

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun - Tiaret



Faculté des Sciences de la Matière
Département de Physique

Mémoire

Présenté par

HOUARI Oumkeltoum

OUDDANE Nadia

*Pour obtenir le diplôme de
Master*

*Filière Physique
Spécialité : physique des matériaux
Thème :*

**ÉTUDE DE LA CONSOLIDATION DES POUDRES
NANOMETRIQUES:POUDRE DE CIMENT**

Soutenu le : 25 /06 /2020

Devant le jury :

Mr. BAGHDAD Rachid
Mr. BELARBI El- Habib
Mr. TURKI Djamel
Mr. Djafri Youcef

Pr. Université Ibn Khaldoun Tiaret
Pr. Université Ibn Khaldoun Tiaret
Pr. Université Ibn Khaldoun Tiaret
Dr. Université Ibn Khaldoun Tiare

Président
Examinateur
Encadrant
Co-Encadrant

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2019/202



Dédicaces :

*Je dédie ce travail à ceux qui sont le symbole de tendresse et d'amour,
et qui sacrifient leur vie pour que la notre soit heureuse.*

A Mes chers parents

*Mon père qui m'a appris la persévérance, la patience et la responsabilité
Ma mère, la plus chère personne à mon cœur, source d'inspiration et de tendresse.*

A mes chers frères DJAMAL EDDINE et IBRAHIM ELKHALIL.

A ma chère sœur ASSIA et mon neveu RAYAN et ma nièce RAWAN.

*A ma grande mère, mes oncles, mes tantes, mes cousines, mes cousins, et toute la
famille.*

A HANAN et SOUMIA et AMINA.

A ma binôme NADIA.

MERCI

HOUARI OUM KETTOUM



BONTONTV



Dédicaces :

Je dédie ce mémoire à mes adorables parents, ma mère et mon père, pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

À mon père, tu as toujours été à mes cotes pour me soutenir et m'encourager.

À ma mère, je vous remercie pour tout le soutien et l'amour.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

À mes très chers frères TOUFIK et ABD ELDJALIL.

À toute ma famille OUDDANE surtout mes chères oncles.

À tous mes amis.

À HANAN et SOUMIA et AMINA.

À ma binôme OUM KELTOUM.

MERCI

OUDDANE NADIA



Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre profonde gratitude à ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné courage et force afin de mener à bien ce travail.

Nous remercions notre directeur de mémoire Mr. TURKI DJAMEL, pour nous avoir dirigé tout au long de la réalisation de ce travail.

Merci à Mr DJAFRI YUCEF pour toute son aide, son suivi permanent et ses précieux conseils.

Nos remerciements vont aussi à tous les membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer ce travail.

Nous remercions toutes les personnes qui ont pu nous aider, d'une manière ou d'une autre, à terminer ce travail .

Nous remercions également tous les autres professeurs.



TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : LES MILIEUX GRANULAIRES

LES MILIEUX GRANULAIRES.....	4
I.1 Définition du milieu granulaire	4
I.2 Caractéristiques du milieu granulaire	4
I.2.1 Taille et morphologie de la particule	4
I.2.2 Densité.....	5
I.2.3 Porosité.....	6
I.3 Classification des poudres.....	7

CHAPITRE II : LE CIMENT (CONCEPTS DE BASE)

II. LE CIMENT.....	10
II.1 Historique et origine de ciment	10
II.2 Procèdes et techniques de fabrication du ciment portland.....	10
II.2.1 Techniques de fabrication	10
II.2.2 Procédés de fabrication du ciment.....	10
II.3 Constituants du ciment.....	10
II.4 Classification des ciments.....	10
II.4.1 Selon leur composition.....	10
II.4.2 Selon leur résistance normale.....	11
II.5 Les différentes propriétés des ciments.....	11
II.5.1 Propriétés physiques	11
II.6 Essais physiques sur les ciments	11

CHAPITRE III : CONSOLIDATION & FORCES D'ADHESION

III. LA CONSOLIDATION.....	20
III.1 Forces d'adhésion	21
III.1.1 Les forces de Van Der Waals.....	21
III.1.2 Ponts liquides	22
III.1.3 Ponts solides.....	23
III.1.4 Forces électrostatiques.....	24
III.2 Les différents types de consolidation.....	24
III.2.1 Projection thermique.....	24

CHAPITRE IV : Étude Expérimentale

IV.	LE CIMENT UTILISE	30
IV.1	Le plâtre	32
IV.2	Le test de consolidation.....	32
IV.2.1	L'appareil utilisé	32
IV.2.2	Les étapes de l'expérience	33
	CONCLUSION.....	37

LIST DES TABLEAUX

Tableau 1 : le pourcentage pondéral de certains constituants[27].	10
Tableau 2 : Classes de résistance du ciment[29]	11
Tableau 3 : Essais physiques des quatre (04) ciments.	11
Tableau 4 : les caractéristiques chimique et physique du ciment fournies par l'ECDE.	31

LIST DES FIGURES

Figure 1 : différents comportements des poudres.	4
Figure 2 : Plusieurs formes idéales de particules en métallurgie des poudres.	5
Figure 3 : Porosité intraparticulaire [10]	6
Figure 4 : Représentation de différente organisation d'un lit de poudre[11]. a) Pores intra granulaires et inter granulaires. b) Organisation optimale d'un lit de poudre. c) Organisation aléatoire d'un lit de poudre.	7
Figure 5 : Classification de Geldart[12, 13]	8
Figure 6 : Echantillon de ciment.	10
Figure 7 : Constituants du ciments avec le pourcentage [26].	10
Figure 8 : Consolidation d'un lit de poudre.	20
Figure 9 : pont liquide entre deux particules sphériques identiques[44].	23
Figure 10 : un schéma d'un processus générique de consolidation par projection thermique.[49]	25
Figure 11 : le processus de projection à froid.	26
Figure 12 : Principe du testeur de cisaillement vibrant [54]	27
Figure 13 : Représentation schématique d'une machine SPS.	28
Figure 14 : Aperçu d'un sac de ciment (50kg).	30
Figure 15 : Appareil d'essai de consolidation.	32
Figure 16 : La cellule de consolidation « a » et sa composante « b ».	34
Figure 17 : le Mécanisme des opérations de consolidation et cisaillement.	34
Figure 18 : l'écran d'affichage.	35

Résumé : Les poudres de ciment sont classées en groupe C de la classification de Geldart (1973). Et sont caractérisées comme des poudres cohésives se présentent généralement sous forme de structures hétérogènes en granulométrie, distribution granulométrique, morphologie (forme) et propriétés physiques (densité, surface spécifique et porosité). Ce système particulaire semble être très complexe à manipuler et à stocker, La complexité de ce comportement est due à la petite taille des particules fines (diamètre inférieur à 30 μm). Ceux-ci ont tendance à former des agglomérats de taille et de forme complètement aléatoires en raison de l'influence des forces interparticulaires (forces de Van der Waals). Ce non-équilibre entre les composés peut augmenter le vide d'air dans la structure solide (porosité), cela conduit à la fissuration du ciment durci. De plus, l'application d'une force externe provoque une déformation plastique entre les agglomérats qui sont plus grandes que les molécules individuelles. Cette étude vise à réduire la porosité du lit de poudre de ciment et mettre en évidence le rôle des forces internes et externe agissant sur la structure des particules en appliquant un test de consolidation pour obtenir une substance plus efficace.

Abstract: The cement powders are classified in group C of the classification of Geldart (1973). Are characterized as cohesive powders, generally appear in the form of heterogeneous structures in particle size, particle size distribution, morphology (shape) and physical properties (density, specific surface and porosity). This particulate system seems to be very complex to handle and store. The complexity of this behavior is due to the small size of the fine particles (diameter less than 30 μm). These tend to form agglomerates of completely random size and shape due to the influence of interparticle forces (Van der Waals forces). This imbalance between the compounds increases the air vacuum in the solid structure (porosity), this leads to cracking of the hardened cement. In addition, the application of an external force causes plastic deformation between the agglomerates which are larger than the individual molecules. This study aims to reduce the porosity of the cement powder bed and highlight the role of internal and external forces acting on the structure of the particles by applying a consolidation test to obtain a more effective substance.

INTRODUCTION GÉNÉRAL

Introduction générale

Le domaine des matériaux nanostructures est l'une des branches qui se développe le plus rapidement dans la discipline actuelle de la science des matériaux, les nanoparticules reçoivent aussi le nom d'ultrafines lorsqu'elles sont dans un gaz ou en état de poudre. Elles peuvent être isolées ou s'associer entre elles pour former des agglomérats[1].

Les poudres sont de plus en plus utilisées comme matériaux de base pour de nombreuses industries (bâtiment, chimie, cosmétique, pharmacie, agro-alimentaire, biotechnologies, peinture, ...). Leur structure nanométrique (en général de taille inférieure au (100 μm)) devient la raison d'une amélioration substantielle, parfois radicale, des propriétés sensibles à la structure[2]. Le ciment appartient au groupe C selon la classification de Geldart. Il s'agit de poudres très fines qui sont dites (cohésives) de diamètre inférieure à 30 μm et sont très complexes à manipuler et à stocker.

De nombreux perfectionnements sont apportés au cours du 20^{ème} siècle à la fabrication du ciment, notamment avec la production des ciments spéciaux, sans toutefois modifier leurs caractéristiques conduisant à un matériau plus efficace[3].

La problématique est la fissuration du ciment durci qui revient à l'augmentation du vide dans la structure solide, qui en résulte à former des agglomérats constitués par des particules qui ont tendance à donner une structure de ciment de taille micrométrique en raison de l'influence des forces interparticulaires (forces de Van der Waals), Pour obtenir un matériau plus efficace on essaie de réduire la porosité de la structure[4].

Le terme « consolidation » a été introduit pour la première fois par *Balshin* pour désigner toutes les méthodes d'emballage des particules dans le corps en vrac sous pression. *Gleiter* a pour la première fois appliqué la technique de consolidation à haute pression pour réaliser des échantillons de palladium nanostructures en vrac et évaluer leurs propriétés mécaniques[5].

Les processus de consolidation consistent à assembler des objets plus petits en un seul produit afin d'obtenir la géométrie, la structure ou la propriété souhaitée. Ces processus reposent sur l'application d'énergie mécanique, chimique ou thermique pour effectuer la consolidation et de réaliser la liaison entre les objets[6].

Introduction générale

Cette étude suit les étapes suivantes :

- Chapitre I, résume les milieux granulaires et leurs caractéristiques représentant une collection de particules solides de dimensions millimétriques présentes partout dans la nature et dans le monde industriel, et une partie concerne le ciment, leur historique, procédés et techniques de fabrication, constituants et classification (selon leur composition, résistance et vitesse de prise).
- Le chapitre II présente brièvement le concept de consolidation puis les différents types de forces inter particulaires qui sont les plus fréquents utilisées dans le domaine de la mécanique des poudres et les différents types de consolidation.
- Enfin, le chapitre III est lié à l'étape expérimentale que nous allons faire, qui vise à consolider la poudre de ciment par œdomètre et étudier les forces qui affectent la porosité de la poudre.

CHAPITRE I

LE CIMENT (CONCEPTS DE BASE)

Les milieux granulaires

I.1 Définition du milieu granulaire

Un milieu granulaire, ou poudre, est un terme qui désigne une collection de particules solides hétérogènes, de dimensions généralement inférieures au millimètre, dispersées dans une phase continue gazeuse[7, 8]. Les milieux granulaires présentent un comportement original, intermédiaire entre celui des solides et celui des liquides, et qui sont présents partout dans la nature et dans le monde industriel. En effet, si on verse une poudre dans un récipient, celle-ci prend la forme du récipient, comme les liquides. Cependant, si on incline ce récipient de quelques degrés, la poudre ne bouge pas, comme si elle était un bloc solide. Et si on incline encore plus le récipient, la surface libre de la poudre va commencer à s'écouler, tel un liquide[7, 9]. Néanmoins, même si le comportement des liquides et des solides sont bien connus et peuvent être décrits par des expressions mathématiques, la description du comportement des poudres, est largement empirique[7]. Pour pouvoir bien étudier le milieu granulaire, il faut avant tout connaître les caractéristiques des particules, ainsi que de la poudre dans son ensemble[7].

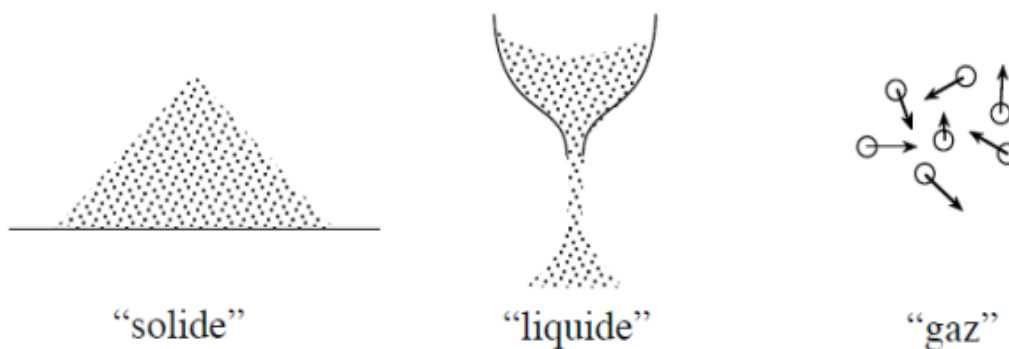


Figure 1 : différents comportements des poudres.

I.2 Caractéristiques du milieu granulaire

I.2.1 Taille et morphologie de la particule

Les particules ne sont en général pas sphériques (cela dépend du processus de production), et peuvent se présenter sous diverses formes (figure 2)[8, 10]. Pour caractériser la taille et la

forme des particules non sphériques, on utilise deux notions[7]:

- Le diamètre équivalent qui correspond au diamètre d'une sphère qui possède une même caractéristique que la particule. Plusieurs diamètres équivalents peuvent être définis en fonction de la caractéristique conservée choisie : diamètre équivalent envolume, en surface, en surface spécifique, en surface projetée, en périmètre. Cette notion permet de définir une dimension caractéristique de la particule, et donc sa taille [7].
- 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. Cette notion permet de quantifier l'écart de la forme de la particule à la sphère. D'autres facteurs de sphéricité peuvent être également définis [7].

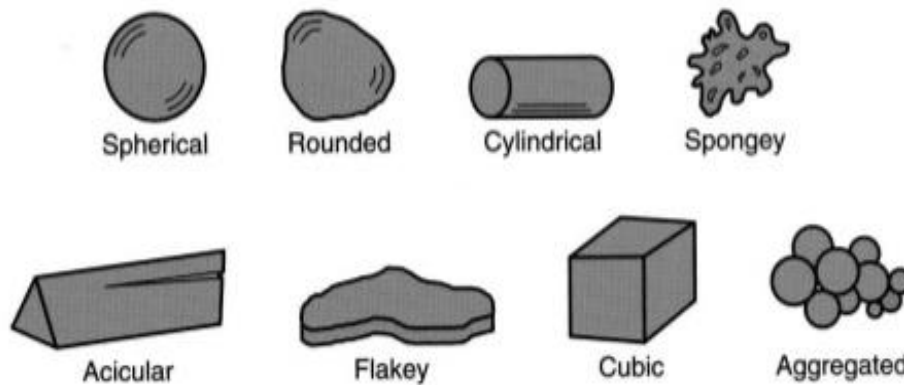


Figure 2: Plusieurs formes idéales de particules en métallurgie des poudres.

I.2.2 Densité

Contrairement aux liquides, solides et gaz dont leur densité dépend de la température et la pression, les poudres voient leur densité varier en fonction de l'organisation dans laquelle elles se trouvent. Ainsi, on peut définir plusieurs types de densité[7, 10]:

- La densité aérée : il s'agit de la masse de poudre rapportée au volume occupé, une fois les particules bien individualisées. Cette densité peut être obtenue en faisant passer la poudre à travers un tamis, avant de la verser dans un récipient de volume connu et de peser la masse de poudre introduite.
- La densité vrac : il s'agit de la masse de poudre rapportée au volume occupé, la poudre étant simplement versée dans un récipient de volume connu.

- La densité tassée : il s'agit de la masse de poudre rapportée au volume occupé, après que la poudre ait subi une série de tassements normés ou de vibrations, jusqu'à atteindre son organisation la plus compacte.

Il est possible de déterminer une densité intrinsèque à la poudre, appelée densité vraie : il s'agit de la masse de poudre rapporté au volume de poudre, excluant les porosités interparticulaires et intra-particulaires. Cette densité est accessible via un pycnomètre à hélium ou pycnomètre à eau pour les poudres non solubles et ne présentant pas de problème de mouillabilité[7].

I.2.3 Porosité

Une particule n'occupe pas forcément tout le volume délimité par son contour. Elle peut présenter des cavités ou pores, ouvertes ou non sur l'extérieur (figure 3). On définit une porosité interne comme le rapport entre le volume des pores et le volume délimité par le contour de la particule[7].

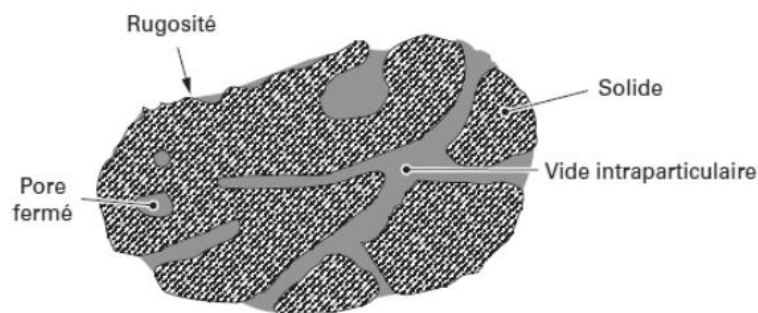


Figure 3: Porosité intraparticulaire[10]

De même que pour une particule, un empilement de particules présente aussi des vides laissés entre les particules. On définit une porosité interstitielle, comme le rapport entre le volume des pores interstitiels et le volume occupé par le lit de poudre. Selon l'organisation de ce lit de poudre, la porosité interstitielle sera plus ou moins grande (figure 4)[7].

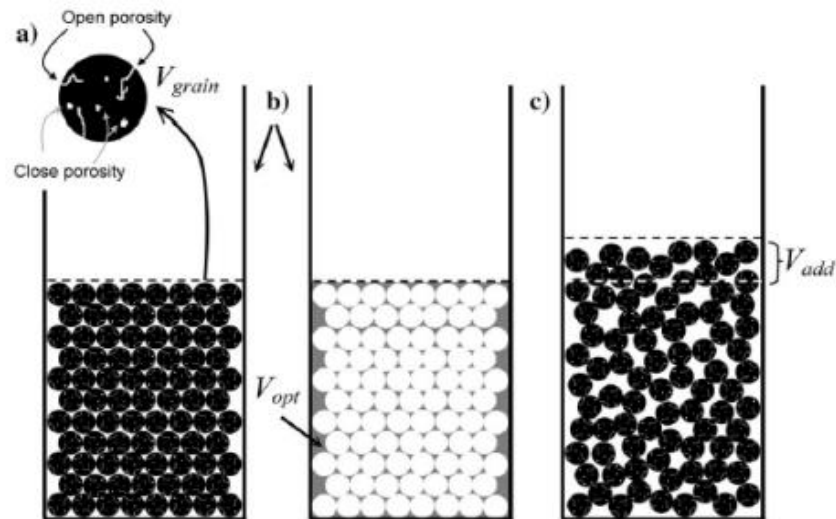


Figure 4 : Représentation de différente organisation d'un lit de poudre[11]. a) Pores intra granulaires et inter granulaires. b) Organisation optimale d'un lit de poudre. c) Organisation aléatoire d'un lit de poudre.

I.3 Classification des poudres

Selon Geldart toutes les poudres n'ont pas la même aptitude à être fluidisées et en conséquence, elles peuvent se comporter différemment vis-à-vis de la fluidisation. Bien que différents critères aient été proposés, la classification de Geldart est la plus répandue (Figure I.5), en fonction du diamètre moyen et de la masse volumique ρ_p des particules, la classification de Geldart donne le type de fluidisation qui est obtenu avec de l'air dans les conditions ambiantes. Il se dégage ainsi quatre groupes de particules caractérisés par un régime de fluidisation différent [12-15].

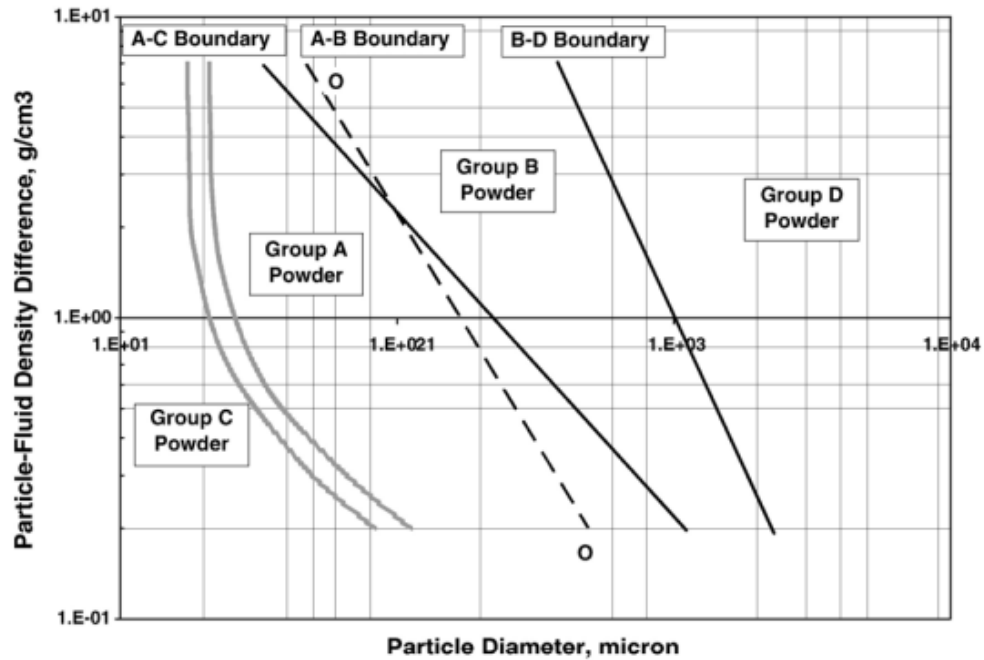


Figure 5 : Classification de Geldart[12, 13]

Groupe A : Ce groupe correspond aux particules relativement fines et / ou de faible densité qui sont dites (aérables). Avant apparition des bulles, les poudres de cette catégorie présentent une fluidisation homogène avec une expansion prononcée de la couche granulaire.

Groupe B : Les poudres du groupe B ont un diamètre compris entre 40 et 50 μm et leur masse volumique varie de 100 à 400 Kg / m^3 . Les solides de cette catégorie sont aisément fluidisés avec des bulles de grandes tailles et en grands nombre qui appariassent dès la mise en fluidisation ($U_{mb} - U_{mf}$).

Groupe C : Il s'agit de poudres très fines qui sont dites (cohésives). Leur fluidisation est difficile à réaliser car les forces cohésives inter-particulaires sont supérieures aux forces exercées par le fluide. La perte de charge à travers de la couche granulaire est inférieure au poids apparent du lit par unité de surface (formation de chemins préférentiels). La fluidisation peut alors être assistée par agitation mécanique, par vibration ou par ajout de particules afin de faciliter la fluidisation.

Groupe D : Il s'agit de matériaux denses et de diamètres importants. Cette catégorie de solides est caractérisée par le diamètre important des bulles. Parfois de l'ordre de la section du réacteur. Les bulles montent moins vite que le gaz interstitiel de sorte que le gaz entre par la base de la bulle et en ressort par le sommet. Ces solides sont utilisables dans les lits à jet.

II. Le ciment

Le ciment appartient au groupe C de la classification de Geldart, qui est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte faisant prise et durcit progressivement dans le temps.

Le ciment est le matériau de base répondant à une utilisation homogène entrant dans les activités de réalisation et de construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil[16, 17].



Figure 6 : Echantillon de ciment.

II.1 Historique et origine de ciment

Le terme ciment est issu du latin *coementum* qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé; il s'est toutefois restreint aux seuls liants dits hydrauliques – parce qu'ils sont capables de durcir sous l'eau –, dont le durcissement est dû aux réactions chimiques d'hydratation des silicates et des aluminates de chaux[18].

Dans la préhistoire et au début de l'antiquité, les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant, comme les murs pélasgiques de Grèce ou les murs incas[18].

Les Grecs sont les premiers constructeurs à employer la chaux obtenue par cuisson du calcaire[19].

Les Romains se servirent beaucoup de la chaux dans leurs constructions, mais améliorèrent ce liant dès le I^{er} siècle avant J-C, en l'additionnant de pouzzolane soit naturelle comme les cendres volcaniques actives, soit artificielles comme les briques pilées. Ils obtinrent ainsi un liant hydraulique, appelé ciment romain, qui est en fait intermédiaire entre une chaux et un

véritable ciment. Celui-ci permet de construire de grands ouvrages hydrauliques, tel le pont du Gard, ou maritimes tels les ports.[20]

Jusqu'au XVIIIe siècle aucun progrès ne s'est fait.

En 1756, l'Anglais John Smeaton, en charge de l'édification du phare d'Eddystone, découvre que les chaux les plus hydrauliques, donc celles effectuant les meilleures prises, sont obtenues à partir d'un mélange de calcaire et d'argile et non, comme on le croyait depuis toujours, de calcaire pur[21, 22].

L'industrie du ciment était née. Quelques années plus tard, L'Anglais Joseph Aspdin fait breveter en 1824 le "ciment Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie[22].

II.2 Procèdes et techniques de fabrication du ciment portland

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité[23].

II.2.1 Techniques de fabrication

Etape 1 : l'extraction des matières premières

Les matières premières - le calcaire et l'argile - sont extraites de carrières situées à proximité des cimenteries[24].

- les rochers et blocs sont abattus à l'explosif,
- ils sont transportés par tombereaux (gros camions) vers des concasseurs pour réduire leur taille à celle de cailloux de moins de 10 cm de diamètre,
- ces matières premières concassées sont triées : leur composition doit comprendre de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer dans des proportions bien déterminées (Figure7).

Etape 2 : la préparation du cru

Une fois concassés, les matériaux subissent plusieurs traitements[24] :

- ils sont pré-mélangés dans des halls de pré-homogénéisation pour obtenir une plus grande régularité de composition,
- ils sont séchés et broyés dans un broyeur,
- le broyeur réduit leur taille à quelques dizaines de microns,
- le passage des gaz du four dans le broyeur permet le séchage de la matière et une captation partielle du soufre de ces gaz par la matière broyée.

Appelée farine crue, la poudre obtenue subit de nombreuses analyses chimiques pendant son traitement.

Etape 3 : la cuisson

La cuisson de la préparation est très complexe et se déroule en plusieurs étapes[24]:

- phase de pré calcination : sous forme de poudre, la farine est introduite dans une tour de préchauffage pour être progressivement chauffée par les gaz produits dans le four rotatif jusqu'à 850°C (procédé à voie-sèche). Par gravité, la farine descend dans cette tour.
- production du clinker : la farine est ensuite introduite dans un four rotatif incliné revêtu de briques réfractaires, la température de flamme atteint alors plus de 2000°C. Cette cuisson entraîne plusieurs réactions chimiques complexes :
- le calcaire se décarbonate sous l'action de la chaleur (900°C) et se transforme en chaux
- les argiles se décomposent en silicates et aluminates
- l'ensemble se recombine ensuite à une température d'environ 1 450°C en silicates et aluminates de chaux - le clinker - produit semi-fini aux propriétés de liant hydraulique
- refroidissement du clinker : dans un refroidisseur, le clinker restitue sa température par soufflage d'air à 100°C

Au cours de ce processus complexe, la composition chimique et l'homogénéité de la matière en entrée du four, ainsi que sa régularité dans le temps, sont des éléments fondamentaux.

Le clinker est ensuite broyé avec des ajouts, dans des proportions très précises, qui donneront au ciment des caractéristiques spécifiques.

Etape 4 : le broyage du ciment

Le clinker subit ensuite plusieurs traitements[24] :

- il est broyé en grains particulièrement fins (moins de 60 microns),
- la poudre obtenue - ciment - est mélangée à du gypse pour régulariser le temps de prise du ciment,
- d'autres traitements peuvent alors intervenir :
 - pour améliorer l'ouvrabilité et la consistance du ciment : ajout de filler de calcaire, de cendres volantes (issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques),
 - pour améliorer les propriétés hydrauliques du ciment : ajout de pouzzolanes naturelles ou artificielles.

Etape 5 : le stockage du ciment

Le ciment obtenu est stocké dans des silos de plusieurs milliers de tonnes, parfois divisés en compartiments permettant la conservation de plusieurs qualités de ciment[24].

II.2.2 Procédés de fabrication du ciment

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment : la voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide[18] :

- Dans **le procédé par voie sèche** (la plus utilisée), la matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air- through' ou AS 'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivores, mais il nécessite la mise en œuvre de moyens importants de captation des poussières (électrofiltres, filtres cyclones et multicyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...)[18, 25].
- Dans **le procédé par voie semi-sèche**(en partant de la voie sèche), la poudre est agglomérée sous forme de boulettes de 10 à 20 mm de diamètre par ajout de 12 à

- 14 % d'eau, séchée et préchauffée dans une chambre 'Grille LEPOL' puis dans le four.
- Dans **le procédé par voie humide**(la plus ancienne), La farine crue est transformée en pâte liquide par ajout d'eau puis broyage et malaxage avant d'être introduite directement dans un four qui sera alors plus long (jusqu'à 200 m). Ce procédé consomme beaucoup de combustible pour évaporer l'eau excédentaire : c'est pourquoi avec le 1^{er} choc pétrolier de 1973, les procédés par voie sèche et semi-sèche lui sont préférés car ils sont plus économiques en besoin énergétique. La voie humide est amenée à disparaître car elle présente l'inconvénient de consommer de 30 à 40 % d'énergie en plus par rapport à la voie sèche[18, 25].
- Dans **le procédé par voie semi-humide**(en partant de la voie humide), la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

II.3 Constituants du ciment

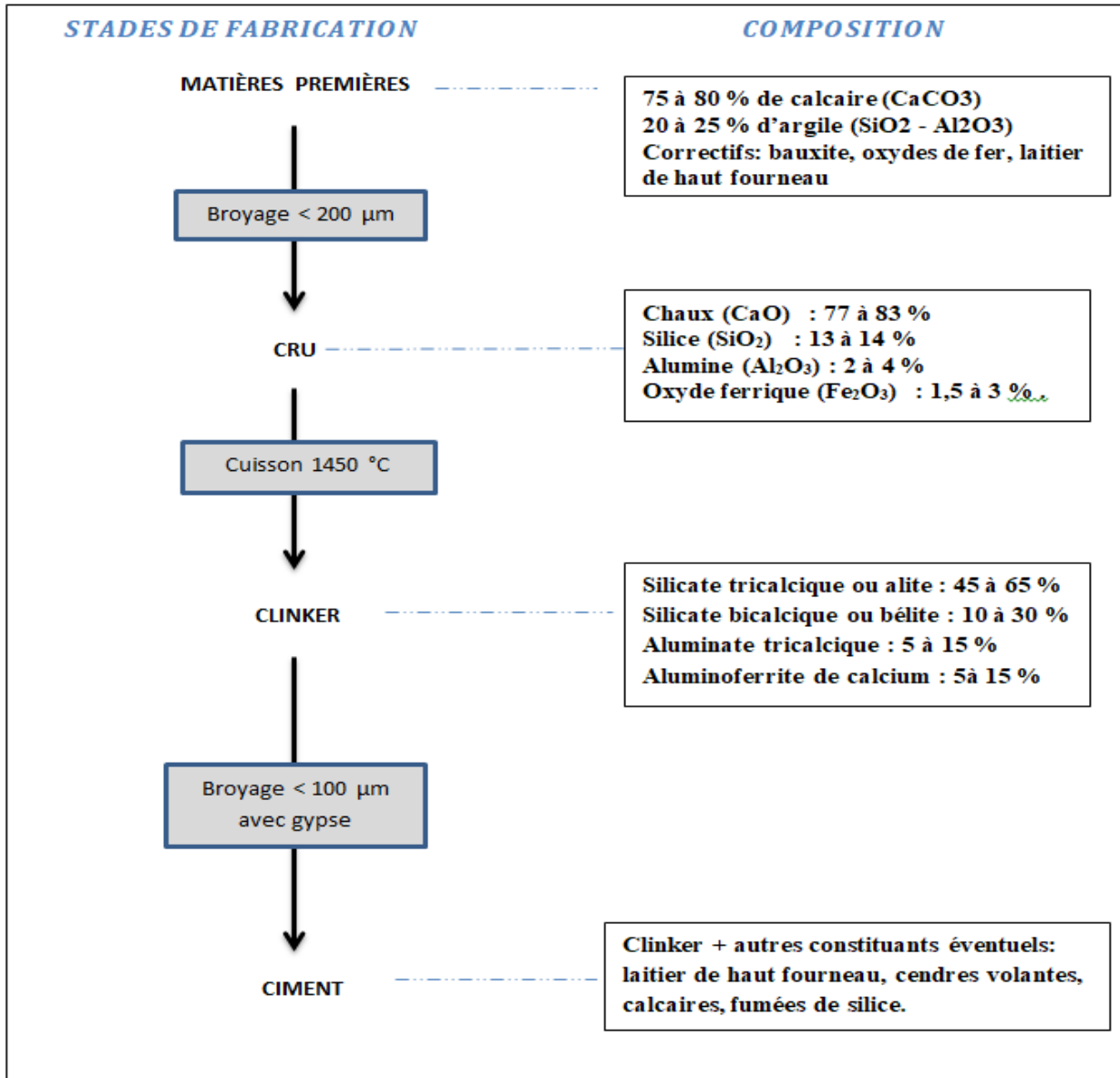


Figure 7 : Constituants du ciments avec le pourcentage[26].

Ce graphique montre les différentes étapes de la fabrication du ciment et ses composants à chaque étape telle que :

- ❖ Les matières premières sont finement broyées (0,1 mm) afin d'obtenir le «cru» de composition suivante[27] :
- **l'oxyde de calcium « Chaux » (CaO)** : Il est lié avec SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , à l'état libre on l'appelle chaux libre (CaO_1). ce dernier provoque une inégalité de changement de volume du ciment pendant l'hydratation (expansion), la résistance

- du ciment augmente en cas d'augmentation de CaO liée, cependant la stabilité chimique de ce ciment diminue en milieux agressif [20].
- **Silice (SiO_2)**: Il se combine avec le CaO en formant les silicates de calcium, un pourcentage élevé de C_2S , dans ce cas le ciment durcit lentement ainsi sa résistance augmente à long terme. L'augmentation de C_2S donne une grande durabilité au ciment surtout au milieu agressif [20].
- **Alumine (Al_2O_3)**: Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant une grande teneur en Al_2O_3 donne un ciment très sensible à la couche sulfatée [20].
- **Oxyde ferrique (Fe_2O_3)** : Il joue le rôle du fondant, il diminue considérablement la température de clinkerisation. Il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les creux sulfatés [20].

Il est à noter que les quatre oxydes ; CaO, SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 interviennent pour plus de 95% de la composition chimique du clinker. On les appelle les oxydes majeurs. Les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont :

- La magnésie (MgO) qui provient de la dolomite qui est souvent présente avec le calcaire.
 - Les oxydes alcalins K_2O et Na_2O qui proviennent en générale, de l'argile et des feldspaths [28].
- ❖ Lors de la cuisson du CRU, les constituants principaux de la matière première réagissent entre eux pour former principalement quatre (04) composés minéralogiques [29]:

Tableau 1 : le pourcentage pondéral de certains constituants[27].

Constituent	Formule chimique	Notation cimentière
Silicate tricalcique	Ca_3SiO_5	C_3S
Silicate dicalcique	Ca_2SiO_5	C_2S
Aluminate tricalcique	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3A
Aluminoferrite de calcium	$\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$	C_4AF

II.4 Classification des ciments

La classification des ciments se fait selon trois critères [20] :

- Selon leur composition: CPA/CPJ/CPZ/CHF/CLK/CLC ou CEM I, II, III.
- Selon leur résistance: 32,5, 42,5, 52,5 N/mm².
- Selon la vitesse de prise: N pour une prise normale et R pour une prise plus rapide.

II.4.1 Selon leur composition

Selon la norme NF P15-301 les ciments constitués de clinker et des composants secondaires sont classés en cinq types d'où ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans la notation européenne, la notation française est indiquée entre parenthèses[30] :

- CEMI: Ciment portland artificiel « sans ajouts » (CPA).
- CEM II: Ciment portland composé (CPJ).
- CEMIII: Ciment de haut fourneau (CHF).
- CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Ces cinq types de ciments sont des ciments normalisés au niveau européen (norme NF P 15-301). D'autres liants existent, et sont, en général, normalisés sous d'autres normes exclusivement françaises. Il s'agit principalement des ciments suivants[31, 32] :

- *Ciments blancs* : ce sont des ciments Portland, la matière première présentant la particularité d'être exempte d'oxyde de fer et des divers autres oxydes métalliques susceptibles de colorer le ciment. Ce ne sont pas des ciments normalisés, ils ne sont utilisés que pour obtenir des effets architectoniques.
- *Ciments de laitier à la chaux* : ce sont des ciments composés essentiellement de laitier granulé de haut fourneau et de chaux hydraulique (ces dernières sont fabriquées à partir de calcaire contenant de 5 à 20 % d'argile, dans des fours à 1 000-1 200°C). Ces ciments sont notés CLX et normalisés sous la norme NF P 15-306.
- *Ciments à maçonner* : notés CM, norme NF P 15-307, ils ont des propriétés proches mais inférieures, de celles du ciment Portland.
- *Ciments naturels* : ils résultent de la cuisson de roches naturelles (calcaire marneux) qui ont des compositions proches de celle du cru utilisé pour fabriquer le ciment Portland.
- *Ciments prompts* : notés CNP, norme NF P 15-314, ils sont fabriqués à plus basse température (1000°C) que les ciments Portland. Ils sont principalement constitués de silicate dicalcique, d'aluminate calcique et de sulfo-aluminate de calcium. Ils sont à prise et à durcissement rapide (moins de huit minutes).
- *Ciments alumineux fondus* : notés CA, norme NF P 15-315, ils sont obtenus par fusion, à très haute température, d'un mélange de calcaire et de bauxite ferrugineuse. Pauvres en SiO_2 (4 à 10 %), ils sont par contre riches en Al_2O_3 (40 à 45 %). Ils sont réfractaires : ils peuvent être utilisés jusqu'à 1 200°C, alors que l'emploi des ciments Portland est limité à 350°C. Ce sont des ciments à haute résistance mécanique mais d'un emploi très délicat. La prise est lente mais le durcissement est très rapide. La chaleur d'hydratation est très élevée ce qui oblige à prendre des précautions vis-à-vis de la dessiccation initiale.

II.4.2 Selon leur résistance normale

Les ciments sont répartis en trois classes de résistances ; 32.5 - 42.5 - 52.5, définis par la valeur minimale de la résistance caractéristique du ciment à 7 et à 28 jours. La résistance du ciment est déterminée sur des éprouvettes de mortier de ciment (Mortier normalisé ; 3 sable/1 ciment/0,5 Eau)[29].

Tableau 2 : Classes de résistance du ciment[29]

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)	
	2jours limite inf	28jours limite inf
32.5N(Normale)	-	≥32.5
32.5R(Rapide)	≥13.5	≥32.5
42.5	≥12.5	≥42.5
42.5R	≥20	≥42.5
52.5	≥20	≥52.5
52.5R	≥30	≥52.5

II.5 Les différentes propriétés des ciments

II.5.1 Propriétés physiques

Le ciment Portland se présente comme une poudre de couleur grise, sauf pour le ciment blanc qui est élaboré à partir de crus ne contenant pas de l'oxyde de fer. Leur cuisson se fait dans des fours à gaz afin d'éviter toutes souillures éventuelles avec les cendres de combustion[28] :

- **Masse volumique** : La masse volumique du ciment Portland pur (anhydre), mesurée au pycnomètre à alcool, est de l'ordre de 2900 à 3150 Kg/m³.
- **Granulométrie** : Les particules du ciment ont des dimensions très petites, comprises entre 1 et 60 µm. Pour leurs classements granulométriques, on utilise

généralement un granulomètre laser, dont le principe repose sur la diffraction des rayons laser dans une cellule contenant la poudre en suspension.

- **Finesse** : La finesse est une caractéristique très importante du ciment. Elle peut être caractérisée par sa surface massique, exprimée par mètre carré de surface des grains du ciment par kilogramme de poudre. Lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande plus l'hydratation est rapide et complète. Pour mesurer la finesse du ciment on utilise le perméabilimètre de Blaine. La surface spécifique Blaine (m^2/g) est souvent utilisée pour classer les ciments en termes de finesse de mouture. La finesse du ciment Portland ordinaire est de l'ordre de 300 à 500 m^2/Kg .

II.6 Essais physiques sur les ciments

Les résultats des quatre (04) ciments sont donnés par le tableau suivant[33] :

Tableau 3 : Essais physiques des quatre (04) ciments.

Ciment		Béni-Saf	Zahana	Saïda	Chlef
Temps de prise (min)	Début	104	133	83	150
	Fin	194	219	150	219
E/C (%)		26.20	26	26.40	25.42
E : Eau (ml)		131	130	132	127.10
C : Ciment (g)		500	500	500	500
S.S.B (Surface Spécifique Blaine) (cm^2/g)		3496.19	3992.17	3291.79	3326.15
Expansion à chaud (mm)		0	0	1	0

Refus sur tamis de 90 μm (%)	2.63	2.02	4.14	10.81
Masse volumique (Kg/dm ³)	1.051	0.839	1.011	1.036

CHAPITRE III

CONSOLIDATION & FORCES D'ADHÉSION

III. La consolidation

La consolidation de la poudre cohésive est donnée par une application d'une charge normale de contrainte sur l'échantillon. Elle est liée aux propriétés de surface et à la zone de déformation des particules en contact. Cette déformation se caractérise par une amélioration de la zone de contact [34]. La consolidation des particules microniques est à la base de différents paramètres où les forces externes et les forces interparticulaires sont les caractéristiques prédominantes[35].

Valverde et Castellanos ont montré qu'une augmentation du stress de consolidation entraîne une formation d'agglomérats désordonnés, entraînant une réduction de la porosité interne à l'intérieur des agglomérats[36]. Comme souligné par Quintanilla, les poudres cohésives sont généralement consolidées par l'application de forces externes provoquant une augmentation des forces d'adhésion interparticulaire[37]. Vermeer et al. (2001) ont montré que le comportement des poudres cohésives est lié aux forces d'adhésion et aux forces de compression[4, 38].

Le test de consolidation est effectué sur la poudre pour analyser la variation du volume de poudre et l'évolution de la porosité de la poudre sous contrainte normale.

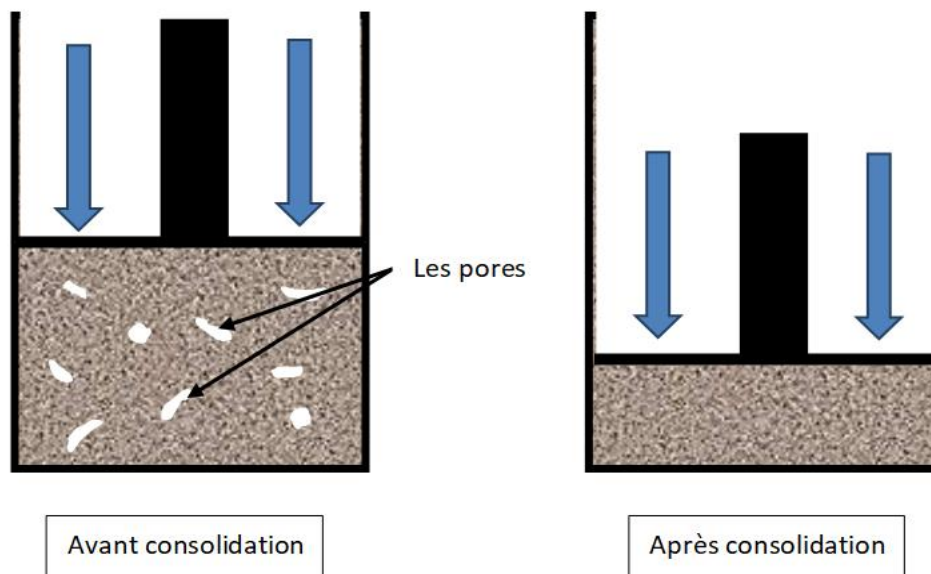


Figure 8 : Consolidation d'un lit de poudre.

La variation de volume a été mesurée en fonction de la force F_N qui a consolidé la poudre sous contrainte normale[4] :

$$\sigma = \frac{F_N}{S} \quad (1)$$

Où

S = surface de la cellule

Ainsi, la variation de la fraction solide a été calculée et liée à la contrainte normale σ comme suit[4, 39] :

$$1 - \varepsilon = \frac{M}{\rho_s V} \quad (2)$$

Ou :

M : Masse de la poudre dans la cellule,

V : Volume total du lit de poudre,

$(1 - \varepsilon)$ Fraction solide, où ε est la fraction vide est ρ_s est la densité.

III.1 Forces d'adhésion

Les types de forces inter particulaires, ainsi que leur magnitude, doivent être connus lors de l'étude du milieu granulaire, et les types d'interactions les plus fréquents dans le domaine de la mécanique des poudres sont présentés par la suite.

III.1.1 Les forces de Van Der Waals

Les forces de Van der Waals sont des forces attractives entre particules qui décroissent avec la distance selon une loi de puissance. Ces forces sont faibles, mais non négligeables pour les poudres très fines, quand on les compare à la force gravitationnelle. La force de van der Waals développée par deux particules est proportionnelle à la taille des particules[40, 41] .

$$F_{vdW} = \frac{A_H}{12a^2} R_{eff} \quad (3)$$

Où

A_H :est la constante de Hamaker. Elle a les dimensions d'une énergie et son ordre de grandeur est 10^{-19} _ 10^{-20} **J** pour la plupart des matériaux,

a :est la distance entre les particules,

R_{eff} :est rayon effective des particules[41] .

Il faut par ailleurs signaler que pour les particules en contact ($a = 0$), la force de van der Waals diverge (tend vers l'infini). Cependant, la distance de séparation reste limitée ($a_0 = 0.4$ nm) à la rugosité de l'ordre moléculaire des particules[40].

Ce modèle a été développé par Langbein [42], Götzinger et Peukert [34] pour inclure les propriétés de surface des particules. Aussi, Xie a démontré qu'au contact, l'énergie de l'interaction entre deux particules lorsque ces particules sont compressées à leurs extrémités. La correction de l'énergie d'interaction est donc donnée par[43] :

$$E_{xie} = -\frac{AD}{12a} \left[1 + \frac{r^2}{2Da} \right] \quad (4)$$

Ou

r est le rayon de la surface effective de contact.

La poudre acquiert un comportement cohésif quand la force d'interaction entre ses particules devient plus importante que leur poids (équation 5)[9] .Ce qui devient le cas lorsque le diamètre des particules devient inferieurs à 50-100 μ m [44].

$$F_{vdw} \gg \frac{4}{3} \pi \rho_p g(R)^3 \quad (5)$$

III.1.2 Ponts liquides

Quand la surface des particules est mouillée par une certaine quantité de liquide mobile, il y aura un autre type d'interaction nommé ponts liquides ou force capillaire. Cette interaction est caractérisée par la présence d'un ménisque qui lie ces deux particules, illustré par la figure (9).

La force d'interaction entres les particules a des origines différentes : la composante axiale de la tension superficielle de l'interface solide/liquide/gaz ; et la force résultante de la pression hydrostatique du ménisque[45, 46].

$$F_{cap} = 2\pi r_2 \gamma + \pi r_2^2 \Delta P \quad (6)$$

Où :

γ est la tension superficielle du liquide,

ΔP est le terme dû à la pression capillaire négative à l'intérieur du ménisque.

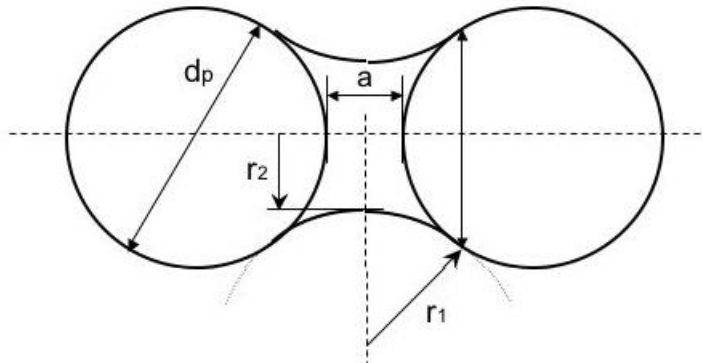


Figure 9 : pont liquide entre deux particules sphériques identiques[44].

Pour un liquide complètement mouillant, la valeur maximale de la force capillaire est observée pour des particules sphériques lisses, lorsque ces particules sont en contact direct[44, 45] :

$$F_{cap} = \pi\gamma d_p \quad (7)$$

Quand les particules sont séparées par une distance a , la force d'adhésion du pont liquide est plus faible et est proportionnelle à cette distance, puis à la quantité de liquide et la taille des rugosités[45].

III.1.3 Ponts solides

Les ponts solides peuvent avoir plusieurs origines : par transfert de matière du volume ou de la surface de grains vers les points de contact si l'on est proche de la température de fusion ou de transition vitreuse (frittage); par des processus de fusion-recristallisation ou sublimation-recristallisation qui là encore conduisent à un transport net de matière ; par fluage des matériaux si les contraintes aux points de contact dépassent le seuil plastique. Ces types d'interactions sont les plus fortes existantes[7].

III.1.4 Forces électrostatiques

Les particules peuvent encore avoir des interactions du type électrostatique. Dans ce cas, les particules accumulent des charges électriques conduisant à des interactions attractives ou répulsives. L'application industrielle où l'on observe très souvent ce type de phénomène est le transport pneumatique, procédés pour lequel on a des nombreuses collisions particule-particule et particule-paroi, permettant ainsi une grande accumulation de charge par triboélectrification[47]. Si la poudre devient très chargée, il peut y avoir un risque de décharge électrique qui peut amener une explosion si la poudre est organique[44]

$$F_e = -\frac{Q^2}{16\pi q_0 h^2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{(R^2 + h^2)}} \right) \quad (8)$$

III.2 Les différents types de consolidation

III.2.1 Projection thermique

La projection thermique (Thermal Spray) est un processus de consolidation par micro solidification pour les métaux, les intermétalliques, la céramique, les polymères et les composites. Le traitement par projection thermique est devenu une technique importante de consolidation des poudres, et les innovations donnent maintenant de nouvelles façons de la fabrication de nouveaux matériaux et matériaux combinaison[48]. La figure (10) montre un schéma d'un processus générique de consolidation de poudre de pulvérisation thermique, illustrant les principales caractéristiques et une microstructure de dépôt typique[49]. Le jet thermique décrit la famille des processus utilisant des produits chimiques (combustion entraîné) ou électrique (plasma ou arc) l'énergie pour chauffer et accélérer finement divisée gouttelettes à des vitesses supérieures à 600 m / s. des millions de gouttelettes sont thermiquement formé par seconde en utilisant chaud jets de gaz ou de plasma et sont ensuite refroidi rapidement à l'impact à la surface d'un objectif une attention accrue doit être concentré sur ces matériaux-traitement techniques en raison de leur capacité à traiter la plupart des matériaux stables phases de fusion, pour traiter les matériaux de nombreuses formes (p. ex. poudres, tiges, fils, et mélanges composites), et de facilement les consolider pour produire microstructures relativement homogènes et raffinées [48].

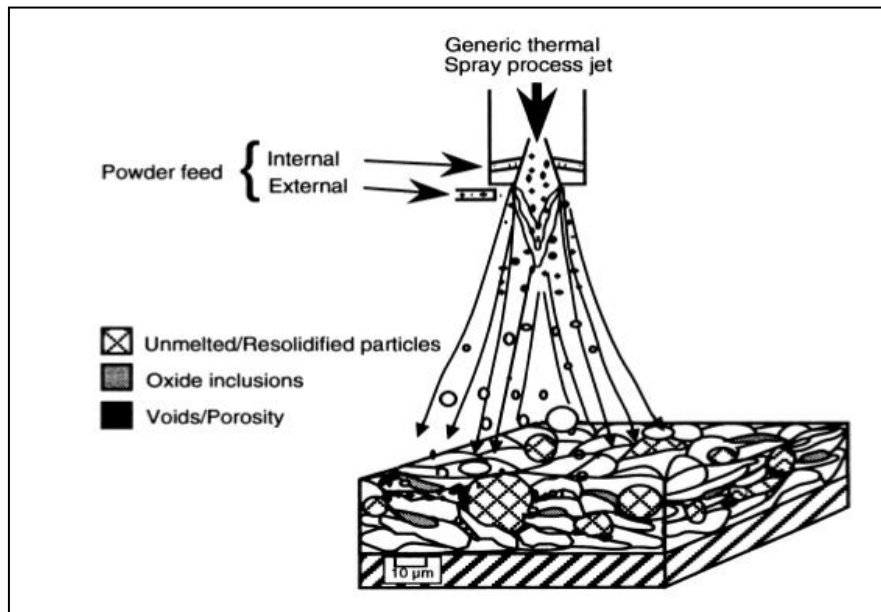


Figure 10 : un schéma d'un processus générique de consolidation par projection thermique.[49]

- **la projection à froid**

La pulvérisation à froid (cold spray) est un processus de dépôt de matériaux dans lequel les revêtements sont appliqués en accélérant les charges de départ en poudre de métaux ductiles à des vitesses de (300 à 1200 m / s) en utilisant des techniques dynamiques au gaz avec de l'azote ou de l'hélium comme gaz de traitement (*figure 11*). Le processus est communément appelé «pulvérisation dynamique à gaz froid» en raison des températures relativement basses (0 à 800 ° C ou 32 à 1470 ° F) du gaz détendu et du flux de particules qui émane de la buse (nozzel). Des débits de poudre allant jusqu'à (14 kg / h) sont possibles. [44]

Le développement de la méthode de projection à froid s'étend à l'expansion des capacités de projection thermique pour former des additifs solides. Le terme état solide définit la principale distinction entre la projection à froid et les autres opérations de projection thermique[50]. Cette nouvelle technologie prometteuse pour le revêtement de surface qui offre de nombreux avantages technologiques par rapport à la projection thermique car elle utilise l'énergie cinétique au lieu de l'énergie thermique pour les précipitations. En conséquence, les contraintes résiduelles, l'oxydation et les réactions chimiques indésirables peuvent être évitées[51].

Ensuite, la pulvérisation à froid couvre une plus large gamme de poudre taille, c'est-à-dire du micron au submicron. Le dépôt à froid permet également la fabrication de matériaux sensibles à la chaleur et comprend ensuite une plus large gamme de matériaux. La méthode de projection à froid permet la combinaison de matériaux différents pour produire des revêtements innovants tels que revêtements multicouches ou revêtements multi matériaux et dégradés. De plus, un avantage significatif de la projection à froid est une amélioration de conditions de travail qui deviennent plus sûres en raison de l'utilisation de température de pulvérisation de gaz. Grâce à ces divers avantages, la technologie de projection à froid reçoit une attention croissante. Elle a tendance à se propager efficacement et rapidement[50].

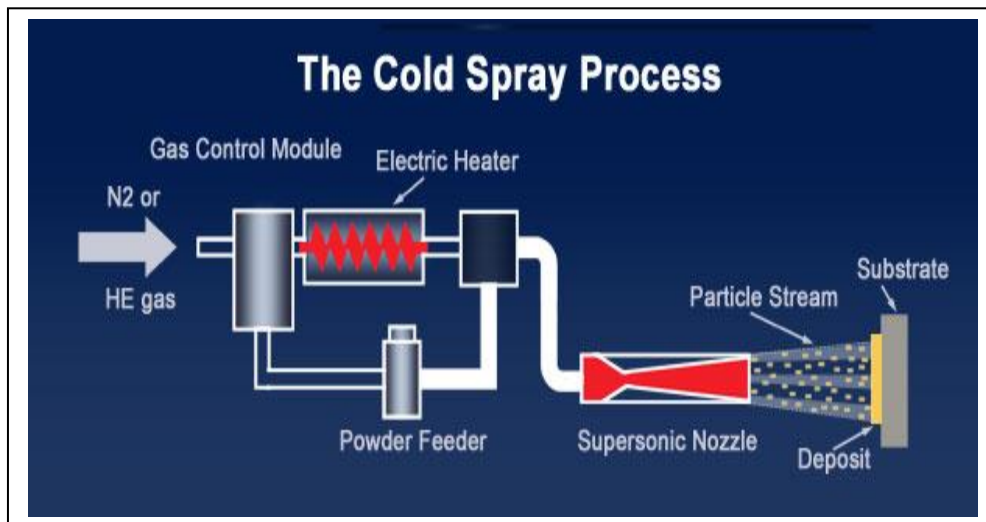


Figure 11 : le processus de projection à froid.

- **La consolidation Vibratoire**

Dans le processus de combinaison de la poudre vibratoire, le matériau en poudre subit une énergie vibratoire tout en portant la pression sub-statique. Ce processus permet une fusion rapide de la poudre avec une dégradation structurelle minimale ou nulle.[52]

L'application de vibrations mécaniques provoquera la consolidation ou le compactage des matériaux pulvérulents en vrac, ce processus s'accompagnant d'une augmentation de la résistance[53].

Le procédé peut être utilisé avec une variété de matériaux en poudre, y compris des matériaux métalliques, céramiques, semi-conducteurs, polymériques, traités par solidification rapide et des matériaux composites. Les poudres peuvent avoir une large gamme de tailles de particules, de formes, de phases et de microstructures, y compris des nanoparticules. L'énergie vibratoire est transmise à la surface d'un échantillon de poudre ou d'un compact, qui peut être confiné dans un moule ou sur pied, à travers une sonotrode ou un autre transducteur haute fréquence [52].

Pour quantifier le comportement de consolidation des poudres cohésives ultrafines par vibrations, Un testeur de cisaillement à oscillant a été utilisé pour cet apport d'énergie supplémentaire[54], Fig.12.

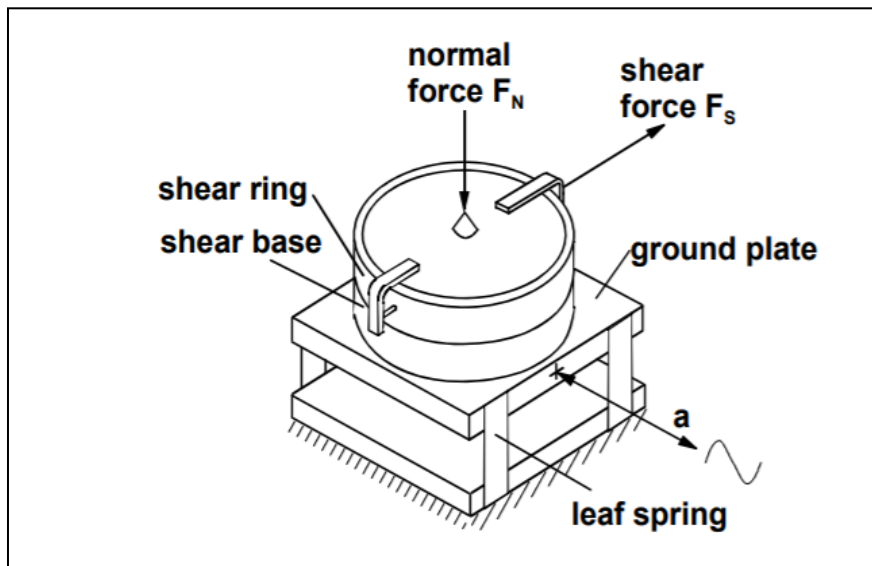


Figure 12 : Principe du testeur de cisaillement vibrant [54]

- **La consolidation par le frittage au plasma d'étincelles (SPS)**

Est un processus qui implique la consolidation de poudres sous l'action d'un courant et d'une pression uniaxiale. Le courant fournit un chauffage Joule pour atteindre les conditions de frittage, ce qui rend le processus fondamentalement différent du pressage à chaud.

Figure 13 montre une représentation schématique d'une machine SPS. Dans une expérience de frittage typique, l'échantillon (poudre) est chargé dans une matrice en graphite et placé à

l'intérieur de la chambre SPS, où les électrodes forcent un courant à travers la matrice en graphite (et à travers l'échantillon s'il est conducteur) pour favoriser des taux de chauffage élevés et avec application de pression combinée. La nature de la méthode SPS ainsi que ses réalisations ont été discutées dans des revues récentes[55, 56]. Parmi les avantages de ce procédé, les temps de consolidation plus courts par rapport à d'autres méthodes et la capacité de diminuer la croissance des grains sont les caractéristiques les plus attrayantes, en particulier lors de la préparation de matériaux denses nanostructures[57].

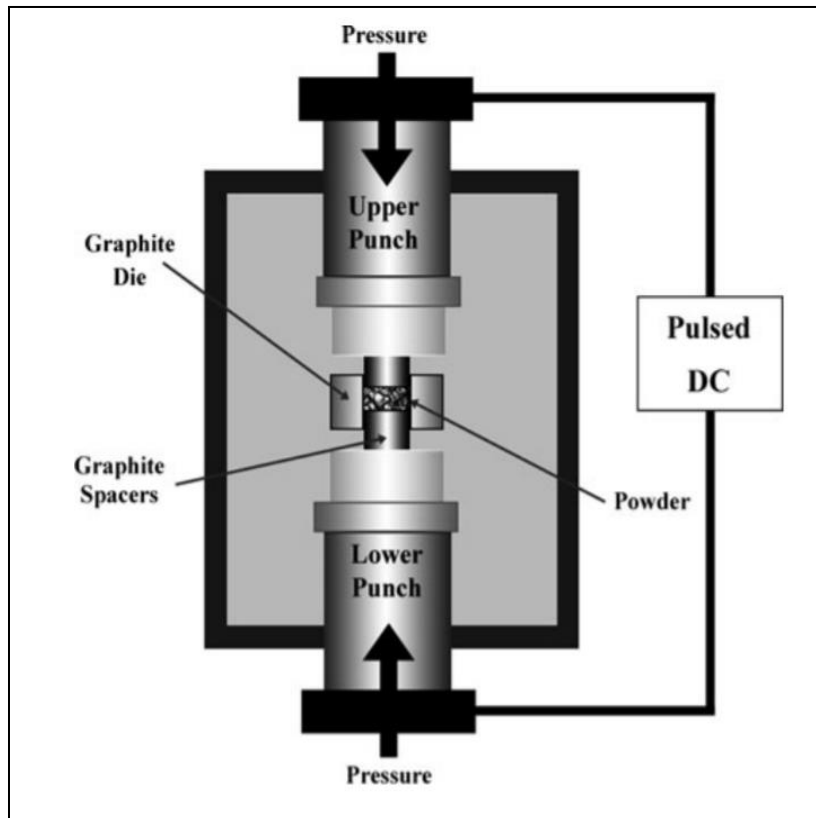


Figure 13 : Représentation schématisée d'une machine SPS générique, utilisant un courant électrique pulsé pour chauffer l'échantillon et des matrices de graphite pour presser la poudre simultanément[57].

CHAPITRE IV

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Introduction

Le ciment, produit stratégique et incontournable pour le développement de tout pays, est un liant de première importance[58] . A cet effet, nous devons travailler dans cette recherche sur le développement de ses fonctionnalités pour assurer une amélioration continue de la qualité. Pour ce faire, notre mémoire concerne l'étude de l'influence de consolidation au comportement de mélange ciment plus eau et le même travail sera effectué en ajoutant le plâtre, ce travail devrait être effectué dans le laboratoire de mécanique des sols (génie civil Université Ibn Khaldoun – Tiaret –).

IV. Le ciment utilise

L'Entreprise des Ciments et Dérivés d'Ech-Chélif est la propriété de la Société de Gestion des Participations « Groupement Industrie du Ciment d'Algérie » L'activité principale de l'entreprise est la fabrication et la commercialisation du ciment portland composé conforme le Norme Algérienne NA 442 appelé CEM, L'image correspondante (Figure III-1) représente un aperçu du sac de ciment (50 kg).



Figure 14 : Aperçu d'un sac de ciment (50kg).

Le ciment utilisé est un CEM II/A-L 42,5N est un ciment Portland au calcaire obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise, avec ajout de 20 % de calcaire.

Les caractéristiques de ce ciment fournies par l'ECDE sont les suivantes[59] :

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES		CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	
Norme NA 442	Ciment ECDE	Norme NA 442	Ciment ECDE
Sulfates SO ₃ ≤ 3.5 %	SO ₃ ≤ 2.00 %	Début de prise ≥ 60 mn	Début de prise > 60 mn
Chlorures Cl ⁻ ≤ 0.1 %	Cl ⁻ ≤ 0.08 %	Stabilité à chaud ≤ 10mm	Stabilité à chaud < 7mm
----	-----	Retrait 28j ≤ 1000 μm/m	Retrait 28j < 650 μm/m

Tableau 4 : les caractéristiques chimique et physique du ciment fournies par l'ECDE.

Le CEM II 42.5 est couramment utilisé pour [60] :

- Travaux nécessitant une résistance initiale élevée (décoffrage rapide par exemple)
- Béton en élévation, armé ou non d'ouvrage courant.
- Fondation ou travaux souterrains en milieu non agressifs.
- Dallage, sols industriels.
- Maçonneries.
- Stabilisation des sols.
- Béton préfabriqué.
- Béton armé ou précontraint.
- Béton en élévation.

IV.1 Le plâtre

Connu depuis l'Antiquité, le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme. S'il est encore employé sous sa forme traditionnelle de poudre gâchée avec de l'eau pour réaliser des enduits, c'est sous la forme d'éléments préfabriqués en usine (carreaux, dalles, plaques) que son utilisation se développe aujourd'hui pour répondre aux besoins de la construction.

Le plâtre s'obtient par déshydratation du gypse – roche naturelle ou sous-produit de certaines industries – qui est un sulfate de calcium hydraté de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ [61].

IV.2 Le test de consolidation

IV.2.1 L'appareil utilisé

Autoshear

Machine de test de cisaillement direct / cisaillement avec acquisition de données intégrée
Machine autonome automatique qui comprend un moteur pas à pas de haute précision avec un mécanisme de transfert de charge de haute précision. La console avec un grand écran tactile couleur permet un contrôle facile de tous les paramètres de test et l'acquisition de données intégrée[62].



Figure 15 : Appareil d'essai de consolidation.

IV.2.2 Les étapes de l'expérience

➤ Préparation de l'échantillon d'essai

- Pour trouver le poids à prendre, il faut faire les calculs suivants telle que :

H : la hauteur de l'échantillon

D : le diamètre de cellule de consolidation

En calcule le volume de ciment : $V = \frac{\pi}{4}(D^2) \times H = \frac{\pi}{4}(6^2) \times 1.8 = 50.88 \text{ cm}^3$

ρ : la masse volumique du ciment $\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3 = m/V$

Nous obtenons donc la masse $m = \rho \times V = 2,8 \times 50.88 = 142.464 \text{ g}$

- Nous plaçons l'échantillon de sorte qu'il se trouve au centre de la cellule de consolidation prendre en compte que l'écoulement de poudre soit homogène,
- Ceci est réalisé par un Tamis de diamètre similaire de cellule de consolidation permettant un écoulement des couches homogènes de l'échantillon.

➤ Assemblage de l'appareil

- L'échantillon doit être placé au milieu sur la pierre poreuse inférieure et la pierre poreuse supérieure, puis mettre le capuchon de chargement sur le dessus avec un papier filtre.

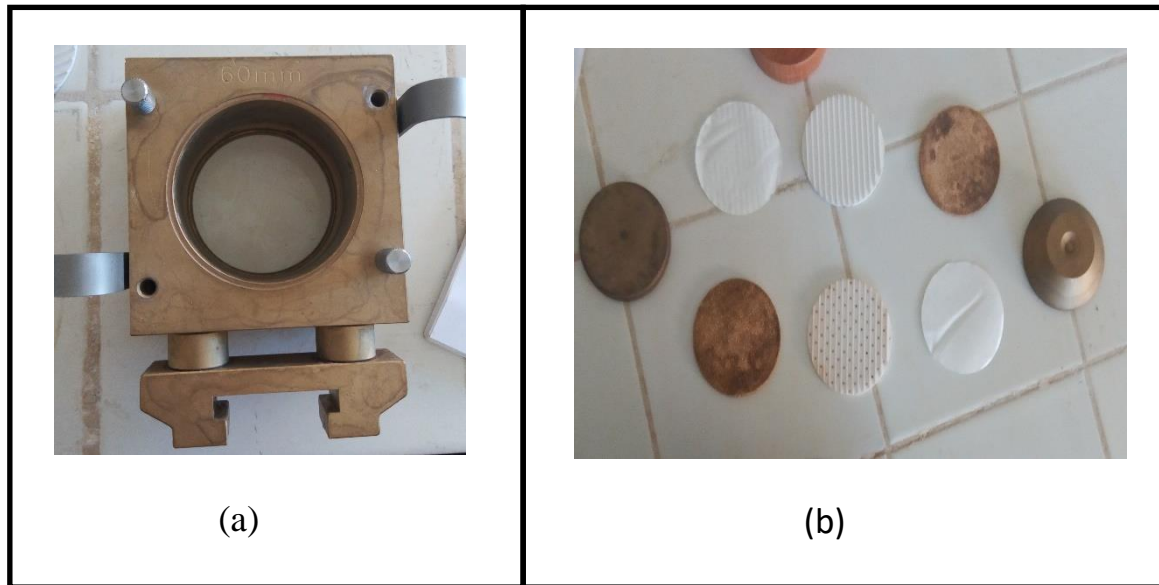


Figure 16 : La cellule de consolidation « a » et sa composante « b ».

- Les deux moitiés glissent horizontalement l'une contre l'autre (essai de cisaillement) (figure 7 -b-) et sont soumises à une contrainte constante normale (essai de consolidation) (figure 7 -a-)

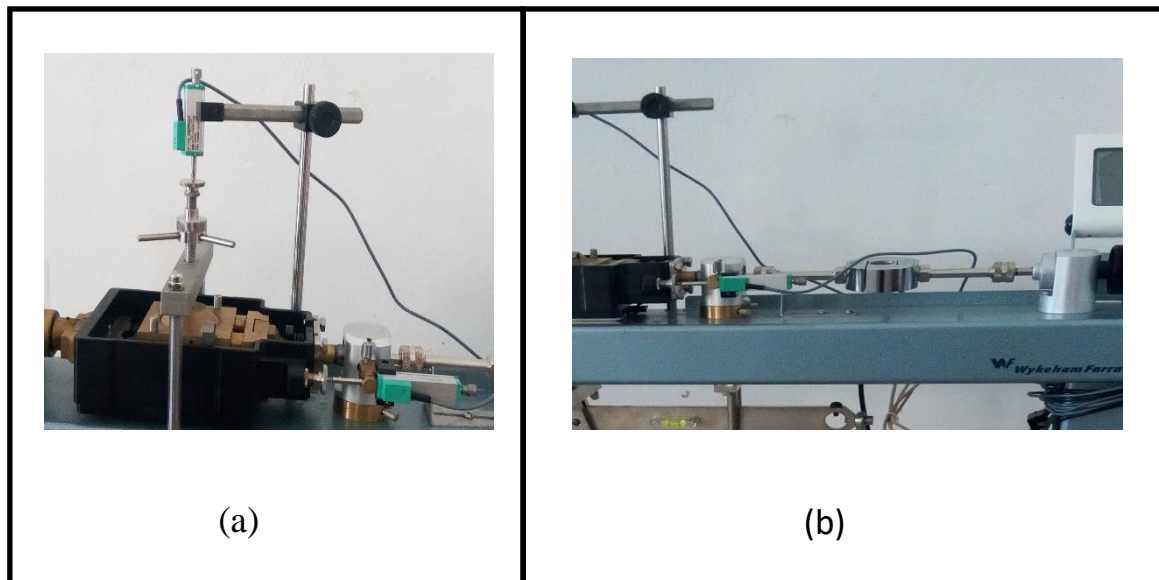


Figure 17 : le Mécanisme des opérations de consolidation et cisaillement.

- Via l'écran, on peut démarrer, suspendre et arrêter le test, sélectionner le mode d'enregistrement des données, afficher les lectures et les diagrammes pendant l'exécution du test et effectuer l'étalonnage des transducteurs (cellule de charge et deux transducteurs de déplacement))[62].

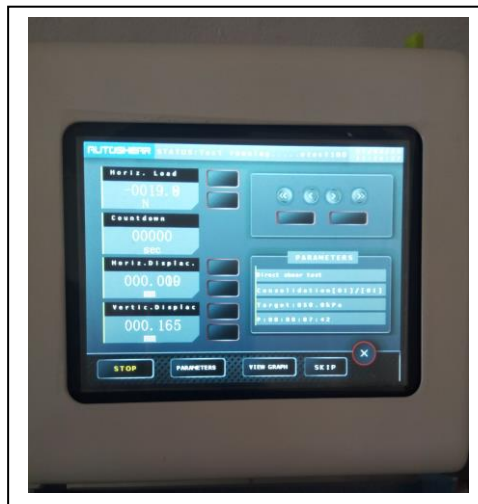


Figure 18 : l'écran d'affichage.

➤ **Chargement du test de consolidation**

Cette expérience comprendra deux parties :

Partie I :

- L'échantillon 1 : mélanger une quantité de ciment et d'eau puis laisser sécher complètement.
- L'échantillon 2 : On introduit une quantité de ciment de masse et densité connue dans la cellule de consolidation. Le processus de consolidation se poursuit avec des charges applicables croissant. en suite mélanger le ciment à consolider avec l'eau et chauffer ce mélange dans un four.
- Dans les deux cas on voit la face de la structure solide obtenu.

- On pourrait voir une diminution de volume de la structure lorsque la contrainte normale est augmentée. Cela est dû à la désintégration des agglomérats et la réorganisation des particules (D. Turki et al, 2018).
- La différence que nous pouvons voir à la face de la structure solide obtenue à partir de chaque échantillon est que l'échantillon 2 présente une structure moins fissurée que l'échantillon 1, et cela est dû à la diminution de la porosité de la structure de poudre qui est principalement liée à la densité apparente (consolidation), (D. Turki et al, 2018).

Partie II :

- L'échantillon 3 : mélanger le ciment et le plâtre où le pourcentage de chacun respectivement (40% et 20%) avec l'eau et chauffer ce mélange dans un four.
 - Après avoir vérifié la face de la structure solide obtenue, elle est écrasé pour appliquer le processus de consolidation.
-
- Le gypse est un minéral ou du sulfate de calcium hydraté sous forme chimique. Le gypse joue un rôle très important dans le contrôle du taux de durcissement du ciment, de sorte qu'il est généralement appelé agent retardateur du ciment. Il est principalement utilisé pour réguler le temps de prise du ciment.

Conclusion générale

Nous avons montré les concepts de base de la technologie des poudres liés à notre sujet. Nous avons également introduit brièvement le ciment ; ses constituants, certaines des propriétés pertinentes pour notre recherche et ses techniques de production. Après cela, nous avons montré les concepts de base nécessaires pour comprendre le test de consolidation, où l'objectif derrière cette technique est clairement énoncé. Il est démontré que la consolidation diminue la porosité des poudres fines. La relation entre la force de pression appliquée et la porosité est indiquée. Les différentes forces d'adhésion sont expliquées et leurs relations sont citées. Une enquête plus approfondie montrerait la relation entre l'adhésion due à la consolidation et les forces d'adhésion au repos, et la différence entre elles peut être conclue.

On peut voir lors de l'application du processus de consolidation les résultats suivant :

- Une structure fissuré dans la structure séché du mélange ciment plus eau sans consolidation.
- Une légère fissuration dans la structure séchée du mélange ciment plus eau avec consolidation.
- Structure lisse (après sèche) du mélange ciment plus gypse plus eau avec consolidation.

Ces résultats peuvent avoir une grande implication sur la façon dont nous comprenons et traitons le ciment dans les processus industriels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. BAHRI H.; *ÉTUDE DES TRAITEMENTS DE SURFACE DES NANOPOUDRES DE VERRE EN MILIEUX CIMENTAIRES* in *Département de Génie Civil* Août 2015, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE (Août 2015)
2. Aïche-Belkadi L.; *Modification des propriétés de surface de poudres en lit fluidisé assisté par une post-décharge*, 2009, Université de Toulouse, Université Toulouse III- Paul Sabatier (2009)
3. *Historique du ciment Mortier liant des maçonneries*. Available from: <https://www.febelcem.be/fr/ciment-applications/historique-du-ciment/>.
4. Turki D., Fatah N., and Saidani M.; *International Journal of Materials Research*. **106**(12): p. 1258-1263 (2015)
5. Ragulya A.; *Advances in Applied Ceramics*. **107**(3): p. 118-134 (2008)
6. *Consolidation Processes*. Available from: <https://www.nap.edu/read/4827/chapter/11>.
7. Tea J.; (2015)
8. Masuda H., Higashitani K., and Yoshida H.; *Powder technology: fundamentals of particles, powder beds, and particle generation*; CRC press (2006)
9. CONDOTTA R.; *COULABILITE DES POUDRES COHESIVES : MESURES AUX FAIBLES CONTRAINTES, GRANULAIRES HUMIDES ET APPLICATION A UNE POUDRE INDUSTRIELLE* 2005 (2005)
10. SALEH K. and GUIGON P.; *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés*. (J2251) (2009)
11. Traina K., Cloots R., Bontempi S., Lumay G., Vandewalle N., and Boschini F.; *Powder technology*. **235**: p. 842-852 (2013)
12. Geldart D.; *Powder technology*. **7**(5): p. 285-292 (1973)
13. Yang W.-C.; *Powder technology*. **171**(2): p. 69-74 (2007)
14. Geldart D., Harnby N., and Wong A.; *Powder technology*. **37**(1): p. 25-37 (1984)
15. Rietema K.; *Powder technology*. **37**(5) (1984)
16. George D. and Jean F.; *Paris: Edition eyrolles*. (1998)
17. Hadjoudj M., Khalfallah A., and Moussaceb K.; *L'impact des ckd sur l'environnement (cimenteraï de lafarje à msila)*, 2016, université Abderahmane Mira (2016)
18. BENCHEIKH A.; *Contribution à la caractérisation d'un ciment à base du laitier+ 5% de calcaire*, 2016, Université Mohamed Boudiaf-M'sila (2016)
19. febelcem. *Historique du ciment*. Available from: <https://www.febelcem.be/fr/ciment-applications/historique-du-ciment/>.
20. Bouali K.; *Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires*, 2015 (2015)
21. Avenier C.; *Béton: les mots et les choses*, 2015 (2015)

22. ABDO J.; *Techniques de l'ingénieur. Construction.* (C920) (2008)
23. Calcia C.; *La fabrication du ciment*, 2014 (2014)
24. VICATE. *Les grandes étapes de fabrication du ciment.* Available from: <https://www.vicat.fr/nos-solutions/nos-expertises/ciment>.
25. SARA M. and GHANIA A.; *CIMENT ET CIMENTERIES EN ALGERIE : PRODUCTION ET NORMALISATION*, Juin 2013, Université de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie (Juin 2013)
26. Yahia M.; *Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment*, 2016, Université Mohamed Boudiaf-M'sila (2016)
27. VIGNES J., Moranville M., and BOURNAZEL J.; *Une vie de ciment*, 1996, BUP (1996)
28. Safia M.S.; *Elaboration et détermination des propriétés d'un nouveau ciment composé à base de pouzzolanes artificielles* in *Département de Chimie 2010 Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed BOUDIAF »* p. 100 (2010)
29. NASSIMA B. and AKILA Z.; *Effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques des pâtes cimentaires et mortiers de ciment* 2016, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département de Génie Des Matériaux (2016)
30. DAHOU F.Z.; *L'influence de la surface spécifique du Blaine sur le ciment*, 2018 (2018)
31. Bye G.C.; *Portland cement: composition, production and properties*; Thomas Telford (1999)
32. Biernacki J.J., Bullard J.W., Sant G., Brown K., Glasser F.P., Jones S., Ley T., Livingston R., Nicoleau L., and Olek J.; *Journal of the American Ceramic Society.* **100**(7): p. 2746-2773 (2017)
33. MEBARKI H.; *Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien: Analyse Physico-chimique et Applications*, 2014 (2014)
34. Götzinger M. and Peukert W.; *Powder technology.* **130**(1-3): p. 102-109 (2003)
35. Castellanos A.; *Advances in physics.* **54**(4): p. 263-376 (2005)
36. Valverde J.M. and Castellanos A.; *Granular Matter.* **9**(1-2): p. 19-24 (2007)
37. Quintanilla M., Castellanos A., and Valverde J.; *Physical Review E.* **64**(3): p. 031301 (2001)
38. Vermeer P.A., Diebels S., Ehlers W., Herrmann H., Luding S., and Ramm E.; *Continuous and discontinuous modelling of cohesive-frictional materials.* Vol. 568. Springer Science & Business Media (2001)
39. Turki D. and Fatah N.; *Brazilian Journal of Chemical Engineering.* **27**(4): p. 555-562 (2010)
40. Djafri Y. and Turki D.; *Progress in Adhesion and Adhesives.* p. 421 (2019)
41. Hamaker H.C.; *physica.* **4**(10): p. 1058-1072 (1937)
42. Langbein D.; *The Journal of Adhesion.* **1**(4): p. 237-245 (1969)
43. Xie H.-Y.; *Powder technology.* **94**(2): p. 99-108 (1997)

44. Zhu H., Zhou Z., Yang R., and Yu A.; *Chemical Engineering Science*. **62**(13): p. 3378-3396 (2007)
45. Tselishchev Y.G. and Val'tsifer V.; *colloid Journal*. **65**(3): p. 385-389 (2003)
46. Podczec F., Newton J.M., and James M.B.; *International journal of pharmaceuticals*. **145**(1-2): p. 221-229 (1996)
47. Traore Ndama A.; *Etude des propriétés électrostatiques des poudres en relation avec leur propriétés comportementales: mise au point, modélisation et interprétation des tests de mesure*, 2010, Compiègne (2010)
48. Smith R.W. and Knight R.; *Jom*. **47**(8): p. 32-39 (1995)
49. Davis J.R.; *Handbook of thermal spray technology*; ASM international (2004)
50. Raoelison R., Verdy C., and Liao H.; *Materials & Design*. **133**: p. 266-287 (2017)
51. Moridi A., Hassani-Gangaraj S.M., Guagliano M., and Dao M.; *Surface Engineering*. **30**(6): p. 369-395 (2014)
52. al. A.e.; (Jan. 7, 2010)
53. Roberts A.; *Vibration of fine powders and its application*, in *Handbook of Powder Science & Technology* Springer. p. 146-201 (1997)
54. Haack A., Kache G., Winkler S., and Tomas J.;
55. Munir Z., Anselmi-Tamburini U., and Ohyanagi M.; *Journal of materials science*. **41**(3): p. 763-777 (2006)
56. Munir Z.A., Quach D.V., and Ohyanagi M.; *Journal of the American Ceramic Society*. **94**(1): p. 1-19 (2011)
57. Munir Z.A., Quach D.V., and Ohyanagi M.; *Electric field and current effects on sintering*; in *Sintering*. Springer (Year)
58. Belhachemi B. and Hassaine N.E.; *Communication Science et Technologie (COST) N. 10* (2012)
59. ECDE. *Notre ciment*. 2016; Available from: http://www.ecde.dz/produits_01.php.
60. GICA G.;
61. DALIGAND D.; *Plâtre*; Ed. Techniques Ingénieur (2002)
62. WR.controls-group. *Product Overview*. 2015; Available from: http://www.wfi.co.uk/media/15/d-1/t-file/Cat-WF_GB_2015_0508_72dpi-1.pdf.