

Bibliographie

- [1] **Pliskin L.**, La fabrication du ciment, ciments français, Eyrolles, Paris (1993)
- [2] Cours en ligne: Matériaux de construction. Agence universitaire de la francophonie. Université nationale RDP Lao. Disponible sur: <http://www.la.refer.org/>
- [3] **Papadakis M et Venuat M.**, Industrie de la chaux du ciment et du plâtre, Dunod, Paris (1970)
- [4] **Prasher C.L.**, Crushing and Grinding Hand book, Wiley & Sons, New York, (1987).
- [5] **Delubac G** (coordonnateur), Aspects théoriques du broyage, Mines et Carrières les Techniques, III-IV, (1996) 15-33.
- [6] **Ragot J., Degoul P., Roech M., Marmonier R., Heitzmann P.**, Axiomatique normalisée des processus de fragmentation, Industrie minérale – Minéralurgie, (1977) 66-84.
- [7] **Laguerie C.**, Techniques de mise en contact entre phases solides et gazeuses- Généralités, A5850, Techniques de l'ingénieur (1989) 9- 19.
- [8] **Herbst J.A. et Fuerstenau D.W.**, Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models, Int. Journal. Min. Processing, 7, (1980) 1-31.
- [9] **Reid K.J.**, A solution to the batch grinding equation , Chem.Eng. Sc, 20, (1965) 953 – 963.
- [10] R. G. Larson. *The structure and rheology of complex fluids*. Oxford University Press, New York, 1999.
- [11] D. Doraiswamy. The origins of rheology : a short historical excursion. *Rheology Bulletin*, 71(1), 2002
- [12] G. Couarraze and J.-L. Grossiord. *Initiation à la rhéologie, 3ème édition*. Lavoisier, 2000.
- [13] Q. D. Nguyen and D. V. Boger. Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 24 :47, 1992.
- [14] P. Coussot and C. Ancey. Rhéophysique des pâtes et des suspensions. EDP Sciences, Paris, 1999.
- [15] P. Coussot. Rheophysics of pastes, suspensions and granular materials. Wiley - Interscience, 2005.

| | | | |
|------------|--------|---------------|-----------------------|
| الريولوجية | 1. | بفعالية حركية | تحليل |
| رقيق | | هذه تبين | فصل الجسيمات |
| الأولية | يتناقص | إجهاد | الجيري والطين والحديد |
| | زيادة | | يتأثر |
| | | محتويات | الثانوية. |

ريولوجيا، وحركية،

Résumé :

Dans une première partie, le broyage discontinu des matières premières à ciment dans un broyeur à boulets de laboratoire est analysé. Dans les premiers instants de broyage, la vitesse de disparition de la classe de taille mère des particules, admet effectivement une cinétique d'ordre 1. Ensuite, l'étude rhéologique des suspensions de calcaire, d'argile et du minerai de fer à différentes teneurs d'eau montre que ces suspensions présentent un comportement d'un fluide rhéofluidifiant qui n'est pas affecté par l'incorporation d'ajout secondaire. De plus, la contrainte seuil de cisaillement diminue avec l'augmentation de la vitesse initiale de broyage.

Mots clés

Cimenterie, Broyage, Broyeur à boulets, Rhéologie, matières premières, ciment, cinétique, bilan de Population, Pate crue

Abstract:

In the first part, the discontinuous grinding cement raw materials in a laboratory ball mill are analyzed. In the first moments of grinding, the rate of disappearance of the parent class size particles effectively admits order kinetics 1. Then, the rheological study of suspensions of limestone, clay and iron ore at different water contents shows that these suspensions exhibit a shear thinning behavior of a fluid which is not affected by the incorporation of additional secondary. In addition, the yield stress of shear decreases with increasing initial speed grinding.

Keywords

Cement, grinding, ball mill, Rheology, raw materials, cement, kinetics, population balance, Pate raw

Conclusion générale

Des expériences de broyage de matières premières à ciment tels que le calcaire, l'argile et le minerai de fer sont effectuées dans un broyeur à boulets de laboratoire. Ensuite, le comportement rhéologique des ces matériaux en suspensions avec différentes teneurs d'eau est étudié.

Les principaux résultats sont résumés comme suit:

- La vitesse de broyage de disparition de la classe mère des particules admet une cinétique d'ordre 1 et dépend fortement de la taille initiale des particules et de la nature du matériau.
- Le comportement rhéologique de la suspension de calcaire est celui d'un fluide rhéofluidifiant. Il n'est pas affecté par l'incorporation d'ajout tel que le sable, l'argile et le minerai de fer, et la contrainte de cisaillement augmente avec la diminution de la teneur d'eau.
- L'augmentation de la vitesse initiale de broyage du calcaire entraîne la diminution de la contrainte seuil de cisaillement de la suspension de ce matériau.

Introduction

Au cours de la fabrication du ciment en voie humide, les matières premières sont broyées avec l'eau dans un broyeur à boulets pour former une pâte crue, constituée en moyenne à 56% en calcaire. Ces installations permettent ainsi l'obtention d'une pâte crue ayant des refus aux tamis de 160 μm et 90 μm respectivement de l'ordre de 1 à 1,5 % et de 5 à 20 %. L'approche utilisée pour la représentation de la finesse de la pâte crue est relativement limitée dans la justesse de sa prédiction, du fait que la granulométrie est assimilée à une taille caractéristique d'un lot de particules.

Le traitement mathématique de l'ensemble de la distribution granulométrique est apparu en réalité avec l'apparition du modèle cinétique du bilan de population qui permet de mieux appréhender la qualité des produits élaborés et qui constitue actuellement pour le broyage homogène une procédure d'extrapolation et de conception de ces installations dans l'industrie du ciment.

Par ailleurs, dans la réalité industrielle, le pompage de la pâte crue à ciment, son écoulement dans les conduites et son transfert vers les bacs de stockage et les bassins d'agitation présentent différents dysfonctionnements tels que le bourrage, le blocage et l'arrêt de fonctionnement des installations. En effet, la conception actuelle des équipements de pompage et de transport ne tient pas compte de la nature complexe de la pâte et la viscosité utilisée dans le calcul de dimensionnement est déterminée à partir d'essais relatifs à des fluides newtoniens. De plus, le dispositif utilisé au laboratoire pour approcher l'écoulement de la pâte est loin de représenter les cisaillements rencontrés pendant le pompage industriel.

En conséquence et afin de répondre à ces insuffisances, l'étude expérimentale que nous effectuerons visera en première étape à analyser la cinétique de broyage des matières premières telle que le calcaire, l'argile et le minerai de fer dans un broyeur à boulets de laboratoire. Ensuite, nous déterminons le comportement rhéologique de ces matériaux en suspensions à différents teneurs d'eau. Enfin, l'influence de la vitesse initiale de broyage du calcaire sur la rhéologie de sa suspension sera mise en évidence.

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

LA NOMENCLATURE

| | |
|----------------------------------|--|
| T | température |
| P | pression |
| t | temps |
| τ | Contrainte de cisaillement |
| | déformation |
| $\dot{\gamma}$ | Vitesse de déformation |
| μ | viscosité dynamique |
| V | volume |
| K | indice de consistance |
| | Densité |
| s | selectivité |
| $B_{i,j}$ | Fonction de broyage cumulée relative aux classes i et j |
| $b_{i,j}$ | Fonction de broyage relative aux classes i et j |
| B(x,y) | Fonction de broyage |
| B | Matrice de broyage |
| d_{50} | Taille médiane des particules |
| d_{80} | Dimension de la maille carrée du tamis laissant passer 80% du matériau |
| D | Diamètre de broyeur |
| d_b | Diamètre de boulets |
| f_c | Fraction de volume de broyeur occupé de la matière de porosité 0,4 |
| x_i | pourcentage massique de solide que laisse passer le tamis d'ouverture |

TABLE DES MATIERES

RESUME

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : Fabrication du ciment en voie humide et propriétés de la pâte crue de matières premières

| | |
|---|---|
| Introduction | 2 |
| I.1. Procédé de fabrication du ciment portland en voie humide | 2 |
| I.1.1. Extraction et chargement de la matière première | 2 |
| I.1.2. Concassage et stockage | 3 |
| I.1.3. Broyage et préparation de la pate | 3 |
| I.1.4. Cuisson de la pate | 4 |
| I.1.5. Broyage du clinker et production du ciment | 5 |
| I.2. Propriétés physico-chimique et transport de la pate crue | 6 |
| I.2.1. Propriétés physico-chimique | 6 |
| I.2.2. Transport de la pâte | 8 |

CHAPITRE II : Notions sur la cinétique de broyage et la Rhéologie des suspensions de matériaux granulaires

| | |
|--|----|
| Introduction | 11 |
| II.1. Cinétique de broyage des matériaux | 11 |
| II.1.1. Procédé de fragmentation | 11 |
| II.1.2. Aptitude des matériaux à la fragmentation | 11 |
| II.1.3. Types de fragmentation | 12 |
| II.2. Granulométrie et surface spécifique d'un ensemble de particules | 13 |
| II.2.1. Analyse granulométrique | 13 |
| II.2.2. Méthodes d'analyse granulométrique | 14 |
| II.3. Approche mathématique du procédé de broyage d'un matériau homogène | 16 |
| II.3.1. Fonction de sélection | 16 |
| II.3.2. Fonction de broyage | 16 |

| | | |
|----------|---|----|
| II.3.3. | Bilan de population | 17 |
| II.3.4. | Détermination des fonctions de sélection et de broyage | 18 |
| II.4. | Rhéologie des suspensions de matériaux granulaires | 19 |
| II.4.1. | Contrainte et déformation dans un fluide | 19 |
| II.4.2. | Contrainte de cisaillement | 19 |
| II.4.3. | Vitesse de déformation | 20 |
| II.4.4. | Viscosité et fluide non-Newtonien | 21 |
| II.5. | Classification des fluides réels en fonction de leur comportement rhéologique | 22 |
| II.5.1. | Fluides indépendants du temps | 22 |
| II.5.1.1 | Fluides sans contrainte seuil | 22 |
| II.5.1.2 | Fluides à contrainte seuil | 24 |
| II.6. | Facteurs affectant la rhéologie d'une suspension | 26 |
| II.6.1. | Ecoulement d'une suspension dans une conduite | 26 |

CHAPITRE III : Matériels utilisés et Méthodologie expérimentale

| | | |
|--------------|--|----|
| Introduction | | 28 |
| III.1. | Matériel utilisé | 28 |
| III.1.1. | Dispositif de broyage | 28 |
| III.1.2 | Tamisage | 30 |
| III.1.3. | Rhéomètre | 30 |
| III.2. | III.2. Protocole expérimental | 31 |
| III.2.1. | III.2.1. Détermination de la cinétique de broyage | 31 |
| III.2.2. | III.2.2. Mesures rhéologiques des suspensions | 31 |
| III.2.2.1. | III 2.2.1 Préparation des échantillons de matières premières | 31 |
| III.2.2.2. | III 2.2.2 Rhéologie des suspensions | 31 |

CHAPITRE IV : Résultat et interprétations

| | | |
|--------------|--|----|
| Introduction | | 33 |
| IV.1. | Cinétique de broyage des matières premières | 33 |
| IV.2. | Comportement rhéologique de suspensions des matières premières | 34 |
| IV.3. | Influence de la vitesse initiale de broyage sur la contrainte de cisaillement de la suspension du calcaire | 38 |

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

| | | |
|--------------|---|----|
| Figure I.1 | Procédé en voie humide de fabrication du ciment | 3 |
| Figure I.2 | Four rotatif à ciment en voie humide | 4 |
| Figure I.3 | Zones d'un four rotatif à voie humide | 5 |
| Figure I.4 | Circuit fermé de broyage du clinker | 6 |
| Figure I.5 | Courbe granulométrique d'une pâte crue à ciment | 8 |
| Figure .6 | Pompage de la pâte de matières premières | 9 |
| Figure I.7 | Dispositif utilisé pour la mesure de la viscosité de la pâte | 10 |
| Figure II.1 | Concasseur à mâchoires. | 12 |
| Figure II.2 | Schéma d'un broyeur à boulets | 13 |
| Figure II.3 | Schéma de principe du granulomètre à laser. | 15 |
| Figure II.4. | Principe du cisaillement laminaire | 19 |
| Figure II.5. | Forces agissant sur deux éléments de couches voisines | 20 |
| Figure II.6. | Mouvement laminaire entre deux plans parallèles | 20 |
| Figure II.7. | Viscosité des fluides pseudo-plastique et dilatant | 23 |
| Figure II.8. | Rhéogramme des fluides sans contrainte seuil | 24 |
| Figure II.9. | Rhéogrammes d'un fluide de Bingham et de Casson | 25 |
| Figure II.10 | Régimes d'écoulement d'une suspension dans une conduite | 27 |
| Figure III.1 | Dispositif expérimental de broyage | 28 |
| Figure III.2 | Tamiseuse de laboratoire | 30 |
| Figure III.3 | Rhéomètre rotatif de Couette | 31 |
| Figure IV.1 | Cinétique de broyage d'ordre 1 d'argile | 33 |
| Figure IV.2 | Cinétique de broyage d'ordre 1 de calcaire | 33 |
| Figure IV.3 | Cinétique de broyage d'ordre 1 de minerai de fer | 34 |
| Figure IV.4 | Contrainte de cisaillement et viscosité apparente de la suspension d'argile | 35 |
| Figure IV.5 | Contrainte de cisaillement et viscosité apparente de la suspension de calcaire | 36 |
| Figure IV.6 | Contrainte de cisaillement et viscosité apparente de la suspension du M.Fer | 37 |
| Figure IV.7 | Contrainte de cisaillement et viscosité apparente de la suspension du mélange de matières premières | 38 |
| Figure IV.8 | Contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation de la suspension du calcaire | 38 |
| Tableau I.1 | composition moyenne de la pâte crue | 4 |

| | | |
|----------------|---------------------------------------|----|
| Tableau I.2. | Teneurs des oxydes dans le cru | 6 |
| Tableau III.1. | Conditions de broyage utilisées | 29 |
| Tableau III.2. | Nature et composition des suspensions | 32 |

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les principales étapes du procédé de fabrication et de mise en œuvre du ciment portland en voie humide, tout en précisant les propriétés d'usage de la pâte crue dans le procédé.

I.1 Procédé de fabrication du ciment portland en voie humide

Le ciment présente l'aspect d'une poudre grise. Dès que celle-ci est mélangée à de l'eau, elle acquiert les propriétés d'un liant hydraulique qui a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation le transforme d'une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [1]. La fabrication du ciment portland se fait à partir du broyage d'un matériau produit semi fini appelé clinker à laquelle on ajoute du sulfate de calcium pour obtenir du ciment. Le clinker est le constituant de base des ciments Portland qui leur assure leur caractéristique principale, à savoir leur hydraulicité. Le clinker produit par cuisson est composé d'un mélange de calcaire et d'argile auquel selon son origine, est parfois corrigé par apport d'autres matériaux (sable, minerai de fer).

Parmi les principaux procédés de fabrication du ciment on retient principalement deux techniques : la voie sèche et la voie humide. Les considérations économiques restent primordiales dans le choix d'une technique de fabrication et qui soit en concordance avec la nature de la carrière. La voie humide est choisie à cause de la richesse en eau des minéraux utilisés et leur mauvaise aptitude au séchage. Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

Le procédé par voie humide compte 4 étapes principales (figure I.1) :

- Extraction des matières premières
- Concassage et stockage
- Broyage et préparation de la pâte
- Cuisson de la pâte
- Broyage du clinker et stockage du ciment

I.1.1.Extraction et chargement de la matière première

De la carrière, on extrait la matière première laquelle est composée de calcaire et d'argile. Elle se fait dans la carrière à ciel ouvert, elle nécessite deux étapes qui sont le forage des trous destinés à recevoir l'explosif et l'abattage des roches et ce en actionnant un cordon détonateur. Le chargement des matières premières dans les camions ou les dumpers se fait par l'intermédiaire de pelles mécaniques. La roche est ensuite acheminée par des bandes transporteuses vers un atelier de concassage.

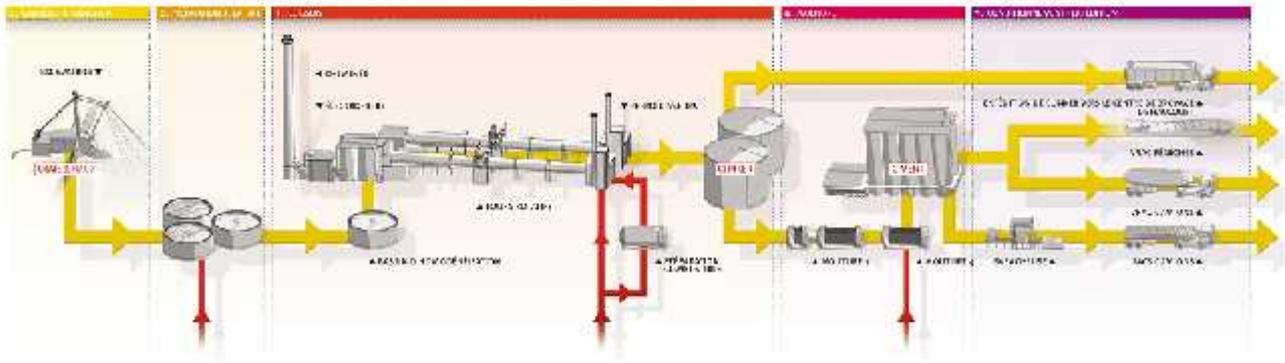


Figure I.1. Procédé en voie humide de fabrication du ciment

I.1.2 Concassage et stockage :

Le concassage de la matière première se fait au niveau de la carrière même et ce grâce au concasseur à cône pour le concassage primaire et le concasseur à marteaux pour le concassage secondaire. Un crible vibrant joue le rôle de séparateur qui permet de réintroduire dans les concasseurs primaire et secondaire des morceaux mal concassés. Une fois les fragments réduits, ils seront stockés dans un hall qui est partagé afin de permettre un meilleur stockage et une bonne homogénéisation de la matière. La reprise de cette matière première fragmentée (calcaire, argile) ainsi que le sable et le minerai de fer se fait à l'aide d'un point roulant vers les quatre trémies pour l'alimentation des broyeurs.

I.1.3 Broyage et préparation de la pâte :

L'atelier de broyage du cru est équipé d'un broyeur à boulets. Le broyeur est formé de quatre doseurs dans lesquels sont amenées les quatre matières premières. Le dosage des matières premières se fait à l'aide de soles doseuses, soient 4 en tout, une pour le calcaire, une pour l'argile, et les 2 autres pour le sable et le minerai de fer. Le débit de chaque matériau est fixé par le laboratoire de l'usine. On fait également un dosage en eau estimé en 30 et 40% (~33%). Cette quantité d'eau est introduite pour faire avancer la matière dans le broyeur et pour

diminuer la quantité de chaleur générée par les chocs des corps broyant, dont la température pouvant atteindre une valeur de l'ordre de 100 à 120 °C. Une fois dosé, le mélange pénètre dans le broyeur à boulets du cru, lequel, les matériaux sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). La composition moyenne requise pour la pâte crue est donnée au tableau II.1, ci après.

Tableau I.1: composition moyenne de la pâte crue

| | Calcaire | argile | Minerai de fer | Sable | Eau |
|-----------------|----------|--------|----------------|-------|---------|
| Proportion en % | 55 à 60 | 8 à 10 | 0,2 à 0,5 | 3 à 5 | 30 à 35 |

A la sortie du broyeur, Le mélange passe à travers une grille et est refoulée par une pompe dans un délayeur (8 à 10 m de diamètre) où il est déchiqueté et écrasé par des herses rotatives le transformant en pâte fluide. La pâte est-ensuite véhiculée et stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Une fois la pâte homogénéisée, elle est déversée dans des bassins circulaires en béton où s'effectue une seconde homogénéisation au moyen d'une combinaison d'agitateurs mécaniques à deux bras et de purge d'air, en même temps pour ne pas laisser la pâte se décanter. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

I.1.4 Cuisson de la pate :

La pâte soigneusement dosée et homogénéisée, est introduite dans un four rotatif alimenté au gaz naturel et constitué par un cylindre d'acier garni intérieurement de briques réfractaires dans lequel, elle doit subir les opérations de séchage, déshydratation, décarbonatation, clinkérisation et refroidissement (figure I.2).



Figure I.2. Four rotatif à ciment en voie humide

La figure I.3 représente les différentes zones d'un four rotatif en voie humide. Les parois de la zone de séchage sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges calorifiques entre la pâte et les parties chaudes du four. Le four est incliné de 4% et tourne à une vitesse variable. Ces deux facteurs conjugués permettent à la matière de progresser dans de bonnes conditions. Au fur et à mesure de son acheminement, la matière s'échauffe et se transforme en clinker (produit de la cuisson) vers 1400 à 1500°C. A la sortie du four, le clinker sous forme de granulés à une température de 1200 °C tombe dans un refroidisseur, permettant de ramener le clinker à une température de 80 à 100°C, pour le transporter et le broyer. Le clinker comprend essentiellement les deux silicates de calcium 3CaOSiO_2 et 2CaOSiO_2 . L'aluminium et le fer passent, en majeure partie, à l'état de $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ et d'une solution solide de composition approximative $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$.

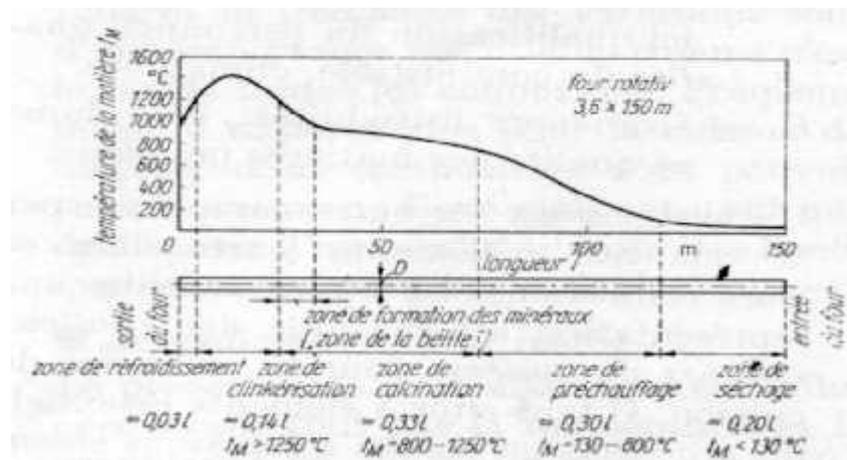


Figure I.3. Zones d'un four rotatif à voie humide

I.1.5 Broyage du clinker et production du ciment

Le clinker est un semi-produit, impropre à la vente, il doit être transformé en ciment. Le ciment est obtenu par broyage des granulés de clinker, avec addition d'un faible pourcentage de gypse (4 – 5%) et éventuellement (15 à 20%) de tuf ou des poussières récupérées du dépoussiérage des gaz de rejet du procédé de cuisson. Les opérations dites de broyage du ciment ont pour but d'accroître la réactivité du clinker, par augmentation de sa surface spécifique et par création de défauts de cristaux en surface de grains. Ce traitement développe les propriétés hydrauliques du ciment et lui confère ses propriétés rhéologiques. La surface spécifique Blaine d'un ciment portland ordinaire, d'une valeur supérieure ou égale à 300 m²/kg dans l'industrie du ciment, est une condition de première satisfaction pour la préparation du béton. Le broyage du clinker est réalisé en circuit fermé (figure I.4).

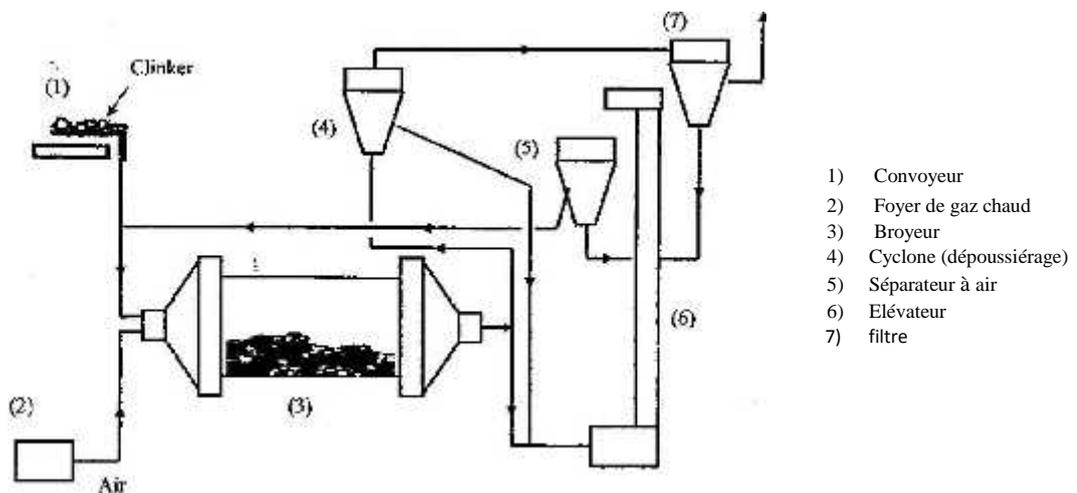


Figure I.4. Circuit fermé de broyage du clinker

I.2 Propriétés physico-chimique et transport de la pate crue

I.2.1 Propriétés physico-chimique

L'aptitude à la cuisson est déterminée par un grand nombre de propriétés de la pate crue et de paramètres technologiques. Les principaux paramètres d'influence physico-chimique sont :

- la composition chimique
- la composition minéralogique
- l'homogénéité
- la composition granulométrique

- **Composition chimique**

Le tableau I.2 indique les valeurs usuelles dans lesquelles s'inscrivent les compositions des crus de cimenteries dans leur ensemble. Ces proportions permettant d'obtenir un clinker de qualité.

Tableau I.2. Teneurs des oxydes dans le cru [2]

| Teneur % | Oxyde | | | | | | |
|----------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-------------------------------------|-----------------|
| | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O, Na ₂ O | SO ₃ |
| Limite | 60-69 | 18-24 | 4-8 | 1-8 | < 5 | < 2 | < 3 |
| Moyenne | 65 | 21 | 6 | 3 | 2 | 1 | 1 |

En fait, une usine donnée ne peut se permettre que des variations très réduites par rapport à une composition optimale propre. Il faut donc élaborer des mélanges des matières de base de calcaire, d'argile ou argilo-calcaire (marnes), de façon à obtenir la composition chimique voulue. Il est très souvent nécessaire d'affiner cette composition par l'ajout d'autres produits de carrière ou de sous produits industriels.

- **Homogénéité**

Pour une cuisson non perturbée et une bonne qualité du clinker, il faut que les constituants broyés finement soient répartis de façon égale et que chaque microvolume présente la même composition chimique que celle de l'ensemble de la pâte crue. Une répartition homogène de tous les constituants nécessaires à la formation du clinker facilite la diffusion. Un manque d'homogénéité dans le mélange cru, comme par exemple un enrichissement en calcaire, aboutit à la formation de composés minéraux autres que ceux que l'on veut obtenir, par exemple à la formation de la chaux libre. La réaction de formation du clinker est conditionnée par la réunion dans un agglomérat d'un nombre suffisamment grand de particules de pâte crue, afin que la composition chimique de cet agglomérat corresponde à celle de l'ensemble de la pâte crue. Pour la finesse habituelle, il faut que se forment des microgranules d'un diamètre d'au moins 0,5 à 1 mm.

- **Propriétés minéralogiques**

Outre la composition chimique du mélange cru et les facteurs technologiques du processus de cuisson, la composition minéralogique des matières premières joue un rôle essentiel dans la formation du clinker. Des différences dans la teneur minéralogique qualitative et quantitative dans l'ordre cristallin, dans la grosseur des grains et la surface spécifique, dans les différents contenus dans le minéral entraînent des différences dans l'aptitude à la cuisson du mélange cru. Les pâtes crues se composent de matières premières différentes des points de vue géologique et minéralogique. Du calcaire moins dense ayant des cristaux plus grossiers, présente un moindre degré de désordre et entraîne des vitesses de réaction plus faibles lors de la cuisson.

- **Dimension des grains :**

La vitesse des réactions de décomposition, des réactions à l'état solide et des processus de dissolution est inversement proportionnelle à la grosseur des grains. L'aptitude à la cuisson de la pâte crue, par conséquent le débit du four et la qualité du clinker, dépendent de la finesse de

la pâte crue. Celle-ci doit être moulue si finement que, dans le cadre de la durée de séjour établie technologiquement, et pour une température de cuisson correspondante, le processus de formation du clinker puisse se dérouler. La pâte crue à plusieurs constituants se caractérise par le fait qu'elle ne suit aucune loi connue de répartition granulométrique (figure I.5).

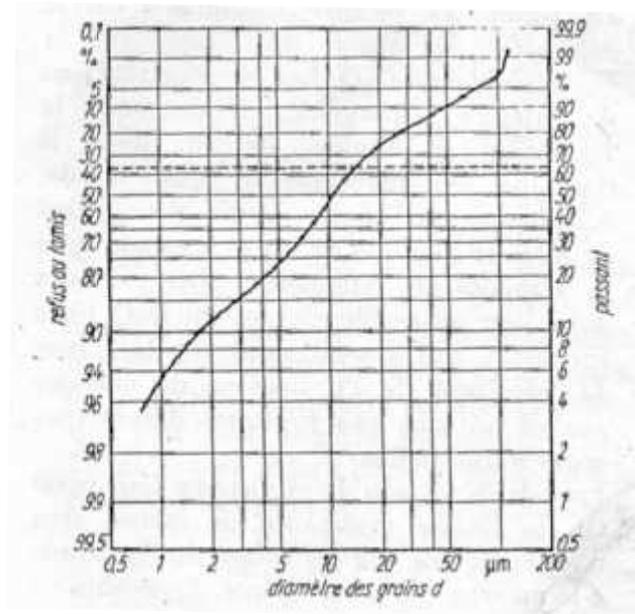


Figure I. 5. Courbe granulométrique d'une pâte crue à ciment

En ce qui concerne l'influence de la dimension des grains sur la vitesse de réaction, la teneur en gros grains ($>90 \mu\text{m}$) est beaucoup plus importante que la répartition granulométrique du fait que les grains de quartz et de calcite ($> 150\mu\text{m}$) ne peuvent réagir complètement pendant leur séjour, technologiquement conditionné dans la zone de clinkérisation. Les cimentiers utilisent pour connaître la finesse de leur cru le refus aux tamis standardisés de $90 \mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ et $200\mu\text{m}$ qui correspondent à des refus respectifs de 5 à 20 %, 12 à 14 % et 3,5 à 4 %. D'autres cimentiers, en plus des refus sur les tamis suscités, utilisent d'autres méthodes pour bien approcher la finesse de leur cru, dont l'une des plus importantes est la surface spécifique Blaine (surface extérieure totale en cm^2 contenue dans un gramme de matière).

I.2.2 Transport de la pâte

Les concepteurs des installations de transport de la pâte crue à ciment (figure I.6), utilisent pour évaluer le débit de la suspension en circulation dans une conduite horizontale, la formule suivante [3] :

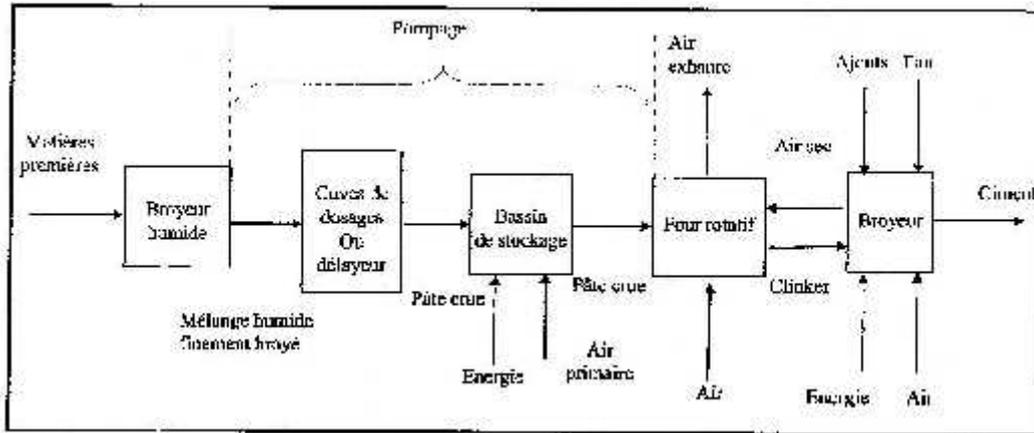


Figure I.6 : Pompage de la pate de matières premières

$$Q = \frac{7}{L \mu} \left(P - 0.65 \frac{\mu}{d} \right) \quad (I.1)$$

Q = débit (en cm³/s)

d = diamètre intérieur de la canalisation (en cm)

L = longueur de la canalisation (en cm)

P = pression motrice (en glcm²)

μ = viscosité dynamique de la pâte (en poises)

La valeur de la viscosité est obtenue à laide d'un essai d'écoulement t dans un entonnoir conique figure (I. 6) en utilisant la formule :

$$\mu = C t \quad (I.2)$$

= masse volumique de la pâte (en g/cm³)

t = temps d'écoulement (en seconde) d'un kilogramme,

C = constante liée aux dimensions du cône utilisé

La valeur de C s'obtient en faisant écouler un fluide newtonien de viscosité et de masse volumique connue et en appliquant la formule :

$$C = \frac{\mu}{\rho} \quad (I.3)$$

= masse volumique du fluide newtonien (en g/cm³)

μ = viscosité dynamique du fluide newtonien (en poises)

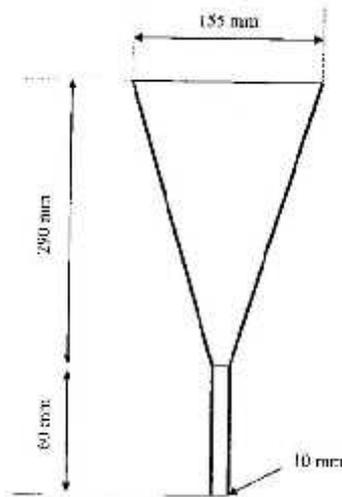


Figure 1. 7. Dispositif utilisé pour la mesure de la viscosité de la pâte

La puissance de la pompe est donnée par la formule suivante:

$$P_u = \frac{Q(1 + P + \rho h)}{3 r} \quad (I.4)$$

Q = débit (en m³/h)

h = dénivellation (en m)

P = pression motrice (en g/cm²)

r = rendement de la pompe

ρ = masse volumique de la pâte (en tonne/m³)

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons certaines notions fondamentales dans le domaine du broyage des matériaux, en particulier l'approche moderne de la cinétique de broyage homogène du bilan de population. Ensuite, nous nous intéressons à la rhéologie de suspensions des matériaux granulaires.

II.1 Cinétique de broyage des matériaux

II.1. 1. Procédé de fragmentation

La réduction granulométrique d'un matériau est le résultat d'une fragmentation, ce terme englobe deux procédés connus et utilisés depuis des siècles: le concassage et le broyage. On considère que le concassage est la première étape de la fragmentation, le broyage alors est l'étape finale, par lequel on cherche à réduire la taille et/ou à augmenter la surface spécifique des particules solides. Son efficacité est toujours évaluée par une mesure de l'accroissement de la finesse.

II.1.2. Aptitude des matériaux à la fragmentation

Sur le plan pratique, on a essayé de caractériser à priori l'aptitude ou la résistance des matériaux à se laisser fragmenter, à partir des propriétés telles que la dureté, la capacité, la résistance à la compression et la résistance à la flexion et au choc. Cette aptitude est quantifiée par des les indices énergétiques suivants :

- *Indice de Bond*: défini comme étant l'énergie consommée pour réduire un matériau de dimension initiale proche de 2mm à une dimension pour laquelle 80% de la masse a une taille inférieure à 100 μ m.
- *Indice de Hardgrove*: est la masse du solide de taille inférieure à 75 μ m produite par le test standard d' Hardgrove après un certain de nombre de tours. Plus la valeur de l'indice Hardgrove est élevée, plus facile est le broyage du solide considéré.
- *Indice d'abrasion*: est défini par l'usure d'un matériau en présence d'un échantillon de matière à broyer [4].

II.1.3 Types de fragmentation

▪ Fragmentation grossière

La fragmentation grossière inclut les opérations de pré-concassage et de concassage proprement dites. Pour les matériaux rocheux, les technologies des appareils de fragmentation grossière reposent sur la mise en oeuvre de forces externes qui peuvent se rattacher à des actions de compression, de cisaillement et d'impacts. La classification des appareils tient compte du mode d'action principal. Il est souvent difficile de faire la part exacte de chaque type de force externe agissant car on observe que le résultat est global. Parmi les appareils de fragmentation, citons les concasseurs à mâchoires (figure II.1), giratoire, à cylindre, à percussions et à cône. La consommation énergétique de la fragmentation grossière est de 1 à 4 kWh/t.

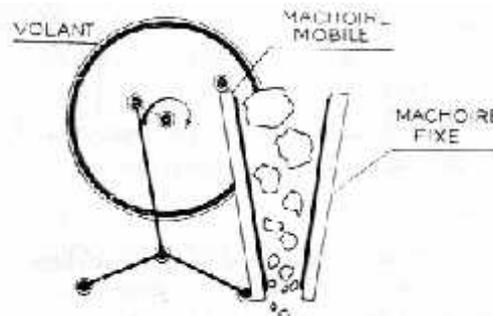


Figure II.1 : Concasseur à mâchoires.

▪ Fragmentation fine

Si le domaine de la fragmentation fine est largement étendu sur le plan des granulométries, les technologies ont été pratiquement restreintes à un seul mode d'action consistant en la mise en oeuvre de forces d'impact. Les exemples se limitent préférentiellement à des matériaux tendres. La consommation énergétique de la fragmentation fine est de 5 à 6 kWh/t pour le broyage grossier et peut atteindre 20 à 30 kWh/ pour le broyage fin. Ce dernier peut être assuré dans des broyeurs, constitués de tubes cylindriques ou cylindro-coniques tournant autour de leur axe horizontal et contenant des corps broyants libres (figure II.2), qui peuvent être des boulets, des barres ou d'autres formes en acier, en silex ou en céramique. Ils doivent être plus lourds et plus gros que les particules à broyer. Les principaux critères qui guident le choix des broyeurs sont:

- la qualité et la forme du produit à obtenir, conditionnée par les traitements physiques, chimiques ou métallurgique ultérieurs,
- les caractéristiques du matériau notamment granulométrie, dureté, plasticité, abrasivité.
- les impératifs de fonctionnement : capacité, fiabilité, coûts opératoire et d'investissement.

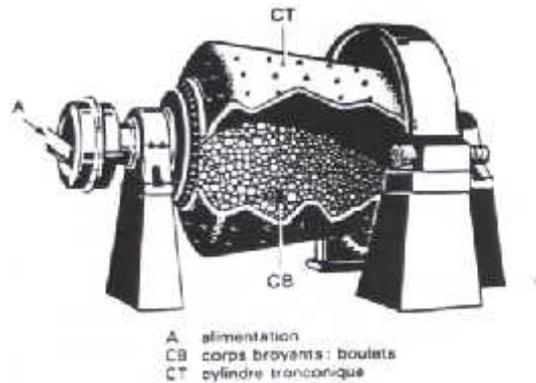


Figure II.2 : Schéma d'un broyeur à boulets.

- **Fragmentation ultra fine**

Dans le domaine de l'ultra fine, les forces de frottement sont largement prépondérantes sur les autres forces, l'énergie réelle dépensée est comprise entre 100 à 1000 kWh/t [5].

II.2. Granulométrie et surface spécifique d'un ensemble de particules

Lors du broyage d'un matériau, on produit des fragments de toutes formes et de toutes dimensions, allant de quelques millimètres jusqu'aux poussières les plus fines. Il est essentiel de pouvoir caractériser l'état granulométrique de toute matière divisée. Pour ce faire, il convient préalablement de définir la dimension d'un ensemble de particules ou de déterminer pour les produits relativement fins la surface spécifique. Cette dernière mesure est une fonction directe de la granularité mais elle ne rend aucun compte de la distribution des dimensions.

II.2.1 Analyse granulométrique

La notion de dimension, déjà difficile à définir pour une particule isolée, est plus complexe encore pour un ensemble hétérogène de particules de toutes formes et de toutes dimensions. En répartissant les particules entre une série de fractions constituées chacune de grains de dimensions voisines qu'on définit le mieux les dimensions de l'ensemble. Le résultat de ces

opérations permet d'établir son analyse granulométrique. L'analyse granulométrique consiste donc à diviser en fractions, la matière ou une partie adéquate de celle-ci constituant un échantillon considéré comme parfaitement représentatif. L'analyse granulométrique donne une répartition numérique ou pondérale suivant une succession d'intervalles dimensionnels, généralement standardisés, couvrant tout le domaine granulométrique. Les résultats des analyses granulométriques peuvent être figurés par des courbes sur des diagrammes proportion - dimension ou, plus souvent, proportion cumulée - dimensions. L'ouverture moyenne ou taille médiane, d_{50} , définie comme l'ouverture théorique du tamis qui laisserait passer juste 50% de la masse totale de produit est souvent utilisée pour caractériser la distribution de taille. Aussi, d'autres dimensions caractéristiques (d_{80} , d_{90}) peuvent être employées. Lorsque l'on désire de donner de l'importance à la surface des particules, on définit leur diamètre moyen par l'expression :

$$d_p = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}} \quad (\text{II.1})$$

x_i est le pourcentage massique de solide que laisse passer le tamis d'ouverture t_{i-1} et que retient le tamis d'ouverture t_i , et d_i est le diamètre moyen de cette fraction de population tel que :

$$d_i = \frac{t_{i-1} + t_i}{2} \quad (\text{II.2})$$

On peut noter que d_p diffère assez sensiblement de d_{50} [6].

II.2.2 Méthodes d'analyse granulométrique

▪ Tamisage

La répartition granulométrique d'un produit peut être obtenue par tamisage. Il convient à cet effet de sélectionner un échantillon parfaitement caractéristique du produit à tester. Le tamisage permet le groupement en classes, indépendamment de la densité et de l'état de surface des particules, en fonction de la dimension des vides des tamis. Les grains passent à travers la toile d'un tamis si deux de leurs dimensions au moins sont inférieures aux dimensions des vides de ce tamis. Les tamis usuels de contrôle, dont le diamètre est fréquemment de 200 mm, permettent d'effectuer les tamisages dans une gamme de dimensions allant de quelques millimètres jusqu'à environ 40 microns. Le tamisage à sec est

réalisé en plaçant une colonne de tamis, sur une tamiseuse automatique de fréquence et d'amplitude réglables dont les ouvertures des mailles carrées forment une série en progression géométrique de raison $\sqrt{2}$ ou $\sqrt[4]{2}$. Une série couramment utilisée est celle du constructeur américain Tyler dont le tamis de référence et celui d'ouverture 100 mesh, (74 μm). La quantité et le temps de tamisage requis pour les tests varient en fonction de la taille supérieure des particules, tout en évitant l'abrasion du produit.

▪ Diffraction laser

La mesure de la granulométrie par diffraction laser consiste à faire traverser l'échantillon de produit par un faisceau, de lumière monochromatique, émis par un laser (figure II.3). La connaissance de la répartition de la lumière diffractée permet de déterminer la courbe granulométrique. L'image résultant de la diffraction d'un faisceau lumineux par des particules est un ensemble d'anneaux concentriques. La quantité de lumière déviée et l'importance de l'angle de déviation permettent de mesurer la taille des particules. C'est la surface projetée de la particule qui entre en ligne de compte. Ainsi, les particules de grosses tailles dévient des quantités importantes de lumière sur des angles faibles par rapport à l'axe de propagation; les petites particules au contraire dévient des quantités infimes de lumière mais sur des angles beaucoup plus larges. La localisation du compteur éclairé donne des informations sur l'angle de diffraction. A partir de celles-ci, le calculateur, par un traitement mathématique, déduit la surface projetée des particules, donc leur dimension et leur nombre dans chaque classe granulométrique. La gamme de tailles accessible s'étend de 0,05 à 900 μm .

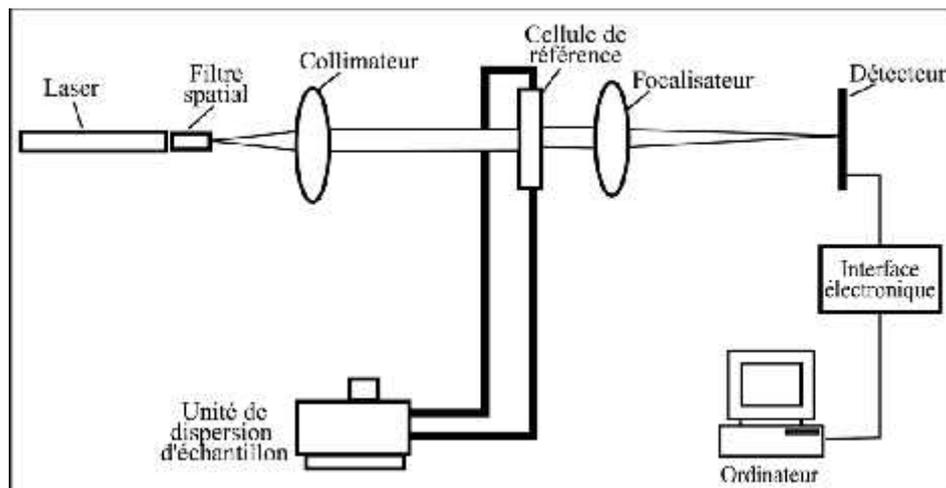


Figure II.3 : Schéma de principe du granulomètre à laser.

▪ Autres méthodes

Le tamisage est la méthode la plus utilisée pour l'analyse granulométrique, cependant il existe d'autres méthodes qui peuvent être utilisées, parmi lesquelles on peut citer la microscopie, la sédimentation, la centrifugation-elutriation, etc. ... [7].

II.3 Approche mathématique du procédé de broyage d'un matériau homogène

Le modèle cinétique du bilan de population est l'approche moderne de la modélisation du processus de fragmentation. Il consiste à introduire une fonction de sélection décrivant le taux de broyage des particules (pendant l'unité de temps), et une fonction décrivant la distribution du produit broyé dans les différentes tranches granulométriques inférieures [8].

II.3.1 Fonction de sélection

Considérons le broyage d'un matériau homogène portant sur une quantité de matière de masse $M(x, t)$ de grains, ayant une dimension donnée x à l'instant t , on admet que la variation de masse dM , pendant le temps dt , est proportionnelle à $M(x, t)$.

$$dM(x, t) = -S(x).M(x, t)dt \quad (\text{II.3})$$

$S(x)$ représente la fonction de sélection, sa dimension est celle de l'inverse du temps et sa valeur dépend de x . Elle est souvent appelée vitesse spécifique de broyage. Alors par analogie avec la cinétique chimique, le broyage est dit du premier ordre.

II.3.2 Fonction de broyage

Cette fonction, notée B dite aussi fonction de fragmentation est complémentaire de la fonction de sélection puisque, par unité de temps, elle indique quantitativement la répartition granulométrique obtenue après broyage de la fraction des grains de dimension initiale y .

On désigne habituellement par : $B(x, y)$ le pourcentage de grains de dimension y , qui donnent après broyage des grains de taille inférieure à x : $B(x, y)$ s'applique donc, par unité de temps, sur la fraction $S(y) M(y)$ des particules mères de dimension y .

Souvent on sera amené à considérer des tranches granulométriques, puisque l'on opère avec des tamis. On considère ainsi la masse M_i de particules appartenant à la tranche granulométrique i . On écrira alors en introduisant la forme discrétisée de la fonction de sélection :

$$dM_i = -S_i M_i dt \quad (\text{II.4})$$

La fonction de sélection S_i , relative à la taille i , est la fraction massique de particules de classe i broyées pendant un instant dt .

La fonction de distribution de broyage $b_{i,j}$ est la fraction massique des particules de classe j dont le broyage a donné des particules plus fines de classe i .

$$b_{i,j} = \frac{dm_{i,j}}{dm_j} = \frac{dm_{i,j}}{S_j m_j dt} \quad (\text{II.5})$$

II.3.3 Bilan de population

La conservation de la masse dans les intervalles de taille inférieure à j donne :

$$\frac{dM_i}{dt} = -S_i M_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \geq i}}^{i-1} S_j b_{i,j} M_j(t) \quad (\text{II.6})$$

Le premier terme à droite de l'égalité exprime la perte en masse due à la fragmentation des particules de classe i , alors que le second exprime l'apport en masse dû à la fragmentation des particules des classes supérieures. Le bilan sur les n classes granulométriques est représenté sous forme matricielle par l'équation suivante :

$$\frac{d}{dt}[m(t)] = [(B - I)S][m(t)] \quad (\text{II.7})$$

Avec

$$B = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ b_{2,1} & 0 & & & \mathbf{0} \\ \cdot & \cdot & 0 & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \\ b_{n,1} & \cdot & \cdot & b_{n,n-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

et

$$S = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & S_2 & \cdot & 0 & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & S_{N-1} & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & S_N \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

I est la matrice identité, B la matrice de distribution de broyage, S la matrice de sélectivité et [m (t)] le vecteur exprimant les fractions massiques. Plusieurs auteurs ont cherché à développer des solutions de l'équation de broyage discontinu. La distribution granulométrique d'un produit, pendant une instante t, est obtenue soit par une solution analytique, soit par intégration numérique ou par calcul matriciel, selon le type de formulation utilisé. Nous ne présenterons ici que la solution analytique proposée par Reid (1965) [9]. Cet auteur a développé une solution analytique en supposant que S et b ne varient pas avec le degré de broyage. Cette solution s'écrit comme suit :

$$m_1(t) = m_1(0) \exp(-s_1 t) \quad (\text{II.10})$$

L'équation (II.10) correspond à la fraction de taille la plus grossière, en particulier, la taille initiale des particules.

$$m_2(t) = \frac{b_{2,1} S_1 m_2(0)}{S_2 - S_1} \exp(-S_1 t) + \left[m_2(0) - \frac{b_{2,1} S_1 m_1(0)}{S_2 - S_1} \right] \exp(-S_2 t) \quad (\text{II.11})$$

$$m_i(t) = \sum_{j=1}^i h_{i,j} \exp(-S_j t) \quad (\text{II.12})$$

$$h_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{pour } i < j \\ m_i(0) - \sum_{k=1}^{i-1} h_{i,k} & \text{pour } i = j \\ \frac{1}{S_i - S_j} \sum_{k=j}^{i-1} S_k b_{i,k} h_{k,j} & \text{pour } i > j \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

II.3.4 Détermination des fonctions de sélection et de broyage

L'utilisation des différentes solutions proposées nécessite la connaissance des valeurs des fonctions de sélection et de broyage. Ces valeurs dépendent de la nature du matériau, du type de la contrainte et de son intensité ainsi que des conditions opératoires. Si ces fonctions ont une forme simple, on peut modéliser le processus de broyage. Lorsque le broyage est non linéaire, c'est-à-dire lorsque le processus de réduction de taille varie avec le temps, alors S est fonction du temps et la modélisation devient plus complexe.

La détermination des fonctions de sélection et de broyage nécessite une estimation de la quantité de matière, qui apparaît dans une classe par broyage des classes supérieures et celle qui disparaît par broyage de cette classe après une durée de broyage t.

II.4 Rhéologie des suspensions de matériaux granulaires

La rhéologie d'une suspension est un aspect très important, par lequel, on peut l'évaluer du point de vue stabilité et la facilité de prise au moment de l'emploi [10]. Les rhéogrammes obtenus permettent d'une part de les classer en fonction de leur comportement rhéologique en divers catégories (fluide plastique, pseudo-plastiques, dilatant,.....etc.) et d'autre part de mettre en évidence leurs propriétés telle que la thixotropie.

II.4.1 Contrainte et déformation dans un fluide

Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour certaines distributions des forces mises en jeu [10]. Au cours d'un tel mouvement, le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes (figure II.4).

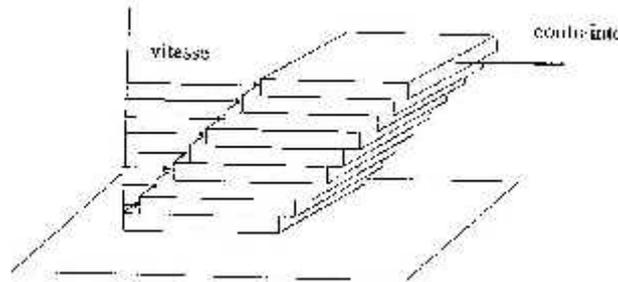


Figure II.4 Principe du cisaillement laminaire

La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre. Les mouvements laminaires de cisaillement sont engendrés à l'aide de rhéomètres. C'est à partir de tels mouvements que peuvent être déterminés les paramètres rhéologiques des fluides.

II.4.2 Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement (notée τ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, elles sont appelées force de cisaillement (figure II.5).

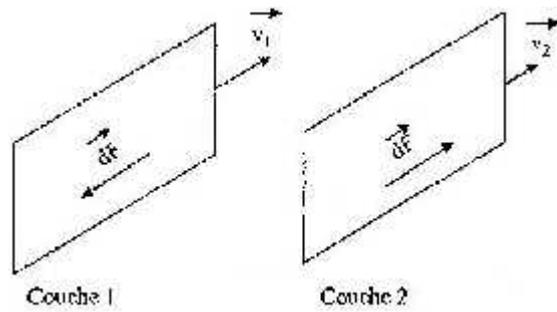


Figure II.5 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines

En supposant que la couche (1) est animée d'une vitesse v_1 supérieure à la vitesse v_2 de la couche (2), la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement dF parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). La couche (2) exerce pour sa part sur la couche (1), une force de cisaillement $-dF$ tendant à la freiner. En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement :

$$\tau = \frac{d}{d} \quad (\text{II.14})$$

représente une force par unité de surface, elle s'exprime en Newton par m ou en Pascal (Pa) et dS est la surface élémentaire de l'entité considérée (m^2).

II.4.3 Vitesse de déformation

La définition de la déformation de cisaillement est représentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile (figure II.6).

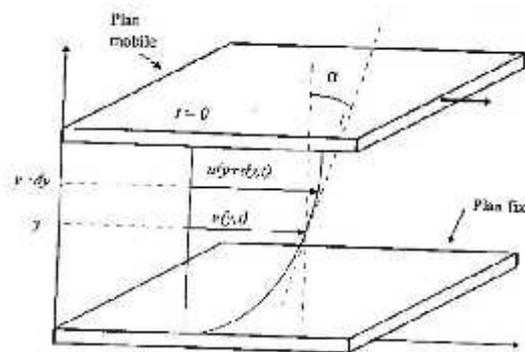


Figure II.6: Mouvement laminaire entre deux plans parallèles.

Pour caractériser la déformation de la tranche de fluide située entre les couches y et $y+dy$, il faut évaluer le déplacement relatif d'une couche par rapport à l'autre. On le définit par :

$$\frac{u(y+dy, t) - u(y, t)}{dy} = \frac{du}{dy}(y, t) = \tan(\alpha) \quad (\text{II.15})$$

Le déplacement relatif, qui caractérise la déformation de la couche d'épaisseur dy est appelé cisaillement et notée- γ . La déformation de cisaillement () est donc définie par l'équation:

$$\gamma = \frac{u(y,t)}{dy} \quad (\text{II.16})$$

Cette grandeur est sans dimension, elle ne dépend pas du déplacement lui-même $u(y,t)$ mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment voisine. La dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement donne l'expression de la vitesse de cisaillement () :

$$\dot{\gamma} = \frac{d}{dt} \gamma = \frac{d}{dt} \left(\frac{u}{dy} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (\text{II.17})$$

II.4. 4. Viscosité et fluide non-Newtonien :

- **Viscosité**

La viscosité d'un liquide est sa résistance à l'écoulement, c'est à dire le glissement relatif de ces différentes couches [11], plus elle est élevée, plus l'écoulement est lent, et elle est plus faible lorsque la température augmente. La viscosité d'un fluide peut être considérablement affecté par les facteurs suivants : température, pression, taux et durée de cisaillement [12]. Elle caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler. Sa connaissance est fondamentale dans de nombreux domaines : en métrologie des fluides, dans l'emploi des peintures, dans la compréhension des phénomènes de lubrification, dans le transport des fluides, dans l'agro-alimentaire et le pharmaceutique, etc.

- **Fluides Newtoniens**

Ces fluides sont caractérisés par une relation proportionnelle entre la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$. Cette relation s'écrit :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{II-18})$$

μ : viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

- **Fluides non-Newtoniens**

Par analogie avec les fluides newtoniens, on introduit pour les fluides non newtoniens, la notion de la viscosité apparente μ_a comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ correspondante, où μ_a est une fonction de la température T et de

la pression P extérieures, mais aussi de la contrainte de cisaillement τ , ou encore, selon un point de vue tout à fait équivalent, de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{II.19})$$

Les raisons du caractère non-newtonien d'un fluide sont liées à la taille des particules, leur concentration dans la phase continue, leur forme, leur nature et leur aptitude à la déformation ou bien la réactivité physico-chimique de la phase continue notamment dans le cas des suspensions colloïdales.

II.5 Classification des fluides réels en fonction de leur comportement rhéologique :

L'état des fluides est caractérisé par deux principaux types de comportement rhéologique suivant la nature des paramètres qui influent sur l'aspect de la courbe d'écoulement :

- Les fluides « indépendants du temps ».
- Les fluides « dépendants du temps ».

La partie ci-après sera consacrée uniquement aux fluides indépendants du temps

II.5.1 Fluides indépendants du temps

Ce sont les fluides pour lesquels il existe une relation entre la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$. Leur comportement rhéologique est indépendant de la durée d'application de la contrainte. Leur équation générale s'écrit :

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad (\text{II-20})$$

Cette catégorie de fluides comprend les fluides newtoniens et non-newtoniens.

-Pour les fluides newtoniens, la viscosité dynamique μ_a est indépendante de la vitesse de cisaillement. Elle ne dépend que de la température, de la pression et de la nature du fluide [13], tels que l'eau, les liquides organiques légers, les solutions aqueuses dont le soluté a une masse moléculaire faible et les suspensions de particules solides à faibles concentrations.

-Pour les fluides non newtoniens, on distingue ceux avec et sans contrainte seuil.

II.5.1.1 Fluides sans contrainte seuil

Ils sont représentés en termes de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (figure II.7).

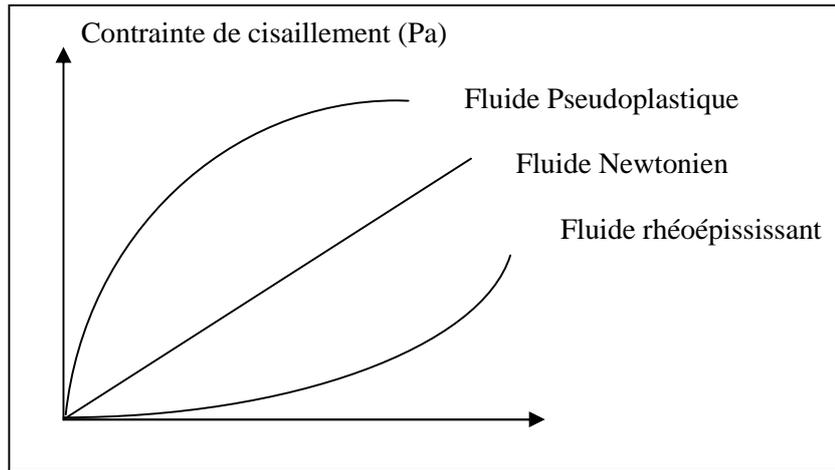


Figure II-7 : Rhéogramme des fluides sans contrainte seuil.

Ostwald (1925) a proposé pour représenter les courbes d'écoulement des fluides pseudo-plastiques la relation dite loi d'Ostwald De Waele :

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{II-21})$$

n : est un exposant à déterminer mais toujours inférieur à 1 et qui traduit l'écart avec le comportement newtonien pour le quel $n = 1$

K : indice de consistance à déterminer également.

Parmi les fluides présentant un comportement pseudo-plastique, on peut citer : les ciments, les colles, les pâtes à papier, le savon, les suspensions de détergents, les solutions de hauts polymères et certaines peintures. La viscosité apparente de tels fluides diminue progressivement lorsque la vitesse de cisaillement augmente (figure II-8a).

L'explication du comportement pseudo-plastique dans le cas d'un polymère à longues chaînes (gélatine et dérivés de la cellulose par exemple) peut être celle-ci : au repos ou pour de faibles contraintes, les chaînes moléculaires sont disposées au hasard et enchevêtrées. Quand le cisaillement augmente, les chaînes s'alignent et se dispersent dans le sens de la force, d'où une diminution de la viscosité apparente.

Les fluides dilatants ou rhéoépississant obéissent également à la loi d'Ostwald mais avec $n > 1$, autrement dit la viscosité apparente μ_a croît avec la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ (figure II-8b)

Ce type de comportement a été initialement mis en évidence sur des suspensions de forte teneur en solide. Au repos, le volume libre entre les particules est minimal ; il est occupé par le liquide suspendant qui enrobe chaque particule d'une fine pellicule qui joue le rôle de lubrifiant. Au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement augmente, le liquide est

insuffisant pour combler tout le volume interstitiel. Les tensions de cisaillement provoquent peu à peu la rupture de ces films, et aux frottements solide-liquide initiaux, se substituent alors des frottements solide-solide qui entraînent une augmentation de la viscosité apparente de la suspension.

Exemples de fluides dilatants : des dispersions très concentrées, des solutions d'amidon ou certains polymères dits PVC (polychlorure de Vinyle).

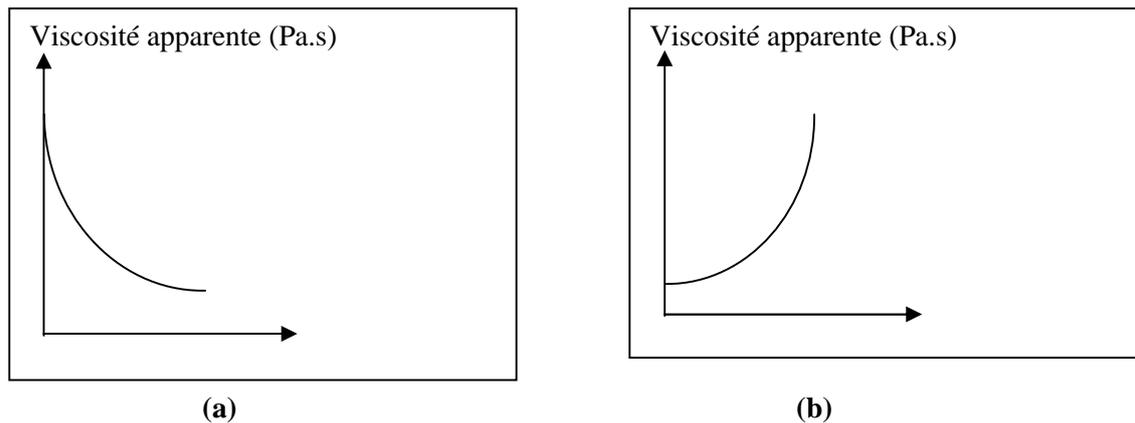


Figure (II-8) : Viscosité des fluides pseudo-plastique et dilatant

II.5.1.2 Fluides à contrainte seuil

En général, les fluides à contrainte seuil (fluides plastiques) sont caractérisés par des courbes d'écoulements appelées rhéogrammes (figure II.9). Leur comportement rhéologique diffère essentiellement de celui des fluides pseudo-plastiques par la présence d'une contrainte seuil d'écoulement. Il est possible d'expliquer qualitativement le comportement d'un corps plastique, en supposant que ce dernier présente au repos une structure tridimensionnelle rigide, susceptible de résister à des contraintes inférieures à la contrainte seuil τ_0 . Dès que l'on dépasse cette contrainte, la structure se détruit et le comportement du fluide devient newtonien sous l'effet de la contrainte efficace $\tau - \tau_0$. Si de nouveau la contrainte appliquée devient inférieure à la contrainte seuil τ_0 , la structure initiale se reforme en un temps suffisamment court qui peut être négligeable.

De nombreux fluides présentent ce comportement plastique comme certaines suspensions de particules solides comme les boues, les ciments frais, les encres d'imprimerie etc...[11, 12]

Plusieurs lois rhéologiques sont utilisées pour décrire le comportement des fluides plastiques :

- La loi de Bingham:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} & > 0 \\ \dot{\gamma} = 0 & < 0 \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

avec τ_0 : contrainte seuil (Pa).
 μ_p : viscosité plastique (Pa.s).

- La loi de Casson:

$$\begin{cases} \tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \mu_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} & > 0 \\ \dot{\gamma} = 0 & < 0 \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

- La loi de Casson généralisée:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n + \mu \dot{\gamma} & > 0 \\ \dot{\gamma} = 0 & < 0 \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

- La loi d'Herschel-Bulkley:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n & > 0 \\ \dot{\gamma} = 0 & < 0 \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

avec K : indice de consistance.
 n : indice de comportement.

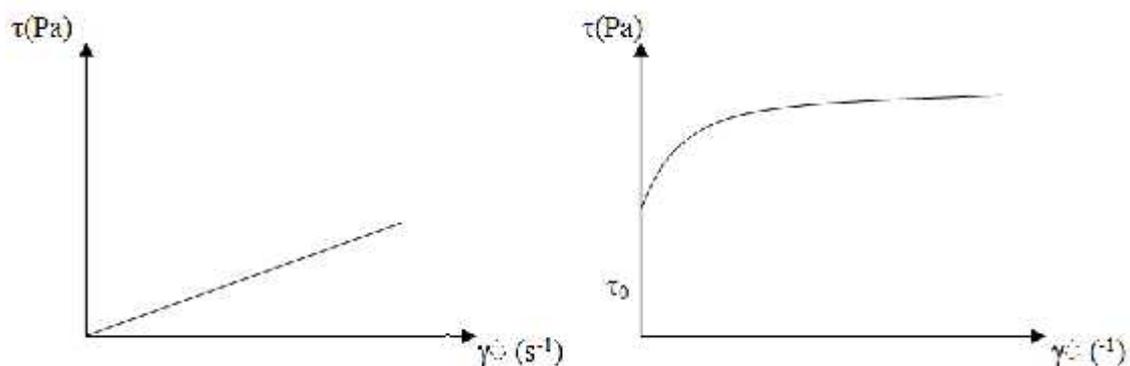


Figure (II.9) : Rhéogrammes d'un fluide de Bingham et de Casson

II.6. Facteurs affectant la rhéologie d'une suspension

- **Forme et taille des particules**

La forme de la particule peut affecter le taux de sédimentation. Elle peut aussi affecter la viscosité de la suspension. Si les particules ne sont pas sphériques la viscosité de la suspension devient plus importante [14]. La fraction du volume maximal de la phase dispersée, diminue quand les particules deviennent de plus en plus de forme irrégulière.

Dans les dispersions diluées, la viscosité est indépendante de la taille des particules. Cependant, dans les suspensions concentrées, l'effet de la taille des particules sur la viscosité dépend du rapport des forces hydrodynamiques et Browniens. Une augmentation dans la taille des particules engendre l'augmentation de l'épaississement de la suspension :

Dans les dispersions, les plus petites particules s'agrègent plus rapidement que les plus grandes particules.

- **Distribution de taille**

La distribution de la taille des particules peut jouer aussi un rôle important dans la détermination de la viscosité de la dispersion. Une suspension avec une large distribution de la taille des particules est moins visqueuse que celle qui a une distribution de la taille des particules étroite.

II.6.1 Ecoulement d'une suspension dans une conduite

Dans ce cas les écoulements de fluides biphasiques, pour des conduites circulaires de rayon R et de longueur L , la perte de pression par frottement P s'exprime par la formule de Darcy-Weissbach:

$$P = f \frac{L \rho u^2}{D} \quad (\text{II.26})$$

Le coefficient de perte de pression par frottement f , dépend de la rugosité de la paroi, de la loi de comportement rhéologique et du régime d'écoulement du fluide.

Contrairement au comportement monotone de la courbe de perte de pression en fonction de la vitesse d'un écoulement laminaire simple phase; celle d'une suspension présente un comportement plus complexe en raison des nombreux paramètres intervenant sur le coefficient de pertes de pression par frottement; la vitesse d'écoulement, la taille des particules, leurs concentrations et par conséquent la loi d'écoulement c'est-à-dire leurs propriétés rhéologiques. Les régimes d'écoulement identifiés sont représentés en figure (II.10).

Dans le cas où les particules sont plus lourdes que la phase porteuse, elles sont soumises à deux forces qui s'équilibrent; la gravité qui entraîne leur sédimentation et les forces de portances et de traînée qui, à l'inverse, tendent à homogénéiser l'écoulement. Plus la vitesse est élevée, plus les particules sont maintenues en suspensions, l'écoulement est alors homogène. Lorsque la vitesse décroît, les particules solides tendent à sédimenter et à s'accumuler en zone basse de la canalisation; l'écoulement devient hétérogène. Puis à des vitesses encore plus faibles, un lit mouvant de particules se forme sur le fond. Mais les particules déposées réduisent la section de passage et par conservation du débit la vitesse augmente. En dessous de la vitesse de dépôt, le lit formé devient stationnaire car les forces d'entraînement agissant sur le lit sont inférieures aux forces de gravité s'opposant au mouvement du lit. Les valeurs des vitesses séparant les différents régimes d'écoulement dépendent évidemment de la taille et de la concentration des particules.

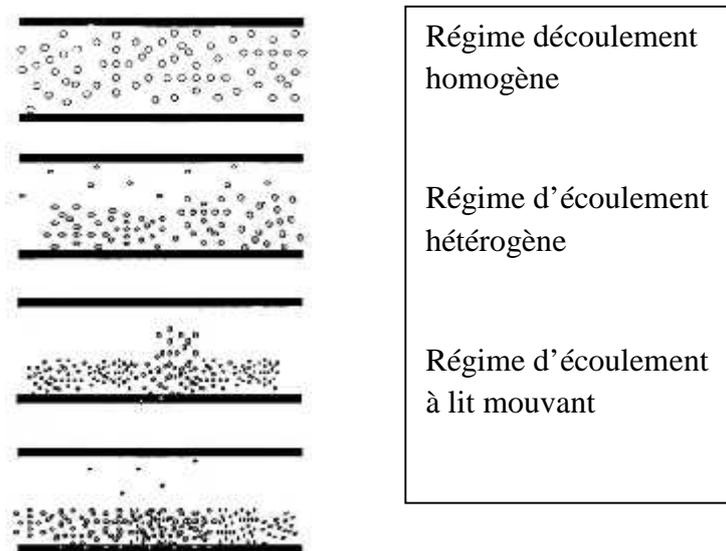


Figure II.10 : Régimes d'écoulement d'une suspension dans une conduite [15]

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats expérimentaux et leurs interprétations.

IV.1. Cinétique de broyage des matières premières

En utilisant l'approche cinétique du bilan de population décrit au paragraphe (II.3.3) du chapitre II, le bilan de matière sur la classe de taille mère des particules est exprimé par l'équation (II.10), que nous rappelons ci-dessous :

$$m_1(t) = m_1(0) \exp(-s_1 t)$$

La représentation de la fraction massique de la taille initiale des particules, en fonction du temps (figures IV.1-IV.3) pour l'argile, le calcaire et le minerai de fer montre que la vitesse de disparition de la classe de taille mère des particules, admet effectivement une cinétique d'ordre 1.

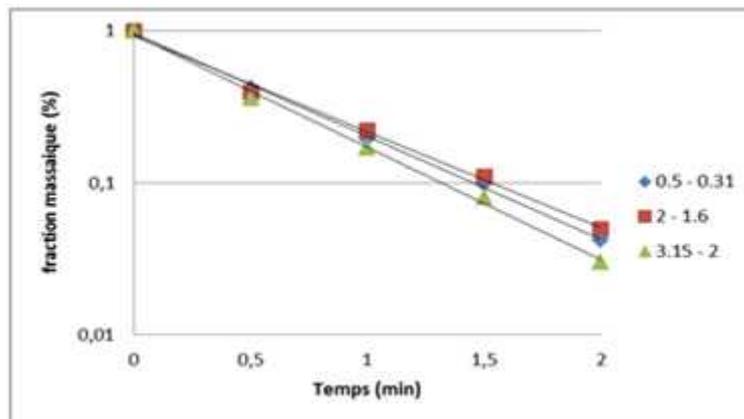


Figure IV.1. Cinétique de broyage d'ordre 1 d'argile

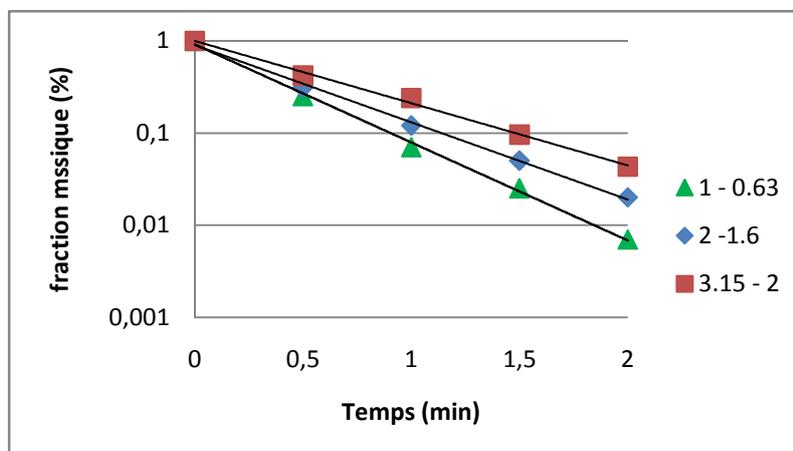


Figure IV.2. Cinétique de broyage d'ordre 1 de calcaire

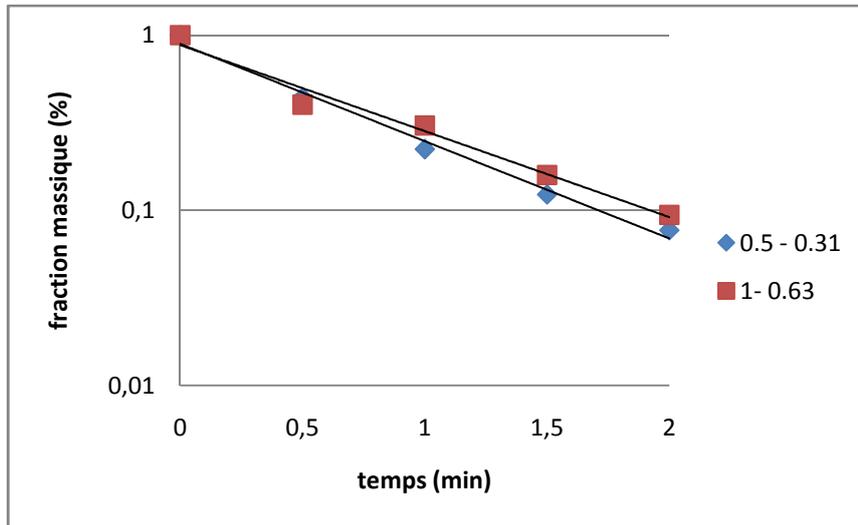


Figure IV.3. Cinétique de broyage d'ordre 1 de minerai de fer

Les courbes permettent de déterminer la vitesse initiale de broyage s_i (fonction spécifique de sélection) pour les différentes classes de tailles de particules. De même, on constate que cette vitesse initiale de broyage dépend fortement de la taille des particules et de la nature du matériau, par conséquent de sa broyabilité. A titre d'exemple pour le calcaire, elle est plus importante en présence des particules de taille (1-0.63mm), elle atteint la valeur de 2.4 min^{-1} . Par contre, pour l'argile elle avoisine une importante valeur de 2.1 min^{-1} pour la classe de taille (3.15-2mm). Ainsi, la dépense spécifique d'énergie pendant les premiers instants du processus de fragmentation peut être diminuée en choisissant une importante vitesse initiale de broyage.

IV.2. Comportement rhéologique de suspensions des matières premières

Les rhéogrammes des différentes suspensions de matières premières étudiées sont représentées en figures ci-après. Ils sont donnés en termes de contrainte de cisaillement et viscosité apparente, en fonction de la vitesse de cisaillement. Rappelons que la nature et la composition volumique des suspensions sont données au tableau III.2 du chapitre III précédent.

- **Suspension d'argile**

La figure IV.4 représente la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente de la suspension d'argile à différentes teneurs d'eau. Quelque soit la teneur d'eau la suspension peut être représenté par un comportement d'un fluide de Bingham à contrainte seuil. De plus, la contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur d'eau. Ceci peut être due à la propriété de l'argile de se gonfler en présence d'eau ce qui provoque une agrégation

des particules. D'autre part, la figure présente une diminution progressive de la viscosité apparente lorsque la vitesse de cisaillement augmente à différentes teneurs d'eau.

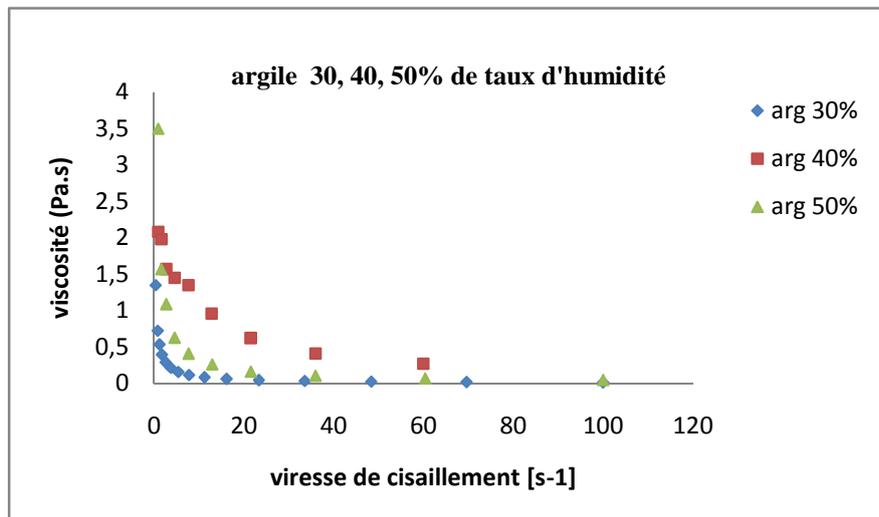
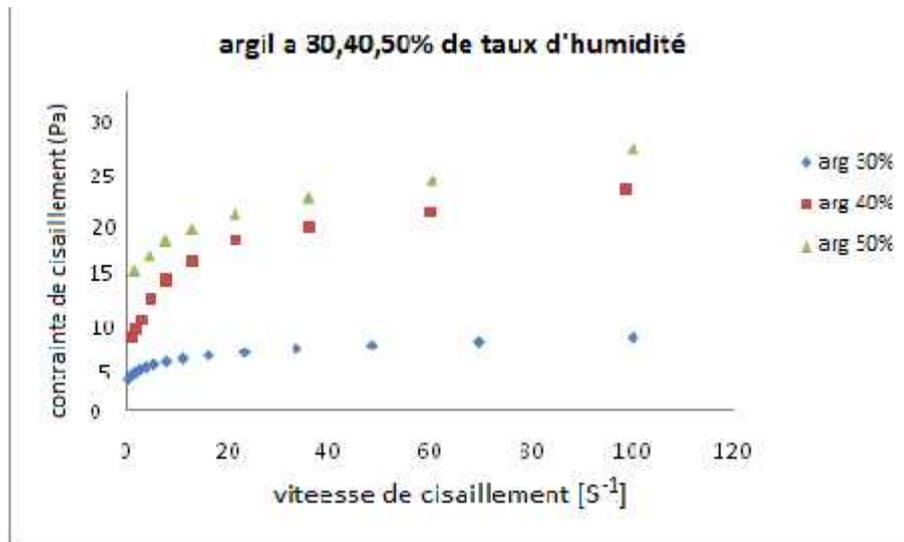


Figure IV.4: Contrainte de cisaillement et viscosité apparente de la suspension d'argile

- **Suspension de calcaire**

La figure IV. 5 montre que le comportement rhéologique des suspensions de calcaire pour les trois teneurs d'eau peut être approché par un comportement rhéofluidifiant. De plus, contrairement à l'argile, la contrainte de cisaillement augmente avec la diminution de la teneur d'eau. Par ailleurs, la pseudoplasticité est nettement mise en évidence dans la figure représentant la viscosité apparente, la chute brutale de la viscosité constatée aux faibles taux de cisaillement est une caractéristique du phénomène de rhéofluidification de ces suspensions.

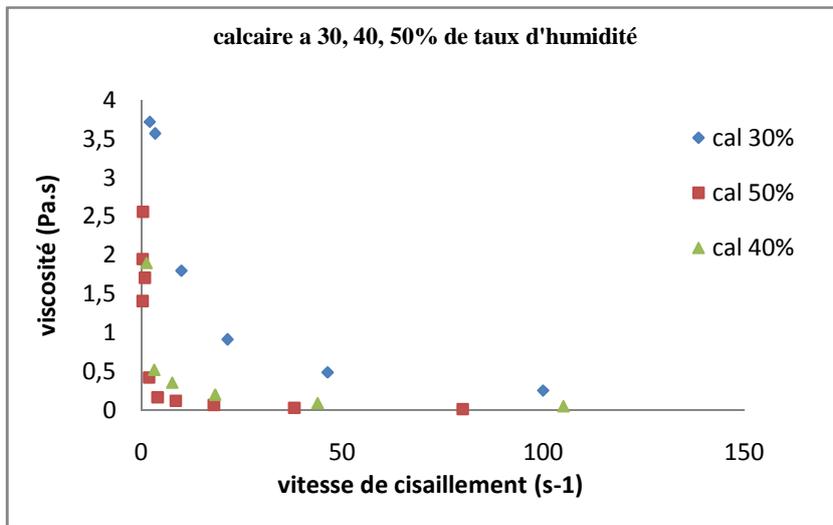
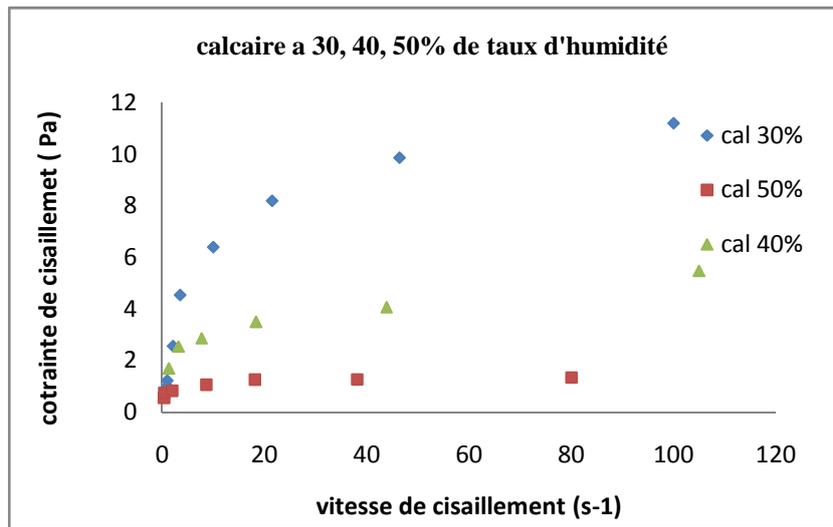
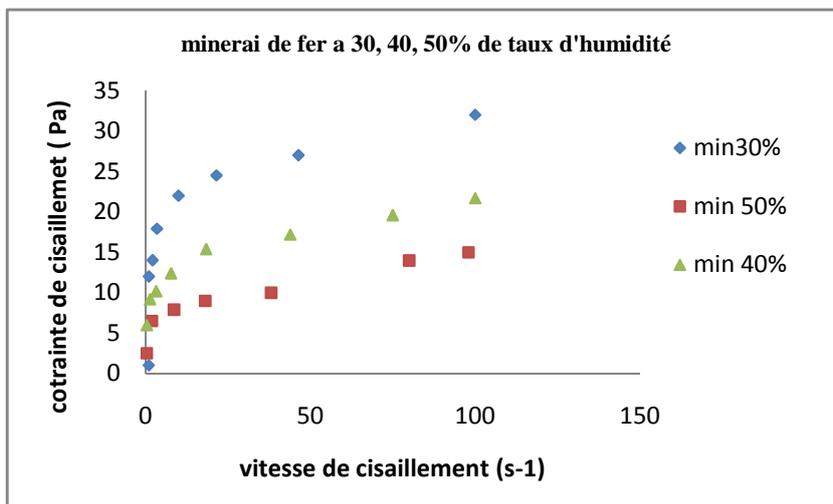


Figure IV.5 Contrainte de cisaillement et viscosité apparente de la suspension de calcaire

▪ **Suspension de Minerai de fer**

Le comportement rhéologique de la suspension du minerai de fer représenté en figure IV.6 est le même que celui du calcaire à différents teneurs d'eau. Toutefois, à vitesse de cisaillement constante la différence entre les valeurs des contraintes est moins prononcée que celle du calcaire.



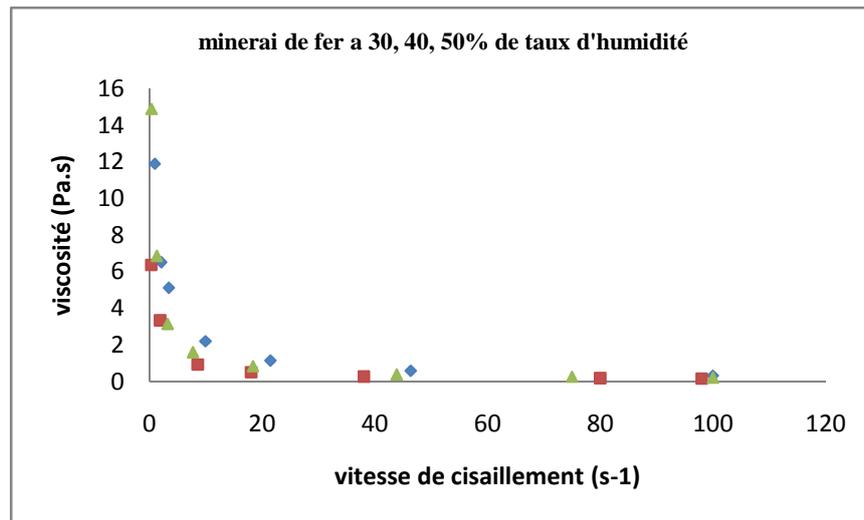
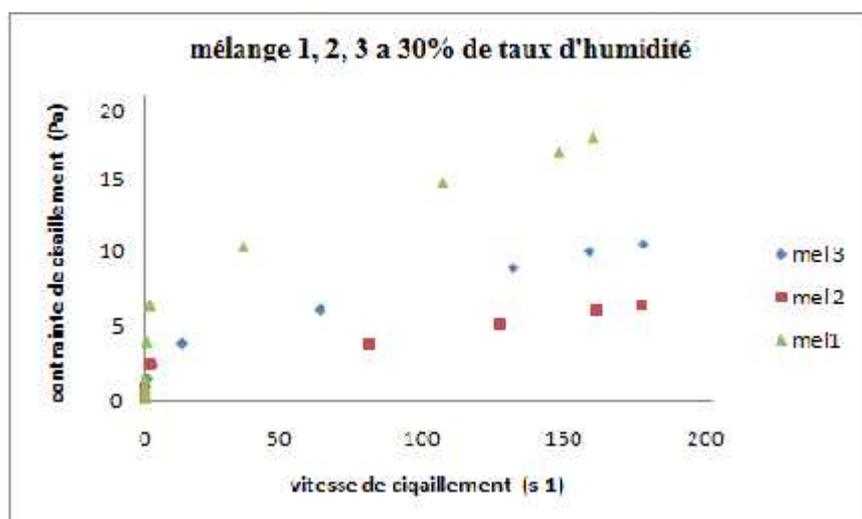


Figure IV.6 Contrainte de cisaillement et viscosité apparente de la suspension du M.Fer

▪ Suspension de mélange de matières premières

Les rhéogrammes des suspensions de mélanges de matières premières m_1 (56% Calcaire + 14% Argile), m_2 (53% Calcaire + 14% Argile + 3% Sable) et m_3 (52% Calcaire + 14% Argile + 2% Sable + 2% Minerai fer) additionnées à 30% en volume d'eau sont représentées en figure IV.7 ci-après. On constate que le comportement rhéofluidifiant est observé pour les différentes suspensions. L'ajout de l'argile, du minerai de fer ainsi que le sable ne modifie pas le comportement rhéologique du constituant principal (calcaire). Par contre, cette incorporation de matériaux secondaires entraîne une augmentation de la contrainte de cisaillement et une diminution de la viscosité apparente.



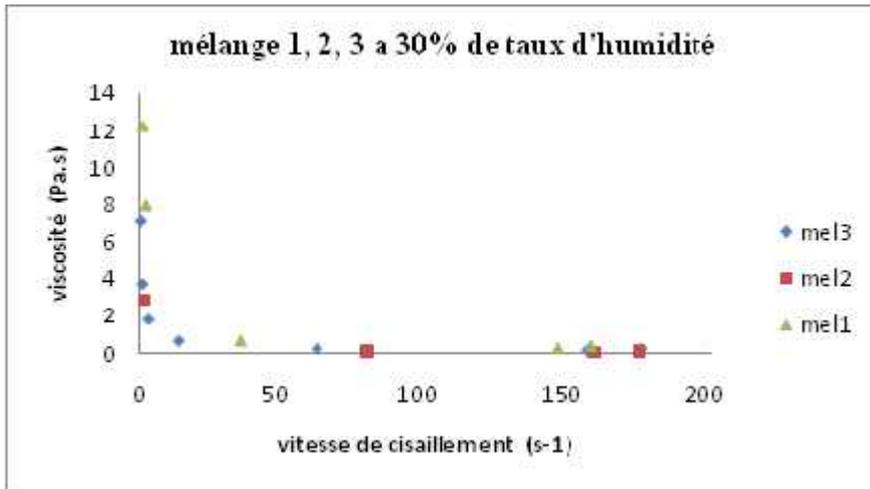


Figure IV.7 Contrainte de cisaillement et viscosité apparente de la suspension du mélange de matières premières

IV.3. Influence de la vitesse initiale de broyage sur la contrainte de cisaillement de la suspension du calcaire

La figure IV.8 représente la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation de deux suspensions à 50% d'eau constituées du produit passant le tamis 200 μ m de broyage des classes granulométriques (1-0.63mm) et (3.15-2mm) du calcaire. On constate que ces suspensions se comportent comme un fluide rhéofluidifiant, à contrainte seuil. En outre, cette contrainte est très basse pour la classe (1-0.63mm). En se référant à la cinétique de broyage interprétée au paragraphe IV.1, on constate que cette classe de taille de particules possède la plus importante vitesse initiale de broyage, ce qui nous conduit à dire que plus la vitesse initiale de broyage est importante, plus la contrainte seuil de cisaillement est faible. Ce résultat peut être interprété par le fait que l'augmentation de la vitesse initiale de broyage des particules, peut générer une quantité importante de fines particules qui peuvent conduire à une meilleure fluidité de la suspension.

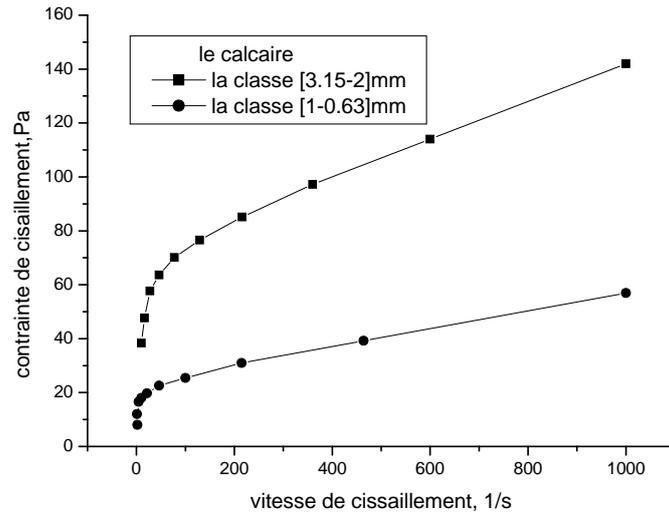


Figure IV.8. Contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation de la suspension du calcaire

Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons le matériel utilisé ainsi que le protocole expérimental suivi pour la préparation des échantillons, leurs analyses granulométriques et rhéologiques. Les matériaux utilisés lors de cette étude sont fournis par la cimenterie de Meftah.

III.1. Matériel utilisé

III.1.1 Dispositif de broyage

Le broyeur utilisé dans les expériences est une cuve cylindrique en céramique de volume de 4,84 Litres (17,15 cm de diamètre et de 21 cm de longueur) (figure III.1). Le broyeur est chargé de 1,37 kg de boulets en céramique de diamètre 25 mm qui correspondent à 20 % du volume totale du broyeur. La cuve est mise en rotation à une vitesse de 70tr/mn qui représente environ 70% de sa vitesse critique (vitesse pour laquelle les boulets sont entraînés par la paroi et ne retombent plus sur la charge du matériau). Le broyeur est chargé en matière première sélectionnée pour un taux de charge (volume des vides entre boulets) égal à 100%. Les conditions de broyage utilisées sont résumées au tableau III.1.



Figure III.1 : Dispositif expérimental de broyage

Tableau III.1 : Conditions de broyage utilisées

| | | | |
|--|---|----------|-----------|
| broyeur | Diamètre interne (cm) | | 17,15 |
| | Longueur (cm) | | 21 |
| | Volume (cm ³) | | 4848 |
| Vitesse de rotation | Vitesse critique N_c (révolution / min) ^(a) | | 102 |
| | Vitesse opérationnelle N (révolution / min) | | 70tr /mn |
| boulets | Qualité | | céramique |
| | densité (g/cm ³) | | 2,36 |
| | Diamètre cm | | 2,5 |
| | Masse de boulet (g) | | 19,3 |
| | Nombre de boulets | | 71 |
| | Porosité de lit de boulets (%) | | 40 |
| | Volume de broyeur occupé par les boulets J (%) ^(b) | | 20 |
| matériaux | Densité (g/cm ³) | Calcaire | 2,7 |
| | | Argile | 2,2 |
| | Masse de matière (g) | Calcaire | 615 |
| | | Argile | 500 |
| | Porosité de la charge de matière(%) | | 40 |
| | Volume de broyeur occupé par la matière f_c (%) ^(c) | | 08 |
| | Vide entre boulets occupé par la matière U (%) ^(d) | | 100 |
| <p>(a) $N_c = 42,3/\sqrt{D}$ (D en mètre)</p> <p>(b) $J = \frac{\text{masse des boulets/densité de boulet}}{\text{volume de broyeur}} * \frac{1}{0,6}$</p> <p>(c) $f_c = \frac{\text{masse de matière/densité de matière}}{\text{volume de broyeur}} * \frac{1}{0,6}$</p> <p>(d) $U = \frac{f_c}{0,4 J}$</p> | | | |

III.1.2 Tamisage

La répartition granulométrique d'un produit peut être obtenue par tamisage. Il convient à cet effet de sélectionner un échantillon parfaitement caractéristique du produit à tester. Le tamisage permet le groupement en classes, indépendamment de la densité et de l'état de surface des particules, en fonction de la dimension des vides des tamis. Les grains passent à travers la toile d'un tamis si deux de leurs dimensions au moins sont inférieures aux dimensions des vides de ce tamis. Les tamis usuels de contrôle, dont le diamètre est fréquemment de 200 μm , permettent d'effectuer les tamisages dans une gamme de dimensions allant de quelques millimètres jusqu'à environ 40 microns. Le tamisage à sec des matières premières brutes (calcaire, argile et minerai de fer) est effectué sur une colonne de tamis (figure III.2). La quantité et le temps de tamisage requis pour les tests varient en fonction de la taille supérieure des particules, tout en évitant l'abrasion du produit. Six différentes classes granulométriques, entre 3 et 0,315 mm sont sélectionnées. Les classes granulométriques choisies sont [3,15-2], [2-1,6], [1,6-1], [1-0,63], [0,63-0,5] et [0,5-0,31]mm.



Figure III.2: Tamiseuse de laboratoire

III.1.3 Rhéomètre

Le comportement rhéologique des matériaux est mesuré à l'aide d'un rhéomètre, en imposant à l'échantillon un couple, une vitesse ou un déplacement. Différents rhéomètres, tels qu'à plateaux parallèles, à cône-plan, à cylindres coaxiaux ou à géométrie Vane peuvent effectuer cette mesure. Notre étude rhéologique utilise un rhéomètre rotatif de Couette de type Physiqua MC1+ (figure III.3), relié à un ordinateur et permettant le traitement et l'analyse des résultats au moyen d'un logiciel Rholve US 200. Le rhéomètre est doté d'une géométrie cône-plan qui est plus adaptée pour la rhéologie des pâtes à ciment, car elle permet d'appliquer une déformation en cisaillement homogène au sein de la suspension.



Figure III.3. Rhéomètre rotatif de Couette

III.2. Protocole expérimental

III.2.1. Détermination de la cinétique de broyage

Le broyeur en position verticale est rempli de charge de boulets, la masse nécessaire de matière première (calcaire ou argile ; minéral de fer) appartenant à l'une des classes granulométriques précédentes est alors introduite dans le broyeur, la cuve est ensuite fermée et mise en rotation. A des intervalles de temps de 0,5, 1, 1.5 et 2 min, le broyeur est arrêté pour permettre la récupération de la charge des boulets et de matière. Les boulets sont alors nettoyés un par un et remis dans le broyeur, par contre la masse récupérée de la matière broyée est tamisée pour l'analyse granulométrique.

III.2.2. Mesures rhéologiques des suspensions

III 2.2.1 Préparation des échantillons de matières premières

Après l'achèvement de l'étape de broyage décrite ci-dessus, la charge de la matière récupérée est réintroduite à nouveau dans le broyeur pour être finement broyée. Après une durée de 10 minutes de broyage, le broyeur est arrêté et le produit est récupéré. La quantité de matière passant le tamis 200 μ m est sélectionnée et prise comme échantillon pour la suite des expériences. Le passant 200 μ m est choisie comme une finesse désirée de la matière première.

III 2.2.2 Rhéologie des suspensions

Plusieurs suspensions composées d'eau et de matière première fine (passant 200 μ m) sont préparées pour les expériences de rhéologie. Le tableau III.2 donne la nature et la composition en volume de ces suspensions. Pour tous les essais, la température est maintenue constante à

20°C. La composition des suspensions 11, 12 et 13 est choisie pour correspondre à une pate crue industriel à ciment.

Tableau III.2 : Nature et composition des suspensions

| Susp1 | Susp 2 | Susp 3 | Susp 4 | Susp 5 | Susp 6 | Susp7 | Susp8 | Susp 9 |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
| 70% Calcaire + 30%eau | 60% Calcaire + 40%eau | 50% Calcaire + 50%eau | 70% Argile + 30%eau | 60% Argile + 40%eau | 50% Argile + 50%eau | 70% M.Fer + 30%eau | 60% M.Fer + 40%eau | 50% M.Fer + 50%eau |
| Susp10 | | | Susp11 | | | Susp12 | | |
| 56% Calcaire + 14% Argile + 30%eau | | | 53% Calcaire +14% Argile + 3% Sable + 30%eau | | | 52% Calcaire + 14% Argile + 2% Sable + 2% Minerai fer + 30%eau | | |