

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2019

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

**ETUDE COMPARATIVE D'ARGILE STABILISÉE AU LAITIER
ACTIVÉ AU CIMENT/CHAUX**

Domaine : Sciences et Technique

Spécialité :

GENIE CIVIL

OPTION

GEOTECHNIQUE

Par

Noms, Prénoms des Etudiants (es)

1/ ABOUISMAIL ABDELLAH

2/ ZIANI KHALED

DIRECTEUR DU MEMOIRE : CHELGHOUM Noureddine, Pr, GENIE CIVIL, U B M ANNABA

CO-ENCADREUR : ZEMOULI Samira, Dr, ARCHITECTURE, U B M ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :

EXAMINATEUR :

Remerciement

Initialement ce travail n'aurait pas été réalisé sans la bénédiction du bon Dieu qui nous a permis de nous instruire et qui a récompensé nos volontés et sacrifices

Nous tenons à remercier du fond du cœur notre Directeur et co-directeur de thèse respectivement Monsieur Noureddine CHELGHOUM, maître de conférences au département de Génie Civil de l'Université d'Annaba et Madame S.ZEMOULI pour leur encadrement scientifique, leur accessibilité et surtout pour la confiance qu'ils nous ont témoignée, pour ses précieux conseils, ses encouragements constants et sa disponibilité pour la réalisation de cette étude.

Nous remercions également le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions s'adressent aussi à nos parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration du présent travail, à tous mes amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de la préparation de ce travail.

Thèse soumise pour l'obtention du diplôme de Master en Mécanique des sols et géotechnique

Par: ABOUISMAIL Abdellah

Et

ZIANI Khaled

Sous la direction de:

Pr Nouredine CHELGHOUM et ZEMOULI Samira

RESUME:

Plus de 500.000 tonnes de laitier issu de la fabrication du fer et de l'acier sont produites chaque année en Algérie. Ces déchets industriels sont souvent stockés à l'air libre provoquant de sérieux problèmes environnementaux. Ce produit naturellement cimentaire, peut être utilisé comme liant hydraulique pour améliorer les propriétés géotechniques des sols fins en place et réduire le cout de construction des ouvrages enterrés. Ce mémoire présente une étude comparative sur les effets du laitier granulé produit localement activé à la chaux hydraulique et celui activé au ciment portland sur les valeurs CBR d'un sol fin. Les résultats obtenus montrent que le laitier granulé activé à la chaux ou au ciment comme liant hydraulique améliore le poinçonnement du sol immédiat et imbibé. Le laitier granulé activé à la chaux hydratée améliore encore plus le CBR et réduit au mieux le gonflement du sol comparativement au laitier activé au ciment portland. En pratique ces améliorations se traduisent par une augmentation substantielle de la portance du sol et une stabilité des structures en terre.

Thesis submitted for the degree of Master of Engineering in Soil Mechanics

By: ABOUISMAIL Abdellah

And

ZIANI Khaled

Under the supervisions:

Pr Nouredine CHELGHOUM and ZEMOULI Samira

ABSTRACT:

More than 500,000 tons of slag from the manufacture of iron and steel are produced each year in Algeria. These industrial wastes are often stored in the open air causing serious environmental problems. This naturally cementitious product can be used as a hydraulic binder to improve the geotechnical properties of fine soils in place and reduce the cost of construction of earthworks. The present dissertation outlines a comparative study on the effect of locally produced granulated when activated with lime and cement on the CBR values of a problematic fine soil. The obtained results show that the granulated and slag activated with hydraulic lime or Portland cement as a hydraulic binder improves both immediate and immersion Californian Bearing Ratio of the soil. Granulated slag activated with hydrated lime improves even better the CBR values and reduces significantly the swelling of the soil than the one activated with Portland cement. In practice, a higher bearing capacity and a better stability of earthworks in site are obtained with lime activated slag.

مذكرة مقدمة للحصول على درجة الماجستير في ميكانيكية التربة والجيو تكنولوجية

من قبل :

أبو اسماعيل عبدالله

زياني خالد

تحت إشراف:

البروفيسور شلغوم نور الدين

والدكتور زمولي سميرة

ملخص:

كل عام يتم إنتاج أكثر من 500.000 طن من الخبث المحبب المستخرج من صناعة الحديد والصلب في الجزائر. غالبا ما يتم تخزين هذه النفايات الصناعية في الهواء الطلق التي تؤثر بشكل خطير على المحيط البيئي. يمكن استخدام هذا المنتج الإسمنتي الطبيعي كرابط هيدروليكي أجل تحسين الخصائص الجيو تكنولوجية للتربة الناعمة في مكانها وخفض تكلفة أعمال بناء الحفر. تقدم هذه المذكرة دراسة مقارنة حول آثار الخبث المحبب المنتج محليا المنشط بالجير الهيدروليكي أو بالاسمنت بورتلاند على قيم **CBR** للتربة الناعمة. وتظهر النتائج المتحصل عليها أن لخبث المحبب بمفرده المنشط بالجير أو الاسمنت كرابط هيدروليكي يحسن من تقييات التربة بشكل لحظي ومشبع ، الخبث المحبب المنشط بالجير الهيدروليكي يحسن أكثر على قيم **CBR** ويقلل بشكل أفضل تضخم التربة مقارنة مع الخبث المحبب المنشط بالاسمنت بورتلاند. عمليا هذه التحسينات تترجم بزيادة كبيرة في سعة تحمل التربة و استقرار الهياكل الترابية

SOMMAIRE

Introduction	1
Chapitre 1 : Recherche bibliographique	3
1.1. Introduction	3
1.2. Californian Bearing Ratio	3
1.2.1. Définitions	3
1.2.2. Objectif et champ d'application	3
1.2.3. Principe	4
1.2.4. Historique de Développement	4
1.2.5. Types de l'échantillon pour tester	5
1.2.6. Principes et Théorie	8
1.2.7. Critères de compactage	10
1.3. Stabilisation	10
1.3.1. La stabilisation physique	11
1.3.2. La stabilisation physico-chimique	12
1.3.3. La stabilisation chimique	12
1.3.3.1. Stabilisation au ciment	14
1.3.3.2. Stabilisation à la chaux	19
1.3.3.3. Stabilisation au bitume	24
Conclusion	24
1.4. Laitier	23
1.4.1. Refroidissement lent	25
1.4.2. Refroidissement rapide	26
1.4.3 Activation du laitier granulé:	27
1.5. Travaux antérieurs	28
Chapitre 2 : Matériaux et procédures d'essais	31
2.1 Introduction	31
2.2 Matériaux	31
2.2.1. Le sol	31
2.2.1.1. Le kaolin	32
2.2.1.2. La bentonite	34
2.2.2. Les matériaux stabilisateurs	36
2.2.2.1. La chaux	36
2.2.2.2. Le ciment	40

2.2.2.3 Le laitier	41
2.3. Préparation des éprouvettes de sol	45
2.4. Mode opératoire de l'essai CBR.....	46
2.4.1. Appareillage	46
2.4.2. Exécution	47
2.4.3. Exemple d'essai CBR pratique	46
Chapitre 3 : Résultats et interprétations.....	58
31. Introduction	58
3.2. Influence du laitier sur le CBR immédiat active à la chaux	58
Récapitulatif des valeurs CBR immédiat du sol stabilisé au laitier activé à la Chaux.....	61
3.3. Influence du laitier sur le CBR immédiat active au ciment	63
Récapitulatif des valeurs CBR immédiat activé au ciment	66
Comparaison des valeurs CBR du sol stabilisé aux laitiers activé à la chaux et activé au ciment	68
3.4. CBR du sol traite au laitier activé à la chaux imbibition à deux jours	68
Récapitulatif des valeurs CBR du sol stabilisé aux laitiers activé à la chaux imbibée à deux jours.....	72
Récapitulatif des valeurs du gonflement de sol stabilisé au laitier activé à la chaux imbibé à deux jours.....	72
3.5. CBR du sol traite au laitier activé au ciment imbibition à deux jours.....	73
Récapitulatif des valeurs CBR du sol stabilisé aux laitiers activé au ciment imbibé à deux jours	77
Récapitulatif des valeurs du gonflement de sol stabilisé au laitier activé au ciment imbibé à deux jours.....	77
Comparaison des valeurs CBR imbibé à deux jours du sol stabilisé aux laitiers activé à la chaux et activé au ciment	78
Comparaison des valeurs de gonflement du CBR imbibé à deux jours pour les sols stabilisé aux laitiers activé à la chaux et activé au ciment.....	79
3.6. CBR du sol traite au laitier active a la chaux imbibition a quatre jours	80
Récapitulatif des valeurs CBR du sol stabilisé aux laitiers activé à la chaux imbibée à quatre jours	83
Récapitulatif des valeurs du gonflement de sol stabilisé au laitier activé à	

la chaux imbibé à quatre jours.....	84
3.7. CBR du sol traite au laitier active au ciment imbibition a quatre jours	85
Récapitulatif des valeurs CBR du sol stabilisé aux laitiers activé au ciment imbibée à quatre jours	88
Récapitulatif des valeurs du gonflement de sol stabilisé au laitier activé au ciment imbibé à quatre jours	89
Comparaison des valeurs CBR imbibé à quatre jours du sol stabilisé aux laitiers activé à la chaux et activé au ciment	90
Comparaison des valeurs de gonflement du CBR imbibé à deux jours pour les sols stabilisé aux laitiers activé à la chaux et activé au ciment.....	91
Conclusion générale et recommandations.....	93
Références	95
Annexes	97

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

<i>symboles</i>	<i>Titres</i>
<i>LMGE</i>	Laboratoire de matériaux géotechnique et environnement
<i>CBR</i>	Californian Bearing Ratio
<i>ASTM</i>	American Society of Testing Materials
<i>DD3</i>	Kaolin type 3
<i>GGBFS</i>	Ground Granulated Blast Furnace Slag
<i>CaO</i>	la chaux
<i>CPJ</i>	Ciment portland composé
<i>BS</i>	British Standard
<i>GNT</i>	matériaux Granulaires non traites
<i>W</i>	Teneur en eau
<i>V_a</i>	Volume de l'aire
ρ_a	La densité sèche
ρ	La densité humide
G_s	Gravité spécifique des particules
<i>CH</i>	Portlandite
<i>Ca</i>	Calcium
<i>CSH</i>	silicate de calcium hydraté
<i>C₂S</i>	Belite
<i>C₃S</i>	Alite
<i>C₃A</i>	aluminate tricalcique
<i>C₄AF</i>	aluminoferrite tétracalcique
<i>CASH</i>	alumino silicate de calcium hydraté
<i>LIP</i>	lime fixation point
<i>PH</i>	Potentielle d'hydrogène
<i>CEC</i>	capacité d'échange cationique
<i>MEB</i>	microscope électronique à balayage
<i>CPFT</i>	Cumulative Percent Finer Than
<i>IP</i>	Indice de plasticité
<i>OMC</i>	Teneur en eau optimal
<i>SSB</i>	Surface spécifique de beline
<i>DRX</i>	Diffraction au rayon x
°C	Dégré Celsius

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableaux</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
<i>Tableau 1.1</i>	Relation Force-Pénétration pour essai CBR	9
<i>Tableau 2.1</i>	Composition chimique moyenne du kaolin DD ₃	32
<i>Tableau 2.2</i>	Composition minéralogique de la Bentonite (BT)	35
<i>Tableau 2.3</i>	Composition Chimique de Bentonite (BT)	35
<i>Tableau 2.4</i>	Propriétés physiques de la chaux hydratée	36
<i>Tableau 2.5</i>	Propriétés chimiques de la chaux hydratée	36
<i>Tableau 2.6</i>	Caractéristiques requises de la chaux pour assurer un traitement de sol	38
<i>Tableau 2.7</i>	Propriétés chimiques du laitier granulé d'El Hadjar	43
<i>Tableau 2.8</i>	Propriétés physiques du laitier granulé broyé	43
<i>Tableau 2.9</i>	Exemples de Mesure de la densité sèche (pour sol non traité)	54
<i>Tableau 2.10</i>	Exemples de Mesure du CBR (pour sol non traité)	55
<i>Tableau 2.11</i>	Exemples de Mesure de la teneur en eau (pour sol non traité)	55
<i>Tableau 4.1</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat pour le sol non traité	95
<i>Tableau 4.2</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat pour le sol non traité	95
<i>Tableau 4.3</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 5% (85% GGBFS+15% Cao)	96
<i>Tableau 4.4</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 5% (85% GGBFS+15% Cao)	96
<i>Tableau 4.5</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 10% (85% GGBFS+15% Cao)	97
<i>Tableau 4.6</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 10% (85% GGBFS+15% Cao)	97
<i>Tableau 4.7</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 15% (85% GGBFS+15% Cao)	98
<i>Tableau 4.8</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 15% (85% GGBFS+15% Cao)	98
<i>Tableau 4.9</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 20% (85% GGBFS+15% Cao)	99
<i>Tableau 4.10</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 20% (85% GGBFS+15% Cao)	99
<i>Tableau 4.11</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 25% (85% GGBFS+15% Cao)	100
<i>Tableau 4.12</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 25% (85% GGBFS+15% Cao)	100
<i>Tableau 4.13</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat pour le sol non traité	101
<i>Tableau 4.14</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat pour le sol non traité	101
<i>Tableau 4.15</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 5% (85%GGBFS+15%CPJ)	102
<i>Tableau 4.16</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat 5% (85%GGBFS+15%CPJ)	102
<i>Tableau 4.17</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 10% (85%GGBFS+15%CPJ)	103
<i>Tableau 4.18</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat 10%(85%GGBFS+15%CPJ)	103

<i>Tableaux</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
<i>Tableau 4.19</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 15% (85%GGBFS+15%CPJ)	104
<i>Tableau 4.20</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat 15% (85%GGBFS+15%CPJ)ut	104
<i>Tableau 4.21</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 20% (85%GGBFS+15%CPJ)	105
<i>Tableau 4.22</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat 20% (85%GGBFS+15%CPJ)	105
<i>Tableau 4.23</i>	Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 25% (85%GGBFS+15%CPJ)	106
<i>Tableau 4.24</i>	Lectures lors de l'essai CBR immédiat 25% (85%GGBFS+15%CPJ)	106
<i>Tableau 4.25</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours pour le sol non traité	107
<i>Tableau 4.26</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours pour le sol non traité	107
<i>Tableau 4.27</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 5% (85%GGBFS+15%Cao)	108
<i>Tableau 4.28</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 5% (85%GGBFS+15%Cao)	108
<i>Tableau 4.29</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 10%(85%GGBFS+15%Cao)	109
<i>Tableau 4.30</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 10%(85%GGBFS+15%Cao)	109
<i>Tableau 4.31</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 15% (85%GGBFS+15%Cao)	110
<i>Tableau 4.32</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 15% (85%GGBFS+15%Cao)	110
<i>Tableau 4.33</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 20% (85%GGBFS+15%Cao)	111
<i>Tableau 4.34</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 20% (85%GGBFS+15%Cao)	111
<i>Tableau 4.35</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 25% (85%GGBFS+15%Cao)	112
<i>Tableau 4.36</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 25% (85%GGBFS+15%Cao)	112
<i>Tableau 4.37</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours pour le sol non traité	113
<i>Tableau 4.38</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours pour le sol non traité	113
<i>Tableau 4.39</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 5%(85%GGBFS+15%CPJ) :	114
<i>Tableau 4.40</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 5% (85%GGBFS+15%CPJ)	114
<i>Tableau 4.41</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)	115
<i>Tableau 4.42</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)	115
<i>Tableau 4.43</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 15% (85%GGBFS+15%CPJ)	116

<i>Tableaux</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
<i>Tableau 4.44</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 15% (85%GGBFS+15%CPJ)	116
<i>Tableau 4.45</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 20% (85%GGBFS+15%CPJ)	117
<i>Tableau 4.46</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 20% (85%GGBFS+15%CPJ)	117
<i>Tableau 4.47</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 25% (85%GGBFS+15%CPJ)	118
<i>Tableau 4.48</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 25% (85%GGBFS+15%CPJ)	118
<i>Tableau 4.49</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours pour le sol non traité	119
<i>Tableau 4.50</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours pour le sol non traité	119
<i>Tableau 4.51</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 5% (85%GGBFS+15%Cao)	120
<i>Tableau 4.52</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 5% (85%GGBFS+15%Cao)	120
<i>Tableau 4.53</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 10% (85%GGBFS+15%Cao)	121
<i>Tableau 4.54</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 10% (85%GGBFS+15%Cao)	121
<i>Tableau 4.55</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 15%(85%GGBFS+15%Cao)	122
<i>Tableau 4.56</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 15% (85%GGBFS+15%Cao)	122
<i>Tableau 4.57</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 20% (85%GGBFS+15%Cao)	123
<i>Tableau 4.58</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 20% (85%GGBFS+15%Cao)	123
<i>Tableau 4.59</i>	Mesure de la densité sèche du C BR imbibé à 4 jours à 25% (85%GGBFS+15%Cao)	124
<i>Tableau 4.60</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 25% (85%GGBFS+15%Cao)	124
<i>Tableau 4.61</i>	Mesure de la densité sèche du C BR imbibé à 4 jours pour le sol non traité	125
<i>Tableau 4.62</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours pour le sol non traité	125
<i>Tableau 4.63</i>	Mesure de la densité sèche du C BR imbibé à 4 jours à 5% (85%GGBFS+15%CPJ)r	126
<i>Tableau 4.64</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 5% (85%GGBFS+15%CPJ)	126
<i>Tableau 4.65</i>	Mesure de la densité sèche du C BR imbibé à 4 jours à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)	127
<i>Tableau 4.66</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)	127
<i>Tableau 4.67</i>	Mesure de la densité sèche du C BR imbibé à 4 jours à 15% (85%GGBFS+15%CPJ)	128
<i>Tableau 4.68</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 15% (85%GGBFS+15%CPJ)	128

<i>Tableaux</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
<i>Tableau 4.69</i>	Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 20% (85%GGBFS+15%CPJ)	129
<i>Tableau 4.70</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 20% (85%GGBFS+15%CPJ)	129
<i>Tableau 4.71</i>	Mesure de la densité sèche du C BR imbibé à 4 jours à 25% (85%GGBFS+15%CPJ)	130
<i>Tableau 4.72</i>	Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 25% (85%GGBFS+15%CPJ)	130

LISTE DES FIGURES

<i>Figures</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
<i>Figure 1.1</i>	Machine universelle de l'essai CBR	4
<i>Figure 1.2</i>	Certains termes utilisés dans la construction de chaussée	6
<i>Figure 1.3</i>	Courbe charge- enfoncement	09
<i>Figure 1.4</i>	Mécanisme de rupture sous le piston CBR	9
<i>Figure 1.5</i>	Classification des liants	14
<i>Figure 1.6</i>	Photographie du clinker qui se présente sous la forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels	14
<i>Figure 1.7</i>	Cycle de la chaux	20
<i>Figure 2.1</i>	Site d'extraction du Kaolin utilisé	32
<i>Figure 2.2</i>	Kaolinite DD3 granulé et broyé	32
<i>Figure 2.3</i>	Micrographie d'un grain du Kaolin DD ₃	33
<i>Figure 2.4</i>	Représentation de la distribution granulométrique suivant les différentes classes	34
<i>Figure 2.5</i>	La bentonite utilisée dans cette recherche	34
<i>Figure 2.6</i>	Structure chimique de la Bentonite	35
<i>Figure 2.7</i>	les types des laitiers selon les méthodes de refroidissement	40
<i>Figure 2.8</i>	Schéma d'élaboration du laitier bouleté	41
<i>Figure 2.9</i>	Laitier bouleté	42
<i>Figure 2.10</i>	Déversement du laitier dans des fosses de 20 à 40m de large, 80 à 200m de long(Laitier cristallisé).	42
<i>Figure 2.11</i>	Laitier des hauts fourneaux d'EL HADJAR sur le site	44
<i>Figure 2.12</i>	exemple de la composition du mélange étudié (DD3, bentonite, GGBFS, Cao, H ₂ O)	44
<i>Figure 2.13</i>	mélange uniforme sec du sol traité au laitier activé	45
<i>Figure 2.14</i>	Pesée de la proportion d'eau	45
<i>Figure 2.15</i>	l'addition de l'eau et le sol humide non uniforme	46
<i>Figure 2.16</i>	le mélange uniforme après l'addition de l'eau	46
<i>Figure 2.17</i>	Echantillon préparé et conservé dans le dessiccateur	47
<i>Figure 2.18</i>	Sol compacte	47
<i>Figure 2.19</i>	Sol compacte après rasage	48
<i>Figure 2.20</i>	Matériels utilisés	49
<i>Figure 2.21</i>	poser des papiers filtre à la base de moule	50
<i>Figure 2.22</i>	Positionnement de disque de gonflement et les surcharges	50
<i>Figure 2.23</i>	Les éprouvettes de sol en cours d'imbibition	51
<i>Figure 2.24</i>	Egouttage de l'éprouvette	51
<i>Figure 2.25</i>	Préparation de la machine CBR et exécution de poinçonnement	52
<i>Figure 2.26</i>	L'éprouvette de sol poinçonné	53
<i>Figure 2.27</i>	Prélèvement d'un échantillon pour mesurer la teneur en eau	53
<i>Figure 2.28</i>	Démoulage à l'aide d'extracteur	54
<i>Figure 3.1</i>	Valeur CBR immédiat pour sol non traité	57
<i>Figure 3.2</i>	Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 5% (85% laitier+15% Cao)	57
<i>Figure 3.3</i>	Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 10% (85% laitier+15% Cao)	58

<i>Figures</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
<i>Figure 3.4</i>	Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 15% (85% laitier+15% Cao)	58
<i>Figure 3.5</i>	Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 20% (85% laitier+15% Cao)	59
<i>Figure 3.6</i>	Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 25% (85% laitier+15% Cao)	59
<i>Figure 3.7</i>	Récapitulatif des valeurs CBR immédiat activé à la chaux	60
<i>Figure 3.8</i>	Valeur CBR immédiat pour sol non traité	61
<i>Figure 3.9</i>	Valeur CBR immédiat activé au ciment à 5% (85% GGBFS+15% CPJ)	62
<i>Figure 3.10</i>	Valeur CBR immédiat activé au ciment à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)	62
<i>Figure 3.11</i>	Valeur CBR immédiat activé au ciment à 15% (85% GGBFS+15% CPJ)	63
<i>Figure 3.12</i>	Valeur CBR immédiat activé au ciment à 20% (85% GGBFS+15% CPJ)	63
<i>Figure 3.13</i>	Valeur CBR immédiat activé au ciment à 25% (85% GGBFS+15% CPJ)	64
<i>Figure 3.14</i>	Récapitulatif des valeurs CBR immédiat activé au ciment	65
<i>Figure 3.15</i>	Comparaison des valeurs CBR pour les laitiers activés à la chaux ou au ciment	66
<i>Figure 3.16</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours pour sol non traité	67
<i>Figure 3.17</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 5% (85% GGBFS+15% Cao)	67
<i>Figure 3.18</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 10% (85% GGBFS+15% Cao)	68
<i>Figure 3.19</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 15% (85% GGBFS+15% Cao)	68
<i>Figure 3.20</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 20% (85% GGBFS+15% Cao)	69
<i>Figure 3.21</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 25% (85% GGBFS+15% Cao)	69
<i>Figure 3.22</i>	Récapitulatif des valeurs CBR imbibé à 2 jours	70
<i>Figure 3.23</i>	Variation du gonflement linéaire absolu à 2 jours d'immersion dans l'eau	71
<i>Figure 3.24</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours pour sol non traité	72
<i>Figure 3.25</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 5% (85% GGBFS+ 15% CPJ)	72
<i>Figure 3.26</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 10% (85% GGBFS+ 15% CPJ)	73
<i>Figure 3.27</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 15% (85% GGBFS+ 15% CPJ)	73
<i>Figure 3.28</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 20% (85% GGBFS+ 15% CPJ)	74
<i>Figure 3.29</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours à 25% (85% GGBFS+ 15% CPJ)	74
<i>Figure 3.30</i>	Récapitulatif des valeurs CBR imbibé à 2 jours	75
<i>Figure 3.31</i>	Variation du gonflement linéaire absolu à 2 jours d'immersion dans l'eau	76
<i>Figure 3.32</i>	Comparaison des valeurs CBR imbibé à 2 jours pour laitier activé à la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) et laitier activé au ciment (85% GGBFS+ 15% CPJ)	77
<i>Figure 3.33</i>	Comparaison des valeurs de gonflement à 2 jours d'immersion pour laitier activé à la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) et laitier activé au ciment (85% GGBFS+ 15% CPJ)	77
<i>Figure 3.34</i>	Valeur CBR imbibé à 2 jours pour sol non traité	78
<i>Figure 3.35</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 5% (85% GGBFS+ 15% Cao)	79
<i>Figure 3.36</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 10% (85% GGBFS+ 15% Cao)	79

<i>Figures</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
<i>Figure 3.37</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 15% (85% GGBFS+ 15% Cao)	80
<i>Figure 3.38</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 20% (85% GGBFS+ 15% Cao)	80
<i>Figure 3.39</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 25% (85% GGBFS+ 15% Cao)	81
<i>Figure 3.40</i>	Récapitulatif des valeurs CBR imbibé à 4 jours	82
<i>Figure 3.41</i>	Variation du gonflement linéaire absolu à 4 jours d'immersion dans l'eau	83
<i>Figure 3.42</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours pour sol non traité	84
<i>Figure 3.43</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 5% (laitier + ciment)	84
<i>Figure 3.44</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 10% (laitier + ciment)	85
<i>Figure 3.45</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 15% (laitier + ciment)	85
<i>Figure 3.46</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 20% (laitier + ciment)	86
<i>Figure 3.47</i>	Valeur CBR imbibé à 4 jours à 25% (laitier + ciment)	86
<i>Figure 3.48</i>	Récapitulatif des valeurs CBR imbibé à 4 jours	87
<i>Figure 3.49</i>	Variation du gonflement linéaire absolu à 4 jours d'immersion dans l'eau	88
<i>Figure 3.50</i>	Comparaison des valeurs CBR immédiat et imbibé à 4 jours	89
<i>Figure 3.51</i>	Comparaison des valeurs de gonflement à 4 jours d'immersion pour laitier activé à la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) et laitier activé au ciment (85% GGBFS+ 15% CPJ)	89



Introduction



INTRODUCTION GENERALE

Le développement de tout pays se reflète en grande partie par ses infrastructures routières. Ces derniers temps, l'Algérie a initié plusieurs grands projets de constructions linaires tels que les routes, les autoroutes, les chemins de fer, les barrages et les réseaux aéroportuaires afin de faciliter le développement de l'agriculture, du commerce et de l'industrie. Malheureusement, les sols de bonnes qualités nécessaires pour mener à bien ces projets ne sont pas toujours disponibles sur les sites de construction. Certains sols fins créent un obstacle devant les ingénieurs à cause de mauvaises caractéristiques géotechniques. La solution à ce problème est de traiter ces sols pour améliorer les propriétés géotechniques souhaitées.

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20^{ème} siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection et les méthodes des traitements par des aditifs, de pilonnage ou de congélation.

Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

Et pour ce la nous sommes décidés à utiliser des matériaux qui sont disponibles au marché algérien (laitier granulé) en associant ce dernier à la chaux d'une part et au ciment d'autre part pour stabiliser un sol fin (DD3+bentonite).

Le laitier broyé granulé (GGBFS) est largement disponible en Algérie. En génie civil, il est essentiellement utilisé comme agrégat dans la confection du béton et le revêtement des chaussées. La recherche au niveau de l'université Badji Mokhtar d'Annaba est très en avance dans ce domaine aussi bien en matériau qu'en géotechnique routière. Des travaux ont été effectués par les différentes équipes de recherche au niveau du département de génie civil.

L'Algérie produit environ 500.000 tonnes de laitier annuellement. Cette production est appelée à croître cette année avec l'ouverture des usines sidérurgiques de BELARA.

Les premiers travaux utilisant le laitier ont été effectués en Allemagne vers les années 1800 lors de la fabrication du béton. Ce résidu métallurgique seul présente des propriétés de sédimentation latentes. La chaux hydraulique et le ciment portland permet d'activer cette propriété en vue de son utilisation dans la stabilisation des sols fins problématiques.

La stabilisation des sols est largement utilisée dans la construction des routes des aéroports et les couches de fondations.

Elle permet d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols sur place et assurer la bonne fonctionnalité des ouvrages linéaire à prix bas.

Plusieurs pays ont utilisé le laitier dans la stabilisation des sols. Cette technique de stabilisation est malheureusement méconnue En Algérie et le laitier produit dans les usines sidérurgiques reste entasser sur place portant atteinte à l'environnement et le cadre de vie des citoyens. Ce laitier n'a fait aucune étude scientifique quant à son utilisation dans le domaine géotechnique et la stabilisation des sols fins en particulier.

Afin de résoudre le problème environnemental posé et exploiter cette ressource à bas prix dans la construction des ouvrages géotechniques, le présent mémoire a pour objectif de définir ce matériau local et d'initier son utilisation dans l'amélioration des propriétés d'un sol problématique. Une série d'essais a été conduite sur des éprouvettes de sol stabilisées au laitier activé à la chaux hydraulique et au ciment Portland afin d'évaluer l'indice de portance CBR immédiat et après immersion dans l'eau et comparer les résultats obtenus des deux méthodes d'activation du laitier utilisées. Ce travail de recherche est présenté dans ce mémoire en trois chapitres suivis d'une conclusion.

Le chapitre 01 détaille une recherche bibliographique sur l'essai CBR, les méthodes de stabilisation des sols fins problématiques au laitier granulé des hauts fourneaux, à la chaux ou au ciment.

Le chapitre 02 présente les différents matériaux utilisés, les méthodes de préparation des différentes éprouvettes de sol et les différentes étapes pour la conduction de l'essai CBR selon l'American Society of Testing Materials (ASTM).

Le chapitre 03 détaille analyse les résultats des différents essais CBR à différentes proportions d'ajout hydraulique effectués au Laboratoire Matériau Géotechnique et Environnement LMGE ensemble avec leur interprétation et leur exploitation pratiques.

En fin une conclusion et des recommandations sont faites à la fin de ce mémoire.



chapitre 1 :
recherche Bibliographique



Chapitre 1

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. INTRODUCTION :

Le chapitre recherche bibliographique présente avant tout une revue détaillée sur l'essai CBR (Californian Bearing Ratio) englobant l'objectif, le champ d'application, le principe et théorie, l'historique de développement, les types des éprouvettes à réaliser, les différentes définitions utilisées en travaux public, critères de compactage et une revue détaillée sur les matériaux utilisés. La stabilisation des sols à aussi fait l'objet d'étude et présentée ci-après. Trois types de stabilisation des sols ont été détaillés, à savoir la stabilisation physique, La stabilisation physico-chimique et la stabilisation chimique. L'accent a été mis sur cette dernière car elle concerne les sols fins problématiques objet de notre recherche. La stabilisation chimique des sols fins par un ajout alternatif composé de laitier granulé activé par fois a la chaux hydratée (CaO) et autre fois au ciment portland composé (CPJ).

Enfin, des travaux antérieurs qui ont été fait dans différents pays utilisant le laitier granulé dans la stabilisation chimique des sols problématiques est présenté afin de pouvoir faire une comparaison des résultats obtenus

1.2. CALIFORNIAN BEARING RATIO :

1.2.1. Définitions : Californie Bearing Ratio ou tout court le CBR, est le rapport de la force nécessaire pour pénétrer un piston circulaire de 1935 mm² de section transversale dans le sol dans un moule spécial à raison de 1.27mm/min à celle requise pour une pénétration similaire dans un échantillon standard de roche concassée compactée. La valeur du CBR est déterminée à la pénétration de 2,5 et 5,0 mm et la valeur prise sera la plus élevée. La valeur du CBR est donnée par l'équation ci-dessous

$$CBR = \frac{\text{Force Mesurée}}{\text{Force Standard}} * 100$$

1.2.2. Objectif et champ d'application : Le California Bearing Ratio ou tout court le CBR est un essai empirique développé en Californie aux États-Unis permet à déterminer la capacité de portance d'un sol compacté, en estimant sa résistance au poinçonnement, en fonction de son état, sa densité et son humidité, ainsi que les charges appliquées. Cet essai CBR est utilisé pour le dimensionnement des couches porteuses des constructions linéaires telles les routes, les autoroutes et les chemins de fer et l'orientation des travaux de terrassements.

L'essai est généralement effectué selon les procédures stipulées par les normes British Standard (BS) et/ou American Society of Testing Materials (ASTM). En réalité, il y a peu de différence entre ces deux normes internationales. Cependant, il existe de nombreuses façons de préparer les éprouvettes pour l'essai et la pratique Américaine diffère légèrement de la méthode Britannique.



Figure 1.1 Machine universelle de l'essai CBR

Université Badji Mokhtar-Annaba

1.2.3. Principe : L'essai est fait en introduisant un piston standard dans l'éprouvette de sol qui déjà préparé à une vitesse de pénétration constante 2.27 T/min a laide d'une manivelle et cadence maitre électrique pour assurer la vitesse de pénétration et lire la force requise pour maintenir cette vitesse à l'aide d'une comparateur . A partir de la relation

Charge-Pénétration qui en résulte, la valeur CBR peut être déduite pour le sol dans la condition à laquelle il a été testé.

1.2.4. Historique de Développement : L'essai a été développé au cours des années 1930 au laboratoire du Département de recherche sur les matériaux de la Division des Autoroutes de Californie aux États-Unis et a été rapporté par O. J Porter (1938). Antérieurement l'évaluation de la qualité des matériaux utilisés dans les bases et les sous bases de l'autoroute dépendaient de méthodes indirectes telles que l'identification du sol et l'analyse de sa bonne fraction seulement. Avec l'augmentation du volume et du poids du trafic au début des années 1930, il est apparu que ces procédures n'étaient pas suffisantes. Porter (1938) a pu montrer qu'il existait une corrélation favorable entre ses données d'essai et la performance observée des routes sous l'action du trafic et la valeur de sa méthode fut reconnue et par la suite largement utilisée. L'essai CBR a été recommandé à la Société Américaine des Tests et des Matériaux en tant que test standard par Stanton (1944), et est maintenant désigné *ASTM D 1883*. La procédure a été développée pour être utilisée sur la construction d'aérodromes par Porter (1949). Davis (1949) a montré que la procédure était applicable à la conception des routes et des pistes d'aérodrome en Grande-Bretagne et une procédure standard pour l'utilisation en Grande-Bretagne a été donnée par le Laboratoire de Recherche en Route (1952). L'essai est apparu pour la première fois dans le British Standards en 1953 puis a été utilisé pour les sols stabilisés (BS 1924: 1953). Il a été appelé l'essai California Bearing Ratio CBR dans l'essai 15 du BS 1377. 1967. Dans Bs 1924 1967 et 1975, et dans la norme standard ASTM, il est désigné par l'appellation Bearing Ratio Test. Ici on s'en réfère à l'essai CBR comme étant l'essai Test 16 du BS 1377 :1975, Le principe de l'essai reste et est toujours reconnu et utilisé dans le monde comme un critère important dans la conception des constructions linéaires en générales.

1.2.5. Types de l'échantillon pour tester : L'essai CBR en laboratoire est effectué sur un échantillon de sol préparé dans un moule de dimension 152.7*152.7mm appelé moule CBR. L'échantillon peut être soit intact ou remanié. Sa préparation peut être effectuée de plusieurs façons. Les échantillons remaniés sont compactés statiquement sous charge constante et continue, ou dynamiquement compacté par une dame de 4.5kg tombant d'une hauteur constante en 5 couches de sol d'épaisseur égales, à la teneur en eau requise pour atteindre une densité préalablement. Les échantillons non remaniés sont prélevés directement sur site dans un moule CBR, soit à partir d'un sol naturel, soit à partir de sols re-

compactés, comme dans le remblai ou une sous-couche de route. Les échantillons peuvent être testés dans le moule immédiatement ou après le trempage dans l'eau pendant deux ou quatre jours.

Un type similaire d'essai peut être effectué sur le sol in situ par l'utilisation d'un banc d'essai monté sur un véhicule ou en remorque appelé essai de plaque. Le principe est le même que l'essai de laboratoire, mais les détails sont au-delà de la portée de cette thèse. Les résultats des essais in-situ ne sont pas directement comparables aux résultats des essais en laboratoire. L'essai en laboratoire dans le moule CBR est reconnu comme essai Standard.

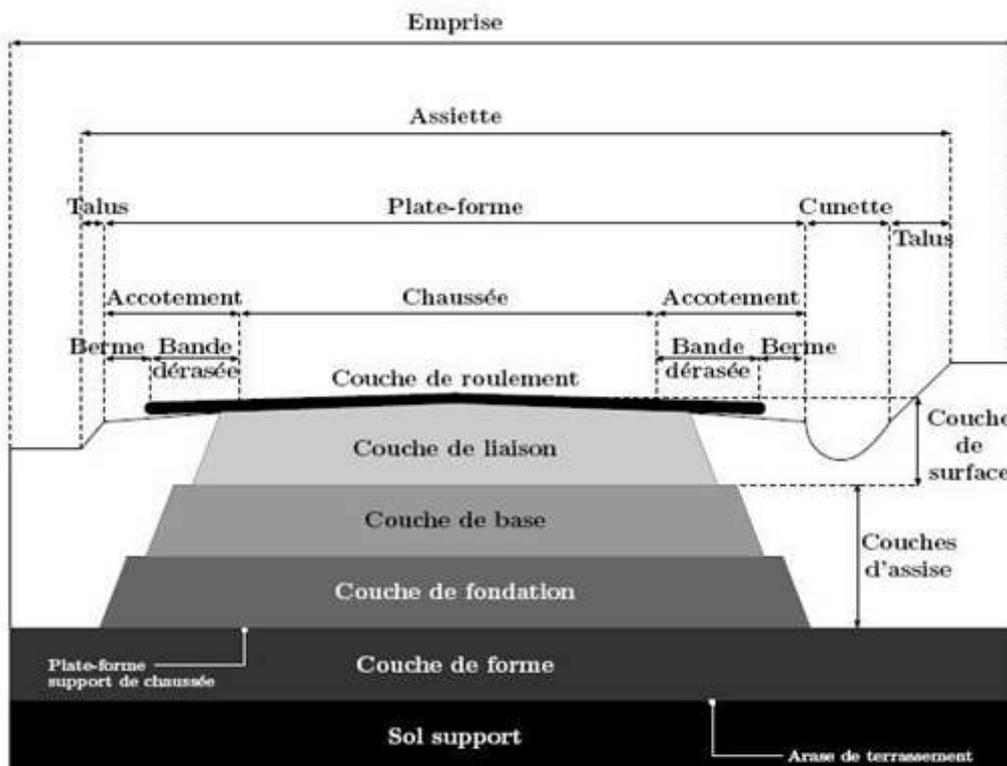


Figure 1.2 Certains termes utilisés dans la construction de chaussée

Résistance à la pénétration : Force ou pression nécessaire pour maintenir la pénétration constante du piston dans le sol.

Couche de forme : La construction d'un sol naturel ou d'un embarcadère préparé et compacté pour supporter un trottoir.

Dans certains cas (par exemple remblais en sol gonflant ou déblais en sol de faible portance), on peut avoir intérêt à remplacer sur une certaine épaisseur le sol naturel, par un meilleur sol sélectionné à cet effet, soit choisi parmi les sols rencontrés dans les terrassements, soit même

prélevé dans des emprunts situés à faible distance du chantier ou traiter ces sols par des ajout pour amélioré.les caractéristique géotechnique des sols on place selon A. Saouane.

Couche d'assise : L'assise de chaussée est généralement constitué de deux couches, la couche de fondation ; surmontée de la couche de base. Ces couches ont pour rôle essentiel de résister aux charges verticales induites par le trafic et de transmettre convenablement les pressions qui en résultent sur le terrain naturel afin de maintenir les déformations à ce niveau, dans les limites admissibles. La couche de base doit être traitée avec plus de soin que la couche e fondation puisque c'est elle qui, d'abord, est soumise aux charges verticales.

Couche de surface : La couche de surface, a pour principal rôle, en plus d'assurer une fermeture étanche de la chaussée, d'absorber les efforts horizontaux tangentiels et de transmettre les charges verticales. Cette couche de surface peut être simple ou multiple ; dans ce dernier cas, la couche en contact direct avec les roues est dite couche de roulement, les autres couches, situées en dessous, s'appelant couches de liaison.

Dans le cas des chaussées en béton de ciment, la dalle, qui repose sur la couche de fondation, joue simultanément le rôle de couche de surface et celui de couche de base.

La qualité d'usage de la chaussée dépend pour une large part, des caractéristiques de surface de la couche de roulement, donc de sa nature et de son état. Cette couche contribue en outre à la pérennité de la chaussée, entre autres par l'étanchéité qu'elle apporte.

Cet ensemble de fonctions fait que le choix de la couche de surface doit être issue de la prise en considération de plusieurs objectifs qu'on peut ranger en quatre groupes :

- La sécurité et le confort des usagers, en relation avec les caractéristiques de surface.
- Le maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels de dévers glaçage
- L'impact sur l'environnement, avec notamment la recherche d'une réduction .des bruits de roulement.

Chaussée : couche construite en matériau durable d'épaisseur spécifique, généralement en béton, en asphalte ou en matériaux bitumineux, conçue pour le transport des véhicules à roues. Ce terme couvre les routes, les aérodromes, les pistes et les voies de circulation.

Chaussées souples : Structure comporte une couverture bitumineuse mince (moins de 15 cm) parfois réduite, à un simple enduit superficiel, Reposant sur une ou plusieurs Couches de matériaux Granulaires non traites (GNT)

Épaisseur globale de la Chaussée est généralement Comprise entre 30 à 60cm selon A Saouane

Chaussées bitumineuses épaisses : Structure comporte une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités au liant hydrocarboné (bitumineux), fait d'une ou deux voire trois couches

Épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 15 à 40cm

Chaussées semi-rigides : Structure comporte une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques Disposés en une ou deux Couches, dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20cm à 50cm

Chaussées mixtes : Structure comporte une couche de surface bitumineuse et une couche de base (10 à 20cm) en matériaux bitumineux (généralement du grave bitume) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40cm)

Chaussées inverses : Structure comporte entre la couche de fondations traitées aux liants hydrauliques et les couches supérieures bitumineuses, une couche supplémentaire de matériaux granulaires.

Chaussées rigides : Structure comporte une dalle en béton de ciment hydraulique (15cm à 30cm)

- Dalle continue renforcées avec armatures (pas de joints)
- Dalle sans armatures (joints +goujons) (joints 4.5m – 9m)
- Dalle avec treillis métallique (joints 9m-30m)
- Dalle en béton précontraint (90m-210m)
- Dalle en béton compacté au rouleau

1.2.6. Principes et Théorie : L'essai CBR est un test de cisaillement à taux de pénétration constante dans lequel un plongeur standard est poussé dans le sol à une vitesse constante et la force requise pour maintenir cette vitesse est mesurée à des intervalles adéquats. La relation de pénétration-charge est tirée comme un graphique duquel les charges correspondantes aux pénétrations standards est lu et exprimé comme le pourcentage des charges standards. Le pourcentage accepté est connu comme le California Bearing Ratio ou la valeur CBR du sol dans l'état où il a été testé. La valeur CBR peut être vue comme une mesure indirecte de la résistance du sol au cisaillement, mais il ne peut être lié directement aux paramètres de la résistance au cisaillement. Un mécanisme supposé d'échec du sol sous le piston (Black, 1961) est indiqué dans la figure 1.4.

Les forces standard correspondantes aux pénétrations comprises entre 2 et 12 mm, indiquées dans la BS, sont indiquées dans le tableau 1.1. Les forces montrées sont de type faible, correspondant aux pénétrations de 2.5 et 5 mm, sont ceux utilisées dans les calculs standards de la valeur CBR. Ceux-ci sont équivalents aux critères originaux pour les pressions de contact sous un plongeur standard

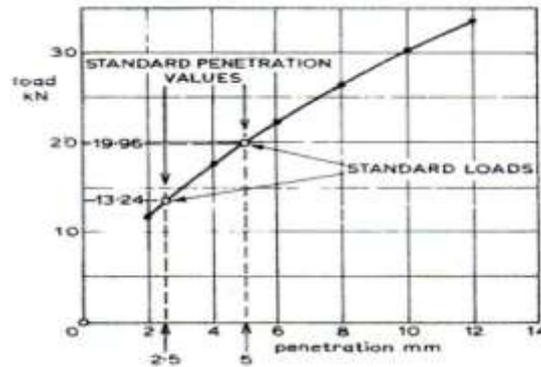


Figure 1.3 Courbe charge- enfoncement

La valeur CBR est essentiellement un moyen d'exprimer les données obtenues de la courbe pénétration-charge comme une quantité numérique unique.

<i>Pénétration (mm)</i>	<i>Force (kN)</i>	<i>Pression (kN/m²)</i>
2	11.5	
2.5	13.24	6894.757
4	17.6	
5	19.96	10342.14
6	22.2	
8	26.3	
10	30.3	
12	33.5	

Tableau 1.1 Relation Force-Pénétration pour essai CBR

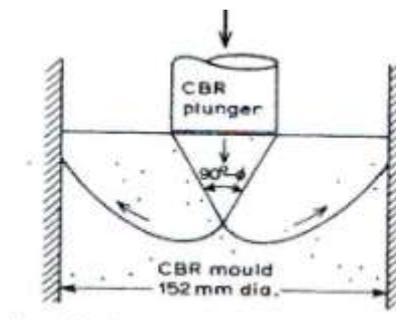


Figure 1.4 Mécanisme de rupture sous le piston CBR

1.2.7. Critères de compactage : Un test CBR est normalement effectué sur un échantillon qui reproduit le plus fidèlement possible les conditions susceptibles de se produire sur le terrain. Si la densité in situ et la teneur en eau sont connues, un échantillon d'essai peut être préparé pour remplir ces conditions.

Cependant, les spécifications relatives aux embarcadères et aux embases sont souvent formulées en termes de plage de teneur en eau autorisée et de teneur maximale en vides d'air. La plage de teneur en eau est généralement spécifiée en fonction de la teneur en eau optimale pour l'une des méthodes de compactage de laboratoire standard. Les vides d'air maximum autorisés peuvent être typiquement de 5% du volume total.

La densité sèche ρ_d d'un sol à une teneur en eau de w (%) et avec une teneur en air de V_a (%) (exprimé comme un pourcentage du volume total) est donné par l'équation :

$$\rho_d = \frac{1 - \frac{V_a}{100}}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{100}}$$

La densité humide ρ correspondante de l'équation est :

$$\rho = \frac{100 + w}{100} * \rho_d$$

Combinant ces deux équations, la densité humide de laquelle la masse de sol requise pour juste remplir le moule CBR après compactage ou compression peut être calculée en utilisant l'équation :

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{V_a}{100}\right) \left(1 + \frac{w}{100}\right)}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{100}}$$

1.3. STABILISATION :

La stabilisation des sols, dans son sens général, considère toutes les techniques physiques, chimiques ou physico-chimiques utilisées pour améliorer les propriétés d'un sol en vue de son utilisation dans la construction (Ashish Kumar Pathak, 2014). En géotechnique routière, la stabilisation des sols est un processus réglementé utilisé pour l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques d'un sol par ajout d'additifs en vue de son utilisation

comme couche et sous couche de fondation destinées à supporter le trafic continu des véhicules et les surcharges de la chaussée.

La nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres pour les constructions de Génie Civil n'a fait que croître au cours des dernières décennies. D'une part le développement des grandes agglomérations urbaines a progressivement imposé de réaliser dans les zones de terrains en place non encore construites, qui sont souvent les plus médiocres, des fondations, des grandes excavations, des tunnels et des ouvrages linéaires. D'autre part le sol, matériau peu coûteux, est devenu de plus en plus un matériau de construction et l'on cherche, pour des raisons souvent économiques, à pouvoir utiliser les sols de qualité médiocre. Il en a résulté le développement d'un très grand nombre de techniques destinées à augmenter les caractéristiques mécaniques globales des sols en place ou rapportés. On peut distinguer grande catégorie de techniques :

- Celles où la structure du sol est améliorée, notamment au niveau des contacts entre les grains, par un additif, un liant, un coulis, ou modifiée par réduction des vides entre les grains, pour atteindre un état plus dense; ce sont les techniques d'amélioration des sols fins.

1.3.1. La stabilisation physique : est réalisée principalement par l'application d'une énergie externe par compactage pour augmenter les performances d'un matériau naturel. Les avantages du compactage sont cependant bien compris et ne seront donc pas détaillés dans cette thèse. Cette technique appelée aussi stabilisation mécanique est aussi le processus d'incorporer un autre matériau dans le but d'obtenir un mélange bien gradué ou diminuer la plasticité du matériau d'origine et aboutir ainsi à des matériaux appropriés à la construction routière. Les propriétés physiques du matériau d'origine sont modifiées sans aucune réaction chimique. Par exemple, des fines sont ajoutées à un matériau pulvérulent pour obtenir un matériau avec une courbe granulométrique proche de l'idéale. Cela permettra d'augmenter la densité obtenue par compactage et améliorer la stabilité du matériau destinés à supporter le trafic routier. La proportion de matière ajoutée est généralement comprise entre 10 et 50%. La stabilisation mécanique est généralement le processus le plus rentable pour améliorer les matériaux pulvérulents peu gradués. Cette technique de stabilisation est généralement utilisée pour augmenter la portance des matériaux granulaires peu gradués afin d'obtenir un matériau adéquat à la construction routière. La rigidité et la résistance sont généralement plus faibles que celles obtenues par une stabilisation chimique et sont souvent

insuffisantes pour les chaussées à forte circulation. Il est des fois nécessaire d'ajouter un agent stabilisant pour améliorer encore mieux les propriétés du mélange des matériaux constitué.

1.3.2. La stabilisation physico-chimique : est le processus d'incorporer un additif dans le système. Dans la littérature cet ajout signifie généralement le bitume ou le goudron. Ces produits sont trop visqueux pour être utilisés à température ambiante et doivent être transformés en bitume fluidifié (une solution de bitume en kérosène ou en diesel) ou en bitume (particules de bitume en suspension dans l'eau). Lorsque le solvant s'évapore ou que l'émulsion "se casse", le bitume se dépose sur le matériau. Le bitume agit comme une cohésion dans les sols granulaires et agent d'étanchéité dans les sols cohérents pour empêcher la pénétration de l'eau. Dans de nombreux cas, le matériau bitumineux agit comme une couche imperméable dans la chaussée, empêchant la montée de l'humidité capillaire. Dans un pays où le bitume est relativement cher par rapport au ciment et où la plupart des compétences sont dans la construction de ciment, il semble plus raisonnable d'utiliser un stabilisateur de ciment plutôt qu'un produit à base de bitume / goudron

1.3.3. La stabilisation chimique : implique l'ajout d'additifs dans le sol naturel d'origine pour former de nouveaux matériaux cimentaires améliorant ainsi les propriétés de sol (moins de gonflement, une meilleure plasticité et maniabilité et une meilleure portance). Selon Zemouli et col, 2018 cette technique est utilisée principalement avec les sols à texture fine comme le limon et l'argile. De nombreuses substances chimiques telles que la chaux, le ciment, le chlorure de calcium, le chlorure de sodium et divers composants de silicate ont été utilisées dans le passé pour stabiliser chimiquement les sols. La chaux et le ciment sont les deux additifs largement employés dans la stabilisation chimique des sols argileux utilisés dans la construction des couches et sous-couche de base au lieu d'importer des matériaux granulaires (Bhattacharja et al. 2003). La stabilisation à la chaux est plus utilisée que la stabilisation au ciment. La chaux est souvent moins chère, sa production se fait localement et peut également améliorer la maniabilité de l'argile sur chantier. La stabilisation à la chaux nécessite une fraction d'argile adéquate et une température de prise relativement élevée d'où son utilisation est encore plus appropriée dans les pays chauds. En plus, l'hydratation du ciment pourrait être retardée par la montmorillonite, un minéral argileux prédominant dans les sols fins gonflants Bien que la chaux soit largement utilisée, le ciment reste très utile pour stabiliser les sols ayant un faible pourcentage d'argile et/ou une température peu élevée. Toutefois, en raison de l'épuisement progressif des matériaux de construction traditionnels et

des pénuries dans la production de ciment, la nécessité de développer un liant alternatif au ciment pour la stabilisation des sols est devenue nécessaire. Des travaux de recherche un peu partout dans le monde portant sur l'utilisation des sous-produits industriels comme substitut au ciment et à la chaux ont été entrepris. L'utilisation de sous-produits industriels présente d'énormes avantages environnementaux et économiques. Toutefois, ces matériaux doivent satisfaire certaines exigences en vue de leur utilisation dans la construction telles que la suppression du potentiel de gonflement, l'amélioration des caractéristiques de plasticité et de résistance et enfin et surtout sa disponibilité.

Le laitier granulé de haut fourneau a été employé que récemment en Australie, en Afrique du Sud, au Royaume-Uni (Higgins et al, 1998) et aux Etats Unis d'Amérique (Lynn Salvati, 2005). La wilaya d'Annaba dans le Nord-Est de l'Algérie est une région industrielle importante. Le complexe d'El Hadjar qui s'étend sur plusieurs hectares produit de grande quantité d'acier, de fer et de sous-produits industriels. SIDER Algérie, la société qui gère cette usine, produit plus de cinq cents mille tonnes de laitier de haut fourneau chaque année envoyé généralement à l'enfouissement en tant que résidus portant préjudice à l'environnement. Cette quantité sera encore plus importante avec le démarrage du complexe sidérurgique de Bellara, un projet en cours de réalisation par une joint-venture entre l'Algérie et l'Emirat Arabe Uni dans la région d'El Milia (Jijel). Une façon de traiter ses déchets en un produit utile est de procéder à leur refroidissement rapide à l'eau dès qu'ils sont retirés des haut-fourneaux pour produire un laitier granulé vitreux riche en silice et en calcium. Ce dernier est par la suite broyé pour donner un laitier granulé broyé de haut fourneau connu sous l'appellation Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS).

Le GGBFS possède peu de propriétés de cimentation, généralement il est utilisé en combinaison avec du ciment Portland ou de la chaux hydratée (hydroxyde de calcium) qui prévoient l'alcali nécessaire à l'activation et par-delà l'amélioration des sols (Higgins et Kennedy 1998; Higgins et al 1998). Son application sur le terrain pourrait bien être bénéfique à l'Algérie en réduisant le coût de construction des infrastructures routières ou autres structures tout en utilisant des déchets de l'industrie sidérurgique. L'utilisation du GGBFS présente aussi d'autres avantages, par exemple le GGBFS peut être utilisé comme un matériau de substitution au ciment ou à la chaux et par conséquent réduit la production des gaz à effet de serre (CO₂). La production de ciment et de chaux contribue à la production de CO₂, ceci est dû à la décomposition nécessaire de calcaire (CaCO₃) pour former le Cao et éliminer le CO₂. A titre d'exemple, environ une tonne de CO₂ est produite pour chaque tonne de clinker

de ciment Portland (Lynn Salvaty, 2004). Ce processus produit aussi du CO₂ indirectement puisque la combustion des combustibles fossiles dans des hauts fourneaux à haute température est nécessaire pour ce processus de décomposition.

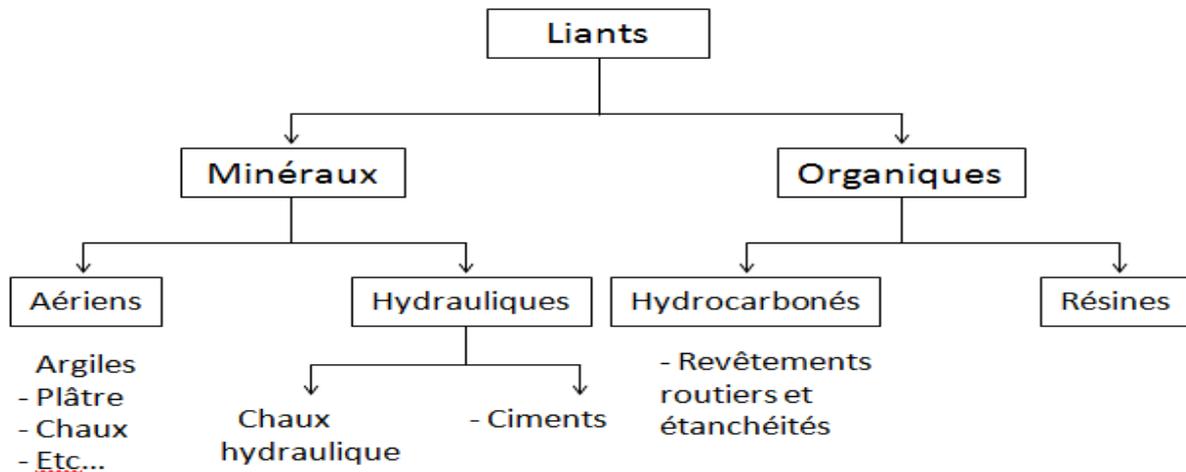


Figure 1.5 Classification des liants

1.3.3.1. Stabilisation au ciment: Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, Tout ciment peut être utilisé pour la stabilisation.

En 1824, l'Anglais Joseph Aspdin, breveta un ciment qu'il a produit en affirmant qu'il est aussi dur que de la pierre de Portland. Aspdin obtenait une matière performante en calcinant de la roche marneuse jusqu'à liquéfaction, à 1200°C. En broyant ensuite finement la matière vitrifiée refroidie – le « clinker » (voir figure1.6), il obtenait un liant d'excellente qualité.



Figure 1.6. Photographie du clinker qui se présente sous la forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels

Tout ciment peut être utilisé pour la stabilisation, mais le ciment Ordinaly Portland est le plus répandu dans l'ensemble du monde. L'ajout de matière de ciment, en présence d'humidité, produit des aluminates de calcium hydratés et des gels de silicate qui cristallisent et relient les particules de matière. La majeure partie d'un matériau stabilisé au ciment provient du ciment hydraté. Une réaction chimique se déroule également entre le matériau et la chaux, qui est libérée lorsque les hydrates de ciment conduisent à une nouvelle augmentation de la résistance. Les matériaux granulaires peuvent s'améliorer en ajoutant une grande proportion de ciment Portland, généralement moins de 10%. L'ajout de plus de 15% de ciment entraîne habituellement un béton conventionnel. En général, la résistance du matériau augmentera sans cesse avec une augmentation de la teneur en ciment.

Constituants. Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à réguler la prise. Pour modifier les propriétés du ciment on ajoute d'autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques

La norme européenne NBN EN 197-1 relative au ciment définit les constituants suivants:

- Constituants principaux (> 95 % de la somme des constituants principaux et secondaires):
 - Clinker Portland (K);
 - Laitier granulé de haut-fourneau (S);
 - Matériaux pouzzolaniques :
 - Pouzzolane naturelle (P);
 - Pouzzolane naturelle calcinée (Q);
 - Cendres volantes:
 - Cendre volante siliceuse (V);
 - Cendre volante calcique (W);
 - Schiste calciné (T);
 - Calcaire (L - LL);
 - Fumée de silice (D);
- Constituants secondaires (< 5 % de la somme des constituants principaux et secondaires);
- Additifs (< 1 % de la somme des constituants principaux et secondaires);

- Sulfate de calcium (l'addition de cette matière a pour objet de réguler le temps de prise du ciment dans certaines limites).

Production du ciment : Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement de la matière première (dureté et humidité). Les procédés de fabrication du clinker peuvent être classés en quatre techniques :

- *la voie humide* : le procès le plus ancien des quatre est celui de la voie humide. La craie constituant la matière première est extraite en carrière et peut être très humide, elle est concassée et homogénéisée. Les matières de correction, nécessaire à l'obtention de la composition désirée, sont dosées et ajoutée à la craie au niveau du broyeur à pâte. Dans ce broyeur, on ajoute également de l'eau et la pâte obtenue est filtrée au travers de tamis, la partie la plus grossière retourne dans le broyeur et la partie fine est stockée dans un bassin. La pâte, qui contient de l'ordre de **30 à 35 %** d'eau, est ensuite pompée depuis le bassin et injectée dans un four très long (qui peut atteindre 220 m). Au fur et à mesure de son avancement dans le four, la pâte va se transformer en clinker, qui va être trempé dans le refroidisseur, avant d'être stocké en silo et les gaz provenant de la combustion sont filtrés et rejetés.

- *la voie semi humide* : dans cette voie on retrouve les mêmes étapes de préparation des matières premières, excepté le fait que la pâte va être filtrée au travers d'un filtre presse puis introduite dans une tour de préchauffage. Dans cette tour, la pâte, qui ne contient plus que **17 à 21 %** d'eau, rencontrent les gaz issus du four dans des cyclones et se transforment petit à petit en une farine par déshydratation. Cette farine entre ensuite dans un four rotatif, plus court que celui présent dans le procédé en voie humide, puisqu'il n'est plus nécessaire à ce niveau d'éliminer l'eau de la pâte.

- *la voie semi sèche* : dans le procédé semi-sec, on ne fabrique plus de pâte. Les matières premières sont broyées et homogénéisées avant d'être introduites sur une sole de granulation (disques inclinés de 35 à 37° sur l'horizontale) où, en étant mélangées avec de l'eau, elles donnent naissance à des granules. Le pourcentage en eau des granules est de l'ordre de **10 à 12 %**. Ces granules sont ensuite introduites sur la grille Lepol, dans ce préchauffeur, la pâte tombe sur des grilles perforées, au travers desquelles passent les gaz de combustion provenant du four. La pâte est ainsi déshydratée et partiellement décarbonatée avant de pénétrer dans le four rotatif.

- *la voie sèche* : le procédé sec a été mis au point pour éliminer l'étape d'évaporation d'eau contenu dans la pâte, il nécessite un calcaire dur contenant peu d'humidité. Les matières premières et correctrices sont introduites dans un broyeur à cru vertical, capable également de

séparer les grosses et les fines particules et enfin capable de sécher également les matériaux. La farine obtenue avec ce broyeur est ensuite homogénéisée dans un silo d'homogénéisation puis elle est introduite dans la tour de préchauffage. Les gaz sortant de la tour de préchauffage vont être partiellement refroidis dans la tour de conditionnement et vont ensuite être réutilisés en partie dans le broyeur à cru, pour réchauffer la farine. La longueur du four rotatif peut être réduite considérablement (de l'ordre de 50 m). Lorsque aujourd'hui une nouvelle usine est construite, c'est en général ce procédé qui est choisi parce qu'il est le plus économique et permet d'atteindre de très grandes capacités de production. Selon T Ali-Boucetta

Différents types de ciments : On distingue cinq types de ciments courants:

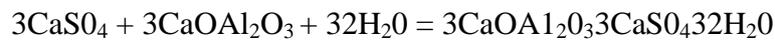
- CEM I Ciment Portland;
- CEM II Ciment Portland compose.
- CEM III Ciment de haut-fourneau;
- CEM IV Ciment pouzzolaniques;
- CEM V Ciment composé.

Réactions sol/ciment : L'hydratation du ciment se divise en trois phases très bien décrites par Pollard et al. (1991). Dans la phase I, (Birchan et al. 1978 référé par Pollard et al. 1991), la poudre de ciment est dispersée dans l'eau, lessivant rapidement les ions Ca^{2+} des grains anhydres pour former une solution contenant principalement de la portlandite (CH) selon Hélène Tremblay, 1998.

Laissant ainsi les grains de ciment riches en silice. Par la suite, le CH aqueux réagit avec les acides siliceux la surface du ciment pour former une membrane gélatineuse semi-perméable de C-S-H autour des particules de ciment (Double et Hellawell, 1977). Cette membrane cause alors une phase dormante dans le processus d'hydratation, faisant augmenter la pression osmotique. À la phase II, l'augmentation de la pression cause la rupture de la membrane avec le développement de nouveaux C-S-H de forme radiée autour des grains anhydres. La phase III est caractérisée par la cristallisation initiale de CH et la transformation du gel de C-S-H qui expose des surfaces spécifiques additionnelles des particules anhydres.

La poudre de ciment contient plusieurs phases déférentes. Les phases principales sont : alite (C_3S), belite (C_2S), aluminat de calcium (C_3A), aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) et périclase (MgO), et les phases mineures : chaux libre (CaO), anhydrite ($CaSO_4$), sulfates de sodium et de potassium (Na_2SO_4 et K_2SO_4) (Reardon, 1992). En additionnant de l'eau, les constituants solubles (chaux libre, sulfates alcalins et anhydrites) se dissolvent pour précipiter de la portlandite et du gypse (Reardon, 1992). La présence de gypse dans le ciment entraîne la

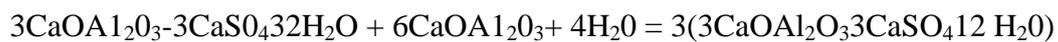
formation d'ettringite lors de son hydratation ce qui contribue à l'augmentation de la résistance (Kamon et al. 1989). L'ettringite se développe par la réaction entre le gypse et l'aluminate de calcium présent dans le ciment en suivant la réaction (Huang 1997) :



(gypse) (aluminate cal.) (eau) (ettringite)

Ce même auteur démontre que la formation d'ettringite, due à la présence de gypse, a un effet bénéfique seulement dans les cas où le sol consomme beaucoup de OH^- et de CaO de sorte que leur concentration dans la solution interstitielle est faible. De cette façon, les cristaux d'ettringite se développent aléatoirement en remplissant les pores sans se fixer aux particules.

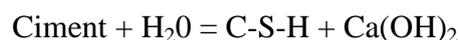
Après un mois de mûrissement, le gros de l'hydratation est complété, soit environ 70 % de l'hydratation totale, et les principaux produits d'hydratation sont : de la portlandite, du gel de C-S-H et du monosulfoaluminate (Reardon, 1992). Le monosulfoaluminate provient de la transformation de l'ettringite qui se produit avec le temps selon l'équation suivante (Pollard et al. 1991):



(Ettringite) (Aluminate cal.) (Eau) (Monosulfoaluminate)

Contrairement à la chaux, la minéralogie et la granulométrie des sols traités au ciment influencent peu les réactions puisque la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires. Le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols comparativement à la chaux qui a besoin de silice et d'alumine provenant des particules argileuses pour développer les réactions pouzzolaniques.

La principale réaction dans un mélange sol/ciment provient de l'hydratation des deux silicates anhydres de calcium (3CaOSiO_2 : C_3S et 2CaOSiO_2 : C_2S), constituants majeurs du ciment, qui forment deux nouveaux composés : l'hydroxyde de calcium (chaux hydratée, appelée portlandite) et le silicate de calcium hydraté (C-S-H) principal agent liant du béton. La réaction est la suivante :



Les produits d'hydratation du ciment ressemblent à ceux produits par les réactions pouzzolaniques. La différence majeure est que le ciment produit de la chaux alors que les réactions pouzzolaniques la consomment. Généralement, les réactions d'hydratation des

ciments sont plus rapides que celles de la chaux, mais dans les deux cas, la résistance finale résulte de la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H)

Avantages de la stabilisation du ciment :

- Il est largement disponible.
- Il est très durable.
- Le ciment de sol est assez résistant aux intempéries et fort.
- Les sols granulaires avec des fines suffisantes sont idéalement adaptés à la stabilisation du ciment car cela nécessite moins de ciment.
- Le ciment de sol réduit les caractéristiques de gonflement du sol.
- Il est couramment utilisé pour stabiliser les sols sableux et autres sols à faible plasticité. Le ciment interagit avec les fractions de limon et d'argile et réduit leur affinité pour l'eau.

Inconvénients de la stabilisation du ciment :

- Des fissures peuvent se former dans le ciment du sol.
- Le coût est relativement élevé.
- Il nécessite un travail supplémentaire.
- La quantité d'eau doit être suffisante pour l'hydratation du ciment et le mélange réalisable.

1.3.3.2. Stabilisation à la chaux : Le traitement des sols à la chaux est une technique appliquée depuis longtemps dans le domaine de génie civil. et généralement en utilise la chaux aérienne

Définition : La chaux résulte de la cuisson de calcaires purs (CaCO_3) tendres et craies ou de calcaires magnésiens (MgCO_3), faisant prise dans l'air par combinaison avec le gaz carbonique (CO_2) pour redonner du carbonate de calcium (CaCO_3) et présentant une grande finesse.

Ses utilisations sont variées : en suspension dans l'eau comme badigeon ayant des propriétés bactéricides (lait de chaux), pure ou avec d'autres liants (ciment, chaux hydraulique) pour la réalisation d'enduits de façade ou de mortiers de pose et de jointoiement, ou encore pour son caractère basique dans les amendements de sol et le traitement des eaux usées. La figure 4.1 résume le cycle de la chaux aérienne où peut voir l'ensemble des transformations que subissent la pierre à chaux et la chaux dans la chaîne opératoire du mortier

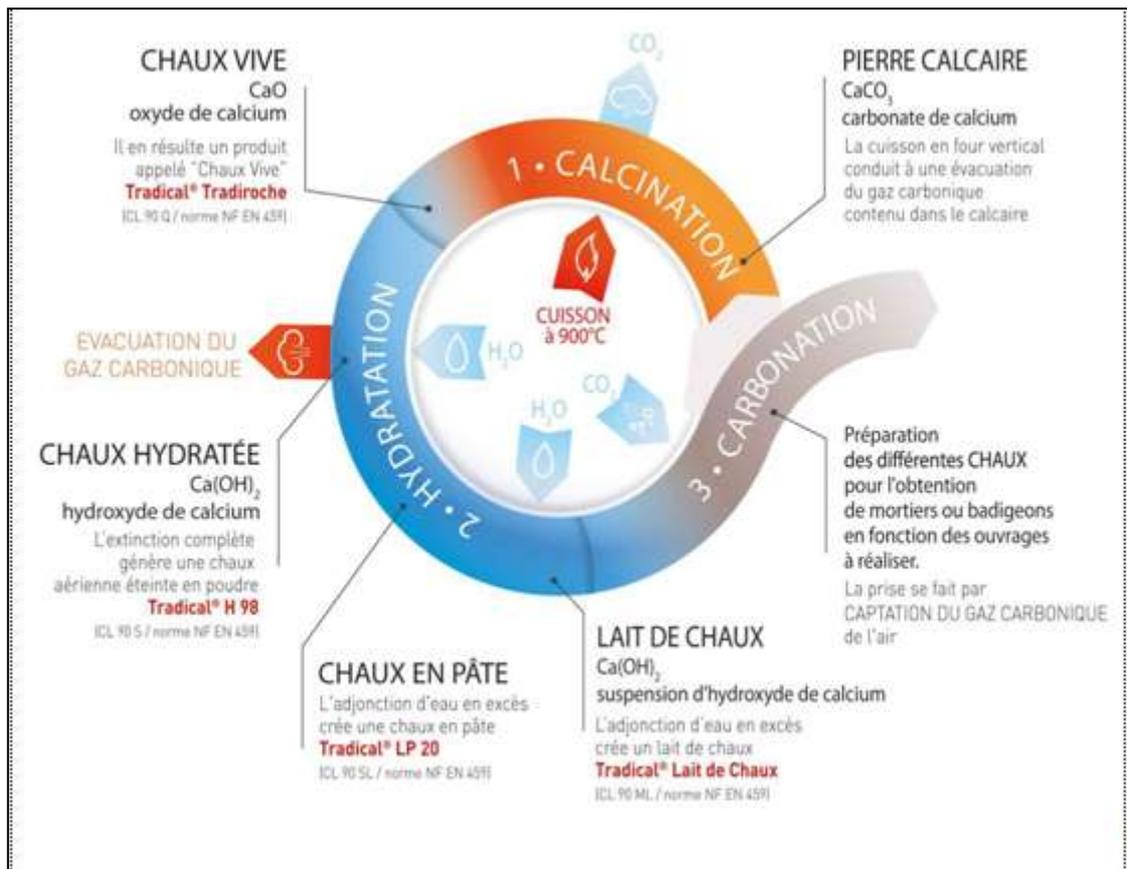


Figure 1.7 Cycle de la chaux

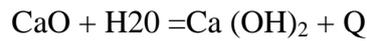
Trois étapes essentielles peuvent être tirées de la figure 1.7 :

- la calcination de la roche calcaire produit de la chaux vive avec une perte de gaz carbonique.
- l'extinction à l'eau de la chaux vive produite de la chaux éteinte.
- la carbonatation, au contact de l'air, de la chaux éteinte produit le durcissement de la matière par reformation de calcite.

Normalisation de la chaux: La chaux pour traitement de sol est régie par deux normes:

- NF EN 459: définit les exigences et les classifications de la chaux de construction (marquage CE) mais ne permet pas de définir une chaux pour traitement de sol;
- NF P 98-101: définit les exigences pour une chaux pour traitement de sol;
- En France nous utilisons pour le traitement des sols des chaux de classe CL80Q suivant EN 459 et répondant aux critères de NP P 98 101.

Le principe : L'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau du sol provoque une consommation d'eau et une évaporation importante. Cette propriété est mise à profit pour l'assèchement des sols fins argileux et humides.



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur

Cette réaction exothermique entraîne une évaporation.

.Par ailleurs, l'adjonction de chaux au sol provoque une modification de la qualité des argiles par échange des cations alcalins (Na^+ , K^+ ...) par des cations Ca^{++} apportés par la chaux; ceci développe des forces électriques conduisant à une agglomération des fines particules argileuses en particules grossières et friables.

Un sol argileux et humide passe d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travaillable et perd une partie de sa sensibilité à l'eau.

On utilise la chaux aérienne sous forme de chaux éteinte ou de chaux vive, qui produit un abaissement plus important de la teneur en eau mais qui est plus délicate à manipuler (3% de chaux vive ont les mêmes effets que 4% de chaux éteinte) :

- *chaux vive* si problème de teneur en eau.
- *chaux éteinte* si problème de portance et teneur en eau convenable.

L'addition de chaux a des effets à long terme (plus d'un an) par combinaison avec les constituants des argiles.

On observe :

- l'augmentation de la cohésion, de la résistance au poinçonnement (l'indice CBR peut être multiplié par 4 ou 10 au bout de deux heures)

CBR = Californian Bearing Ratio, estimation de la portance d'un sol en mesurant sa résistance au poinçonnement

- l'augmentation des résistances mécaniques
- une meilleure perméabilité de l'argile
- dans le cas d'argiles gonflantes : diminution des variations volumiques

L'action de la chaux : Elle dépend :

- de la finesse qui augmente la surface de contact
- de la teneur en chaux libre (élément actif)
- de la durée du traitement
- du compactage qui doit suivre rapidement le malaxage (dans la journée)
- de la teneur en eau

Réactions sol/chaux : Les réactions qui se produisent en présence de chaux (sol/chaux) se résument comme suit (tiré de Choquette *et al* 1987):

- ❖ *échange cationique*: remplacement des principaux cations échangeables des minéraux argileux par l'ion calcium provenant de la chaux;
- ❖ *floculation et agglomération* des particules d'argile (Herzog et Mitchell 1963);
- ❖ *carbonatation de la chaux*: réaction entre la chaux et le dioxyde de carbone de l'air pour former du carbonate de calcium (Eades *et al.* 1962, Pettry et Rich 1971)
- ❖ *réaction pouzzolanique*: réaction entre la chaux, la silice et l'alumine provenant des minéraux argileux, produisant des agents cimentaires (C-S-H, C-A-H et C-A-S-H) (Eades et Grimm 1960, Hilt et Davidson 1960, Glenn et Hardy 1963, Diamond *et al.* 1964, Sloane 1965, Ormsby et Kinter 1973).

-La première réaction est celle qui initie la stabilisation. Elle se fait sentir instantanément lors de l'ajout de chaux. Un excès d'ions Ca^{2+} survient alors dans la solution interstitielle. Les ions Ca^{2+} sont en partie adsorbés à la surface des particules argileuses en remplacement des cations monovalents comme Na^+ et K^+ . La quantité de Ca^{2+} adsorbée dépend de la capacité d'échange cationique du sol traité. Plus la capacité d'échange est élevée, plus le sol adsorbe de Ca^{2+} . En fait, tous les cations adsorbés ne sont plus disponibles pour les réactions pouzzolaniques. La quantité de chaux nécessaire pour satisfaire l'affinité du sol pour la chaux est appelée "lime fixation point" (LFP) (Hilt et Davidson 1960). La chaux en excès du LFP est celle qui participe au processus de cimentation. Selon Ingles et Metcalf (1972) le LFP se situe autour de 3 % mais est directement reliée à la proportion de minéraux argileux présents dans le sol.

-La deuxième réaction, la floculation, intervient aussi très rapidement et cause une modification importante de la plasticité du sol. La dissociation de la chaux en Ca^{2+} et OH^- entraîne une augmentation du pH de la solution à une valeur supérieure à 12.4. Un pH aussi alcalin provoque l'attaque de certains minéraux, principalement les silicates et les aluminates (minéraux argileux, quartz, feldspath). Bérubé *et al.* (1990) dressent la liste des principaux minéraux réactifs à la chaux. Le pH élevé provoque donc l'attaque des argiles, ce qui permet la dissociation de l'hydrogène des groupes SiOH présents en bordure des couches tétraédriques et AlOH présents en surface des couches octaédriques selon les réactions suivantes :



La surface des particules est donc laissée avec une charge négative supplémentaire reliée aux ions oxygène qui fait augmenter la C.E.C. (Mathew et Narasimha Rao 1997). L'excès de

charge négative rend l'attraction entre les particules plus intense et crée ainsi la floculation des particules.

-La troisième réaction est indésirable puisqu'elle ne fait que consommer de la chaux en la transformant en carbonate de calcium au contact du CO_2 de l'air, et forme ainsi des liens de cimentation très fragiles. Cette chaux ayant réagi devient inutilisable pour les réactions pouzzolaniques.

-La dernière réaction est la plus importante car c'est elle qui crée des liens de cimentation entre les particules en produisant de nouveaux minéraux qui augmentent la résistance des sols. Cette réaction est plus ou moins lente, et est fonction de divers facteurs comme la minéralogie et la granulométrie du sol traité ainsi que le temps et la température de mûrissement. Cette réaction fait intervenir la silice et l'alumine dissociées des particules attaquées par la chaux en formant de nouveaux minéraux comme des C-S-H (silicates de calcium hydratés), des C-A-H (aluminates de calcium hydratés) et des C-A-S-H (aluminosilicates de calcium hydratés). Les réactions qui interviennent, ainsi que les phases minérales néoformées sont décrites par plusieurs chercheurs (Eades et Grimm 1960, Hilt et Davidson 1960, Glenn et Hardy 1963, Diamond et al. 1964, Sloane 1965, Ormsby et Kinter 1973, Choquette 1988

Les processus physico-chimiques incités par la chaux : Lors de l'incorporation de chaux à un sol humide, trois processus physico-chimiques essentiels se produisent :

- l'hydratation et l'ionisation de la chaux ;
- la modification de la capacité d'échange cationique (*CEC*) (Diamond et Kinter, 1965) menant à la floculation/agglomération des particules argileuses (Herzog et Michell, 1963),
- le développement des réactions pouzzolaniques : réactions entre la chaux, la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3) contenus dans les particules du sol, créant des produits cimentaires (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H) qui lient les particules de sols entre elles (Eades et Grim, 1960 ; Diamond et al, 1964). Il peut se produire aussi la carbonatation, en fonction des conditions dans lesquelles le traitement est réalisé.

La cinétique de ces réactions est influencée par plusieurs facteurs :

- La température du milieu: plus la température est élevée, plus la prise est rapide. Cependant, au-dessus de $45^\circ C$, les produits de la réaction sont dénaturés. La prise est ralentie voire arrêtée lorsque la température est inférieure à environ $4^\circ C$

(Thompson, 1968; Bell, 1996), et reprend lorsque la température commence à s'élever à nouveau.

- La quantité et la nature de la fraction argileuse: c'est la fraction argileuse du sol, constituée de phyllosilicates d'aluminium, qui réagit avec la chaux. Tous les minéraux argileux sont attaqués par la chaux, mais ceux qui ont la plus haute teneur en silicates disponibles réagissent plus fortement. Ainsi, la structure en trois couches de la montmorillonite expose des silicates des deux côtés du feuillet, de manière à ce qu'une montmorillonite subisse des réactions plus vite qu'une kaolinite composée de deux couches, parfois avec un décalage de plusieurs semaines dans le cas de la recombinaison pouzzolanique. Néanmoins, une surface de silicates «disponibles» est attaquant si elle n'est pas reliée à une autre surface similaire par des ions qui ne sont pas facilement échangeables, comme c'est le cas dans l'illite et le chlorite.
- L'état hydrique du sol: la quantité de l'eau libre dans le sol doit être suffisante pour assurer la solubilisation et l'hydratation des particules (Cabane, 2005). Concrètement, la teneur en eau optimale se situe légèrement au-dessus de celle à l'optimum Proctor normal (Le Roux, 1969).

1.3.3.3. Stabilisation au bitume: Le bitume et le goudron sont trop visqueux pour être utilisés à température ambiante et doivent être réalisés en bitume coupé (une solution de bitume en kérosène ou diesel) ou une émulsion de bitume (particules de bitume en suspension dans l'eau). Lorsque le solvant s'évapore ou que l'émulsion se brise, le bitume est déposé sur le matériau, le bitume agit simplement comme une colle pour coller les particules de matière et empêcher l'entrée d'eau. Dans de nombreux cas, le matériau bitumineux agit comme une couche imperméable dans le trottoir, empêchant l'augmentation de l'humidité capillaire. Dans un pays où le bitume est relativement coûteux par rapport au ciment et où l'expertise est la construction de ciment, il semble plus raisonnable d'utiliser un stabilisateur de ciment plutôt qu'un prI.

1.4. LE LAITIER :

Le laitier de haut-fourneau est un sous-produit formé lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer, des combustibles (cendres du coke) et de divers fondants (acide ou basiques). La fonte ruisselle en continu en bas du haut fourneau sous forme de liquide. Les éléments résiduels qui parviennent à la gangue du minerai, des cendres du combustible et des

fondants se rassemblent sous forme liquide et constituent le laitier. Etant donné la différence de masse volumique entre la fonte et le laitier, ils sont donc séparés par décantation.

Le laitier est un silicate d'aluminium, de calcium et de magnésium. Il contient en outre des oxydes de manganèse et de fer en faible quantité, ainsi que du sulfure de calcium. Le laitier permet l'élimination de la *gangue* à l'aide de caractéristiques de fusibilité et de fluidité convenables et aussi les réactions d'échange avec le métal liquide agissant sur la composition de celui-ci. La fonte en fusion contient les éléments suivants : Fe, C, Si, Mn, P, S...alors que le laitier en fusion en bas du haut-fourneau contient les éléments tel que SiO₂, P₂O₅, MnO, CaO, Al₂O₃...

A la sortie des hauts fourneaux, le laitier se présente sous forme d'un liquide à une température d'environ 1450°C. Deux processus sont utilisés pour le refroidissement de la matière en fusion.

1.4.1. Refroidissement lent: Le laitier liquide à 1300°C /1500°C est évacué immédiatement en poche à laitier, dès la sortie du haut-fourneau vers des zones spécifiques nommées crassiers, pour y être déversé, coulée après coulée. Il s'y refroidit lentement à l'air libre, se transformant ainsi en roche dure artificielle chimiquement stable. Il est désigné par *laitier rocheux ou cristallisé* et est très souvent évacué vers des stations de concassage. La densité en place du laitier concassé varie de 1.8 à 2.0. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium.

Le laitier cristallisé de haut fourneaux est élaboré selon différentes classes granulaire tous venant concassé 0/D et d/D. selon la demande il y a lieu de distinguer:

-*Le laitier tout-venant* : C'est un laitier cristallisé, de fraîche production ou non, tel que repris à l'engin. Les granulométries sont de l'ordre de 0/300 mm, sans garantie de fuseau. Il s'agit plutôt d'un matériau de remblais ou de couche de forme.

-*Le laitier concassé* : C'est un laitier cristallisé concassé, livré en toutes granulométries. Le laitier 0/D est dit «de compactage», lorsqu'il est criblé et calibré, mélangé ou non en proportions variables, avec du laitier granulé ou tout autre liant hydraulique. La granulométrie maximale du 0/D est de 0/50 mm ; il s'agit plutôt d'un matériau d'assises à prise lente. Concernant le laitier d'EL HADJAR la granulométrie varie de (0/80, 0/100, 0/150 et plus).

1.4.2. Refroidissement rapide: Le laitier est refroidi brutalement et pulvérisé en grains de quelques millimètres par un puissant jet d'eau (trempe). Cette opération appelée granulation lui confère une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable en développant des résistances mécaniques, comme le ferait un ciment. Elle transforme le laitier en un sable à granulométrie étalée et contenant peu de fines de couleur claire appelé *laitier vitrifié ou granulé*. Il est généralement évacué vers des lieux de stockage ou d'expédition. Leur densité voisine 1.20. Les laitiers de haut-fourneau vitrifiés possèdent des propriétés hydrauliques mises à profit dans les cimenteries ou directement dans le traitement des assises de chaussées. Il existe deux types de laitier vitrifié :

- le *laitier granulé*, pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression.

- le *laitier bouleté* qui est soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique.

Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitier sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules ; cette technique n'est appliquée qu'à Fos-sur-Mer.

Les laitiers cristallisés sont utilisés en technique routière depuis la constitution de remblais jusqu'aux couches de surface des chaussées ainsi que pour les bétons. Les laitiers de fraîche production et les stocks constitués au fil des décennies, appelés crassiers, sont exploités comme des carrières de roche naturelle pour la fabrication de granulats. En raison de leurs caractéristiques physico-chimiques, les laitiers vitrifiés, le plus souvent élaborés sous forme de laitiers granulés, trouvent un emploi privilégié dans l'industrie cimentière, mais aussi comme liants dans différents mélanges granulaires des assises de chaussées.

Le laitier vitrifié granulé correspond à un sable à prise hydraulique (0/5 à 0/6mm d'après PREDIS 2001).il peut être pré broyé pour augmenter sa teneur en fines ainsi que sa réactivité et obtenir le laitier granulé broyé des hauts fourneaux GGBFS (Grounds Granulated Blast

Furnace Slag). Il peut aussi être activé pour développer son hydraulicité ; l'activation de type calcique ou sulfato-calcique étant effectuée selon la norme NF P 98-107.

1.4.3. Activation du laitier granulé: Beaucoup d'activateurs ont été suggérés pour activer le GGBFS. Les activateurs les plus utilisés généralement sont hydroxyde de calcium, sulfate de calcium, ciment Portland Ordinaire, hydroxyde de sodium, carbonate de sodium et sulfate de sodium (Gjorv, 1989). Wu et autres, (1990) ont suggéré que l'hydroxyde de sodium, le sulfate de sodium et le sulfate en aluminium de potassium puissent être employés comme activateurs pour le GGBS et puissent aider à briser les liens de Si-O et d'Al-O. Wild et Tasong (1999) ont utilisé la chaux comme activateur dans leur étude sur l'influence du GGBFS sur la résistance du sulfate de la Kaolinite stabilisée à la chaux. Ils ont observé que le rapport optimum lime/GGBS est 1:5 pour activer le GGBS, et pour empêcher toute attaque provoquée par la solution excessive de sulfate. Wild and Tasong ont également observé que la réaction d'hydratation du GGBFS activée par la chaux est plus rapide que la réaction pozzolanique de la chaux avec l'argile parce que le GGBFS contient une quantité élevée d'alumine et de silice. Les principales réactions produites lors de l'activation du GGBFS avec de la chaux sont le gel C-A-S-H et l'hydrotalcite type phase contenant le magnésium.

Le ciment portland est l'un des activateurs les plus utilisés. La réaction du GGBFS avec le ciment en présence de l'eau est un processus très complexe. L'hydratation du ciment portland produit principalement Ca(OH)_2 (hydroxyde de calcium) et le gel du C-H-S. Dans l'hydratation du ciment Portland Mélangé, bien que des quantités mineures d'alcalis soient libérées, GGBFS est principalement activé par le Ca(OH)_2 produit d'hydratation (Hakkinen, 1993 ; Bijen, 1996). Ainsi la chaux sous forme de Ca(OH)_2 , peut être ajoutée comme additif ou être libérée de l'hydratation de ciment Portland. Le GGBFS contient des quantités élevées d'alumine et de silice produit moins de produit hydraté on le comparant avec le ciment portland ordinaire. Les principales réactions produites lors de l'hydratation du GGBFS sont calcium de silicate hydraté, calcium aluminat hydraté et un peu d'hydroxyde de calcium. (Higgins et al, 1998). La longue expérience d'utilisation des laitiers de hauts fourneaux en technique routière n'a pas à ce jour révélé d'impact préjudiciable sur les eaux souterraines et le milieu naturel.

1.5. Conclusion : Les structures des constructions linéaires sont des fois construites sur des sols de fondation compressibles. Lorsque le remblai constituant la structure des routes ou autres sont stabilisés au ciment, les réactions chimiques d'hydratation et de carbonations sont rapides et le sol stabilisé devient consistant et dure dans un intervalle de temps très court. Celle-ci est un inconvénient majeur car toute déformation dans le sol de fondation engendrera des fissures dans la structure du remblai stabilisé qui par la suite se propage à la surface superficielle causant ainsi des dommages considérables au fonctionnement des ouvrages des travaux public. En ce qui concerne la chaux, les réactions immédiates et pouzzolaniques sont des réactions très lentes et par conséquent le gain de résistance et l'amélioration des propriétés géotechniques s'avèrent très lentes. Il est alors très intéressant de pouvoir trouver un liant hydraulique intermédiaire entre le ciment qui est rapide dans sa prise et la chaux qui donne des améliorations sur temps beaucoup plus long. La fabrication du fer au niveau de l'usine métallurgique de SIDER à Annaba en Algérie dispose d'une grande quantité de déchet industriel désigné par le laitier. Ces énormes masses de laitier sont stockés à l'air libre portant ainsi préjudice à l'environnement et la qualité de vie des citoyens. L'une des solutions à ce problème environnemental est de procéder à l'utilisation de ce déchet doté d'une certaine hydraulicité dans la stabilisation des sols fins lors de la construction des ouvrages linéaires qui nécessite des quantités énormes de matériaux pour leurs réalisations.

1.6. TRAVAUX ANTERIEURS :

Ashish Kumar Pathak, et.al. (2014) ont étudié l'effet du GGBFS sur la propriété technique (teneur en eau optimale et densité sèche maximale, limite de plasticité, limite de liquidité, compactage, résistance à la compression non confinée, essai de rapport triaxial et californien) du sol et déterminent les propriétés techniques du stabilisé. GGBFS est ajouté de 0% à 25% en poids sec de sol, tout d'abord vérifier la propriété de tous les sols à 0% (pas de GGBFS) et ensuite comparer après à l'ajout de GGBFS de 5% à 25%. Les études ont montré que généralement les propriétés d'ingénierie se sont améliorées avec l'ajout de GGBFS. L'ajout de GGBFS a entraîné une amélioration spectaculaire dans les plages d'essai couvertes dans le programme. La densité sèche maximale a augmenté et la teneur en eau optimale a diminué avec l'augmentation de la teneur en GGBFS et à 25% nous avons obtenu la valeur maximale de densité sèche.

Oormila.T.R. et.al (2014), ont prouvé que l'utilisation de déchets industriels dans l'amélioration des sols est une méthode rentable et respectueuse de l'environnement. La stabilisation du sol est étudiée à l'aide de cendres volantes et de laitier de haut fourneau calciné au sol. Cette thèse comprend l'évaluation des propriétés du sol comme le test de résistance à la compression non confinée et le test du coefficient de roulement en Californie. L'échantillon de sol a été recueilli à Palur, Tamil Nadu et en plus, différents pourcentages de cendres volantes (5%,10%, 15% et 20%) et GGBFS (15%, 20%, 25%) ont été ajoutés pour trouver la variation de sa force d'origine. Sur la base de ces résultats, un essai CBR a été effectué avec la cinétique optimale, une GGBFS optimale et une combinaison de cendres volantes optimales avec des pourcentages de GGBFS variables (15%, 20% et 25%). A partir de ces résultats, il s'est avéré que le GGBFS optimal (2096) donne la valeur maximale de l'augmentation de la valeur CBR par rapport à tous les autres.

LaximanthYadu (2013) a évalué le potentiel du laitier de haut fourneau granulé (GGBFS) avec des cendres volantes pour stabiliser le sol mou. Des échantillons de sol mou ont été prélevés à TatibandhAtart, route rurale de Raipur, Chhattisgarh. Ce sol a été classé comme CI-MI selon le système de classification standard indien (SCS). Différentes quantités de SGB, c'est-à-dire 3, 6 et 9% avec différentes quantités de cendres volantes. Le 3%, 6%, 9% et 12% ont été utilisées pour stabiliser le sol mou. La performance du GGBFS avec des sols modifiés par des cendres volantes a été évaluée en utilisant un test de compaction et California Bearing Ratio (CBR). Sur la base de ces tests de performance, la quantité optimale de GGBFS avec des cendres volantes a été déterminée comme étant de 3% de cendres volantes + 6% de GBBFS.

DVS Prasad (2008) décrit les tentatives faites pour étudier le processus de stabilisation avec des traces d'essai modèles sur une sous-catégorie expansive. Des essais de cisaillement, de CBR et de chargement-déchargement ont été réalisés sur les voies avec différents matériaux de renfort, à savoir des plastiques usagés et du caoutchouc de rebut introduit dans le sous-sol de gravier posé sur une sous-catégorie expansive. Les résultats des essais montrent que la sous-bas de gravier renforcé est plus résistante à la charge que la sous-couche de gravier non renforcée dans le flexible

AANJANKUMAR &PRASADARAJU (2008) Des tests de charge cyclique ont été effectués sur les voies avec des produits chimiques comme la chaux et le ciment introduits

dans la sous-couche de cendres volantes posées sur une sous-couche expansive. sous-bas de cendres.

T.K.ROY et B.CCHATTOPADHYAY (2008) ont entrepris un programme expérimental pour explorer la possibilité d'utiliser des matériaux alternatifs tels que la cendre de riz et les cendres d'étang en les mélangeant au sol pour la construction d'une sous-catégorie routière.

BHUVANESHWARI, ROBINSON, GANDHI(2005) ont décrit l'étude réalisée pour vérifier les améliorations des propriétés du sol expansif avec des cendres volantes en pourcentages variables. Des essais en laboratoire et des essais sur le terrain ont été effectués et les résultats sont rapportés dans ce document. Une des difficultés majeures dans l'application sur le terrain est un mélange complet des deux matériaux (sol expansif et cendres volantes) en proportion requise pour former une masse homogène.

Une étude menée par PHANIKUMAR et SHARMA (2004) sur l'effet des cendres volantes sur les propriétés techniques de sol expansif à travers un programme expérimental. L'effet sur des paramètres tels que l'indice de gonflement libre (FSI), le potentiel de gonflement, la pression de gonflement, la plasticité, le compactage, la résistance et la conductivité hydraulique du sol expansif ont été étudiés. Les cendres ont mélangé un sol expansif avec des teneurs en cendres volantes de 0, 5, 10, 15 et 20% en poids sec et ont déduit que l'augmentation de la teneur en cendres volantes réduisait les caractéristiques de plasticité et réduisait le FSI d'environ 50% par l'addition de 20% de cendres volantes, lorsque la teneur en cendres volantes augmente, il y a une diminution de la teneur en eau optimale et le poids unitaire sec maximal augmente. L'effet des cendres volantes s'apparente à l'effort de compaction accru. Ainsi, le sol expansif est rendu plus stable. La résistance au cisaillement non drainé du sol expansif mélangé à de la cendre volante augmente avec l'augmentation de la teneur en cendres.



chapitre 02 :
Matériaux et procédure d'essai



Chapitre 2 :

MATERIAUX ET PROCEDURES D'ESSAIS

2.1. INTRODUCTION

Le chapitre décrit les matériaux utilisés dans le présent travail de recherche. Le mode opératoire des différents essais avec leurs procédures et techniques employées pour préparer les différentes éprouvettes, l'exécution de l'essai et leurs déroulements sont aussi détaillés.

2.2. MATERIAUX

Le sol utilisé est un mélange de kaolinite et de bentonite préparé en laboratoire. Les stabilisateurs à savoir le laitier granulé broyé, la chaux hydratée et le ciment portland composé proviennent successivement de l'usine sidérurgique d'El Hadjar situé dans la wilaya d'Annaba (Algérie), l'unité SODEPAC Filiale ERCO situé à Oum DJERANE wilaya de SAIDA et la société des ciments de Hadjar-Soud (SCHS), groupe GICA BEKOUICHE LAKHDER BP 181 21300 AZZABA la wilaya de SKIKDA (Algérie). Il a été préparé au laboratoire de MDS de l'Université d'Annaba. Il est représentatif de la majorité des sols à problème en Afrique du Nord.

2.2.1. Le sol : utilisé lors de cette étude est un matériau artificiellement confectionné au niveau du laboratoire de mécanique des sols du département de génie civil à l'université Badji Mokhtar-Annaba par le mélange de 85% de kaolinite DD3 et 15% de bentonite disponible dans le commerce par masse sèche. Ce sol est représentatif des sols réactifs disponibles dans de nombreux endroits à travers le monde Haque et al (2008). L'ajout de 15% de bentonite lui confère un potentiel de gonflement, un phénomène que la plus part des sols problématiques subissent. L'utilisation de ce sol artificiel a pour but d'éliminer l'incohérence des éprouvettes des essais et d'assurer la répétabilité des tests, qui sont des facteurs importants pour toutes études comparatives avec des contenus d'additifs et des durées de durcissement variables. En littérature, plusieurs auteurs ont utilisé ce sol constitué dans leurs travaux de recherche. Yazici (2009), Haque et al (2007) et (2008) ont effectué des travaux sur le comportement de ce sol constitué et stabilisé avec plusieurs types d'ajouts dont les laitiers

granulés broyés des hauts fourneaux produits en Turquie et en Australie. Leurs résultats serviront comme référence à ce travail de recherche entrepris

2.2.1.1. Le kaolin : est extrait de la mine SOALKA de Djebel DEBBAGH située à 35 km au Nord-Ouest de la ville de Guelma. Ce gisement important se trouve à une altitude de 700 à 1060 m au dessus de la mer) (figure 2.1). Il contient environ 38 % en masse d'alumine et près de 40% de silice et présente une perte au feu de l'ordre de 17%. Cette dernière est essentiellement causée par la présence de l'eau structurale et quelques impuretés organiques. Le kaolin est caractérisé par une couleur grisâtre (figure 2.2). Cette coloration est essentiellement due à la présence de magnésium et d'un certain nombre d'éléments colorateurs (Fe, Ti,) (Tableau 2.1). Au toucher, il présente une grande aptitude à la friabilité.



Figure 2.1 Site d'extraction du Kaolin utilisé



Figure 2.2 Kaolinite DD3 granulé et broyé

Composition chimique (%)													
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	P.F	Total
39.8	38.36	1.14	0.78	0.24	0.45	0.20	0.48	0.02	0.46	0.02	0.01	17.27	99.6

Tableau 2.1 Composition chimique moyenne du kaolin DD₃

Du point de vue minéralogique, l'analyse par diffraction aux rayons X (figure 2.3) a révélé que le kaolin utilisé contient essentiellement de la kaolinite (Fiche JCPDS 80-0886) et de l'halloysite (JCPDS 29-1489). La masse volumique du kaolin DD3 brut, mesurée par le pycnomètre à hélium (type ACCUPYC 1300), est de **2,6 g/cm³**. Broyé à une taille inférieure à 150µm, le kaolin DD3 présente une surface spécifique (BET= Brunauer–Emmitt–Teller) de l'ordre de 93 m²/g. Un examen par MEB d'un échantillon de la poudre de kaolin DD₃ (figure 2.3) a montré que les grains se présentent sous forme d'agglomérats de feuillets allongés en désordre. Cela favorise un taux élevé de microporosité, par conséquent, une grande surface spécifique comme cela a été trouvé.

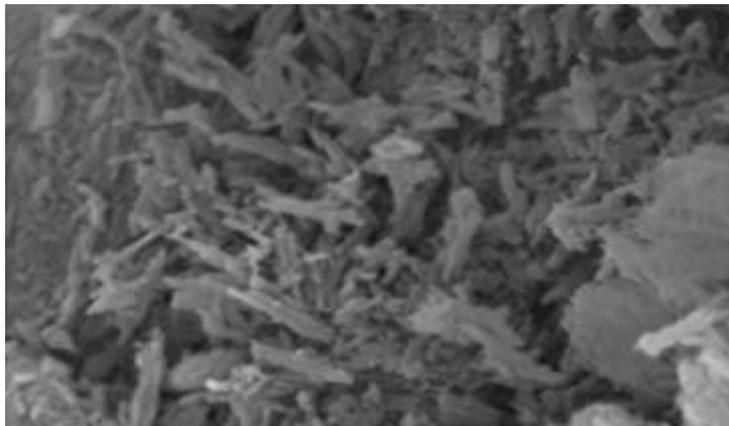


Figure 2.3 Micrographie d'un grain du Kaolin DD₃

Ce kaolin a été broyé mécaniquement et tamisé à une taille inférieure à 75µm. La distribution granulométrique de cette fraction a été analysée par un appareil de type Mastersizer 2000 (Malvern Instruments). Cet appareil appartient à la dernière génération des granulométries et peut mesurer des tailles allant de 20 nm à 2000µm. Son principe de mesure est basé sur le phénomène de diffraction lumineuse. Chaque taille de particule a sa propre image de diffraction. Le dépouillement de l'image de diffraction d'un champ de particules permet de mesurer la proportion de chaque taille. Dans le cas de ce kaolin, les résultats obtenus sont représentés sous forme d'histogrammes sur la figure 2.4 sous forme de CPFT (Cumulative Percent Finer Than). La distribution est continue et elle est un peu concentrée près de la taille 25µm. La taille moyenne (à 50 % de CPFT) de la poudre analysée est de l'ordre de 13 µm.

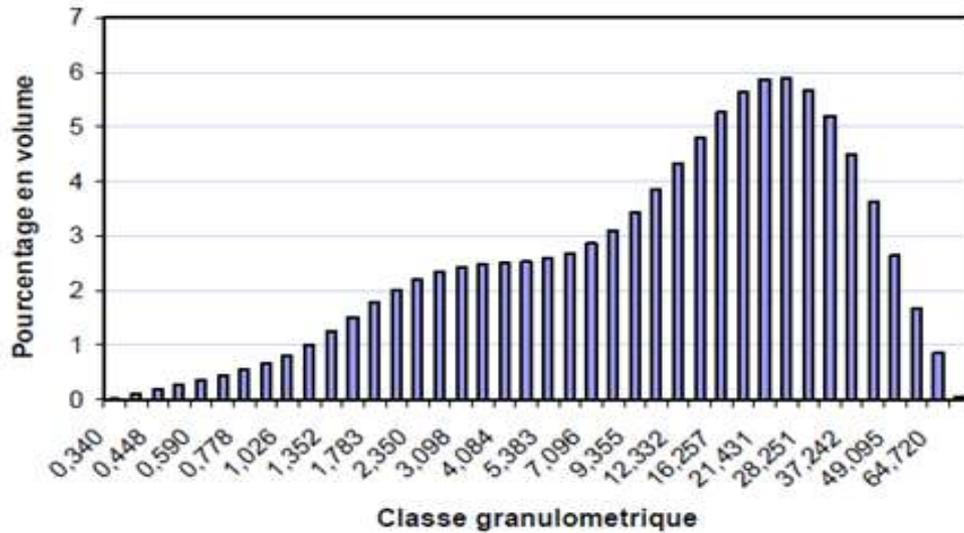


Figure 2.4 Représentation de la distribution granulométrique suivant les différentes classes.

2.2.1.2. La bentonite : provient de gisement de MZILA, une localité située à 37km au Nord Est de la wilaya Mostaganem. Cette bentonite de bonne qualité, avec un PH de 10.5, est généralement destinée à la cimentation des forages dans l'industrie pétrochimique. C'est une argile riche en montmorillonite qui présente une capacité d'échange cationique (C.E.C) élevée et des propriétés de gonflement et de plasticité remarquables. Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent les compositions minéralogiques et chimiques de ce matériau.



Figure 2.5 La bentonite utilisée dans cette recherche

<i>Désignations</i>	<i>% en poids</i>
<i>Montmorillonite</i>	45 à 60
<i>Quartz</i>	15 à 20
<i>Feldspaths</i>	3 à 5
<i>Biotites</i>	8 à 10

Tableau 2.2 Composition minéralogique de la Bentonite (BT).

<i>Désignations</i>		<i>% en poids</i>
<i>Silice</i>	<i>SiO₂</i>	64,23
<i>Alumine</i>	<i>Al₂O₃</i>	14,62
<i>Oxyde de Fer</i>	<i>Fe₂O₃</i>	1,81
<i>Oxyde de Calcium</i>	<i>CaO</i>	2,75
<i>Oxyde de Magnésium</i>	<i>MgO</i>	1,98
<i>Sulfates</i>	<i>SO₃</i>	0,32
<i>Oxyde de potassium</i>	<i>K₂O</i>	1,87
<i>Oxyde de sodium</i>	<i>Na₂O</i>	1,41
<i>Perte au feu</i>	<i>P.A.F</i>	11,14

Tableau 2.3 Composition Chimique de Bentonite (BT).

Les bentonites ont de larges applications dans différents domaines (forage, fonderie, céramique, peinture, pharmacie, terres décolorantes,...). La majeure partie de la bentonite exploitée dans le monde est utilisée comme liant du sable de moulage, dans l'industrie de la fonderie et aussi pour épaissir les fluides de forage.

La montmorillonite est le constituant principal de la bentonite. C'est un phyllosilicates 2 :1 (famille de smectites) dans lequel la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des actions échangeables (Ca, Mg, H⁺, K⁺, NH⁺ et Na⁺) situés principalement entre ces couches silicates (figure 2.5) ; ces cations ne font pas partie de la structure et gardent une certaine mobilité.

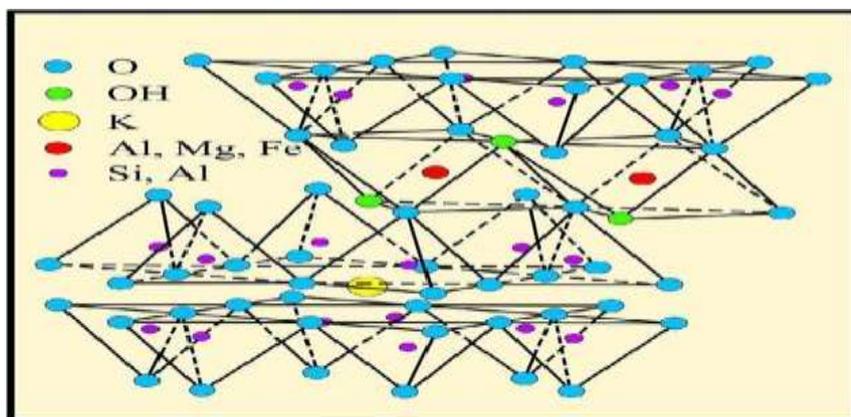


Figure 2.6 Structure chimique de la Bentonite

2.2.2. LES MATERIAUX STABILISATEURS

2.2.2.1. La chaux : utilisée dans ce programme de recherche étant la chaux hydraulique produite par l'entreprise SODEPAC Filiale ERCO situé à Oum DJERANE wilaya de SAIDA. Le choix de ce type de chaux est justifié par le fait que le laitier granulé réagit mieux lorsqu'il est activé avec cette substance Kinutia et al (1998, 1999) et Osinubik (2006). Les analyses chimiques et les caractéristiques physiques de la chaux ont été effectuées au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux de Saida selon la norme DIN: 1060. Les tableaux 2.4 et 2.5 donnent respectivement les caractéristiques physiques et la composition chimique de la chaux hydratée utilisée comme activateur du laitier granulé broyé des hauts fourneaux d'EL Hadjar.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Masse volumique absolue</i>	600 – 900 g/l
<i>Coefficient d'absorption</i>	<5
<i>Sensibilité au gel</i>	<30
<i>Volume d'extinction</i>	2,73 cm ³
<i>Supérieure à 630 µm</i>	0%
<i>Supérieure à 90 µm</i>	>83,3%

Tableau 2.4. Propriétés physiques de la chaux hydratée

<i>Constituants</i>	<i>Chaux hydratée ()</i>
<i>MgO</i>	<0,5
<i>SiO₂</i>	<2,5
<i>MnO</i>	-
<i>Fe₂O</i>	<2
<i>TiO₂</i>	-
<i>CaO</i>	>83,3
<i>Al₂O₃</i>	<1,5
<i>Na₂O</i>	<4,7-0,5
<i>K₂O</i>	-
<i>SO₃</i>	<2,5
<i>H₂O⁺</i>	-
<i>H₂O⁻</i>	-
<i>P₂O₅</i>	-
<i>CO₂</i>	<2
<i>CaCO₃</i>	<10
<i>Matériau insoluble dans HCL</i>	<1
<i>Sulfites (pyrites)</i>	-
<i>Perte au feu</i>	-

Tableau 2.5. Propriétés chimiques de la chaux hydratée (...)

En ce qui concerne le traitement des sols à la chaux, trois caractéristiques de ce liant sont importantes:

- La teneur en CaO. Le CaO peut être:
 - disponible: c'est-à-dire non combiné, sous forme de CaO pour la chaux vive et sous forme Ca(OH)_2 pour la chaux éteinte;
 - combiné: sous forme de carbonate (son importance est appréciée par la teneur en CO_2 de la chaux), de silicates et d'aluminates (la somme du CaO libre et du CaO combiné représente le CaO total). Sous forme combinée, le CaO n'est pas réactif et ne présente donc pas d'avantages pour le traitement.
- La finesse de mouture (elle conditionne l'homogénéité du mélange sol-chaux, garantissant l'hydratation complète de la chaux). Elle intervient également dans les conditions de stockage et de transport.
- La réactivité d'une chaux vive est évaluée par sa vitesse d'hydratation et le dégagement de chaleur provoqué par cette réaction chimique. Plusieurs facteurs influencent la réactivité d'une chaux vive, les principaux étant le mode de cuisson de la pierre calcaire originelle, sa pureté et le broyage de la chaux.

L'essai est détaillé dans la norme NBN EN 459-2, § 5.10. La méthode de mesure normalisée consiste à suivre le dégagement de chaleur issu de l'addition de 150 grammes de chaux vive à 600 grammes d'eau préalablement portée à une température de 20 °C, et ce dans un récipient isotherme. Le temps mis par le mélange pour atteindre une température de 60 °C est appelé le t_{60} et est exprimé en minutes. Plus la chaux est réactive, plus ce délai est court. Il est à noter que cette valeur n'exempte pas de réaliser la détermination des caractéristiques granulométriques et de la teneur en CaO disponibles.

Globalement, pour assurer un traitement du sol satisfaisant, les caractéristiques de la chaux sont les suivantes:

	<i>CaO disponible</i>	<i>Finesse de mouture/ Granularité</i>	<i>Vitesse d'hydratation</i>
<i>Chaux vive CL90-Q</i>	$\geq 88\%$ (RW99)	<i>Refus au tamis de 2mm < 5% avec refus au tamis de 0,063 mm < 70% (CCT 2010, RW99, SB 250)</i>	<i>60°C en moins de 8 min (RW99)</i>
<i>Chaux éteinte CL90-S</i>	<i>>60%(teneur en Ca(OH)₂ ≥ 90% (RW99)</i>	<i>Refus au tamis de 0,063 mm < 15% (CCT 2010, RW99, SB 250)</i>	/

Tableau.2.6 Caractéristiques requises de la chaux pour assurer un traitement de sol

La chaux aérienne incorporée à un sol cohésif humide s'engage dans deux réactions distinctes avec les minéraux argileux:

- une réaction rapide responsable des effets immédiats de la chaux (amélioration des sols à la chaux);
- une réaction lente conduisant à un durcissement progressif du mélange sol-chaux compacté et conduisant aux effets à long terme (stabilisation). La vitesse de réaction dépend directement de la température.

Pour le traitement des sols, toutes les chaux pulvérulentes, qu'elles soient vives ou éteintes conviennent. Toutefois, s'il est nécessaire d'assécher le sol pour se rapprocher des conditions optimales de réemploi, le choix de l'utilisateur s'orientera vers la chaux vive qui permet de diminuer la teneur en eau du sol.

Les sols fins, c'est-à-dire les sols qui contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, ont des propriétés routières déplorables. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, foisonnent sous l'effet du gel. Ils n'ont donc aucune stabilité face aux variations climatiques. Ils peuvent ainsi se trouver, soit dès l'extraction, soit à la suite d'intempéries, à un degré de consistance tel que la circulation des engins devienne difficile, voire impossible, ce qui par voie de conséquence rend leur utilisation délicate.

Compte tenu de ses propriétés, la chaux modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux, grâce à trois actions distinctes :

La teneur en eau d'un mélange sol-chaux se trouve abaissée en raison de :

- L'apport de matériaux secs
- La consommation de l'eau nécessaire à l'hydratation de la chaux (chaux vive)

- L'évaporation d'eau suite à la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation et par l'aération provoquée par le malaxage.

En moyenne, la diminution de la teneur en eau d'un sol traité est de l'ordre de 1 à 2 % pour 1 % de chaux.

L'incorporation de chaux dans un sol argileux, développe une agglomération des fines particules argileuses en éléments plus grossiers et friables : c'est la floculation. L'incidence de ces réactions sur le mélange sol-chaux sont :

- Une diminution de l'indice de plasticité IP.
- Une augmentation de l'indice portant immédiat IP.
- Un aplatissement de la courbe Proctor avec diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale.
- Un sol argileux humide passe ainsi de manière quasi-instantanée d'un état plastique à un état solide, friable, non collant et perd partiellement sa sensibilité à l'eau. Sa manipulation sur chantier devient aisée, son comportement à la mise en œuvre et sa portance sont améliorés. L'homogénéité qu'il acquiert le place dans des conditions idéales pour subir le traitement au ciment ou au liant hydraulique routier.

La chaux, en tant que base forte, élève le pH du sol et provoque l'attaque des constituants du sol (silice et alumine). Il se forme alors des aluminates et des silicates de calcium hydratés (réaction pouzzolanique) qui, en cristallisant, agissent comme un liant entre les grains. Il est à noter que l'intensité et la vitesse de ces réactions à long terme dépendent d'un certain nombre de caractéristiques du sol : pH, teneur en matières organiques, quantité et la nature de la fraction argileuse, teneur en eau, dosage en chaux maximal (fonction de la quantité maximale de chaux "consommable" par l'argile présente dans le sol) et surtout température.

2.2.2.2. Le ciment : utilisé dans ce programme de recherche étant le ciment portland composé produite localement par le groupe GICA la wilaya de SKIKDA Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse, en tant que régulateur de prise et répond aux exigences de la norme NA 442 2000: 2000.

Composition :

Clinker : 80 à 94%

Ajouts : 06 à 20%(laitier)

Caractéristiques Mécaniques :

Les résistances à la compression font apparaître une valeur moyenne des résultats à 28 jours d'âge voisine 42,5 MPa.

Les valeurs limites garanties sont :

10,0 MPa à 02 jours

40,0 MPa à 28 jours

Caractéristiques Chimiques :

La teneur en sulfates (SO₃) dans le ciment < 2.5%

La teneur en chlorures (Cl⁻) = 0,1%

2.2.2.3. Laitier : Le laitier est un sous produit de l'élaboration de la fonte. Il est formé des constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke, et donc composé essentiellement de chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO₂) et alumine (Al₂O₃). L'élaboration du laitier peut conduire selon le traitement de refroidissement adopté, à deux formes minéralogiques :

- Laitier vitrifié: obtenu par refroidissement rapide par trempe.
- Laitier cristallisé : obtenu par refroidissement lent à l'air du laitier liquide.

Ces deux formes minéralogiques sont fondamentalement différentes du point de vue cristallographique et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulité latente.

Au contraire, le laitier cristallisé a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique,

Lorsqu'il existe, n'est que modeste.

Les principales formes de laitier :

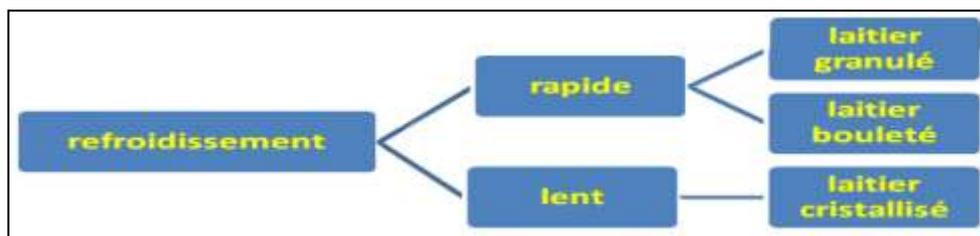


Figure 2.7 les types des laitiers selon les méthodes de refroidissement

Laitier granulé (vitrifié) : la granulation a été utilisée à l'origine comme moyen de fragmentation du laitier pour faciliter sa manutention.

Elle se faisait très simplement en déversant le jet de laitier liquide dans un bassin rempli d'eau. On s'avisait ultérieurement des propriétés hydrauliques latentes du laitier granulé ainsi obtenu. (Figure 4).

Le principe de la granulation est d'extraire le plus possible de chaleur d'une quantité de laitier fondu, en minimum de temps (il faut atteindre des températures inférieures à 800°C en un minimum de temps), pour obtenir l'état vitreux indispensable pour son utilisation comme substitut du ciment portland.

Ensuite, les différents types de granulations furent inventés et expérimentés pour :

- Améliorer la constante des caractéristiques du laitier granulé.
- Augmenter sa réactivité.
- Diminuer la consommation d'eau qui est importante (8 à 10 m³/t de laitier).

Laitier bouleté : la fragmentation du laitier résulte simultanément de l'action de l'eau et de l'air (Figure 2.6) :

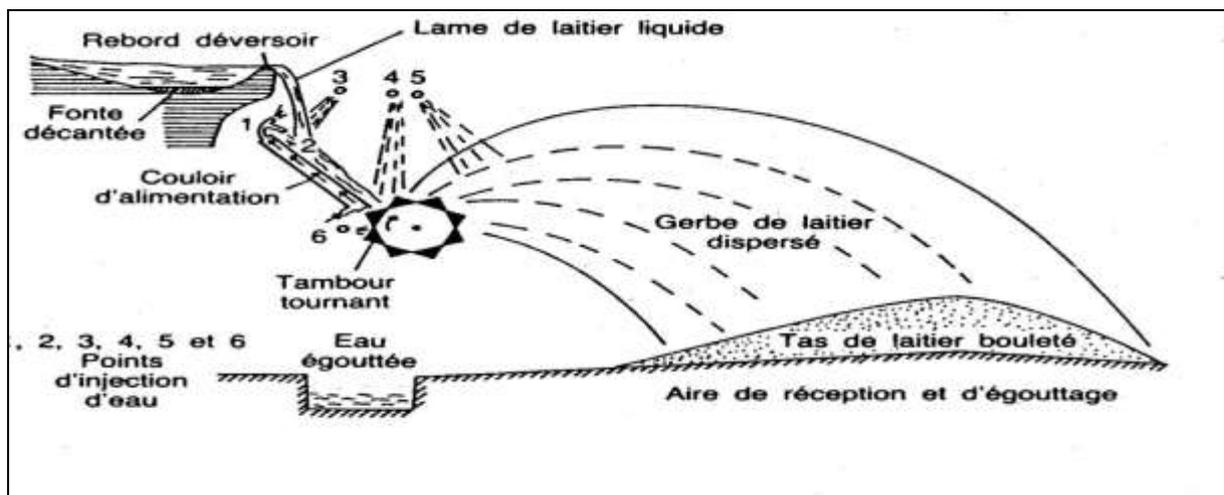


Figure 2.8: Schéma d'élaboration du laitier bouleté

Le laitier liquide se déverse dans un tambour tournant cannelé à axe horizontal qui comporte des trous en périphérie, alimenté en eau sous pression. Des rampes d'arrosage extérieur complètent ce dispositif. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses. C'est pendant cette trajectoire aérienne que la trempe a lieu. Le matériau s'égoutte ensuite naturellement.

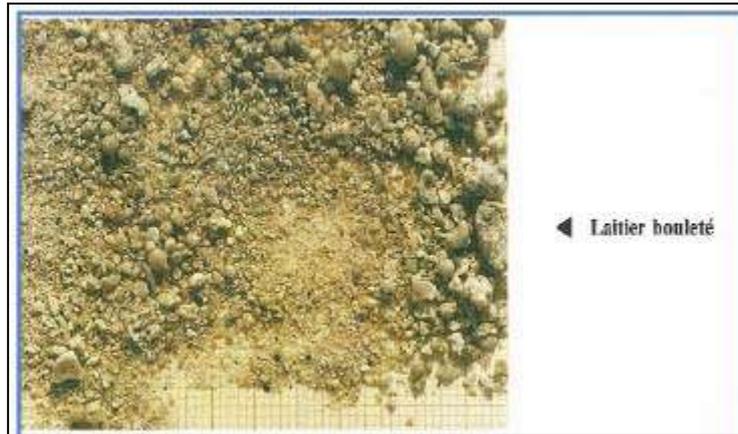


Figure 2.9 : Laitier bouleté

Laitier cristallisé : un refroidissement lent entraîne la cristallisation du laitier. On obtient un matériau solide sous forme de gros granulats, après concassage et classification par fractions granulaires. Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse ou il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé (Figure 2.8). Après solidification de la surface, le refroidissement est activé par un arrosage qui accélère la progression du front de solidification et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier. Le laitier cristallisé résultant d'un refroidissement lent est une roche artificielle qui peut être utilisée en l'état : c'est le laitier tout-venant ou concassé et calibré.



Figure 2.10 : Déversement du laitier dans des fosses de 20 à 40m de large, 80 à 200m de long (Laitier cristallisé).

Composition chimique: La composition chimique des laitiers varie avec la nature de minerai de fer utilisé et avec la qualité de la fonte fabriquée. Ils sont essentiellement constitués de chaux, de silice et d'aluminium. Les laitiers d'EL HADJAR se composent généralement des propositions suivantes :En plus de ces éléments principaux, les laitiers

contiennent aussi des sulfates, de la chaux libre et des inertes. Les laitiers ont une composition chimique voisine de celle des ciments PORTLAND mais moins riche en chaux. Ils sont basiques, celui d'EL HADJAR, son PH est de l'ordre de 12. tout les caractéristiques physique et chimique de laitier granulé sont indiqués dans les tableaux (2.7) et (2.8) successivement

<i>Constituants</i>	<i>Laitier granulé (El Hadjar)</i>
<i>MgO</i>	<i>1,30</i>
<i>SiO₂</i>	<i>42,15</i>
<i>MnO</i>	<i>0,568</i>
<i>Fe₂O₃</i>	<i>1,20</i>
<i>TiO₂</i>	<i>0,572</i>
<i>CaO</i>	<i>42,890</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>10,00</i>
<i>Na₂O</i>	<i>-</i>
<i>K₂O</i>	<i>0,563</i>
<i>SO₃</i>	<i>-</i>
<i>H₂O⁺</i>	<i>-</i>
<i>H₂O⁻</i>	<i>-</i>
<i>P₂O₅</i>	<i>-</i>
<i>CO₂</i>	<i>-</i>
<i>CaCO₃</i>	<i>-</i>
<i>Matériau insoluble dans HCL</i>	<i>-</i>
<i>Sulfites (pyrites)</i>	<i>-</i>
<i>Perte au feu</i>	<i>Néant</i>

Tableau 2.7. Propriétés chimiques du laitier granulé d'El Hadjar

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>
<i>PH</i>	<i>11,45</i>
<i>Densité spécifique</i>	<i>3,01</i>
<i>Masse volumique absolue</i>	<i>3g/cm³</i>
<i>Surface spécifique de Blaine SSB</i>	<i>5632 cm²/g</i>

Tableau 2. 8. Propriétés physiques du laitier granulé broyé



Figure 2.11 Laitier des hauts fourneaux d'EL HADJAR sur le site

2.3. PREPARATION DES EPROUVETTES DE SOL:

Après avoir apporté le laitier et la DD3, on pèse 10 kilogrammes de chacun et on les sèche dans l'étuve pendant 72 heures à 60°C. En suite à tour de rôle on les met dans le broyeur avec 37 kilogrammes de boules de fer pendant 14 h 30 minutes pour atteindre une finesse prédéterminée. Pour mieux les conserver les matériaux broyés après séchage sont mis dans des boîtes étanches pour éviter l'humidification. Les étapes de préparation des différentes éprouvettes sont comme suit :

Préparation du sol stabilisé au GGBFS activé à la chaux hydratée :

- Une quantité d'additifs composée de laitier granulé broyé et de chaux hydratée et 4.5 kilogrammes de matériau dont 85% de DD3 et 15% de bentonite sont préalablement séchés dans une étuve pendant 48 heures à 60°C.



Figure 2.12 exemple de la composition du mélange étudié (DD3, bentonite, GGBFS, CaO)

- En le met les matériaux dans un dessiccateur pour prendre un temps de refroidissement et ensuite mélangé avec une truelle pour l'obtention d'un mélange uniforme pendant 30 minutes.



Figure 2.13 mélange uniforme sec du sol traiter au laitier activé

- Le laitier broyé granulé sec avec une quantité de chaux hydraulique correspondante représentée par 15% du total de l'additif hydraulique est ensuite ajouté selon la proportion préalablement fixée à savoir 0 ; 5 ; 10 ; 15 ; 20 et 25% d'additif.
- Pesé La quantité d'eau correspondant à la teneur en eau optimale OMC déterminée lors du compactage est ajoutée graduellement à mesure que le sol est malaxé.



Figure 2.14 Pesée de la proportion d'eau

- Additionner la quantité d'eau et malaxé jusqu'à l'uniformité



Figure 2.15 l'addition de l'eau et le sol humide non uniforme



Figure 2.16 le mélange uniforme après l'addition de l'eau

- Une fois le mélange est uniforme, le sol est conservé dans des sacs étanches pendant 24h dans le dessiccateur (c'est le mellowing time).gardé cette étapes dans tous les pourcentages d'aditif sauf le sol non traité



Figure 2.17 échantillon préparé et conservé dans le dessiccateur

- Après 24h, le sol est compacté dans un moule CBR de dimensions $152.7 \times 152.7 \text{ mm}^2$ avec une base perforée en cinq couches d'épaisseur plus ou moins égale au moyen d'une dame de 4.5kg.



Figure 2.18 sol compacté

- Après on rase la partie supérieure du moule à l'aide d'une règle, puis on passe à l'exécution de l'essai.



Figure 2.19 sol compacté après rasage

Remarque : dans le cas du sol stabilisée au GGBFS activé au ciment ces étapes sont les mêmes sauf il change la chaux au ciment

2.4. MODE OPERATOIRE DE L'ESSAI CBR:

2.4.1. Appareillage :

- ❖ Matériel de confection des éprouvettes
 - ✓ Une moule CBR de dimension 152,7*152,7 mm
 - ✓ Une dame de Proctor modifié
 - ✓ Un ensemble des accessoires contient :
 - Une base perforée pour assurer le drainage au court d'essai d'imbibition.
 - Une trousse coupante.
 - Une Règle à araser
 - Disque d'espacement de même diamètre du moule et hauteur égale 25 mm
 - Un matériel d'usage courant contient (deux balance de divers précisions, étuve, bacs, dessiccateur, les tares, pelle, truelle, burette, papier filtre, et burette à huile)
- ❖ Matériel de mise en émersion et de mesure de gonflement
 - ✓ D'un ou plusieurs bacs de hauteur suffisante pour assurer l'immersion complète des éprouvettes.

- ✓ Des anneaux fondus
- ✓ Un port anneaux perforé
- ✓ Des comparateur pour mesure le gonflement avec ces port.
- ❖ Matériel de poinçonnement
 - ✓ Un appareil de poinçonnement comprend le dispositif suivant :
 - Une annaux de capacité égale 60KN
 - Deux comparateurs dont :
 - Le comparateur de force qui indique la charge appliquée sur l'éprouvette préparée (comparateur de force) en kilo Newton.
 - Le comparateur de déplacement qui permet de suivre les enfoncements au centième près de millimètre
 - Un bras en forme de volant comportant deux vitesses (une petite et l'autre grande) nous permettant de contrôler la vitesse de déplacement ;
 - Un piston de poinçonnement de diamètre 0.0495 m
 - Un contrôleur de cadence ou cadence mètre électronique dont l'aiguille tourne dans le même sens que le comparateur de déplacement (sens horaire) permettant de suivre une vitesse constante lors de l'essai d'enivrant 1.27 T/min ;
 - Un plateau mobile sur lequel est mis le moule comportant l'échantillon préparé ;
 - Une boîte avec un couvercle dans lequel on met de l'huile pour la purgation ;
 - Un écrou renfermant un trou qui est également utilisé pour la purgation.
 - ✓ Disque centreur de même dimension de disque d'espacement



Figure 2.20 Matériel utilisé

2.4.2. Exécution:

L'essai de gonflement comporte les étapes suivantes :

1. Positionner des papiers filtre dans la base du moule pour garder tout les particules fine



Figure 2.21 poser des papiers filtre à la base de moule

2. Positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette de sol avant de mettre les sur charge



Figure 2.22 positionnement de disque de gonflement et les sur charge

3. Mètre en place et initialisé le dispositif de mesure de gonflement
4. Immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau D'au moins 20mm et Assurer le temps de l'émersion (deux ou quatre jours) $\pm 2h$



Figure 2.23 l'éprouvette de sol en cours d'imbibition

5. Retirer le moule et l'éprouvette du bac à immersion et après égouttage, exécuté le poinçonnement



Figure 2.24 égouttage de l'éprouvette

L'essai de poinçonnement comporte les étapes suivantes :

1. L'échantillon est placée sur le plateau, bien axé sur le piston de poinçonnement à l'aide d'un disque centreur de même dimension que le disque d'espacement ;
2. On tourne le plateau de façon à l'amener au contact de la tige jusqu'à ce que l'aiguille du comparateur de force bouge (ce qui témoigne le contact entre l'éprouvette de sol et la tige de poinçonnement) et on arrête le mouvement ;
3. Le comparateur de déplacement est placé sur le bord du moule ;
4. L'aiguille des deux comparateurs sont ensuite mise sur le zéro ;
5. L'appareil électronique est ensuite branché ;
6. L'essai s'effectue à 3 (3 opérateurs) dont :
 - ❖ le premier actionne la presse en tournant le volant de la petite vitesse en suivant le cadence mètre qui a une vitesse de 1.27 T/min et suit le comparateur de déplacement.
 - ❖ le second suit le comparateur de force.
 - ❖ le dernier suit le chronomètre
7. Ces opérations sont faites simultanément en prenant les mesures de l'enfoncement et de la force exercée ainsi que le temps correspondant



Figure 2.25 Préparation de la machine CBR et exécution de poinçonnement



Figure 2.26 l'éprouvette de sol poinçonné

8. On détermine enfin la teneur en eau de l'échantillon ainsi soumis à cet essai, à partir d'au moins 2 prélèvements (3 prélèvements sont conseillés) que l'on fait de part et d'autre de l'emprunte, dans la région qui a été soumise au poinçonnement. La mesure de la teneur en eau doit suivre immédiatement l'opération de poinçonnement.



Figure 2.27 prélèvement des échantillons pour mesurer le teneur en eau



Figure 2.28 démoulage à l'aide d'extracteur

2.4.3. Exemple d'essai CBR pratique : Cas du CBR du sol non traité (0% laitier)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi * D^2)/4] * H$	(cm ³)	2338,61
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10226,60
Masse du sol humide compacté	(g)	4258,00
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1820,73
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1379,34

Tableau 2.9 Exemples de Mesure de la densité sèche (pour sol non traité)

Temps approximatif (secondes)	Enfoncement (mm)	Force (kN)	Pression (bars) $P=5,19 * F$
0	0,00	0	0
24,93	0,50	0,50	2,60
22,80	1,00	0,75	3,89
24,93	1,50	1,00	5,19
22,32	2,00	1,20	6,23
24,31	2,50	1,50	7,79
22,21	3,00	1,60	8,30
25,01	3,50	1,70	8,82
22,18	4,00	1,80	9,34
24,47	4,50	1,90	9,86
23,16	5,00	2,00	10,38
47,30	6,00	2,20	11,42
47,30	7,00	2,30	11,94
47,40	8,00	2,40	12,46
46,89	9,00	2,50	12,98
46,97	10,00	2,60	13,49

Tableau 2.10.Exemples de Mesure du CBR (pour sol non traité)

Tare		Tare + sol humide (g)	Tare + sol sec (g)	Teneur en eau (%)
Numéro	Masse (g)			
40	13,08	24,16	21,48	31,90
41	12,31	22,92	20,34	32,10
42	10,42	19,25	17,08	32,63
Teneur en eau moyenne				32,00

Tableau 2.11 Exemples de Mesure de la teneur en eau (pour sol non traité)



CHAPITRE 03:
Résultats et interprétation



Chapitre 3 :

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.1. INTRODUCTION

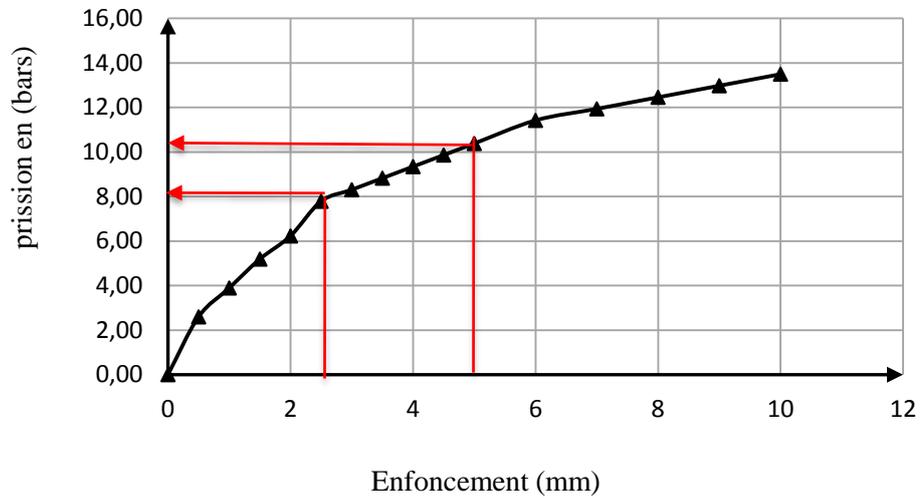
Le présent chapitre présente les résultats des essais de poinçonnement du sol, constitué de 85% de Kaolin et 15% de Bentonite, traité par ajout de laitier granulé broyé produit localement activé à la chaux hydraulique ou au ciment Portland. Ces activateurs ne représentent que 15% du pourcentage total d'additif. Les résultats des essais conduits au niveau du laboratoire de recherche LMGE pour six séries de tests sont présentés interprétés et commentés ci-dessous. Ces essais concernent l'influence du laitier activé sur le CBR immédiat, le CBR sur éprouvettes imbibées à 2 jours, le CBR sur éprouvettes imbibées à 4 jours. Les CBR des éprouvettes stabilisées au laitier activé à la chaux hydratée et au ciment comme indiqué au précédemment sont comparés à fur et à mesure dans le chapitre.

3.2. INFLUENCE DU LAITIER SUR LE CBR IMMEDIAT ACTIVE A LA CHAUX

Les travaux entrepris antérieurement par les collègues de mécanique des sols et ceux de la spécialité des matériaux au niveau des laboratoires de recherche du département de génie civil à l'université Badji Mokhtar-Annaba ont montré que le laitier d'El Hadjar possède une réaction latente (Zemouli et col, 2018) et (Biskri et col, 2017). De ce fait, il a été décidé d'activer ce laitier afin de voir sa performance dans l'essai de poinçonnement le Californian Bearing Ratio autrement dit le CBR. L'activation du laitier granulé peut être faite soit par la chaux soit par le ciment portland. Selon Haq et col en 2010, la chaux hydratée est la plus recommandée pour une telle activation vue son prix sur le marché et sa disponibilité. La chaux hydratée représente 15% de la proportion de l'ajout total au sol en vue de sa stabilisation. Une série d'essai au CBR sur la machine universelle a été conduite pour les proportions de laitier granulé activé à la chaux hydraulique de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25% de liant hydraulique. Tous ces résultats sont représentés sur les figures 3.1 à 3.6. Ces dernières indiquent que les valeurs de CBR obtenues pour chaque pourcentage d'ajout à

savoir 11.12 pour 0% additif, 13.34 pour 5% additif, 14.82 pour 10% additif, 25.20 pour 15% additif, 29.65 pour 20% additif et enfin 46.33 pour 25% GGBFS.

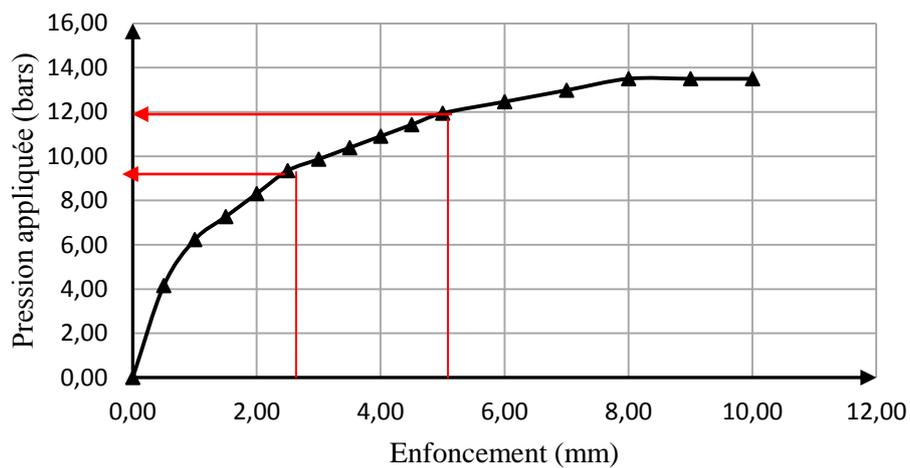
CBR immédiat pour sol non traite



P (2,5 mm)= 7,79 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 11,12
P (5 mm) = 10,38 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 9,88
CBR= 11,12	

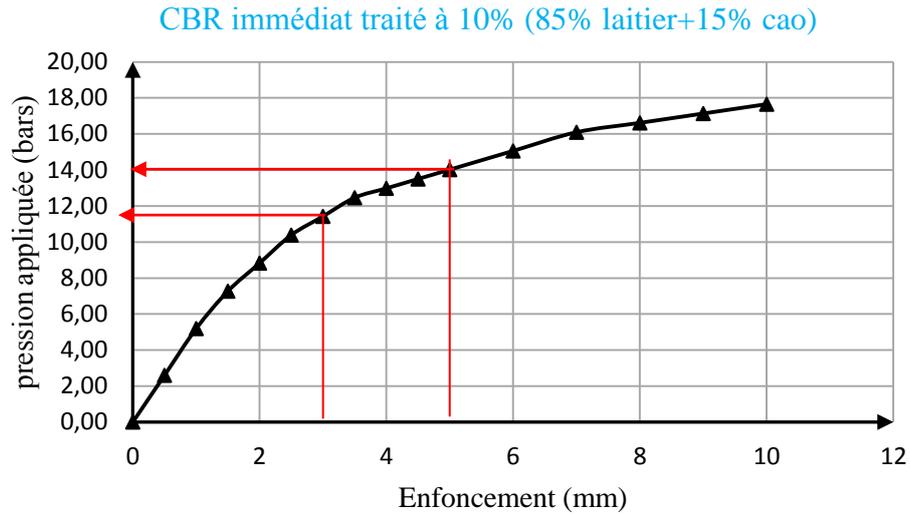
Figure 3.1 Valeur CBR immédiat pour sol non traité

CBR immédiat traité à 5% (85% laitier+15% cao)



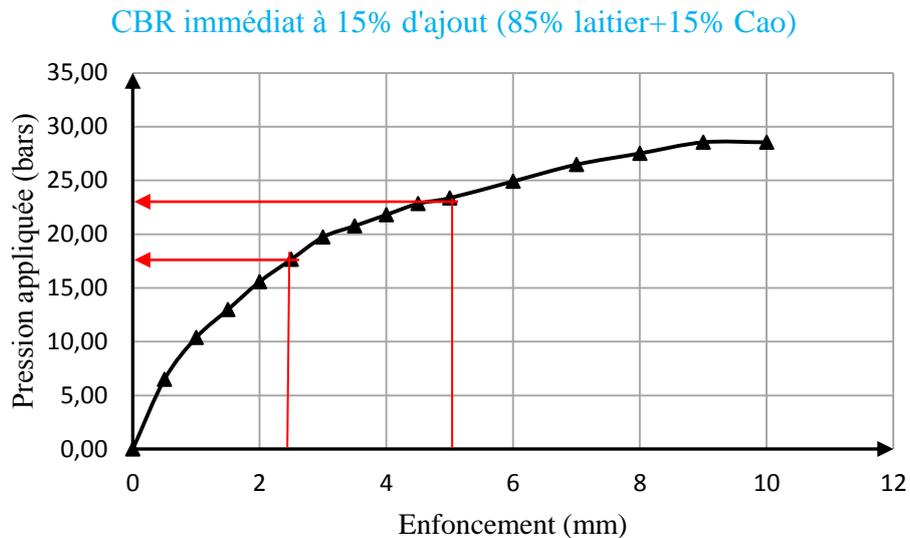
P (2,5 mm) = 9,34 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 13,34
P (5 mm) = 11,94 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) / 1,05 = 11,37
CBR=13,34	

Figure 3.2 Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 5% (85% laitier+15% Cao)



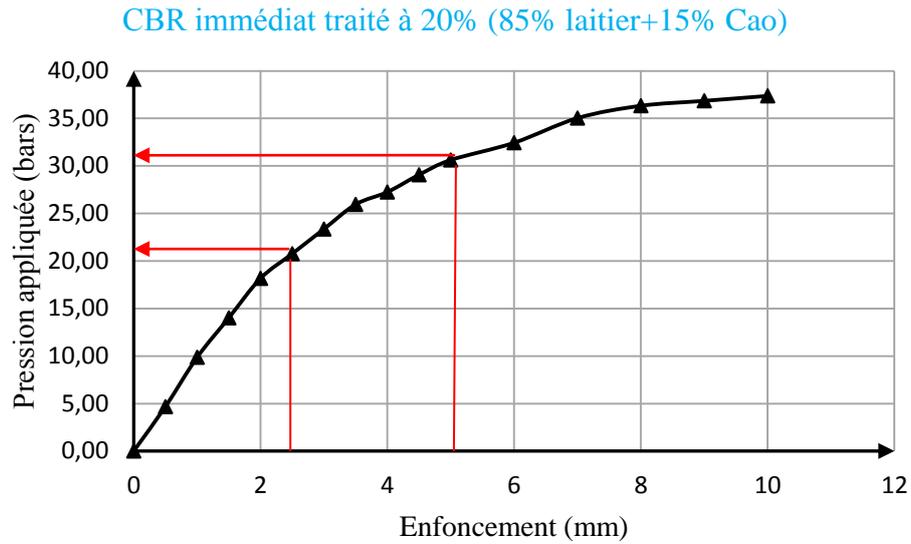
P (2,5 mm) = 10,38 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 14,82
P (5 mm) = 14,01 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 13,34
CBR= 14,82	

Figure 3.3 Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 10% (85% laitier+15% Cao)



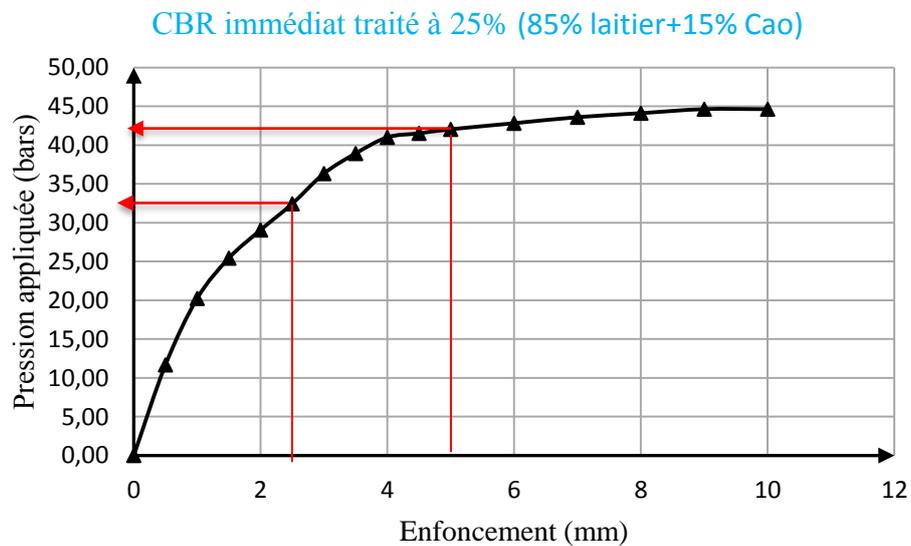
P (2,5 mm) = 17,64 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 25,2
P (5 mm) = 23,35 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 22,23
CBR= 25,2	

Figure 3.4 Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 15% (85% laitier+15% Cao)



P (2,5 mm) = 20,76 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 29,65
P (5 mm) = 30,62 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 29,16
CBR = 29,65	

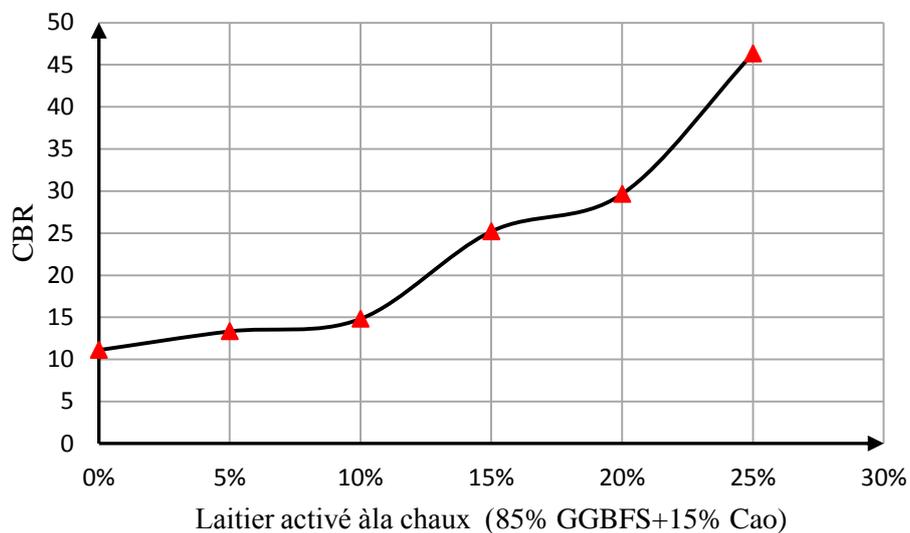
Figure 3.5 Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 20% (85% laitier+15% Cao)



P (2,5 mm) = 32.44bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 46,33
P (5 mm) = 42,04 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 40,03
CBR=46,33	

Figure 3.6 Valeur CBR immédiat activé à la chaux à 25% (85% laitier+15% Cao)

Pour une meilleure compréhension de l'influence de laitier activé à la chaux sur la valeur du CBR, la courbe CBR-pourcentage d'ajout (GGBFS+Cao) a été tracée sur la figure 3.7. Ce graphe montre clairement l'augmentation du CBR en fonction de l'accroissement de la quantité d'ajout hydraulique utilisé dans ce cas précis. L'augmentation semble modérée au début entre 0 et 15% puis s'accélère au delà de 15% (85% laitier+15% Cao) pour atteindre un CBR 46.5 à 25% d'additif. Cette amélioration est attribuée au changement de la granulométrie après ajout de laitier activé qui tend tout d'abord à augmenter les particules grosses et diminuer la quantité des particules fines dans le sol d'une part et à la réaction immédiate du laitier avec les minéraux argileux dans le sol. Cette dernière résulte en la formation de petits grains de sol augmentant ainsi la quantité de la fraction de sol grossier et par conséquent sa granulométrie.



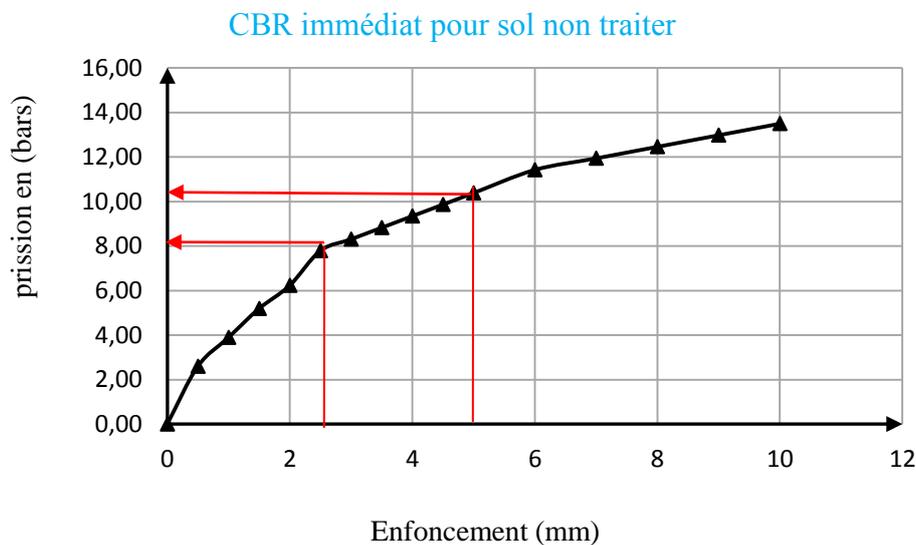
Proportions	CBR _{2,5 mm}	CBR _{5 mm}	CBR
0%	9,88	11,12	11,12
5%	13,34	11,37	13,34
10%	14,82	13,34	14,82
15%	25,2	22,23	25,2
20%	29,65	29,16	29,65
25%	46,33	40,03	46,33

Figure 3.7 Récapitulatif des valeurs CBR immédiat activé à la chaux

3.3. INFLUENCE DU LAITIER SUR LE CBR IMMEDIAT ACTIVE AU CIMENT

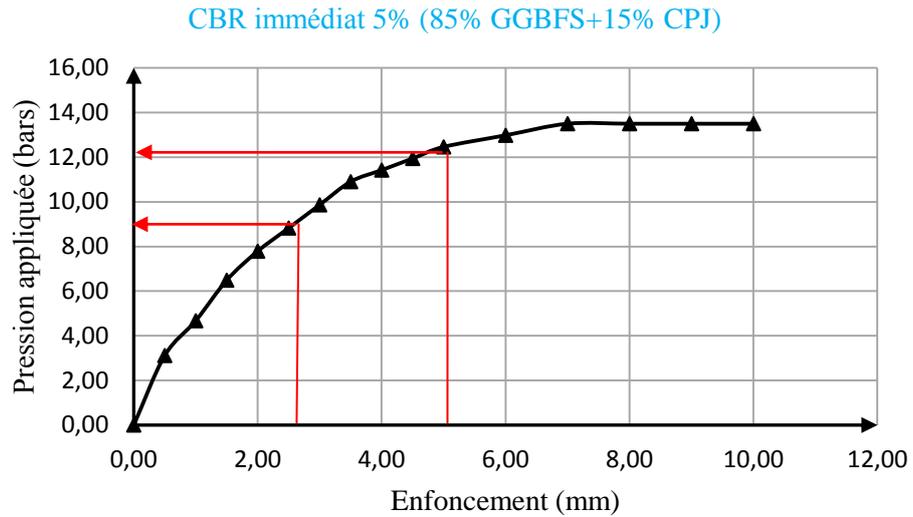
L'utilisation du ciment dans la stabilisation des sols fins a commencé en Allemagne au début du siècle dernier. Un grand nombre de projets en géotechnique routière ont été réalisés utilisant ce liant hydraulique pour améliorer les propriétés intrinsèques des sols à faible capacité portante. Cependant ce matériau s'est avéré être très couteux et il ne sera utilisé dans ce projet de recherche uniquement comme activateur du laitier granulé des hauts fourneaux.

Les figures 3.8 à 3.13 présentent les résultats des essais d'écrasement à la machine universelle CBR disponible au niveau du département de génie civil. Ces dernières indiquent les valeurs de CBR obtenues pour chaque pourcentage d'ajout à savoir 11,12 pour le sol non traité, 12,6 pour le sol traité à 5% laitier activé au ciment (85% GGBFS+15% CPJ), 14,82 pour 10% l'additif (85% GGBFS+15% CPJ), 18,54 pour 15% l'additif (85% GGBFS+15% CPJ), 21,74 pour 20% l'additif (85% GGBFS+15% CPJ) et enfin 25,71 pour 25% l'additif (85% GGBFS+15% CPJ).



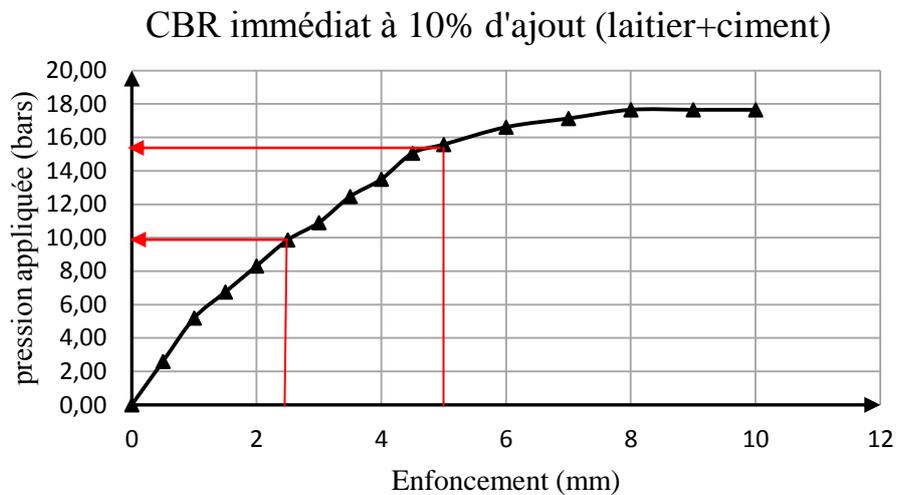
P (2,5 mm)= 7,79 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 11,12
P (5 mm) = 10,38 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 9,88
CBR= 11,12	

Figure 3.8 Valeur CBR immédiat pour sol non traité



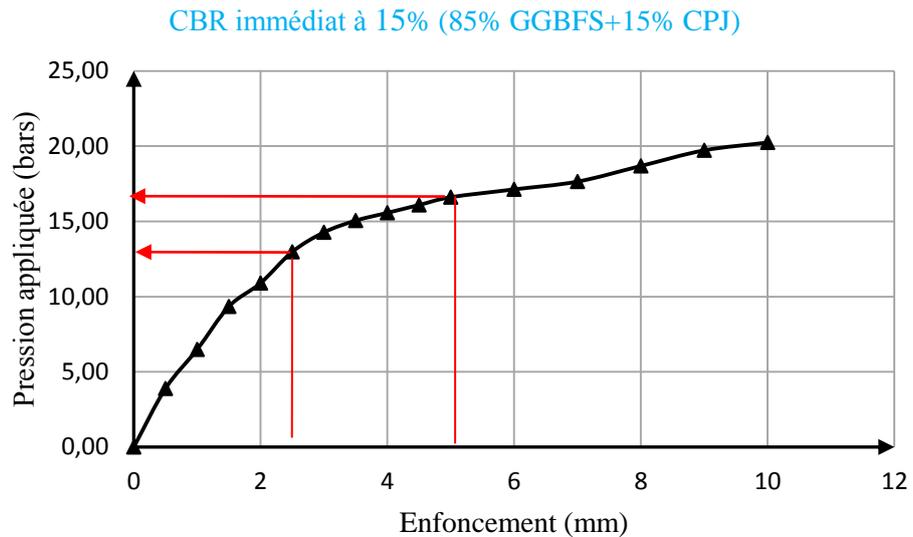
P (2,5 mm)= 8,82 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 12,6
P (5 mm) = 12,46 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 11,86
CBR= 12,6	

Figure 3.9 Valeur CBR immédiat activé au ciment à 5% (85% GGBFS+15% CPJ)



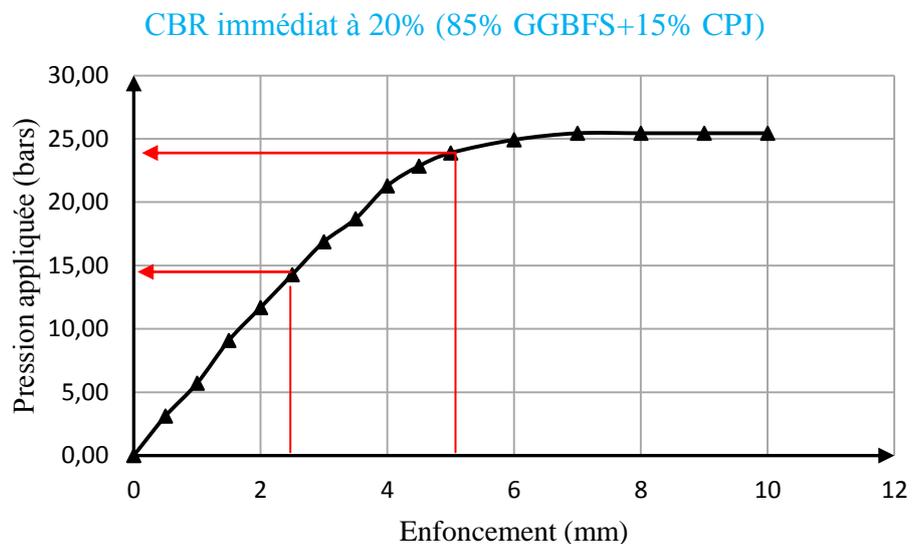
P (2,5 mm)= 9,86 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 14,08
P (5 mm) = 15,57 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 14,82
CBR= 14,82	

Figure 3.10 Valeur CBR immédiat activé au ciment à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)



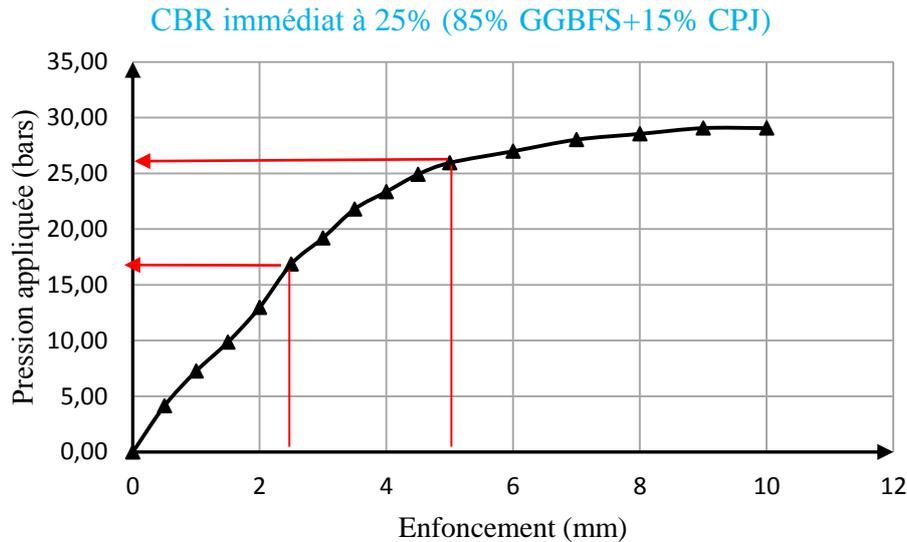
P (2,5 mm)= 12,98 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 18,54
P (5 mm) = 16,61 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 15,81
CBR= 18,54	

Figure 3.11 Valeur CBR immédiat activé au ciment à 15% (85% GGBFS+15% CPJ)



P (2,5 mm)= 14,27 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 20,38
P (5 mm) = 22,83 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 21,74
CBR= 21,74	

Figure 3.12 Valeur CBR immédiat activé au ciment à 20% (85% GGBFS+15% CPJ)



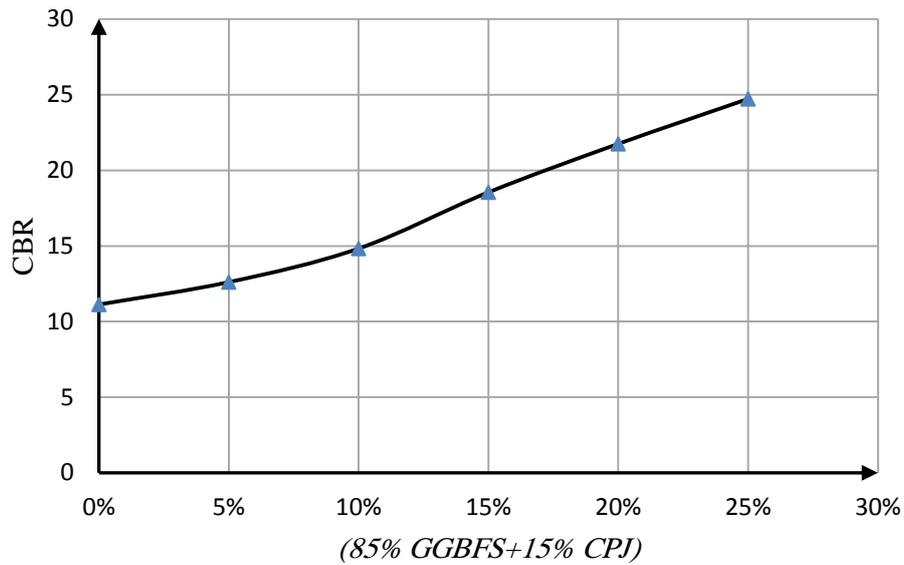
P (2,5 mm)= 16,86 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 24,08
P (5 mm) = 25,95 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 24,71
CBR= 24,71	

Figure 3.13 Valeur CBR immédiat activé au ciment à 25% (85% GGBFS+15% CPJ)

Pour une meilleure lisibilité, les valeurs des CBR obtenues pour les différentes proportions d'ajout de liant hydraulique qui est le laitier granulé activé au ciment portland sont compilées dans un même graphe sur la figure 3.14. Celle-ci montre que l'augmentation de laitier activé au ciment portland (85% GGBFS+15% CPJ) résulte en un accroissement progressif de la valeur CBR du sol comme dans le cas du laitier activé à la chaux.

L'augmentation semble être modérée entre 0 et 10% puis s'accélère au delà de 10% (85% GGBFS+15% CPJ) pour atteindre un CBR 25,95 à 25% d'additif. Cette amélioration est attribuée au changement de la granulométrie après ajout de laitier activé au ciment qui tend tout d'abord à augmenter le nombre de particules grosses et diminuer la quantité des particules fines dans le sol d'une part et à la réaction immédiate du laitier avec les minéraux argileux dans le sol. Cette dernière résulte en la formation de petits grains de sol augmentant ainsi la quantité de la fraction de sol grossier et par conséquent sa granulométrie.

Récapitulation CBR immédiat activé au ciment



Proportions	CBR _{2,5 mm}	CBR _{5 mm}	CBR
0%	9,88	11,12	11,12
5%	8,82	12,46	12,46
10%	9,86	15,57	15,57
15%	12,98	16,61	16,61
20%	14,27	22,83	22,83
25%	16,86	25,95	25,95

Figure 3.14 Récapitulatif des valeurs CBR immédiat activé au ciment

La comparaison des résultats obtenus pour les valeurs CBR dans les deux cas de stabilisation au laitier activé à la chaux (85% GGBFS+15 % Cao) et au laitier activé au ciment portland (85% GGBFS+15 % CPJ) est donnée sur la figure 3.15. Celle-ci montre bien la même évolution des valeurs CBR dans les deux cas en plus de l'amélioration du CBR lorsque le laitier est activé à la chaux hydratée au-delà de 10% d'ajout. Pour une meilleure compréhension du phénomène responsable de cette différence dans le comportement mécanique obtenu les essais au rayon-X (DRX) et au microscope électronique (MEB) sont recommandés.

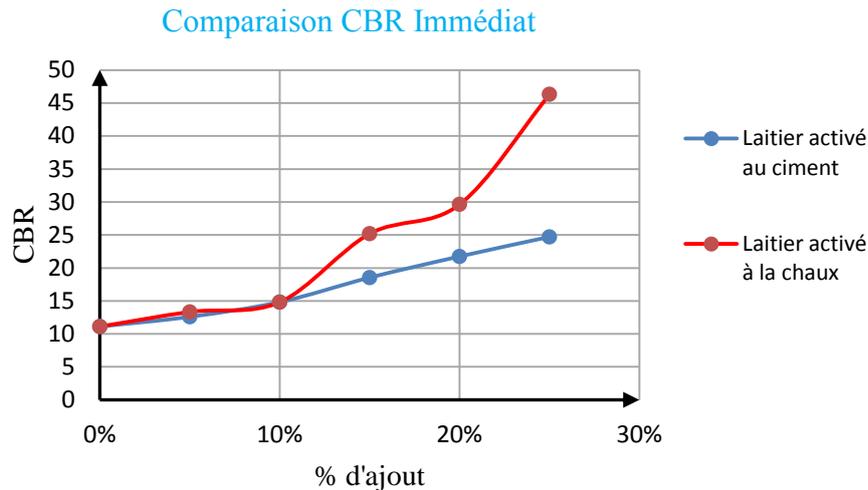


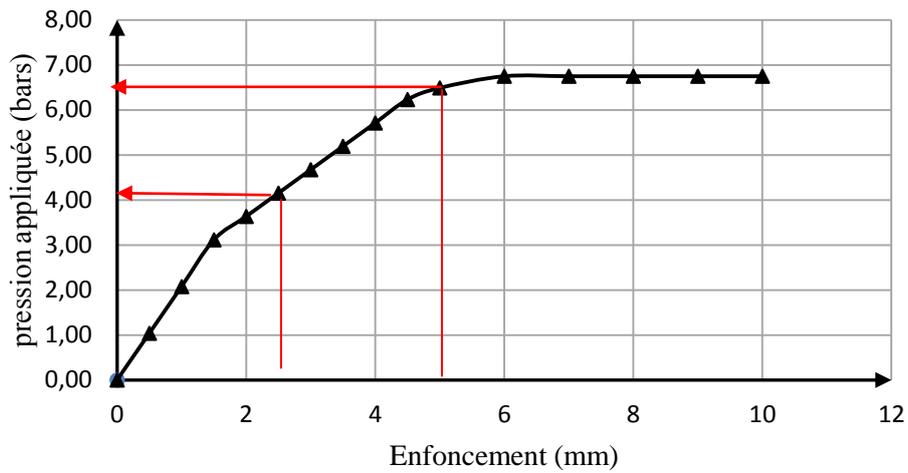
Figure 3.15 Comparaison des valeurs CBR pour les laitiers activés à la chaux ou au ciment

3.4. CBR DU SOL TRAITÉ AU LAITIER ACTIVE A LA CHAUX IMBIBITION A DEUX JOURS

Les essais de poinçonnement imbibés dans l'eau sont un autre type d'essai CBR effectué essentiellement en géotechnique routière. Ils représentent les conditions les plus défavorables pour toutes les constructions linéaires. En effet, deux types d'essais imbibés sont généralement recommandés, les essais imbibés à deux jours et les essais imbibés à quatre jours. Dans cette section, les résultats du sol imbibé à deux jours obtenus lors de la campagne d'essai sont présentés sur les figures 3.16 à 3.21 ensemble avec les valeurs de gonflement de ces même éprouvettes en figure 3.23. Ces essais importants ont été effectués pour les ajouts de 5%, 10%, 15%, 20%, et 25% de laitier activé c'est-à-dire (85% GGBFS+15% Cao).

D'après ces graphes tracés un CBR de 6,18 a été obtenu pour le sol non traité, un CBR de 11,12 pour 5% (85% GGBFS+15% Cao), un CBR de 12,36 pour 10% (85% GGBFS+15% Cao), un CBR de 22,24 pour 15% (85% GGBFS+15% Cao), un CBR de 32,62 pour 20% (85% GGBFS+15% Cao) et un CBR de 66,72 pour 25% (85% GGBFS+15% Cao).

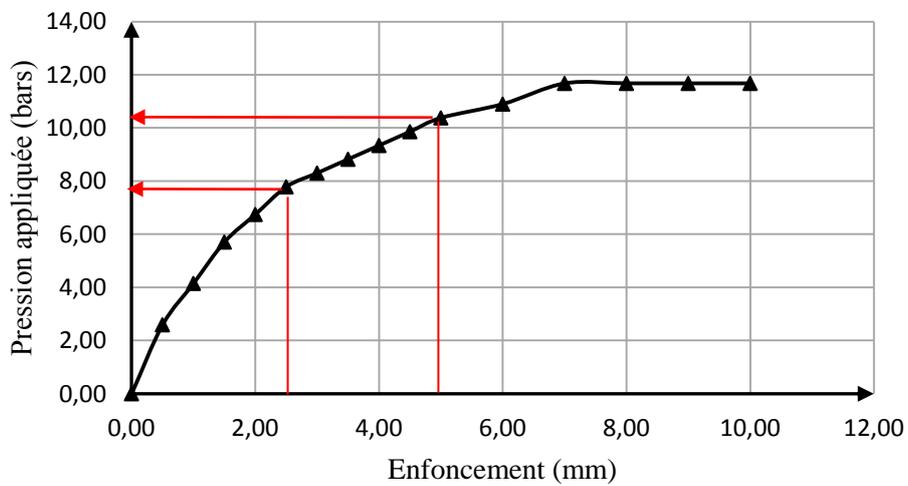
CBR imbibé à 2 jour pour sol non traiter



P (2,5 mm)= 4,15	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 =5,92
P (5 mm) = 6,49	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 6,18
CBR=6,18	

Figure 3.16 Valeur CBR imbibé à 2 jours pour sol non traité

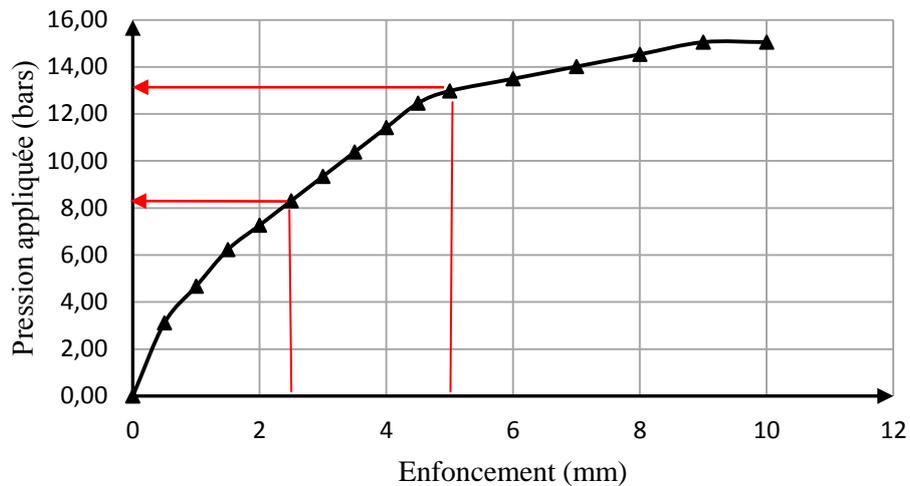
CBR imbibé à 2 jours à 5% (85% GGBFS+15% Cao)



P (2,5 mm) = 7,79 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 11,12
P (5 mm) = 10,38 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 9,88
CBR= 11,12	

Figure 3.17 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 5% (85% GGBFS+15% Cao)

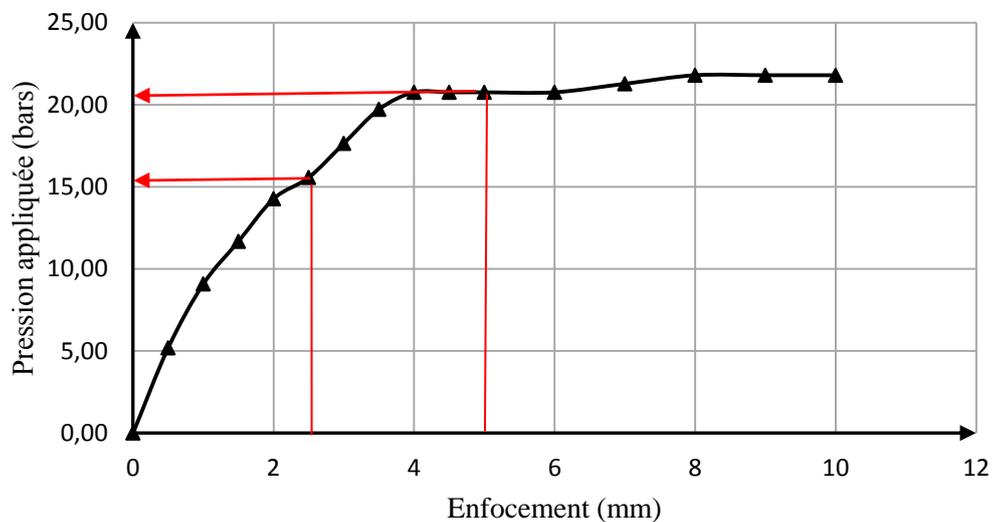
CBR imbibé à 2 jours à 10% (85% GGBFS+15% Cao)



P (2,5 mm) = 8,3 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 11,85
P (5 mm) = 12,98 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 12,36
CBR= 12,36	

Figure 3.18 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 10% (85% GGBFS+15% Cao)

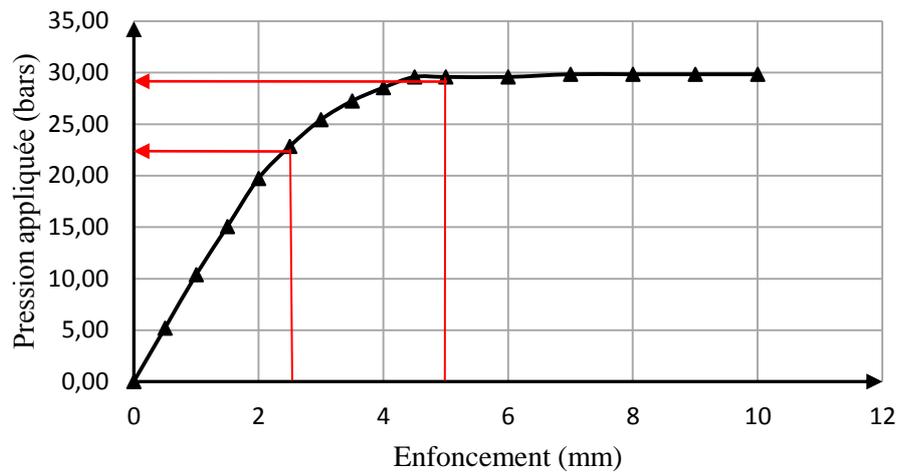
CBR imbibé à 2 jours à 15% (85% GGBFS+15% Cao)



P (2,5 mm) = 15,57 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 22,24
P (5 mm) = 20,76 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 19,77
CBR= 22,24	

Figure 3.19 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 15% (85% GGBFS+15% Cao)

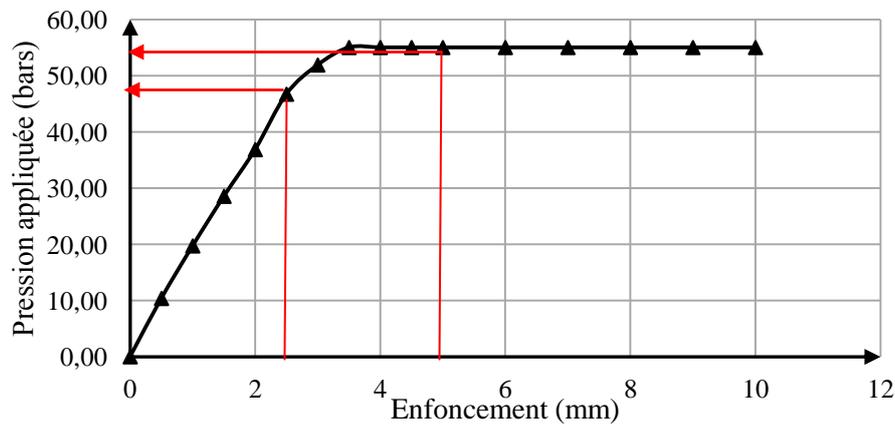
CBR imbibé à 2 jours à 20% (85% GGBFS+15% Cao)



P (2,5 mm) = 22,84 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 32,62 bars
P (5 mm) = 29,58 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 28,17 bars
CBR = 32,62 bars	

Figure 3.20 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 20% (85% GGBFS+15% Cao)

CBR imbibé à 2 jours à 25% (85% GGBFS+15% Cao)

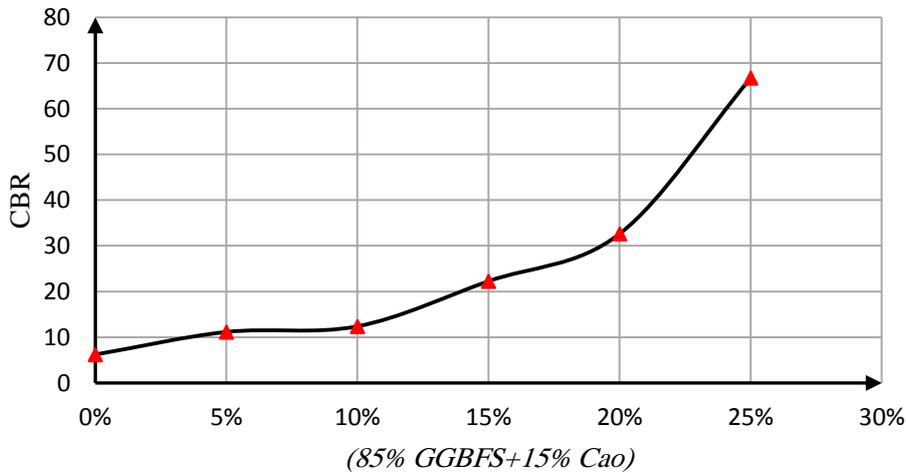


P (2,5 mm) = 46,71 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 66,72 bars
P (5 mm) = 55,01 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 52,39 bars
CBR= 66,72 bars	

Figure 3.21 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 25% (85% GGBFS+15% Cao)

Afin de voir au mieux l'évolution et l'influence du pourcentage du laitier activé (85% GGBFS+15% Cao) sur la valeur du CBR est donnée sur la figure 3.22. Elle montre que l'accroissement de la quantité d'ajout de liant hydraulique qui n'est autre que le laitier activé (85% GGBFS+15% Cao) engendre un accroissement de la valeur du CBR. Cette valeur du CBR varie de 6,18 pour 0% d'ajout à 66,72 pour 25% (85% GGBFS+15% Cao). De 5 à 10% d'ajout, la vitesse de changement progressive paraît lente mais cet accroissement s'accélère au-delà pour les pourcentages de 15, 20 et 25% (85% GGBFS+15% Cao).

Récapitulation CBR imbibé à 2 jours

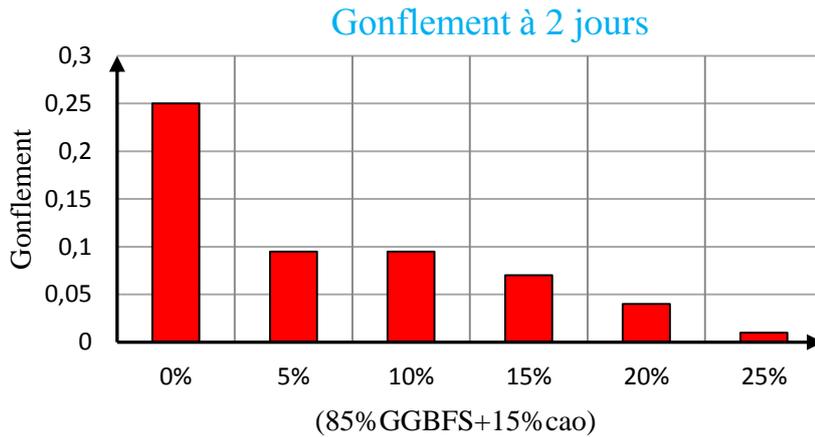


Proportions	CBR _{2,5 mm}	CBR _{5 mm}	CBR
0%	5,92	6,18	6,18
5%	11,12	9,88	11,12
10%	11,85	12,36	12,36
15%	22,24	19,77	22,24
20%	32,62	28,17	32,62
25%	66,72	52,39	66,72

Figure 3.22 Récapitulatif des valeurs CBR imbibé à 2 jours

Le gonflement est une caractéristique importante à contrôler pour éviter tous les dommages future dans l'intégralité de la structure de la construction routière réalisée. Pour cela, il a été décidé de procéder à la mesure du gonflement linéaire absolu des éprouvettes de sol non traitées et traitées au laitier activé à la chaux à différentes proportions d'ajout hydraulique de laitier activé. Les résultats obtenus sont compilés sur la figure 3.23 Celle-ci indique que l'augmentation du pourcentage du laitier activé à la chaux (85% GGBFS+15% Cao) résulte en une diminution du gonflement linéaire absolu du sol stabilisé. Ce gonflement

linéaire absolu varie de 0,25 millimètres pour le sol non traité à 0.095 millimètres pour 5% (85% GGBFS+15% Cao) à 0,095 millimètres pour 10% (85% GGBFS+15% Cao), à 0.07 millimètres pour 15% (85% GGBFS+15% Cao), à 0.04 millimètres pour 20% (85% GGBFS+15% Cao) et enfin à 0.01 millimètres pour 25% (85% GGBFS+15% Cao). Cette diminution est le résultat des réactions physico-chimique entre le laitier et les différents minéraux argileux dans le sol fin



Proportions	Divisions	Gonflement à 2 jours (mm)
0%	25	0,25
5%	9,5	0,095
10%	9,5	0,095
15%	7	0,07
20%	4	0,04
25%	1	0,01

Figure 3.23 Variation du gonflement linéaire absolu à 2 jours d'immersion dans l'eau

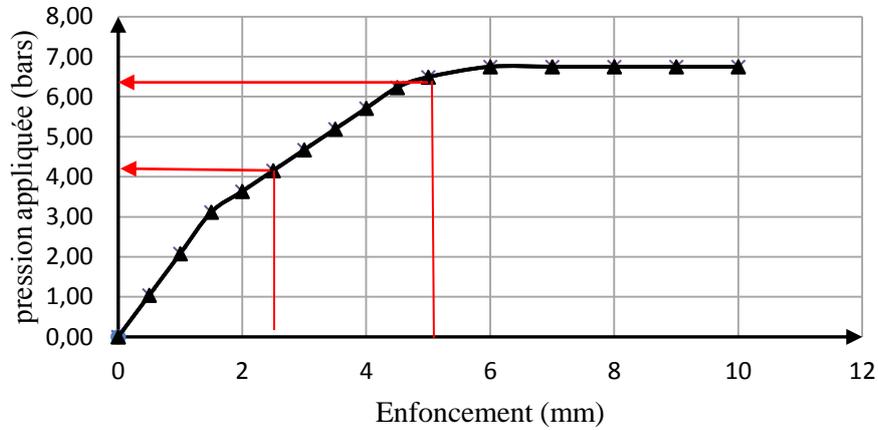
3.5. CBR DU SOL TRAITÉ AU LAITIER ACTIVE AU CIMENT

IMBIBATION A DEUX JOURS

Dans cette section l'essai imbibé à 2 jours pour le sol stabilisé au laitier activé au ciment sont présentés sur les figures 3.24 à 3.29 ensemble avec les valeurs de gonflement des éprouvettes de sol qui eux sont donnés sur la figure 3.31. Ces deux essais importants à savoir le CBR et le gonflement ont été effectués pour les pourcentages d'ajout de 5%, 10%, 15%, 20%, et 25% de laitier activé c'est-à-dire (85% GGBFS+ 15% CPJ). D'après ces graphes tracés un CBR de 6,18 a été obtenu pour le sol non traité, un CBR de 7,41 pour 5% (85% GGBFS+ 15% CPJ), un CBR de 7,41 pour 10% (85% GGBFS+ 15% CPJ), un CBR de 12,97

pour 15% (85% GGBFS+ 15% CPJ), un CBR de 14,08 pour 20% (85% GGBFS+ 15% CPJ) et un CBR de 15,57 pour 25% (85% GGBFS+ 15% CPJ).

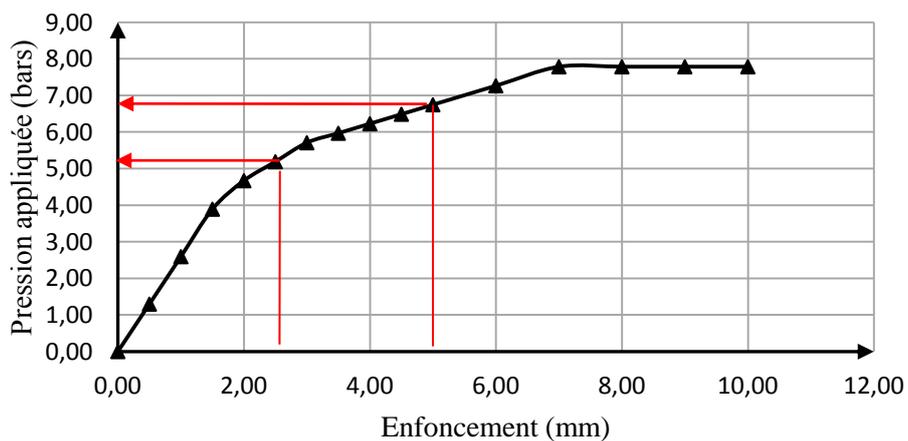
CBR imbibé à 2 jour pour sol non traiter



P (2,5 mm)= 4,15 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 5,92
P (5 mm) =6,49 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 6,18
CBR= 6,18	

Figure 3.24 Valeur CBR imbibé à 2 jours pour sol non traité

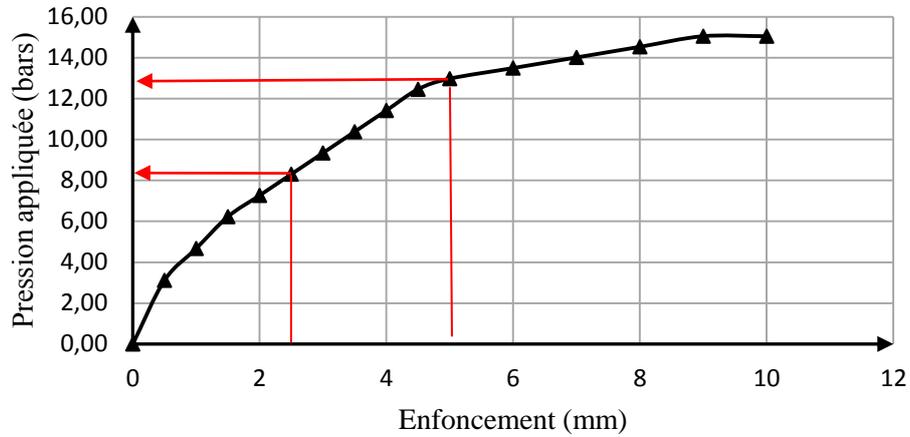
CBR imbibé à 2 jours à 5% (85% GGBFS+ 15% CPJ)



P (2,5 mm) = 5,19 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 7,41
P (5 mm) = 6,75 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 6,42
CBR= 7,41	

Figure 3.25 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 5% (85% GGBFS+ 15% CPJ)

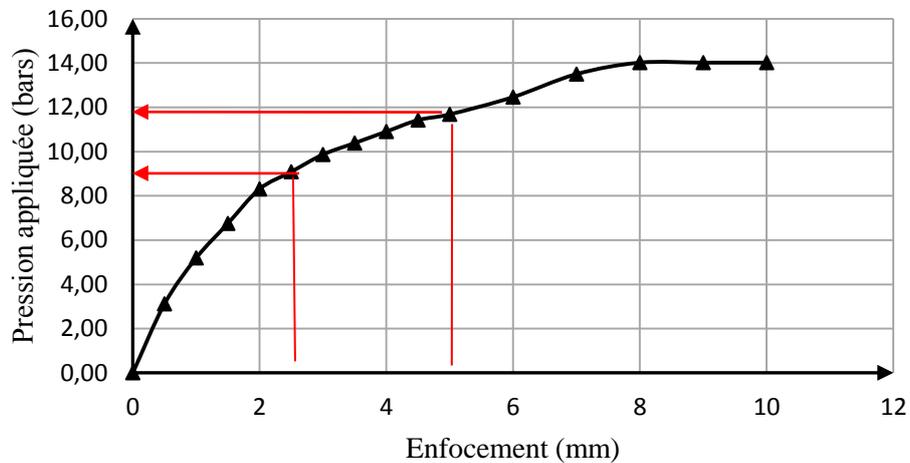
CBR imbibé à 2 jours à 10% (85% GGBFS+ 15% CPJ)



P (2,5 mm) = 5,19 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 7,41
P (5 mm) = 6,75 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 6,42
CBR= 7,41	

Figure 3.26 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 10% (85% GGBFS+ 15% CPJ)

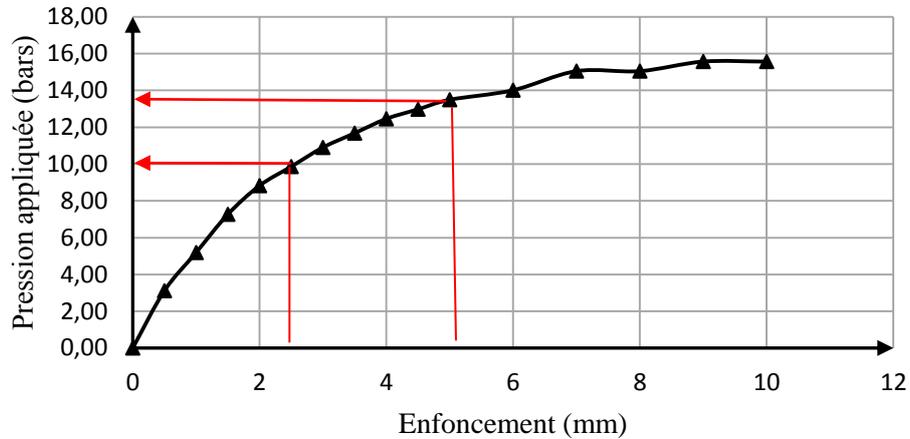
CBR imbibé à 2 jours à 15% (85% GGBFS+ 15% CPJ)



P (2,5 mm) = 9,08 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 12,97
P (5 mm) = 11,68bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 11,12
CBR= 12,97	

Figure 3.27 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 15% (85% GGBFS+ 15% CPJ)

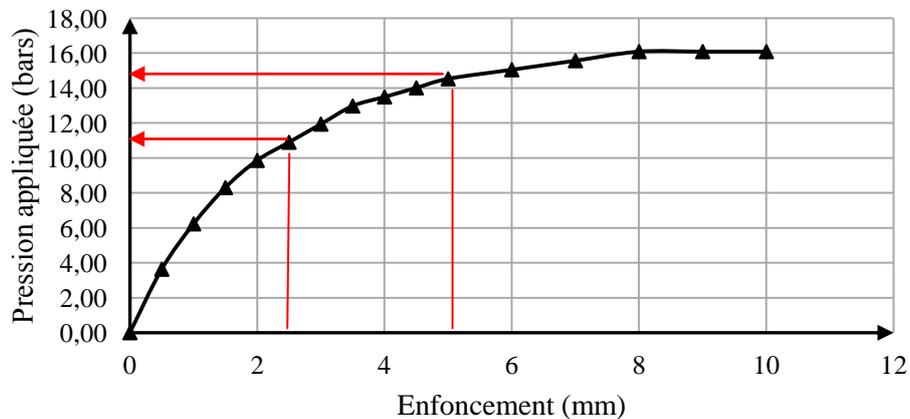
CBR imbibé à 2 jours à 20% (85% GGBFS+ 15% CPJ)



P (2,5 mm) = 9,86 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 14,08
P (5 mm) = 13,49 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 12,84
CBR = 14,08	

Figure 3.28 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 20% (85% GGBFS+ 15% CPJ)

CBR imbibé à 2 jours à 25% (85% GGBFS+ 15% CPJ)



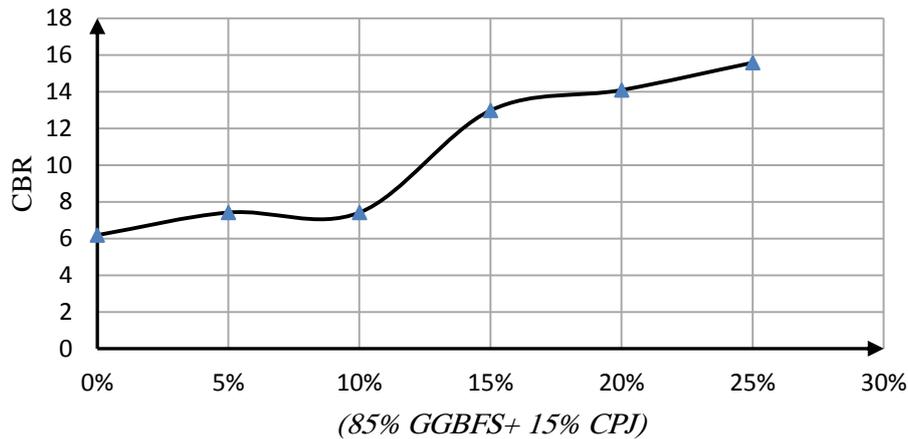
P (2,5 mm) = 10,9 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 15,57
P (5 mm) = 14,53 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 13,83
CBR= 15,57	

Figure 3.29 Valeur CBR imbibé à 2 jours à 25% (85% GGBFS+ 15% CPJ)

L'évolution et l'influence du pourcentage du (85% GGBFS+ 15% CPJ) sur la valeur du CBR pendant l'imbibition à deux jours est donnée sur la figure 3.31. Elle montre un

accroissement de la valeur CBR lorsque la quantité du laitier activé au ciment (85% GGBFS+ 15% CPJ) augmente. Jusqu'à 10% (85% GGBFS+ 15% CPJ), le changement dans le CBR ne semble pas être important il ne dépasse pas la valeur 7,41 mais à une proportion supérieure le CBR augmente de manière significative jusqu'à 15,57 pour 25% (85% GGBFS+ 15% CPJ).

Récapitulation CBR imbibé à 2 jours

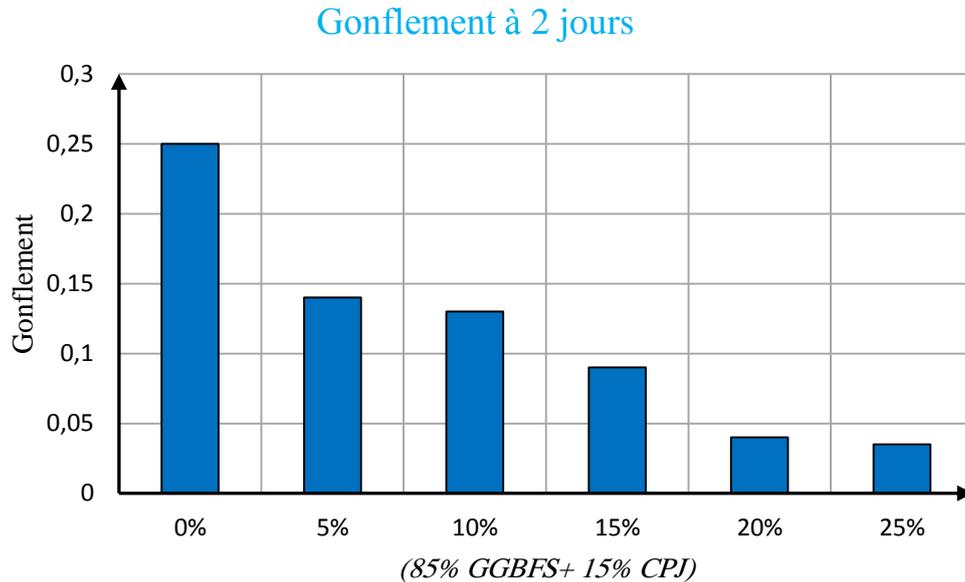


Proportions	CBR _{2,5 mm}	CBR _{5 mm}	CBR
0%	5,92	6,18	6,18
5%	7,41	6,75	7,41
10%	7,41	7,41	7,41
15%	12,97	11,12	12,97
20%	14,08	12,84	14,08
25%	15,57	13,83	15,57

Figure 3.30 Récapitulatif des valeurs CBR imbibé à 2 jours

Le gonflement linéaire absolu des éprouvettes de sol non traitées et traitées au laitier activé au ciment a aussi été étudié et les résultats obtenus sont compilés sur la figure 3.32. Celle-ci indique que l'augmentation du pourcentage du laitier résulte une diminution du gonflement linéaire absolu du sol stabilisé. Ce gonflement linéaire absolu varie de 0,25 millimètres pour 0% de laitier activé au ciment à 0,14 millimètres pour 5% (85% GGBFS+ 15% CPJ), à 0,13 millimètres pour 10% (85% GGBFS+ 15% CPJ), à 0,09 millimètres pour 15% (85% GGBFS+ 15% CPJ), à 0,04 millimètres pour 20% (85% GGBFS+ 15% CPJ) et 0,035 millimètres pour 25% (85% GGBFS+ 15% CPJ). Cette diminution est le résultat des

réactions physico-chimique entre le laitier et les différents minéraux argileux dans le sol fin étudié à savoir la réaction d'évaporation et de modification qui s'en suivent. Les présents résultats confirment ceux obtenu par ADAMA et col en 2017.



Proportions	Divisions	Gonflement à 2 jours (mm)
0%	25	0,25
5%	14	0,14
10%	13	0,13
15%	9	0,09
20%	4	0,04
25%	3,5	0,035

Figure 3.31 Variation du gonflement linéaire absolu à 2 jours d'immersion dans l'eau

La comparaison des essais CBR imbibé à deux jours pour les éprouvettes de sols traitées au laitier activé à la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) et activé au ciment (85% GGBFS+ 15% CPJ) est donnée sur la figure 3.32. Cette dernière indique que les valeurs CBR imbibé à deux jours du laitier activé à la chaux sont plus élevées que les valeurs obtenues à deux jours de saturation du laitier activé au ciment et cela pour toutes les proportions utilisées.

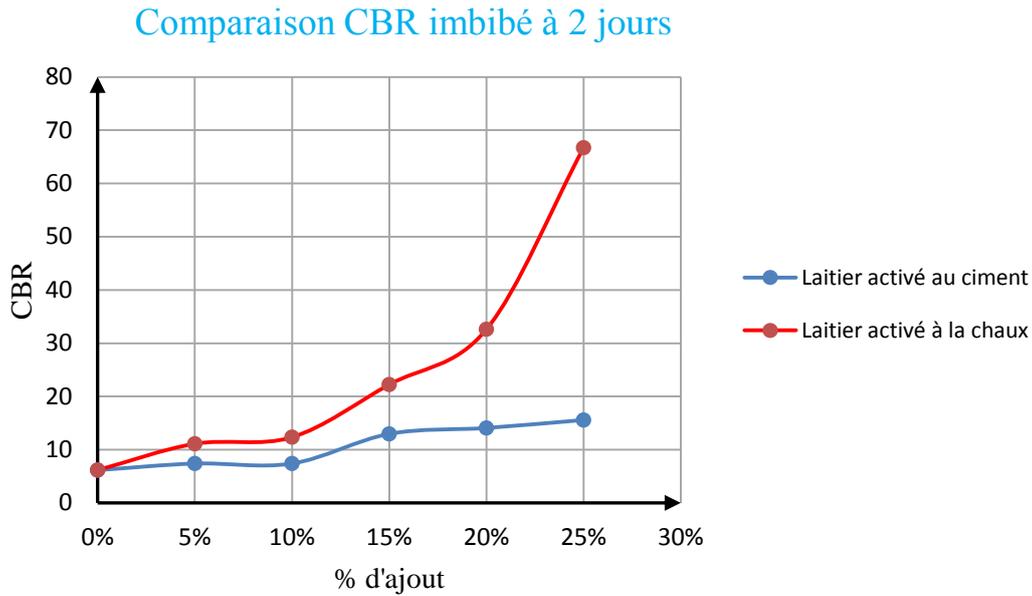


Figure 3.32 Comparaison des valeurs CBR imbibé à 2 jours pour laitier activé à la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) et laitier activé au ciment (85% GGBFS+ 15% CPJ)

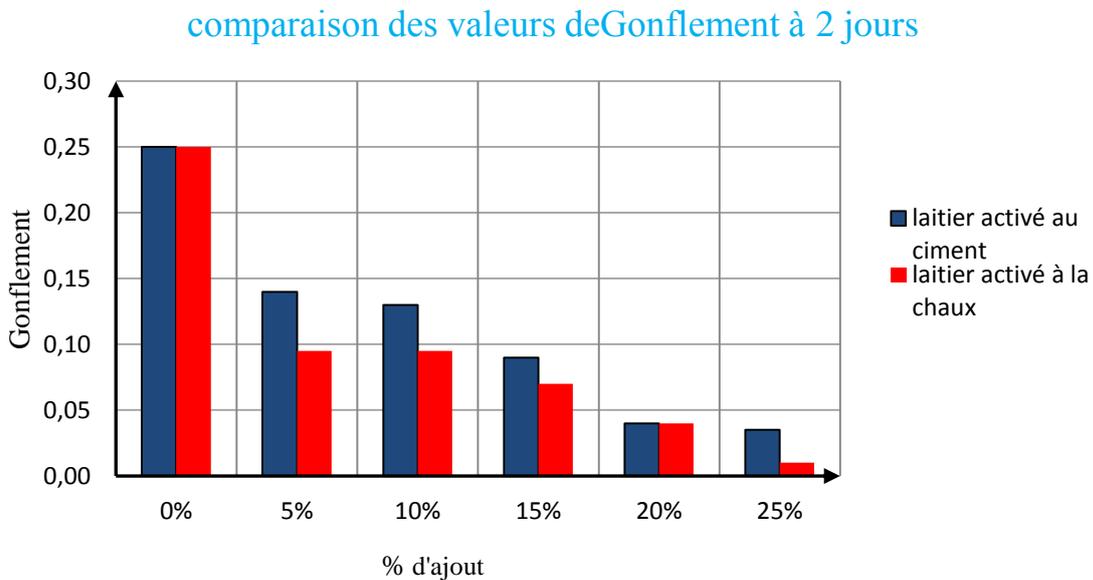


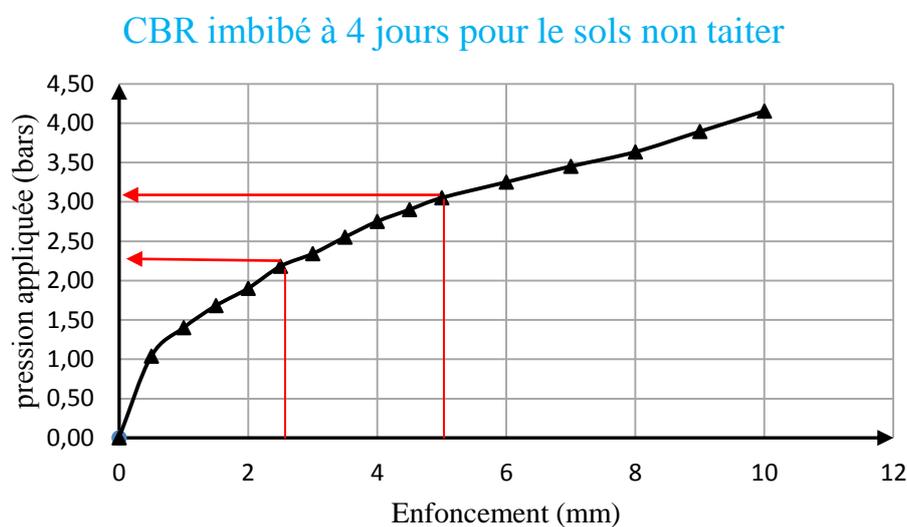
Figure 3.33 Comparaison des valeurs de gonflement à 2 jours d'immersion pour laitier activé à la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) et laitier activé au ciment (85% GGBFS+ 15% CPJ)

Comme il a été mentionné auparavant, le gonflement des sols est un phénomène très dangereux pour les structures géotechniques réalisées en sol. C'est pour ça il a été procédé à la mesure du gonflement lors des essais CBR imbibés a deux et analyser les résultats obtenus pour les liants au laitier activé a la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) et au ciment portland (85% GGBFS+ 15% CPJ. Ces résultats sont présentés sur la figure 3.33. Cette dernière

montre que l'augmentation de la proportion de liant hydraulique en gendre une diminution la magnitude du gonflement du sol stabilisé. Plus encore, l'activation de laitier à la chaux hydraulique réduit au mieux le gonflement du sol et ce ci pour toutes les pourcentages utilisés

III.6. CBR DU SOL TRAITÉ AU LAITIER ACTIVE A LA CHAUX IMBIBATION A QUATRE JOURS

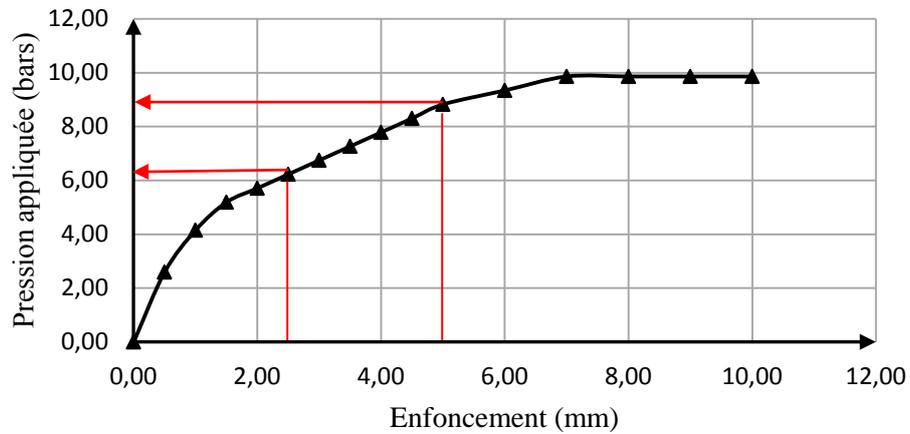
Les essais de poinçonnement imbibé à 4 jours pour le cas des éprouvettes de sol stabilisées au laitier activé à la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) sont donnés dans cette section. Les figures 3.34 à 3.39 présentent les résultats obtenus du CBR ensemble avec les valeurs de gonflement qui eux sont donnés sur la figure 3.41. Ces deux séries d'essais ont été effectués pour les pourcentages d'ajout de 5%, 10%, 15%, 20%, et 25% de laitier activé c'est-à-dire (85% GGBFS+ 15% Cao). D'après ces graphes tracés un CBR de 3.14 a été obtenu pour le sol non traité, un CBR de 8,9 pour 5% (85% GGBFS+ 15% Cao), un CBR de 10,38 pour 10% (85% GGBFS+ 15% Cao), un CBR de 18,54 pour 15% (85% GGBFS+ 15% Cao), un CBR de 37,03 pour 20% (85% GGBFS+ 15% Cao) et un CBR de 81,55 pour 25% (85% GGBFS+ 15% Cao).



P (2,5 mm)= 2,20 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 3,14
P (5 mm) = 3,10 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 2,95
CBR= 3,14	

Figure 3.34. Valeur CBR imbibé à 2 jours pour sol non traité

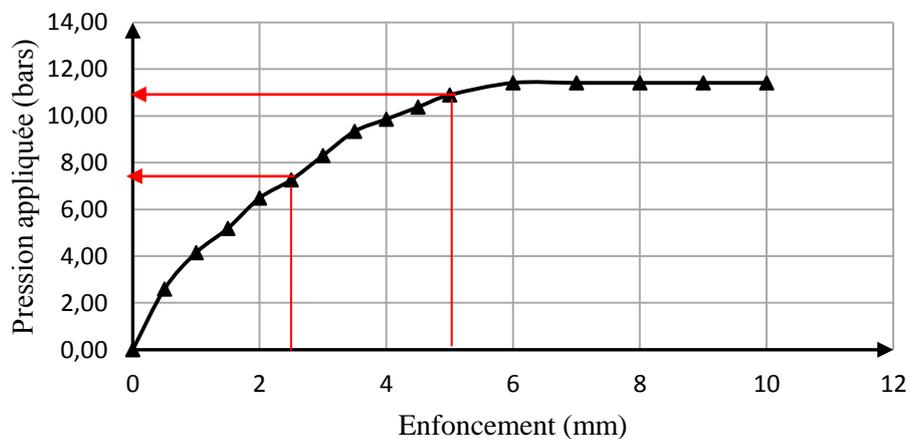
CBR imbibé à 4 jours à 5% (85% GGBFS+ 15% Cao)



P (2,5 mm) = 6,23 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 8,9
P (5 mm) = 8,82 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 8,4
CBR= 8,9	

Figure 3.35 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 5% (85% GGBFS+ 15% Cao)

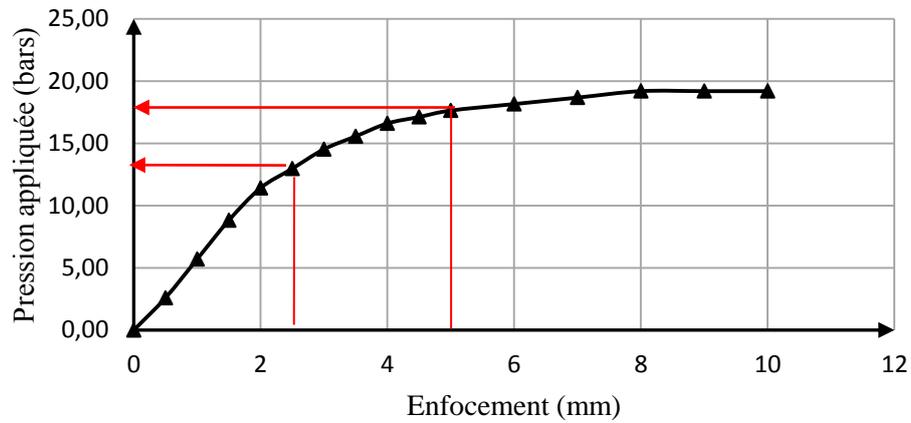
CBR imbibé à 4 jours à 10% (85% GGBFS+ 15% Cao)



P (2,5 mm) = 7,27 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 10,38
P (5 mm) = 10,9 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 10,38
CBR= 10,38	

Figure 3.36 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 10% (85% GGBFS+ 15% Cao)

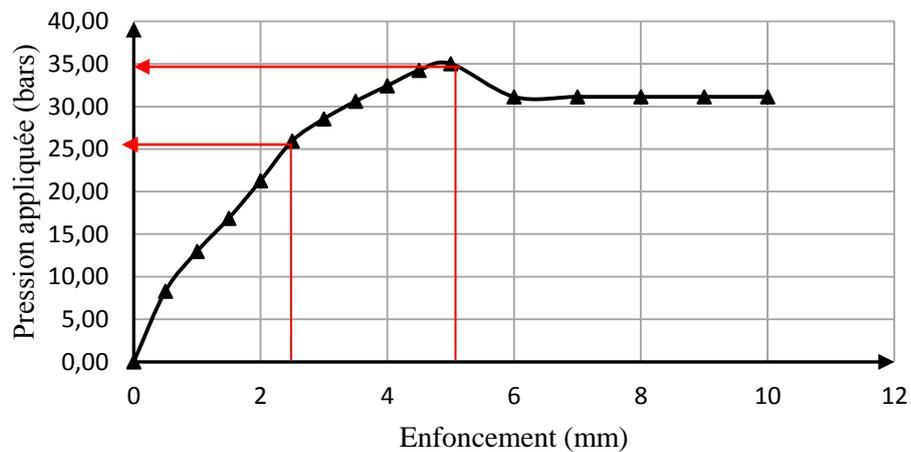
CBR imbibé à 4 jours à 15% (85% GGBFS+ 15% Cao)



P (2,5 mm) = 12,98 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 18,54
P (5 mm) = 17,65 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 16,80
CBR= 18,54	

Figure 3.37 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 15% (85% GGBFS+ 15% Cao)

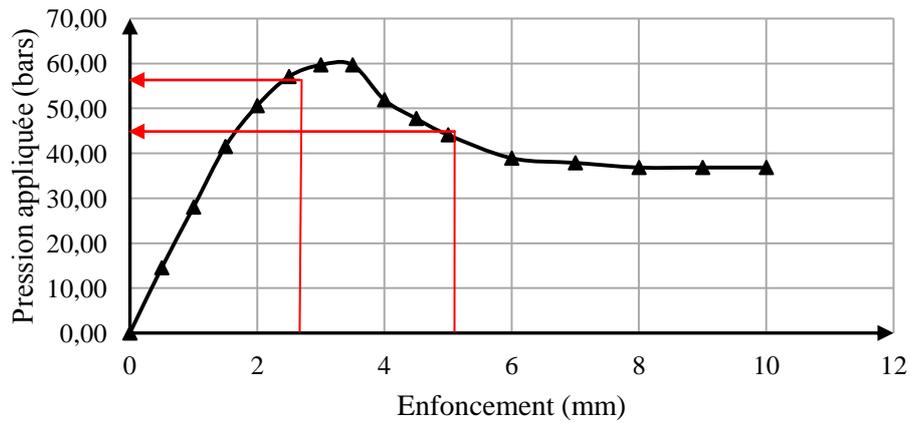
CBR imbibé à 4 jours à 20% (85% GGBFS+ 15% Cao)



P (2,5 mm) = 25,95 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 37,07
P (5 mm) = 35,03 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 33,36
CBR = 37,07	

Figure 3.38 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 20% (85% GGBFS+ 15% Cao)

CBR imbibé à 4 jours à 25% (85% GGBFS+ 15% Cao)

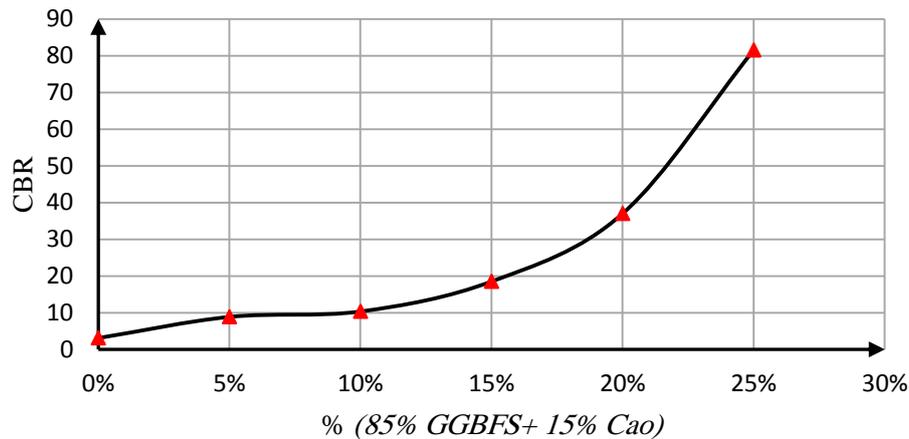


P (2,5 mm) = 57,09 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 81,55
P (5 mm) = 47,75 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 45,19
CBR= 81,55	

Figure 3.39 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 25% (85% GGBFS+ 15% Cao)

Une courbe a été tracée afin de voir au mieux l'évolution et l'influence du pourcentage du laitier activé (85% GGBFS+ 15% Cao) sur la valeur du CBR comme le montre la figure 3.40. Elle montre que l'accroissement de la quantité d'ajout de liant hydraulique engendre un accroissement de la valeur du CBR. Cette valeur du CBR varie de 3.14 pour 0% d'ajout à 81,55 pour 25% (85% GGBFS+ 15% Cao).

Récapitulation CBR imbibé à 4 jours

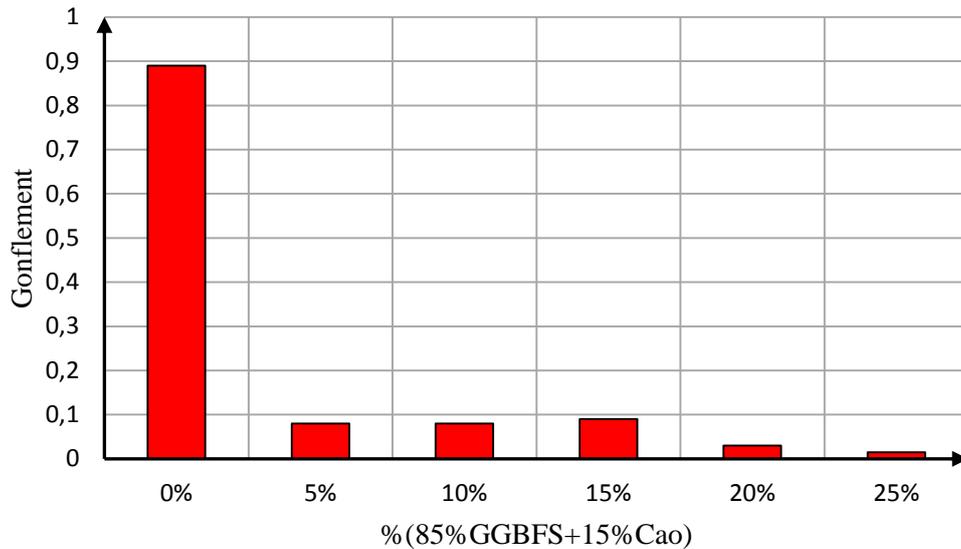


Proportions	CBR _{2,5 mm}	CBR _{5 mm}	CBR
0%	3,14	2,95	3,14
5%	8,9	8,4	8,9
10%	10,38	10,38	10,38
15%	18,54	16,8	18,54
20%	37,07	33,36	37,03
25%	81,55	45,19	81,55

Figure 3.40 Récapitulatif des valeurs CBR imbibé à 4 jours

Les résultats des essais de gonflement obtenus sont présentés sur la figure 3.41 qui indique que l'augmentation du pourcentage du laitier activé à la chaux sur les éprouvettes de sol imbibées à quatre jours résulte en une diminution du gonflement linéaire absolu du sol stabilisé. Ce gonflement linéaire absolu varie de 0,89 millimètres pour le sol non traité à 0,08 millimètres pour 5% (85% GGBFS+ 15% Cao), à 0,08 millimètres pour 10% (85% GGBFS+ 15% Cao), à 0,09 millimètres pour 15% (85% GGBFS+ 15% Cao), à 0,03 millimètres pour 20% (85% GGBFS+ 15% Cao) et 0,015 millimètres pour 25% (85% GGBFS+ 15% Cao). Cette diminution est le résultat des réactions physico-chimique entre le laitier et les différents minéraux argileux dans le sol fin étudié à savoir la réaction d'évaporation et de modification qui s'en suivent.

Gonflement à 4 jours



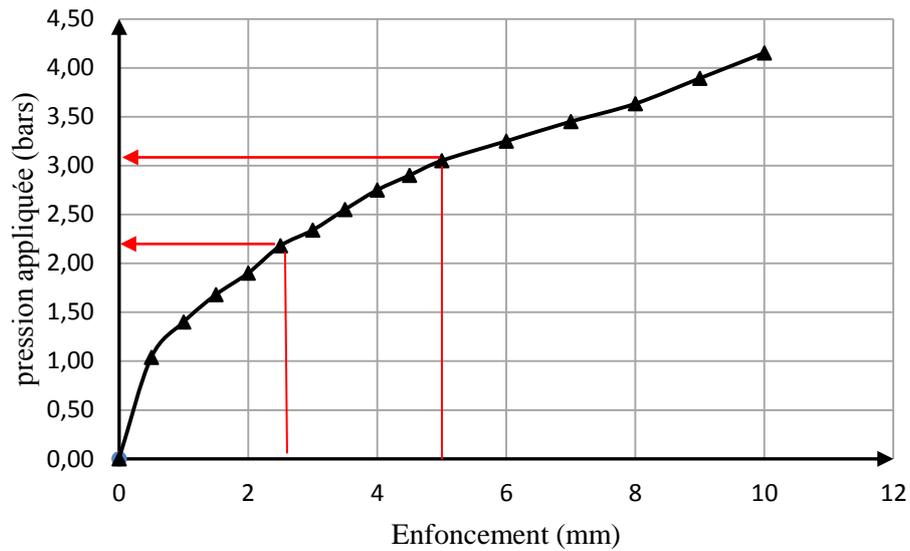
Proportions	Divisions	Gonflement à 4 jours (mm)
0%	89	0,89
5%	8	0,08
10%	8	0,08
15%	9	0,09
20%	3	0,03
25%	1,5	0,015

Figure 3.41 Variation du gonflement linéaire absolu à 4 jours d'immersion dans l'eau

3.7. CBR DU SOL TRAITÉ AU LAITIER ACTIVE AU CIMENT IMBIBATION A QUATRE JOURS

La section 3.7 donne l'analyse des essais imbibés pendant 4 jours. Les figures 3.42 à 3.47 présentent les résultats du comportement mécanique. Les valeurs de gonflement des éprouvettes de sol sont quand a eux données par la figure 3.49. Ces deux séries d'essais ont été effectués pour les proportions d'ajout de 5%, 10%, 15%, 20%, et 25% (85% GGBFS+15% CPJ), c'est-à-dire de laitier activé. D'après ces graphes tracés un CBR de 3.14 a été obtenu pour le sol non traité, un CBR de 8,9 pour 5% (85% GGBFS+15% CPJ), un CBR de 10,87 pour 10% (85% GGBFS+15% CPJ), un CBR de 11,86 pour 15% (85% GGBFS+15% CPJ), un CBR de 11,85 pour 20% (85% GGBFS+15% CPJ) et un CBR de 13,34 pour 25% (85% GGBFS+15% CPJ).

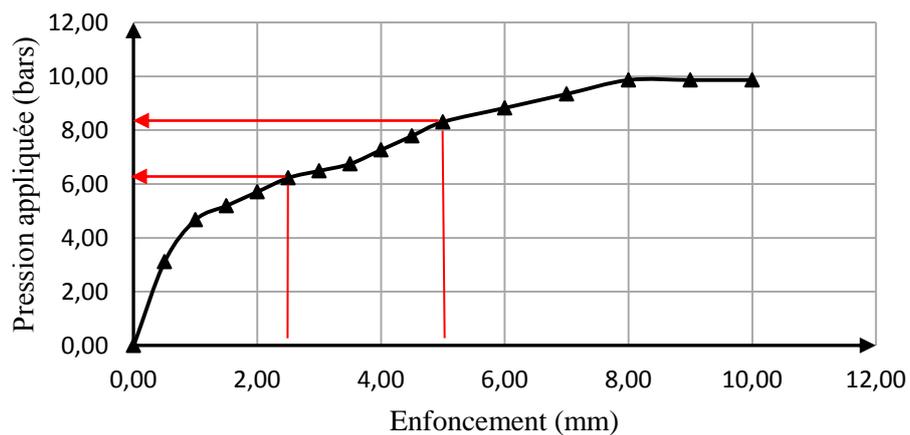
CBR imbibé à 4 jours pour le sol non traiter



P (2,5 mm) = 2,20 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5mm)/0,70 = 3,14
P (5 mm) = 3,10 bars	CBR (5 mm) = P (5mm) / 1,05 = 2,95
CBR = 3,14	

Figure 3.42 Valeur CBR imbibé à 4 jours pour sol non traité

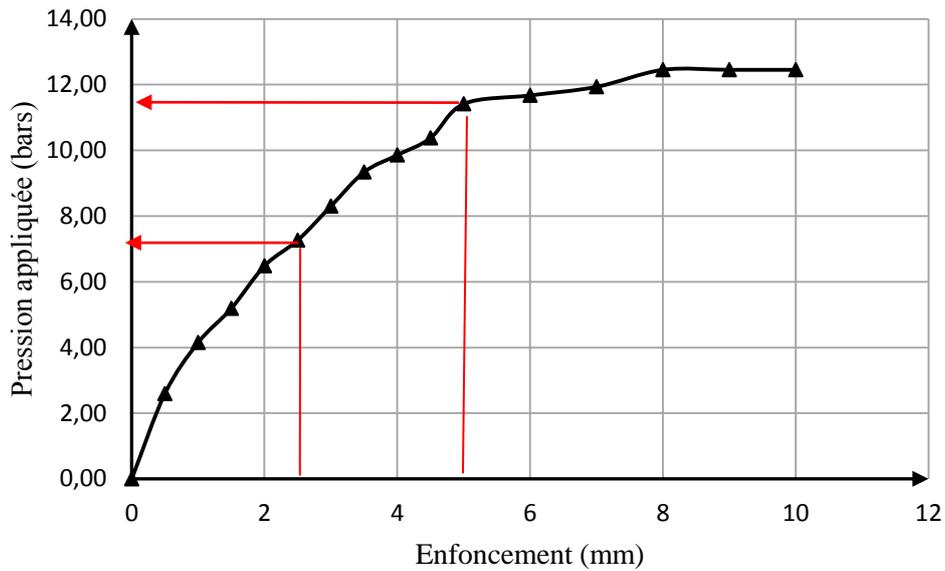
CBR imbibé à 4 jours à 5% (85% GGBFS+ 15% CPJ)



P (2,5 mm) = 6,23 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 8,9
P (5 mm) = 8,30 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) / 1,05 = 7,90
CBR = 8,9	

Figure 3.43 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 5% (laitier + ciment)

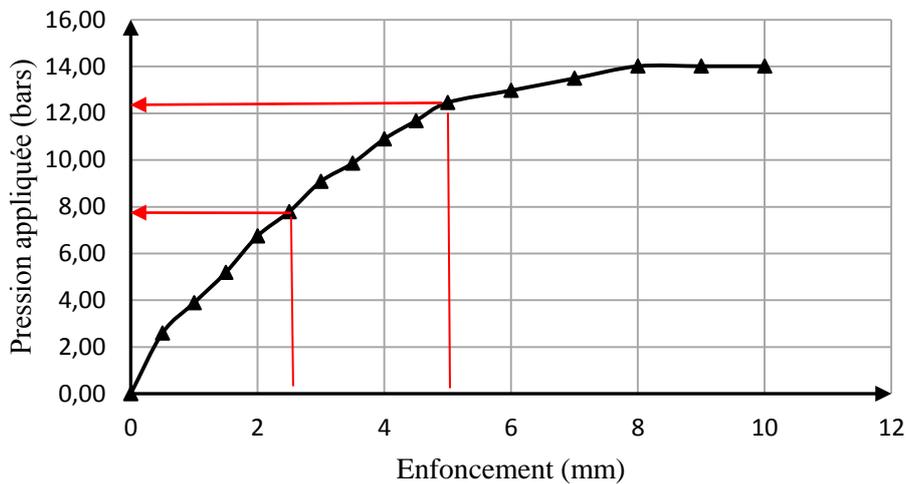
CBR imbibé à 4 jours à 10% (85% GGBFS+ 15% CPJ)



P (2,5 mm) = 7,27 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 10,38
P (5 mm) = 11,42 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 10,87
CBR= 10,87	

Figure 3.44 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 10% (laitier + ciment)

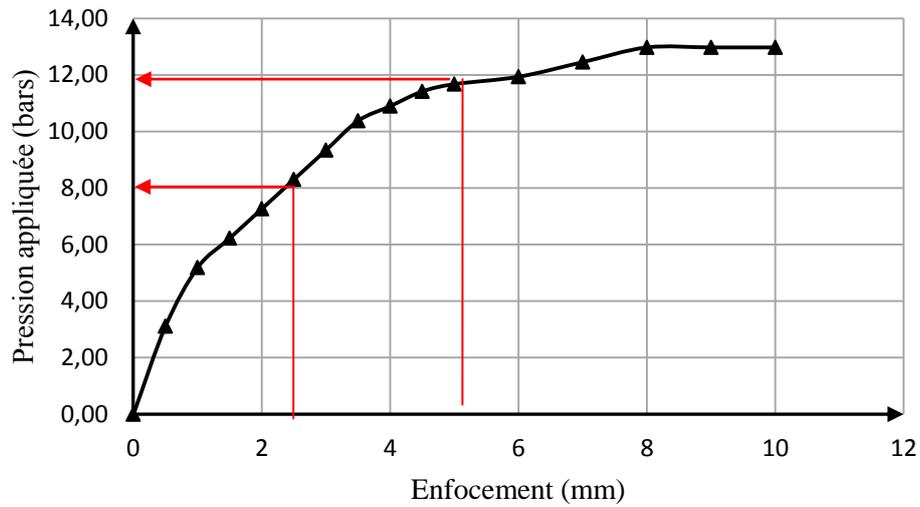
CBR imbibé à 4 jours à 15% (85% GGBFS+15%CPJ)



P (2,5 mm) = 7,79 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 11,12
P (5 mm) = 12,46 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 11,86
CBR= 11,86	

Figure 3.45 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 15% (laitier + ciment)

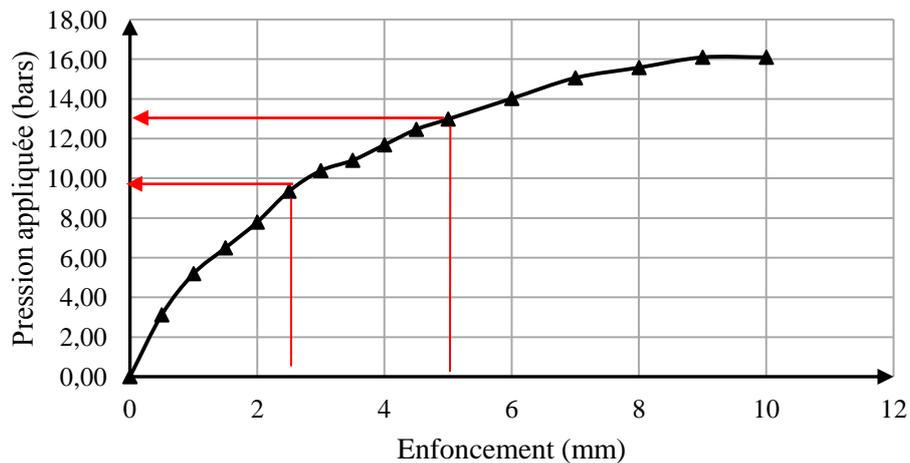
CBR imbibé à 4 jours à 20% (85% GGBFS+15% CPJ)



P (2,5 mm) = 8,3 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 11,85
P (5 mm) = 11,68 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 11,12
CBR = 11,85	

Figure 3.46 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 20% (laitier + ciment)

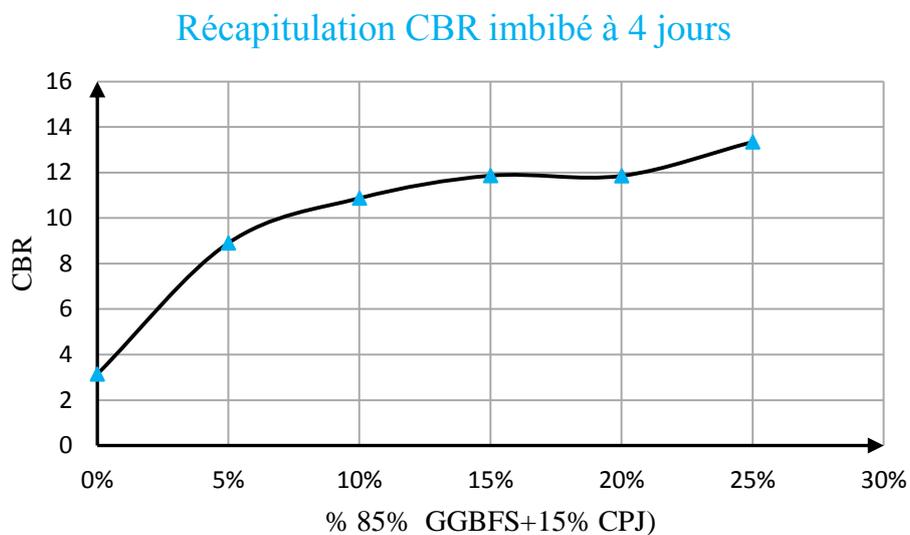
CBR imbibé à 4 jours à 25% (85% GGBFS+15% CPJ)



P (2,5 mm) = 9,34 bars	CBR (2,5 mm) = P (2,5 mm)/0,70 = 13,34
P (5 mm) = 12,98 bars	CBR (5 mm) = P (5 mm) /1,05 = 12,36
CBR= 13,34	

Figure 3.47 Valeur CBR imbibé à 4 jours à 25% (laitier + ciment)

L'évolution et l'influence du pourcentage du (85% GGBFS+15% CPJ) sur la valeur du CBR est donnée sur la figure 3.48. Elle montre que l'accroissement de la quantité d'ajout de liant hydraulique qui n'est autre que le laitier activé engendre un accroissement de la valeur du CBR. Cette valeur du CBR varie de 3.14 pour 0% d'ajout à 13,34 pour 25% GGBFS. Cette augmentation du CBR est probablement due à la réaction immédiate entre le laitier activé et les minéraux argileux qui entraîne la formation des particules de sol plus grossier, et par conséquent une translation de la courbe granulométrique vers le coté droit du graph semi logarithmique.



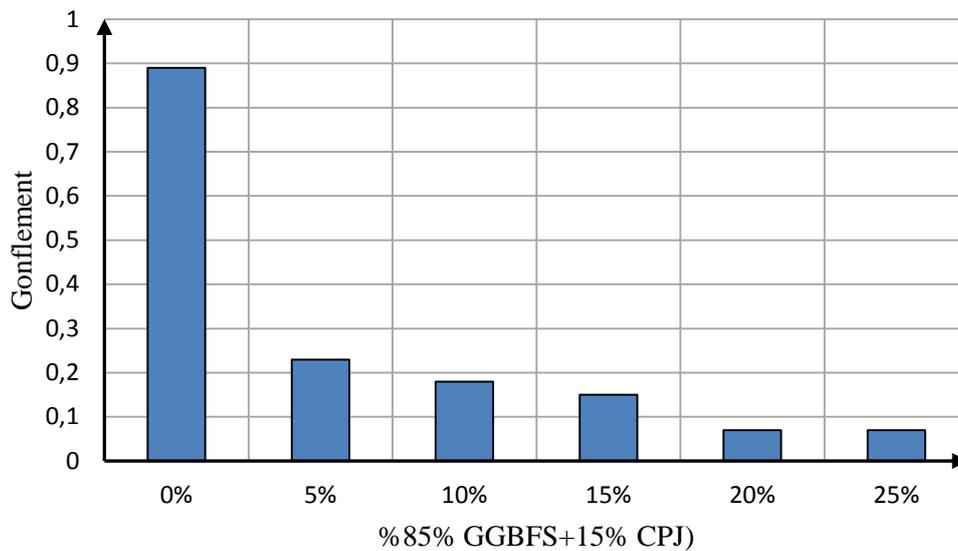
Proportions	CBR _{2,5 mm}	CBR _{5 mm}	CBR
0%	3,14	2,95	3,14
5%	8,9	7,9	8,9
10%	10,38	10,87	10,87
15%	11,12	11,86	11,86
20%	11,85	11,12	11,85
25%	13,34	12,36	13,34

Figure 3.48 Récapitulatif des valeurs CBR imbibé à 4 jours

Le gonflement dans les sols problématiques cause des dégâts importants dans les infrastructures routières c'est donc une caractéristique importante à contrôler. La mesure du gonflement linéaire absolu des éprouvettes de sol non traitées et traitées au laitier à différentes proportions de laitier est donc absolument nécessaire. Les résultats obtenus sont donnés sur la figure 3.49. Elle indique que l'accroissement de la proportion du laitier activé résulte en une diminution du gonflement linéaire absolu du sol stabilisé. Ce gonflement linéaire absolu varie

de 0.89 millimètres pour 0% de laitier à 0,23 millimètres pour 5% d'ajout, à 0,18 millimètres pour 10% (85% GGBFS+15% CPJ), à 0,15 millimètres pour 15% (85% GGBFS+15% CPJ), à 0,07 millimètres pour 20% (85% GGBFS+15% CPJ) et 0.07 millimètres pour 25% (85% GGBFS+15% CPJ). Cette diminution est le résultat des réactions physico-chimique entre le laitier et les différents minéraux argileux dans le sol fin étudié à savoir la réaction d'évaporation et de modification qui s'en suivent. Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux de ADAMA et col en 2017.

Gonflement à 4 jours



Proportions	Divisions	Gonflement à 4 jours (mm)
0%	89	0,89
5%	23	0,23
10%	18	0,18
15%	15	0,15
20%	7	0,07
25%	7	0,07

Figure 3.49 Variation du gonflement linéaire absolu à 4 jours d'immersion dans l'eau

La comparaison des essais imbibés à 4 jours pour la stabilisation du sol aux laitiers activés (85% GGBFS+15% Cao) et (85% GGBFS+15% CPJ) est donnée sur la figure 3.50. Cette dernière indique que les valeurs CBR imbibés à 4 jours sont pratiquement les mêmes entre 0% et 10%. Au-delà de dix pourcent, les CBR des éprouvettes de sol améliorées au laitier activé à la chaux deviennent plus importants que celles stabilisées au laitier activé au

ciment. Cette différence croit avec l'augmentation de la proportion d'ajout. A 25% d'ajout un CBR de 81,55 et 13,34 sont obtenus successivement pour les liants hydrauliques (85% GGBFS+15% Cao) et (85% GGBFS+15% CPJ).

Comparaison CBR imbibé à 4 jours

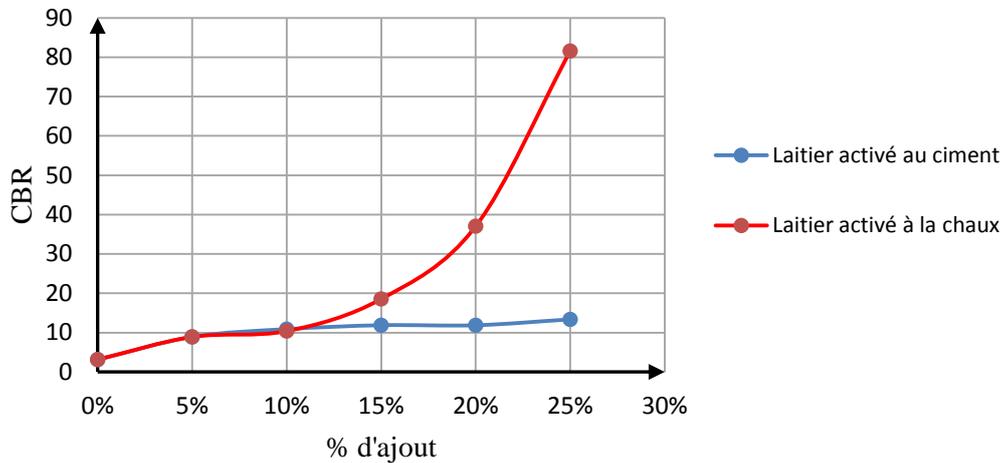


Figure 3.50 Comparaison des valeurs CBR immédiat et imbibé à 4 jours

comparaison des valeurs de Gonflement à 4 jours

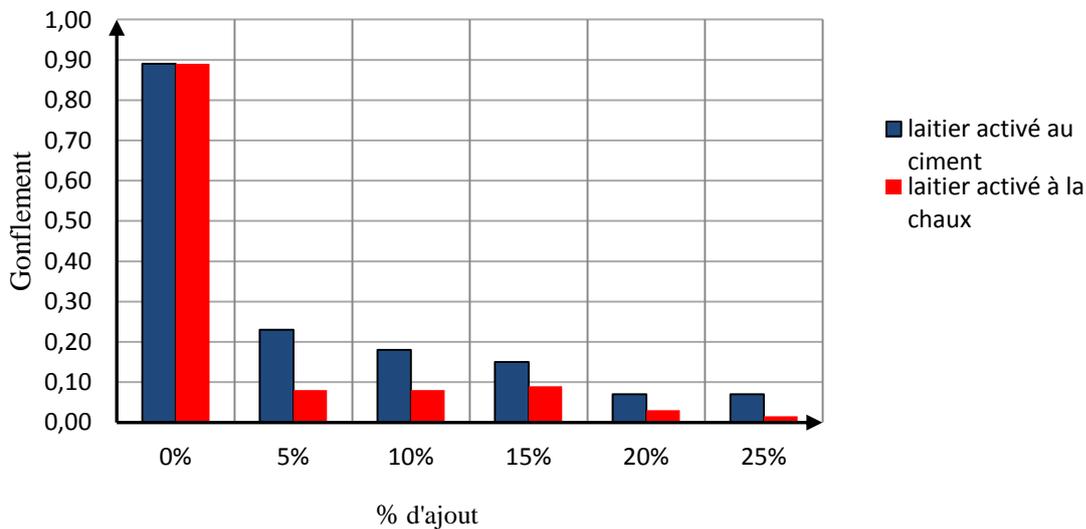


Figure 3.51 Comparaison des valeurs de gonflement à 4 jours d'immersion pour laitier activé à la chaux (85% GGBFS+ 15% Cao) et laitier activé au ciment (85% GGBFS+ 15% CPJ)

Comme il a été mentionné auparavant, le gonflement des sols est un phénomène très dangereux pour les structures géotechniques réalisées en sol. C'est pour ça il a été procédé à la mesure du gonflement lors des essais CBR imbibés a quatre jours et analyser les résultats obtenus pour les liants au laitier activé a la chaux (85% *GGBFS*+ 15% *CaO*) et au ciment portland (85% *GGBFS*+ 15% *CPJ*). Ces résultats sont présentés sur la figure 3.51. Cette dernière montre que l'augmentation de la proportion de liant hydraulique en gendre une diminution la magnitude du gonflement du sol stabilisé. Plus encore, l'activation de laitier à la chaux hydraulique réduit au mieux le gonflement du sol et ce ci pour toutes les pourcentages utilisés



Conclusion



CONCLUSION GENERALE

Le présent mémoire porte sur le comportement mécanique d'une argile gonflante préparée en laboratoire par le mélange de 85% de kaolin et 15% de bentonite stabilisée avec le laitier granulé broyé de haut fourneau produit localement pour son éventuel utilisation dans les constructions linéaires de génie civil telles que les routes, autoroutes et les pistes d'aérodromes. L'essai effectué dans ce mémoire étant l'essai de poinçonnement California désigné sous l'appellation le CBR. Deux types de liants hydrauliques ont fait l'objet d'étude dans ce mémoire à savoir le laitier granulé activé à la chaux et le laitier granulé activé au ciment portland. Cette étude a permis de clarifier laquelle des deux méthodes de stabilisation est plus apte de point de vue comportement mécanique uniquement.

L'Algérie est un gros producteur de fer et acier. Avec ces grandes usines sidérurgiques d'El Hadjar, de Ballara et Birtouta, de grandes quantités de laitier sont produites et mises en dépôt à l'air libre sous forme de déchets industriels portant ainsi atteinte à l'environnement et au cadre de vie des citoyens. Afin de remédier à ce problème environnemental et il est utile d'utiliser ce déchet à bas prix dans la construction des ouvrages linéaires en géotechniques. L'idée est alors venue de stabiliser les sols à problème qui sont largement rependus dans les zones arides et semi-arides du pays. Pour cela un sol artificiel a été constitué au niveau du Laboratoire de Matériaux, Géotechnique et Environnement (LMGE) de l'université Badji Mokhtar-Annaba. Ce sol est une argile gonflante problématique. Les essais de poinçonnement sur ce sol ont été conduits en utilisant l'essai California Bearing Ratio comme mentionné ci-dessus. Sur la base des résultats obtenus lors de cette étude, les conclusions suivantes ont pu être tirées :

1. Le poinçonnement immédiat du sol fin au laitier activé à la chaux hydraulique l'augmente le CBR immédiat pour tous les pourcentages d'ajouts hydrauliques utilisés.
2. L'activation du laitier au ciment portland améliore aussi les valeurs CBR immédiat pour les mêmes quantités d'additifs utilisées.

3. La comparaison des deux méthodes d'activation a mis en évidence que l'ajout à plus de 10% du laitier granulé activé à la chaux engendre un CBR immédiat plus important que lorsque le sol est stabilisé au laitier activé au ciment.
4. La conduite des essais CBR imbibé à 2 et 4 jours ont montré un accroissement de cette caractéristique lorsque la proportion des deux types d'ajout utilisés dans le programme de recherche.
5. Les valeurs CBR imbibé à 2 et 4 jours pour l'argile gonflante stabilisée au laitier activé à la chaux sont beaucoup plus supérieures a celles de la même argile stabilisé au laitier activé au ciment portland.
6. L'impacte du laitier granulé activé à la chaux sur le gonflement des éprouvettes imbibées à 2 et 4 jours est apparait être très évident que lorsque l'argile est améliorée au laitier activé au ciment.

Le laitier granulé activé à la chaux s'avère alors un additive intéressant recommandé pour l'amélioration de l'indice CBR d'un sol fin problématique gonflant. L'activation du laitier granulé à la chaux hydraulique accélère les réactions physico-chimiques d'évaporation et de modification dans le sol traité et par conséquent une meilleure stabilité du sol est obtenue.

Pour les futurs travaux, les auteurs recommandent de procéder aux essais du DRX et du MEB afin de mieux comprendre tout changement dans la composition chimique et minéralogique qui puisse être engendré dans la matrice du sol stabilisé.



Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARTICLES / PUBLICATION / THESES

1. ASTM D 1883 test 16 of British Standard (BS) 1377 :1975
2. A. Saouane - Cours de géotechnique routière (Sources : G. Sanglerat-Internet-Notes personnelles)
3. BISKRI et col, Comportement physico-mécanique et durabilité des bétons à hautes performances à base de deux filler « Influence de la nature des granulats »Thèse de doctorat (2017), UBMA
4. CHEKEMBOU Tahaebdelkaoui, Influence du laitier activé à la chaux sur les caractéristiques de la plasticité du (kaolin + bentonite) ; Mémoire master (2015) UBMA.
5. Choquette, M, Bérubé, M.-A. and Locat, J. 1987. Mineralogical and Microtextural Changes Associated with Lime Stabilization of Marine Clays form Eastern Canada. Applied Clay Science, Vol. 2, pp. 2 15-232
6. Dayalan JInternational Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), comparative study on stabilization of soil with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and fly Ash (2016)
7. Dianiond, S.- White. J.L. and Dolch, W.L. 1964. Transformation of clay minerals by calcium hydroxyde-. attack. Proc. of the 12th National Conference on Clays and Clay Minerals. Atlanta. Ga. pp. 359-379.
8. Diamond. W. And Kinter. B. 1965. Mechanisms of Soil-Lime Stabilisation. Highway Research Record No. 92.TRB. Washington D.C.. pp. 83-102
9. Double, D.D. and Hellowell, A. 1977. What happens when water is added to cement'?. *Sci. Am.* Vol. 237. pp. 82-90
10. Haq et col en 2010, Behavior of lime-slag-treated clay. *Groundimprovement*, 161 Issue G14. Pp. 207-216.
11. Hélène Tremblay, amélioration mécanique prédiction de la compressibilité des sols fins du Québec Thèse de (ph.D)
12. KONATE Adama et SYLLA Ahmadou, Stabilisation d'une argile gonflante par ajout de laitier granulé, Mémoire master (2017), UBMA

13. Kumar A., Pandey V., Murari K., Sing J.P., 2014. Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag. *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol.4 (5) (Version 2), pp.164-171
14. Pollard. S.J.T., Montgomery, D.M., Sollars, C.J. and Perry, R 1991. Organic compounds in cement-based stabilisation of hazardous mixed wastes - Mechanistic and process considerations. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 28, No. 3, pp. 3 13-327
15. REZAIGUIA Rami Abdeldjalil, Influence du laitier sur les caractéristiques de la compression simple, Mémoire master (2016), UBMA
16. Salvati L., Vichit-Vadakan W., 2004. Investigation of factors affecting the improvement of clay with ground blast furnace slag-US *Department of Transportation SPR-2953*
17. SIDIBE Souleymane et al comportement d'une argile problématique dans un essai CBR, Mémoire master (2018), UBMA
18. Tahar ALI-BOUCETTA Classification et historique des liants minéraux çatal Hoyük est un site archéologique en Turquie classé patrimoine mondial en 2012
19. V.Lelong Le traitement des sols à la chaux, éléments fondamentaux Journée Technique CFMS Valorisation des Sols Fins 3 Décembre 2008 Paris
20. ZEMOULI et col, Utilisation du laitier granulé broyé des hauts fourneaux dans la stabilisation des sols, *Rev. Sci. Technol.*, Synthèse 36 : 103-114 (2018), UBMA



ANNEXE

Annexes :**CBR immédiat activé à la chaux:**Essai du sol non traité :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10226,60
Masse du sol humide compacté	(g)	4258,00
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1820,73
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1379,34

Tableau 4.1 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat pour le sol non traité

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (KN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0	0,00
24,93	0,5	0,5	2,60
22,8	1	0,75	3,89
24,93	1,5	1	5,19
22,32	2	1,2	6,23
24,31	2,5	1,5	7,79
22,21	3	1,6	8,30
25,01	3,5	1,7	8,82
22,18	4	1,8	9,34
24,47	4,5	1,9	9,86
23,16	5	2	10,38
47,3	6	2,2	11,42
47,3	7	2,3	11,94
47,4	8	2,4	12,46
46,89	9	2,5	12,98
46,97	10	2,6	13,49

Tableau 4.2 Lectures lors de l'essai CBR immédiat pour le sol non traité

Essai à 5% d'ajout(85%GGBFS+15%CaO) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10202,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4233,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1810,22
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1362,19

Tableau 4.3 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 5%(85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (bars)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0,00	0,00	0,00
23,56	0,50	0,80	4,15
23,56	1,00	1,20	6,23
22,81	1,50	1,40	7,27
24,34	2,00	1,60	8,30
22,94	2,50	1,80	9,34
25,1	3,00	1,90	9,86
22,25	3,50	2,00	10,38
24,61	4,00	2,10	10,90
22,78	4,50	2,20	11,42
22,78	5,00	2,30	11,94
47,08	6,00	2,40	12,46
47,42	7,00	2,50	12,98
47,23	8,00	2,60	13,49
47,09	9,00	2,60	13,49
47,38	10,00	2,60	13,49

Tableau 4.4 Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 5%(85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 10% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du moule à vide	(g)	4779,00
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,50
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10317,90
Masse du sol humide compacté	(g)	4265,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1823,90
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1394,73

Tableau 4.5 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 10%(85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (KN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
23,35	0,5	0,50	2,60
22,19	1	1,00	5,19
24,6	1,5	1,40	7,27
22,8	2	1,70	8,82
27,33	2,5	2,00	10,38
19,48	3	2,20	11,42
25,24	3,5	2,40	12,46
22,5	4	2,50	12,98
24,7	4,5	2,60	13,49
22,58	5	2,70	14,01
47,2	6	2,90	15,05
47,08	7	3,10	16,09
46,99	8	3,20	16,61
47,5	9	3,30	17,13
47,92	10	3,40	17,65

Tableau 4.6 Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 10%(85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 15% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi * D^2)/4] * H$	(cm ³)	2338,68
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10319,80
Masse du sol humide compacté	(g)	4351,20
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1860,59
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1431,77

Tableau 4.7 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 15%(85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (KN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	1,25	6,49
22,37	1	2,00	10,38
25,51	1,5	2,50	12,98
21,86	2	3,00	15,57
24,86	2,5	3,40	17,65
22,73	3	3,80	19,72
24,41	3,5	4,00	20,76
22,79	4	4,20	21,80
25,18	4,5	4,40	22,84
22,23	5	4,50	23,36
46,88	6	4,80	24,91
47,28	7	5,10	26,47
47,24	8	5,30	27,51
47,13	9	5,50	28,55
47,03	10	5,50	28,55

Tableau 4.8 Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 15%(85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 20% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO):

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du moule à vide	(g)	4779,00
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,50
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10332,50
Masse du sol humide compacté	(g)	4280,00
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1830,14
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1883,32

Tableau 4.9 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 20%(85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (KN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
25,11	0,5	0,90	4,67
24,19	1	1,90	9,86
25,24	1,5	2,70	14,01
22,11	2	3,50	18,17
24,91	2,5	4,00	20,76
22,06	3	4,50	23,36
25,3	3,5	5,00	25,95
22,35	4	5,25	27,25
25,1	4,5	5,60	29,06
22,51	5	5,90	30,62
47	6	6,25	32,44
47,4	7	6,75	35,03
47,2	8	7,00	36,33
43,9	9	7,10	36,85
46,97	10	7,20	37,37

Tableau 4.10 Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 20%(85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 25% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du moule à vide	(g)	4779,40
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,90
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10326,70
Masse du sol humide compacté	(g)	4273,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1827,40
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1411,30

Tableau 4.11 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat à 25%(85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
23,35	0,5	2,25	11,68
22,19	1	3,90	20,24
24,6	1,5	4,90	25,43
22,8	2	5,60	29,06
27,33	2,5	6,25	32,44
19,48	3	7,00	36,33
25,24	3,5	7,50	38,93
22,5	4	7,90	41,00
24,7	4,5	8,00	41,52
22,58	5	8,10	42,04
47,2	6	8,25	42,82
47,08	7	8,40	43,60
46,99	8	8,50	44,12
47,5	9	8,60	44,63
47,92	10	8,60	44,63

Tableau 4.12 Lectures lors de l'essai CBR immédiat à 25%(85%GGBFS+15%CaO)

CBR immédiat activé au ciment :

Essai du sol non traité :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi * D^2)/4] * H$	(cm ³)	2338,61
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10226,60
Masse du sol humide compacté	(g)	4258,00
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1820,73
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1379,34

Tableau 4.13 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat pour le sol non traité

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (KN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0	0,00
24,93	0,5	0,5	2,60
22,8	1	0,75	3,89
24,93	1,5	1	5,19
22,32	2	1,2	6,23
24,31	2,5	1,5	7,79
22,21	3	1,6	8,30
25,01	3,5	1,7	8,82
22,18	4	1,8	9,34
24,47	4,5	1,9	9,86
23,16	5	2	10,38
47,3	6	2,2	11,42
47,3	7	2,3	11,94
47,4	8	2,4	12,46
46,89	9	2,5	12,98
46,97	10	2,6	13,49

Tableau 4.14 Lectures lors de l'essai CBR immédiat pour le sol non traité

Essai à 5% d'ajout (85%GGBFS +15%CPJ) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10231,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4265,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1823,90
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1365,91

Tableau 4.15 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 5% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (KN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0,00	0,00	0,00
23,56	0,50	0,60	3,11
23,56	1,00	0,90	4,67
22,81	1,50	1,25	6,49
24,34	2,00	1,50	7,79
22,94	2,50	1,70	8,82
25,1	3,00	1,90	9,86
22,25	3,50	2,10	10,90
24,61	4,00	2,20	11,42
22,78	4,50	2,30	11,94
22,78	5,00	2,40	12,46
47,08	6,00	2,50	12,98
47,42	7,00	2,60	13,49
47,23	8,00	2,60	13,49
47,09	9,00	2,60	13,49
47,38	10,00	2,60	13,49

Tableau 4.16 Lectures lors de l'essai CBR immédiat 5% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 10% d'ajout (85%GGBFS +15%CPJ) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du moule à vide	(g)	4776,20
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6049,70
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10311,90
Masse du sol humide compacté	(g)	4262,20
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1822,53
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1391,98

Tableau 4.17 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 10% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (KN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
23,35	0,5	0,50	2,60
22,19	1	1,00	5,19
24,6	1,5	1,30	6,75
22,8	2	1,60	8,30
27,33	2,5	1,90	9,86
19,48	3	2,10	10,90
25,24	3,5	2,40	12,46
22,5	4	2,60	13,49
24,7	4,5	2,90	15,05
22,58	5	3,00	15,57
47,2	6	3,20	16,61
47,08	7	3,30	17,13
46,99	8	3,40	17,65
47,5	9	3,40	17,65
47,92	10	3,40	17,65

Tableau 4.18 Lectures lors de l'essai CBR immédiat 10% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 15% d'ajout (85%GGBFS +15%CPJ) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10310,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4341,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1856,40
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1424,71

Tableau 4.19 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 15% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (bars)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,75	3,89
22,37	1	1,25	6,49
25,51	1,5	1,80	9,34
21,86	2	2,10	10,90
24,86	2,5	2,50	12,98
22,73	3	2,75	14,27
24,41	3,5	2,90	15,05
22,79	4	3,00	15,57
25,18	4,5	3,10	16,09
22,23	5	3,20	16,61
46,88	6	3,30	17,13
47,28	7	3,40	17,65
47,24	8	3,60	18,68
47,13	9	3,80	19,72
47,03	10	3,90	20,24

Tableau 4.20 Lectures lors de l'essai CBR immédiat 15% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 20% d'ajout (85%GGBFS +15%CPJ) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	233861,00
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10227,90
Masse du sol humide compacté	(g)	4262,80
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1822,79
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1379,64

Tableau 4.21 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 20% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (KN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
25,11	0,5	0,60	3,11
24,19	1	1,10	5,71
25,24	1,5	1,75	9,08
22,11	2	2,25	11,68
24,91	2,5	2,75	14,27
22,06	3	3,25	16,87
25,3	3,5	3,60	18,68
22,35	4	4,10	21,28
25,1	4,5	4,40	22,84
22,51	5	4,60	23,87
47	6	4,80	24,91
47,4	7	4,90	25,43
47,2	8	4,90	25,43
43,9	9	4,90	25,43
46,97	10	4,90	25,43

Tableau 4.22 Lectures lors de l'essai CBR immédiat 20% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 25% d'ajout (85%GGBFS +15%CPJ) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	233861,00
Masse du moule à vide	(g)	4779,00
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,50
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10389,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4336,50
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1854,30
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1421,14

Tableau 4.23 Mesure de la densité sèche du CBR immédiat 25% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression $P=5,19 \cdot F$ (bars)
0	0	0,00	0,00
23,35	0,5	0,80	4,15
22,19	1	1,40	7,27
24,6	1,5	1,90	9,86
22,8	2	2,50	12,98
27,33	2,5	3,25	16,87
19,48	3	3,70	19,20
25,24	3,5	4,20	21,80
22,5	4	4,50	23,36
24,7	4,5	4,80	24,91
22,58	5	5,00	25,95
47,2	6	5,20	26,99
47,08	7	5,40	28,03
46,99	8	5,50	28,55
47,5	9	5,60	29,06
47,92	10	5,60	29,06

Tableau 4.24 Lectures lors de l'essai CBR immédiat 25% (85%GGBFS+15%CPJ)

CBR imbibé à deux jours du laitier activé à la chaux :

Essai pour le sol non traiter):

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	991,90
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4547,70
Masse du moule à vide	(g)	4775,90
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6049,40
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10298,60
Masse du sol humide compacté	(g)	4249,20
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1816,97
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1374,31

Tableau 4.25 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours pour le sol non traité

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,20	1,04
22,37	1	0,40	2,08
25,51	1,5	0,60	3,11
21,86	2	0,70	3,63
24,86	2,5	0,80	4,15
22,73	3	0,90	4,67
24,41	3,5	1,00	5,19
22,79	4	1,10	5,71
25,18	4,5	1,20	6,23
22,23	5	1,25	6,49
46,88	6	1,30	6,75
47,28	7	1,30	6,75
47,24	8	1,30	6,75
47,13	9	1,30	6,75
47,03	10	1,30	6,75

Tableau 4.26 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours pour le sol non traité

Essai à 5% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur du disque d'espacement	(mm)	25,00
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau 01	(g)	991,90
Masse totale des anneaux fondus 01	(g)	4547,70
Masse du moule à vide (01)	(g)	4775,90
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6049,40
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10310,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4260,60
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1821,85
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1367,75

Tableau 4.27 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 5% (85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0,00	0,00	0,00
25,11	0,50	0,50	2,60
24,19	1,00	0,80	4,15
25,24	1,50	1,10	5,71
22,11	2,00	1,30	6,75
24,91	2,50	1,50	7,79
22,06	3,00	1,60	8,30
25,3	3,50	1,70	8,82
22,35	4,00	1,80	9,34
25,1	4,50	1,90	9,86
22,51	5,00	2,00	10,38
47	6,00	2,10	10,90
47,4	7,00	2,25	11,68
47,2	8,00	2,25	11,68
43,9	9,00	2,25	11,68
46,97	10,00	2,25	11,68

Tableau 4.28 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 5% (85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 10% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO):

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur du disque d'espacement	(mm)	25,00
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	887,50
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4544,70
Masse du moule à vide	(g)	7341,20
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	8614,70
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	12870,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4255,30
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1819,58
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1385,71

Tableau 4.29 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 10%(85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression $P=5,19 \cdot F$ (bars)
0	0	0	0,00
25,11	0,5	0,6	3,11
24,19	1	0,9	4,67
25,24	1,5	1,2	6,23
22,11	2	1,4	7,27
24,91	2,5	1,6	8,30
22,06	3	1,8	9,34
25,3	3,5	2	10,38
22,35	4	2,2	11,42
25,1	4,5	2,4	12,46
22,51	5	2,5	12,98
47	6	2,6	13,49
47,4	7	2,7	14,01
47,2	8	2,8	14,53
43,9	9	2,9	15,05
46,97	10	2,9	15,05

Tableau 4.30 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 10%(85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 15% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO):

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau 01	(g)	991,90
Masse totale des anneaux fondus 01	(g)	4547,70
Masse du moule à vide (01)	(g)	4775,90
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6049,40
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10351,80
Masse du sol humide compacté	(g)	4282,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1831,17
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1406,75

Tableau 4.31 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 15% (85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	1,00	5,19
22,37	1	1,75	9,08
25,51	1,5	2,25	11,68
21,86	2	2,75	14,27
24,86	2,5	3,00	15,57
22,73	3	3,40	17,65
24,41	3,5	3,80	19,72
22,79	4	4,00	20,76
25,18	4,5	4,00	20,76
22,23	5	4,00	20,76
46,88	6	4,00	20,76
47,28	7	4,10	21,28
47,24	8	4,20	21,80
47,13	9	4,20	21,80
47,03	10	4,20	21,80

Tableau 4.32 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 15% (85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 20% laitier d'ajout (85%GGBFS+15%CaO) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	891,20
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4550,30
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10212,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4243,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1814,49
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1369,94

Tableau 4.33 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 20% (85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
25,11	0,5	1,00	5,19
24,19	1	2,00	10,38
25,24	1,5	2,90	15,05
22,11	2	3,80	19,72
24,91	2,5	4,40	22,84
22,06	3	4,90	25,43
25,3	3,5	5,25	27,25
22,35	4	5,50	28,55
25,1	4,5	5,70	29,58
22,51	5	5,70	29,58
47	6	5,70	29,58
47,4	7	5,75	29,84
47,2	8	5,75	29,84
43,9	9	5,75	29,84
46,97	10	5,75	29,84

Tableau 4.34 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 20% (85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 25% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	992,90
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4545,60
Masse du moule à vide	(g)	4779,00
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,50
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10322,80
Masse du sol humide compacté	(g)	4270,30
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1825,99
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1402,77

Tableau 4.35 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 25% (85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	2,00	10,38
22,37	1	3,80	19,72
25,51	1,5	5,50	28,55
21,86	2	7,10	36,85
24,86	2,5	9,00	46,71
22,73	3	10,00	51,90
24,41	3,5	10,60	55,01
22,79	4	10,60	55,01
25,18	4,5	10,60	55,01
22,23	5	10,60	55,01
46,88	6	10,60	55,01
47,28	7	10,60	55,01
47,24	8	10,60	55,01
47,13	9	10,60	55,01
47,03	10	10,60	55,01

Tableau 4.36 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 25% (85%GGBFS+15%CaO)

CBR imbibé à deux jours du laitier activé au ciment

Essai du sol non traiter

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	991,90
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4547,70
Masse du moule à vide	(g)	4775,90
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6049,40
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10298,60
Masse du sol humide compacté	(g)	4249,20
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1816,97
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1374,31

Tableau 4.37 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours pour le sol non traité

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression $P=5,19 \cdot F$ (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,20	1,04
22,37	1	0,40	2,08
25,51	1,5	0,60	3,11
21,86	2	0,70	3,63
24,86	2,5	0,80	4,15
22,73	3	0,90	4,67
24,41	3,5	1,00	5,19
22,79	4	1,10	5,71
25,18	4,5	1,20	6,23
22,23	5	1,25	6,49
46,88	6	1,30	6,75
47,28	7	1,30	6,75
47,24	8	1,30	6,75
47,13	9	1,30	6,75
47,03	10	1,30	6,75

Tableau 4.38 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours pour le sol non traité

Essai à 5% d'ajout (85%GGBFS+15%CPJ) :

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur du disque d'espacement	(mm)	25,00
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau 01	(g)	997,00
Masse totale des anneaux fondus 01	(g)	4546,20
Masse du moule à vide (01)	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10197,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4228,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1808,08
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1365,05

Tableau 4.39 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 5% (85%GGBFS+15%CPJ) :

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0,00	0,00	0,00
25,11	0,50	0,25	1,30
24,19	1,00	0,50	2,60
25,24	1,50	0,75	3,89
22,11	2,00	0,90	4,67
24,91	2,50	1,00	5,19
22,06	3,00	1,10	5,71
25,3	3,50	1,15	5,97
22,35	4,00	1,20	6,23
25,1	4,50	1,25	6,49
22,51	5,00	1,30	6,75
47	6,00	1,40	7,27
47,4	7,00	1,50	7,79
47,2	8,00	1,50	7,79
43,9	9,00	1,50	7,79
46,97	10,00	1,50	7,79

Tableau 4.40 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 5% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 10% d'ajout (85%GGBFS+15%CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur du disque d'espacement	(mm)	25,00
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	992,90
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4545,60
Masse du moule à vide	(g)	4779,00
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,50
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10296,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4243,50
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1814,53
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1385,34

Tableau 4.41 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0	0,00
25,11	0,5	0,4	2,08
24,19	1	0,6	3,11
25,24	1,5	0,8	4,15
22,11	2	0,9	4,67
24,91	2,5	1	5,19
22,06	3	1,1	5,71
25,3	3,5	1,2	6,23
22,35	4	1,3	6,75
25,1	4,5	1,4	7,27
22,51	5	1,5	7,79
47	6	1,7	8,82
47,4	7	1,8	9,34
47,2	8	1,9	9,86
43,9	9	1,9	9,86
46,97	10	1,9	9,86

Tableau 4.42 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 15% d'ajout(85%GGBFS+15%CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau 01	(g)	991,90
Masse totale des anneaux fondus 01	(g)	4547,70
Masse du moule à vide (01)	(g)	4775,90
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6049,40
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10370,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4320,60
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1847,50
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1419,73

Tableau 4.43 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 15% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,60	3,11
22,37	1	1,00	5,19
25,51	1,5	1,30	6,75
21,86	2	1,60	8,30
24,86	2,5	1,75	9,08
22,73	3	1,90	9,86
24,41	3,5	2,00	10,38
22,79	4	2,10	10,90
25,18	4,5	2,20	11,42
22,23	5	2,25	11,68
46,88	6	2,40	12,46
47,28	7	2,60	13,49
47,24	8	2,70	14,01
47,13	9	2,70	14,01
47,03	10	2,70	14,01

Tableau 4.44 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 15% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 20% d'ajout (85%GGBFS+15%CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	887,50
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4544,70
Masse du moule à vide	(g)	7341,20
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	8614,70
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	12855,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4240,30
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1813,17
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1367,81

Tableau 4.45 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 20% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
25,11	0,5	0,60	3,11
24,19	1	1,00	5,19
25,24	1,5	1,40	7,27
22,11	2	1,70	8,82
24,91	2,5	1,90	9,86
22,06	3	2,10	10,90
25,3	3,5	2,25	11,68
22,35	4	2,40	12,46
25,1	4,5	2,50	12,98
22,51	5	2,60	13,49
47	6	2,70	14,01
47,4	7	2,90	15,05
47,2	8	2,90	15,05
43,9	9	3,00	15,57
46,97	10	3,00	15,57

Tableau 4.46 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 20% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 25% d'ajout (85%GGBFS+15%CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	891,20
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4550,30
Masse du moule à vide	(g)	7872,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	9145,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	13480,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4334,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1853,40
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1423,83

Tableau 4.47 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 2 jours à 25% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,70	3,63
22,37	1	1,20	6,23
25,51	1,5	1,60	8,30
21,86	2	1,90	9,86
24,86	2,5	2,10	10,90
22,73	3	2,30	11,94
24,41	3,5	2,50	12,98
22,79	4	2,60	13,49
25,18	4,5	2,70	14,01
22,23	5	2,80	14,53
46,88	6	2,90	15,05
47,28	7	3,00	15,57
47,24	8	3,10	16,09
47,13	9	3,10	16,09
47,03	10	3,10	16,09

Tableau 4.48 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 2 jours à 25% (85%GGBFS+15%CPJ)

CBR imbibé à quatre jours du laitier activé à la chaux

Essai du sol non traité

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du porte anneau	(g)	994,60
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4548,40
Masse du moule à vide	(g)	4782,60
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6056,10
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10181,80
Masse du sol humide compacté	(g)	4125,70
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1764,11
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1336,45

Tableau 4.49 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours pour le sol non traité

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression $P=5,19 \cdot F$ (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,20	1,04
22,37	1	0,25	1,40
25,51	1,5	0,30	1,68
21,86	2	0,35	1,90
24,86	2,5	0,40	2,18
22,73	3	0,45	2,34
24,41	3,5	0,50	2,55
22,79	4	0,55	2,75
25,18	4,5	0,55	2,90
22,23	5	0,55	3,05
46,88	6	0,60	3,25
47,28	7	0,65	3,45
47,24	8	0,70	3,63
47,13	9	0,75	3,89
47,03	10	0,80	4,15

Tableau 4.50 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours pour le sol non traité

Essai à 5% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur du disque d'espacement	(mm)	25,00
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau 01	(g)	997,00
Masse totale des anneaux fondus 01	(g)	4546,20
Masse du moule à vide (01)	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10220,80
Masse du sol humide compacté	(g)	4252,20
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1818,25
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1365,05

Tableau 4.51 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 5% (85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0,00	0,00	0,00
25,11	0,50	0,50	2,60
24,19	1,00	0,80	4,15
25,24	1,50	1,00	5,19
22,11	2,00	1,10	5,71
24,91	2,50	1,20	6,23
22,06	3,00	1,30	6,75
25,3	3,50	1,40	7,27
22,35	4,00	1,50	7,79
25,1	4,50	1,60	8,30
22,51	5,00	1,70	8,82
47	6,00	1,80	9,34
47,4	7,00	1,90	9,86
47,2	8,00	1,90	9,86
43,9	9,00	1,90	9,86
46,97	10,00	1,90	9,86

Tableau 4.52 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 5% (85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 10% d'ajout (85%GGBFS+15%Cao)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur du disque d'espacement	(mm)	25,00
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	992,90
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4545,60
Masse du moule à vide	(g)	4779,00
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,50
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10296,90
Masse du sol humide compacté	(g)	4244,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1814,92
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1382,16

Tableau 4.53 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 10% (85%GGBFS+15%Cao)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0	0,00
25,11	0,5	0,5	2,60
24,19	1	0,8	4,15
25,24	1,5	1	5,19
22,11	2	1,25	6,49
24,91	2,5	1,4	7,27
22,06	3	1,6	8,30
25,3	3,5	1,8	9,34
22,35	4	1,9	9,86
25,1	4,5	2	10,38
22,51	5	2,1	10,90
47	6	2,2	11,42
47,4	7	2,2	11,42
47,2	8	2,2	11,42
43,9	9	2,2	11,42
46,97	10	2,2	11,42

Tableau 4.54 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 10% (85%GGBFS+15%Cao)

Essai à 15% d'ajout (85%GGBFS+15%CaO)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau 01	(g)	991,90
Masse totale des anneaux fondus 01	(g)	4547,70
Masse du moule à vide (01)	(g)	4775,90
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6049,40
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10361,10
Masse du sol humide compacté	(g)	4311,70
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1843,70
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1413,66

Tableau 4.55 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 15%(85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,50	2,60
22,37	1	1,10	5,71
25,51	1,5	1,70	8,82
21,86	2	2,20	11,42
24,86	2,5	2,50	12,98
22,73	3	2,80	14,53
24,41	3,5	3,00	15,57
22,79	4	3,20	16,61
25,18	4,5	3,30	17,13
22,23	5	3,40	17,65
46,88	6	3,50	18,17
47,28	7	3,60	18,68
47,24	8	3,70	19,20
47,13	9	3,70	19,20
47,03	10	3,70	19,20

Tableau 4.56 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 15% (85%GGBFS+15%CaO)

Essai à 20% d'ajout(85%GGBFS+15%Cao)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	891,20
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4550,30
Masse du moule à vide	(g)	7872,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	9145,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	13405,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4259,40
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1821,33
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	137,21

Tableau 5.57 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 20% (85%GGBFS+15%Cao)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
25,11	0,5	1,60	8,30
24,19	1	2,50	12,98
25,24	1,5	3,25	16,87
22,11	2	4,10	21,28
24,91	2,5	5,00	25,95
22,06	3	5,50	28,55
25,3	3,5	5,90	30,62
22,35	4	6,25	32,44
25,1	4,5	6,60	34,25
22,51	5	6,75	35,03
47	6	6,00	31,14
47,4	7	6,00	31,14
47,2	8	6,00	31,14
43,9	9	6,00	31,14
46,97	10	6,00	31,14

Tableau 4.58 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 20% (85%GGBFS+15%Cao)

Essai à 25% d'ajout(85%GGBFS+15%CaO)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	887,50
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4544,70
Masse du moule à vide	(g)	7341,20
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	8614,70
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	12946,20
Masse du sol humide compacté	(g)	4331,50
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1852,16
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1425,72

Tableau 4.59 Mesure de la densité sèche du C BR imbibé à 4 jours à 25% (85%GGBFS+15%CaO)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	2,80	14,53
22,37	1	5,40	28,03
25,51	1,5	8,00	41,52
21,86	2	9,75	50,60
24,86	2,5	11,00	57,09
22,73	3	11,50	59,69
24,41	3,5	11,50	59,69
22,79	4	10,00	51,90
25,18	4,5	9,20	47,75
22,23	5	8,50	44,12
46,88	6	7,50	38,93
47,28	7	7,30	37,89
47,24	8	7,10	36,85
47,13	9	7,10	36,85
47,03	10	7,10	36,85

Tableau 4.60 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 25% (85%GGBFS+15%CaO)

CBR imbibé à quatre jours du laitier activé au ciment

Essai du sol non traiter

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du porte anneau	(g)	994,60
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4548,40
Masse du moule à vide	(g)	4782,60
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6056,10
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10181,80
Masse du sol humide compacté	(g)	4125,70
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1764,11
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1336,45

Tableau 4.61 Mesure de la densité sèche du C BR imbibé à 4 jours pour le sol non traité

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,20	1,04
22,37	1	0,25	1,40
25,51	1,5	0,30	1,68
21,86	2	0,35	1,90
24,86	2,5	0,40	2,18
22,73	3	0,45	2,34
24,41	3,5	0,50	2,55
22,79	4	0,55	2,75
25,18	4,5	0,55	2,90
22,23	5	0,55	3,05
46,88	6	0,60	3,25
47,28	7	0,65	3,45
47,24	8	0,70	3,63
47,13	9	0,75	3,89
47,03	10	0,80	4,15

Tableau 4.62 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours pour le sol non traité

Essai à 5% d'ajout (85%GGBFS+15%CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur du disque d'espacement	(mm)	25,00
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau 01	(g)	997,00
Masse totale des anneaux fondus 01	(g)	4546,20
Masse du moule à vide (01)	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10201,10
Masse du sol humide compacté	(g)	4232,50
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1809,83
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1358,02

Tableau 4.63 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 5% (85%GGBFS+15%CPJ)r

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0,00	0,00	0,00
25,11	0,50	0,60	3,11
24,19	1,00	0,90	4,67
25,24	1,50	1,00	5,19
22,11	2,00	1,10	5,71
24,91	2,50	1,20	6,23
22,06	3,00	1,25	6,49
25,3	3,50	1,30	6,75
22,35	4,00	1,40	7,27
25,1	4,50	1,50	7,79
22,51	5,00	1,60	8,30
47	6,00	1,70	8,82
47,4	7,00	1,80	9,34
47,2	8,00	1,90	9,86
43,9	9,00	1,90	9,86
46,97	10,00	1,90	9,86

Tableau 4.64 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 5% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 10% d'ajout(85%GGBFS+15%CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur du disque d'espacement	(mm)	25,00
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	992,90
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4545,60
Masse du moule à vide	(g)	4779,00
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,50
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10290,00
Masse du sol humide compacté	(g)	4237,50
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1811,97
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1380,34

Tableau 4.65 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0	0,00
25,11	0,5	0,5	2,60
24,19	1	0,8	4,15
25,24	1,5	1	5,19
22,11	2	1,25	6,49
24,91	2,5	1,4	7,27
22,06	3	1,6	8,30
25,3	3,5	1,8	9,34
22,35	4	1,9	9,86
25,1	4,5	2	10,38
22,51	5	2,2	11,42
47	6	2,25	11,68
47,4	7	2,3	11,94
47,2	8	2,4	12,46
43,9	9	2,4	12,46
46,97	10	2,4	12,46

Tableau 4.66 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 10% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 15% d'ajout (85% GGBFS+15% CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau	(g)	991,90
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4547,70
Masse du moule à vide	(g)	4775,90
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6049,40
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10398,10
Masse du sol humide compacté	(g)	4348,70
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1859,52
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1427,87

Tableau 4 67 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 15% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
25,11	0,5	0,50	2,60
24,19	1	0,75	3,89
25,24	1,5	1,00	5,19
22,11	2	1,30	6,75
24,91	2,5	1,50	7,79
22,06	3	1,75	9,08
25,3	3,5	1,90	9,86
22,35	4	2,10	10,90
25,1	4,5	2,25	11,68
22,51	5	2,40	12,46
47	6	2,50	12,98
47,4	7	2,60	13,49
47,2	8	2,70	14,01
43,9	9	2,70	14,01
46,97	10	2,70	14,01

Tableau 4.68 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 15% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 20% d'ajout (85%GGBFS+15%CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,61
Masse du porte anneau 01	(g)	992,90
Masse totale des anneaux fondus 01	(g)	4545,60
Masse du moule à vide	(g)	4779,00
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	6052,50
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10290,80
Masse du sol humide compacté	(g)	4238,30
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1812,31
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1371,71

Tableau 4.69 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 20% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,60	3,11
22,37	1	1,00	5,19
25,51	1,5	1,20	6,23
21,86	2	1,40	7,27
24,86	2,5	1,60	8,30
22,73	3	1,80	9,34
24,41	3,5	2,00	10,38
22,79	4	2,10	10,90
25,18	4,5	2,20	11,42
22,23	5	2,25	11,68
46,88	6	2,30	11,94
47,28	7	2,40	12,46
47,24	8	2,50	12,98
47,13	9	2,50	12,98
47,03	10	2,50	12,98

Tableau 4.70 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 20% (85%GGBFS+15%CPJ)

Essai à 25% d'ajout (85%GGBFS+15%CPJ)

Diamètre du moule D	(mm)	152,70
Hauteur du moule	(mm)	152,70
Hauteur de l'éprouvette H	(mm)	127,70
Volume total d'éprouvette = $[(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H$	(cm ³)	2338,68
Masse du porte anneau	(g)	997,00
Masse totale des anneaux fondus	(g)	4546,20
Masse du moule à vide	(g)	4695,10
Masse du disque d'espacement	(g)	1273,50
Masse du moule à vide + disque d'espacement	(g)	5968,60
Masse du moule + disque+sol humide compacté	(g)	10329,10
Masse du sol humide compacté	(g)	4360,50
Masse volumique du sol humide	(kg/m ³)	1864,56
Masse volumique du sol sec	(kg/m ³)	1432,95

Tableau 4.71 Mesure de la densité sèche du CBR imbibé à 4 jours à 25% (85%GGBFS+15%CPJ)

Temps approximatif (sec)	Enfoncement (mm)	F (kN)	Pression P=5,19*F (bars)
0	0	0,00	0,00
24,76	0,5	0,60	3,11
22,37	1	1,00	5,19
25,51	1,5	1,25	6,49
21,86	2	1,50	7,79
24,86	2,5	1,80	9,34
22,73	3	2,00	10,38
24,41	3,5	2,10	10,90
22,79	4	2,25	11,68
25,18	4,5	2,40	12,46
22,23	5	2,50	12,98
46,88	6	2,70	14,01
47,28	7	2,90	15,05
47,24	8	3,00	15,57
47,13	9	3,10	16,09
47,03	10	3,10	16,09

Tableau 4.72 Lectures lors de l'essai CBR imbibé à 4 jours à 25% (85%GGBFS+15%CPJ)