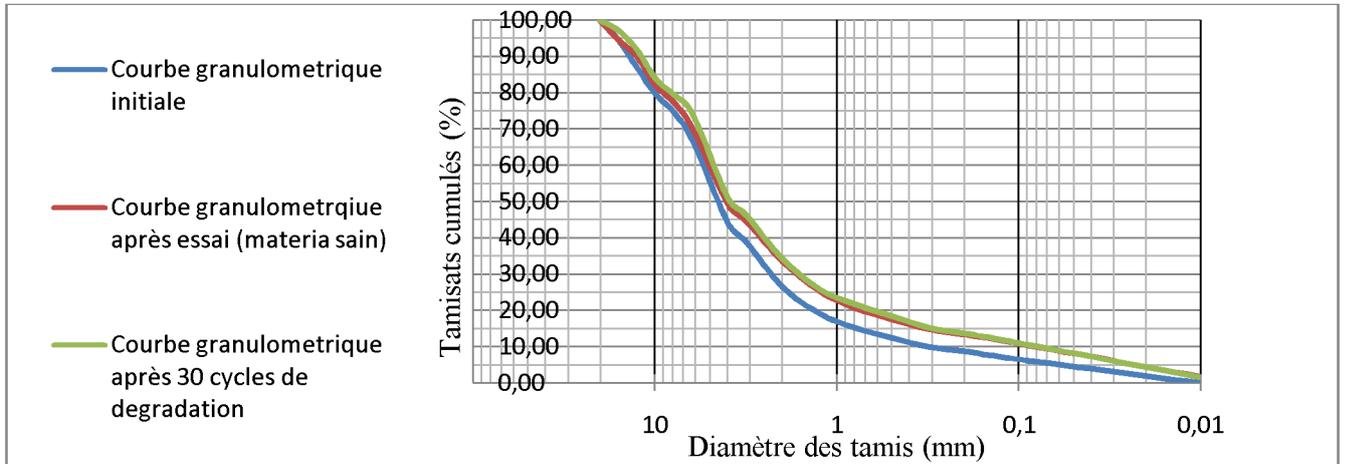


Fig 31: Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 25 coups 3ème, Série.

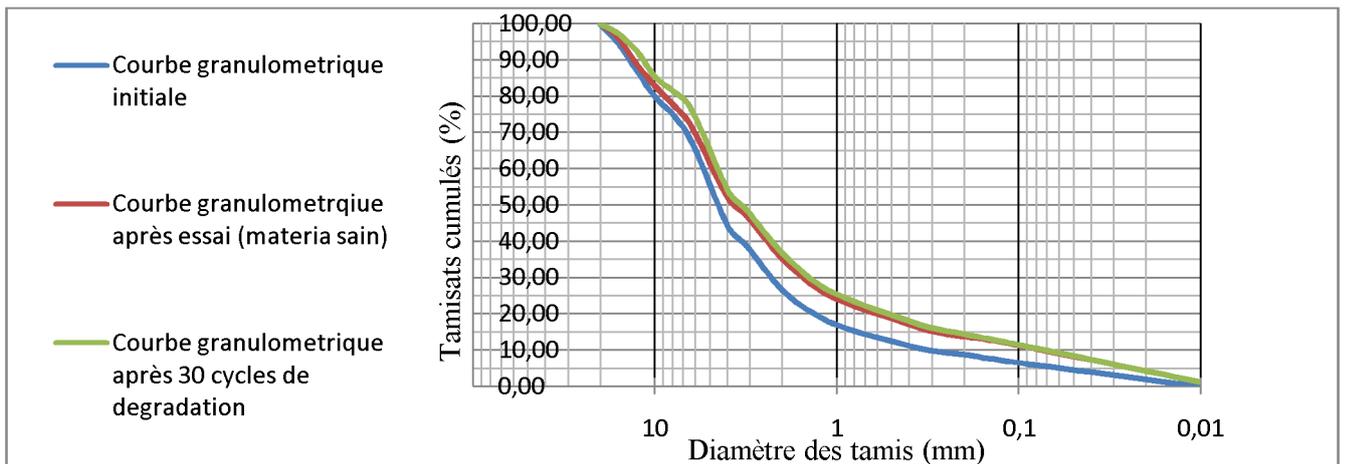


Fig 32: Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 55 coups 3ème, Série.

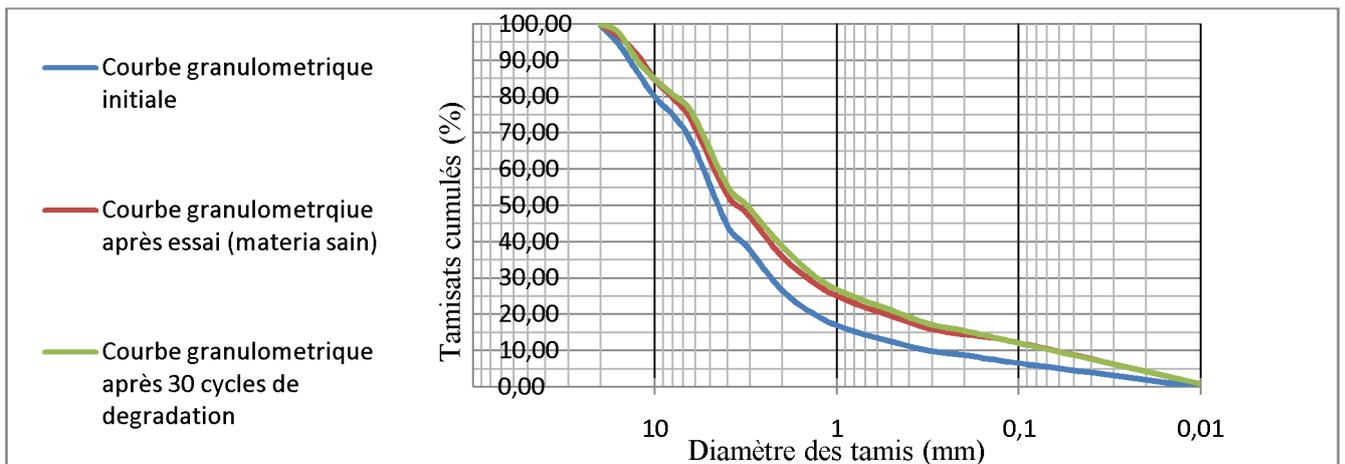


Fig33: Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 75 coups 3ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 3ème série schiste + sulfates

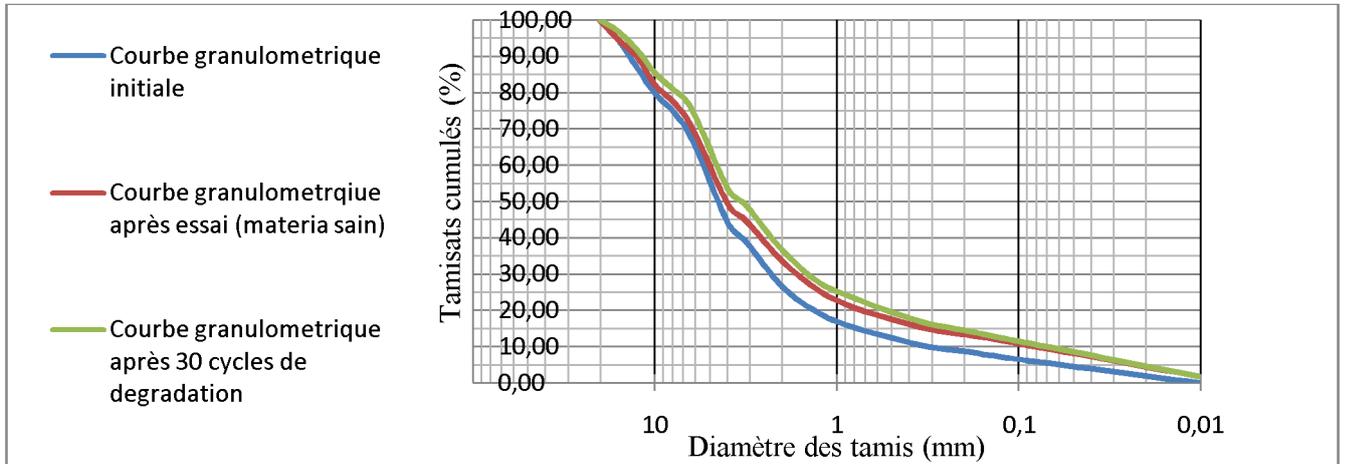


Fig 34: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 25 coups 3ème, Série.

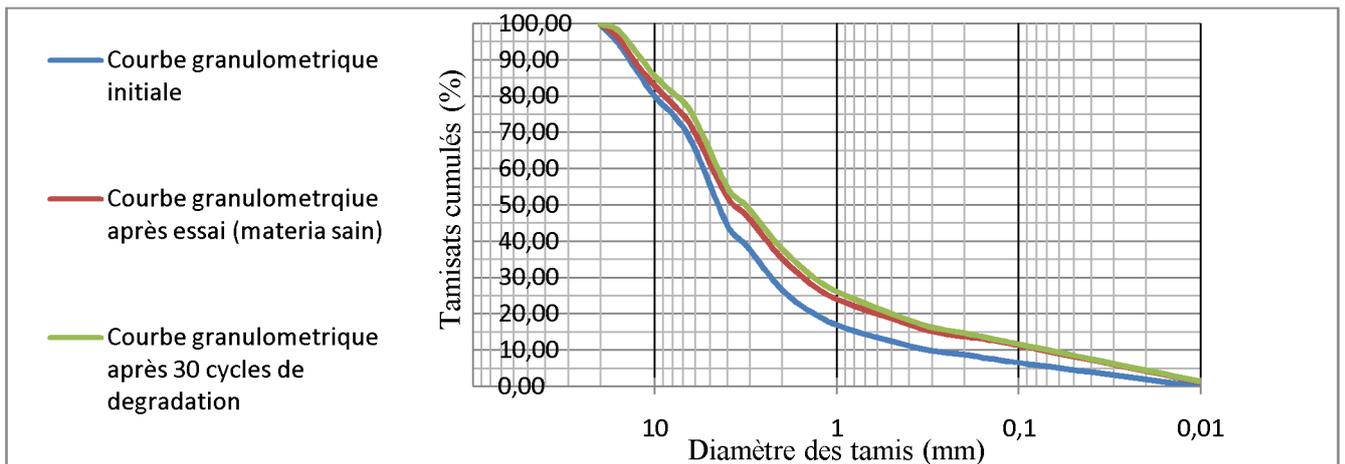


Fig 35: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 55 coups 3ème, Série.

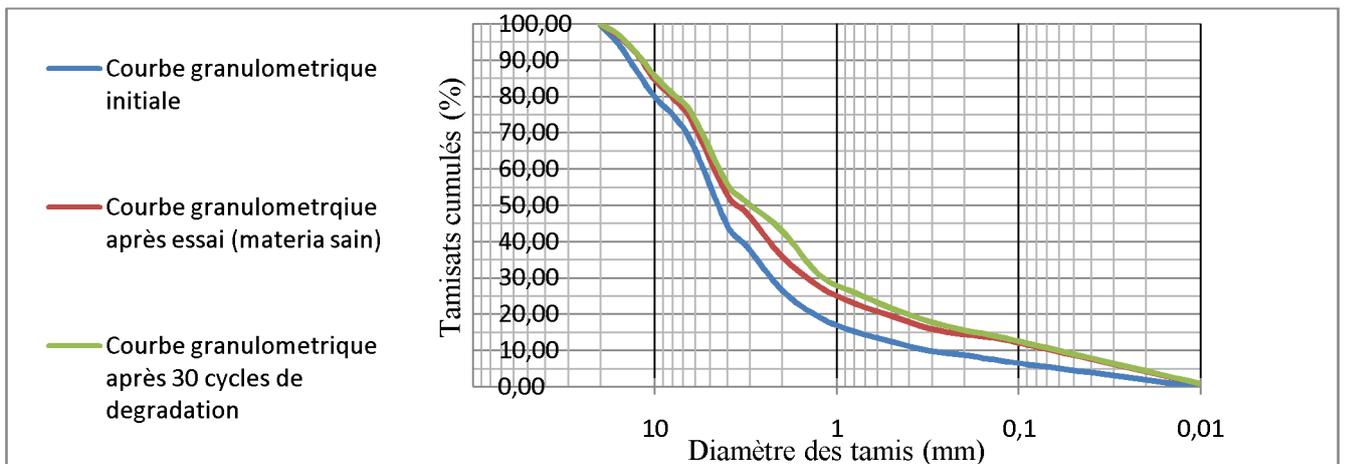


Fig 36: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 75 coups 3ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 4ème série schiste +eau

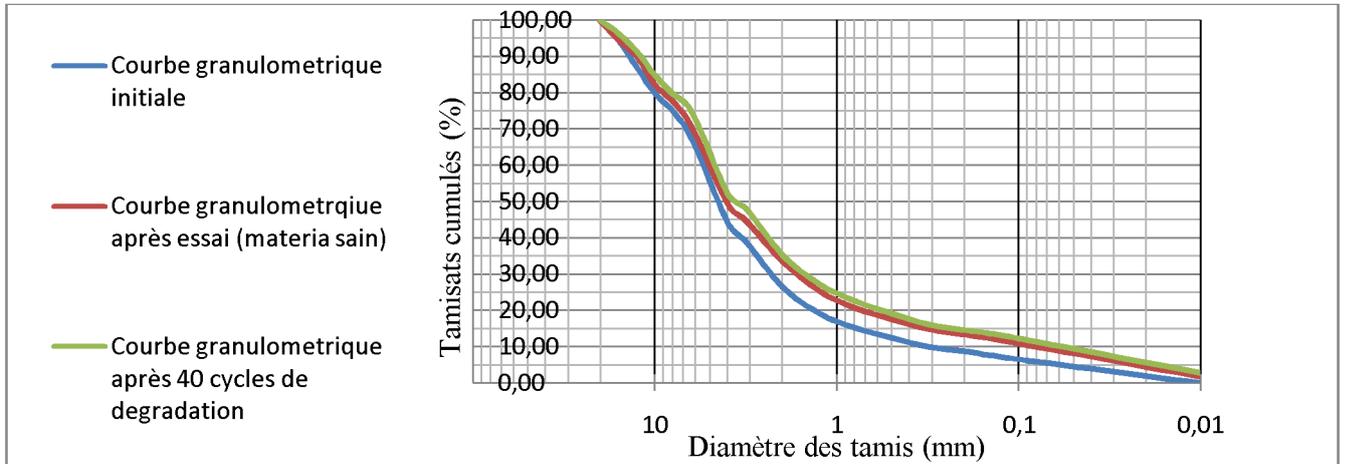


Fig37: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 25 coups 4ème, Série.

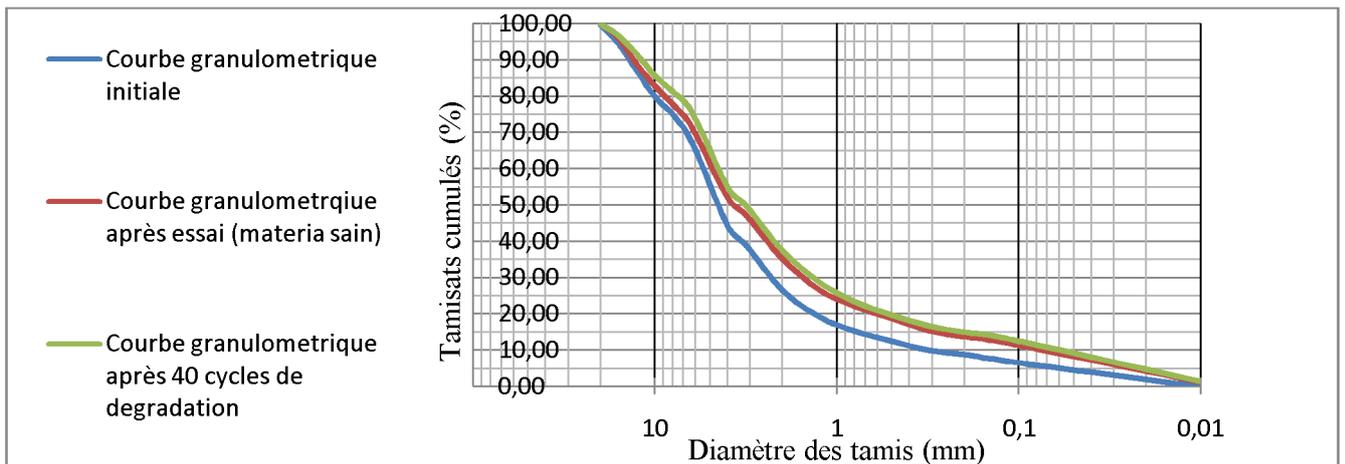


Fig 38 : Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 55 coups 4ème, Série.

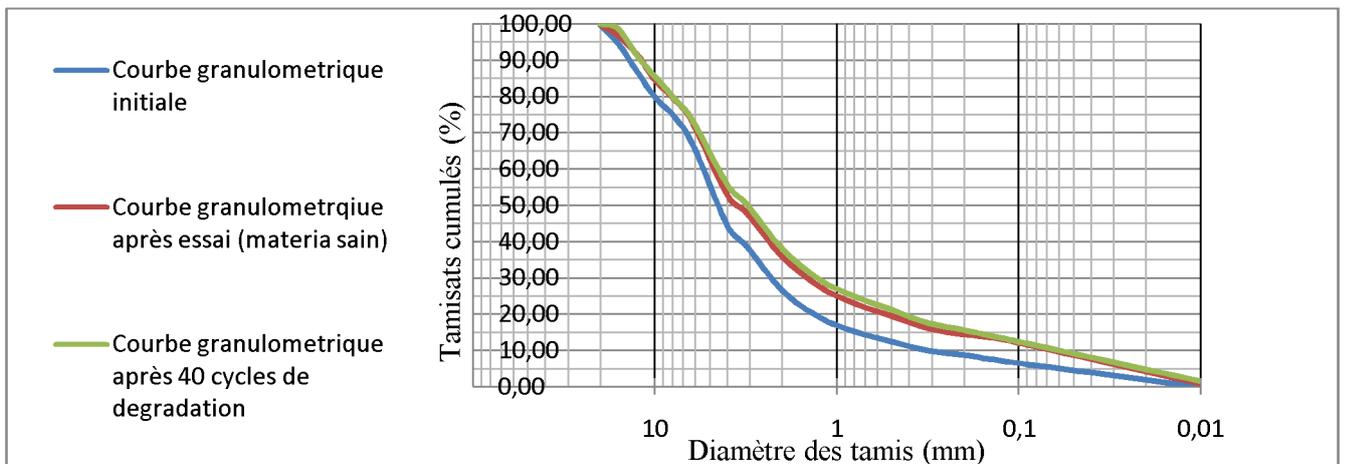


Fig 39: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 75 coups 4ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 4ème série schiste +détergents

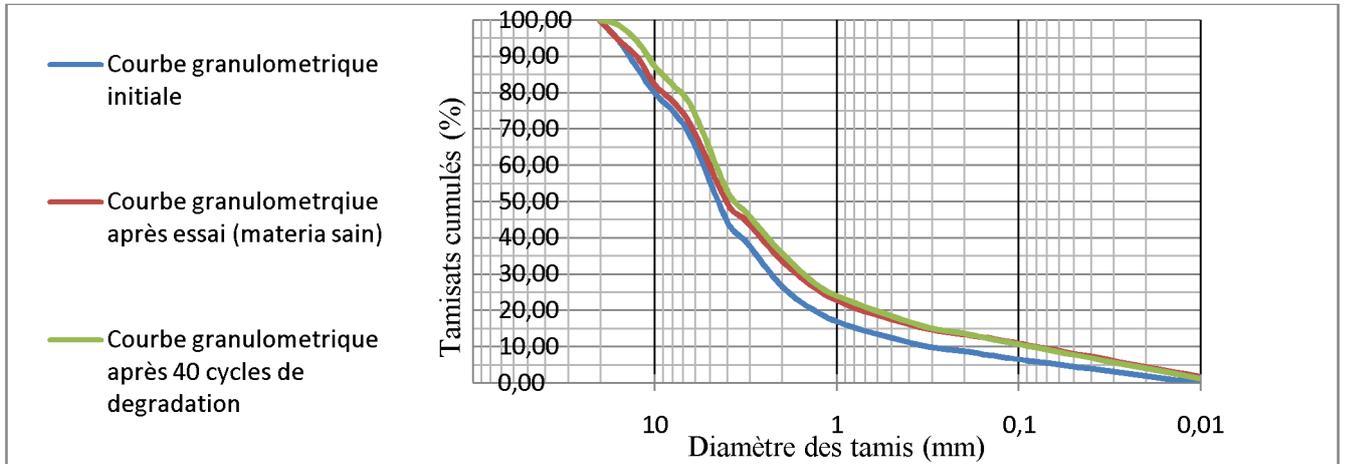


Fig40: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 25 coups 4ème, Série.

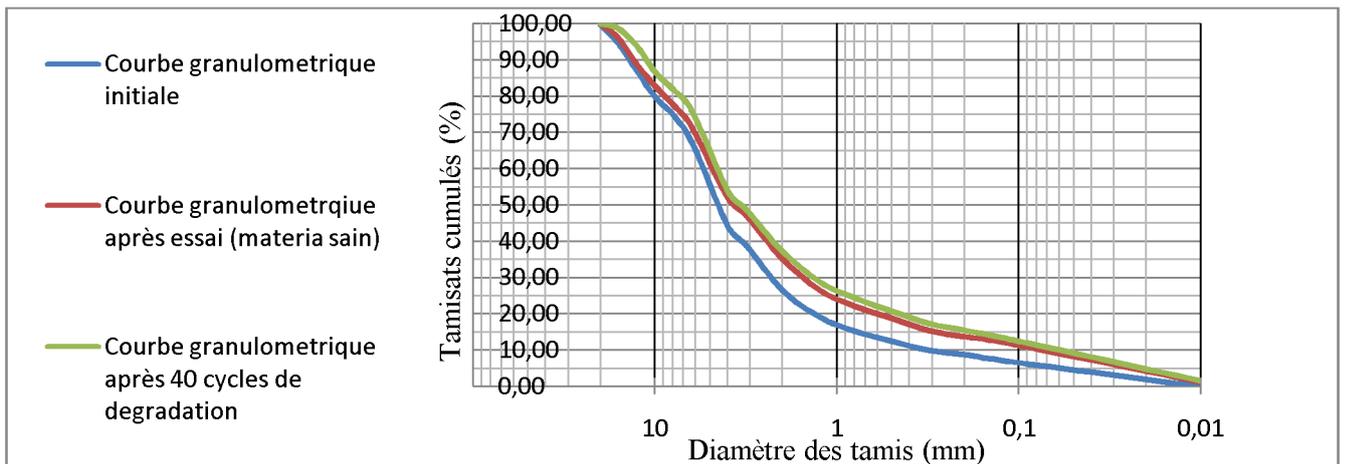


Fig 41: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 55 coups 4ème, Série.

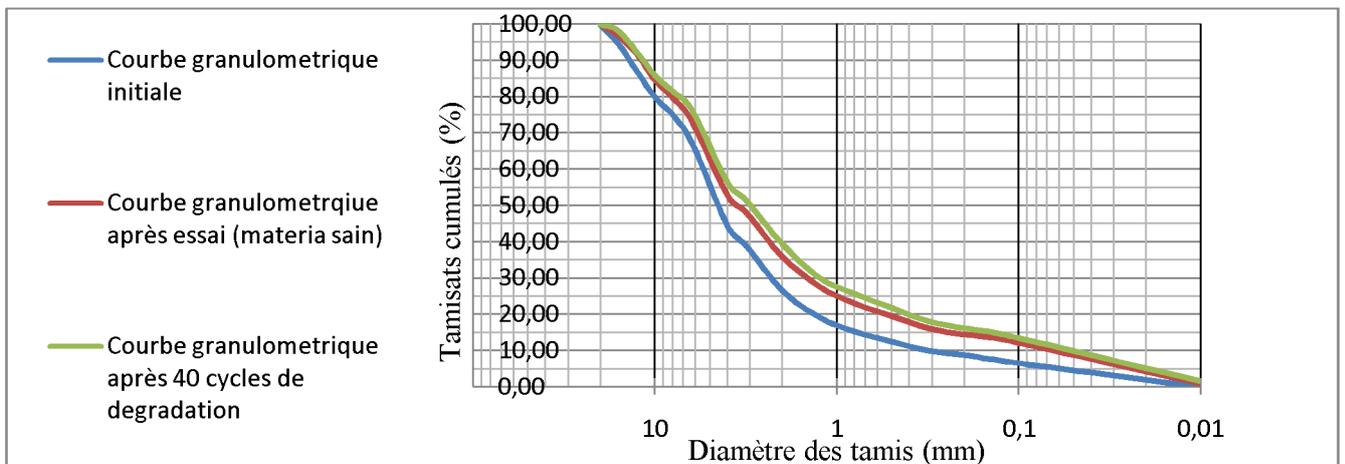


Fig 42 : Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 75 coups 4ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 4ème série schiste + phosphates

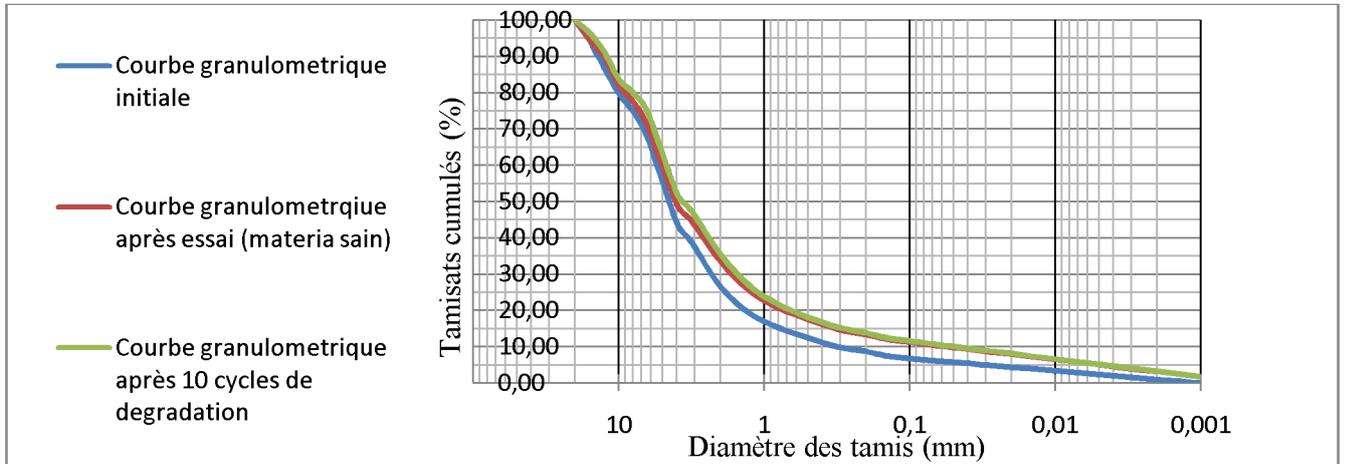


Fig 43 : Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 25 coups 4ème, Série.

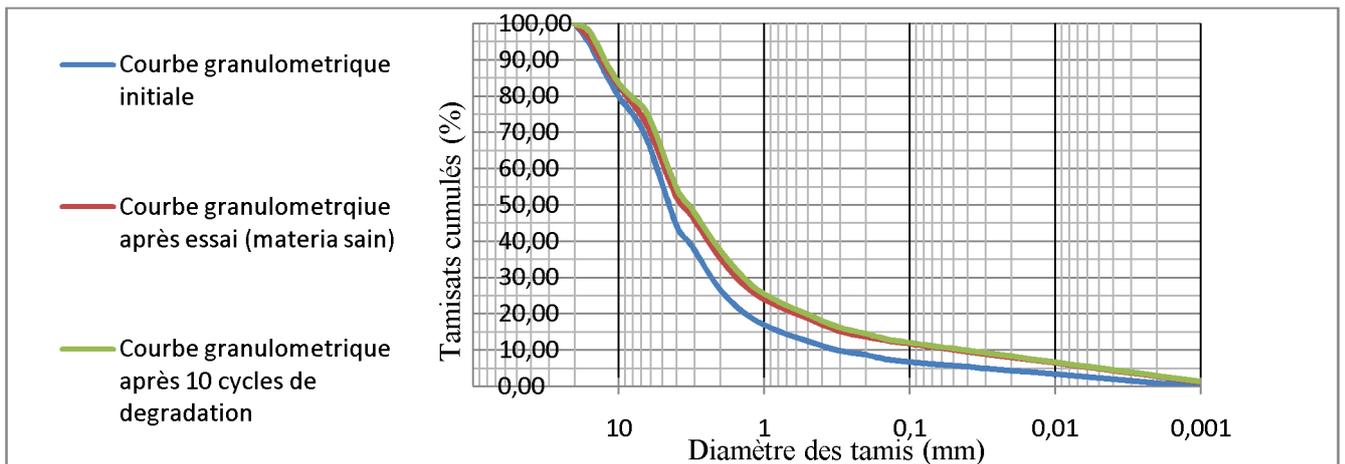


Fig 44 : Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 55 coups 4ème, Série.

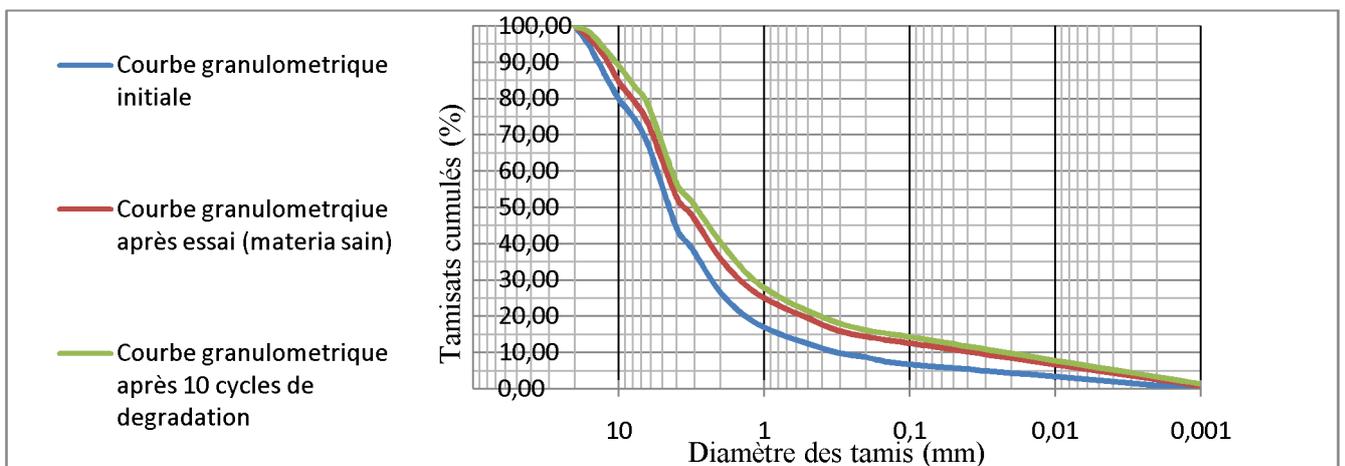


Fig 45 : Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 75 coups 4ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 4ème série schiste + sulfates

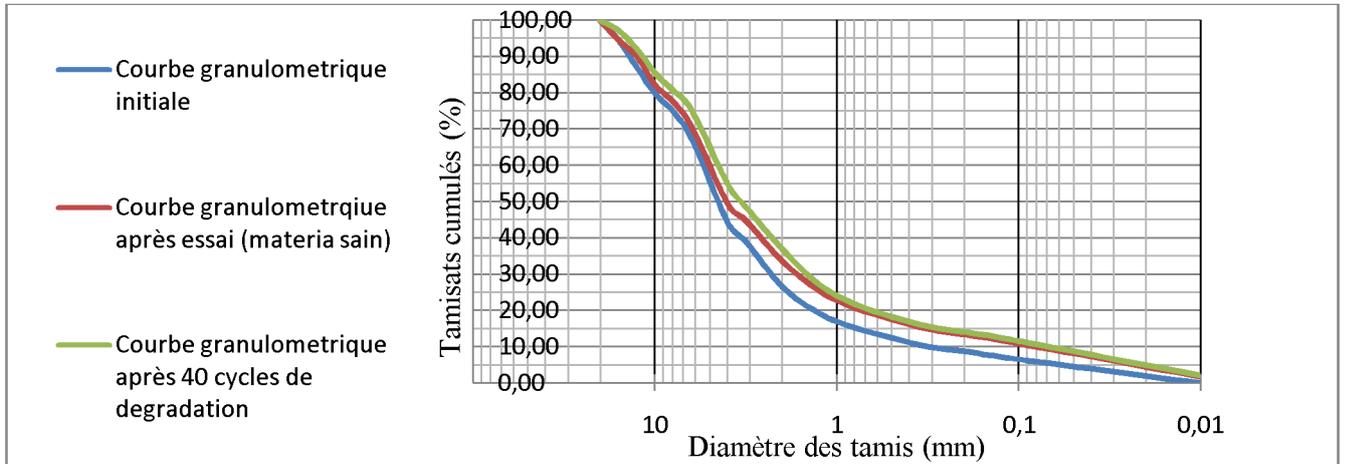


Fig 46 : Courbe granulométrique schiste +sulfates, Énergie de compactage 25 coups 4ème, Série.

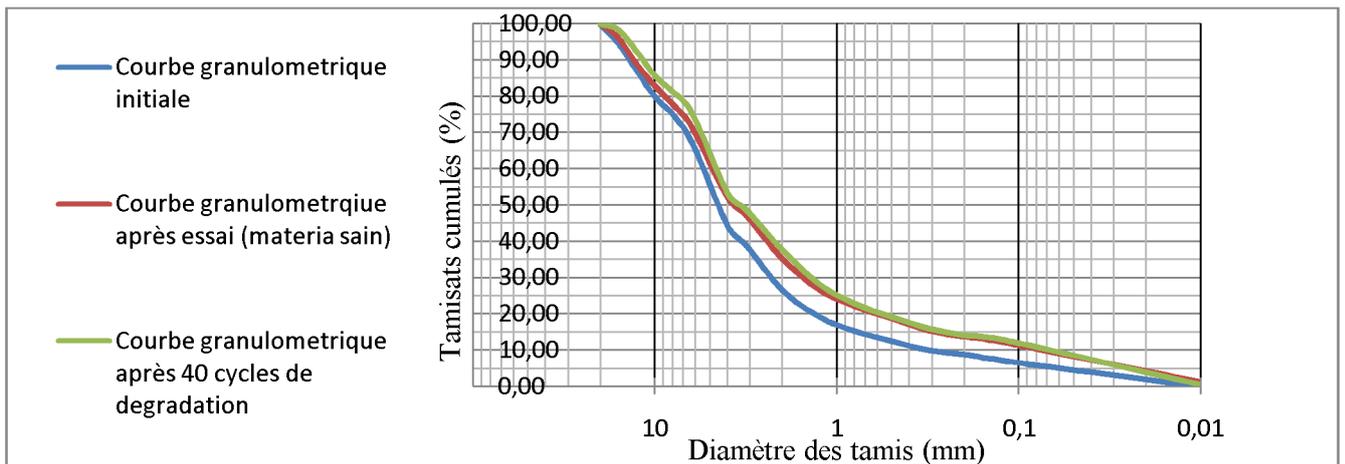


Fig 47 : Courbe granulométrique schiste +sulfates, Énergie de compactage 55 coups 4ème, Série.

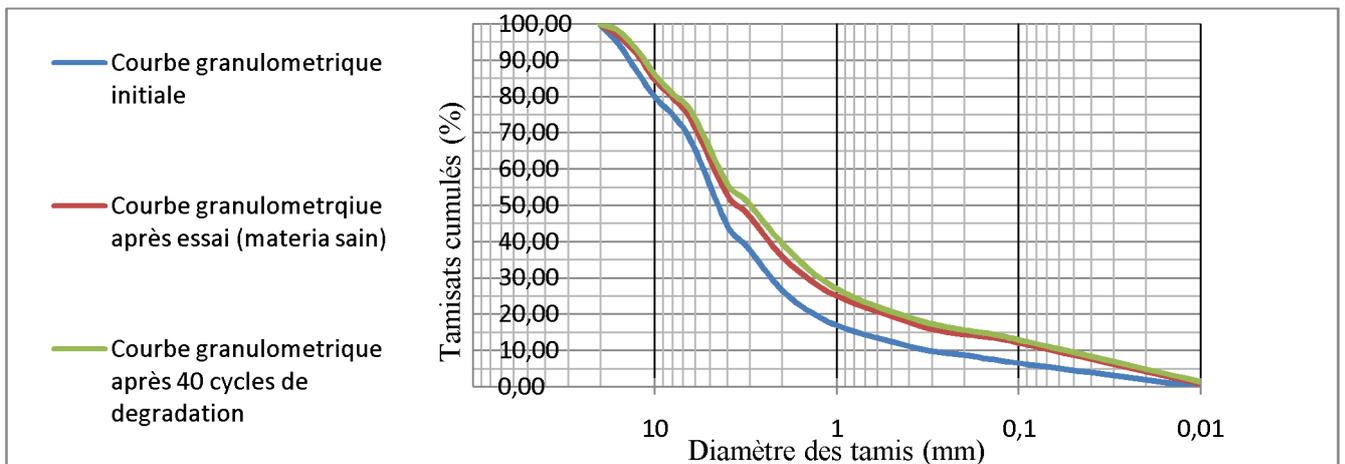


Fig 48 : Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 75 coups 4ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 5ème série schiste +eau

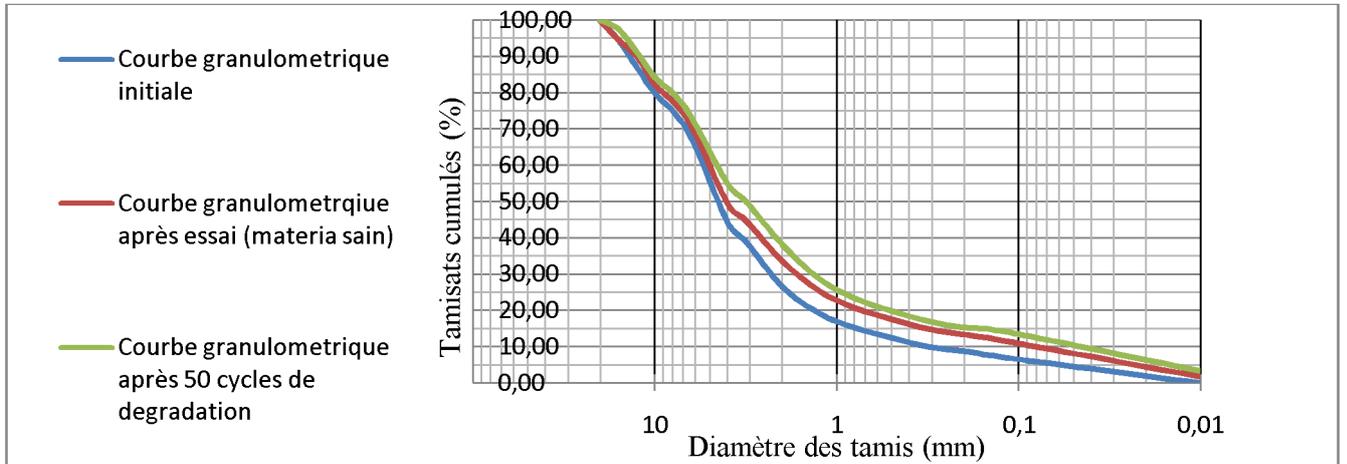


Fig 49: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 25 coups 5ème, Série.

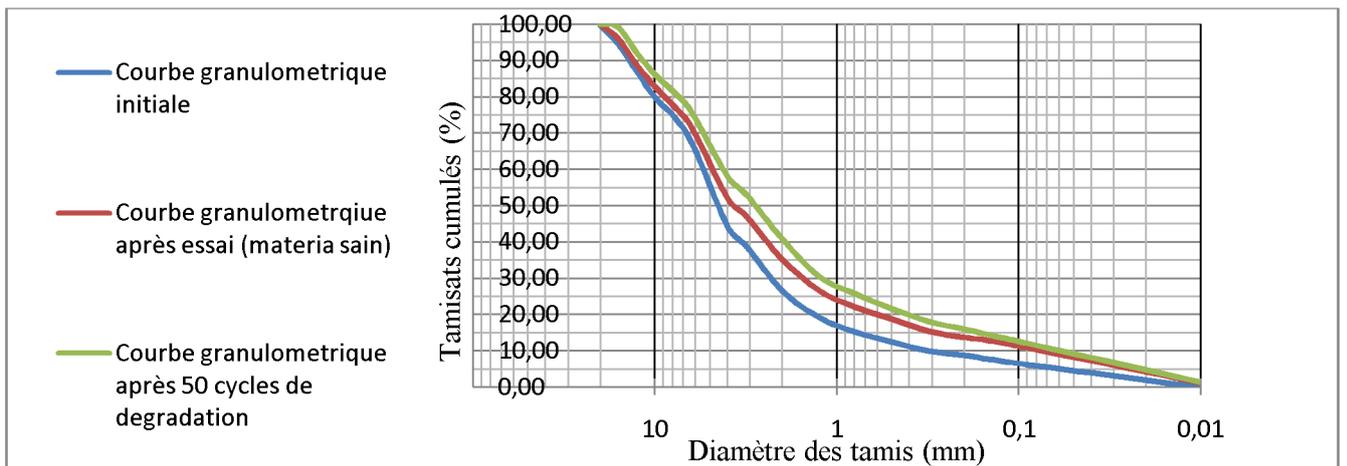


Fig 50 : Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 55 coups 5ème, Série.

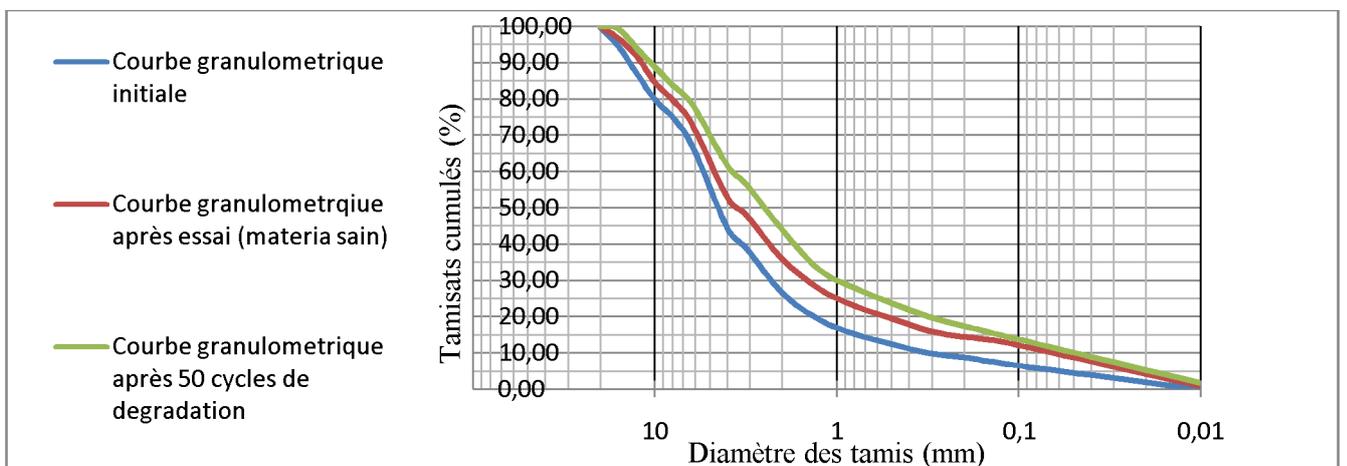


Fig 51: Courbe granulométrique schiste +eau, Énergie de compactage 75 coups 5ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 5ème série schiste +détergents

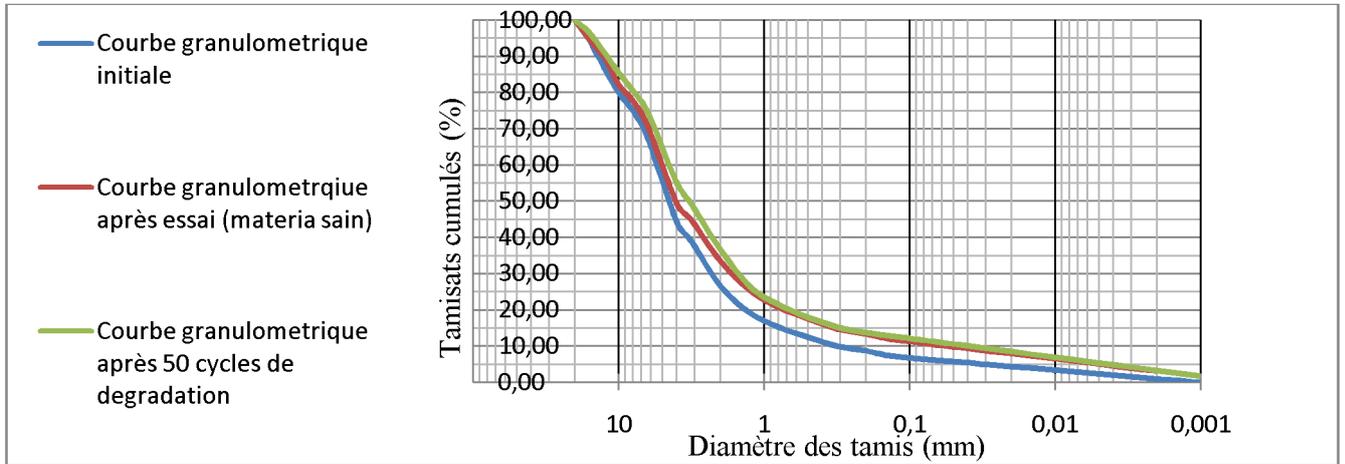


Fig 52: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 25 coups 5ème, Série.

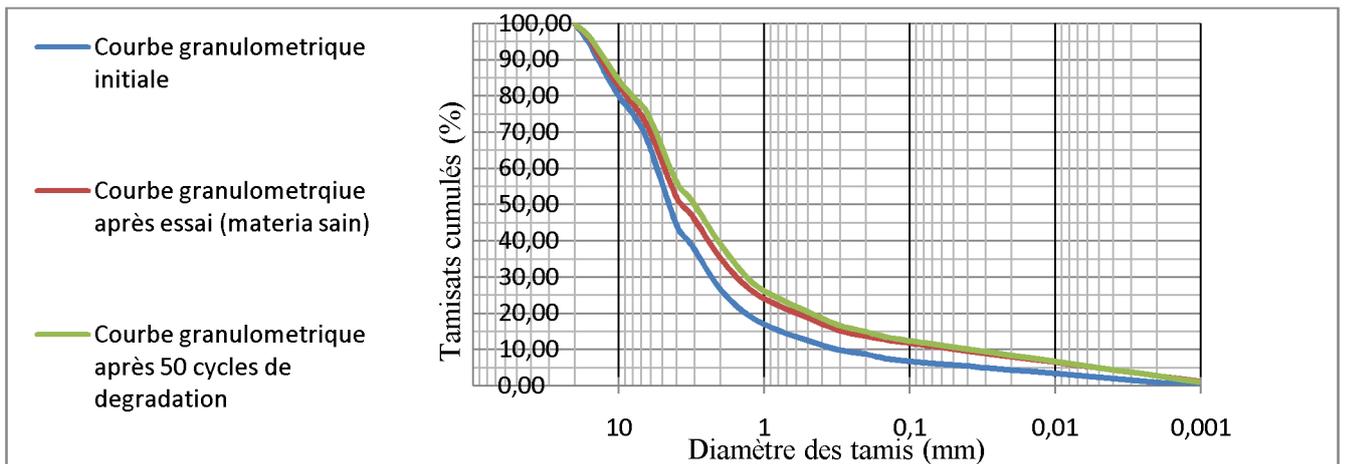


Fig 53: Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 55 coups 5ème, Série.

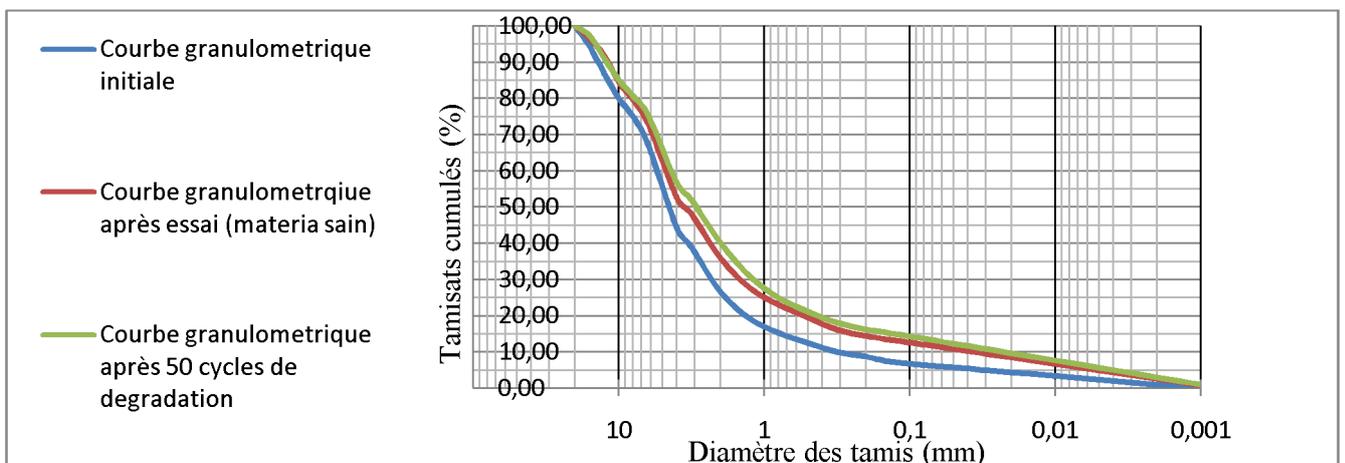


Fig 54 : Courbe granulométrique schiste +détergents, Énergie de compactage 75 coups 5ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 5ème série schiste + phosphates

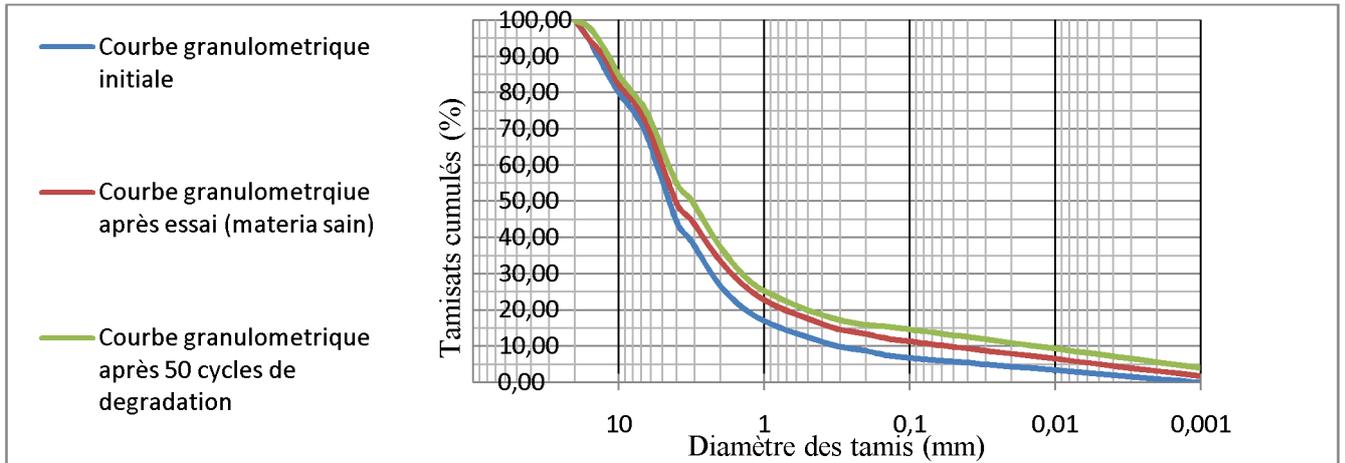


Fig 55 : Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 25 coups 5ème, Série.

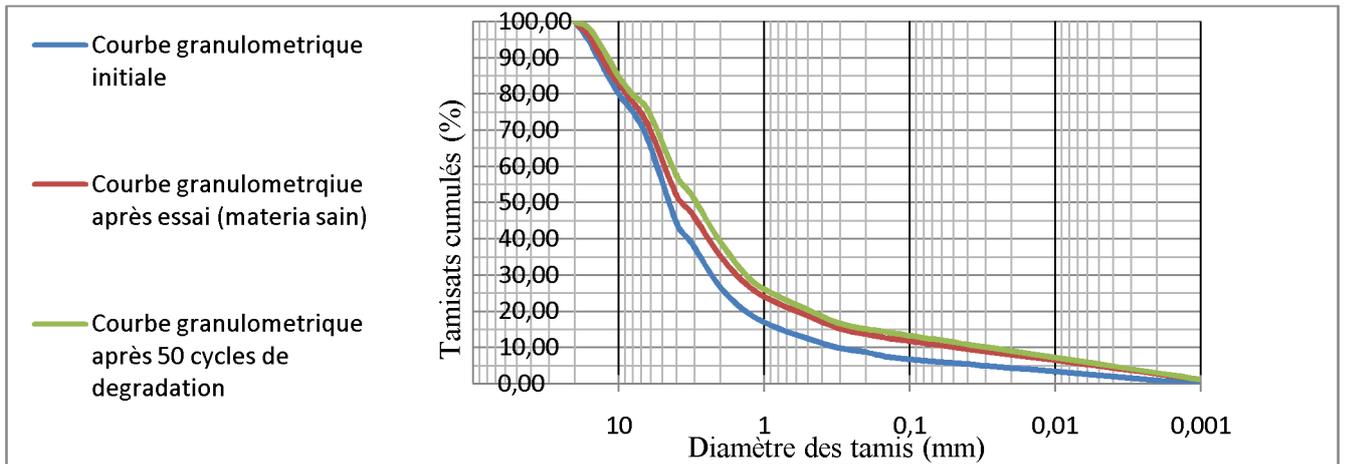


Fig 56 : Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 55 coups 5ème, Série.

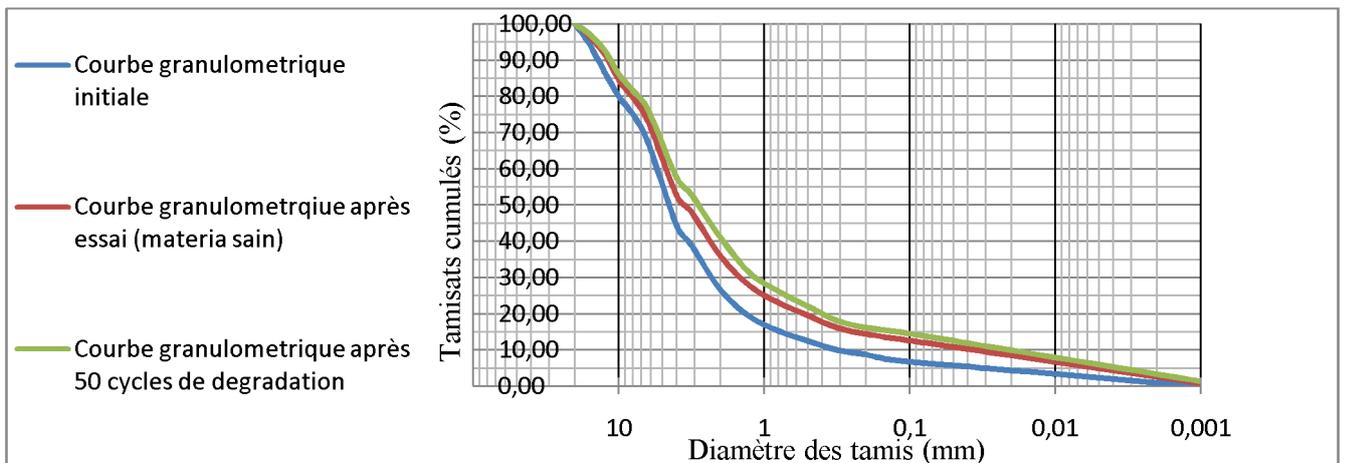


Fig 57 : Courbe granulométrique schiste +phosphates, Énergie de compactage 75 coups 5ème, Série.

# ANNEXE B

## Courbes granulométriques 5ème série schiste + sulfates

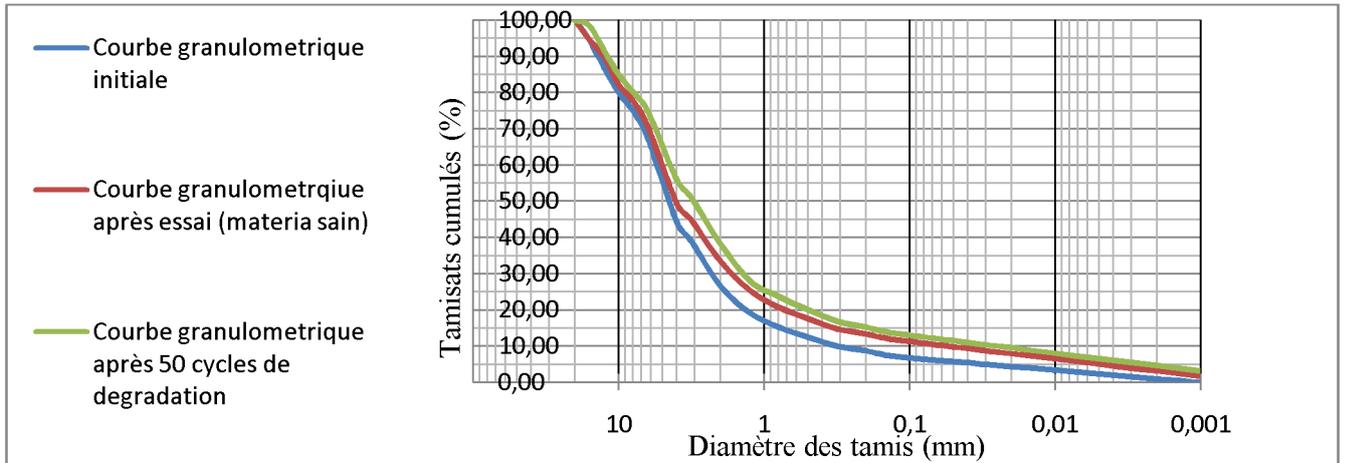


Fig 58 : Courbe granulométrique schiste +sulfates, Énergie de compactage 25 coups 5ème, Série.

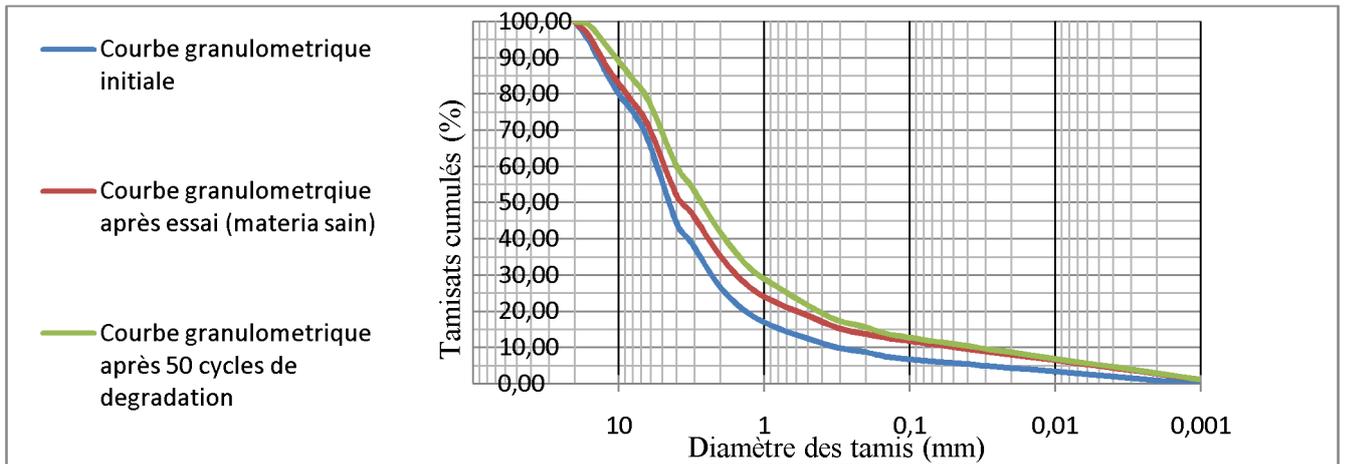


Fig 59 : Courbe granulométrique schiste +sulfates, Énergie de compactage 55 coups 5ème, Série.

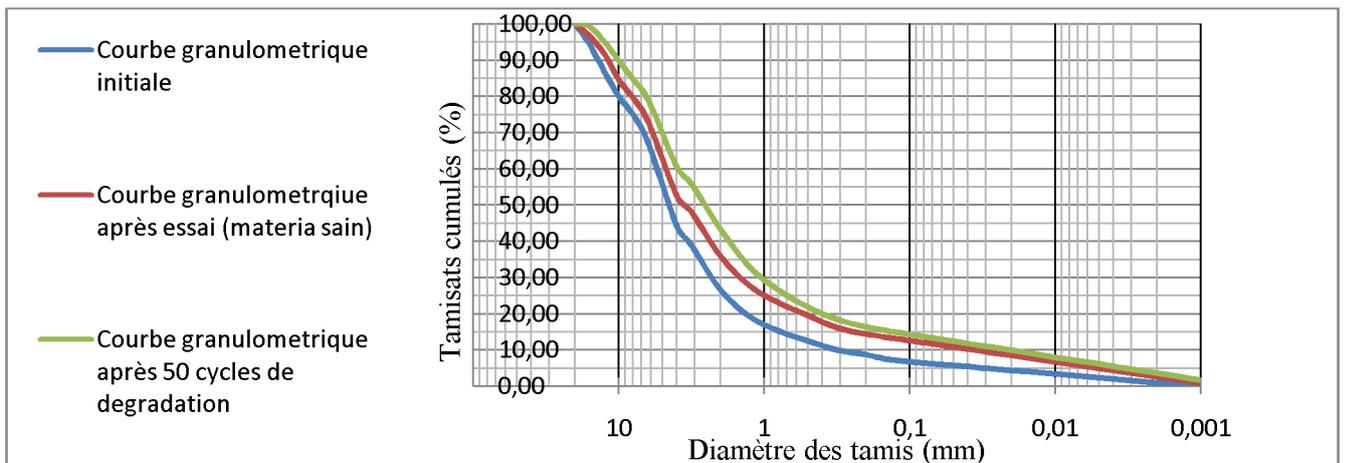
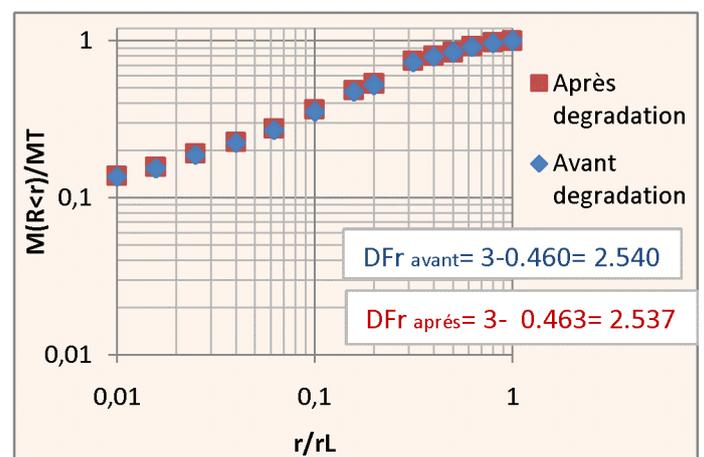
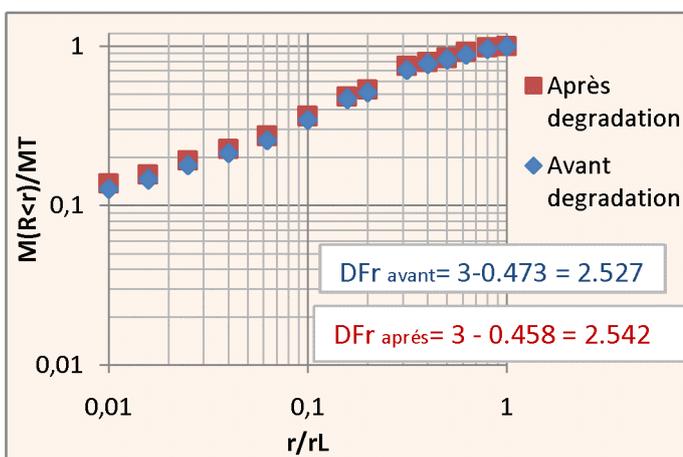
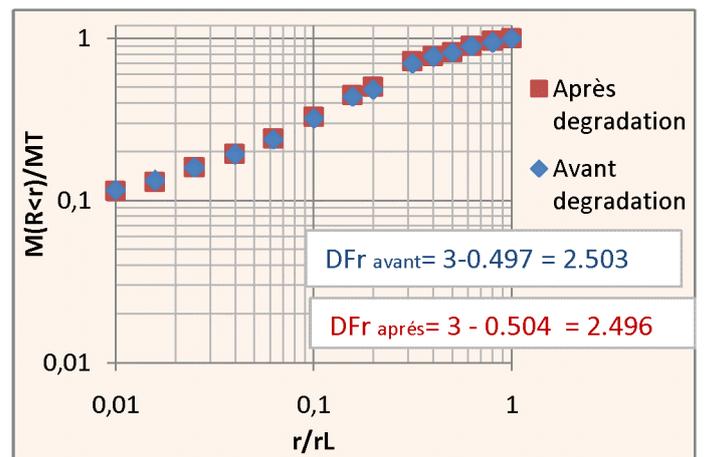
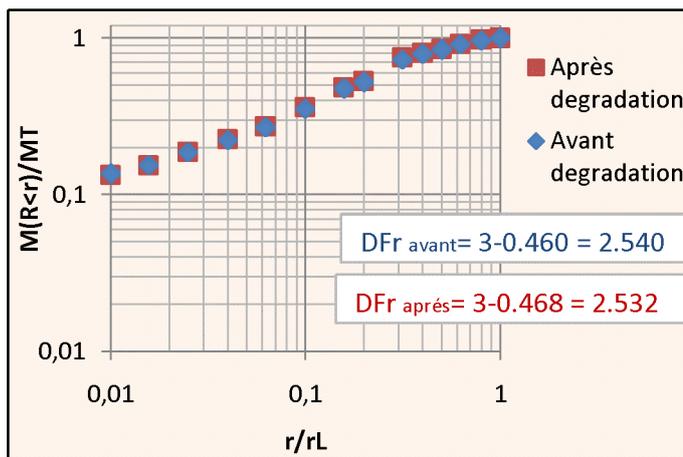
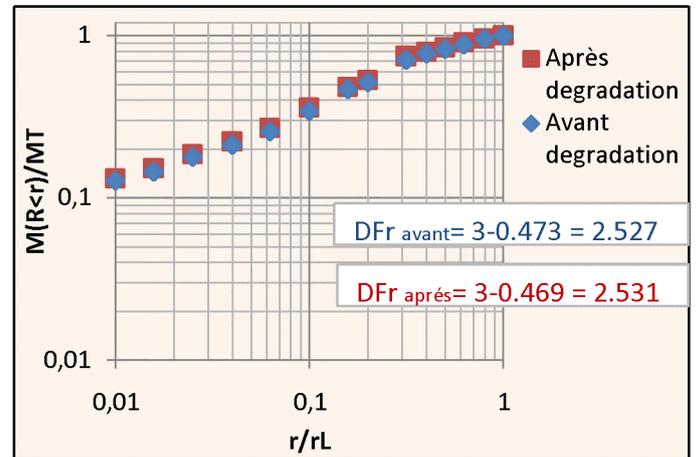
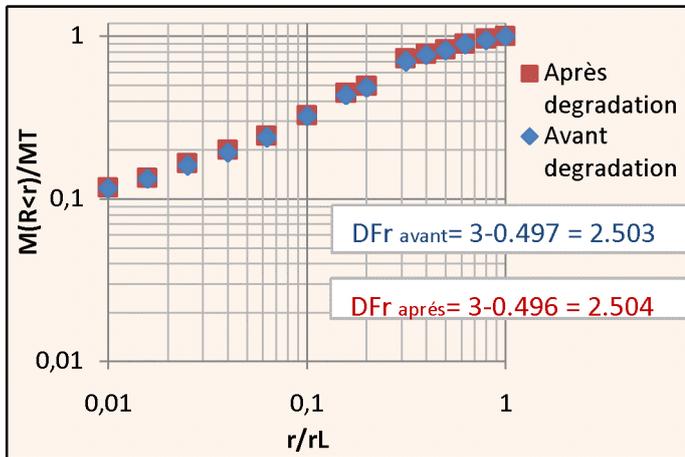


Fig60: Courbe granulométrique schiste + sulfates, Énergie de compactage 75 coups 5ème, Série.

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale



# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

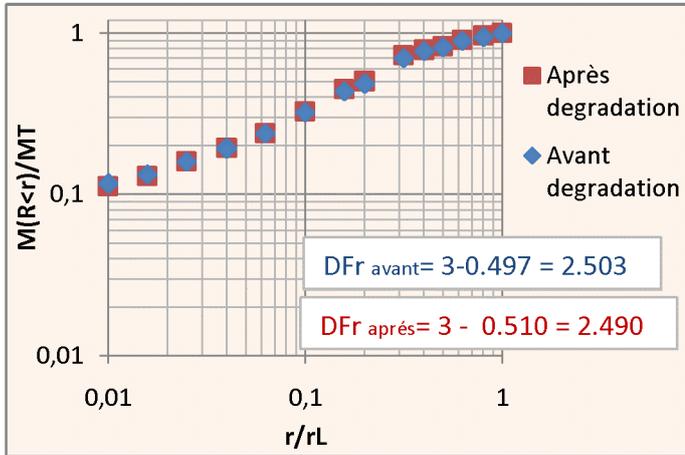


Figure 7: Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 25 coups (1ère série).

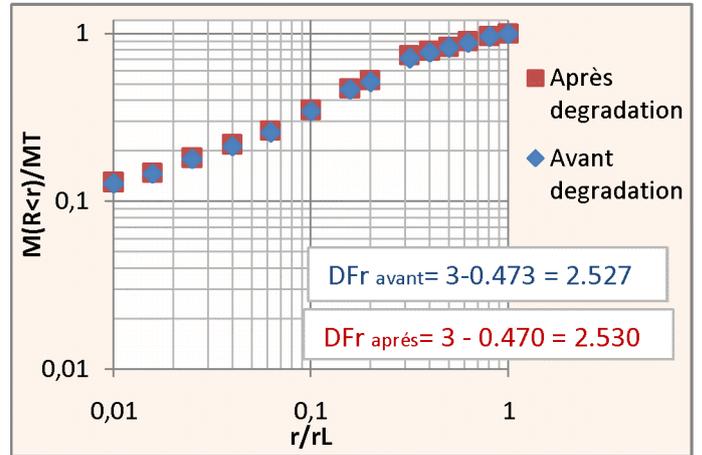


Figure 8: Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 55 coups (1ère série).

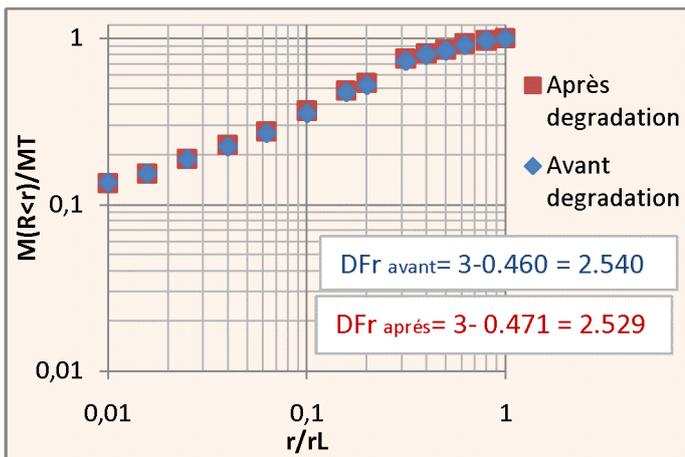


Figure 9: Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 75 coups (1ère série).

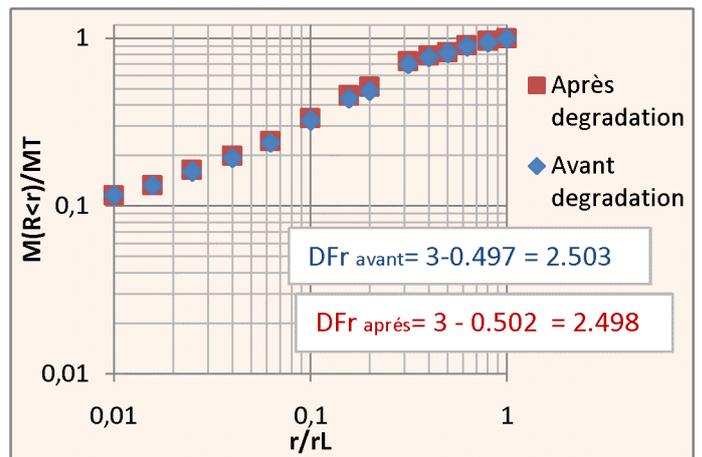


Figure 10 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 25 coups (1ère série).

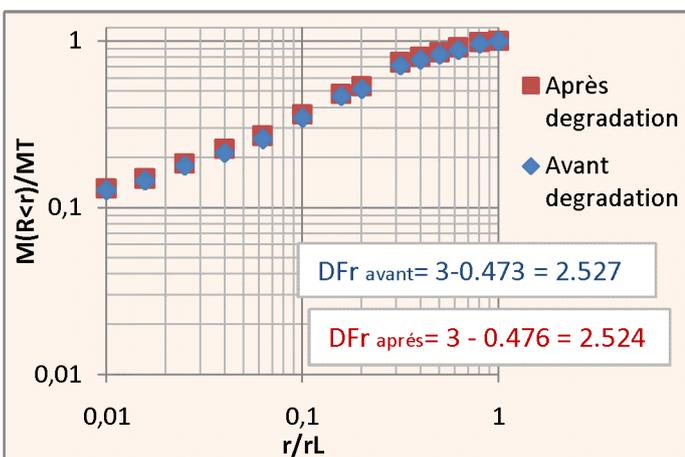


Figure 11 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 55 coups (1ère série).

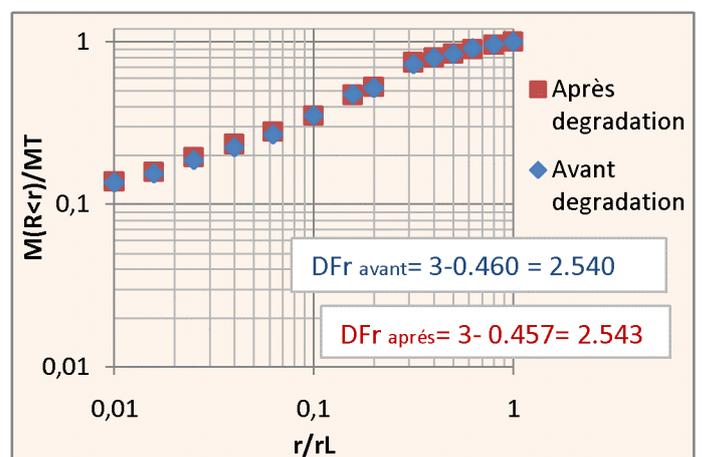


Figure 12 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 75 coups (1ère série).

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

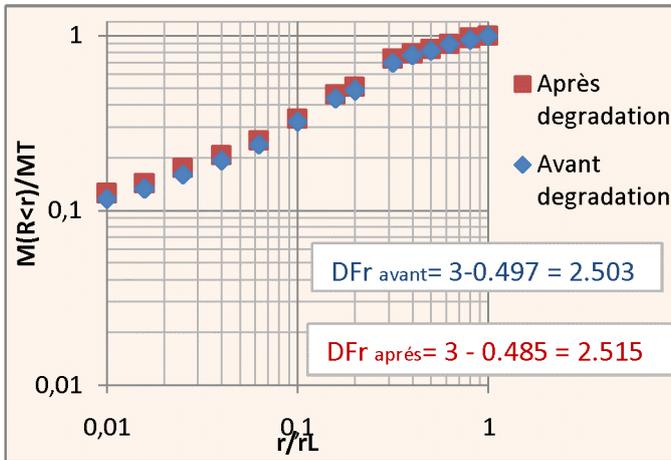


Figure 13 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 25 coups (2ème série).

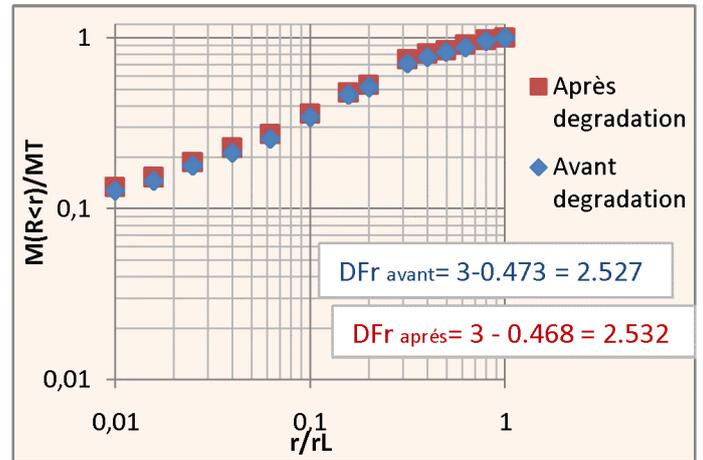


Figure 14 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 55 coups (2ème série).

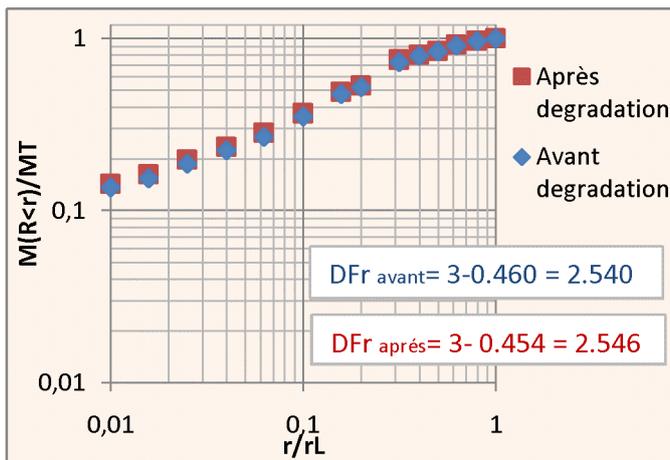


Figure 15 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 75 coups (2ème série).

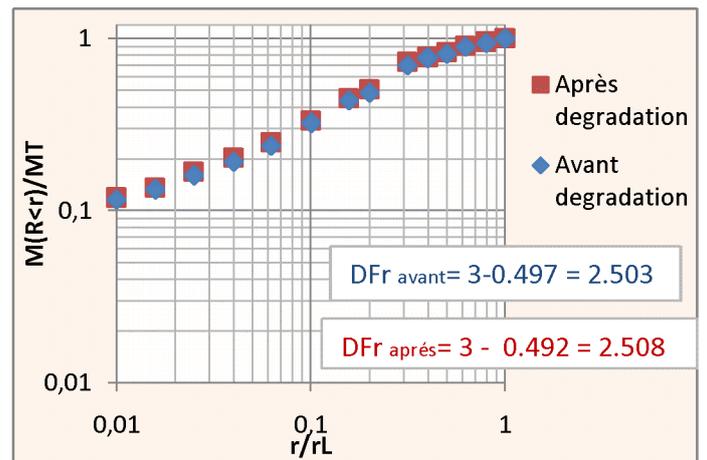


Figure 16 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 25 coups (2ème série).

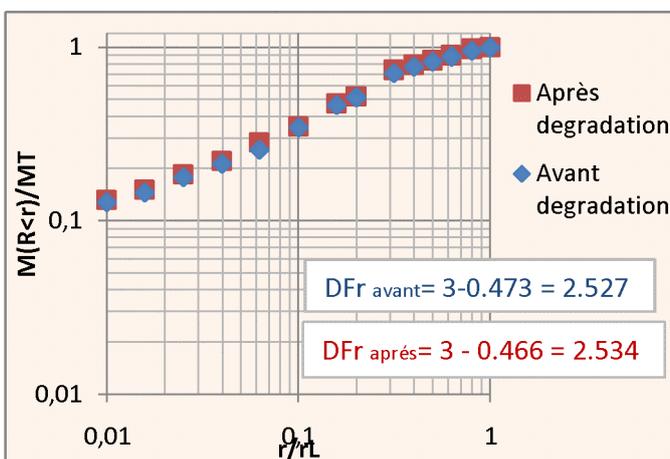


Figure 17 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 55 coups (2ème série).

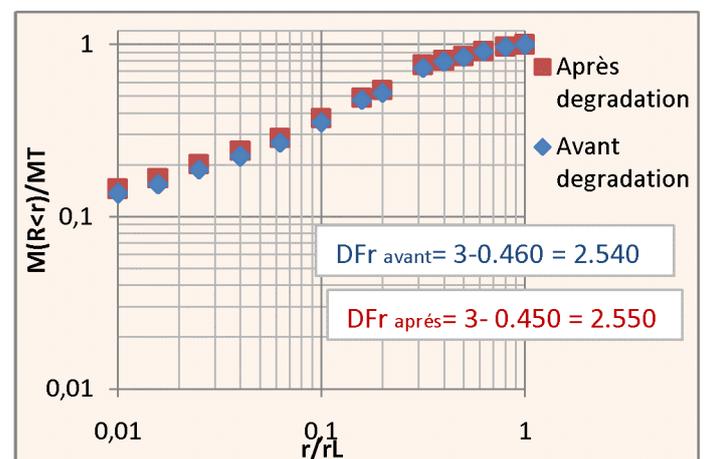


Figure 18 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 75 coups (2ème série).

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

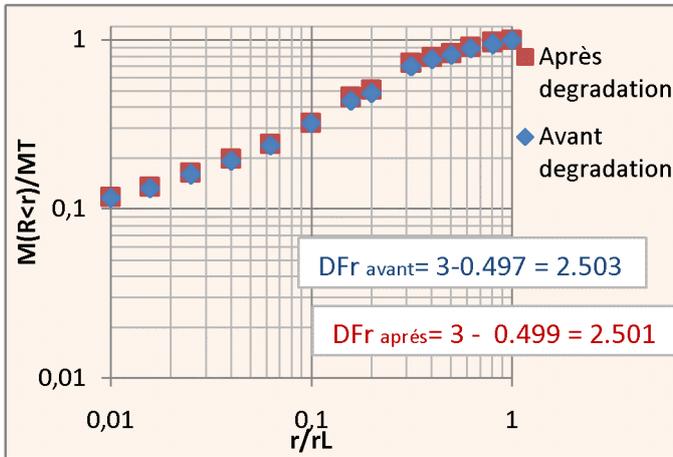


Figure 19 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 25 coups (2ème série).

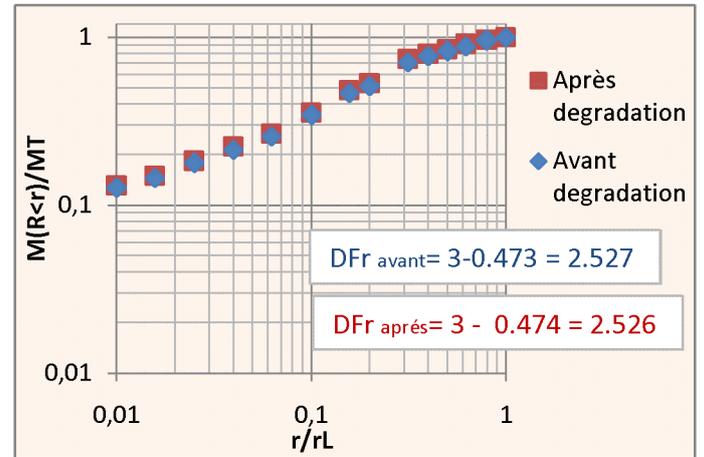


Figure 20 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 55 coups (2ème série).

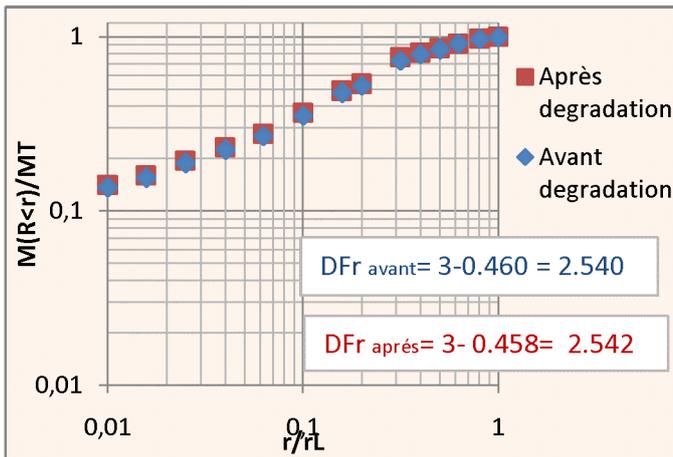


Figure 21 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 75 coups (2ème série).

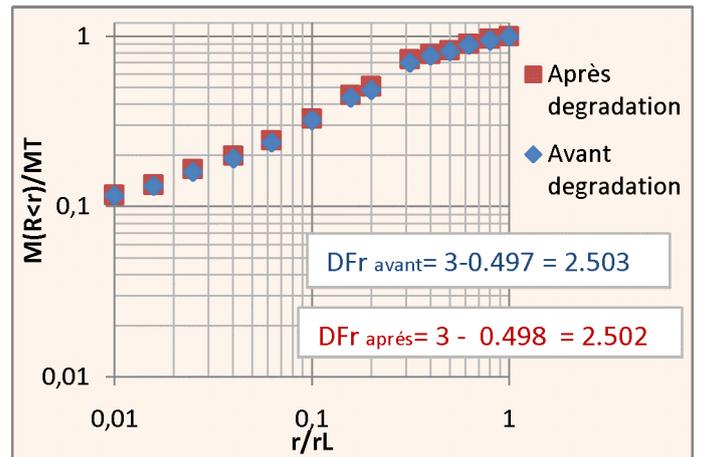


Figure 22 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 25 coups (2ème série).

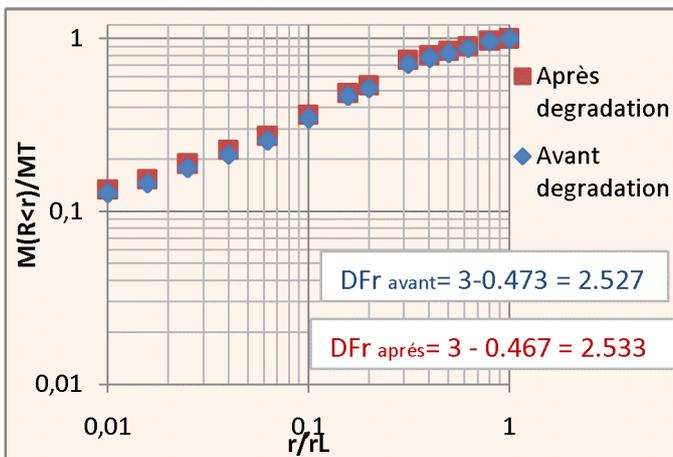


Figure 23 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 55 coups (2ème série).

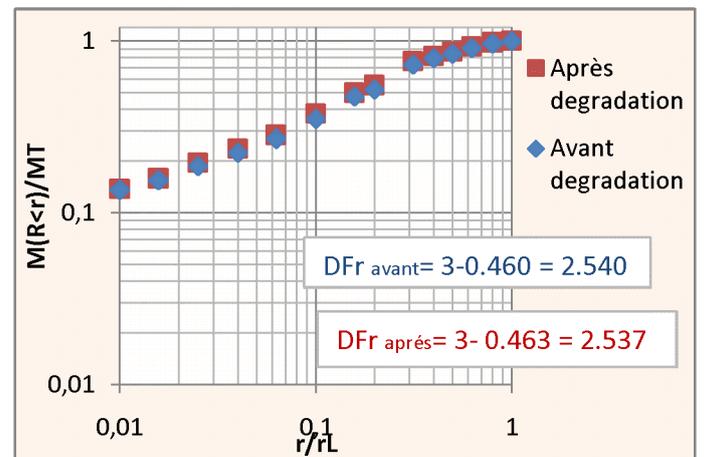


Figure 24 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 75 coups (2ème série).

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

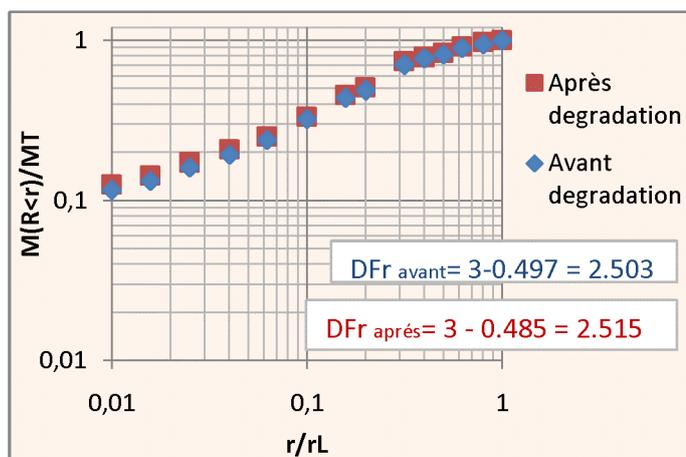


Figure 25 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 25 coups (3ème série).

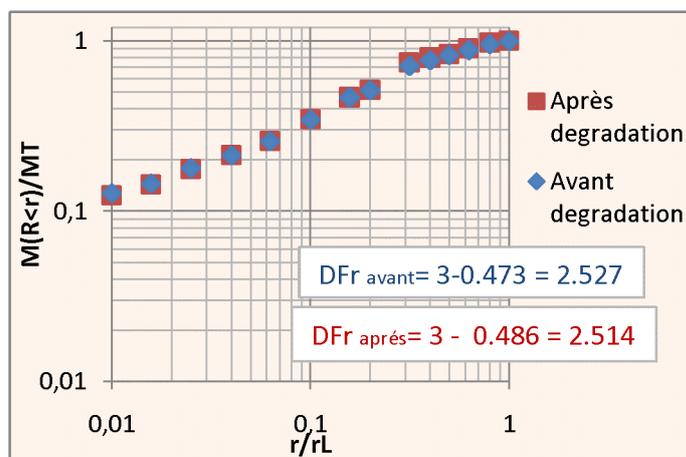


Figure 26 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 55 coups (3ème série).

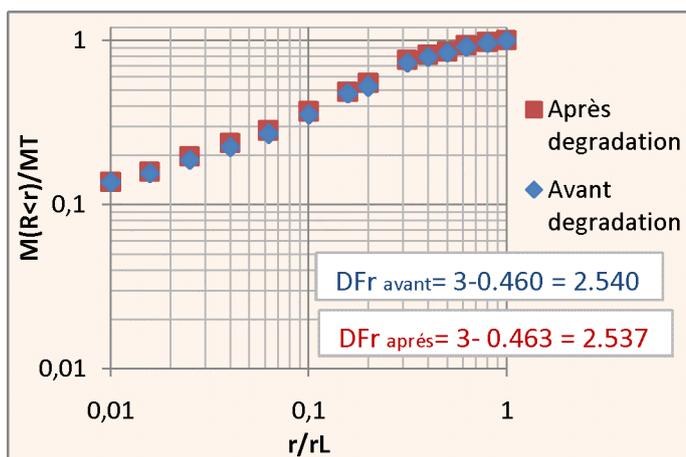


Figure 27 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 75 coups (3ème série).

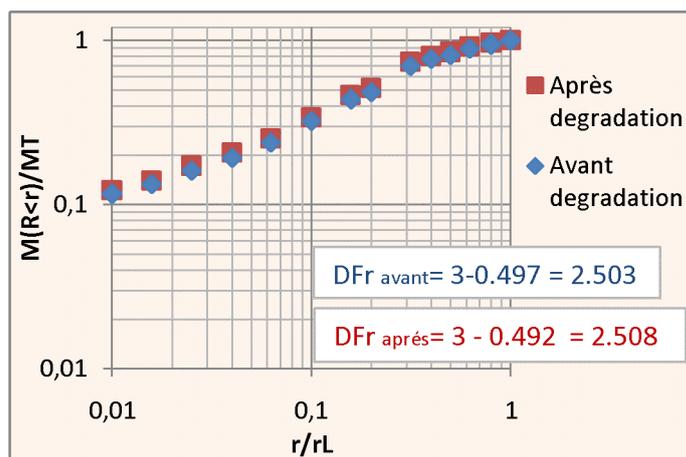


Figure 28 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 25 coups (3ème série).

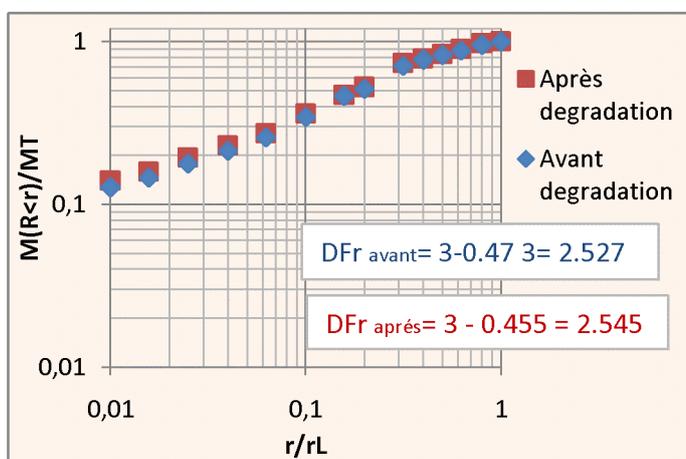


Figure 29 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 55 coups (3ème série).

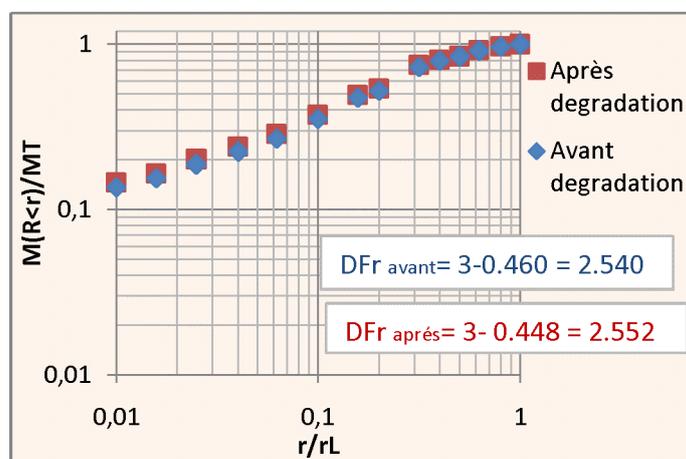


Figure 30 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 75 coups (3ème série).

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

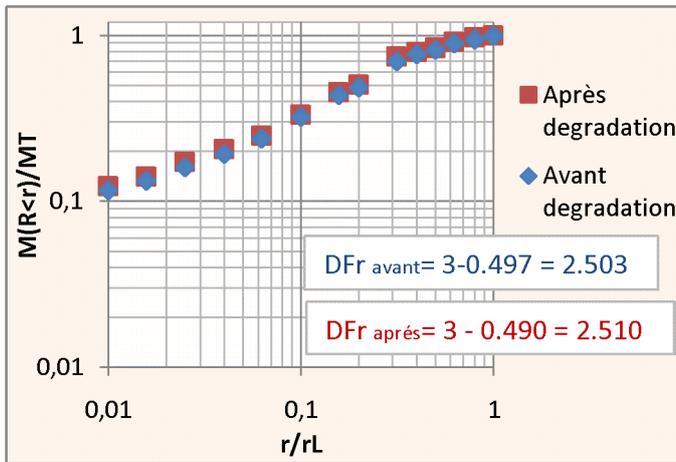


Figure 31 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 25 coups (3ème série).

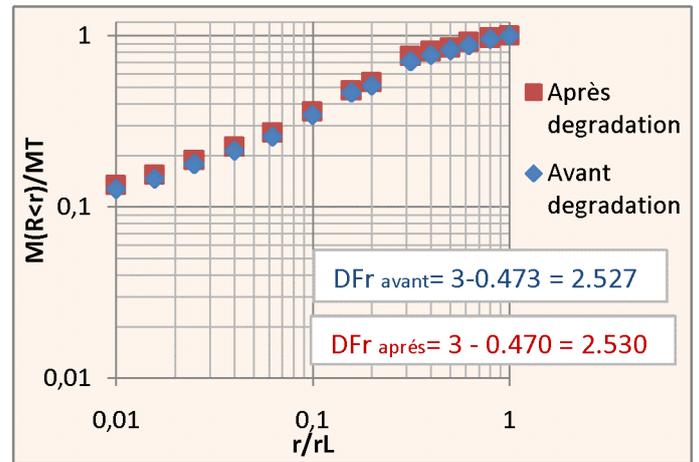


Figure 32: Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 55 coups (3ème série).

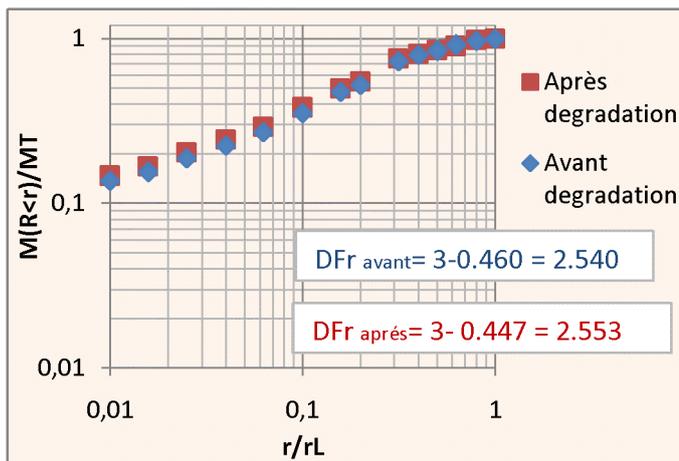


Figure 33 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 75 coups (3ème série).

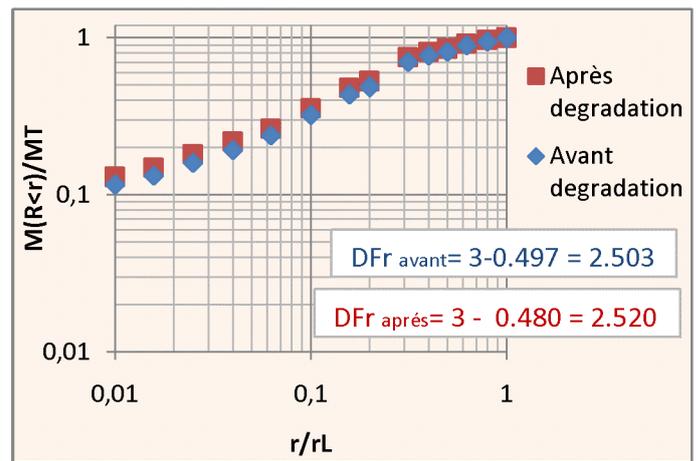


Figure 34 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 25 coups (3ème série).

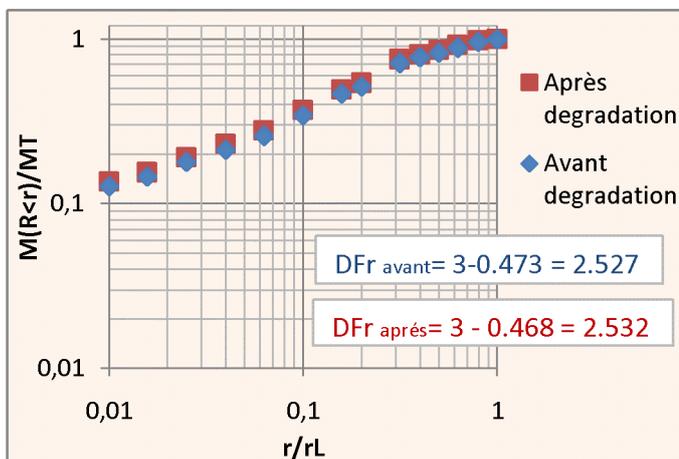


Figure 35 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 55 coups (3ème série).

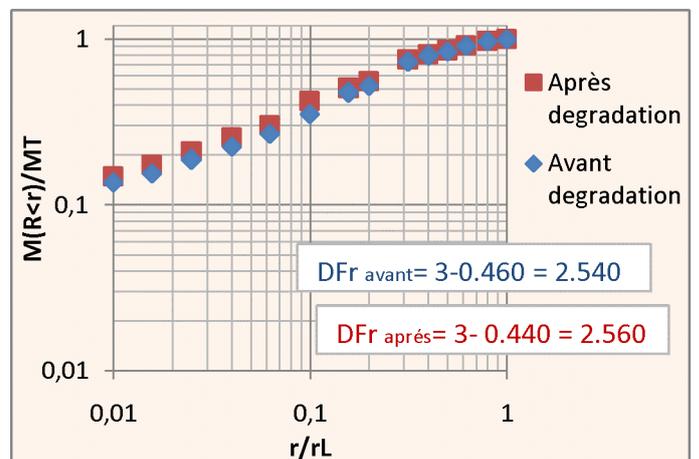


Figure 36 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 75 coups (3ème série).

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

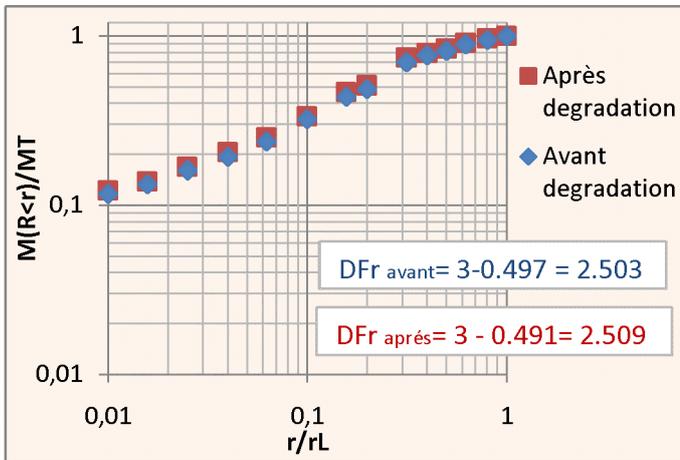


Figure 37 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 25 coups (4ème série).

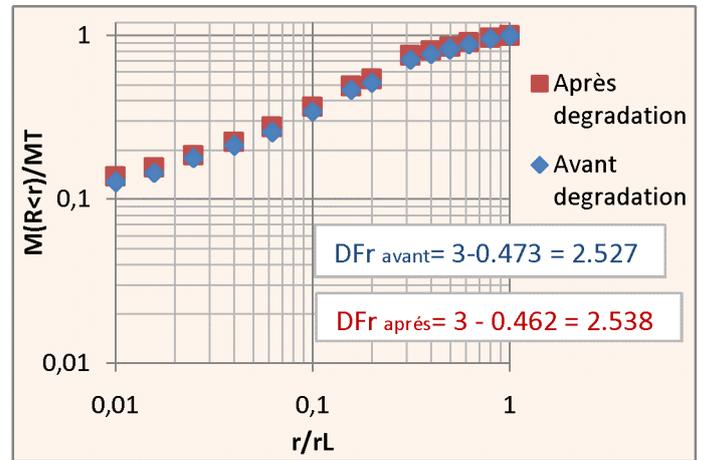


Figure 38 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 55 coups (4ème série).

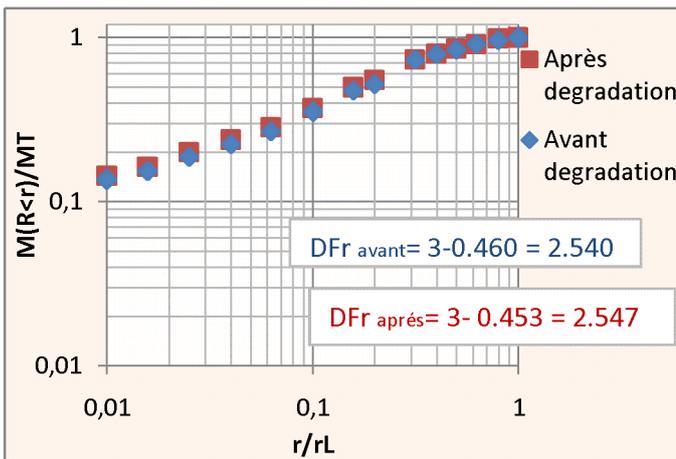


Figure 39 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 75 coups (4ème série).

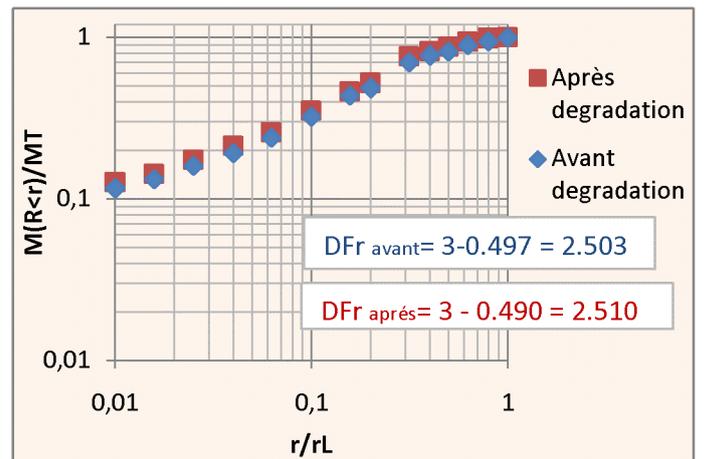


Figure 40 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 25 coups (4ème série).

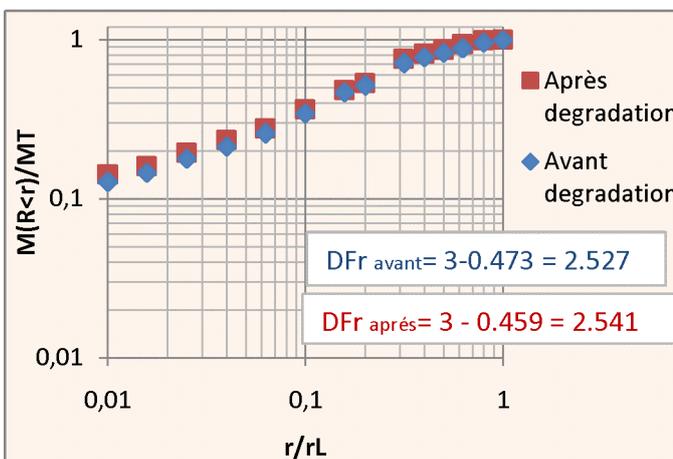


Figure 41 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 55 coups (4ème série).

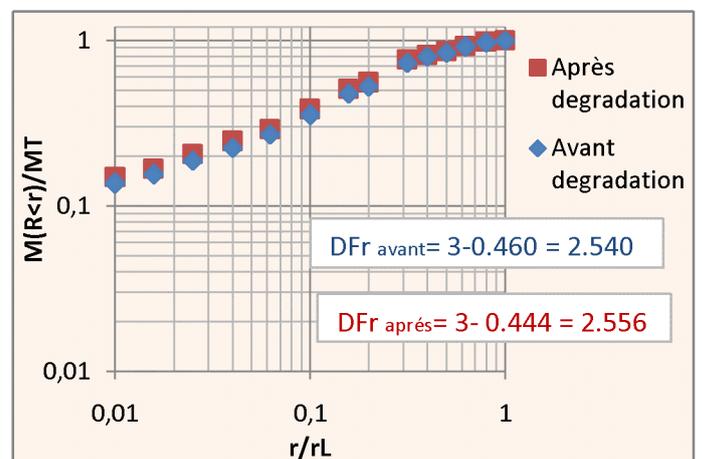


Figure 42 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 75 coups (4ème série).

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

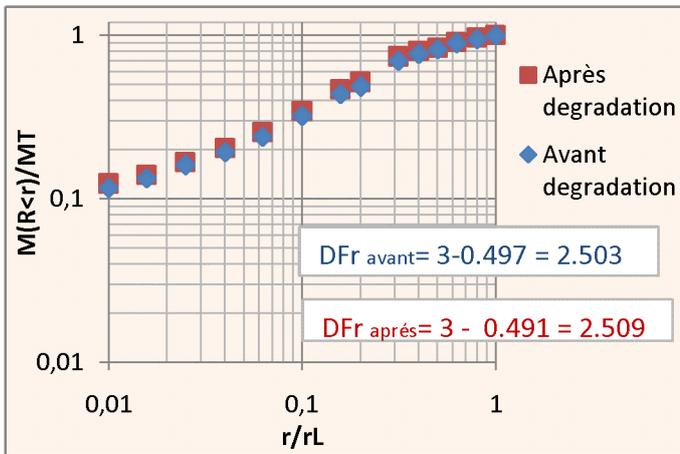


Figure 43 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 25 coups (4ème série).

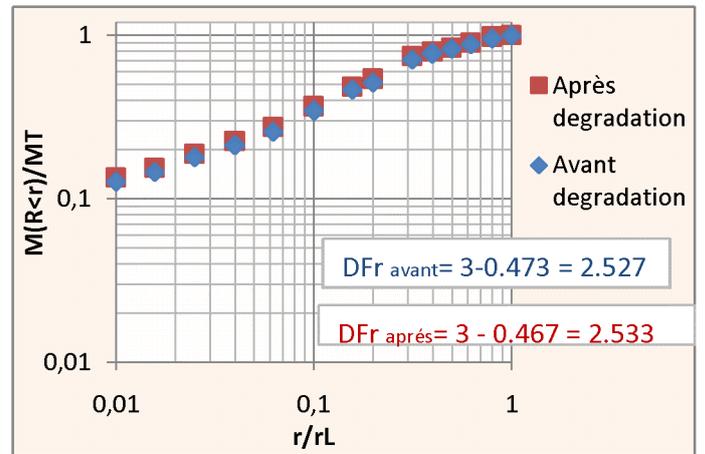


Figure 44 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 55 coups (4ème série).

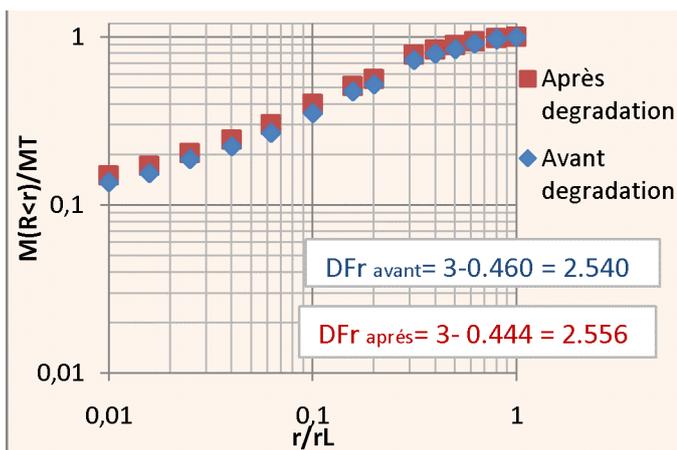


Figure 45 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 75 coups (4ème série).

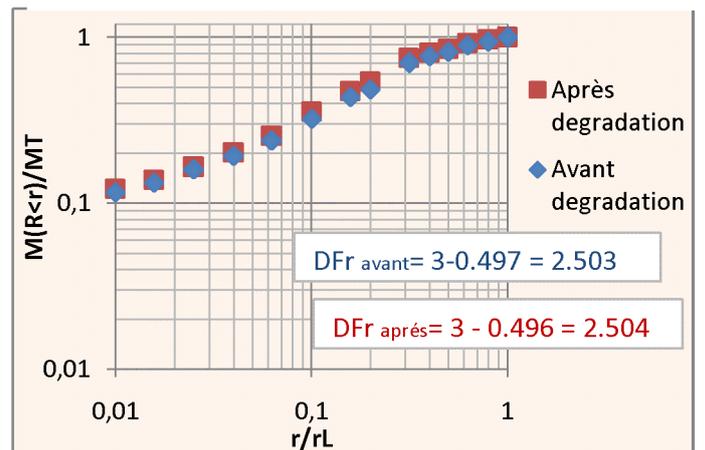


Figure 46 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 25 coups (4ème série).

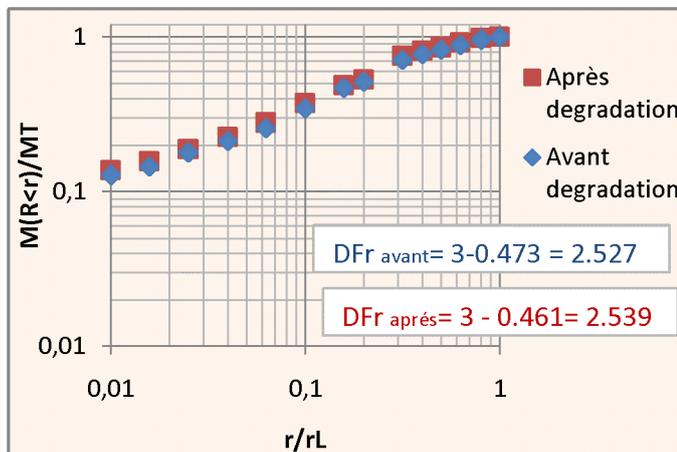


Figure 47 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 55 coups (4ème série).

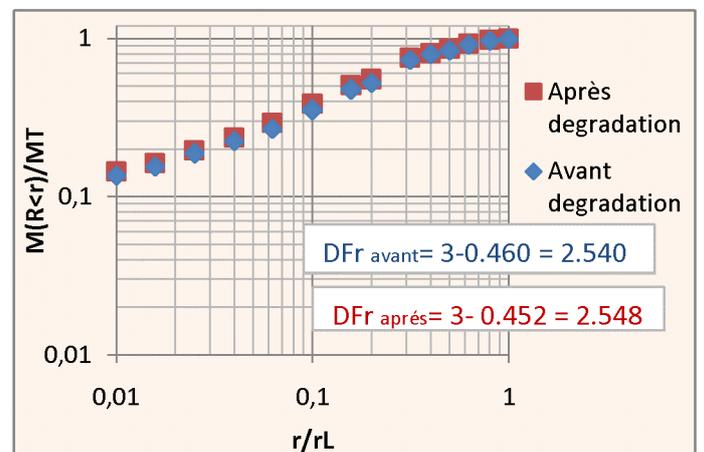


Figure 48 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 75 coups (4ème série).

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

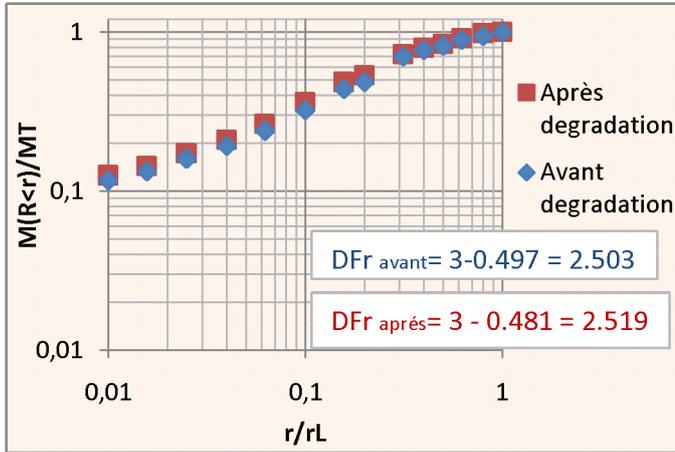


Figure 49 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 25 coups (5ème série).

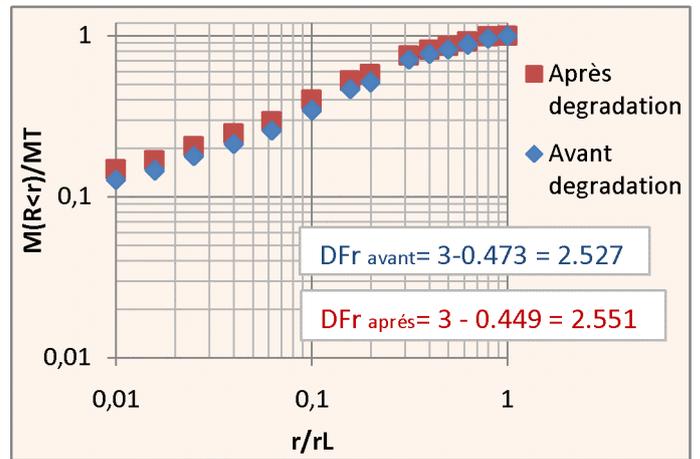


Figure 50 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 55 coups (5ème série).

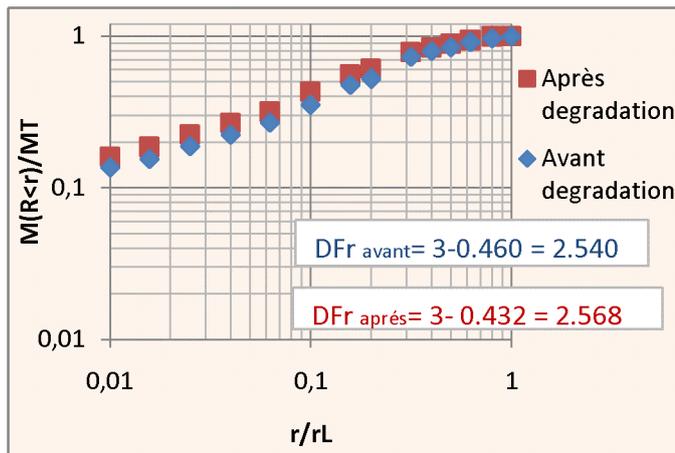


Figure 51: Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + Eau à 75 coups (5ème série).

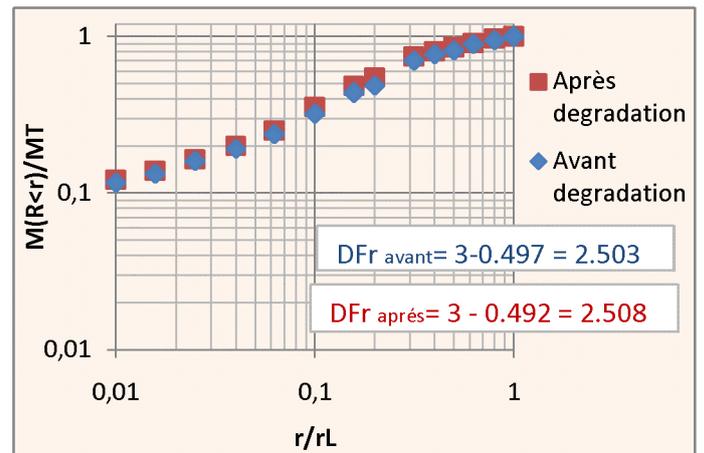


Figure 52 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 25 coups (5ème série).

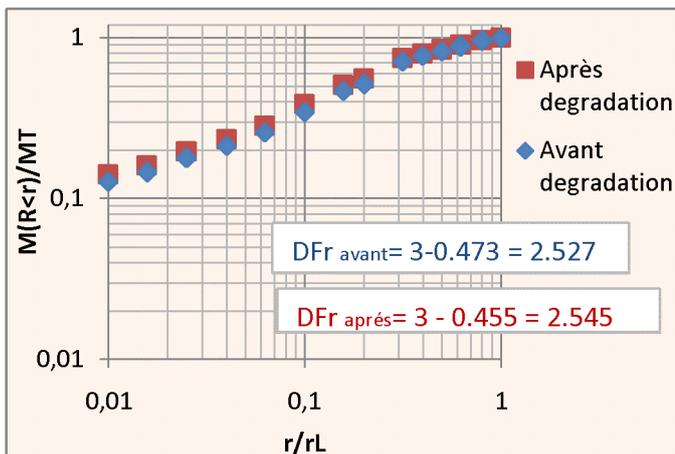


Figure 53 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 55 coups (5ème série).

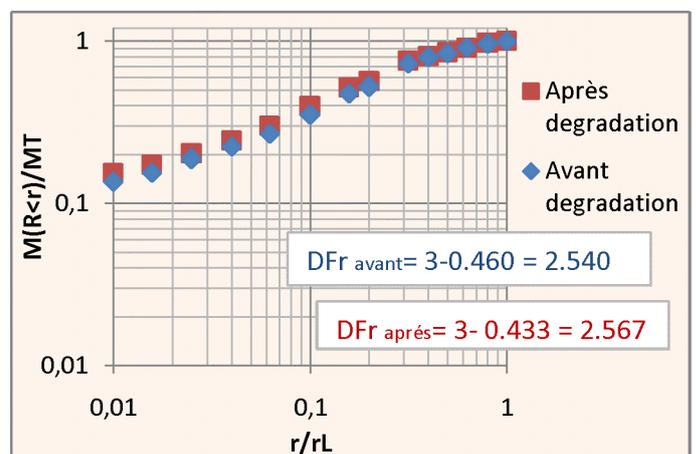


Figure 54 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + détergents à 75 coups (5ème série).

# ANNEXE C

## Calcul de la dimension fractale

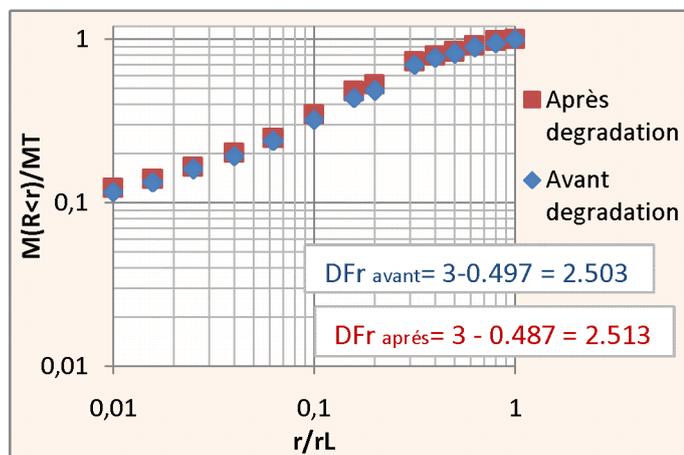


Figure 55: Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 25 coups (5ème série).

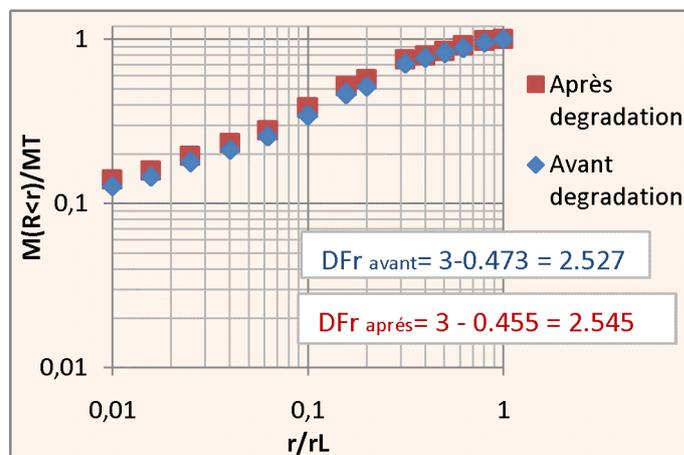


Figure 56 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 55 coups (5ème série).

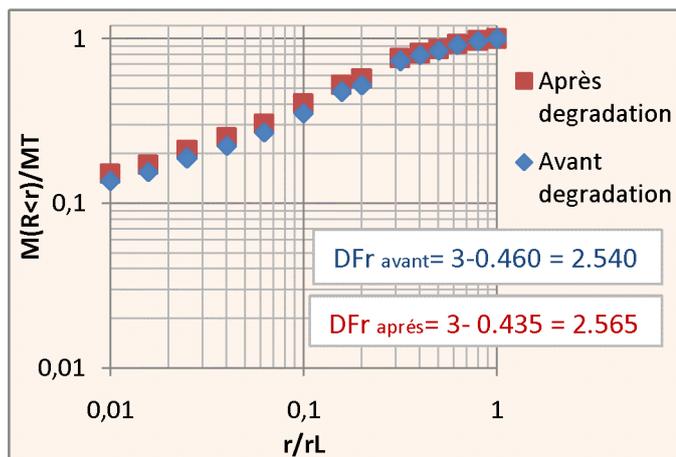


Figure 57: Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + phosphates à 75 coups (5ème série).

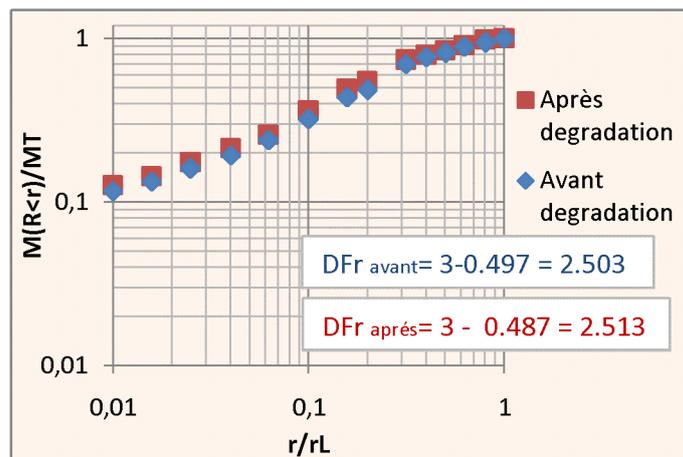


Figure 58 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 25 coups (5ème série).

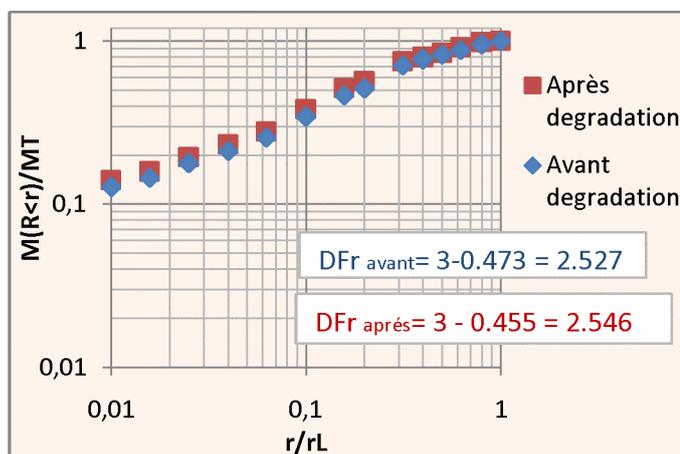


Figure 59 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 55 coups (5ème série).

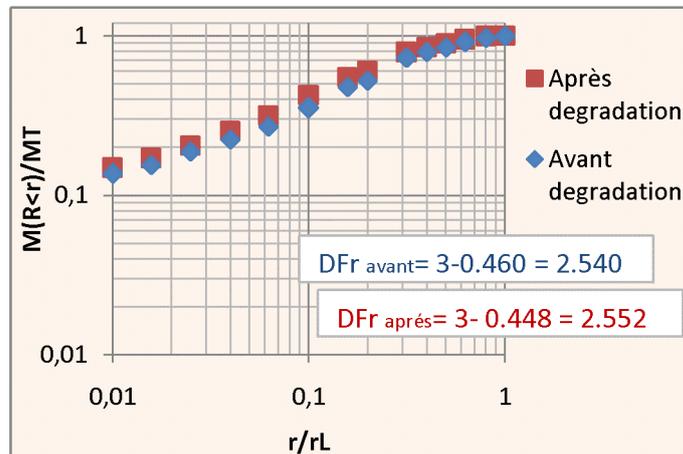


Figure 60 : Calcul de la DFR pour l'échantillon du schiste + sulfates à 75 coups (5ème série).