

VI.1 Introduction :

Ce chapitre présentera 3 parties, la première partie s'étalera sur des essais d'identifications sur le sable brute désigné par (SB), un sable traité avec la silice à la base dans **Adwan Chemicals Company** dans la zone industrielle de **Farnaka**. Ce sable représente le matériau de base dans les procédés de moulage dans la fonderie de Tiaret (**ALFET**).

La deuxième partie présentera les résultats d'identification concernant le sable à vert (S1) qui d'ailleurs ne présente aucun risque toxique avec un pH neutre égale à 7, puis des essais de portance sans traitement et avec traitement a liant hydraulique (chaux , ciment) à diffèrent dosages ainsi que quelque essais mécaniques sur des éprouvettes prismatiques de mortier normal.

La troisième partie on s'intéressera aux sables à prise chimique tels que le sable au silicate de soude (S2) et le sable silicate de soude +bentonite (S3) et la manière de les traiter afin de lancer des essais d'identification au laboratoire.

A la fin de ce chapitre, on présentera les résultats de **DRX**, afin de déterminer les types de minéraux constituant chaque échantillon avant et après traitement.

VI.2 Essais sur sable brute désigné (SB).

VI.2.1 Les essais d'identification.

VI.2.1.1 Analyse granulométrique.

La granularité se définit comme étant la répartition de la dimension moyenne des particules de sable, exprimée en pourcentage de la masse totale du matériau.

L'analyse granulométrique s'effectue jusqu'à $80 \mu\text{m}$ par tamisage du matériau par voie sèche et voie humide en utilisant une série de tamis normalisé (**Figure VI.1**).

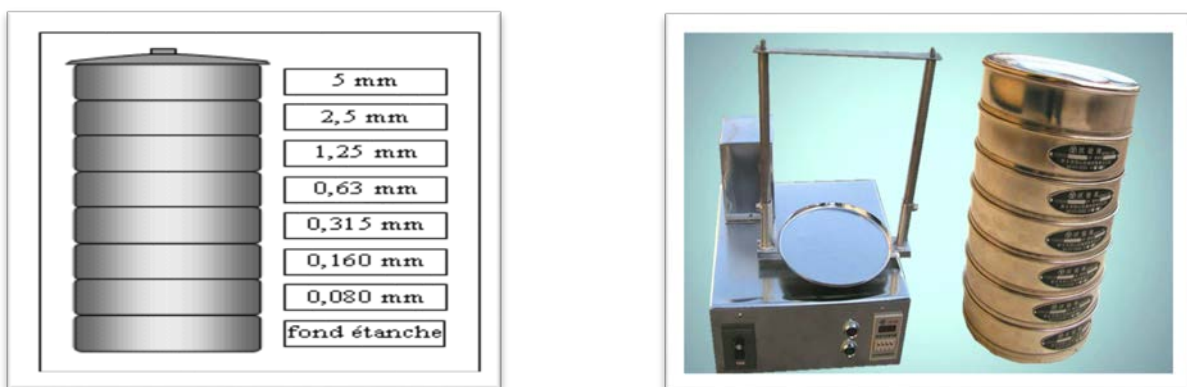


Figure VI.1 : Série de tamis normalisé.

L'essai a été réalisé suivant la norme **NF P18-560**.

Les tableaux V.1 et V.2 de la partie 1 résumant, respectivement les résultats de l'essai granulométrique par tamisage par voie sèche.

Tableau VI.1 : Résultats de l'analyse granulométrique sur le sable brute (SB) ECH 01.

Ouverture des tamis en mm	Masse de refus cumulé(Ri) en grammes	Pourcentage (%) du refus cumulés $Ri/Ms*100$	Pourcentage (%) des tamis cumulés $100*(Ri/Ms)-100$
5	0	0	100
4	0	0	100
2	0.2	0.04	99.96
1	2.1	0.42	99.58
0.5	2.6	2.52	97.48
0.4	39.8	7.96	92.04
0.315	217.8	43.58	56.46
0.200	474.7	94.94	5.06
0.100	493.5	98.7	1.3
0.080	493.7	98.74	1.26
Fond	494.4	98.86	0.14

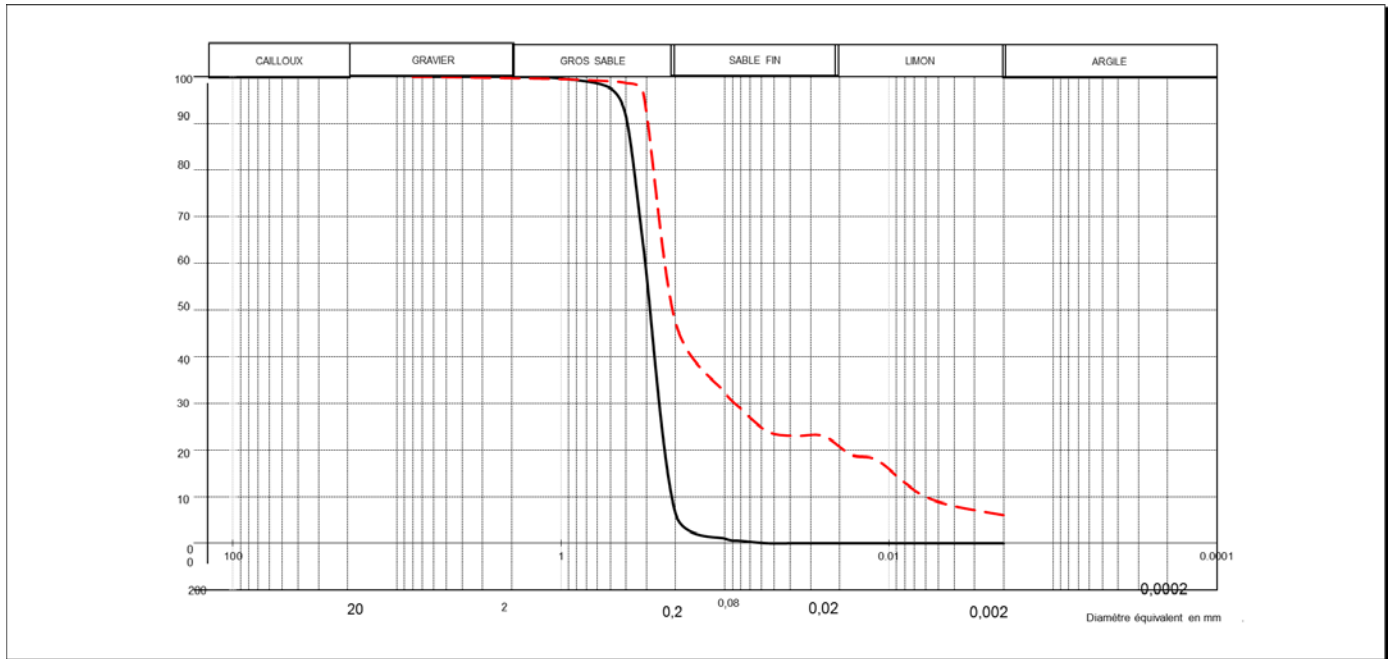


Figure VI.2 : La courbe d'analyse granulométrique du sable brute (SB) ECH 01.

Tableau VI.2 : Résultat sur l'analyse granulométrique sur le sable brute (SB) ECH 02.

Ouverture des Tamis en mm	Masse des refus cumulés (Ri) en grammes	Pourcentage des refus cumulés $Ri/Ms*100$	Pourcentage des tamisâts cumulés $100*(Ri/Ms)-100$
5	00	00	100
4	00	00	100
2	00	00	100
1	1.8	0.36	99.64
0.5	12.4	2.48	97.52
0.4	44	8.8	91.20
0.315	180.9	36.18	63.82
0.200	468.3	93.66	6.34
0.100	494.8	98.96	1.04
0.080	497.3	99.46	0.54
Fond	498.2	98.80	0.12

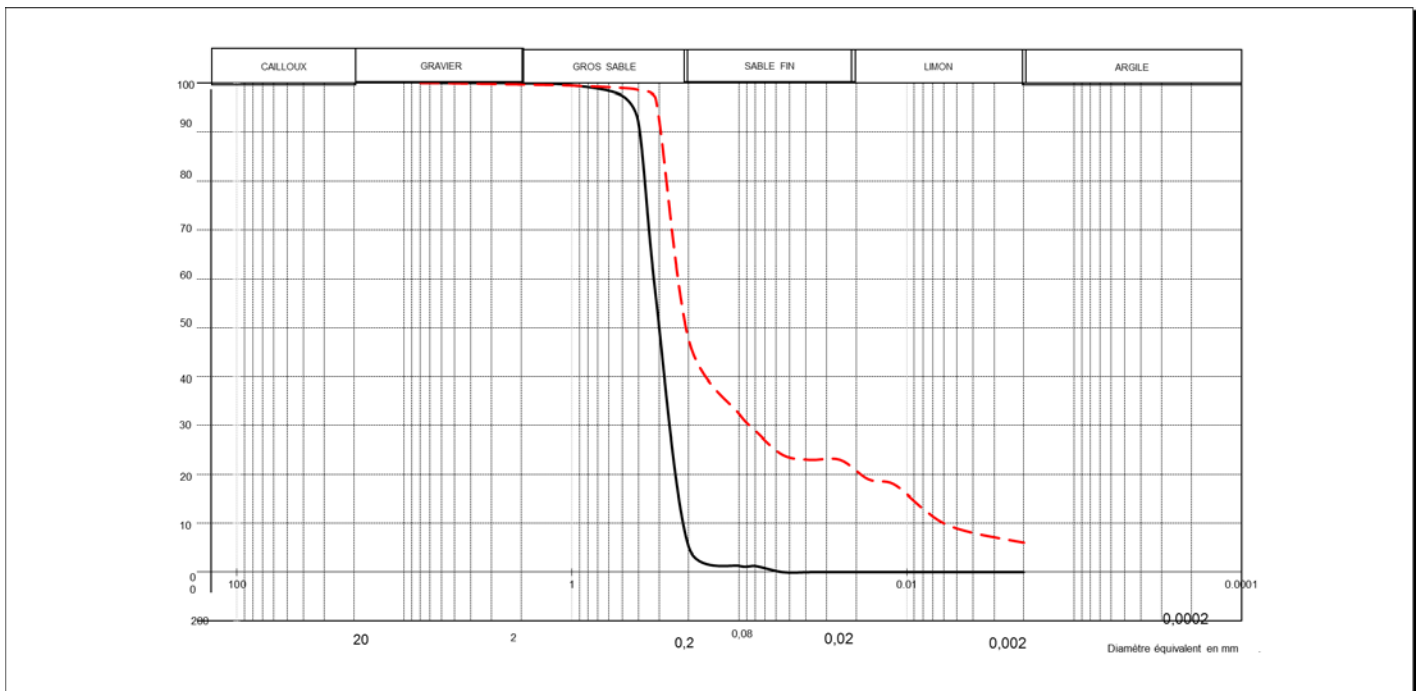


Figure VI.3 : La Courbe d'analyse granulométrique du sable brute (SB) ECH 02.

Commentaires :

En comparant la courbe de référence en rouge avec la courbe du sable (SB) pour les deux échantillon(courbe en noir), on s'aperçoit que la granulométrie n'est pas du tout la même puisque le sable (SB) est un sable grossier et le pourcentage des fines est très faible, la taille moyenne (d_{50}) est égale à 0.3 mm

VI.2.1.2 La limite d'Atterberg.

Sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du matériau .Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations des teneurs en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction du sable passant au tamis de 400 μm .

Lorsque l'on fait décroître progressivement la teneur en eau d'un échantillon de sable on constate qu'il passe successivement par plusieurs étapes, dont la description a été proposée par l'agronome suédois **ATTERBERG** :

1. *Etat liquide.*
2. *Etat plastique.*
3. *Etat solide.*



Figure VI.4 : Coupelle de Casagrande.

Résultat trouvé :

L'essai de la limite d'Atterberg nous a donné un Indice de plasticité non mesurable puisque le sable (SB) a un caractère non plastique par absence d'argile.

VI.1.1.3 Valeur de bleu de méthylène.

La valeur de bleu de méthylène se détermine à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène.

A chaque ajout on contrôle l'adsorption en prélevant une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre normalisé pour faire une tache. L'adsorption maximale est atteinte quand une auréole bleu clair se produit à la périphérie de la tache.

Cet essai a pour but de caractériser globalement la fraction argileuse contenue dans le matériau.

L'essai a été réalisé suivant la norme **NF P 94-068**.

$$\text{VBS} = \frac{V \times C}{M} \times 100$$

On a trouvé dans le laboratoire de chimie que le **VBS = 0.67g** (pour 100g de sable brute).

VI.2.1.4 Teneur en carbonates CaCO_3 :

La teneur en carbonates de calcium CaCO_3 d'un sol est déterminée par attaque à l'acide chlorhydrique d'une certaine quantité de sol sec. La mesure de la quantité de gaz carbonique dégagé permet de calculer la masse de carbonate de calcium dissoute et donc la teneur en carbonates de calcium du sol, exprimée en pourcentage de la masse de la phase solide du solide, le but de cet essai est de terminer la nature chimique du matériau mis à l'essai.

L'essai a été réalisé suivant la norme **NF P 94-048**.

$\text{CaCO}_3 = 00\%$. Donc le sable n'est sans aucun cas carbonaté soit aucune présence de carbonates.

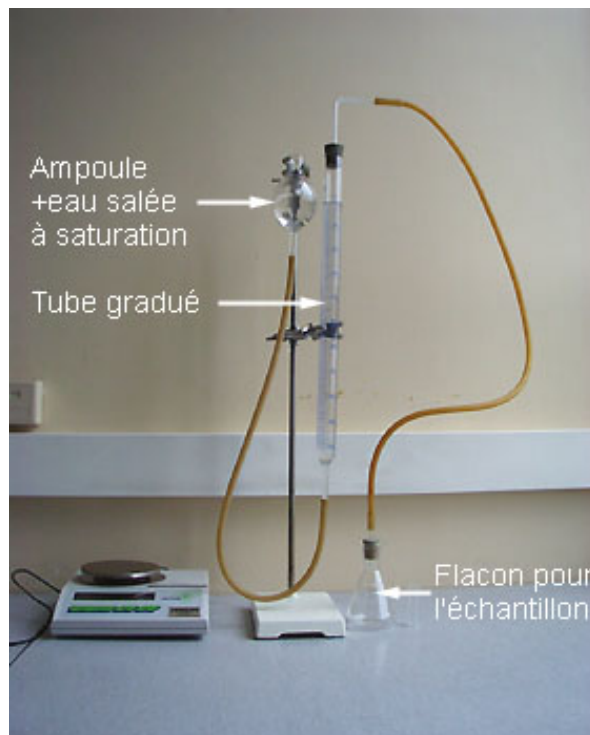


Figure VI.5 : Calcimètre pour la détermination de la teneur en carbonates.

VI.2.1.5 Equivalent de sable.

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté du sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à maille carrée de 5 mm, il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fin, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fin qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (**Es**) est le rapport, **multiplié par 100**, de la hauteur de la partie sableuse sédimenté, à la hauteur total du flocculat et de la partie sableuse sédimenté.

Cet essai est réalisé par la norme **NF P 18-598**

La mesure **h₁** : **10.50** (échantillon 01), **10.60** (échantillon 02).

La mesure **h₂** : **9.10** (échantillon 01), **9.40** (échantillon 02).

La mesure **h'₂** : **10.10** (échantillon 01), **10.20** (échantillon 02).

$$E_s (\text{piston}) = 100 * h_2 / h_1 \quad E_s (\text{visuel}) = 100 * h'_2 / h_1$$

$$E_{s1} = 86.66 \quad \text{et} \quad E_{s2} = 88.67 \quad \longrightarrow \quad E_s \text{ moyen (piston)} = 87.66.$$

$$E_{s1} = 96.19 \quad \text{et} \quad E_{s2} = 96.22 \quad \longrightarrow \quad E_s \text{ moyen (visuel)} = 96.20.$$



Figure VI.6 : Éprouvettes 01 et 02 du sable brute (SB).

V.2.2 Classement du sable :

Tableau VI.3 : Tableau récapitulatif des résultats d'identification du sable brute (SB).

D max (mm)	2 mm
Passant à 80 µm (%)	P₁=1.26. P₂=0.54.
IP	Non mesurable.
VBS (g)/100g.	Moyenne=067
Carbonates CaCo3 (%).	00

D'après les résultats trouvés en utilisant le tableau de classification (**classification des sols GTR**), ...voir l'**annexe(03)**.

Notre sol peut être classé comme étant : matériau sableux et graveleux avec fines (**classe B**) et **sous classe (B1)**

VI.3 Essais sur sable à vert désigné (S1).

VI.3.1 Les essais d'identification.

VI.3.1.1 Analyse granulométrique et sédimentométrique.

Tableau VI.4 : résultat de l'analyse granulométrique du sable (S1) ECH 01.

Ouvertures des tamis en mm	Masse de refus cumulés (Ri) en grammes	Pourcentage des refus cumulés $Ri/Ms*100$	Pourcentages des tamisats cumulés $100*(Ri/Ms)-100$
5	0.4	0.04	99.96
4	0.5	0.05	99.95
2	3.6	0.36	99.64
1	8.1	0.81	99.19
0.5	29.8	2.98	97.02
0.4	116.1	11.61	88.39
0.315	398.7	39.87	60.13
0.200	770.9	70.09	29.91
0.100	774.1	77.41	22.59
0.080	786.8	78.68	21.32
Fond	788.8	78.88	0.20

Tableau VI.5 : Résultat de l'essai sédimentométrie ECH 01.

Lecture densimétrique	P% sur tamis 80 μm	D (μm)
1.0225	19	0.075
1.020	17	0.055
1.0185	16	0.038
1.0175	15	0.025
1.0145	15	0.017
1.011	10	0.012
1.0095	09	0.008
1.007	07	0.006
1.0055	06	0.004
1.0045	05	0.002

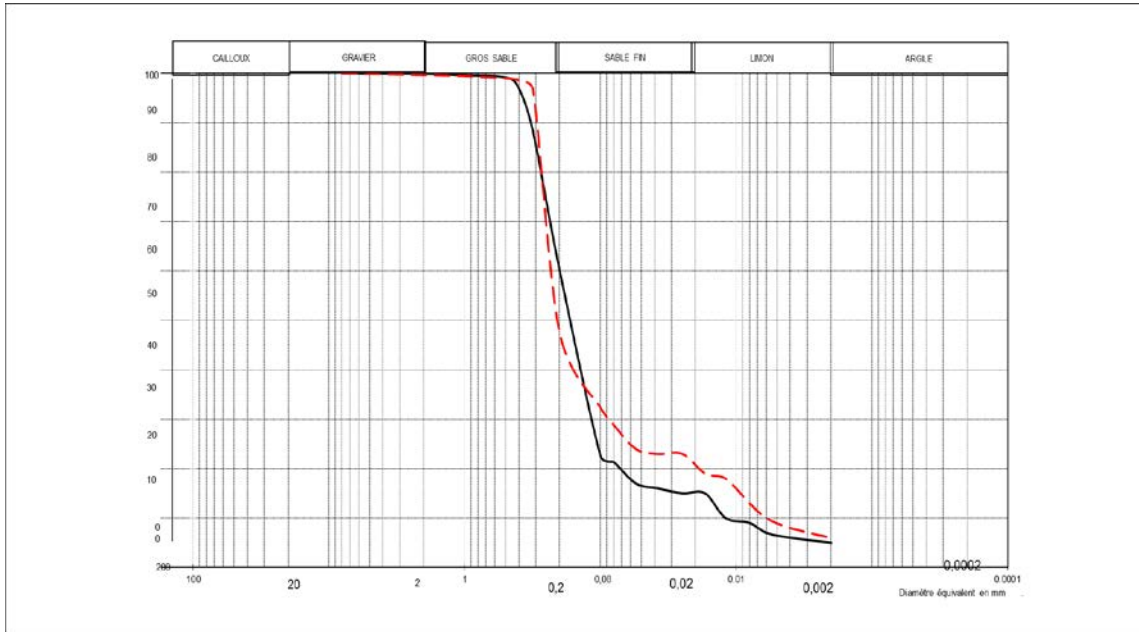


Figure VI.7: La courbe d'analyse granulométrique du sable (S1) ECH 01.

Tableau VI.6 : Résultat de l'analyse granulométrique du sable (S1) ECH 02.

Ouvertures des tamis en mm	Masse de refus cumulés(Ri) en grammes	Pourcentage des refus cumulés $Ri/Ms*100$	Pourcentage du tamisats cumulés $100*(Ri/Ms)-100$
5	1.4	0.14	99.86
4	2.5	0.26	99.74
2	4.4	0.44	99.56
1	7.5	0.75	99.25
0.5	27.6	2.76	97.24
0.4	111.4	11.14	88.86
0.315	334.2	33.42	66.58
0.200	712.8	71.28	28.72
0.100	773.5	77.35	22.65
0.080	781.7	78.17	21.83
Fond	783.2	78.36	0.15

Tableau VI.7 : Résultat de l'essai de sédimentométrie ECH 02.

Lecture densimétrique	P% sur tamis 80 µm	D (µm)
1.023	20	0.075
1.022	19	0.055
1.205	18	0.038
1.019	17	0.025
1.0165	15	0.017
1.014	13	0.012
1.025	12	0.008
1.010	10	0.006
1.008	08	0.004
1.006	07	0.002

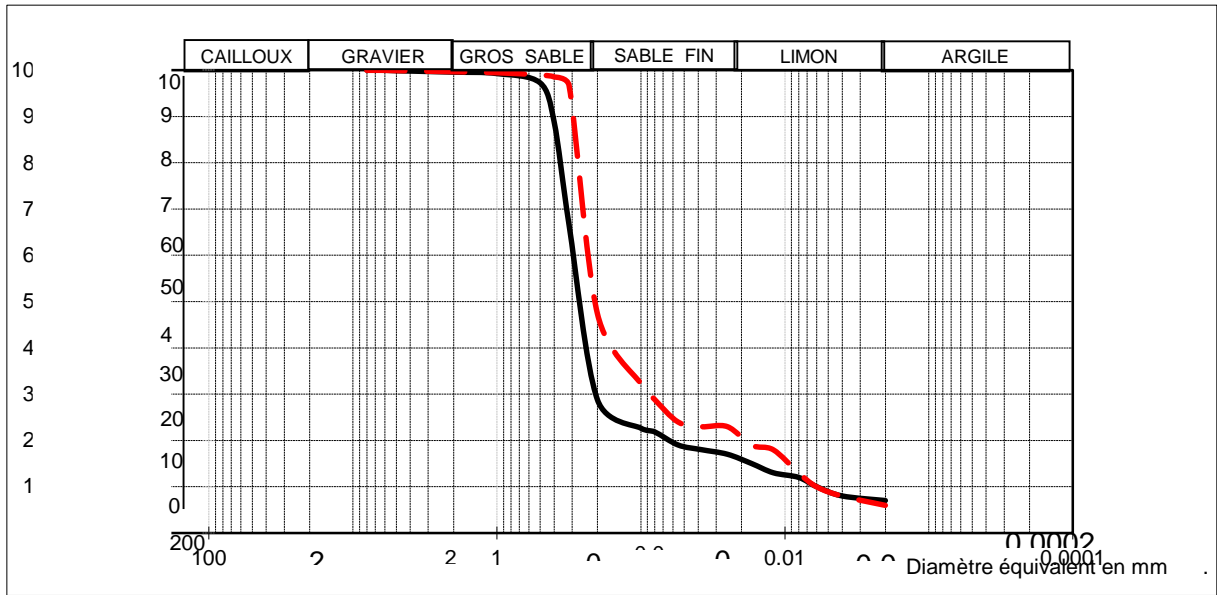


Figure VI.8 : La courbe d'analyse granulométrique de sable (S1) ECH02.

Commentaires :

La répartition des grains des différentes dimensions sont conforme à la courbe de référence (courbe en rouge), la taille moyenne des grains (d50) est égale à 0.2 mm.

Tableau VI.8 : Récapitulation des résultats d'identification.

	ECH 01		ECH02	
Dmax (mm)	5		5	
Passant au 80µm (%)	21.32		21.83	
IP	Non mesurable		Non mesurable	
VBS	1.67		1.61	
CaCo3 (%)	00		00	
Es (%)	ES (piston)=15	ES (visuel)=26	ES (piston)=15	ES (visuel)=25
Poids spécifique (ρ_s) g/cm³	2.593		2.548	
Masse volumique (γ) g/cm³	1.258		1.255	

VI.3.2 Classement du sable (S1) :

D'après les résultats trouvés en consultant le guide de classification (GTR) on a pu classier notre sable comme suit :

Un sable de classe **B** soit un matériau sableux et graveleux avec fines et d'une sous- classe **B₆** ce qui signifie un sable et graves argileux à très argileux.....**voir l'annexe(03)**.

V.3.3 Les essais de portance :

C'est la caractéristique qui définit la capacité d'un sable à supporter une charge qui lui est appliqués.

La portance dépend de la nature du matériau, de son pourcentage d'eau et du degré de compactage.

La portance du matériau et son degré d'humidification optimum sont déterminés par des essais dont le plus usuels sont l'essai Proctor pour la compacité et l'essai CBR pour la résistance à la charge de portance.

V.3.3.1 L'essai Proctor [NF P 94-093].

Le principe consiste à compacter avec une énergie définie un échantillon de matériau remanié dans un moule normalisé et à mesurer le poids volumique sec obtenu. L'essai est recommandé pour différentes teneurs en eau. Il existe deux types d'essai d'usages courant.

Les résultats sont présentés sous la forme d'une courbe dont en abscisse la teneur en eau et en ordonnée la densité sèche. Cette courbe a un maximum

Connu sous « l'optimum Proctor » normal ou modifié selon la nature de l'essai. Ce maximum définit la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale.

Ainsi ces valeurs peuvent être utilisées pour valider la qualité d'un compactage sur un chantier, elles sont surtout utilisées lors de l'étude de formulation pour définir la modification à apporter au sol permettant de passer de son état naturel à son état optimal de mise en œuvre. L'essai Proctor modifié se fait sur des matériaux destinés à la réalisation des couches d'une chaussée et en prenant en compte un poids plus important des engins de



Figure VI.9 : Essai Proctor.

Tableau VI.9 : Résultat de l'essai Proctor modifié.

0% liant hydraulique.				
Essai N°	01	02	03	04
Masse du moule +échantillon (g)	11790	12015	12205	12385
Echantillon sec (g)	4137.28	4206.12	4493.46	4386.51
Teneur en eau (%)	06.35	8.77	10.16	12.96
Densité sèche (T/m³)	1.80	1.83	1.95	1.90

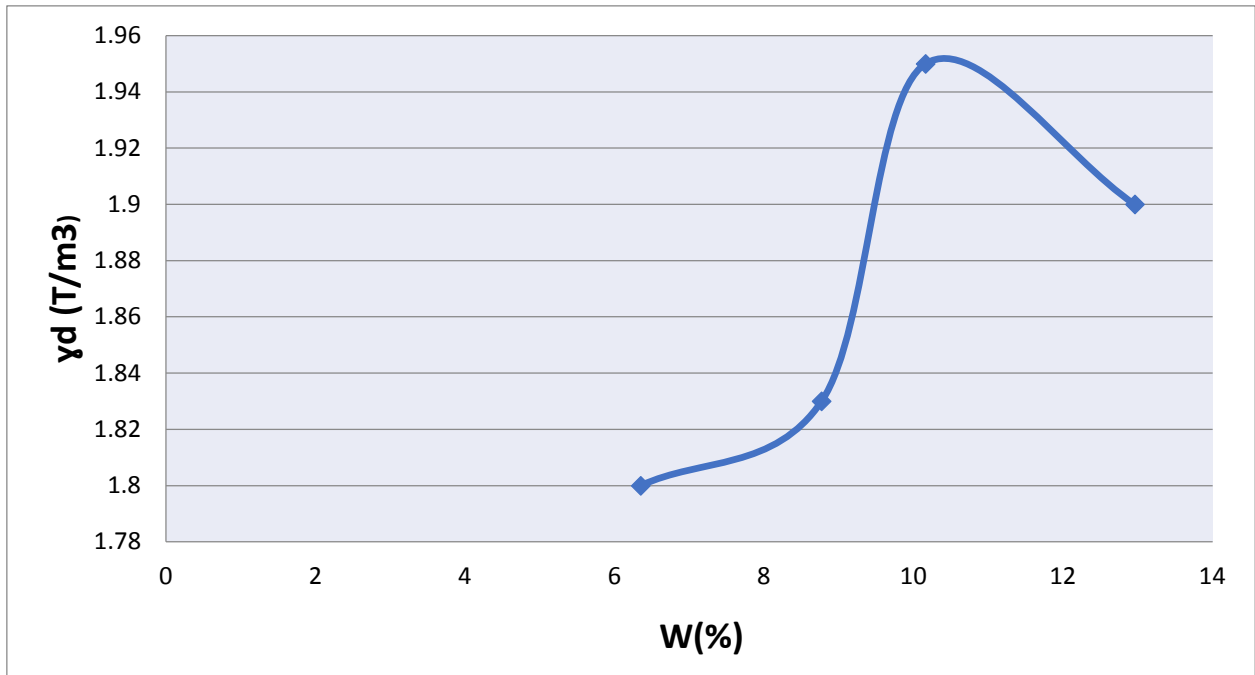


Figure VI.10 : Courbe de l'essai Proctor modifié.

V.3.3.2 Essai CBR [NF P 94-078].

Après immersion (4 jours), Indice CBR (I.CBR) exprimé en pourcentage (%) le rapport entre les pressions produisant dans un même temps d'un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part dans un matériau type d'autre part. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes.

$$I.CBR \text{ à } 2.5 \text{ mm} = \frac{\text{effort de penetration (Kn) à } 2.5 \text{ mm d'enfoncement}}{13.35 \text{ KN}} \times 100.$$

$$I.CBR \text{ à } 5 \text{ mm} = \frac{\text{effort de penetration (Kn) à } 5 \text{ mm d'enfoncement}}{20 \text{ KN}} \times 100.$$

$$I.CBR = \max (ICBR \text{ à } 2.5 \text{ mm}, ICBR \text{ à } 5 \text{ mm}).$$

Tableau VI.10 : Résultat de l'essai CBR d'immersion à 4 jours du sable à vert (S1).

Nombre de coups / couches	Indice portant (%) à...	
	2.5 mm	5 mm
55	41.65	47.8
25	26.70	30.11
10	13.88	14.80

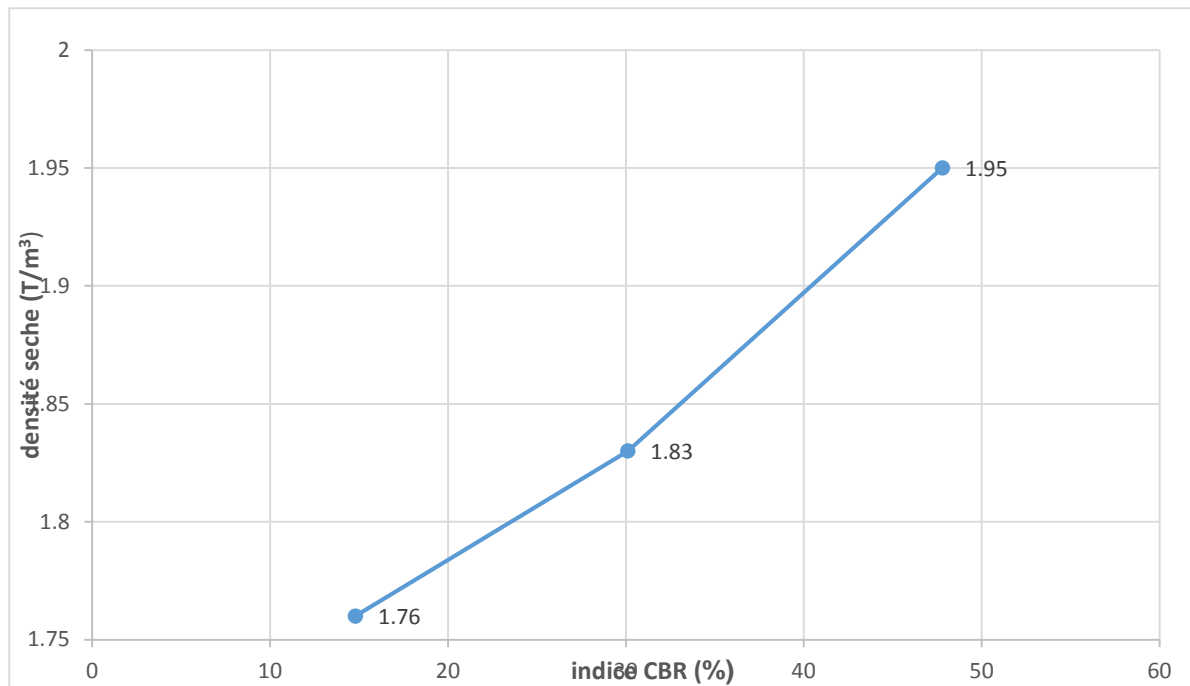


Figure VI.11 : Courbe de l'essai CBR.



Figure VI.12 : Les étapes de l'essai CBR après immersion (Phases A, B, C)

V.3.3 Exécution du traitement :

Le traitement des sols en place à la chaux et /ou au ciment ou au liant hydraulique routier (**LHR**) est une technique éprouvée et parfaitement au point, qui a connu un très fort développement depuis une vingtaine d'années.

Les échantillons de sables utilisés sont mélangés à différents pourcentages de chaux et de ciment sont représentée comme suit :

2%, 4% de chaux et 2%, 4% de ciment.

Les résultats de l'essai Proctor modifié sont exprimés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.11 : Résultat de l'essai Proctor modifié (sable à vert traité à 2% de chaux).

2% de chaux					
Essai N°	01	02	03	04	05
Masse de moule + échantillon(g)	11655	11860	12010	12125	12380
Echantillon sec (g)	4018.62	4145.40	4246.06	4293.04	4442.00
Teneur en eau (%)	5.26	6.66	8.10	11.11	12
Densité sèche (T/m³)	1.74	1.80	1.84	1.86	1.83

Tableau VI.12 : Résultat de l'essai Proctor modifié (sable à vert traité à 4% de chaux).

4% de chaux					
Essai N°	01	02	03	04	05
Masse de moule + échantillon (g)	11735	12020	12300	12255	12235
Echantillon sec (g)	4045.45	4148.64	4357.14	4230.43	4128.20
Teneur en eau (%)	10	11	12	15	17
Densité sèche (T/m³)	1.75	1.80	1.89	1.83	1.79

Tableau VI.13 : Résultat de l'essai Proctor modifié (sable à vert traité à 2% de ciment).

2% de ciment			
Essai N°	01	02	03
Masse de moule + échantillon (g)	11780	11830	11900
Echantillon sec (g)	4180.36	4201.52	4166.66
Teneur en eau (%)	6.45	8.77	10.16
Densité sèche (T/m³)	1.81	1.82	1.80

Tableau VI.14 : Résultat de l'essai Proctor modifié (sable à vert traité à 4% de ciment).

4% de ciment			
Essai N°	01	02	03
Masse de moule +échantillon (g)	11975	12190	12230
Echantillon sec (g)	4209.09	4330.35	4259.83
Teneur en eau (%)	10.10	12.06	15.38
Densité sèche (T/m³)	1.83	1.88	1.85

Les résultats de l'essai CBR sont exprimés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.15 : Résultats de l'essai CBR du (sable à vert traité à 2% de chaux).

Nombre de coups / couches	Indice portant (%)	
	2.5 mm	5 mm
55	201	168.2
25	134.32	125.13
10	70	62.06

Tableau VI.16 : Résultats de l'essai CBR du (sable à vert traité à 4% de chaux).

Nombre de coups / couches	Indice portant (%)	
	2.5 mm	5 mm
55	141.27	135.55
25	90.18	87.36
10	47.09	46.18

Tableau VI.17 : Résultats de l'essai CBR du (sable à vert traité à 2% de ciment).

Nombre de coups / couches	Indice portant (%)	
	2.5 mm	5 mm
55	112.35	79.55
25	74.19	53.03
10	40.45	25.51

TAB VI.18 : Résultats de l'essai CBR du (sable à vert traité à 4% de ciment).

Nombre de coups / couches	Indice portant (%)	
	2.5 mm	5 mm
55	119.17	142.20
25	79.44	90.8
10	38.72	47.4

VI.3.3.1 L'influence de traitement :

VI.3.3.1.1 L'influence du traitement sur l'essai de Proctor modifié :

Les différents résultats de l'essai Proctor sont récapitulés dans le tableau dans VI.19.

Tableau VI.19 : L'influence de traitement sur l'essai Proctor modifié.

Liant (%)	Essai N°	01	02	03	04	05
0%	W (%)	06.35	8.77	10.16	12.96	14.33
	γ_d (T/m ³)	1.80	1.83	1.95	1.90	1.87
2% de chaux	W (%)	6.66	08.10	11.11	12	13.30
	γ_d (T/m ³)	1.80	1.84	1.86	1.83	1.81
4% de chaux	W(%)	10	11	12	15	17
	γ_d (T/m ³)	1.75	1.80	1.89	1.83	1.79
2% de ciment	W(%)	6.45	8.77	10.16		
	γ_d (T/m ³)	1.81	1.82	1.80		
4% de ciment	W(%)	10.10	12.06	15.38		
	γ_d (T/m ³)	1.83	1.88	1.85		

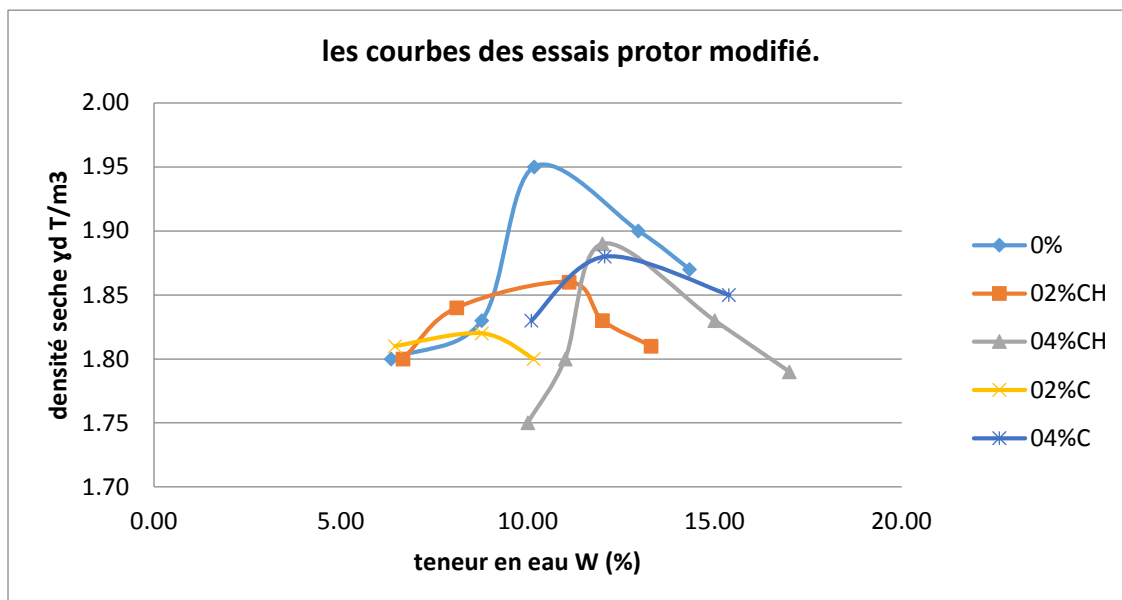


Figure VI.13 : Courbe de l'influence de traitement sur le compactage.

D'après le résultat obtenu (Figure VI.13) on peut observer une diminution de la densité sèche en ce qui concerne les sables traité par les liants par rapport au sable non traité, par ailleurs la teneur en eau augmente en fonction de l'ajout du dosage en liants.

VI.3.3.1.2 L'influence du traitement sur les résultats CBR

La détermination de l'indice CBR, en fonction de l'énergie de compactage (10, 25, 55 coups) appliqué sur le sable pour des pourcentages variables de liants engendrent une augmentation très rapide de cet indice avec l'augmentation de la cohésion.

Tableau VI.20 :L'influence de traitement sur le résultat CBR.

Pourcentage de liant (%)	I.CBR 55	I.CBR 25	I.CBR 10
0%	47.8	30.11	14.80
2 % de chaux	201	134.32	70
4 % de chaux	141.27	90.18	47.09
2% de ciment	112.35	74.19	40.45
4% de ciment	142.20	90.8	47.4

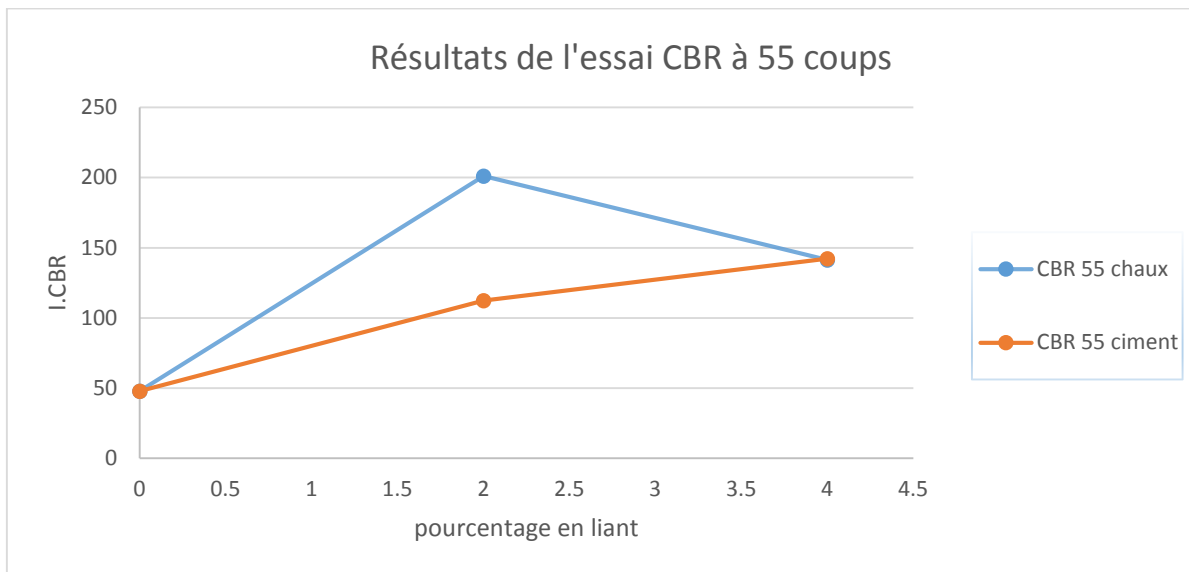


Figure VI.14 : Résultat de l'essai CBR de 4 jours d'immersion à 55 coups.

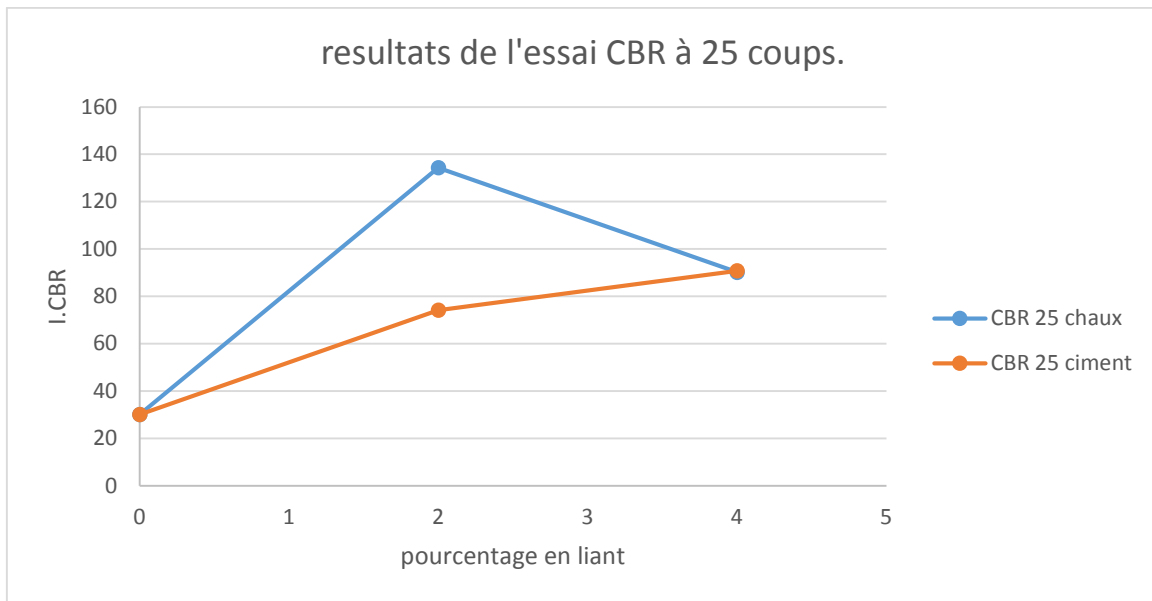


Figure VI.15 : Résultats de l'essai CBR de 4 jours d'immersion à 25 coups.

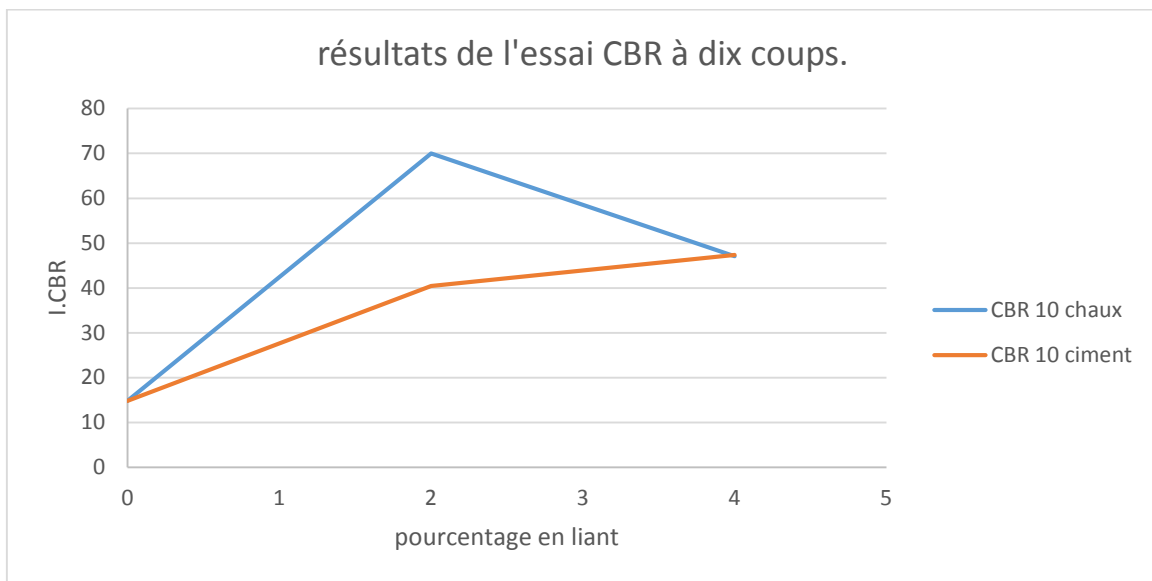


Figure VI.16 : Résultats de l'essai CBR de 4 jours d'immersion à dix coups.

On remarque à travers ce résultat que l'indice CBR d'immersion augmente en fonction du dosage de ciment, en ce qui concerne le dosage en chaux l'indice CBR augmente à un certain pourcentage ensuite chute juste après. Cela montre l'intérêt du traitement du sable étudié avec la chaux et au ciment pour l'amélioration des performances mécaniques des matériaux traités

VI.3.4. Les essais sur mortier durci :

VI.3.4.1 Confection des éprouvettes de mortier :

a. Conservation des éprouvettes :

Les essais sont souvent effectués sur des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16$ cm conservés dans l'eau à 20°C , ou dans une armoire humide maintenue à une température de $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90% .

Un malaxeur normalisé et des moules normalisés permettent de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de **section carrée $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ et longueur 16cm** (Ces éprouvettes sont appelés "**éprouvettes $4 \times 4 \times 16$** "). Un appareil à chocs permet d'appliquer **60 chocs** aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de **$15\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$** à la fréquence d'une chute par seconde **pendant 60 s**.

Une machine d'essais de résistance à la flexion permet d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50\text{N/s} \pm 10\text{N/s}$.

La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui présenté sur la **figure VI.17**.



Figure VI.17 : Machine d'essai de résistance à la flexion.

Une machine d'essai à la compression permet d'appliquer des charges jusqu'à **150KN** (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de **$2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$** . Cette machine est équipée d'un dispositif de compression. **la norme EN 196-1** décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Dans notre cas on a utilisé la machine de l'essai Marshall pour absence de machine ou plus exactement que la machine normalisée pour cet essai était hors de service. **La figure VI.18** montre **la machine Marshall** utilisée pour l'essai **de compression**.



Figure VI.18 : La machine de l'essai Marshall utilisé pour l'essai de compression.

Avec le mortier normal préparé, on remplit **un moule 4×4×16**. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule **60 chocs** à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

Entre **20h et 24h** après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulés et entreposés dans de **l'eau à 20 °C ± 1°C** jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes **ENV 197-1 et NFP 15-301** définissent les classes de résistance des ciments d'après leur **résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours**. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment.

b. Mode opératoire :

Mélanger le sable à vert normalisé avec le ciment à tester et l'eau dans les proportions suivantes : **450 ± 2g de ciment, 1350 ± 5g de sable normalisé (passé dans un jeu de tamis compris de 0.063 mm jusqu'à 2.00 mm) et 225 ± 1g d'eau**.

Avant d'être utilisé pour l'identification de caractéristiques physique et/ou mécanique, ce mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :

Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur, y verser ensuite le ciment, aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.

Après 30s de malaxage introduite régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.

Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout mortier adhérant aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.

Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau qui suit dans le tableau VI.21.

Tableau VI.21 : Opérations de malaxage du mortier normal.

Operations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable	Raclage de la cuve		
durée			30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	arrêt		Vitesse lente		arrêt		Vitesse rapide



Figure VI.19 : Moules prismatiques utilisés.

VI.3.4.2 Résultats des résistances à la compression et à la flexion :

Tableau VI.22 : Comparaison de la résistance à la flexion avec un sable témoin.

Essai N°	La contrainte de flexion (MPa) à...		
	07 jours.	14 jours.	28 jours.
01	0.275	0.350	0.440
02	0.325	0.380	0.473
Moyenne	0.300	0.365	0.456
Mortier témoin	0.88	0.89	0.85

Tableau VI.23 : Comparaison de la résistance à la compression avec un sable témoin.

Essai N°	La contrainte de compression (MPa) à...		
	7 jours.	14 jours.	28 jours.
01	5.25	8.82	9.86
02	9.27	9.49	10.11
Moyenne	7.26	9.15	9.98
Mortier témoin	17.13	13.75	11.69

Commentaires :

On constate après les essais mécaniques de flexion que la résistance reste très faible avec la formulation qu'on a utilisé soit du **sable à vert (S1)**, par ailleurs la résistance à la compression reste moyennement acceptable en la comparant avec le mortier témoin.

Remarque :

- Le sable utilisé dans la formulation du mortier témoin est un sable de guelta de la région de **LAGHOUAT** ainsi que les résultats de comparaison réalisé dans le mémoire présenté par **Mimouni Melouka**,

- Le ciment utilisé est **un ciment PORTLAND** composé de types **CEM II/A-42.5 R**.

VI.4 Essai sur les sables désignés (S2) et (S3).**VI.4.1 Principe du traitement hydraulique :**

Afin de laver les sables (S2) et (S3), il fallait adopter la manière la plus rentable et la plus faisable pour cela nous avons utilisé un perméamètre à paroi rigide dépourvu de son moule métallique, la bouteille doit être rempli d'eau distillé.

L'appareillage est connecté à un Büchner de taille moyenne siphonné jointé et connecté au tuileau qui est relié à la base du Büchner.

Le Büchner siphonné est bien jointé pour éviter toute perte d'eau durant le traitement hydraulique. Le bout du siphon en **PVC** était relié à une fiole de 5 litres pour récupérer l'eau qui servait à laver l'échantillon de sable.

Cette eau retenue dans le lavage doit être conservé dans un bac dont on devait mesurer son pH à chaque fois pour la jeter ensuite. Le débit utilisé dans le lavage était un débit moyen ou faible pour donner le temps à l'eau distillée de bien s'infiltrer dans les grains de sable et dissoudre le silicate de soude d'une manière lente et efficace et la récupérer par la suite dans la fiole.

Le pH doit être vérifié à chaque fois pour en assurer de sa neutralité durant le lavage, chaque prise de pH est prise en compte.

Après 15 litres consommé durant le lavage, l'échantillon du sable (S2) ou (S3) doit être récupéré pour être étuvé à une température moyenne qui varie entre 40 jusqu'à 50 °C.

Après séchage, on récupère l'échantillon du sable chimique et on vérifie son pH qui remonte à 8.5. L'opération est recommencée pour un autre lavage en place pour consommer à peu près 15 litres d'eau distillé pour un kilo de sable usés.

Après lavage, on laisse le sable sécher à une température ambiante moyenne, après 24 heures, on vérifie le pH pour en assurer de la neutralité du sable.

VI.4.2 Mode opératoire :

On introduit un kilo de sable usés (**S2**) ou (**S3**) à l'intérieur du **Büchner**, on étale le sable d'une façon uniforme et plate.

Après avoir fermé le Büchner par un coude siphonné et bien jointé, on ouvre le robinet avec très lent débit tout en permettant à l'eau de s'infiltrer dans le sable.

On vérifie le pH initial **après 2 ou 3 litres de lavage**, l'eau retenue dans la fiole doit être conservé dans un bac pour le neutraliser et le jeter pas la suite dans le réseau des eaux usées.

Après **5 litres** utilisé on constate que le pH descend jusqu'à un **pH=12**.

On continue à revérifier le pH jusqu'à **15 litres**, on remarquera que le **pH descend** jusqu'à **pH=7.5**.

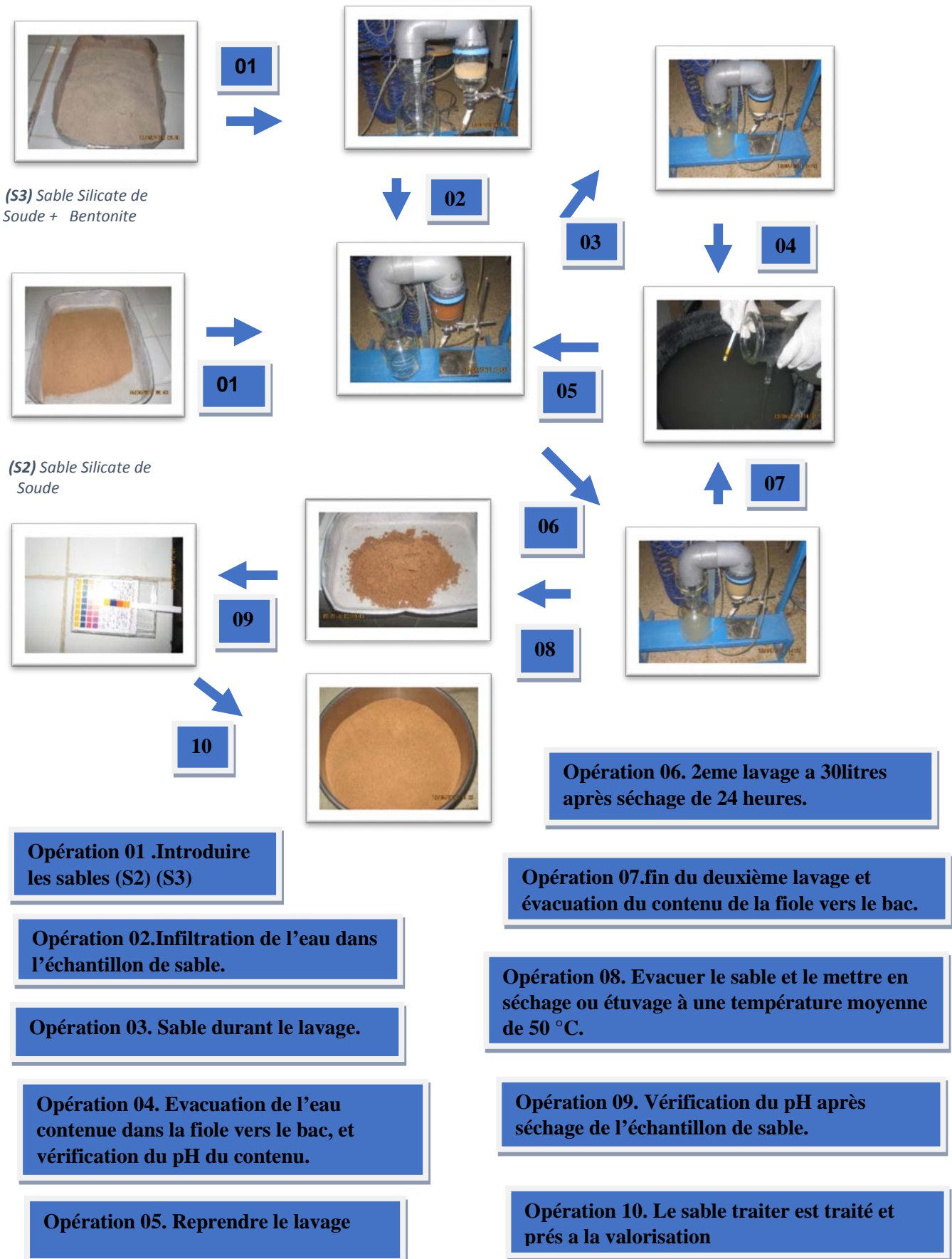
On enlève l'échantillon pour l'étuver à **50°C** ou sécher à **l'air libre** durant 24 heures (**dans notre cas l'échantillon (S2) a été séché à l'air libre pendant 48 heures contrairement au sable (S3) qui a été étuvé durant presque 6 heures**).

Après séchage ou étuvage on constate que le pH remonte à **pH=11.5**, alors on introduit le sable de nouveau dans le **Büchner** pour le laver jusqu'à la consommation de presque **32 litres** d'eau distillé. On constate que le pH devient et égale à **pH=6.5**.

Après **48 heures** on constate que le pH reste neutre soit un pH compris entre **6 jusqu'à 7**.

L'opération qui suit résume les différentes opérations faites pour traiter les sables (S2), (S3).

Figure VI.20 : Etapes de traitement hydraulique des sables (S2) et (S3).



Remarques importantes :

- ✚ La manutention durant le traitement nécessite une protection des yeux et de la peau on utilisant des gants en latex et des masques pour éviter de respirer les odeurs durant le traitement.
- ✚ Avant de procéder au traitement indiqué dans les sections précédentes, nous avons essayé d'établir l'essai hydraulique sur un procédé plus miniature que celui indiqué, en utilisant un **Büchner de diamètre inférieur** et en introduisant **50g** de sable pour générer d'une façon approximative la quantité d'eau qu'il faut pour un traitement d'un kilo (**l'eau distillée nécessaire pour le traitement d'une quantité de 50 g est 1.5 litres.**)
- ✚ On devait exclure le moule métallique du perméamètre à paroi rigide pour risques d'oxydation, ainsi tous les accessoires utilisés durant le traitement étaient en **verre** ou en **plastique(PVC)**.
- ✚ Lors de notre visite à **ADWAN chemicals company**, les chimistes du labo de la société en question nous ont recommandée de chauffer l'eau et d'utiliser l'eau courante (**l'eau de robinet**) puisque elle été **efficace** pour le traitement et la hausse de chaleur permet d'accélérer la dissolution du silicate de soude qui enveloppe les grains de sable.



Figure VI.21 : Le dispositif miniature pour le traitement de 50g de sable.



Figure VI.22 : Le dispositif du traitement hydraulique pour le traitement d'un kilo de sable.

VI.4.3 Les essais d'identification des sables (S2) et (S3).

VI.4.3.1 Analyse granulométrique (norme NF P 19-560).

Tableau VI.24 : Résultat de l'analyse granulométrique du sable (S2).

Tamis ouverture en mm	Masse de refus cumulé (Ri) en grammes	Pourcentage du refus cumulé $Ri/Ms*100$	Pourcentage des tamisats cumulé $100*(Ri/Ms)-100$
5	00	00	100
4	00	00	100
2	00	00	100
1	00	00	100
0.500	20	4	96
0.400	102	20	80
0.315	270	54	46
0.200	478	95.6	4.4
0.100	494	98.8	1.2
0.080	495	99	1
Fond	498	98	2

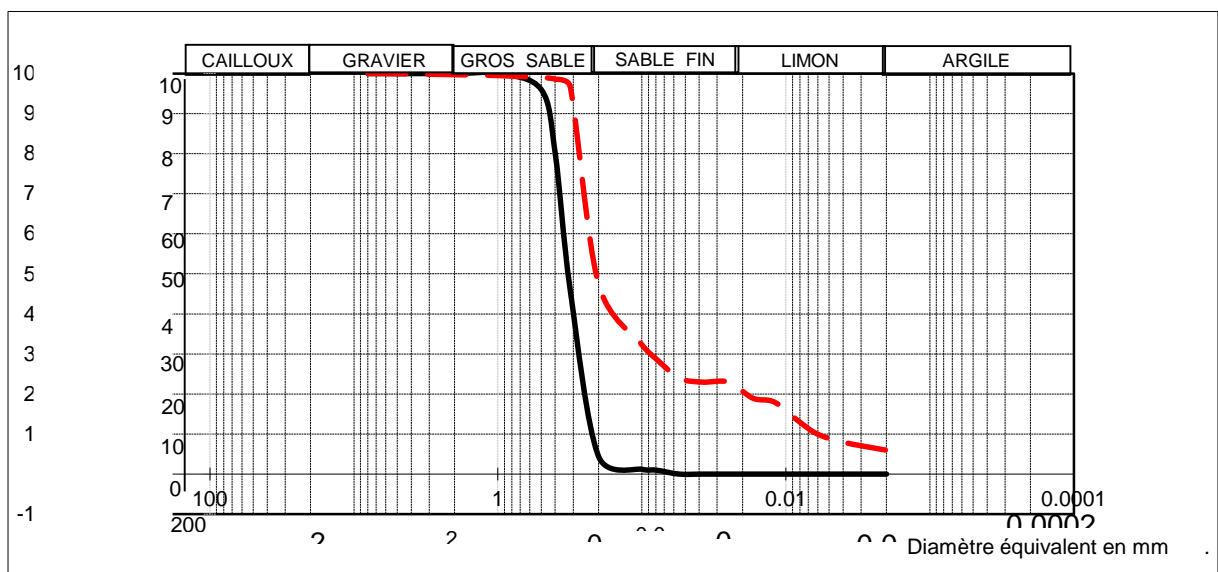


Figure VI.23 : La courbe d'analyse granulométrique du sable (S2).

Tableau VI.25 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable (S3).

Tamis ouverture en mm	Masse des refus cumulés (Ri) en grammes.	Pourcentage des refus cumulés $Ri/Ms*100$	Pourcentage des tamisats cumulés $100*(Ri/Ms)-100$
5	00	00	100
4	00	00	100
2	00	00	100
1	14	2.8	97.2
0.500	176	35.2	64.8
0.400	250	50	50
0.315	340	68	32
0.200	458	91.6	8.4
0.100	486	97.2	2.8
0.080	488	97.6	2.4
Fond	497	99.6	0.4

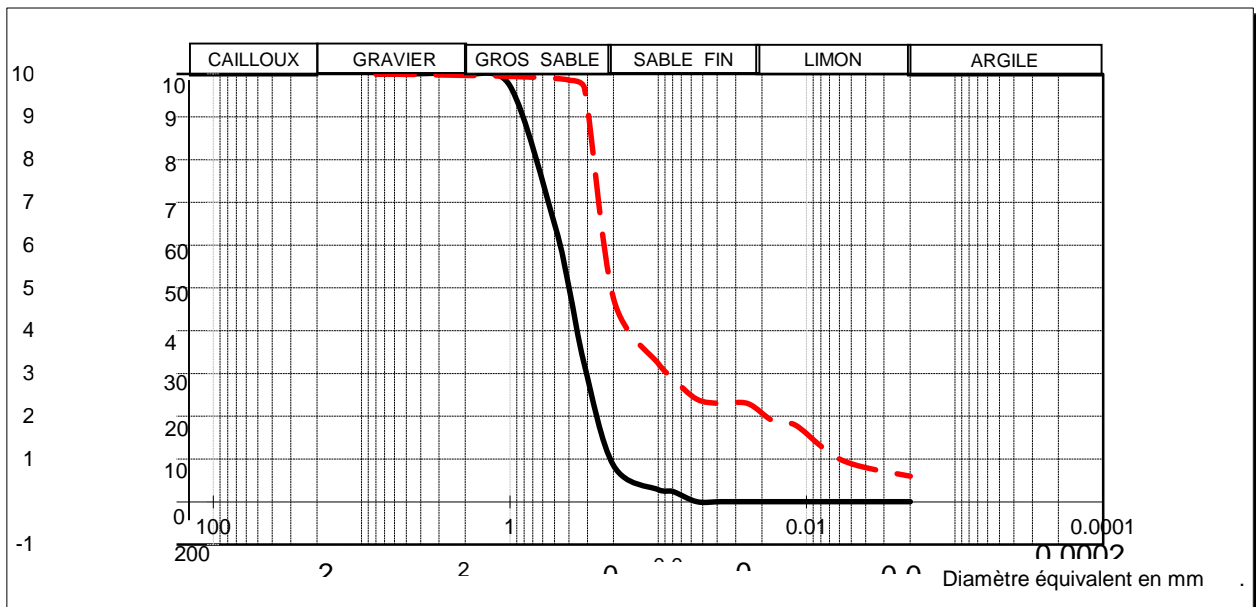


Figure VI.24 : La courbe d'analyse granulométrique du sable (S3).

Commentaires :

Après traitement hydrauliques, les sables (S2) et (S3) redeviennent des sables grossier sans une grande différence dans la répartition des grains du sable (SB), la taille moyenne des grains (d50) est égale à 0.3 mm.

VI.4.3.2 Résultat d'identification :

Tableau VI.26 : Résultats des essais identification.

	Sable (S2)		Sable (S3)	
D max (mm)	0.5		1	
Passant au 80 µm (%)	1		2.4	
VBS (gr/ 100g).	0.15		2.13	
CaCo₃ (%)	2		00	
Es (%)	Es piston = 92	Es visuel = 99	Es piston =54	Es visuel = 59

VI.4.4 Classement des sables (S2) et (S3).

D'après les résultats trouvés et on se basant sur le tableau de classification(GTR), nos matériaux peuvent être classé comme étant :

- **Sable au silicate de soude** désigné sable (S2) est classé comme **sol sableux et graveleux avec fines (B)** et une sous classe définit comme **un sable siliceux (B₁)**.

- **Sable au silicate de soude + bentonite** désigné sable (S3) est classé comme **sol sableux et graveleux avec fines (B)** et une sous classe définit comme **un sable argileux (peu argileux) (B₂)...voir l'annexe03**

VI.5 Résultat de la diffraction des rayons X :

Les résultats qu'on a trouvé par la technique de diffraction nous indique juste la composition cristalline des matériaux analysés, plus on peut déduire la forme des cristallites à partir des paramètres a, b, c et alpha, beta, gamma et le type de cristallites, dans notre cas du quartz et surtout du alpha quartz puisque nos matériaux nos pas été exposé à des températures très élevés durant le séchage.

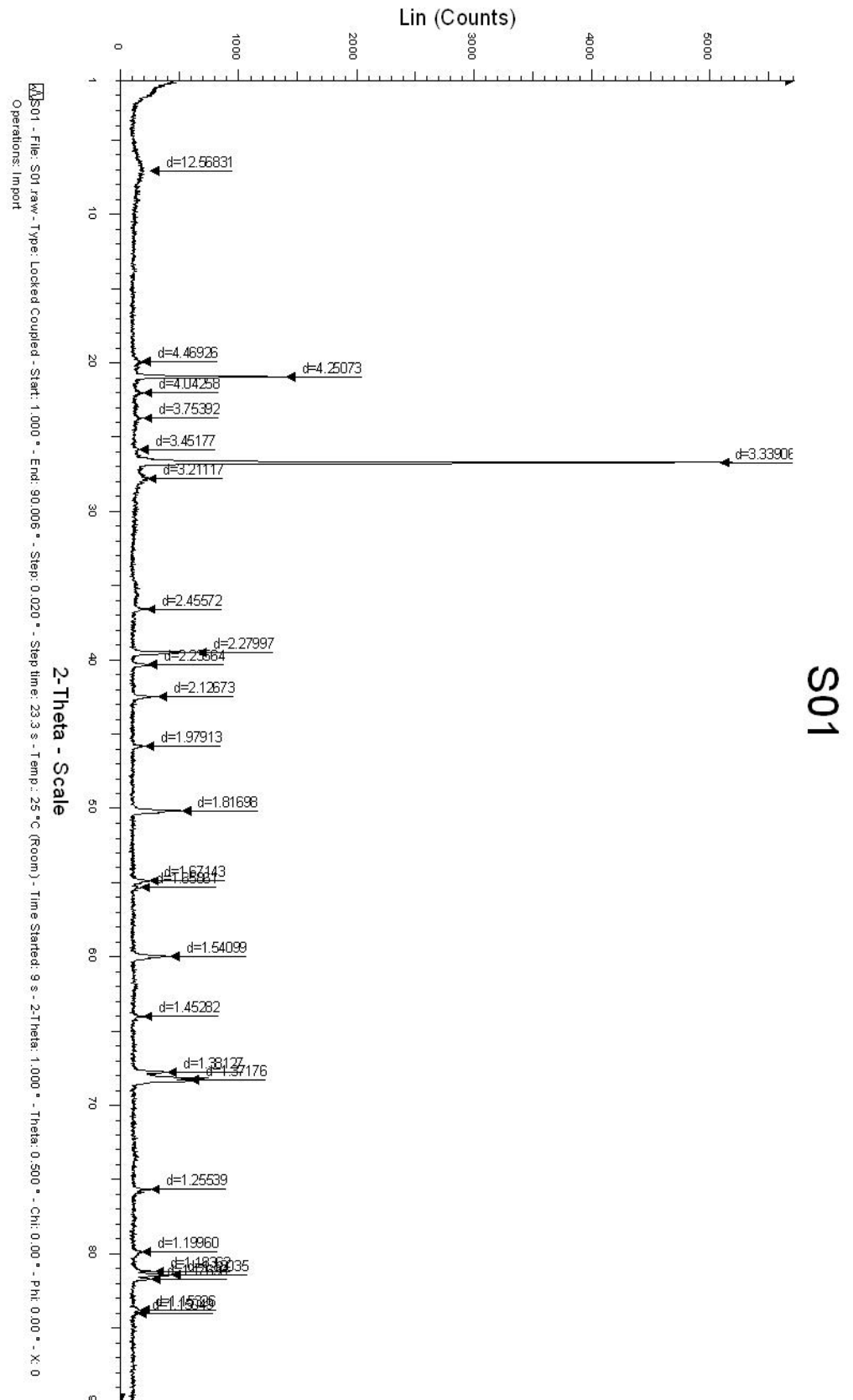


Figure VI.25 : Spectre (01) sable à vert non traité.

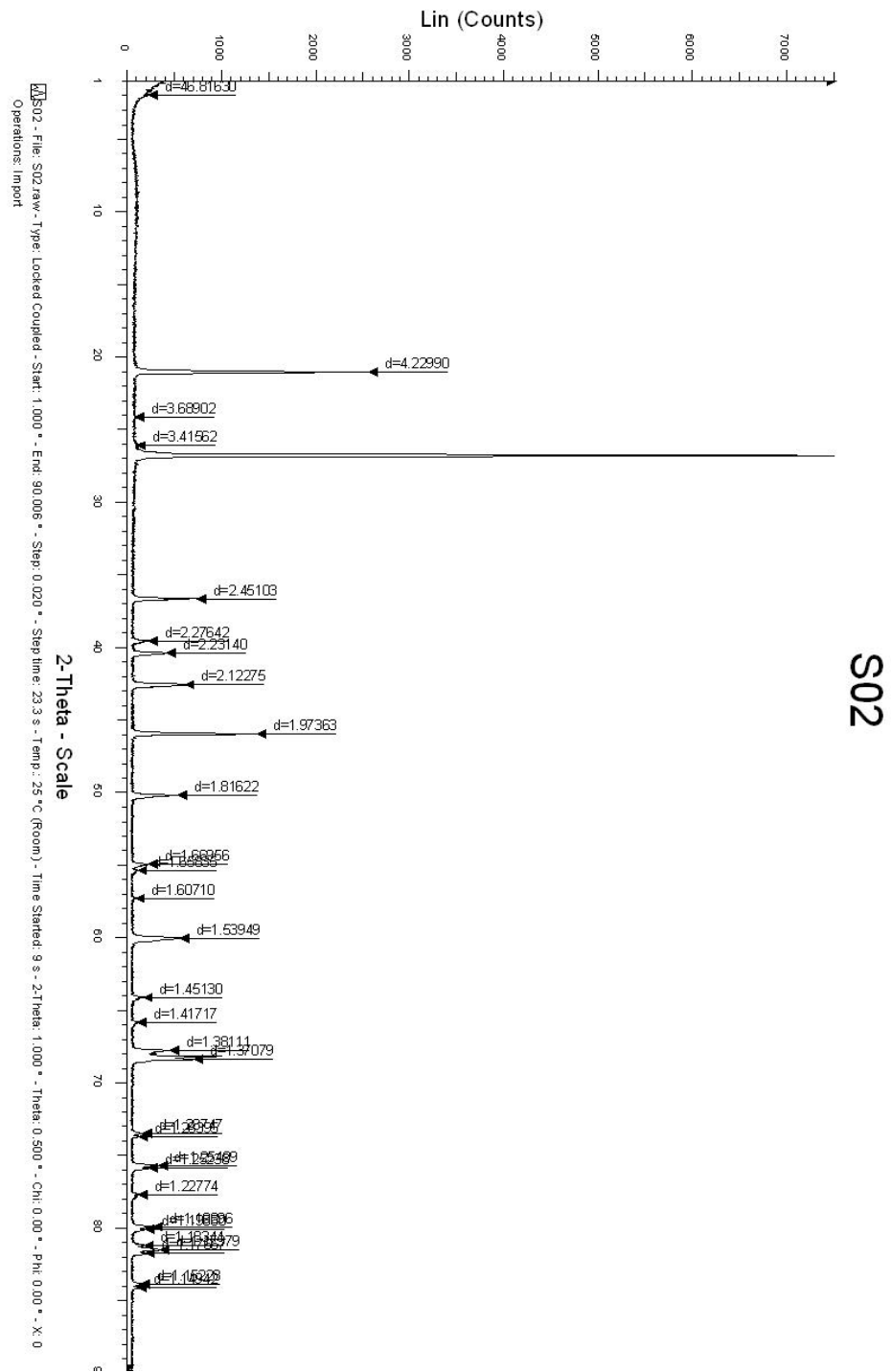


Figure VI.26 : Spectre (02) sable au silicate de soude non traité (ADWAN)

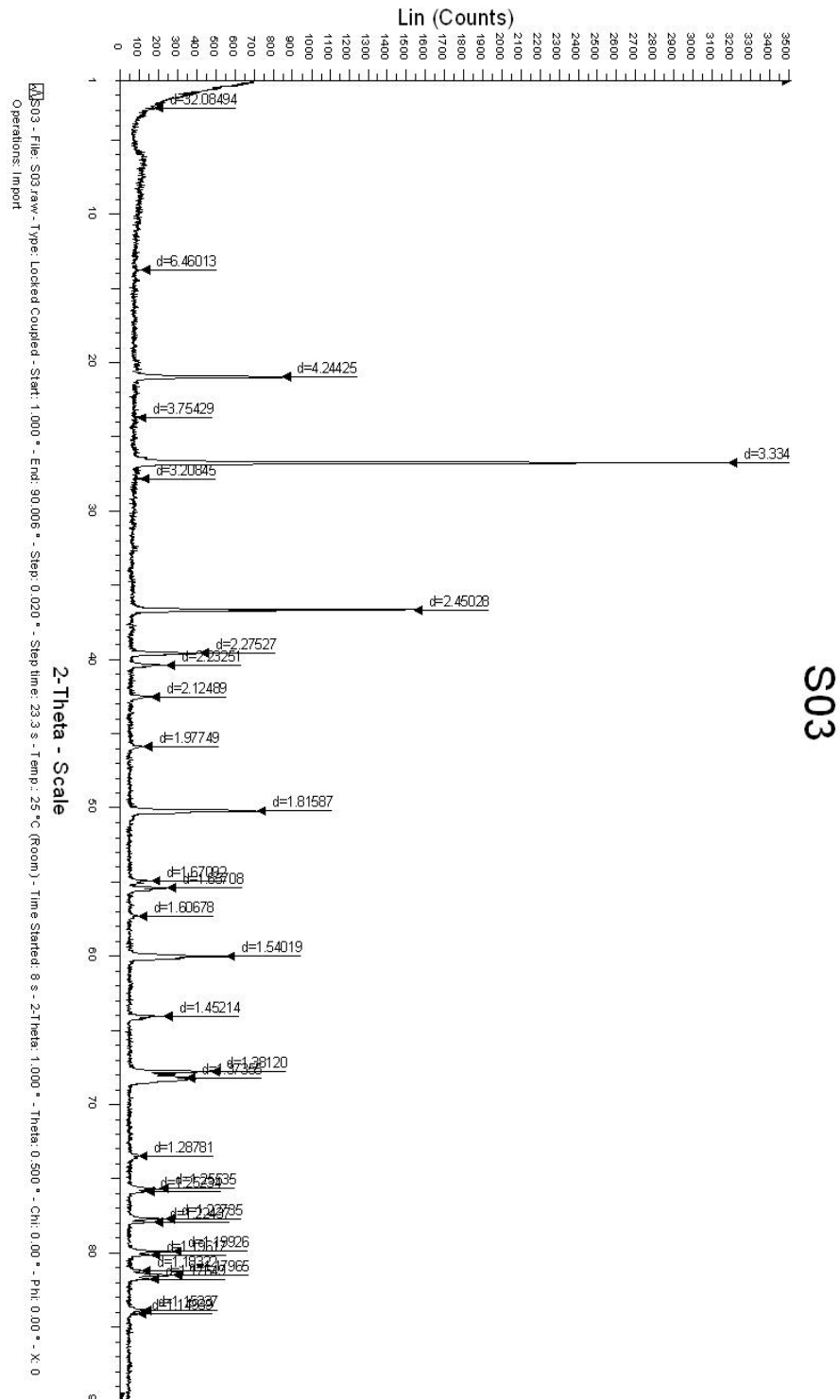


Figure VI.27 : Spectre (03) sable au silicate de soude non traité (Chlef).

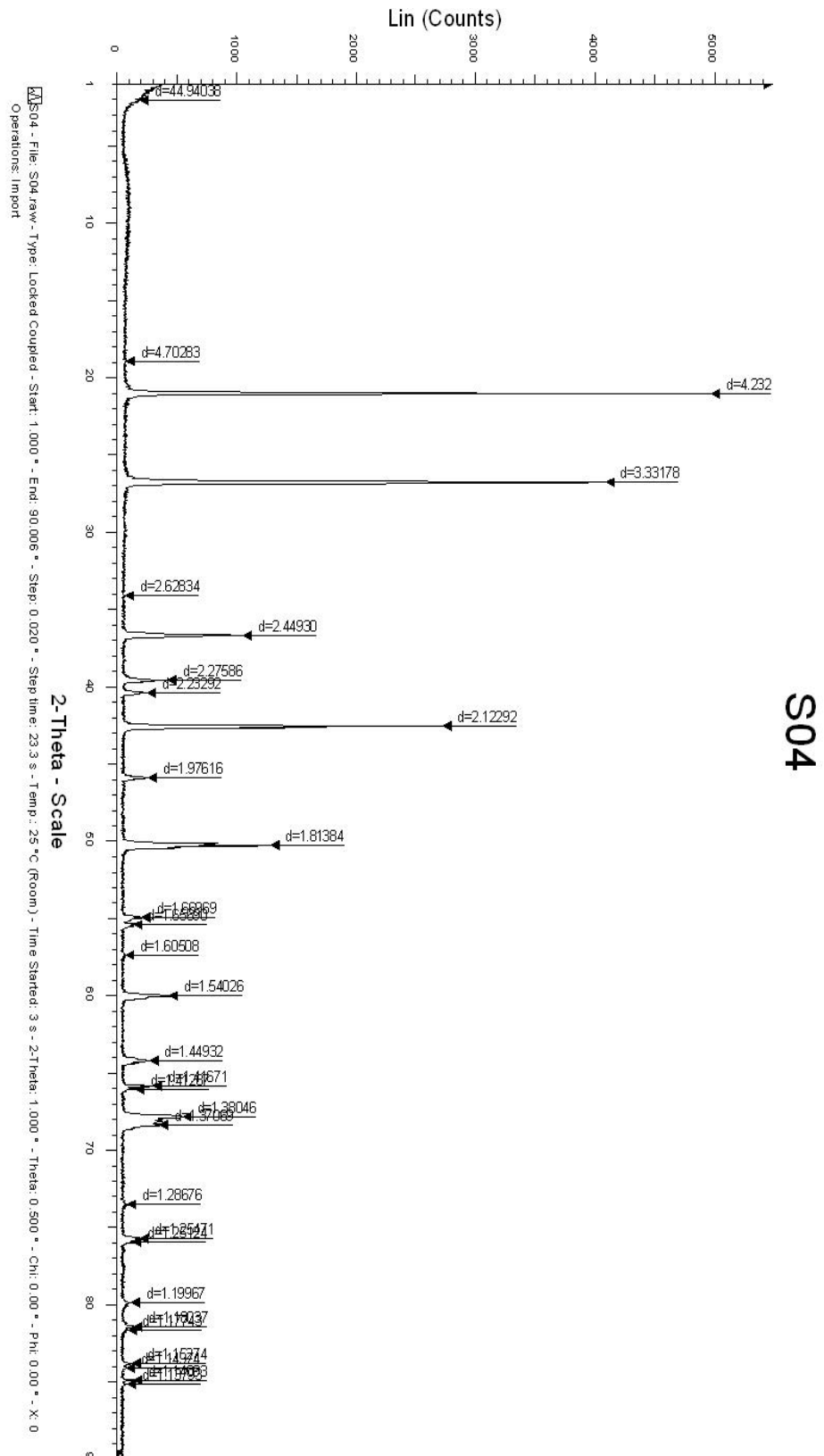


Figure VI.28 : Spectre (04) sable furanique (S4).

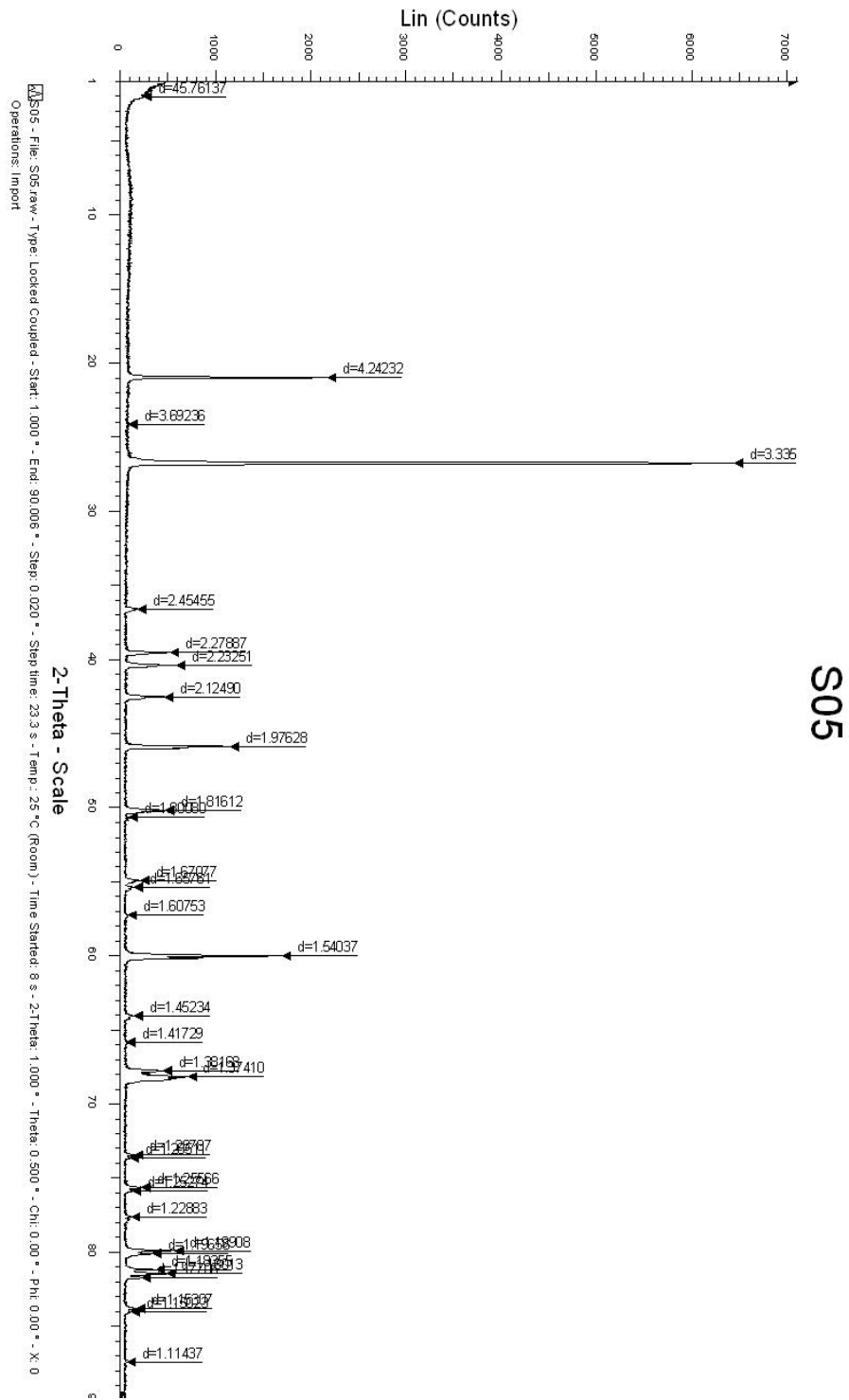


Figure VI.29 : Spectre (05) sable au silicate de soude traité hydrauliquement (ADWAN).

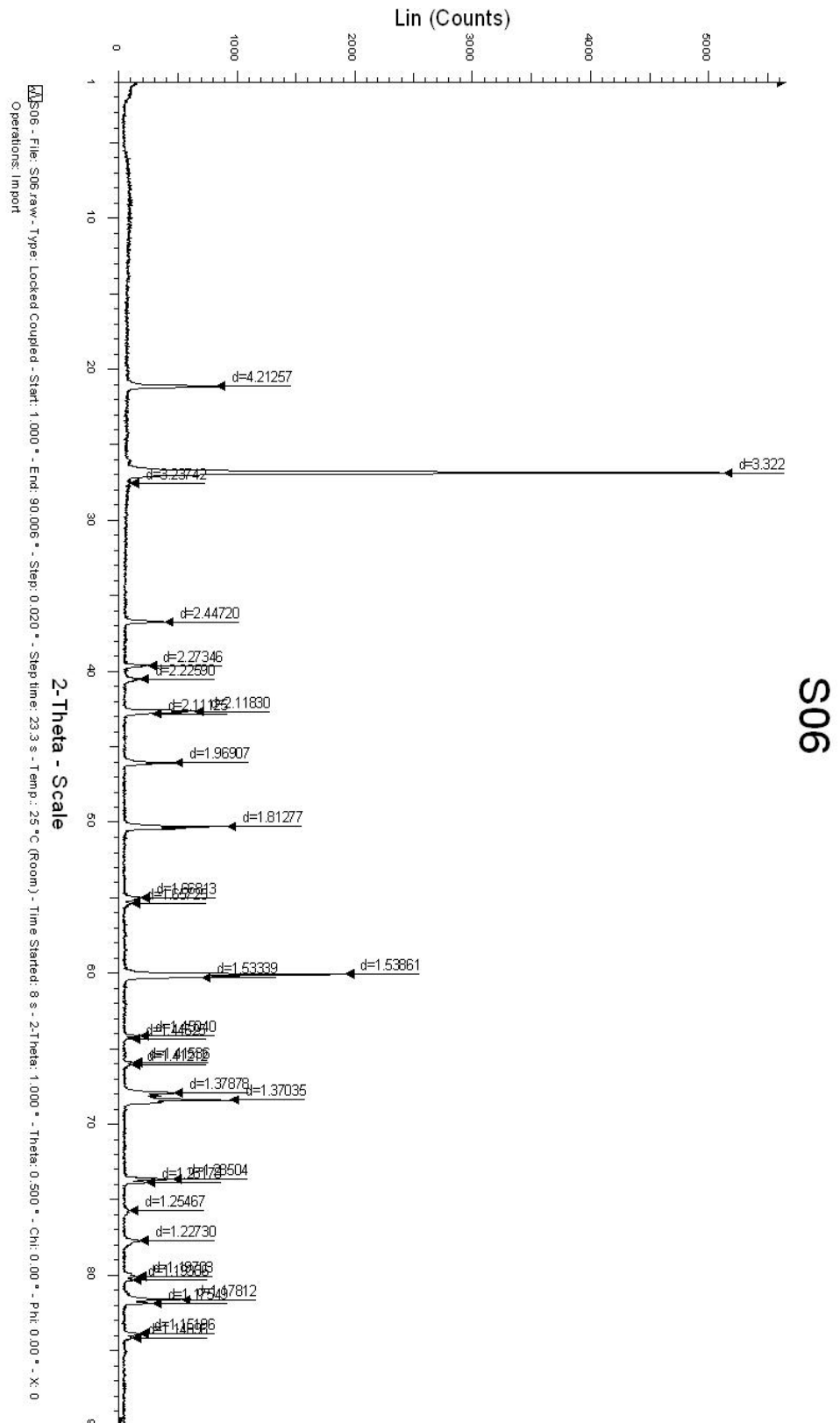


Figure VI.30 : Spectre (06) sable au silicate de soude traité hydrauliquement (Chlef).

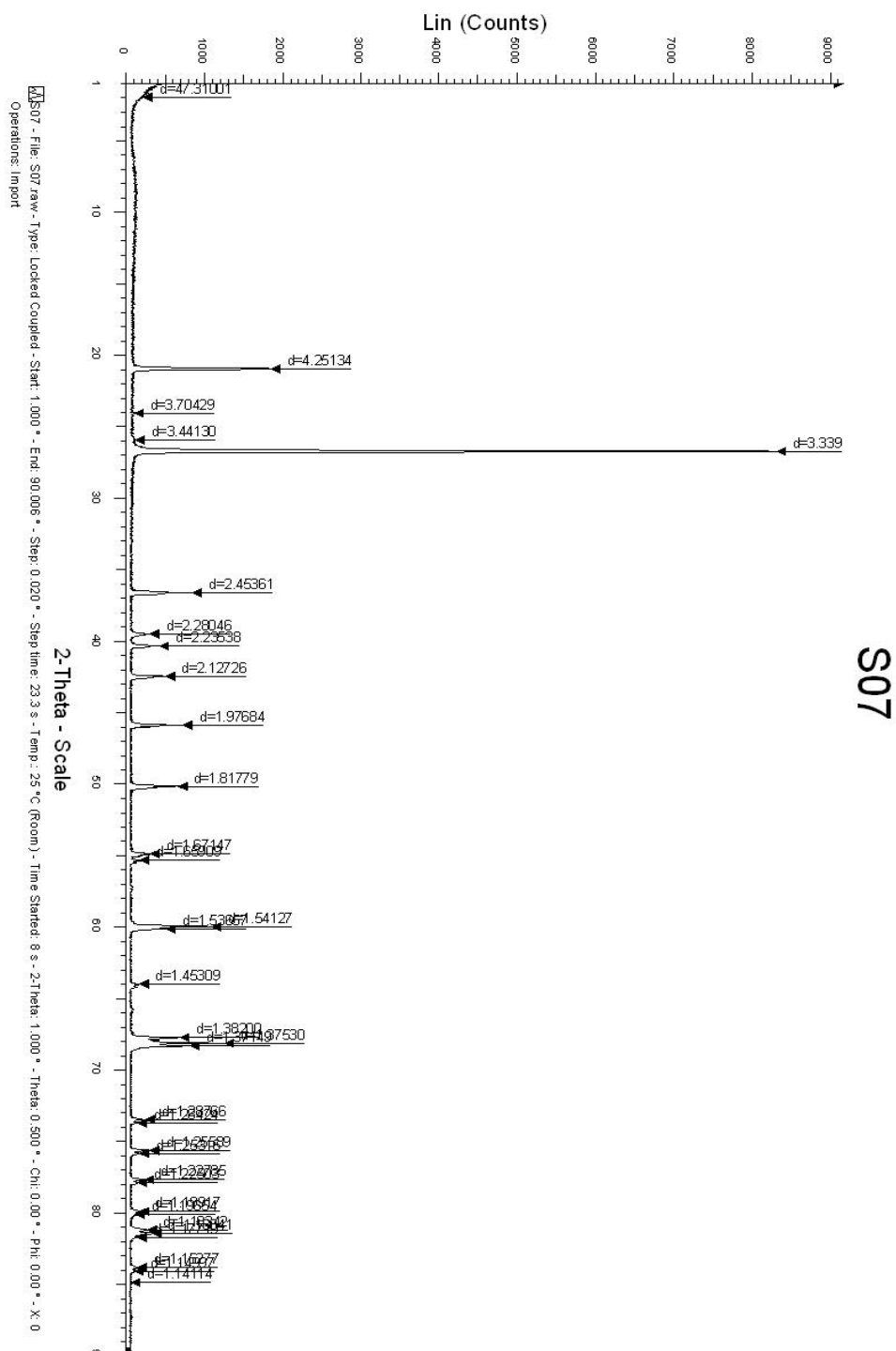


Figure VI.31 : Spectre (07) sable au silicate de soude plus Bentonite non traité (Adwan).

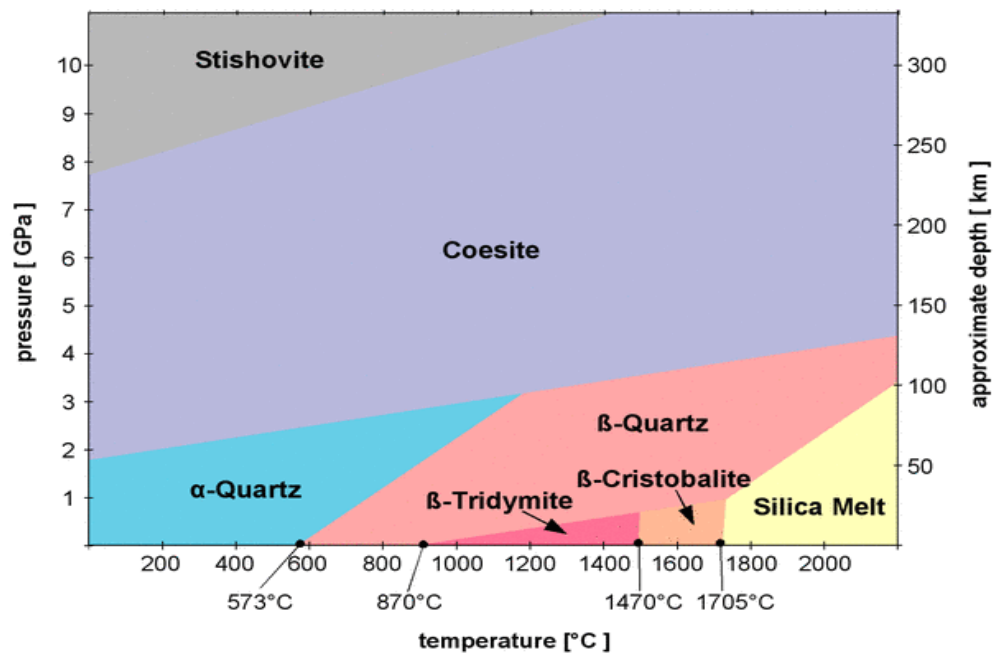


Figure VI.32 : Diagramme de stabilité du quartz.

VI.5.1 Interprétation des résultats :

D'après les pics représentés dans les graphes on peut déduire plusieurs informations concernant les matériaux analysés par la méthode de diffraction aux rayons X :

- Les plans cristallins qui sont contenus dans les échantillons de sables ont tous des formes hexagonaux avec ($b = a = 4.91344$, $c = 5.40524$) et ($\text{Alpha} = \text{Beta} = 90^\circ$) et $\text{Gamma} = 120^\circ$ et un groupe cristallographique $P=3221$.
- On constate d'après les spectres représentés dans les spectres de DRX une présence de quartz importante dans les sables ayant une cristallinité très élevée. (Voir l'annexe 04).
- On peut composer notre quartz comme un alpha quartz (Figure VI.32).
- D'après le spectre du sable au silicate de soude traité hydrauliquement (Chlef) contient du Feldspath (Figure VI.30).
- Le sable au silicate de soude + bentonite non traité (ADWAN) contient de la montmorillonite (Figure VI.31).

Conclusion :

Le sable à vert présenté durant notre travail de mémoire a montré une grande efficacité dans le domaine de la construction routière et plus précisément dans les couches de remblais et couches de formes en donnant des résultats très satisfaisant en ce qui concerne les essais de portance (Proctor, CBR). Les sables (S2) (S3) peuvent présenter des caractéristiques géotechniques énormes cela après des essais d'identifications.