

# Sommaire

DEDICACES	
REMERCIEMENT	
RESUME	
TABLE DES MATIERSE	
LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX	
<b>Introduction Générale</b>	<b>2</b>
<b>1 Etude phénoménologique du retrait-gonflement Approche bibliographique</b>	
<b>1.1 Nature et structure des sols argileux</b>	<b>5</b>
1.1.1 Introduction	5
<b>1.2 Minéralogie des argiles</b>	<b>6</b>
1.2.1 Minéraux argileux	6
1.2.1.1 Structure des argiles	6
1.2.1.1.a Feuilletés en tétraèdre(de silice)	6
1.2.1.1.b Feuilletés en octaèdre (ou d'alumine)	7
1.2.1.2 Principaux groupes de minéraux argileux	8
1.2.1.2.a Kaolinite	8
1.2.1.2.b Montmorillonite	10
1.2.1.2.c L'illite	11
<b>1.3 Microstructures des sols argileux</b>	<b>12</b>
1.3.1 Définitions et concepts de texture/structure	13
1.3.2 Classification des différentes textures	15
1.3.3 Définitions des unités de l'espace poreux	18
<b>1.4 FORCES ENTRE PARTICULES D'ARGILE</b>	<b>20</b>
1.4.1 Force de répulsion	20
1.4.2 Force d'attraction	20
1.4.3 Force d'hydratation (attractive – répulsive)	20
<b>1.5 PHENOMENE DU GONFLEMENT</b>	<b>20</b>
1.5.1 Mécanisme du gonflement	20
1.5.2 Description du phénomène de gonflement	22
<b>1.6 Facteurs influençant le retrait-gonflement des sols argileux</b>	<b>22</b>
1.6.1 Facteurs intrinsèques	22
1.6.1.1 Composition minéralogique	23
1.6.1.2 Capacité d'échange cationique (CEC)	23
1.6.1.3 Surface spécifique d'une particule argileuse	24

1.6.1.4	Activité des argiles	<b>24</b>
1.6.1.5	Théorie de la double couche	<b>25</b>
1.6.2	Facteurs externes	<b>27</b>
1.6.2.1	Teneur en eau initiale	<b>27</b>
1.6.2.2	Densité sèche	<b>28</b>
1.6.2.3	Mode de compactage	<b>29</b>
1.6.2.4	Effet de l'échelle	<b>30</b>
<b>1.7</b>	<b>STABILISATION DES SOLS GONFLANTS</b>	<b>31</b>
1.7.1	Stabilisation mécanique	<b>31</b>
1.7.1.1	Méthode de compactage	<b>31</b>
1.7.1.2	Méthode de substitution	<b>32</b>
1.7.1.3	Méthode de pré humidification	<b>32</b>
1.7.1.4	Stabilisation par ajout de sable	<b>32</b>
1.7.2	Stabilisation chimique	<b>33</b>
1.7.2.1	Stabilisation par des solutions salines	<b>33</b>
1.7.2.2	Stabilisation par les liants hydrauliques (Chaux, Ciment et)	<b>35</b>
1.7.2.2.a	Stabilisation par ajout de la chaux	<b>35</b>
1.7.2.2.b	Stabilisation par ajout du ciment	<b>38</b>
<b>1.8</b>	<b>Caractérisations directes et indirectes de l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement</b>	<b>40</b>
1.8.1	Paramètres du gonflement	<b>41</b>
1.8.2	Caractérisation au laboratoire	<b>41</b>
1.8.2.1	Caractérisations indirectes	<b>42</b>
1.8.2.2	Modèles d'estimation du gonflement - Méthodes indirectes	<b>45</b>
1.8.2.3	Essais de caractérisation directe du gonflement au laboratoire	<b>46</b>
1.8.2.3.a	Méthode à gonflement libre (ou méthode d'hydratation sous chargement nul)	<b>46</b>
1.8.2.3.b	Méthode sous charge constante (Essais en parallèle ou méthodes d'hydratation sous charge constante)	<b>46</b>
1.8.2.3.c	Méthode à volume constant (ou méthodes d'hydratation à gonflement empêché)	<b>46</b>
<b>1.9</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>47</b>
<b>2</b>	<b>Valorisation de pneus usés et La poudrette de caoutchouc</b>	
<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>49</b>
<b>2.2</b>	<b>Généralités</b>	<b>49</b>
2.2.1	Définition	<b>50</b>

2.2.2	Principaux constituants et catégories d'un pneu	<b>50</b>
2.2.3	Composition chimique d'un pneu	<b>52</b>
<b>2.3</b>	<b>Valorisation du pneumatique usagé</b>	<b>53</b>
2.3.1	Valorisation Energétique	<b>54</b>
2.3.2	Valorisation matière	<b>55</b>
2.3.3	Valorisation originale des pneus usagés	<b>55</b>
<b>2.4</b>	<b>Valorisation et réalisations en Algérie par la technique pneu sol</b>	<b>57</b>
<b>2.5</b>	<b>Comportement du Pneu sol</b>	<b>59</b>
2.5.1	Comportement général du Pneu sol	<b>60</b>
2.5.2	Comportement mécanique du Pneu sol Cas statique	<b>61</b>
2.5.3	Adhérence Terre-Pneumatiques	<b>61</b>
<b>2.6</b>	<b>Problèmes liés de disposition de pneu de chute</b>	<b>62</b>
<b>2.7</b>	<b>La Poudrette de caoutchouc</b>	<b>63</b>
2.7.1	Les caractéristiques des granulats de caoutchouc	<b>64</b>
2.7.2	Transformation de la poudrette de caoutchouc	<b>65</b>
2.7.2.1	Déchetage primaire	<b>66</b>
2.7.2.1	Déchetage secondaire	<b>68</b>
<b>2.8</b>	<b>Valorisation de poudrette de caoutchouc</b>	<b>68</b>
<b>2.9</b>	<b>Conditions de mise en œuvre</b>	<b>74</b>
<b>2.10</b>	<b>L'intérêt de poudrette de caoutchouc</b>	<b>74</b>
<b>2.11</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>76</b>
<b>3</b>	<b>L'identification et la prévision de stabilisation de ces sols gonflant par l'ajout de la poudrette de caoutchouc programme par le logiciel ' SCILAB'</b>	
<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>78</b>
<b>3.2</b>	<b>Identification des sols gonflants</b>	<b>80</b>
<b>3.3</b>	<b>Matériels utilisé</b>	<b>81</b>
3.3.1	La phrase matricielle "le sol"	<b>81</b>
3.3.2	La phase renforcement (Fibres de caoutchouc)	<b>81</b>
<b>3.4</b>	<b>Mesure indirecte du potentiel de gonflement</b>	<b>82</b>
<b>3.5</b>	<b>Analyse de Gonflement des sols étudiés</b>	<b>84</b>
<b>3.6</b>	<b>Protocoles d'essai</b>	<b>84</b>
<b>3.7</b>	<b>Résultats</b>	<b>86</b>
3.7.1	Effet de la teneur en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel de	<b>86</b>

	gonflement	
3.7.2	Effet de la teneur en caoutchouc des pneus usés sur la pression de gonflement	<b>88</b>
<b>3.8</b>	<b>Modèles de prévision de gonflement</b>	<b>90</b>
<b>3.9</b>	<b>Estimation du potentiel et pression de gonflement a l'aide de programmation de Scilab</b>	<b>92</b>
3.9.1	L'interface de SCILAB	<b>94</b>
<b>3.10</b>	<b>Résultats et discussions</b>	<b>96</b>
3.10.1	Le taux et la pression de gonflement	<b>96</b>
3.10.2	Comparaison des résultats estimés du taux et la pression de gonflement avec ceux expérimentaux.	<b>100</b>
<b>3.11</b>	<b>Conclusion</b>	<b>104</b>
<b>4</b>	<b>Estimation du module d'élasticité des sols de fibres de caoutchouc à l'aide de modèles de matériaux composites</b>	
<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>106</b>
<b>4.2</b>	<b>Choix des Modèles Analytiques</b>	<b>107</b>
<b>4.3</b>	<b>Matériels utilisé</b>	<b>108</b>
4.3.1	La phrase matricielle "le sol"	<b>108</b>
4.3.1.1	Module de Young élastique du sol	<b>108</b>
4.3.2	La phase renforcement (Fibres de caoutchouc)	<b>109</b>
4.3.2.1	Module du Young élastique des fibres de caoutchouc des pneus usées (la phase deux)	<b>110</b>
<b>4.4</b>	<b>Module de Young expérimentale les deux sols étudiés</b>	<b>111</b>
<b>4.5</b>	<b>Confrontation des Modèles Analytiques aux Résultats Expérimentaux</b>	<b>112</b>
4.5.1	Résultats des Approches Prédictives	<b>113</b>
4.5.2	Comparaison des Résultats Obtenus avec ceux Expérimentaux	<b>116</b>
<b>4.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>118</b>
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>120</b>
	<b>Références bibliographique</b>	<b>123</b>
	<b>Annexe</b>	<b>131</b>

## **Listes des figures**

<b>Fig.1.1.</b> Feuillet en tétraèdre	<b>7</b>
1.1. a) et c) Tétraèdre de silice	
1.1. b) Vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre	
1.1. d) Schéma du feuillet de silice	
<b>Fig.1.2.</b> Feuillet en octaèdre	<b>7</b>
1.2. a) et c) Octaèdre d'aluminium	
1.2. b) Vue isométrique d'un feuillet en octaèdre.	
1.2. d) Schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium	
<b>Fig1.3.</b> Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile.	<b>8</b>
<b>Fig.1.4.</b> Structure atomique de la kaolinite	<b>9</b>
1.4. a) Schéma de la structure élémentaire de la Kaolinite	
1.4. b) Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite	
<b>Fig.1.5.</b> Structure atomique de Famille de la montmorillonite	<b>11</b>
1.5.a) Schéma de la structure élémentaire de la montmorillonite	
1.5. b) Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite	
<b>Fig.1.6.</b> Structure atomique de Famille de l'illite	<b>11</b>
1.6.a) Schéma de la structure élémentaire del'illite	
1.6.b) Vue isométrique de la structure atomique et schématique de l'illite.	
<b>Fig.1.7.</b> Organisation des particules d'argiles	<b>14</b>
<b>Fig.1.8.</b> Influence de l'électrolyte sur la porosité d'une bentonite	<b>15</b>
<b>Fig.1.9.</b> Arrangement des particules d'argile en suspension	<b>14</b>
<b>Fig.1.10.</b> Représentation schématique d'assemblages de particules argileuses et grains non argileux	<b>16</b>
<b>Fig.1.11.</b> Classification des textures des sols d'origines sédimentaire et éluviale : texture en nid d'abeille	<b>17</b>
1.11. (a), en squelette    1.11. (c), fluidale« turbulent »    1.11. (e), domaines	
1.11. (b), matricielle    1.11 (d), laminaire    1.11. (f), pseudoglobulaire« pseudoglobular »	
1.11. (g) et en éponge (h).	
<b>Fig.1.12.</b> Texture des sols gonflants	<b>18</b>
<b>Fig.1.13.</b> Représentation schématique des différents types de pores	<b>19</b>
Ces auteurs ont proposé quatre types d'arrangement de l'espace poreux	
<b>Fig.1.14.</b> Force d'hydratation.	<b>20</b>
<b>Fig.1.15.</b> Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation	<b>21</b>
<b>Fig.1.16.</b> Courbe de gonflement en fonction du temps.	<b>22</b>
<b>Fig.1.17.</b> Mesure de la CEC	<b>23</b>
<b>Fig1.18.</b> Abaque pour identification des sols gonflants	<b>25</b>

<b>Fig.1.19.</b> Abaque d'évaluation de potentiel de gonflement	<b>25</b>
<b>Fig.1.20.</b> Schéma d'une double couche d'eau entourant une particule argileuse	<b>26</b>
<b>Fig.1.21.</b> Schéma de l'eau adsorbée des minéraux argileux	<b>26</b>
<b>Fig.1.22.</b> Ions échangeables	<b>27</b>
<b>Fig.1.23.</b> Potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale	<b>27</b>
<b>Fig.1.24.</b> Variation du gonflement en fonction de la teneur en eau initiale	<b>28</b>
<b>Fig.1.25.</b> Variation de la pression de gonflement en fonction de la densité sèche	<b>28</b>
<b>Fig.1.26.</b> Variation du gonflement en fonction de la densité sèche initiale	<b>29</b>
<b>Fig.1.27.</b> Comparaison entre les valeurs de perméabilité obtenue sur des éprouvettes compactées par pétrissage et par méthode statique	<b>30</b>
<b>Fig.1.28.</b> Variation du gonflement final en fonction de l'épaisseur des échantillons	<b>30</b>
<b>Fig.1.29.</b> Variation de la pression de gonflement en fonction du temps avec les différentes solutions	<b>35</b>
<b>Fig.1.30.</b> Effet des sels utilisés sur l'argile de Mansourah	<b>34</b>
<b>Fig.1.31.</b> Effet de la chaux sur la pression de gonflement des échantillons traités compactés à l'OPN Khattab	<b>35</b>
<b>Fig.1.32.</b> Effet du dosage à la chaux sur le gonflement de la Bentonite de Maghnia	<b>35</b>
<b>Fig.1.33.</b> (a) Variation des limites de consistance en fonction du temps pour 3% et 6% chaux ; (b) Evolution de la valeur au bleu de méthylène en fonction de pourcentage de chaux	<b>36</b>
<b>Fig.1.34.</b> Courbe Proctor de l'argile traitée à la chaux et non traitée.	<b>36</b>
<b>Fig.1.35.</b> (a) Evolution du potentiel de gonflement des éprouvettes traitées à 3 et 6% de chaux conservées suivant le premier mode. (b) Evolution de pression de gonflement.	<b>37</b>
<b>Fig.1.36.</b> Effet des stabilisants sur les limites des consistances 1.37. (a) Effet des stabilisants sur la limite de liquidité $W_L$ (%) 1.37. (b) Effet des stabilisants sur l'indice de plasticité $I_p$ (%)	<b>38</b>
<b>Fig.1.37.</b> Effet des stabilisants sur les paramètres mécaniques de gonflement (a) Effet des stabilisants sur la pression du gonflement (b) Effet des stabilisants sur le potentiel du gonflement	<b>39</b>
<b>Fig.1.38.</b> Caractérisation des sols gonflants	<b>42</b>
<b>Fig.1.39.</b> Classification des sols gonflants	<b>43</b>
<b>Fig.1.40.</b> Différentes méthodes d'essais de gonflement	<b>46</b>
<b>Fig. 2.1.</b> Coupe transversale d'un pneu Michelin	<b>51</b>
<b>Fig. 2.2.</b> Valorisation en Poudrette de caoutchouc	<b>55</b>
<b>Fig.2.3.</b> Schéma d'une filière de valorisation matière	<b>57</b>
<b>Fig. 2.4.</b> Pose des nappes de pneus Projet pilote – Route de Bousmail	<b>58</b>
<b>Fig.2.5.</b> Stabilité d'un glissement de terrain - Cas de Tizi Ghenif – Wilaya de Tizi Ouzou Algérie	<b>59</b>
<b>Fig.2.6.</b> Pneus entiers avec flancs	<b>60</b>

<b>Fig.2.7.</b> Pneus avec un seul flanc	<b>60</b>
<b>Fig.2.8.</b> Pneus sans flanc	<b>60</b>
<b>Fig.2.9.</b> Ligne de production de pneu	<b>63</b>
<b>Fig.2.10.</b> Aspect des poudrettes de caoutchouc	<b>64</b>
<b>Fig.2.11.</b> Le différent diamètre des granulats des pneus usés après broyage.	<b>65</b>
<b>Fig.2.12.</b> Différent mode de valorisation de poudrette de caoutchouc.	<b>69</b>
<b>Fig.2.13.</b> Bassin d'infiltration	<b>70</b>
<b>Fig.2.14</b> La valorisation de broyats de pneus dans la fonction de drainage	<b>71</b>
<b>Fig.2.15.</b> Production d'encrant d'acoustiques à l'aide de poudrette de caoutchouc	<b>72</b>
<b>Fig.2.16.</b> Coupe schématique verticale d'un sol sportif de 3ème génération	<b>73</b>
<b>Fig. 3.1.</b> Effet de la teneur en caoutchouc de pneus usés sur le potentiel de gonflement de sol A.	<b>87</b>
<b>Fig.3.2.</b> Effet de la teneur en caoutchouc de pneus usés sur le potentiel de gonflement des sols B.	<b>87</b>
<b>Fig.3.3.</b> Effet de la teneur en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol A.	<b>89</b>
<b>Fig.3.4.</b> Effet de la teneur en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol B	<b>89</b>
<b>Fig.3.5.</b> Une fenêtre graphique 3D	<b>94</b>
<b>Fig.3.6.</b> La fenêtre console du logiciel Scilab	<b>95</b>
<b>Fig.3.7.</b> L'éditeur Scipad	<b>96</b>
<b>Fig.3.8.</b> Programme propose pour le calcul de taux et pression de gonflement	<b>97</b>
<b>Fig.3.5.</b> Taux de gonflement estimé et mesuré pour la Bentonite	<b>100</b>
<b>Fig.3.6.</b> Taux de gonflement estimé et mesurée pour l'Argile	<b>101</b>
<b>Fig.3.7.</b> Pression de gonflement estimé et mesurée pour la Bentonite	<b>102</b>
<b>Fig.3.8.</b> Pression de gonflement estimé et mesurée pour l'Argile	<b>103</b>
<b>Fig.4.1.</b> Photographies montrant (i) des fibres de caoutchouc des pneus usés, (ii) et (iii) la poudre de caoutchouc.	<b>110</b>
<b>Fig. 4.2.</b> Rapport des caractéristiques des phases Ea/Em dans les deux argiles	<b>113</b>
<b>Fig.4.3.</b> Programme propose pour estimer le module d'élasticité en utilisant les modèles analytiques.	<b>114</b>
<b>Fig.4.4.</b> Modules d'élasticité effective en fonction de la fraction volumique du renfort pour les auteurs pour l'argile pour l'argile d'Ayaida	<b>115</b>
<b>Fig.4.5.</b> Modules d'élasticité effective en fonction de la fraction volumique du renfort pour les auteurs pour la Bentonite de Maghnia	<b>115</b>
<b>Fig.4.6.</b> Modules d'élasticité effective en fonction de la fraction volumique du renfort	<b>117</b>

confrontation des résultats analytiques et expérimentaux pour l'argile d'Ayaida

**Fig.4.7.** Modules d'élasticité effective en fonction de la fraction volumique du renfort **118**

confrontation des résultats analytiques et expérimentaux pour la Bentonite de Maghnia.

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau.1.1.</b> Classification des phyllosilicates	<b>9</b>
<b>Tableau.1.2.</b> Relation entre type de cations et gonflement	<b>23</b>
<b>Tableau.1.3.</b> Caractéristiques physico-chimiques des minéraux argileux courants.	<b>24</b>
<b>Tableau.1.4.</b> Activité de différents minéraux	<b>25</b>
<b>Tableau.1.5.</b> Les pourcentages utilisés	<b>39</b>
<b>Tableau.1.6.</b> Classification du potentiel de gonflement des sols argileux selon différents auteurs	<b>42</b>
<b>Tableau.1.7.</b> Paramètres hydriques et potentiel de gonflement	<b>44</b>
<b>Tableau.1.8.</b> Modèles d'estimation du taux de gonflement ( $\epsilon_g$ ) et de la pression de gonflement ( $\sigma_g$ ).	<b>45</b>
<b>Tableau.2.1.</b> Composition des pneus tourisme et poids lourd	<b>53</b>
<b>Tableau.2.2.</b> Distribution granulométrique pour les trous de filière de $\varnothing$ 20 mm et $\varnothing$ 16 mm	<b>65</b>
<b>Tableau.2.3.</b> Les méthodes d'extraction des contaminants du pneu	<b>66</b>
<b>Tableau.3.1.</b> caractéristique des sols étudiés	<b>82</b>
<b>Tableau.3.2.</b> Potentiel de gonflement estimé (en fonction des limites d'Atterberg) des échantillons testés.	<b>83</b>
<b>Tableau.3.3.</b> Modèles de prévision testée pour le gonflement des sols étudiés.	<b>91</b>
<b>Tableau.3.4.</b> Taux de gonflement mesuré et estimé pour les sols étudiés.	<b>99</b>
<b>Tableau.3.5.</b> Pression de gonflement mesurée et estimée pour les sols étudiés	<b>99</b>
<b>Tableau.4.1.</b> Le module d'élasticité effectif par les différents modèles analytiques (MPa).	<b>108</b>
<b>Tableau.4.2.</b> Les valeurs typiques du module de Young pour le matériau cohésif	<b>109</b>
<b>Tableau.4.3.</b> Le module d'élasticité de composite sol-fibres mesuré expérimentalement	<b>112</b>
<b>Tableau.4.4.</b> Caractéristiques expérimentales et la fraction volumique pour les composites de sol-fibres	<b>113</b>
<b>Tableau.4.5.</b> Modules d'élasticité effective des sols-fibres obtenus par les différents modèles analytiques (MPa).	<b>114</b>
<b>Tableau.4.6.</b> Modules d'élasticité effectifs (MPa): Confrontation des différents modèles analytiques aux résultats expérimentaux.	<b>116</b>
<b>Tableau.4.7.</b> Ecarts (%) sur les modules d'Young entre les prédictions des modèles analytiques et des résultats expérimentales.	<b>116</b>

