



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Thème :

Méthode de caractérisation des poudres de sable.

Proposé et dirigé par :

Dr. FARSI Chouki

Présenté :

ZANAT Nour El Houd

RAHMANI Achouak

Soutenu publiquement devant le jury:

SAIB Cherif

FARSI Chouki

MOUSSAOUI Nafissa

MCA

MCA

MAA

Président

Encadreur

Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2021

Remerciement

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre travail et qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions dans un premier temps remercier, tous le *COLLECTIF DU DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE*, et toute L' *EQUIPE PEDAGOGIQUE* de l'université de M'sila sans oublier les responsables des laboratoires qui nous ont rendus de grands services

Notre encadreur C.FARSI, et notre enseignant à l'université de M'sila, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.

Nous remercions également les intervenants professionnels responsables de notre formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Le collectifs *du LABORATOIRE DE PHYSIQUE* de diffraction des rayons x pour leur aide a relever les résultats obtenus en des analyses de DRX qui nous a beaucoup appris sur les défis à relever dans le monde des poudres et leurs analyses.

Messieurs les *RESPONSABLES ET GUIDES* dans le lieu du stage l'M E I de M'sila, pour nous avoir accordé des entretiens et avoir répondu à nos questions sur la culture du monde des affaires, ainsi que leur expérience personnelle. Ils ont été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire.

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont soutenu, d'une manière ou d'une autre,

Nous concluons notre déclaration en remerciant les membres du jury pour l'honneur qui nous a permis d'accepter de lire et de diriger ce travail.

« *Que la paix d'Allah soit toujours avec vous* » »

Dédicace

nous tenons à dédier ce mémoire :

*À nos **chères mères** et nos **chers pères**, en signe de gratitude pour leur dévouement, leur soutien continu tout au long de nos années d'études, leur sacrifice illimité, leur réconfort moral, ils ont déployé de grands efforts pour nous enseigner, éduquer et avoir une vision en vue d'atteindre cet objectif.*

*À tous les membres de notre famille et **chers amis** en son nom, à ceux qui nous ont aidés à faire ce travail humble et à les encourager, ainsi qu'à tous nos enseignants.*

Enfin à tous nos collègues de la promotion de Génie Mécanique

Sommaire

Introduction générale:.....Error! Bookmark not defined.01

Chapitre I La Granulométrie

I.1 Définition :.....	04
2 .Analyse des poudres.....	06
2.1.L'analyse granulométrique.....	07
I.3. les techniques d'analyse granulométrique :.....	07
I.3.1. Généralités:.....	08
I.3.2.:Microscope.....	08
I.3.3.le tamisage.....	10
I.3.3.1. Le principe de tamisage. :	11
I.3.4.Granulométrie laser:.....	11
I.3.4.1. Le principe de Granulométrie laser :.....	11
I.3.4.a. La théorie de Fraunhofer :.....	12
I.3.4.b La théorie de Mie	12
I.3.4.2.Expression et résultats :.....	14
I 3.5.Spécifications des poudres selon la Pharmacopée Européenne 7 ^{ème} édition	15
I 4.QUALIFICATION DE VOS POUDRES.....	16
I 4.1.Qu'est-ce que la qualification des poudres ?.....	16
I 5.Exemple de courbe de granulométrie laser pour du sucre glace.....	17
5.1 .Morphologie des particules	17
6 - Pourquoi réaliser des tests sur vos poudres ?.....	17
7 .Exemples de types d'écoulement	18
A - Écoulement en masse.....	18
B - Écoulement en cheminée.....	18
8- Nos solutions pour vérifier la conformité de vos poudres.....	18
9 - Quels équipements ?.....	19
9.1 - Rhéomètre pour tester l'écoulement des poudres	19
9.2.Tamis de contrôle pour analyses granulométriques.....	20
10 - Paramètres à prendre en compte.....	20
11 - Solutions / résultats.....	22

Chapitre II GENERALITES SUR LES TYPES DE SABLE

II.1. Introduction :.....24

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

II.2. Definition	24
II.3.Les caractéristiques du sable	24
II.4.Clasification de sable.....	25
II.4.1. Selon son origine :	25
II.4.2. Selon sa composition	25
II.4.3.Selon sa densité	26
II.4.4.Selon sa forme	26
II.5.les Types de sable:.....	27
II.5.1.Sable alluvionnaire :	27
II.5.2 Sable de carrière:	27
II.5.3.Sable de d'une :	28
II.6.Principaux des sables disponible	28
II 7.Propriété du sable :.....	29
II.8.Formation de sable :	29
II .9.Composition minéralogique :	30
10. Exemple FINESSE de sable.....	30
II 11.Utilisation de sable.....	30
12 LE SABLAGE.....	31
12.1.Présentation du sablage.....	31
13.Le choix de l'abrasif.....	34
14.Impact sur l'environnement et la société.....	34
15.La poussière du Sahara, un engrais naturel.....	35
16.TECHNOLOGIE.....	36
17.Recyclable, décarboné et biodégradable.....	37
18.Informations complémentaires.....	40

Chapitre III Les méthodes de caractérisation des poudres en sable

Introduction:.....	42
III.1 Granulométrie laser.....	42
III.2.Caractérisation structurale et microstructurale:.....	42
III.2.1.Diffraction des rayons X :.....	42
III.2.1.a.Elaboration des échantillons :.....	42
III.2.1.b.Appareillage et traitement des données :.....	43
3. Analyse XPS.....	45

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

3.1.Analyse qualitative.....	45
3.2.Analyse quantitative.....	46
3.3.Exemples.....	46
4.Aventage et inconvénients.....	47
III.5.Microscope optique à balayage :.....	48
III. 5.1.Elaboration des échantillons :.....	48
III.5.2.Appareillage:.....	48
Chapitre IV Partie Exprimentale.....	49
1.Introduction.....	50
2. Analyse granulométrique.....	50
3.But de l'essai de l'analyse granulométrique.....	51
4.Matériel nécessaire.....	51
5.Mode opératoire.....	52
6.Masse volumique absolue.....	54
7.Masse volumique apparente à l'état compact.....	56
Conclusion générale.....	60
Bibliographie.....	62
Résumé	64

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : La forme des particules.....	04
Figure2 : D'après la Pharmacopée Européenne 7.0 : Mesures courantes de la taille des particules.....	09
Figure 3 : des tamis d'analyse granulométrique.....	11
Figure 4 : Exemple de résultat obtenu par granulométrie laser	13
Figure 5 :Distribution et relation entre la taille des particules en fonction de leurs volumes.....	15
Figure 6 : exemple d'un poudre.....	16
Figure7 :exmple pour les tests sur les poudres.....	17
Figure 8 : Écoulement en cheminée.....	18
Figure 9 :courbe pour tester l'écoulement des poudres	20
Figure 10 :D'après Ter Borg : probabilité d'occurrence d'écoulement en masse en fonction de l'angle du silo.....	21
Figure 11 :Protocole de mesure : détermination du lieu d'écoulement par le test de cisaillement de Jenike.....	22
Figure 12 :sableuse et cabine de sablage	31
Figure 13 :Cabine de sablage.....	32
Figure 14 :Desin en désert Algérien.....	36
Figure 15 : Béton durable en sable du désert algérien.....	36
Figure 16 : Diffractomètre de poudres (Appartenant au laboratoire de physique ,université de Msila □/□).....	44
Figure 17 :exemple des résultat DRX DE SABLE.....	44
Figure 18 :Exemple de spectre de survol XPS d'une série de films d'oxyde d'alliages Ni-Cr-Mo (alliages résistants à la corrosion dans les environnements oxydants et réducteurs).....	45
Figure 19 :Exemple de spectre à haute résolution XPS d'un échantillon d'un film de PMMA (polyméthacrylate de méthyl.....	46
Figure 20 : Microscope électronique à balayage (MEB-FEG).....	48

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Figure 21 : Sable de la région de bousaada.....	50
Figure 22 : Machine à tamiser électrique de laboratoire de Génie Mécanique du type :KERN.....	51
Figure 23 : Colonne de tamis avec des mailles respectivement de haut en bas : 5mm ;2.5mm ;1.25mm ;0.63mm ;0.315mm ;0.160 mm;0.08mm.....	52
Figure24 :balance utilisée pour le peusage du type KERN.....	53
Figure25 :Courbe represente DRX de l'échantillon (+0,08)	56
Figure26 :Courbe represente DRX de l'échantillon (-0,08)	57
Figure 27 :échantillon de sable dont le diamètre est inférieur à 0,08.....	57
Figure 28 : échantillon de sable dont le diamètre est supérieure à 0,08.....	58
Figure 29 : grenaille métallique en différents diamètres.....	58
Figure 30 : grenaille métallique en différents diamètres photomicrographie.....	58
Figure 31 : Micro Bille de verre en différents diamètres.....	59
Figure 32 : Micro Bille de verre photomicrographie.....	59

LISTE DES TABLEAU

Tableau 1 Diamètres équivalents.....	05
Tableau 2 Exemple de résultat obtenu par granulométrie laser.....	14
Tableau 3 :Classification des sables en fonction de leurs compositions (teneurs en % massique)	26
Tableau 4 : Les principales propriétés des matériaux disponibles	29
Tableau 5 :Analyse chimique de sab.....	30
Tableau 6 :Machine et leur utilisation.....	32
Tableau 7 : les application et leur résultat et avantage.....	33
Tableau 8 :fiche technique de CORINDON BRUN[MEI].....	38
Tableau 9 :fiche technique de grenaille métallique.....	39
Tableau 10 : Analyse granulométrique du sable de l'état naturel après Son homogénéisation	54
Tableau 11 : Résultats de la masse volumique absolue de sable.....	55

Introduction générale :

Dans le présent mémoire on a commencer à donner une description sur les poudre et leur utilisation L'utilisation des poudres est très répandue dans le domaine mécanique , en effet la fabrication des matériaux et composite sous form solide se fait principalement à partir de mélange de poudre (principe actif et excipients).

E. Doelker a montré que l'utilisation de ces poudres est conditionnée par leurs caractéristiques primaires telles que la structure cristalline, la taille et la forme des particules constituantes. La connaissance des propriétés des matières premières utilisées lors du développement des forms solides devient indispensable pour la mise au point d'une formulation et d'un procédé de fabrication fiable. Il est conventionnel de considérer les poudres comme étant des systèmes particulières que l'on peut classer en deux catégories différentes selon le comportement général du système (TRAINEL, 8):

- Les poudres à écoulement libre : Ces poudres s'écoulent très facilement et ne posent aucun problème de montage. Par contre, chaque particule d'une telle poudre a une forte mobilité individuelle. Les mélanges composés avec ces poudres ont donc une forte tendance à ségréger.
- Les poudres cohésives : Ces poudres possèdent de fortes liaisons interparticulaires devant leur poids tels que les forces de Van Der Waals, les forces électrostatiques...
- Ces liaisons peuvent entraîner la formation d'agglomérats. Si de telles poudres posent des problèmes d'écoulement ou de stockage, les mélanges qu'elles composent n'ont pas de fortes tendances à ségréger.
- Ces deux comportements types sont influencés par les caractéristiques des matières premières et par les conditions opératoires. Les caractéristiques les plus importantes pouvant influencer ces comportements sont les suivantes (GUYOT, 2 ; GILLARD, 13 ; 23):
- Densité particulaire et distribution granulométrique: la masse d'une particule est proportionnelle à son volume (donc à sa taille) et à sa densité. D'après la relation cidessous, plus les poudres ont des masses (m exprimée en grammes) importantes, plus la gravité ou pesanteur (g exprimée en mètres par seconde) a un effet prononcé avec une résultante des forces de gravité (F_g)
- Forme et propriétés de surface des particules : les particules pratiquement sphériques, qui sont par exemple produites par enrobage ou atomisation, ont un meilleur écoulement que des particules de formes irrégulières. Des particules rugueuses ont une mobilité moins importante que des particules plus lisses.
- Friabilité des particules : la formation de fines peut fortement influencer la cohésion d'un système particulier. Les fines peuvent augmenter la cohésion du système qui entraîne un mauvais écoulement. Elles sont également responsables de dé mélange.
- La présence de charges électrostatiques : Des phénomènes électrostatiques peuvent apparaître à la suite de frottements inter particuliers ou de frottements avec la paroi de l'équipement. Ces forces électrostatiques sont d'autant plus importantes devant les forces de gravité que les particules mises en jeu sont de petite taille. Il apparaîtra également que des particules de charge apparaîtront avec un effet stabilisant sur le mélange lorsque des particules de même charge s'accéléreront le phénomène de ségrégation. Quoiqu'il en soit, la taille des particules reste un paramètre prépondérant du point de vue des charges électrostatiques puisque l'électricité est un phénomène de surface. Ou, plus un

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

solide est divisé, plus sa surface est grande donc plus les contacts interparticulaires seront nombreux et susceptibles de générer l'électricité statique.

- La connaissance de la taille, de la densité, de la forme, de l'état de surface, de la teneur en eau et de la friabilité des particules est donc indispensable pour mettre au point une forme galénique et/ou une méthode de fabrication appropriée. Cette étude propose de voir l'impact de la granulométrie sur des procédés de fabrication à travers des exemples.
- Dans une première partie, les techniques d'analyse granulométrique seront acquises.
- La mise au point d'une méthode d'analyse granulométrique fiable est indispensable avant toute étude portant sur les caractéristiques des poudres.
- Puis nous avons parlé de sable et l'importance de son utilisation dans le monde ,surtout une cause de sa grande quantité en Algérie en asseyant de contribuer avec les chercheurs des différentes spécialités spécialement pour en matière de production de solutions sonsées .
- Le types de sables comme additifs pour l'obtention de plusieurs types de produits, proviennent de sources naturelles ou de sous-produits d'autres industries [2]. La compacité de la pâte de ciment par exemples peut être améliorée par la formation des silicates de calcium hydratés. Ces particules fines siliceuses ont évolué d'un rôle pouzzolanique certain et ont contribué à l'augmentation de la résistance et de la durabilité des produits auxquels elles sont incorporées [3,4].
- Dans ce mémoire, nous avons concentré nos études principalement sur l'effet de l'ajout du sable de l'état naturel ou finement broyé sur les propriétés physicochimiques et mécaniques.
- La Diffraction des Rayons X (DRX) est une technique de caractérisation des matériaux cristallisés, qu'ils soient massifs, sous forme de poudre ou de dépôts. En laboratoire, cette technique est principalement appliquée aux matériaux inorganiques : minéraux, métaux, alliages, céramiques....

Chapitre I

La granulométrie des poudres

I. Généralités sur la granulométrie :

1. Définition

D'après la définition de l'AFNOR, la granulométrie est une science qui a pour objet la mesure de la taille et de la forme des particules élémentaires qui constituent les ensembles de grains de substances diverses, telles que farines, poudres, sables, etc. Elle est définie par la répartition statistique des particules qui composent la poudre en fonction de leurs dimensions. C'est une caractéristique fondamentale, en relation directe avec toutes les opérations unitaires de broyage, séparation, mélange et transfert [1]. La granulométrie joue aussi un rôle important sur la vitesse de dissolution in vitro et in vivo [2]. D'après la loi de Noyes et Whitney, la vitesse de dissolution est proportionnelle à la surface offerte à la dissolution or plus un solide est divisé, plus sa surface est grande.

La forme des particules est souvent difficile à définir, les particules ayant rarement des formes sphériques ou régulières. Les formes les plus courantes sont les suivantes :

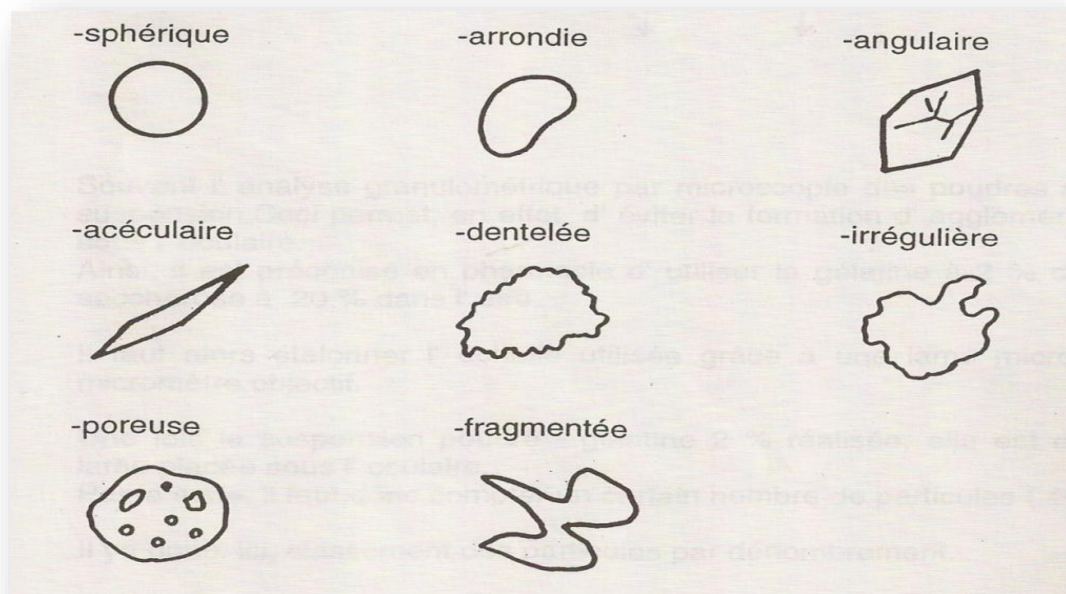


Figure 1 : La forme des particules[2]

La taille des particules est toujours exprimée par un diamètre. Pour une sphère il existe une définition non ambiguë de diamètre. Mais pour les particules ayant des formes variées, les diamètres utilisés sont les diamètres de sphères équivalentes (équivalent spherical diameter ESD, en anglais).

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Un diamètre équivalent correspond au diamètre de sphères identiques d'une poudre imaginaire qui mesuré par la même technique présenterait la même valeur que la poudre analysée. Il existe différents diamètres équivalents :

Tableau 1 Diamètres équivalents[2]

Désignation	Non	Propriété équivalente la sphère	Expression
D_v	Diamètre en volume	Volume	$V = \frac{\pi}{6} d^3_v$
D_s	Diamètre en surface	Surface	$S = \pi d^2_s$
D_{stk}	Diamètre de Stokes	Vitesse de chute libre suivants la loi de stokes (Re _t < 0,2) avec $Re_t = \frac{\rho u d}{\mu}$	$d_{stk} = \sqrt{\frac{d_v}{d_d}}$ $d_{stk} = \sqrt{\frac{d_v^3}{d_d}}$
D_{sv}	Diamètre en Surface spécifique	Surface /Volume	$d_{sv} = d_v^3 / d_s^2$
D_d	Diamètre de poussée	Résistance au déplacement dans le meme fluide, a vitesse (régime de stokes)	$F_d = 3\pi d_d \mu u$
D_A	Diamètre de maille	Passage au meme Ouverture carrée	

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Les principales techniques d'analyses granulométriques utilisées sont :

1.1 La microscopie (optique et / ou électronique) : indispensable dans un premier temps car elle permet de se faire une idée la forme et de la répartition granulométrique globale.

1.2 La méthode des tamis : méthode rapide et simple pour des poudres pas trop fines ($>90 \mu\text{m}$)

1.3 La granulométrie laser :

méthode de mesure pour les poudres même très fines Ces différentes méthodes seront détaillées ci-après. Pour des formes irrégulières, le résultat est influencé par la méthode de mesure utilisée.

La granulométrie peut être modifiée par l'humidité.

Il est donc important de contrôler l'humidité des matières avant leur mise en œuvre et/ou de travailler dans les conditions d'hygrométrie contrôlées si nécessaire.

La granulométrie peut être modulée par broyage ou par la maîtrise du procédé de synthèse ou de production de la matière.

La maîtrise des paramètres des broyeurs, des cristal liseurs, des séparateurs est nécessaire pour la maîtrise de la granulométrie.

2. Analyse des poudres :

Pour la caractérisation physique des particules, il faut commencer par le laboratoire d'analyses granulométriques [3]

L'analyse granulométrique désigne l'opération permettant de mesurer la taille des grains présents dans un échantillon selon leurs caractéristiques (poids, taille...) pour en comprendre leur nature.

Ce type d'analyse peut être réalisé par granulométrie laser (voie liquide ou humide, ou par voie sèche), par tamisage ou par sédimentation

Le support et l'expertise d'un laboratoire dans l'analyse granulométrique permet aux industriels de mesurer la qualité de leurs poudres, formulations, dispersions ou matériaux, quel que soit le secteur d'activité [..., pharma.]

Quel que soit le secteur industriel (Industrie Chimique, Pharmaceutique, Cosmétique, Bâtiment, Agroalimentaire) ou l'application de vos produits, l'expertise et les services d'analyses granulométriques nous permettent de vous offrir la meilleure qualité de vos échantillons (poudres, solutions, émulsions, dispersions).

L'analyse granulométrique et la caractérisation de poudre. Se basent sur les prestations suivantes :

- Analyse granulométrique par granulométrie Laser (courbe de distribution de la taille des particules, détermination de D50...)
- Analyse de particules métalliques

- Analyse de poudres par DRX, par Microscopie MEB – EDX
- Analyse granulométrique sur dépôts et précipités en solution par MEB, granulométrie laser
- Analyse et mesure de surface par BET
- Analyses chimiques sur pièces de faible dimension
- Analyses de céramiques
- Analyse de particules et contamination en laboratoire
- Caractérisation de poudre hydroxyapatite selon la norme NF ISO 13779-3
- Caractérisation de nanomatériaux et granulométrie
- Développement de méthode analytique et validation de méthode d'analyse granulométrique
- Distribution de la taille des particules et nanoparticules par granulométrie laser, DLS et MEB (Microscopie Electronique à Balayage)
- Etude morphologique de microparticules, analyses de nanoparticules par MEB couplé à une sonde EDX
- Études de porosité et de perméabilité par pycnométrie Helium He, porosité Mercure Hg...
- Le laboratoire FILAB est agréé Crédit Impôt Recherche (CIR).

A travers nos trois niveaux de prestations - l'analyse, l'expertise et l'accompagnement R&D - FILAB accompagne les entreprises de tout secteur et de toute taille, dans la résolution de leurs problématiques industrielles de position la clients, savoir-faire et l'expérience de son équipe.[3]

3. Les techniques d'analyse granulométrique

3.1. Généralités

Une mesure de la distribution de la taille des particules est effectuée dans le but de relier cette analyse à une propriété ou à un comportement de la poudre. Lors du choix d'une méthode de mesure de la distribution de la taille des particules, l'application finale doit être toujours prise en compte. Ainsi, par exemple, il importe de savoir si la poudre sera utilisée sèche ou dispersée dans un liquide.

Cependant, les différentes méthodes de mesure de distribution de la taille des particules ont souvent des limites d'utilisation.

Les particules constitutives d'une poudre font l'objet d'une distribution de taille qui peut être un modèle ou bimodale. Pour limiter le nombre de classes granulométriques, une distribution avec des classes en progression géométrique est préférée.

La moyenne d'une distribution est une mesure de la tendance centrale. Parmi les tendances centrales les plus utilisées on trouve ainsi le mode, la médiane et la moyenne. Le mode est le diamètre le plus fréquent dans une distribution ; il correspond au maximum de la courbe de fréquence.

La médiane représente la valeur d'où la fréquence totale des valeurs au-dessus et au-dessous est identique (autrement dit, on trouve le même nombre ou total de particules au-dessous de la médiane' au-in) . La moyenne doit quant à elle être calculée et elle détermine le point où les moments de la distribution sont égaux. Pour une distribution normale, le mode, la moyenne et la médiane coïncident ; alors qu'ils diffèrent dans le cas d'une distribution non normale.

Les méthodes d'analyse granulométrique doivent être développées de façon à être:

- ✓ Reproductibles
- ✓ couvrir un large spectre granulométrique
- ✓ rapides
- ✓ peu onéreuses
- ✓ utiliser peu de produit

3.2.Par microscope

Cette technique fondamentale est décrite à la Pharmacopée 7ème édition .

C'est la seule méthode qui permet d'analyser la morphologie des particules de façon directe. Cependant, avant de la mettre en œuvre, il faut d'abord définir quel diamètre on va mesurer (cf figure 2) :

- ✓ **Diamètre de Martin:** diamètre au point qui divise une particule orientée de façon aléatoire en 2 aires projetées égales
- ✓ **Diamètre de Féret :** Distance entre deux tangentes parallèles à des côtés opposés de la particule
- ✓ **Longueur:** plus grande dimension de bord à bord d'une particule orientée parallèlement à l'échelle oculaire.
- ✓ **Largeur :** plus grande dimension mesurée perpendiculairement à la longueur

Cette méthode mesure une répartition granulométrique en nombre réalisé sur au moins 400 particules. Couplée à un logiciel d'analyse de données, les observations peuvent être obtenues et beaucoup prises à partir de ces observations microscopiques. On peut notamment calculer différents facteurs de forme caractérisant ainsi la particule

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Il est à noter qu'avant toute observation microscopique, une préparation rigoureuse de l'échantillon à analyseur est nécessaire. En effet pour que l'analyse microscopique soit efficace, certaines conditions doivent être remplies [4] :

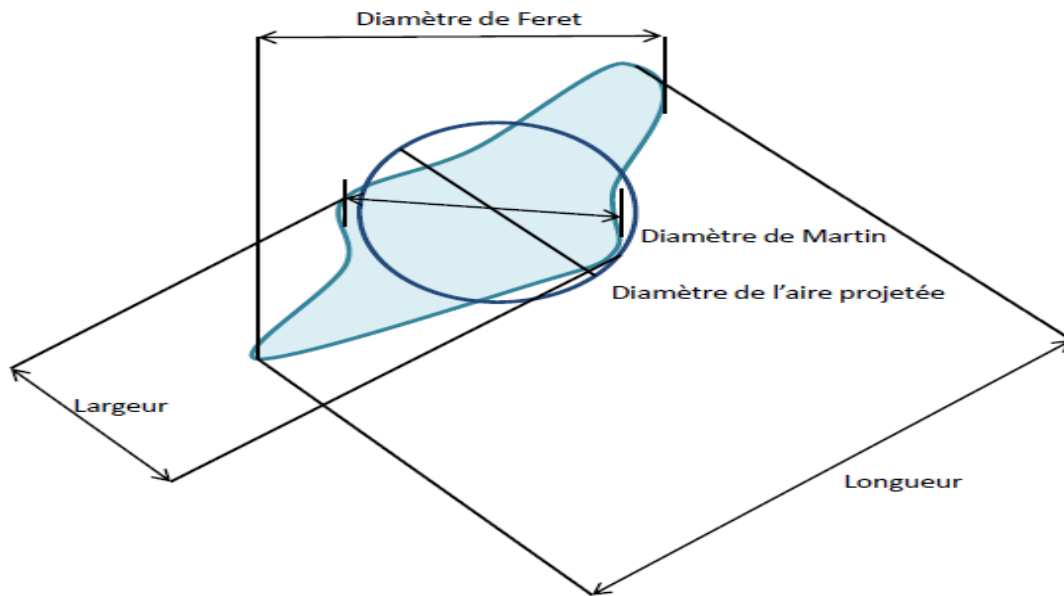


Figure 2 : D'après la Pharmacopée Européenne 7.0 : Mesures courantes de la taille des particules

- Individualité des particules
- Visibilité
- Immobilité
- Absence de structure étrangère
- Homogénéité de taille ou d'orientation des particules

L'échantillon de poudre analysé au microscope doit subir une préparation avant l'analyse pour permettre l'individualisation des particules constituantes. L'étalement ou l'écrasement d'un tas de poudre à sec à l'aide d'une spatule ou d'une lamelle, ne sont qu'exceptionnellement valables (particules non fragiles et isodiamétriques). Dans la majorité des cas, l'analyse se fera en phase liquide à l'aide d'un milieu désagglomérant dans lequel la poudre est insoluble. Cette technique d'analyse est très utilisée dans le domaine des essais limites de taille pour les préparations oculaires ou parentérales qui doivent être exemptes de toutes particules visibles (l'œil humain peut détecter des particules jusqu'à 50 μm).

C'est une méthode longue qui ne saurait s'appliquer à des échantillons nombreux mais elle a l'avantage de permettre l'observation directe de la forme des particules. L'analyse microscopique est indispensable dans les premières phases du développement ou quand un doute quant à la qualité de la matière première survient car c'est la seule méthode d'analyse directe qui existe. Dans ce cas, l'échantillon

analysé est comparé à l'échantillon de référence conservé par le laboratoire de contrôle qualité.

3.3. Le tamisage

Le tamisage est l'une des plus anciennes méthodes d'analyse granulométrique et aussi l'une des plus largement utilisées lorsqu'il s'agit d'analyser la taille de particules supérieures à 90 µm en général : c'est en effet une technique peu coûteuse utilisée dans beaucoup de domaines autres que la pharmacie comme la géologie. Cette technique est décrite dans la Pharmacopée Européenne 7.0 [5]. Elle permet de mesurer le diamètre de taille (D_i) des particules. La technique consiste à diviser en fractions, à l'aide d'une colonne de tamis, la matière ou une partie adéquate de celle-ci constituant un échantillon parfaitement représentatif. La séparation idéale n'est cependant jamais réalisée puisque :

- ✓ Les ouvertures de tamis ne sont pas égales mais sont distribuées autour d'une moyenne
- ✓ La forme carrée des mailles de tamis influence les distributions granulométriques mesurées, à l'exception du cas où toutes les particules sont parfaitement sphériques
- ✓ La morphologie des grains conditionne la séparation par cette analyse
- ✓ L'opération de tamisage est limitée dans le temps.

Même si cette technique est très répandue et peu coûteuse, elle ne convient pas pour tous les produits, surtout lorsque leur structure est hétérogène (masses volumiques différentes au sein d'un même produit, présence d'aspérités) ou si les particules sont de forme lamellaire ou fibreuse. D'autre part, en dessous de 90 microns, les particules ont tendance à s'agglomérer, la répartition granulométrique devient aléatoire. Cette méthode

d'analyse est donc généralement bien adaptée aux produits comportant au moins 80% de particules de taille supérieure à 90 micromètres.



Figure 3 : des tamis d'analyse granulométrique.

3.3.1. Principe du tamisage :

D'après la pharmacopée Européenne [6]. Le tamisage doit être conduit dans des conditions n'entraînant ni absorption ni déperdition d'humidité par l'échantillon.

Les tamis analytiques sont constitués d'une toile tissée à ouverture (maille) de forme sensiblement carrée. Cette toile est fixée à la base d'un cadre cylindrique ouvert. Pour cette analyse, il est recommandé d'utiliser au moins sept tamis pour couvrir une gamme granulométrique suffisamment étendue. Après avoir pesé individuellement chaque tamis, ceux-ci sont empilés les uns sur les autres par ordre décroissant de finesse, puis la poudre à analyser est placée sur le tamis supérieur. Cette colonne est ensuite soumise à agitation pendant une durée déterminée. Le mode d'agitation est standardisé (4). La fréquence quant à elle doit être définie selon la méthode décrite à la pharmacopée [5]. Après agitation de la colonne de tamis, on pèse de nouveau précisément chaque tamis. L'essai donne le pourcentage en masse de particules comprises dans chaque intervalle granulométrique.

Il est recommandé par la Pharmacopée Européenne d'utiliser des tamis en progression géométrique de raison $\sqrt{2}$. La suite de tamis la plus couramment utilisée étant la suivante : 1000 μm , 710 μm ; 500 μm , 350 μm , 250 μm , 180 μm , 125 μm et 90 μm .

3.4. Granulométrie laser

3.4.1 Principe de granulométrie laser

La granulométrie laser est une technique créée dans les années 1970. C'est une technique de choix pour mesurer des objets dont la taille est comprise approximativement entre 100 nm et 1000 μm . Cette méthode dans la Pharmacopée Européenne 7.0 [6]. Le granulométrie

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

laser permet de déterminer la distribution granulométrique d'objets dispersés au sens large (dispersion solide / air, solide / liquide ou liquide / liquide). En pratique elle permet de mesurer le diamètre en volume (D_v) de particules solides ou éventuellement de gouttelettes émulsionnées. La dispersion des échantillons est assurée par l'un des modules associés au banc laser, à savoir soit un module pour voie liquide qui assure en continu l'agitation de l'émulsion ou de la suspension, soit le module pour voie sèche qui permet la dispersion dans l'air de poudre sèche. Le mode de dispersion doit être adapté à la poudre à analyser afin de ne pas modifier la répartition granulométrique (en cassant les particules ou en provoquant leur agglomération). Dans cette étude le granulométrie laser est un Mastersizer 2000, il permet de mesurer des particules :

- ✓ De 0.02 à 2000 μm en voie liquide
- ✓ De 0.2 à 2000 μm en voie sèche

La mesure de si petits objets est rendu possible par leur propriété particulière à dévier un faisceau lumineux de type laser (phénomènes de diffraction, diffusion et réflexion). L'appareil applique ensuite un modèle mathématique afin de rendre des résultats corrects, il convient de choisir convenablement le modèle mathématique appliqué qui se base sur deux théories principales :

La théorie de Fraunhofer qui doit être utilisée si les particules sont de taille élevée par rapport à la longueur d'onde. L'absorption et la diffusion ne sont pas considérées devant le phénomène de diffraction largement prédominant. Dans cette théorie, les particules sont donc considérées comme étant des particules sphériques, opaques et non poreuses. Cette théorie appliquée à de très fines particules peut engendrer des erreurs sur la mesure de la taille. Ainsi la présence de populations réellement absentes ou un décalage de la distribution granulométrique vers les grosses particules sont les principales conséquences d'utilisation de ce modèle et définissent ses limites d'utilisation.

La théorie de Mie doit être utilisée si les particules sont transparentes, le plus souvent leur taille est proche voire plus petites que la longueur d'onde utilisée. Cependant cette théorie s'applique aussi dans le cas de grosses particules lorsque celles-ci sont transparentes. Cette théorie tient compte tant de la diffraction que de la diffusion de la lumière autour de la particule.

dans son milieu. Il est alors possible de corréler la taille des particules à la façon dont elles dévient la lumière, en considérant ces particules comme sphériques et en connaissant leurs propriétés optiques (indice de réfraction et d'absorption). Cette théorie est plus complexe et ne saurait s'appliquer à une poudre composée de plusieurs phases ou si l'indice de réfraction est inconnu.

Ainsi l'angle de diffraction est inversement proportionnel à la taille des particules et la quantité de lumière déviée est proportionnelle à la taille :

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

- Les grosses particules diffractent de fortes quantités de lumière sur des petits angles.
- Les petites particules diffractent de très faibles quantités de lumière qui s'étalent de façon décroissante de 0° à des angles plus larges.
- L'intensité de la lumière absorbée par l'échantillon est fonction de sa concentration, elle est définie par l'obscuration.
- L'obscuration dépend de la méthode choisie (sèche ou humide).
- Elle ne doit pas être trop faible sinon les résultats risquent de ne pas être représentatifs ni trop élevée (souvent $< 35\%$). L'intensité de la lumière déviée enregistrée par chacun des détecteurs permet de constituer une image de diffraction en 2 dimensions qui est ensuite analysée à l'aide de modèle(s) mathématique(s) implantés dans le logiciel de granulométrie utilisé.

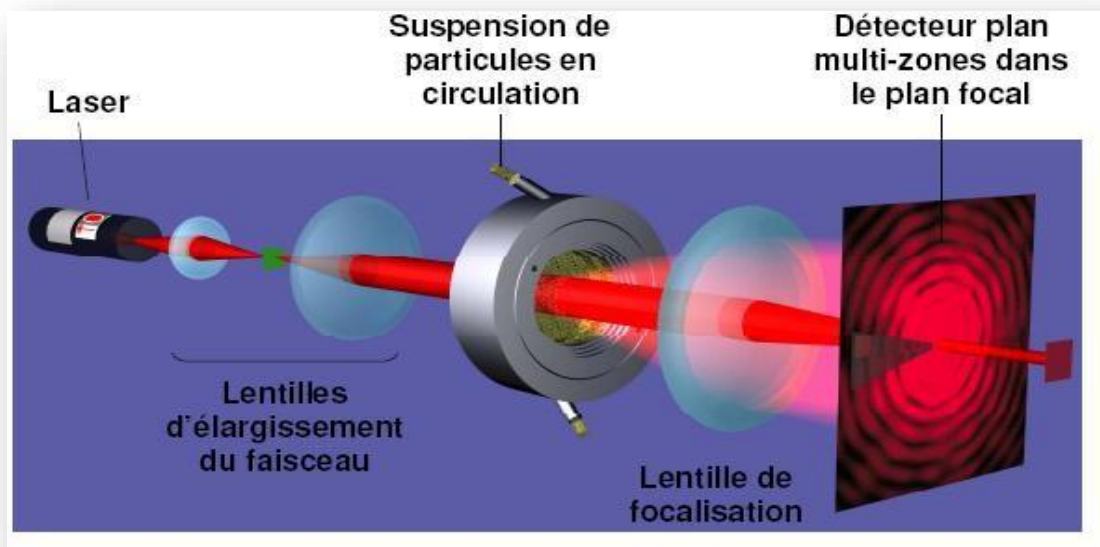


Figure 4: Schéma d'un granulométrie laser

De cette analyse ressort la distribution granulométrique en volume de l'échantillon.

Pour réaliser une mesure de taille au moyen du granulométrie laser, il est impératif que les particules passant devant le faisceau laser soient individualisées et donc bien dispersées. Les modules de dispersion ont pour rôle d'assurer par des moyens mécaniques (pression, agitation, vibrations) la dispersion de l'échantillon.

Parallèlement, afin de réaliser une mesure correcte, il est également impératif que le manipulateur s'assure de réaliser une prise représentative de l'échantillon à mesurer, de ne pas faire de sélection de l'échantillon et de bien homogénéiser le prélèvement (en particulier dans le cas des suspensions).

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Lors de l'utilisation d'une granulométrie laser, il faut toujours garder en mémoire les hypothèses des théories mises en œuvre, notamment que les particules sont assimilées à des sphères (ce qui n'est en réalité pas souvent le cas) pour éviter les erreurs d'interprétation. Par ailleurs, de manière à valider les résultats obtenus, il est préférable de les comparer à des observations en microscopie optique ou électronique quand cela est possible.

3.4. 2. Expression et résultats

Il est préférable de ne rendre le résultat qu'après avoir effectué trois mesures d'un même échantillon.

Les résultats peuvent être rendus sous forme de nombreux paramètres calculés. Le rapport d'analyse par défaut mentionne:

L'ensemble de la distribution granulométrique, exprimée en volume ou en (%) en fonction des classes de taille (D_v = diamètre d'une sphère équivalent à la particule) sur une échelle de 0.02 μm à 2000 μm .

Le $D_v(10)$, $D_v(50)$ et $D_v(90)$ qui correspondent respectivement aux diamètres en dessous desquels se situe 10, 50 et 90% du volume des particules.

Le $D_v[4,3]$ correspond au diamètre moyen en volume.

Le sp_n , défini comme $[D_v(90) - D_v(10)] / D_v(50)$, donne une indication sur la largeur de la distribution granulométrique.

L'uniformité est une déviation par rapport à la médiane, donne également une indication sur la largeur de la distribution granulométrique.

La surface spécifique, qui n'est ici pas une réelle mesure mais plutôt une extrapolation basée sur le diamètre moyen et sur la masse volumique.

Tableau 2 Exemple de résultat obtenu par granulométrie laser

Particle Name: Fraunhofer	Accessory Name: Hydro 2000S (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 0.000	Absorption: 0	Size range: 0.020 to 2000.000	Obscuration: um 19.07 %
Dispersant Name: Silicone oil	Dispersant RI: 1.396	Residual: 0.422 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0509 %Vol	Span : 2.109	Uniformity: 0.652	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.354 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 16.954 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 70.216 um	
d(0.1): 8.099 um	d(0.5): 63.622 um		d(0.9): 142.250

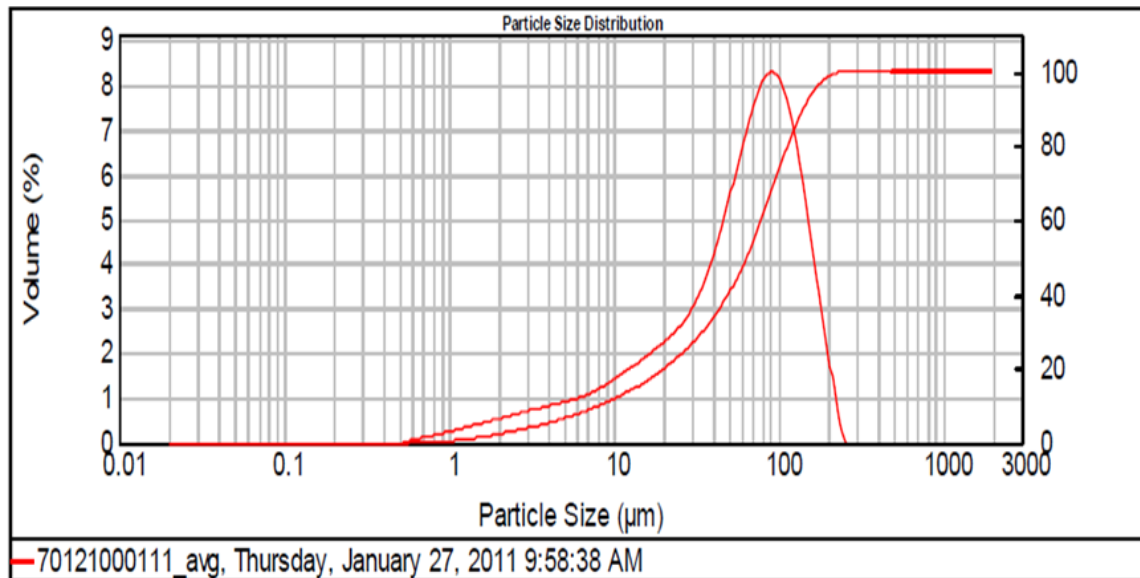


Figure 5: Distribution et relation entre la taille des particules en fonction de leurs volumes

Parmi les autres valeurs calculées lors de l'analyse, le mode (sommet du pic) est particulièrement utile dans le cas d'une distribution bimodale : dans ce cas, le $D_v(50)$ perd son sens car il se situe au milieu de deux pics. Les modes suivent avec précision le déplacement de chaque pic individuel (utilisés au cours d'un broyage par exemple).

3.5. Spécifications des poudres selon la Pharmacopée Européenne 7ème édition

Une monographie concernant l'analyse de la taille des particules par diffraction laser est décrite à la Pharmacopée 7.0 [5]. Selon la Pharmacopée Européenne la répétabilité accessible avec la méthode par diffraction laser dépend principalement des caractéristiques du matériel tandis que la répétabilité requise est fonction de l'objectif de la mesure. Il est impossible de spécifier ici des limites d'application obligatoire, car la répétabilité (préparation différente de l'échantillon) peut sensiblement varier d'une substance à l'autre. Néanmoins, il est de bonne pratique de considérer, pour la répétabilité, des critères d'acceptation tels que ($n=6$) :

$D_v(10) : CV \leq 15\%$

$D_v(50) : CV \leq 10\%$

$D_v(90) : CV \leq 15\%$

Pour des particules dont la taille est inférieure à 10 µm, ces valeurs sont à multiplier par deux.

4. QUALIFICATION DE VOS POUDRES[3]



Figure 6 : exemple d'un poudre

4.1. La qualification des poudres

La qualification des poudres concerne tous les industriels transformant et manipulant quotidiennement des matières poudres sous forme de produits finis ou matières premières. Dans de nombreux processus de fabrication, de manutention des poudres et de matériel industriel sous forme de produits finis ou premières, l'obtention de résultats parfaits.

La manutention des poudres peut s'avérer difficile, particulièrement au moment du traitement et du stockage. En effet, de nombreux facteurs influent sur l'écoulement des poudres, comme la taille et la forme des particules, la structure chimique, l'humidité, la température, les propriétés de l'emballage, la charge électrostatique, la morphologie de la surface, l'absorption de gaz, l'humidité atmosphérique et la répartition des dimensions des particules autrement appelées « SPAN ». Or la bonne conduite d'un procédé dépend principalement du comportement des poudres, et en particulier de sa Coulabilité.

Pour pouvoir bien étudier le milieu granulaire, il faut avant tout connaître les caractéristiques des particules, ainsi que de la poudre dans son ensemble. Les particules ne sont en général pas sphériques, et peuvent se présenter sous diverses formes.

Pour caractériser la taille et la forme des particules non sphériques, on utilise deux notions :

Le diamètre équivalent qui correspond au diamètre d'une sphère qui possède une même caractéristique que la particule.

Le facteur de sphéricité (Ψ_v) qui est le rapport entre la surface de la sphère ayant le même volume que la particule, par rapport à la surface de la particule.

En général, la taille des particules présentes dans une poudre est très dispersée. L'analyse granulométrique de la poudre permet de définir les paramètres moyennés représentatifs de l'ensemble de la distribution des tailles de particules.

5.Exemple de courbe de granulométrie laser pour du sucre glace

5.1 .Morphologie des particules : selon la forme des particules, celles-ci vont s'écouler plus ou moins facilement. Pour des particules présentant une forme qui s'éloigne de la sphère, c'est-à-dire pour des formes allongées telle que les bâtonnets ou encore les aiguilles, l'écoulement sera difficile.

L'historique de la **poudre**, c'est-à-dire sa manipulation, son stockage ainsi que son transport, peut avoir un impact sur sa coulabilité. Selon la manière dont a été manipulée la poudre, celle-ci sera dans un certain état d'organisation, et présentera donc une certaine cohésivité (désaération, segmentation granulométrique, reprise d'humidité...).

6 . Pourquoi réaliser des tests sur vos poudres ?

La réalisation de test de coulabilité avec le support de notre **laboratoire des poudres** vous permettra de déterminer les performances de vos **poudres** avant qu'elles soient intégrées au **processus de production** et ainsi, éventuellement d'adapter les différents équipements composant la **ligne de production**. Ces tests permettent de définir des diamètres minimums d'écoulement, degré de pentes des trémies, état de surface, mise en place d'aide à l'écoulement.



Figure7 :exemple pour les tests sur les poudres

7 .Exemples de types d'écoulement :[3]

A - Écoulement en masse

Toute la matière contenue dans le silo est en mouvement mais pas nécessairement à la même vitesse.

- Pas de zone morte
- Distribution des temps de séjour (premier entré -premier sorti), FIFO.
- Faible ségrégation
- Capacité de stockage plus faible (angle du silo de stockage élevé)
- Moindre résistance à l'abrasion de l'équipement de stockage

B - Écoulement en cheminée

Mouvement d'un noyau central seulement

- Présence de zone morte
- Distribution des temps de séjour (premier entré - dernier sorti, pas de gestion des lots de chargement)
- Forte ségrégation
- Plus grande capacité de stockage (angle faible du silo de stockage)
- Équipement de stockage plus résistant à l'abrasion

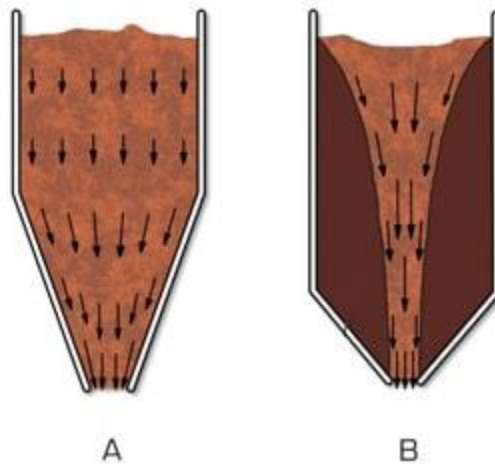


Figure 8 : Écoulement en cheminée

8 - Nos solutions pour vérifier la conformité de vos poudres.

Nous réalisons des tests et des mesures de coulabilité et de granulométrie pour vérifier la conformité de vos poudres.

Palamatic Process, forte de son expertise dans le domaine des poudres et pulvérulents, accompagne les industriels dans la caractérisation granulométrique des poudres utilisées dans leurs usines.

Pour préparer vos poudres, nous envisageons d'équipements de laboratoire et vous envisagez de réaliser des tests sur vos poudres dans les conditions réelles de

production. Notre laboratoire réalise plusieurs mesures sur les échantillons de poudres afin de quantifier, classer, contrôler et comparer le type d'écoulement des poudres.

Exemples de tests de mesure : granulométrie, angle de glissement, angle de talus, mesure des masses volumiques tassées et non tassées (indice d'Hausner), test de mesure de la dispersion des poudres...

Méthodes pour l'évaluation de la coulabilité des poudres :

Angle de repos Essais de tassement : indice de Hausner, essais dynamiques par tassement, essais dynamiques par compression,

Comparaison des essais de tassement

9 - Quels équipements ?

Le comportement global d'une poudre, et en particulier sa coulabilité, est le résultat des interactions interparticulaires des particules qui la composent, mais aussi des interactions de la poudre avec son environnement, c'est-à-dire l'air, mais dans le procédé dans lequel il est manipulé. La nature ainsi que l'importance de ces interactions dépendent de nombreux paramètres, tels que :

- ✓ Des caractéristiques de la particule : morphologie, taille, distribution granulométrique...
- ✓ Des caractéristiques de l'air environnant : humidité, température, taux d'aération.
- ✓ Des caractéristiques du procédé de manipulation : état de surface des parois, manipulation de la poudre, pression.

Si ces forces d'interaction dominent la force de gravité, la poudre présentera un comportement cohésif, et présentera donc des difficultés pour l'écoulement : l'écoulement sera irrégulier voire absent. Pour évaluer cette capacité à s'écouler, il existe différentes méthodes.

9.1 - Rhéomètre pour tester l'écoulement des poudres

L'appareil de contrôle d'écoulement de poudre fournit l'analyse simple et rapide du comportement d'écoulement de la poudre dans l'équipement de traitement industriel. Le rhéomètre permet, par exemple d'évaluer la capacité de déversements de poudres placées dans des conteneurs de stockage.

Plusieurs choix de tests peuvent être préprogrammés : fonction écoulement, friction murale ou densité en vrac.

Exemples de données en sorties :

- Index propre d'écoulement des poudres

- Dimensions d'arcs
- Diamètre trou de rat

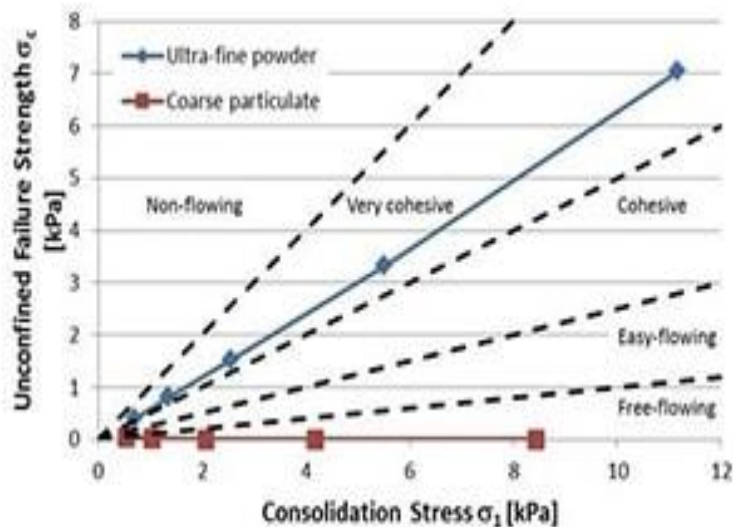


Figure 9 : courbe pour tester l'écoulement des poudres

9.2. Tamis de contrôle pour analyses granulométriques

Le tamis de laboratoire Palamatic Process utilisé en colonne permet de déterminer la courbe et la granulométrie de la poudre.

Le tamis de laboratoire Palamatic Process produit un mouvement de tamisage en 3 dimensions afin que les résultats de tamisage soient rapidement disponibles et parfaitement reproductibles. Le produit à tamiser tombe verticalement et est réparti en un mouvement circulaire sur toute la surface du tamis. Notre logiciel permet l'évaluation informatisée de l'analyse granulométrique avec une lecture rapide et aisée des données.

10 - Paramètres à prendre en compte

D'autres paramètres extérieurs doivent être pris en compte :- Surface des parois : de la même manière que les particules interagissent entre elles, ces particules peuvent également interagir avec les parois

- Humidité : l'humidité du milieu peut impacter la coulabilité d'une poudre, par influence de la teneur en eau de cette dernière
- Température : la température impacte la coulabilité d'une poudre
- La nature et les propriétés physiques de la poudre et sa coulabilité
- Le demi-angle d'ouverture du silo
- La rugosité de la paroi

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

- La pression interne dans le silo
- La taille de l'ouverture
- Un écoulement en masse nécessite un angle faible et des parois lisses
- La transition entre les conditions d'écoulement / non écoulement dépend de la taille de l'ouverture
- La taille de l'ouverture gouverne le débit massique

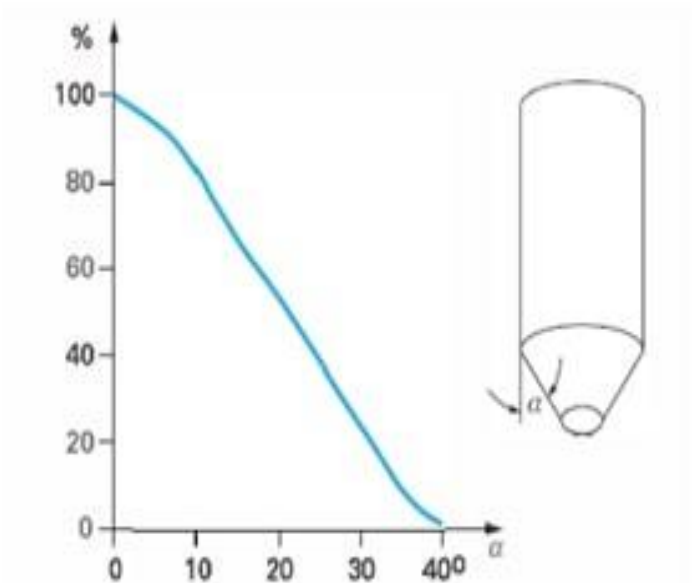


Figure 10 :D'après Ter Borg : probabilité d'occurrence d'écoulement en masse en fonction de l'angle du silo

Le test de Jenike, initialement développé pour le dimensionnement des silos, permet de quantifier les propriétés d'écoulement d'une poudre. Cette consistance à déterminer la contrainte tangentielle et à appliquer à un empilement de poudre consolidée, soumise à une contrainte normale à N , afin de « rompre » cet empilement. Le couple (σ_N, τ_R) est appelé point de rupture.

La détermination de plusieurs points de rupture permet de définir le lieu d'écoulement, qui correspond à l'ensemble des points de rupture. Ce lieu d'écoulement permet de déterminer la fonction d'écoulement, intrinsèquement à la poudre, permettant de quantifier sa coulabilité. Etant donné qu'un point de rupture (σ_N, τ_R) est dépendant de l'état de consolidation initial de la poudre, il faut s'assurer que cet état soit le même pour chaque mesure, afin d'obtenir des résultats exploitables

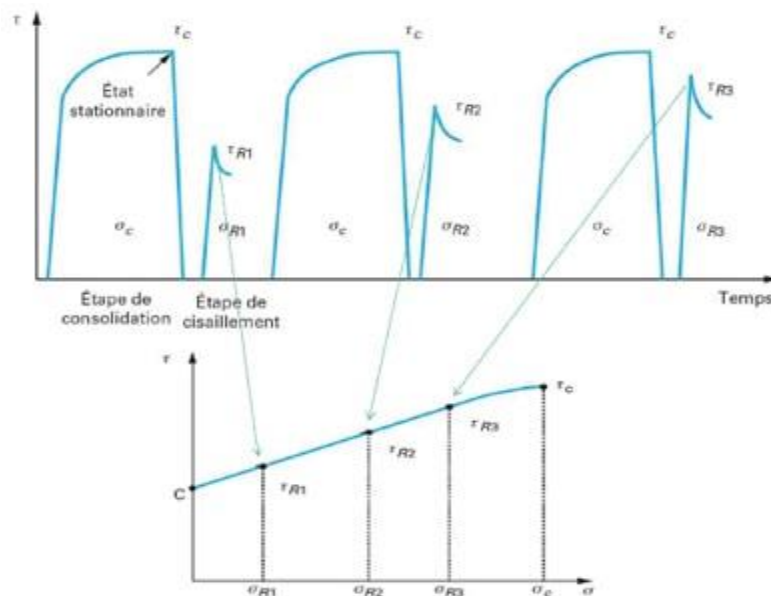


Figure 11 : Protocole de mesure : détermination du lieu d'écoulement par le test de cisaillement de Jenike

11 - Solutions / résultats

La qualification des poudres permet d'adapter les différents équipements composant la ligne de production.

Ainsi, nous pouvons vous proposer différentes technologies de transfert pneumatique (aspiré ou poussé, phase dense ou diluée) ou encore des solutions de vibration adaptées à vos produits et à votre processus pour faciliter l'écoulement des produits poudres de phases de vrac et de transfert .

Nous pouvons vous aider à déterminer le type de vibreur adapté à vos besoins. Différentes technologies sont disponibles : plaques et bus de fluidification, Vibro-aérateurs, Canons à Air, Percuteurs Pneumatiques et Combinés, Vibreurs Pneumatiques...

Rencontrons-nous !

Chapitre II

Généralité sur les sables

GENERALITES SUR LES SABLES

II.1.INTRODUCTION

Les sables s'accumulent chaque jour le long des rivières ou sur littoral. Il n'y a pas pratiquement pas de sable au grand large. Certains ports construits près des embouchures s'ensablent rapidement. D'une année sur l'autre, les bancs de sable d'une rivière se déplacent vers l'aval. Le quartz est généralement l'élément prédominant dans un sable. Le quartz est un minéral dur qui entre dans la composition de roches telles que les granites ou les gneiss : roches très répandues, surtout dans les massifs montagneux.

L'altération des granites, des gneiss et autres roches dures et cohérents donne naissance à des grains de quartz, à quelques grains de feldspath, de micas ou autres et à des particules argileuses. L'usure de ces roches donne aussi des éléments plus gros tels que galets, graviers qui s'altèreront à leur tour [7].

II .2. DÉFINITION

Matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres.

On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière ,les sables de mer et les sables de rivière.

Le terrain dans lequel le **sable grossier** domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les engrais solubles, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet, amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol.

Si, au contraire, l'élément dominant est du **sable ténu**, c'est l'inverse qui se produit, le terrain tasse et prend la compacité du sol argileux, manquant ainsi d'aération.

Des amendements sont nécessaires pour corriger les défauts des sols sableux ; l'apport de terre argileuse donne de la cohésion aux terrains qui en manquent, mais le fumier de ferme ,en augmentant l'humus, est dans tous les cas le meilleur des traitements : il apporte au sable grossier l'agglomérant dont il a besoin et au sable fin l'allègement et l'aération qui lui font défaut.

Inversement, le sable grossier peut constituer un amendement dans les sols compacts

II.3.LES CARACTÉRISTIQUES DU SABLE [7]

Jusqu'à présent, les critères de choix d'un sable se basaient essentiellement sur la connaissance de la granulométrie, et éventuellement du pH. Un certain nombre de caractères physiques complémentaires au pH et à la granulométrie ont été retenus. Ce sont :

- ✓ La densité apparente et la densité réelle.
- ✓ Le foisonnement.

- ✓ La porosité et la capacité de rétention.
- ✓ La perméabilité.
- ✓ La forme.

Et en supplément pour les sables de bunkers :

- ✓ La portance,
- ✓ Le croutage,
- ✓ La couleur.

II.4. Classification des sables :

4.1. Selon son origine

Le sable, en fonction de son origine, peut être classé en quatre catégories :

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions des fleuves ou des rivières), de roches massives (sédimentaire, éruptives, métamorphique, etc.) ou de dunes. Le sable naturel n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition.

4.2. Selon sa composition

En fonction de sa composition minéralogique (teneurs en silice, alumine et chaux), le sable peut être classé en quatre catégories

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Tableau 3 : Classification des sables en fonction de leurs compositions (teneurs en % massique)

Composition	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)
Siliceux	70 à 90	0,1 à 1	1 à 10
Silico-alumineux	50 à 70	1 à 5	10 à 25
Silico-calcaires	15 à 20	15 à 30	3 à 10
Calcaires	2 à 10	30 à 50	0,5 à 2

4.3. Selon sa densité

Selon la densité de sable, on distingue trois types :

- **Léger** : de masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³, et le plus usuel est à base d'argile expansée, de schiste expansés ou de laitier expansé.
- **Courant** : de masse volumique entre 2000 et 3000 kg/m³, et il est généralement les basaltes, quartzites, grès, porphyre, diorite, granites, schistes, laitier.
- **Lourd** : de masse volumique varie de 4000 à 8000 kg/m³, et le plus utilisé est la barytine (d'une densité absolue de 4,2 à 4,7), la magnétite (d'une densité absolue de 4,5 à 5,1), les riblons(d'une densité absolue de 7,6 à 7,8) et la grenaille (d'une densité absolue de 7,6 à 7,8).

4.4. Selon sa forme

Selon la forme de sable, on peut désigner deux grands types :

- **Roulé** : dont la forme a été acquise par l'érosion de roches meubles (alluvions des fleuves ou des rivières) ou des dunes.
- **Angulaire ou Concassé** : dont la forme a été obtenue par abattage et concassage de roches massives et dures.

II.5. Types de sable

5.1. Sable alluvionnaire

Le sable alluvionnaire, dit aussi roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion. Il est issu de roches meubles des dépôts des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières.

Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, le sable utilisé pour le béton est le plus souvent siliceux.

Ce sable, plus recommandé à la confection des bétons, doit présenter une granularité telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Cette granularité est caractérisée par le module de finesse (MF). Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin ;

- $1.8 \leq MF \leq 2.2$: le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisante.
- $2.2 \leq MF \leq 2.8$: le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.
- $2.8 \leq MF \leq 3.2$: le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations.

5.2. Sable de carrière

Le sable de carrière, dit aussi concassé, est un sous-produit des processus industriels contrôlés de concassage, de lavage et de criblage appliqués à des roches massives généralement calcaires.

Ce sable, qui se trouve couramment dans la classe granulaire 0/3 mm, est rarement utilisé dans la confection des bétons en raison de leurs taux élevé en fines qui varié de 8 à 30 % et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Plusieurs recherches ont été menées pour la valorisation de sable de carrière dans la confection des mortiers et bétons. En effet, elles ont trouvé que la morphologie de ces grains angulaires est plus adaptée à un meilleur accrochage à la pâte de ciment que celle de sables roulé, ce qui offre plus de résistances au béton.

L'utilisation de sable de carrière est déterminée par sa granulométrie et ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. En générale, il s'utilise pour des sous-fondations et fondations, des applications liées au ciment, par exemple du béton, et pour la production de mélanges bitumineux. [8]

5.3 .Sable des dunes

Le sable de dune est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent.

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer.

Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, forme la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir [9].

II.6.PRINCIPAUX SABLES DISPONIBLES

De nombreux sables sont désormais disponibles. Si la silice, de loin la plus utilisée, est d'origine naturelle, d'autres sont des produits plus ou moins artificiels qui, en raison de leur coût, sont réservés à des emplois spéciaux.

-La silice, de formule SiO_2 , et plus spécialement sa variété allotropique, le quartz α , est extrêmement répandue à travers le monde dans les bassins d'origine sédimentaire.

-La chromite est le mélange d'oxydes de fer et de chrome FeO , Cr_2O_3 contenant au minimum 50 % de Cr_2O Les sables de chromite sont obtenus après des traitements complexes de broyage, de lavage et de classification granulométrique.

L'olivine est le mélange de silicates de fer et de magnésium SiO_4Mg_2 et SiO_4Fe_2 . Ces sables sont également obtenus par des traitements de broyage et de classification -Le zircon est le silicate de zirconium Zr SiO_4 , présent à faible dose (1 à 2%) dans les sables de plage d'Australie et de Floride.

-Les silice-alumineux, de formule générale $n \text{Al}_2\text{O}_3$, $m \text{SiO}_2$, résultent de la calcination à haute température de produits naturels qui sont des argiles réfractaires et du kaolin, ou sont entièrement synthétisés à partir de silice et d'alumine.

Les produits calcinés sont ultérieurement broyés et classés. Suivant la nature des produits de base, on distingue:

*Les chamottes, issues d'argiles réfractaires plus ou moins pures, dont la teneur en alumine est en général supérieure à 40% ; une qualité obtenue à partir de kaolin très

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

pur est connue sous la dénomination commerciale de Molochite; Les mullites et sillimanites, obtenues par synthèse, qui contiennent respectivement 72 et 63 % d'alumine [10].

II.7.PROPRIÉTÉS DE SABLE

Les principales propriétés des matériaux disponibles sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4: Les principales propriétés des matériaux disponibles [10].

Propriétés	Silice	Chromite	Olivine	Zircon	Chamottes et mullites (2)
Disponibilité	très abondante	Limitée	Limitée	Limitée	Limitée
Coût	très bon marché	Elevé	Moyen	Elevé	moyen à très élevé
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,65	4,3 à 4,5	3,2 à 3,6	4,4 à 4,7	2,5 à 2,7
Température de fusion (°C)	1730	1760 à 1980	1540 à 1760	2000 à 2200	1300 à 1800
Stabilité	Bonne	Bonne	Bonne	excellente	moyenne à bonne
Conductivité thermique	Faible	Très élevée	Moyenne	très élevée	Faible
Acidité-basacité	Acide	Neutre basique	Basique	Acide neutre	Neutre
Masse volumique en vrac (g/cm ³)	1,55 à 1,60	2,7	1,9	2,8	1,45 à 1,55

(1) produit manufacturé.

(2) produit manufacturé ou synthétisé.

8.PRINCIPE DE FORMATION DES SABLES:

Le sable se forme à la suite des phénomènes physiques et chimiques auxquels sont soumises les roches. Les processus physiques fragmentent les roches en des éléments de taille réduite qui sont les blocs, les graviers, les sables, les limons et les argiles. Dans le processus de formation des sables l'action physique est prépondérante. Sous l'action de processus physiques (vent, eau) ou chimiques (action dissolvante de l'eau), ces éléments sont entraînés par les eaux de ruissellement. Au cours du transport, ils vont subir des variations de taille et de morphologie en fonction du moyen de transport. Les particules vont se déposer ou être drainées généralement jusqu'à la mer. C'est ainsi que les sables se retrouvent sur les plages ou dans les lits des cours d'eau.

9.Composition minéralogique:

Les sables sont principalement constitués de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les sables sont toujours définis en fonction des constituants majoritaires : on parle ainsi de sable quartzeux, feldspathique, ferrugineux, micacé, calcaire, ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux

10.EXEMPLE DE FINESSE DE SABLE

Le sable: le sable utilisé est de provenance de la région de Gabès (wethref). Ce sable a été broyé au laboratoire de géotechnique dans un broyeur à boulets jusqu'à des finesses de 20µm, 40µm et 80µm. Les résultats de l'analyse chimique sont portés dans le tableau 2. Tableau 2. Analyse chimique du sable finement broyé (%). Du point de vue chimique la constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage en silice (minuscules grains de quartz) qui est supérieur à 95%, par conséquent le sable étudié est un sable siliceux. Les ciments étudiés sont obtenus en mélangeant le ciment avec le sable broyé à différentes finesses et à différents pourcentages massiques (10%, 15% et 20%).

Tableau 5 :Analyse chimique de sable

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Cl (ppm)	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	ZnO	CaCO ₃
96.94	0.63	0.68	1.55	0.04	0.2	99	0.22	0.02	0.03	0.03	1.1

II.11.Utilisation du sable

Le sable est l'une des matières premières dans la construction. Il constitue également la principale matière première de l'industrie du verre.

Le sable, du fait de son abondance et de sa facilité d'exploitation, est utilisé dans de nombreux domaines d'activités.

C'est l'une des principales matières premières utilisées dans le génie civil. Il est utilisé aussi bien dans le domaine routier que dans celui du bâtiment.

Dans la construction des routes, le sable est utilisé comme matière première de remblai, couche de base et couche de finition.

Dans le bâtiment, il est employé dans la composition de béton, du mortier et la confection des briques (parpaing sable ciment).

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Le sable est le principal composant de la plate forme sur laquelle sont posés les pavés, pour les chemins et les routes secondaires, les parkings et les garages etc.

Le sable est encore très utilisé en fonderie, où il est employé pour la réalisation des moules. Par ailleurs, il intervient dans la fabrication de céramiques.

Le sable est également largement utilisé pour ses propriétés abrasives (cas du papier de verre recouvert de sable). Il peut aussi être utilisé pour un décapage à la sableuse afin de nettoyer certaines surfaces (la pierre, par exemple) ou pour aplanir des surfaces de métal grossier (avec de la vapeur sous pression chargée de sable).

En milieu naturel, le sable accumule des minéraux lourds alluvionnaires, permettant l'extraction de certains minéraux dont l'or, les diamants, la cassitérite (minerai d'étain), la magnétite (oxyde de fer) ou l'ilménite (oxyde de fer et de titane).

Le sable est un élément important dans le domaine touristique, lorsqu'il est présent sur les plages et les dunes où il est également un élément indispensable à la protection de la côte [11]

12 LE SABLAGE

12.1.Présentation du sablage[12]

Il s'agit d'un traitement de surface par impact. Cette technique industrielle consiste à projeter à grande vitesse un abrasif sur un matériau en utilisant notamment un pistolet et des buses.

L'équipement nécessaire utilise l'air comprimé : les sableuses et les cabines de sablage se connectent donc à des compresseurs.



Figure 12:sableuse et cabine de sablage

Une sableuse se connecte à un compresseur et s'utilise pour les travaux en extérieur comme le grenaillage de pièces métalliques (portails, grilles, charpentes...), le décapage du bois (volets, escaliers, poutres...) ou bien encore le ravalement de façade et le nettoyage de bâtiments. Contrairement à une cabine de sablage, il est préférable d'utiliser des abrasifs non recyclables, ces derniers ne pouvant pas être récupérés après utilisation.

La cabine de sablage (étanche) se connecte à un compresseur. L'utilisation de cette machine rend possible le travail en intérieur et la récupération du sable (les abrasifs recyclables).



figure 13 :Cabine de sablage Désignation

- 1/ Ouverture pour les mains avec des gants étanches.
- 2/ Trappe d'accès pour passer les pièces.
- 3/ Pistolet de sablage (avec buse) + connexion au compresseur.
- 4/ Bride d'aspiration. Il faut utiliser un aspirateur spécial avec une cuve métallique pour récupérer la poussière.
- 5/ Hublot.
- 6/ Cône récupérateur avec trappe de vidange. Les abrasifs sont plus lourds que la poussière, on peut donc les récupérer (quand ils sont recyclables).

Tableau 6:Machine et leur utilisation[12]

Machine	Utilisation
Sableuse	Pour travaux en extérieur Reservée au sablage de grande surface
Cabine de sablage	Pour travaux en intérieur Destinée au sablage de petites pièces(selon la taille de la cabine) Possibilité de récupérer le sable

Les applications possibles avec des abrasifs

Enlever la couche superficielle d'une pièce (ex : peinture...), provoquer la déformation de sa surface ou encore engendrer des aspérités pour améliorer l'adhérence d'une couche superficielle. Selon le type d'abrasif choisi, le sablage permet de nombreuses applications :

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

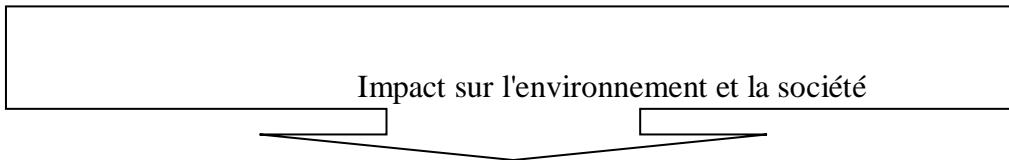
Tableau 7 : les application et leur résultat et avantage[12]

Applications	Résultats / Avantages
Ebarber	Parfait pour éliminer des bavures de vos pièces usinées. <input type="checkbox"/> Pratique pour atteindre des parties peu accessibles avec un ébarbage manuel ou à la machine.
Décaper	Avec précision et rapidité, le décapage des revêtements (peintures, vernis, laques,...) est possible. <input type="checkbox"/> Le substrat (la base qui reçoit le revêtement) n'est pas altéré. <input type="checkbox"/> Améliore l'état de surface de la pièce traitée. <input type="checkbox"/> Application d'un nouveau revêtement possible. <input type="checkbox"/> Plus efficace et rapide que d'autres techniques (ex : meuler, racler, nettoyer chimiquement, brosser,...)
Nettoyer	Pas de changement dimensionnel. <input type="checkbox"/> Substrat non dégradé. <input type="checkbox"/> Pour le nettoyage des moules, matrices, outils (même fragiles), ...
Ebavurer	Elimination des bavures Substrat non détérioré
Détartre	Supprime le tartre formé sur les pièces occasionné par divers facteurs (corrosion, rouille, chaleur,...). Sans danger, à l'inverse du détartrage chimique. La pièce retrouve un état de surface parfait : la peinture, le revêtement, le plaquage,..., sont praticables sans difficulté.
Graver du verre	Idéal pour les gravures (ex : logos) fines grâce à l'action du décapage. Sur le verre, la poterie, les médailles,... Allie rapidité et précision

13. Le choix de l'abrasif

En raison de sa contenance en silice hautement cancérigène, le sable n'est pas la matière projetée lors de l'opération de sablage. De nombreux abrasifs peuvent être utilisés : corindon blanc, corindon mixte, carbure de silicium noir et vert, bille céramique, carbure de bore, bgrenat,.... **Le choix de l'abrasif dépend de l'application à réaliser.**

Voici quelques précisions sur 3 abrasifs souvent employés : le corindon brun, la bille de verre et la grenaille métallique



Les dépôts de poussière en surface constituent une source de micronutriments pour les écosystèmes terrestres et marins. Il semblerait que la poussière du Sahara constitue un fertilisant pour la forêt amazonienne et l'on sait que les particules de poussière améliorent la production de biomasse marine en apportant du fer et du phosphore dans les zones océaniques qui manquent de ces éléments. La poussière a cependant de nombreux effets néfastes sur l'agriculture; elle diminue notamment les rendements car elle étouffe les semis, entraîne une perte de tissu végétal, réduit la photosynthèse et accentue l'érosion des sols.

Parmi les conséquences indirectes des dépôts de poussière figurent l'obstruction des canaux d'irrigation, le recouvrement des voies de transport et la détérioration de la qualité de l'eau des rivières et des fleuves. En réduisant la visibilité, les poussières aéroportées gênent la circulation aérienne et routière. Les risques posés par une mauvaise visibilité lors du décollage et de l'atterrissage obligent parfois à retarder ou à dérouter des vols. Par ailleurs, les particules peuvent éroder les surfaces des avions et endommager les moteurs.

La poussière a aussi une incidence sur la production des centrales solaires, en particulier sur les installations qui doivent recevoir un rayonnement direct. Les exploitants doivent veiller à ce que les particules ne s'accumulent pas sur les panneaux. Le nettoyage requis pour que le rayonnement entrant parvienne jusqu'aux capteurs est une opération longue et coûteuse.

14. Comment le sable du Sahara fertilise la forêt amazonienne[13]

La NASA s'est intéressée aux nuages de sable provenant du Sahara. Le but, savoir comment ce phénomène a évolué au fil des siècles, mais aussi connaître l'impact environnemental. Ce désert, qui s'étend sur une grande partie du nord de l'Afrique, mesure 9 200 000 kilomètres carrés.

15. La poussière du Sahara, un engrais naturel

L'agence fédérale explique sur son site que "plus de 60 millions de tonnes de sa poussière minérale chargée de nutriments sont soulevées dans l'atmosphère chaque année, créant une énorme couche d'air chaud et poussiéreux que les vents transportent à travers l'Atlantique pour fournir ces nutriments à l'océan et à la végétation en Amérique du Sud et dans les Caraïbes".

Après avoir nourri la faune marine lors de son voyage au dessus de l'océan Atlantique, la poussière saharienne arrive donc dans les Caraïbes et en Amérique du Sud. Là, les minéraux qu'elle contient, comme le fer et le phosphore, sont absorbés par les végétaux, agissant comme un engrais pour la forêt amazonienne.

"Les pluies emportent un grand nombre de ces précieux nutriments du sol dans le bassin du fleuve Amazone, ce qui rend l'apport de nutriments d'Afrique important pour maintenir une végétation saine", explique ainsi la NASA.

A noter que ces nuages de poussière ont aussi des effets négatifs. Ils entraînent par exemple une mauvaise qualité de l'air pour les habitants. De plus, tous ces nutriments peuvent causer des proliférations d'algues nuisibles au large des côtes de la Floride, mais aussi des maladies et des décès des récifs coralliens liés aux dépôts de poussière.

Des nuages de sable de moins en moins nombreux

Les nuages de poussière provenant du Sahara sont eux aussi impactés par le réchauffement climatique. La NASA indique ainsi que l'année dernière fut l'une des plus chaudes jamais enregistrée. En juin, un énorme nuage de sable du Sahara avait ainsi survolé l'Atlantique jusqu'en Amérique du Nord.

Et pourtant, l'agence fédérale affirme qu'au cours du siècle prochain, les nuages de poussière provenant d'Afrique seront les plus bas enregistrés lors des 20 000 dernières années, à cause du changement climatique et du réchauffement des océans. Les experts prédisent une réduction d'au moins 30% de l'activité des poussières sahariennes par rapport aux niveaux actuels au cours des 20 à 50 prochaines années, et une baisse continue au-delà

"Les températures de surface de la mer ont un impact direct sur la vitesse du vent, de sorte que lorsque l'Atlantique nord se réchauffe par rapport à l'Atlantique sud, les alizés qui soufflent la poussière d'est en ouest s'affaiblissent. En conséquence, les vents plus lents ramassent et transportent moins de poussière du Sahara, indique la NASA. (...) Et au fur et à mesure que les panaches de poussière diminuent, leurs impacts sur la végétation et l'océan seront également moindre."



FIGURE 14 :DESSINS EN DESERT ALGERIEN

Le sable du désert pourrait servir à construire durablement[[14](#)]



Figure 15 : Béton durable en sable du désert algérien

16.TECHNOLOGIE.

Une équipe de scientifiques britanniques a développé un matériau de construction biodégradable qui repose sur le sable du désert. Une solution qui valoriserait ainsi une ressource (quasi) infinie et qui répondrait à la pénurie de sable qui se profile dans le monde.

Cela peut sembler fou, mais le sable pourrait venir à manquer dans le futur. Car, sur les centaines de milliards de millions de tonnes (Mt) qui existent sur la planète, moins de 5 % sont utilisables pour produire du béton. Les vastes déserts du Sahara ou d'Arabie présentent en effet des grains qui sont trop lisses, érodés par des siècles de

vent et de frottements, et qui ont la particularité de ne pas bien s'agréger... D'où l'exploitation actuelle des fonds marins où la ressource est adéquate, mais de plus en plus rare. Chaque année, plus de 40.000 Mt sont ainsi extraites des plages et mers du globe afin de servir les industries humaines du béton et du verre, laissant présager d'une pénurie mondiale à l'horizon de la fin du siècle. A moins que les recherches des scientifiques britanniques de l'Imperial College de Londres ne bportent leurs fruits...

17. Recyclable, décarboné et biodégradable

Quatre jeunes chercheurs déclarent avoir mis au point un nouveau procédé, nommé "**Finite**" qui valorise justement le sable désertique. Au moyen d'un liant dont la nature n'est pas révélée, il est possible d'agréger les grains et d'obtenir un matériau composite dont la résistance en compression serait équivalente à celle du béton classique. Avantage supplémentaire, l'empreinte carbone de cette résine non polluante serait bien inférieure à celle du ciment, dont les émissions de gaz carbonique sont souvent décriées.

Matteo Maccario, un des chercheurs, déclare dans *Dezeen* : "*Nos estimations les plus pessimistes sont en ce moment inférieures à la moitié de l'empreinte CO2 du béton*". Et le Finite serait également recyclable par fusion, à l'image du verre, et aisément teinté ou moulé. Enfin, le matériau laissé tel quel serait biodégradable.

Une caractéristique qui le rendrait davantage destiné à des constructions temporaires qu'à des projets pérennes. Dans l'interview, le co-inventeur donne l'exemple de l'édification d'un pavillon pour un événement qui pourrait être déconstruit dans les trois mois afin que le matériau soit recyclé dans un autre projet.

Pour servir à la construction de structures plus durables, le Finite devra encore passer des tests de résistance et de vieillissement, et peut-être adapter sa formulation. Sur l'avenir du procédé, encore entouré de mystère pour cause de secret industriel, Matteo Maccario annonce : "*Il faudra plus que notre projet ou qu'un seul matériau, mais nous sommes vraiment impatients de voir un avenir où le bâti ne sera plus une chose qu'on doit garder pour toujours ou démolir et mettre à la décharge, mais au contraire quelque chose qui utilisera la Nature et qui sera réutilisable à l'infini*". L'utilisation des sables du désert permettrait, en outre, d'éviter le lavage à grandes eau du sel des sables marins, économisant par là une autre ressource qui se raréfie. Cette technologie - presque trop prometteuse pour être vraie - pourrait également enrayer le phénomène d'érosion des plages suite à l'exploitation trop intensive du littoral qui ne laisse pas le temps aux courants de redéposer de la matière. Le Finite signifie-t-il la fin de ce fléau

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Tableau8 : fiche technique de MICROBILLE DE VERRE [MEI ms'ila]



Matière	Oxyde d'aluminium.
Dureté MOHS	9
Forme massive	Arêtes vives.
Densité rielle	3,94.
Couleur	Brun.
Granulométrie	Entre 0,1 à 2 mm / F8 à F220 (Norme FEPA).
Structure	Alumine Alpha
utilisation	Traitement de surface. Décapage avant peinture. Suppression de la rouille. Réalisation de rugosités (petites aspérités) pour l'application ultérieure d'une colle, d'une peinture, d'un revêtement,
recyclage. Dégagement minime de poussière. consommation réduite d'air comprimé.	Avantage Grande dureté. Excellente capacité de Demande une Résistant.

- MICROBILLE DE VERRE



Matière	Verre sodocalcique.
Dureté MOHS	5,5 à 6.

CARACTÉRISATION DES POUDRE EN SABLE

Densité apparente	Entre 1,4 et 1,6 kg/dm
Granulométrie	Entre 425-600 μ et 4-45 μ .
utilisation	Nettoyage de moule. <input type="checkbox"/> Ebavurage délicat. <input type="checkbox"/> Finition de surface. <input type="checkbox"/> Shot peening (grenailage de précontrainte).
Avantage	Création d'une grande variété d'états de surface. <input type="checkbox"/> Permet une finition uniforme. <input type="checkbox"/> Recyclable.
Consiels bars. sablage dotée d'un mano régulateur pression.	Ne pas travailler à plus de 5 Utiliser une cabine de Pour le réglage de la

Tableau 9 :fiche technique de grenaille métallique

- GRENAILLE METALLIQUE



Matière	Bille ronde ou angulaire en acier
Avantage	Fort pouvoir abrasif.
Utilisation	Décapage. <input type="checkbox"/> Nettoyage rapide. <input type="checkbox"/> Dérouillage. <input type="checkbox"/> Préparation de surface. <input type="checkbox"/> Décalaminage (enlever la calamine résultant de la combustion d'un carburant, qui s'est déposée sur des parois métalliques). <input type="checkbox"/> Satinage. <input type="checkbox"/> Dépolissage.
A noter	Non recyclable.

18. Informations complémentaires

- La granulométrie (taille) et la pression de l'air comprimé conditionnent la force d'impact de chaque grain abrasif projeté sur la pièce.
- La force de l'impact est également déterminée par la distance entre la buse (qui se trouve au bout du pistolet) et la pièce.
- Plus la pression de l'air est élevée, plus l'abrasif doit posséder une grande dureté.
- L'utilisation d'une cabine de sablage ou d'une sableuse élimine l'abrasif sous forme de poussière. Toutefois, certains abrasifs très résistants sont recyclables, ils peuvent être utilisés plusieurs fois avant d'être inemployables (ex : corindon brun, microbille de verre...).
- Une utilisation successive de deux abrasifs différents est possible afin d'obtenir deux traitements différents (ex : le décapage puis le satinage)

Le sablage exige le port de lunettes de sécurité, d'un masque respiratoire et de gants de sécurité. A noter qu'il est parfois possible de brancher un aspirateur à poussières (avec une cuve métallique) aux cabines de sablage.

Chapitre III

Les méthodes de caractérisation des poudres

I.INTRODUCTION :

Ce chapitre présente succinctement les méthodes d'analyse utilisées pour caractériser les matières premières et les poudre. Toutes les matières premières (sable et inclusions granulaires) ont été caractérisées par granulométrie laser, puis à l'échelle structurale (diffraction des rayons X) et microstructurale (microscopie électronique à balayage) .

La distribution granulométrique des poudres étudiées a été déterminée par granulométrie laser en voie humide. Cette technique, basée la diffusion de la lumière d'un faisceau laser envoyé sur les particules, permet en effet de mesurer les dimensions des grains de 0,001 à 200 μm .

Dans le cadre de cette étude, les analyses sont réalisées au moyen d'un granulométrie laser [15]. Les particules sont préalablement mises en suspension, dans de l'alcool (éthanol) pour le ciment et dans de l'eau pour les autres inclusions, et sont dispersées au moyen d'une sonde ultrasonore. Pour l'analyse de la fumée de silice et du quartz broyé, nous avons ajouté le super plastifiant (§ III-A-3) comme agent dé flocculant pour une bonne dispersion des grains.

2.Caractérisation structurale et microstructurale

2.1.Diffraction des rayons X (DRX)

2.1.a. Elaboration des échantillons

L'élaboration des échantillons a été faite au LSI(.....). Les poudres de quartz broyé et de fumées de silice de granulométrie inférieure à 40 μm (Figure III-A-4 et Figure III-A-6) ne nécessitent pas de préparation particulière. En revanche, le ciment utilisé ici contient une fraction importante de grains de taille comprise entre 40 et 100 μm (Figure III-A-1) : il est indispensable pour l'analyse par diffraction des rayons X sur poudres de le broyer davantage pour s'affranchir de l'effet de taille des cristallites. Les poudres sont broyées manuellement à l'aide d'un mortier agate et tamisées jusqu'à 40 microns (refus nul).

Pour chaque BPR, de gros morceaux sont d'abord obtenus en fracturant une éprouvette à l'aide d'un marteau. La question se pose alors de la meilleure procédure à adopter pour l'obtention des poudres. En effet, la difficulté de l'analyse par DRX des BPR repose sur la complexité d'un mélange

de phases de différentes tailles de grains et cristallinité. Le sable contient beaucoup de gros grains (entre 100 et 600 μm) (Figure III-A-8). D'autre part, le quartz est très bien cristallisé, ce qui rend très faible la contribution des raies de diffraction du ciment anhydre (Figure V-A-1). Nous avons fait deux essais préliminaires sur un BPR pour mettre au point le protocole à retenir :

1) Les morceaux sont d'abord concassés à l'aide d'un broyeur mécanique à mâchoires. Nous essayons ensuite d'éliminer le maximum de sable en tamisant à 80 μm la poudre obtenue. Nous broyons alors manuellement l'ensemble du tamisât à l'aide d'un mortier en agate jusqu'à 40 μm (refus nul).

2) Les morceaux sont d'abord concassés à l'aide d'un broyeur mécanique à mâchoires. Nous broyons (manuellement à l'aide d'un mortier agate) l'ensemble de la poudre obtenue jusqu'à 40 μm (refus nul).

L'analyse par diffraction des rayons X sur les deux poudres obtenues a montré qu'il reste toujours une fraction trop importante de sable dans le premier essai et que l'étape supplémentaire du tamisage à 80 μm n'optimise pas significativement le rapport signal quartz/ciment. La seconde méthode a donc été adoptée pour la préparation de tous les échantillons de BPR. Le broyeur mécanique et les tamis sont nettoyés à l'air comprimé et à l'éthanol

2.1.b. Appareillage et traitement de données

Les données ont toutes été obtenues sur les appareils de la plate-forme technologique « Analyse et Caractérisation » de l'ICMPE [16] en collaboration avec Sandrine Tusseau-Nenez. Nous avons d'abord recherché les conditions optimales d'acquisition des diffractogrammes (choix de l'appareil, des fentes et du temps d'acquisition) pour une identification précise des phases dans tous les échantillons. Nous avons utilisé un diffractomètre de poudres Panalytical X'Pert Pro, en géométrie Bragg Brentano (θ/θ), équipé d'un détecteur rapide (X'Celerator). Le rayonnement incident ($K\alpha_1$, $K\alpha_2$) est produit à partir d'un tube à anticathode Co (40 kV, 30 mA). La Figure II-B-1 montre une vue générale du montage. Les données ont été enregistrées dans l'intervalle $2\theta_{\text{Co}} = 10-135^\circ$, avec un pas de $0,0167^\circ$.

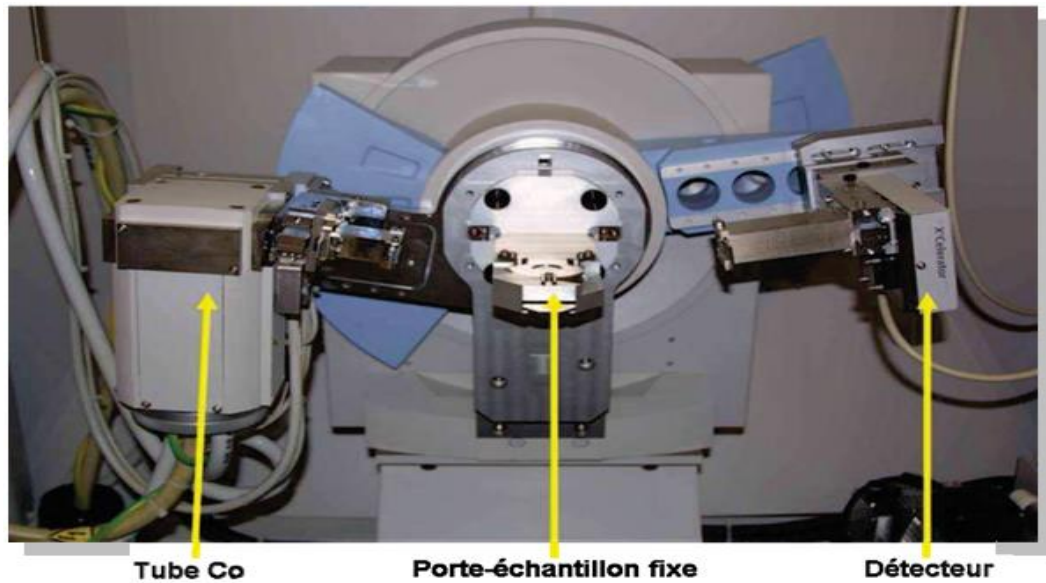


Figure 16: Diffractomètre de poudre (Appartenant au laboratoire de physique ,université de Msila)

L'identification des phases présentes dans chaque échantillon a été faite au LSI à l'aide du logiciel EVA (Bruker-AXS, version 13) couplé à la base de données structurales JCPDS-ICDD (PDF-2). Dans le cas plus complexe du ciment anhydre et des BPR, l'identification des phases a été confortée par une analyse plus approfondie par la méthode de Rietveld [Rietveld_1969]. L'analyse a été faite en collaboration avec M. Signes-Frehel, au moyen du logiciel TOPAS-R (Bruker-AXS) basé sur une approche des paramètres fondamentaux [17].

Un exemple des résultats obtenus par DRX

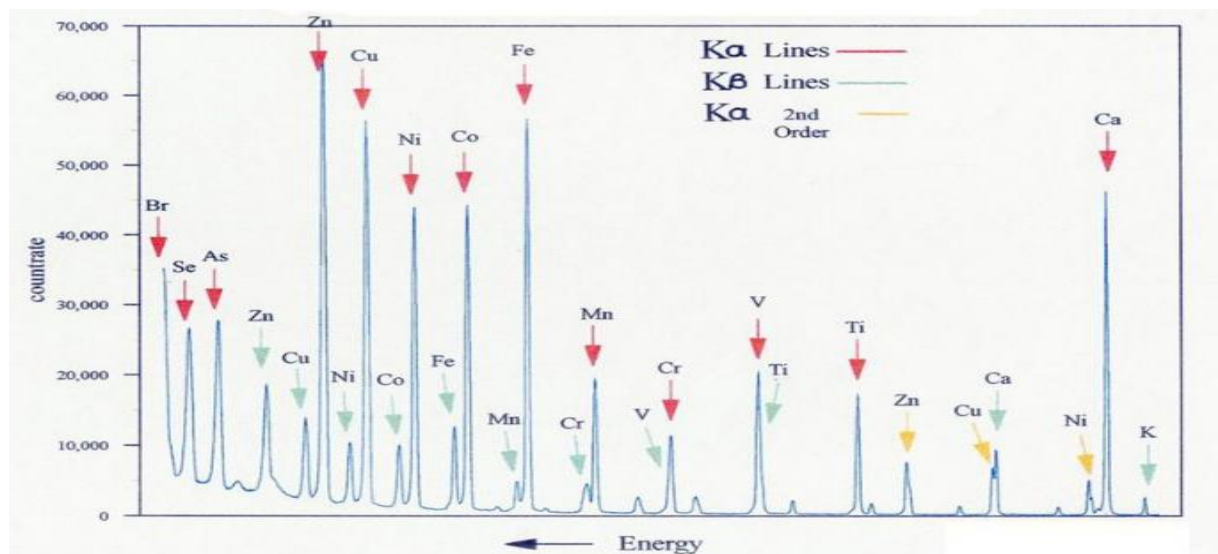


Figure 17 :Exemple des résultat de l'analyse par DRX du sable

3. Analyse XPS

3.1. Analyse

qualitative

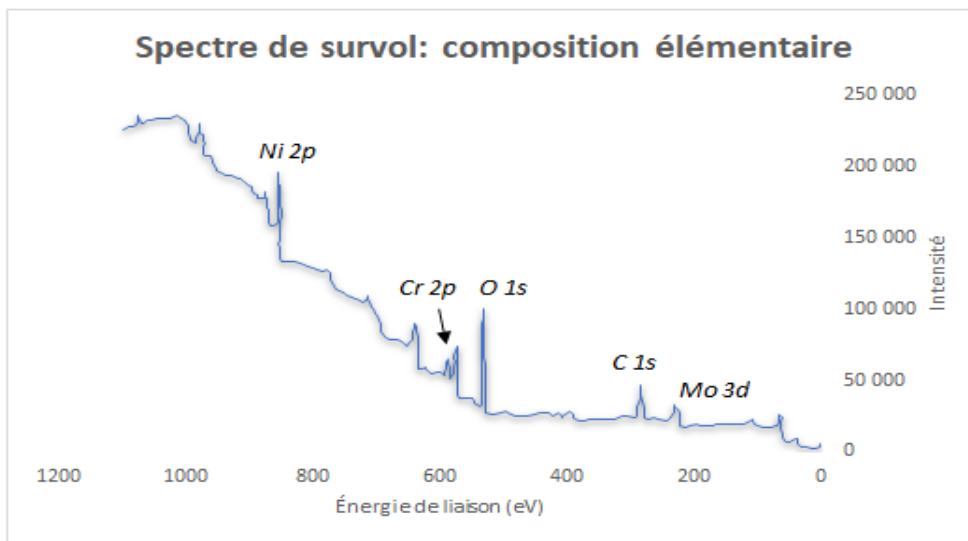


Figure 18: Exemple de spectre de survol XPS d'une série de films d'oxyde d'alliages Ni-Cr-Mo (alliages résistants à la corrosion dans les environnements oxydants et réducteurs)

Dans cette analyse, il y a un balayage de basse résolution, appelé un spectre de survol, qui sert de base à la détermination de la composition élémentaire des échantillons. Normalement, la profondeur d'analyse est trois fois le libre parcours moyen des électrons qui est en fonction de la composition de l'échantillon et de l'énergie cinétique des électrons qui s'échappent. Tous les éléments, exceptés l'hydrogène et l'hélium peuvent être détectés puisqu'ils n'ont pas d'électrons de cœur, mais uniquement des électrons de valence. Chaque élément du tableau périodique a un ou plusieurs niveaux d'énergies, cela se traduira par l'apparition de certains pics dans une région donnée (énergies de liaisons d'environ 0 à 1 250 eV)¹. Dans certains cas, les pics peuvent se chevaucher, mais ce problème peut être réglé ou diminué en observant une autre région du spectre pour des pics additionnels. Cependant, ces cas sont assez rares et habituellement, les pics ont une belle résolution et ne conduit pas à une identification ambiguë des éléments présents qui ont des concentrations plus élevées que 0,1 %¹. Également, dans cette analyse, les électrons sont moins ralentis, mais il est possible de balayer pour faire un spectre et de voir tout ce qu'il y a dans l'échantillon

3.2. Analyse quantitative

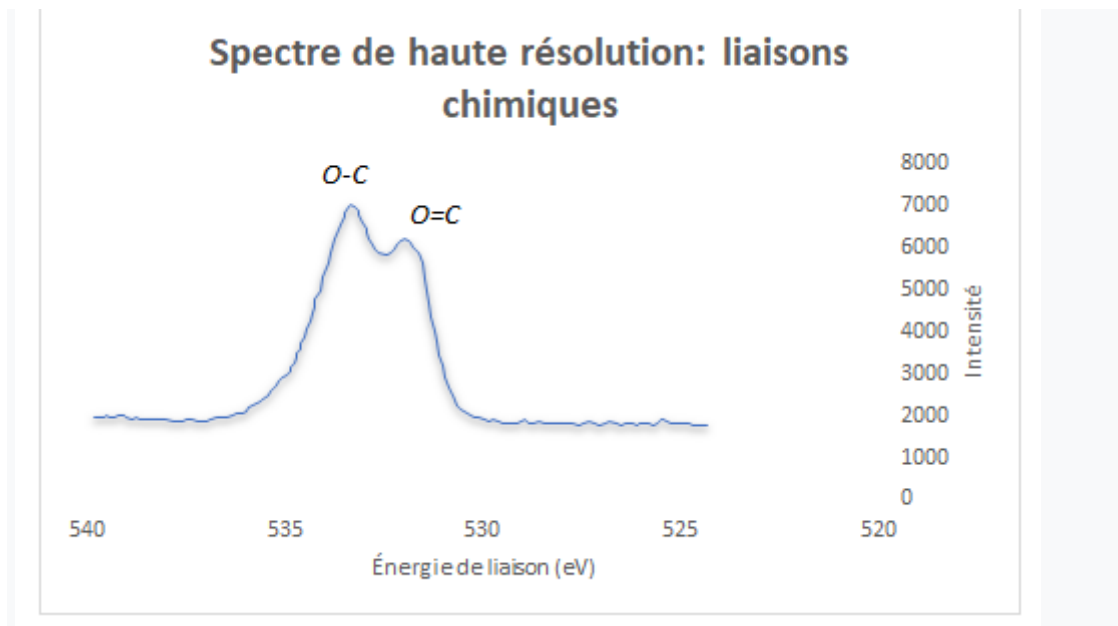


Figure 19 :Exemple de spectre à haute résolution XPS d'un échantillon d'un film de PMMA (polyméthacrylate de méthyle)

Dans cette analyse, la vitesse des électrons est diminuée afin d'obtenir une meilleure résolution des pics. Les électrons sont plus ralentis que lors de l'analyse qualitative. Malgré le fait que plus ils sont ralentis, plus il y a d'électrons perdus et le signal devient donc plus faible, il est plus facile d'obtenir des informations précises d'où ils proviennent. Certains éléments ont plusieurs électrons Auger, ce qui peut rendre la lecture du spectre plus difficile. Il est cependant possible d'utiliser des tables afin d'identifier où sont les électrons Auger et les autres pics pour déterminer les éléments de l'échantillon. Pour l'analyse des solides et des liquides, il est nécessaire de supposer que la composition de surface de l'échantillon est la même que sa composition dans la masse. L'analyse quantitative peut normalement être effectuée si 5 % de l'élément est présent¹

3.3.Exemples

Quelques exemples de systèmes étudiés par la XPS [18]

Biologie [19] (pansements et gants jetables)

Catalyseur (catalyseur à base d'oxyde métallique) [20.21]

Analyses de défauts (composants métalliques, échec d'adhésion et papier imprimé)

Revêtements de verres (revêtements de verre à faible émissivité et verres de contacts)

Microélectroniques (monocouches auto-assemblées et matériaux LED organiques)

Oxydes (oxydation d'un catalyseur à base de cobalt et contamination de l'acier)

Polymères (traitement de surface des tissus et cartographie de l'état chimique des polymères)[23]

Analyse de routine (caractérisation de fines couches d'or sur l'acier) [24]

4. Avantages et inconvénients

4.1. Avantages

Les éléments de la sous-surface à la surface peuvent être étudié pour les systèmes organiques et inorganiques[25]. Si on veut étudier la chimie dans la masse, le profil des différentes profondeurs de l'échantillon peut être déterminé en utilisant la gravure ionique (aussi connue comme la pulvérisation cathodique, qui est une méthode destructive). L'avantage d'utiliser la XPS est dans l'empreinte des matériaux et l'identification des orbitales de liaisons des échantillons étudiés[26]. Il est possible d'utiliser une grande variété d'échantillons. Cette méthode peut être utilisée par la plupart des personnes, et non pas uniquement des chercheurs hautement entraînés à utiliser cette machine [27] Il est possible d'obtenir des informations supplémentaires en analysant la surface après que l'échantillon ait été bombardé avec des ions d'énergies élevés ou basses. La XPS est une méthode beaucoup moins destructive que la AES (*Atomic Emission Spectroscopy*). Ceci est dû au fait que la puissance délivrée est plus basse que la AES et non pas parce que les photons causent moins de dommages que les électrons de mêmes énergies. Il est possible d'obtenir des informations sur les surfaces des plastiques, des surfaces organiques et des polymères[28] Pour les polymères, ces études sont importantes pour l'adhésion, l'aptitude à la teinture et l'imprimabilité. Une des caractéristiques est la possibilité de faire l'analyse à des niveaux de vide relativement modérés. Il est également possible de déterminer le degré d'oxydation des composés inorganiques[28].

4.2. Inconvénients

Les désavantages sont que plusieurs études ont tendance à uniquement utiliser la XPS pour déterminer les éléments sur la surface d'un échantillon en négligeant les autres informations qui pourraient être obtenues avec la XPS ou d'autres méthodes d'analyse. Il est difficile de concentrer les rayons X avec une intensité suffisante sur une cible relativement petite. Le diamètre du rayon était de 1 cm tandis que, récemment, ce diamètre a réussi à être réduit pour obtenir 1 mm[28]. La source de rayon X ne peut tolérer une pression de 5×10^{-5} torr[28]. Même si la haute résolution est très sensible à un changement mineur ou à un certain changement de gradient, ces problèmes peuvent être réglés. Les photoélectrons produits en XPS sont incapables de passer à travers plus de 5 à 10 nm de solides¹. De ce fait, la XPS analyse principalement les accumulations sur les surfaces.

5. Microscopie électronique à balayage (MEB)

5.1. Elaboration des échantillons

Les échantillons sont réalisés à partir de fragments ou de poudres. Les fragments sont enrobés dans une résine époxy à température ambiante. Après durcissement, les échantillons sont polis en plusieurs étapes, en finissant par un plateau diamanté 18 microns. Le polissage commence avec de l'eau puis se termine avec de l'éthanol. Tous les échantillons (sections polies ou poudres) sont recouverts d'une fine couche d'or (d'une épaisseur de l'ordre de 3-10 nm) par pulvérisation cathodique afin de rendre la surface conductrice et d'éviter les effets de charge.

5.2. Appareillage

Les observations microstructurales ont été réalisées sur le microscope électronique à balayage mutualisé entre les trois laboratoires LSI, PMC, PICM de l'Ecole Polytechnique. Ce microscope est équipé d'un canon à effet de champ à cathode froide (Modèle Hitachi S-4800, Figure II-B-2). Il est couplé à un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) permettant la microanalyse X.

Les images en électrons secondaires et rétrodiffusés ont été réalisées en appliquant une tension de 10 ou 15 kV. Les analyses EDX ont toujours été obtenues avec une tension de 15 kV, afin d'exciter suffisamment les raies de fluorescence des atomes présents



Figure 20: *Microscope électronique à balayage (MEB-FEG)*

Chapitre IV

Partie expérimentale

Méthode de caractéristique des poudres de sable
d'après laboratoire génie civil MADACI

1.Introduction

Nous avons commencé à décrire physiquement les caractéristiques du sable utilisé de la région de Boussaâda qui est le sable des dunes (SD) de la région qui entoure la ville de BOUSAADA (Wilaya de M' SILA).

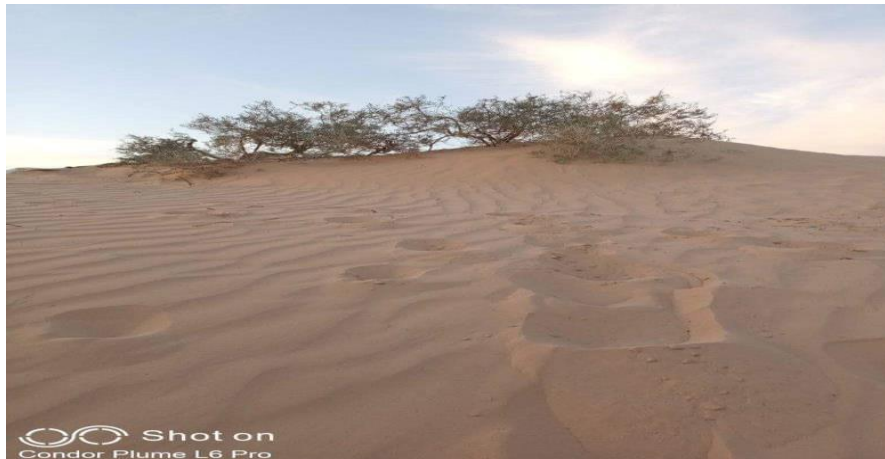


Figure21 :Sable de la région de Boussaâda

On a commencé par les opérations suivantes :

- 1-Homogénéisations** de 50 kg de sable de cette région puis on a tiré 2 kg pour l'analyse granulométrique :
- 2-Lavage de cette quantité de sable** pour éliminer les argiles et les particules nuisibles ;
- 3-Séchage naturel** de cette partie du sable.
- 4-Pesage de 2 kg** de ce produit homogénéisé.

Notre but de trouver les caractéristiques de l'analyse granulométrique est de déterminer des résultats des grosseurs et les pourcentages pondéraux respectifs des grains constituant l'échantillon pris à l'état naturel.

2. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est effectuée après l'élimination des particules supérieures à 5 mm et inférieures à 0.02 mm avec le passage de sable sur les tamis (5 mm et 0.02 mm).

3. But de l'essai de l'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de détecter les grosseurs et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

Il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des graines d'un granulat. L'analyse granulométrique a trois buts :

Déterminer les dimensions des grains.

Déterminer les proportions de grains de même dimension.

En déduire le module de finesse (MF).

4. Matériel nécessaire :

Des tamis dont les ouvertures carrés, de dimension normalisée, sont

[ggg] LABORATOIRE GENIE CIVIL MADACI-Bâtiment et Travaux publics –
Siège social Sétif: cité Maabouda (en face de l'institut d'optique et mécanique de précision) .09/03/ 2021.

réalisés soit à partir d'un maillage métallique. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, on à utiliser une machine à tamiser électrique qui effectue un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis.



Figure 22 : Machine à tamiser électrique de laboratoire de Génie Mécanique du type :KERN

❖ Tamisage :

Cette opération est faite au laboratoire d'un temps de 10 min. pour l'élimination des particules supérieures à 5 mm et l'obtention de la classe $(-0.08+0)$ mm

Les résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé sont représentés dans le tableau N°10

A travers des tamis dont les ouvertures carrés, de dimension normalisée, sont réalisés à partir d'un maillage métallique

5.Mode opératoire :

Prélever (2 kg) de sable sec.

Peser chaque tamis à vide a 1 g pré, soit mi la masse du tamis.

Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas :

5mm ;2.5mm ;1.25mm ;0.63mm ;0.315mm ;0.160 mm;0.08mm.



**Figure 23 : Colonne de tamis avec des mailles respectivement de haut en bas :
5mm ;2.5mm ;1.25mm ;0.63mm ;0.315mm ;0.160 mm;0.08mm.**

3-On commence par verser le sable sec sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agité pendant 10 mn.

4-Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.

5-Peser chaque tamis séparément 1 g prés.

Les résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé est représenté dans les tableauxN°

- ✓ Prélever (2 kg) de sable sec.

- ✓ Peser chaque tamis à vide a 1 g pré, soit mi la masse du tamis.

En utilisant la balance suivante du type KERN



Figure24 balance utilisée pour le peusage du type KERN

- ✓ Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas : (5-2.5)- (1.25-0.63(-0.315-0.125-0.08). La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion de poussières. On commence par peser les tamis ainsi que le fond.
- ✓ Verser le sable sec sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agité pendant 10 mn. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.
- ✓ Peser chaque tamis séparément 1 g prés.
- ✓ Soit M_i la masse de tamis (1) + le sable(m_i).
- ✓ La différence entre M_i et m_i correspond au refus partiel R_1 du tamis 1.
- ✓ Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.

- ✓ Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R_1 , soit R_2 la masse du refus cumulé du tamis ($R_2 = R_1 + \text{refus partiel sur tamis}$).
- ✓ Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumulés R_3, R_4 . Le tamisât cumulé est donné la relation suivante :

$$T = 100 - R_e$$

Avec :

- ✓ T : tamisât en %.
- ✓ R_e : refus cumulés en %.

Les résultats sont les tableaux suivants :

Tableau 10 : Analyse granulométrique du sable de l'état naturel après Son homogénéisation.

Tamis (mm) .	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât cumulé
		g	%	
5.000	0	0	0.00	100.00
2.500	1	1	0.05	99.95
1.250	1	2	0.05	99.95
0.630	11	22	0.55	99.45
0.315	320	342	16.00	84.00
0.160	1428	1770	71.40	28.60
0.080	216	1986	10.80	89.20
Fine	2	1988	0.10	99.90

Correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés des tamis d'ouvertures (0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5) (mm). Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons (NF P 18-540).

Les normes soviétiques spécifient le Module de finesse (MF) des sables comme suit :

- ✓ Sable gros $MF > 2.5$
- ✓ Sable moyenne $2 < MF < 2.5$
- ✓ Sable fin $1.5 < MF < 2$
- ✓ Sable très fin $1 < MF < 1.5$

Il est donné par la relation suivante :

$$MF = 1/100 (R_e(0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5))$$

6. Masse volumique absolue

Elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

❖ Mode opératoire :

La masse volumique absolue de sable est déterminée à l'aide d'un récipient de 1000 cm³ on prend 3 échantillons de masse 300g.

On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse 250 ml d'eau, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y excite.

Après cette opération, on détermine le volume finale occupé par le mélange sable-eau, soit (V) ce volume.

Dance le volume occupé par le sable seul c'est :

$$\text{Volume de sable} = V_1 = V - V_e \quad V_e = 250 \text{ cm}^3$$

La masse volumique absolue du sable et calculée par la formule :

$$\rho_s = M/V_1 \quad M = 300\text{g}$$

Tableau 11 : Résultats de la masse volumique absolue de sable.

Résultats obtenus :

N° d'essai	M (g)	V _e (ml)	V (ml)	ρ_s [g/cm ³]	ρ_s (moy) [g/cm ³]
1	300	250	367	2.56	2.58
2	300	250	366	2.58	
3	300	250	365	2.60	

La masse volumique apparente à l'état lâche

La masse volumique apparente du sable, c'est la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

❖ **Mode opératoire :**

On déterminer la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardiste de capacité 2

à 2.5 L.

- ✓ On remplit l'entonnoir avec sable sec.
- ✓ On pèse le récipient vide de capacité 0.9 L, soit M₁ ce poids.
- ✓ En place le récipient sous l'entonnoir a une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- ✓ On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M₂ ce poids...

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivant :

$$\mathbf{Y_{app} = (M_2 - M_1)/V_r}$$

Avec :

- ✓ M₁ : Masse du récipient vide.
- ✓ M₂ : Masse du récipient plus le sable.
- ✓ V_r : Volume du récipient.

7.Masse volumique apparente à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

❖ Mode opératoire :

Même méthode que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient on soumet ce dernier à 30 secousses manuelles. On complète le remplissage du récipient après le tassement du sable, puis on nivelle ce dernier et on le pèse. Soit M_2 le poids de l'ensemble (sable + récipient), la masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$Y = (M - M_1)/V_r,$$

- ✓ M_1 : Masse du récipient vide.
- ✓ M_2 : Masse du récipient plus le sable.
- ✓ V_r : Volume du récipient.

Après avoir tamisé le sable que nous avons pris de la région de bousaada,nous avons prélevé deux échantillons (+0,08 et -0,08) et les avons examinés DRX ,et nous avons finalement obtenus les résultat suivants :

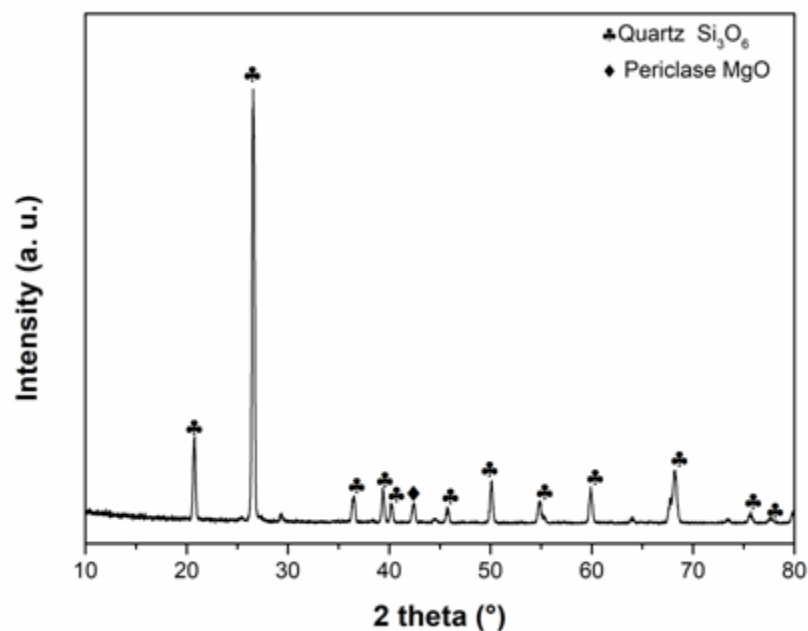


Figure 25 : courbe représentant l'échantillon (+0,08)

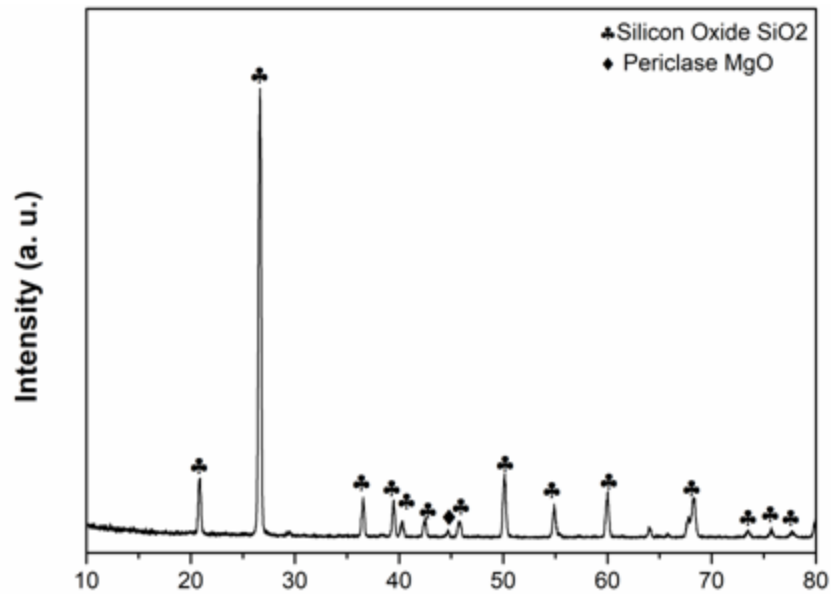


Figure 26 : courbe représentant l'échantillon (-0,08)

A travers les deux courbes sur les quelles nous avons effectué l'examen DRX :

- Pour le premier échantillon (le diamètre est supérieur à 0,08) riche en Qarts Si_3O_6 , il contient un très faible pourcentage de MgO .
- Pour le deuxième échantillon (le diamètre inférieur à 0,08) il a un pourcentage élevé de SiO_2 , c'est quasi inexistant MgO .

De cela, nous concluons que le sable de la région de Bousaada peut être utilisé dans les travaux de construction, il peut être ajouté comme support dans les matériaux composite dans certaines proportions.

Enfin, nous avons prélevé les deux échantillons pour l'imagerie au microscope optique :



Figure 27 : échantillon de sable dont le diamètre est inférieur à 0,08



Figure 28 : échantillon de sable dont le diamètre est supérieure à 0,08

Nous avons également apporté des échantillons d'une Société de Maintenance des Equipement industriels (les propriétés chimiques que nous mettons dans la partie théorique qui sont dans sa fiche technique).

Nous avons photographié les échantillons que nous avons ramenés au microscope optique pour voir la structure de ce dernier.



Figure 29 : grenaille métallique en différents diamètres

Après microscopie :

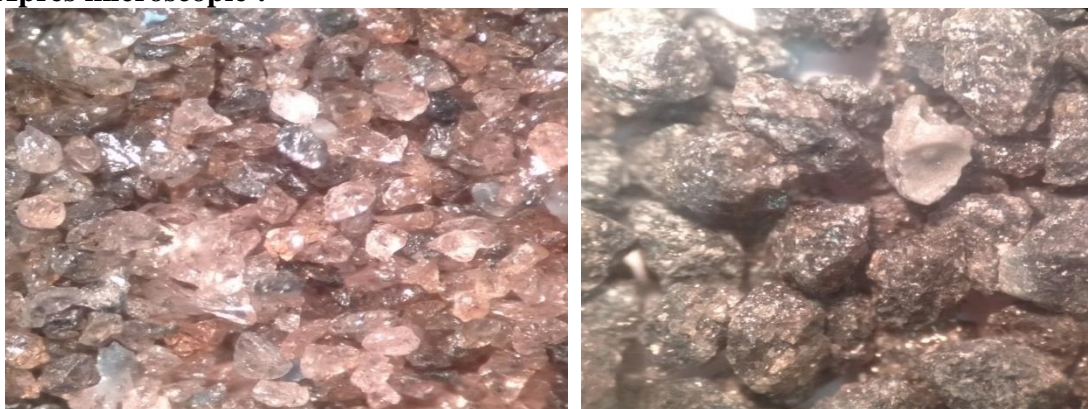


Figure 30 : grenaille métallique en différents diamètres photomicrographie



Figure 31 : Micro Bille de verre en différents diamètres



Figure 32 : Micro Bille de verre photomicrographie

Conclusion :

Ce travail de génie des matériaux sur l'étude de quelques types de sables dont la synthèse reste difficile malgré l'intérêt des communautés scientifique et industrielle en raison de forts potentiels d'applications. Notre objectif a été de contribuer aux procédés de fabrication des poudres de sable et leur transformation pour permettre d'obtenir des matériaux avec des applications industrielles plus larges.

La caractérisation des poudres de sable n'est pas une tâche triviale. Une des principales raisons en est la présence phases des solides de différentes propriétés surtout en état compact. Il faut aussi signaler l'importance de la procédure d'échantillonnage à laquelle la plus grande attention doit être apportée. Dans l'idéal, une technique de caractérisation des poudres devrait satisfaire plusieurs. Toutefois, la majorité des tests existants souffre de plusieurs inconvénients, à savoir :le besoin d'un personnel qualifié ;des mauvaises répétitivité et reproductibilité des essais ... Il y a donc nécessité d'élaborer des moyens de caractérisation plus rationnels, plus universels et plus fiables afin de mieux connaître l'état solides divisés.

Enfin, quelle que soit la propriété recherchée, il s'avère que le choix approprié d'un test de caractérisation nécessite déjà une certaine connaissance du produit et doit se faire en fonction de l'utilisation que l'on envisage de faire des résultats. Ce travail traite des matériaux solides divisés qui sont mis en œuvre dans l'industrie chimique et qui sont utilisés comme moyen de contrôle, d'analyse et d'amélioration. Plus précisément, sont introduites ici les notions de base des propriétés du grain. Les caractéristiques des particules (leur taille, leur masse volumique, leur forme, leur porosité, etc), mais également les propriétés relatives à une population de particules (la distribution de taille, la masse volumique en vrac, l'homogénéité, etc)

Les matériaux solides divisés présentent une part non négligeable des produits, finis ou intermédiaires, mis en œuvre dans l'industrie et sont omniprésents dans notre vie quotidienne. Dans ce mémoire , on a introduit les notions de base nécessaires à la caractérisation des milieux granulaires : des propriétés du grain Caractérisation et analyse des poudres en passant par les caractéristiques collectives des particules. L'objectif est de permettre au lecteur de comprendre et de visualiser les bases scientifiques et les techniques de caractérisation des solides divisés qui peuvent être utilisées comme moyens de contrôle, d'analyse et d'amélioration d'un procédé.

Une poudre est un assemblage de particules solides hétérogènes dispersées entre lesquelles s'exerce une multitude d'interaction (Van der Waals, capillaires, électrostatiques, etc.). Le comportement global d'une poudre dépend directement de ces interactions et des caractéristiques des particules solides. Premièrement, après la préparation des poudres de sable des dunes (SD) de la région de Boussaâda (M'SILA),on a constaté qu'après l'Homogénéisations ;le Lavage ;Séchage ; de 50 kg de sable , on a tiré 2 kg qui sont constitués généralement de silice, et d'une petite quantité de magnésium). Le but de l'essai d'analyse granulométrique ,est de détecter les grosseurs et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon ; de déduire le module de finesse (MF).

L'utilisation du sable dans une cabine de sablage ou d'une sableuse élimine l'abrasif sous forme de poussière. Toutefois, certains abrasifs très résistants sont recyclables, ils peuvent être utilisés plusieurs fois avant d'être inemployables (ex : corindon brun,

microbille de verre...). Une utilisation successive de deux abrasifs différents est possible afin d'obtenir deux traitements différents (ex : le décapage puis le satinage). Dans ce mémoire on a présente les méthodes d'analyse utilisées pour caractériser les matières premières et les poudre. Toutes les matières premières (sable et inclusions granulaires) ont été caractérisées par granulométrie, puis à l'échelle structurale par (diffraction des rayons X).

la distribution granulométrique des poudres étudiées a été déterminée par granulométrie laser en voie humide. Cette technique, basée la diffusion de la lumière d'un faisceau laser envoyé sur les particules, permet en effet de mesurer les dimensions des grains de 0,001 à 200 μm .

Dans le cadre de cette étude, les analyses sont réalisées au moyen d'un granulométrie laser (CILAS 1180). Les particules sont préalablement mises en suspension, dans de l'alcool (éthanol) pour le ciment et dans de l'eau pour les autres inclusions, et sont dispersées au moyen d'une sonde ultrasonore. Pour l'analyse de la fumée de silice et du quartz broyé, nous avons ajouté le super plastifiant (§ III-A-3) comme agent dé flocculant pour une bonne dispersion des grains.

éférences Bibliographiques

[1] G. Menéndez, V. Bonavetti, E.F. Irassar, «Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag». *Cement and Concrete Composites*, 25, 1, p.61-67 (2003)

[2] J. Gillard .De la poudre au comprimé : évolution de la microstructure.*Labo-Pharma – Problèmes et Techniques – N°309*, 1981, p.359-369

[3]Laboratoire d'analyses granulométriques

[4].F. Mayne Echantillonnage et analyse granulométrique des poudres par microscopie Thèse pour le diplôme de docteur en pharmacie, 1975

[5]. *Pharmacopée Européenne en ligne 7ème édition, version 7.0* Tamis.Classification granulométrique des poudres par tamisage.Analyse de la taille des particules par diffraction de la lumière laser

[7] Microscopie. Estimation de la distribution granulométrique par tamisage analytique .Uniformités des teneurs unidoses

[8] BEN Fettacha et Mohamad Abdou :de compacité des bétons Autoplaçants aus différents type de sables soutenue le 04/06/2016

[9]Sedran T 1999 : Application a la formulation des bétons auto-nivelant thèse de doctorat ,ecole nationale des ponts et chaussées s paris Frence Mar

[10]philippe jasson,technique de l'ingénieur,sables et matériaux de moulage de fonderie, Date publication:10/12/1999 éditions techniques de l'ngenieur*294rue de crimée 75019paris-France,les page(M3575)_59,3 375-59 M 3 375)

[11]Ben fatcha mohame abdou:de compacité des bétons autoplaçants aus différents type de sables soutenue 04/06/2016

[12]société de maintenance des équipements industriels Msila

[13]CHLOÉ GURDJIAN Publié le 20/04/2021 à 17h58 - Mis à jour le 21/04/2021

[14]DÉVELOPPEMENT DURABLEPROJETS ET INNOVATIONSG.N., le 18/05/2018 à 16:52

[15] Djerbi, A., (2007), "Influence de l'endommagement mécanique sur la perméabilité au gaz et sur la diffusion des ions chlore des bétons", Thèse de doctorat, Université de Nantes.

[16] Dreux, G., (1970), "Guide pratique du béton", Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.

[17] Dugat, J., Roux, N., et Bernier, G., (1996), "Mechanical properties of reactive powder

concretes", *Materials and Structures*, S2, p. 233-240.

[18] ↑ (en) « Applications covering the range of applications in XPS » [[archive](#)], sur *ThermoScientific XPS*, 2013 (consulté le 18 octobre 2017)

[19] ↑ (en) Sally L. McArthur, Gautam Mishra et Christopher D. Easton, « Applications of XPS in Biology and Biointerface Analysis », dans *Surface Analysis and Techniques in Biology*, Springer International Publishing, 2014 (ISBN 978-3-319-01360-2, DOI [10.1007/978-3-319-01360-2_2](#), [lire en ligne](#) [[archive](#)]), p. 9–36

[20] ↑ (en) Sally L. McArthur, Gautam Mishra et Christopher D. Easton, « Applications of XPS in Biology and Biointerface Analysis », dans *Surface Analysis and Techniques in Biology*, Springer International Publishing, 2014 (ISBN 978-3-319-01360-2, DOI [10.1007/978-3-319-01360-2_2](#), [lire en ligne](#) [[archive](#)]), p. 9–36

[21] ↑ (en) « Surface chemistry of phase-pure M1 MoVTeNb oxide during operation in selective oxidation of propane to acrylic acid », *J. Catal.*, 2012, p. 48-60 ([lire en ligne](#) [[archive](#)])

[22] ↑ « The reaction network in propane oxidation over phase-pure MoVTeNb M1 oxide catalysts », *J. Catal.*, 2014, p. 369-385 ([lire en ligne](#) [[archive](#)])

[23] ↑ « XPS analysis of PE and EVA samples irradiated at different-doses », *Applied Surface Science*, 2018 ([lire en ligne](#) [[archive](#)])

[24] ↑ « XPS Characterization of the Surface Oxide Film of 316L Stainless Steel Samples that were Located in Quasi-Biological Environments », *Materials Transactions*, 2002 ([lire en ligne](#) [[archive](#)])

[25] ↑ [Revenir plus haut en : a et b](#) (en) T. Lucatorto et R. Celotta, *Advances in Surface Science*, Londres, [Academic Press](#), 2001, 454 p.

[26] ↑ (en) J. C. Vickerman et I. S. Gilmore, *Surface Analysis : The Principal Techniques*, [Wiley](#), 2009, 686 p

[27] ↑ [Revenir plus haut en : a b c d e f g h et i](#) (en) D. A. Skoog, J. F. Holler et S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, États-Unis, Cengage Learning, 2017, 959 p.

[28] ↑ [Revenir plus haut en : a b et c](#) (en) A. W. Czanderna, *Methods of Surface Analysis*, Amsterdam, Netherlands, [Elsevier](#), 1984, 496 p.

Résumé :

Les poudres de sable font partie des matériaux largement utilisés dans les industries de fabrication ou de transformation des matériaux. Ces poudres sont constituées de nombreuses particules ainsi que d'une phase gazeuse qui remplit l'espace entre les grains. Durant ce travail de mémoire, nous sommes intéressés à l'étude des méthodes d'analyse de ces systèmes très complexes de grains fins et même très fins. Lorsqu'une poudre de sable est simplement déposée sous forme de tas, elle se trouve dans un état stable et est alors comparable à un matériau solide. Dans un état dynamique elle peut s'écouler. Elle prend alors la forme du contenant dans lequel elle est versée, et est donc apparentée à un matériau liquide.

Le présent travail ,est basé sur l'étude d'une quantité de sable après son homogénéisation de la région de Boussaâda M'sila ,qui possède pour les classes fines inférieures à 0.08 mm, des états quasi-statique au cours duquel les particules de poudre peuvent se réarranger entre elles, provoquant une diminution progressive du volume du tas de poudre à l'état humide .

Afin d'appréhender le comportement d'une poudre, il est nécessaire de bien comprendre les caractéristiques des particules qui la composent CHIMIQUEMENT.

Après la détermination des caractéristiques granulométriques de nos échantillons nous avons fait l'extraction de deux classes importantes selon leur classification qui sont la classe -0.08 mm et 0.08 mm puis on les a analysé par rayon x (la DRX).

Les résultats des analyses été obtenus par le DIFRACTOMETRE du laboratoire pédagogique du département de physique Université de Mohamed Boudiaf de M'sila.

.La diffraction des rayons X qui repose sur l'enregistrement d'un diffractomètre et sur l'analyse des pics de ce diagramme qui permet de caractériser nos cristallites présents dans l'échantillon à partir des éléments suivants :1.Position des pics : analyse qualitative, identification de phases cristallines présentes ;2.Largeur des pics : taille et forme des cristallites, contraintes internes

3.Intensité des pics : estimation de composition chimique, analyse quantitative, orientation préférentielle.

Les résultats nos échantillons ramenés de Boussaâda ont montrés qu'il sont constitués d'une grande quantité de silice et d'une très petite quantité de magnésium.

Comme conclusion finale on peut dire :que le sable ramenés de cette région peut être utilisés comme des ajouts aux matériaux composites ou comme matériaux de construction au béton .

Cela s'explique par son comportement lorsqu'il est soumis aux forces gravitationnelles, il existe également des interactions inter-particulaires capables d'exercer une influence non négligeable. Elles permettent notamment de maintenir les particules de poudre dans un état d'équilibre, lors duquel la poudre reste stable et ne s'écoule pas. Lorsque ces interactions inter-particulaires ne sont plus suffisamment fortes, l'état d'équilibre entre les particules n'est plus maintenu, et la poudre s'écoule. Le déplacement des particules au sein d'une poudre est dépendant de différents types d'interactions inter-particulaires.

ملخص :

مساحيق الرمل هي واحدة من المواد المستخدمة على نطاق واسع في صناعة المواد أو صناعات المعالجة. تتكون هذه المساحيق من العديد من الجسيمات بالإضافة إلى الطور الغازي الذي يملأ الفراغ بين الحبيبات. خلال هذه الرسالة، نحن مهتمون بدراسة طرق تحليل هذه الأنظمة المعقدة للغاية من الحبوب الدقيقة وحتى الدقيقة جداً. عندما يتم ترسيب مسحوق الرمل ببساطة في كومة، فإنه يكون في حالة مستقرة ومن ثم يمكن مقارنته بمادة صلبة. في حالة ديناميكية يمكن أن تتدفق. ثم تأخذ شكل الحاوية التي تُسكب فيها، وبالتالي فهي مرتبطة بمادة سائلة.

يعتمد العمل الحالي على دراسة كمية من الرمل بعد تجانسها لمنطقة بسادة المسيلة، والتي تحتوي على حالات شبه ثابتة للفئات الدقيقة أقل من 0.08 مم، يمكن خلالها لجسيمات المسحوق إعادة ترتيب نفسها، مما يتسبب في انخفاض تدريجي في حجم كومة المسحوق الرطب.

لفهم سلوك المسحوق، من الضروري فهم خصائص الجسيمات التي تتكون منها كيميائياً. بعد تحديد خصائص حجم الجسيمات لعيناتنا، استخرجنا فئتين مهمتين حسب تصنيفهما، وهما فئة -0.08 مم و 0.08 مم، ثم تم تحليلهما بالأشعة السينية (XRD).

تم الحصول على نتائج التحليلات بواسطة DIFRACTOMETER للمختبر التربوي لقسم الفيزياء بجامعة محمد بوضياف بالمسيلة.

حيود الأشعة السينية الذي يعتمد على تسجيل مقياس الحيود وعلى تحليل قمم هذا الرسم البياني مما يجعل من الممكن تمييز بلوراتنا الموجودة في العينة من العناصر التالية: 1- موضع القمم: تحليل نوعي، تحديد الأطوار البلورية الحالية؛ 2. عرض الذروة: حجم وشكل البلورات والضغط الداخلية. 3. شدة الذروة: تقدير التركيب الكيميائي، التحليل الكمي، التوجه التفضيلي.

أظهرت النتائج التي أحضرتها عيناتنا من بوسعادة أنها تتكون من كمية كبيرة من السيليكا وكمية صغيرة جداً من المغنيسيوم.

في الاستنتاج النهائي يمكننا أن نقول: أن الرمل الذي تم إحضاره من هذه المنطقة يمكن استخدامه كإضافات لمواد مركبة أو كمواد بناء خرسانية.

يفسر ذلك من خلال سلوكه عند تعرضه لقوى الجاذبية، فهناك أيضاً تفاعلات بين الجسيمات قادرة على ممارسة تأثير كبير. إنها تجعل من الممكن على وجه الخصوص الحفاظ على جزيئات المسحوق في حالة توازن، حيث يظل المسحوق ثابتاً ولا يتدفق. عندما لا تكون هذه التفاعلات بين الجسيمات قوية بما فيه الكفاية، فإن حالة التوازن بين الجسيمات لم تعد محفوظة، ويتدفق المسحوق. تعتمد حركة الجسيمات داخل مسحوق على أنواع مختلفة من التفاعلات بين الجسيمات

Summary :

Sand powders are one of the widely used materials in the materials manufacturing or processing industries. These powders are made up of many particles as well as a gas phase that fills the space between the grains. During this thesis, we are interested in the study of the methods of analysis of these very complex systems of fine and even very fine grains. When a sand powder is simply deposited in a pile, it is in a stable state and is then comparable to a solid material. In a dynamic state it can flow. It then takes the form of the container in which it is poured, and is therefore related to a liquid material.

The present work is based on the study of a quantity of sand after its homogenization of the region of Boussaâda M'sila, which has for fine classes less than 0.08 mm, quasi-static states during which the particles of powder can rearrange themselves, causing a gradual decrease in the volume of the wet powder pile.

In order to understand the behavior of a powder, it is necessary to understand the characteristics of the particles that compose it CHEMICALLY.

After determining the particle size characteristics of our samples, we extracted two important classes according to their classification, which are the -0.08 mm and 0.08 mm class, then they were analyzed by x-ray (XRD).

The results of the analyzes were obtained by the DIFRACTOMETER of the educational laboratory of the physics department of Mohamed Boudiaf University of M'sila.

X-ray diffraction which is based on the recording of a diffractometer and on the analysis of the peaks of this diagram which makes it possible to characterize our crystallites present in the sample from the following elements: 1. Position of the peaks: analysis qualitative, identification of crystalline phases present; 2. Peak width: size and shape of crystallites, internal stresses

3. Peak intensity: estimation of chemical composition, quantitative analysis, preferential orientation.

The results our samples brought back from Boussaâda showed that they consist of a large amount of silica and a very small amount of magnesium.

As a final conclusion we can say: that the sand brought back from this region can be used as additions to composite materials or as concrete building materials.

This is explained by its behavior when subjected to gravitational forces, there are also inter-particle interactions capable of exerting a significant influence. They make it possible in particular to maintain the powder particles in a state of equilibrium, during which the powder remains stable and does not flow. When these inter-particle interactions are no longer strong enough, the state of equilibrium between the particles is no longer maintained, and the powder flows. The movement of particles within a powder is dependent on different types of inter-particle interactions.