

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA  
BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY**



**جامعة باجي مختار عنابة**

Faculté des Sciences de la Terre

Département des Mines

## **T H E S E**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Mines

Option : Valorisation des Ressources Minérales

**OPTIMISATION ET SIMULATION DES PARAMETRES DU  
PROCEDE DE FILTRATION. CAS ARCELOR MITTAL STEEL.**

Par  
**BENOUIS BORNIA**

Soutenue le :

Devant le jury :

|                                |       |                                   |
|--------------------------------|-------|-----------------------------------|
| Président : BOUNOUALA Mohamed  | Pr    | Université Badji Mokhtar - Annaba |
| Rapporteur : HAFSAOUI Abdellah | Pr    | Université Badji Mokhtar - Annaba |
| Examineur : BEZZI Nacer        | Pr    | Université A. Mira - Bejaia       |
| Examineur : IDRES Abdelaziz    | Pr    | Université Badji Mokhtar - Annaba |
| Examinatrice : BARKA Fatiha    | M.C.A | Université A. Mira - Bejaia       |
| Examineur: OULD HAMOU Malek    | M.C.A | ENP EL Harrach – Alger            |

Année Académique: 2018 / 2019

*À la mémoire de  
Mes Parents adorés,  
Je  
dédie  
Ce travail car  
Je leur dois  
Tout ce que  
Je suis.*

# Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu **Monsieur le Professeur Abdallah Hafsaoui**, de l'université Badji Mokhtar, Faculté des sciences de la terre, Département des Mines Je le remercie particulièrement pour le temps qu'il a consacré à la relecture attentive et critique du manuscrit et j'exprime ici toute ma reconnaissance pour la confiance qu'il m'a allouée pendant toutes ces années.

Je tiens également à exprimer mes sincères reconnaissances au jury de soutenance de ma thèse de doctorat en Sciences qui ont accepté d'évaluer ce travail. Qu'ils soient remerciés pour le temps consacré à cette tâche :

- au **Professeur Bounouala Mohamed**, Président de jury de l'Université Badji Mokhtar – Annaba ;
- au **Professeur Bezzi Nacer** membre Examineur de l'Université A. Mira de Bejaia ;
- au **Professeur Idres Abdelaziz** membre Examineur de l'Université Badji Mokhtar – Annaba ;
- au **Dr Barka Fatiha** Maître de conférences, membre examinatrice de l'Université A. Mira de Bejaia ;
- au **Dr Ould Hamou Malek** Maître de conférences, membre examinateur de l'E.N.P Alger.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Monsieur Aoul Elias Hadjaj**, Professeur à l'université Badji Mokhtar, Faculté des sciences de L'ingénieur, Département d'Électromécanique pour l'intérêt marqué qu'il a porté à ce travail, dès son commencement. Son soutien, tant moral que scientifique, m'a profondément touché. Qu'il soit remercié pour ses encouragements et son esprit critique constructif.

Je remercie **Monsieur Saidani Messaoud**, Professeur à l'Université de Coventry, Angleterre, pour son soutien permanent et sans faille qui m'a permis de réaliser ce travail de thèse dans les meilleures conditions. En outre, je lui sais gré d'avoir mis à ma disposition divers équipements de son laboratoire.

*Je tiens également à remercier chaleureusement ma chère collègue et amie **Mme Hafida Boutefnouchet**, Maitre de conférences au Département des Mines de l'Université Badji Mokhtar – Annaba pour son support morale et ses intarissables encouragements qui ont permis à ce travail de voir le jour.*

*Les mots me manquent pour exprimer toute ma gratitude et mon éternelle reconnaissance à mon amie **Mme Amina Atek née Roumane**.*

*Enfin, je remercie chaleureusement **les membres de ma famille** pour leur aide et leur soutien moral qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus grande reconnaissance et affection et qu'il me soit permis de remercier vivement toute personne qui a participé de près ou de loin, à leur contribution et leur aide pour mener à bien ce travail de longue haleine.*

## الملخص

كان الهدف من عمل هذه الأطروحة هو دراسة تأثيرات البارامترات المختلفة مثل حجم الجسيمات وتركيزات المواد الصلبة والضغط المطبق على المقاومة المحددة الظاهرة والرطوبة النهائية للكعكات التي تم الحصول عليها خلال عملية الترشيح

النتائج التي تم الحصول عليها من اختبار الترشيح تشير إلى أن حجم الجسيمات كان عاملاً هاماً جداً في هذه العملية. يؤدي وجود الجسيمات الدقيقة في تعليق العلف إلى كعكة تحتوي على عدد كبير من المسام الصغيرة التي تميل إلى احتجاز الماء في الكعكة. لذلك ، تم الحصول على كعكة من محتوى الرطوبة عالية وقوة محددة عالية.

ومع زيادة تركيزات المواد الصلبة في الملاط ، انخفض محتوى الرطوبة والمقاومة المحددة ، ومع ذلك ، عند تركيز المواد الصلبة المرتفعة ، اتجهت الرطوبة إلى الاستقرار وازدادت المقاومة المحددة الواضحة. للوصول إلى أدنى قيمة ثابتة.

تم إجراء اختبار نزع المياه الميكانيكية باستخدام أربع عينات مصنوعة من أربع توزيعات بحجم الجسيمات حيث يختلف حجم وشكل الجسيمات في نطاق واسع عن تلك المستخدمة في اختبارات الترشيح في هذه الحالة، تم فحص تأثير جسيمات متناهية الصغر على عملية نزع الماء الميكانيكية. وقد وجد أنه تم الحصول على كعكة من الرطوبة العالية عند زيادة نسبة الجسيمات الدقيقة في تعليق العلف.

**كلمات المفاتيح:** المقاومة المحددة ; حجام الجسيمات ; الرطوبة النهائية ; الكعكة ; قوة محددة عالية.

# *Résumé*

L'objectif du travail de cette thèse était d'étudier les effets de différents paramètres tels que la dimension des particules, la concentration en solides et la pression appliquée sur la résistance spécifique apparente et l'humidité finale des gâteaux obtenu lors du processus de filtration.

Les résultats obtenus à partir du test de filtration ont indiqués que la taille des particules était un facteur très important dans le processus. La présence de particules fines dans la suspension d'alimentation conduit à un gâteau contenant un grand nombre de petits pores qui ont tendance à piéger l'eau dans le gâteau. Par conséquent, un gâteau de haute teneur en humidité et de résistance spécifique élevée a été obtenu.

Au fur et à mesure que la concentration des solides dans la suspension augmente, la teneur en humidité et la résistance spécifique diminuaient, par contre à une faible concentration en solides, l'humidité avait tendance à se stabiliser et la résistance spécifique apparente tend à atteindre une valeur minimale constante.

Le test de déshydratation mécanique a été effectué en utilisant quatre échantillons réalisés à partir de quatre distributions granulométriques où la dimension et forme des particules varient selon un large intervalle que ceux utilisés dans les essais de filtration.

Dans ce cas, l'effet des particules ultrafines sur le processus de déshydratation mécanique a été examiné. On a constaté qu'un gâteau d'une humidité élevée a été obtenu lorsque le pourcentage de fines particules a été augmenté dans la suspension d'alimentation.

**Keywords:** Resistance specific ; Pression de filtration; Distribution granulométrique des particules; Gâteaux de filtration; Humidité finale; Débit de filtration.

# *Abstract*

The objective of the work of this thesis was to study the effects of different parameters such as particle size, solids concentration and applied pressure on the apparent specific resistance and the final moisture of the cakes obtained during the filtration process. .

The results obtained from the filtration test indicated that particle size was a very important factor in the process. The presence of fine particles in the feed suspension leads to a cake containing a large number of small pores which tend to trap water in the cake. Therefore, a cake of high moisture content and high specific strength was obtained.

As the solids concentrations in the slurry were increased, the moisture content and the specific resistance decreased, however, at a low solids concentration, the moisture tended to stabilize and the apparent specific resistance increased to reach a constant minimum value.

The mechanical dewatering test was performed using four samples made from four particle size distributions where the size and shape of the particles varied over a wide range from those used in the filtration tests.

In this case, the effect of ultrafine particles on the mechanical dewatering process was examined. It has been found that a cake of high humidity has been obtained when the percentage of fine particles has been increased in the feed suspension.

**Keywords:** Specific resistance; vacuum filtration; particles size distribution; filter cakes; moisture content; filtration rate.

# *Liste des Figures*

| <b>Figure N°</b>  | <b>Page N°</b> |
|---|----------------|
| 1. Diagramme schématique d'un système de filtration   | 6              |
| 2. Mécanisme de la filtration sur support   | 8              |
| 3. Mécanisme de la filtration en profondeur   | 9              |
| 4. Filtre de Nutsche  | 18             |
| 5. Filtre à tambour rotatif   | 19             |
| 6. Types de déchargement du gâteau utilisés dans les filtres à tambour rotatif  | 20             |
| 7. Filtre à Bande sans fin  | 23             |
| 8. Différence de pression à travers un gâteau de filtration idéale.   |                |
| a) Gâteau incompressible  |                |
| b) Gâteau compressible  | 30             |
| 9. Classification des types d'eau contenue dans un lit de particules  | 37             |
| 10. Représentation schématique d'une courbe de pression capillaire  | 39             |
| 11. Diagramme des forces du système Liquide/Solide/Gaz  | 42             |
| 12. Dispositif de filtration sous vide- Entonnoir Buchner   | 55             |
| 14. Distribution granulométrique des échantillons   | 63             |
| 15. Effet de la concentration en solides sur l'humidité finale des six initiaux   | 65             |
| 16. Effet de la concentration en solides sur la résistance spécifique apparente des six échantillons initiaux                                 | 65             |
| 17. Volume de filtration des six échantillons initiaux  | 65             |
| 18. Distribution granulométrique I: Effet de la pression appliquée sur humidité finale des trois concentrations en solides                    | 67             |
| 19. Distribution granulométrique I: Effet de la pression appliquée sur La résistance spécifique apparente des trois concentrations en solides | 67             |

|   |    |
|---|----|
| 20. Distribution granulométrique I: volume d'eau récupéré pendant 15 min de déshydratation mécanique à 60 % Solides en masse sous une pression appliquée de 60KPa | 67 |
| 21. Distribution granulométrique II : Effet de la pression appliquée sur humidité finale à une concentration 40% Solides en masse                                 | 69 |
| 22. Distribution granulométrique II : Effet de la pression appliquée sur la résistance apparente spécifique à une concentration 40 % solides en masse             | 69 |
| 23. Distribution granulométrique II: Volume d'eau récupéré pendant 15 min de déshydratation mécanique à une concentration 60 % solides en masse                   | 69 |
| 24. Distribution granulométrique III: Effet de la pression appliquée sur l'humidité finale à une concentration de 40% solides en masse                            | 70 |
| 25. Size distribution III: Effet de la pression appliquée sur la résistance spécifique apparente à une concentration 40 % solides en masse                        | 70 |
| 26. Distribution granulométrique III: Volume d'eau récupéré pendant 15 min de déshydratation mécanique à une concentration 60 % Solides en masse                  | 70 |
| 27. Distribution granulométrique IV : Effet de la pression appliquée sur l'humidité finale à 40% solides en masse   | 72 |
| 28. Distribution granulométrique IV: Effet de la pression appliquée sur la résistance spécifique apparente à une concentration 40 % solides en masse              | 72 |
| 29. Distribution granulométrique IV: Volume d'eau récupérée pendant 15 min de déshydratation mécanique à une concentration 60 % Solides en masse                  | 72 |

# *Liste des Tableaux*

| <b>Tableau N°</b>   | <b>Page N°</b> |
|---|----------------|
| 1. Caractéristiques chimiques du verre                                      | 50             |
| 2. Caractéristiques physiques du verre                                      | 51             |
| 3. Echantillons utilisés pour les essais de filtration<br>et déshydratation | 57             |
| 4. Exemple d'un test de filtration  | 58             |
| 5. Distribution granulométrique   |                |
| a) Composition de l'échantillon pour la distribution granulométrique I      |                |
| b) Analyse de Tamisage de la distribution granulométrique I                 | 59             |
| 6. Distribution granulométrique II  |                |
| a) Composition de l'échantillon pour la distribution granulométrique II     |                |
| b). Analyse de Tamisage de la distribution granulométrique II               | 60             |
| 7. Distribution granulométrique III   |                |
| a). Composition de l'échantillon pour la distribution granulométrique III   |                |
| b). Analyse de Tamisage de la distribution granulométrique III              | 61             |
| 8. Distribution granulométrique IV  |                |
| a). Composition de l'échantillon pour la distribution granulométrique IV    |                |
| b). Analyse de Tamisage de la distribution granulométrique IV               | 62             |

# *Table des Matières*

**DEDICACE**

**REMERCIEMENTS**

**Résumé**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des symboles**

|   |          |
|---|----------|
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>                      | <b>1</b> |
| <b>Chapitre 1. Procédés et techniques de filtration</b> |          |
| 1.1 Généralités sur les procédés de separation .....    | 3        |
| 1.2 Procédé de filtration .....                         | 4        |
| 1.3 Techniques de filtration .....                      | 5        |
| 1.3.1 Filtration en surface .....                       | 6        |
| 1.3.2 Filtration en profondeur .....                    | 7        |
| 1.4 Pression de filtration .....                        | 8        |
| 1.5 Pratique de la filtration .....                     | 8        |
| 1.5.1 Modes d'alimentation des filtres .....            | 10       |
| 1.6 Compléments de filtration .....                     | 11       |
| 1.6.1 Décanteurs .....                                  | 11       |
| 1.6.2 Floculants .....                                  | 11       |
| 1.6.3 Adjuvants de filtration .....                     | 12       |
| 1.7 Auxiliaires de filtration.....                      | 13       |
| 1.8 Filtration sous vide .....                          | 13       |

|  |    |
|--|----|
| 1.8.1 Filtres statiques Nutsche .....          | 15 |
| 1.8.2 Filtres rotatifs à tambour.....          | 16 |
| 1.8.2.2 Mode de déchargement .....             | 17 |
| 1.8.3 Filtres à bande sans fin .....           | 18 |
| 1.9 Choix des filtres continus sous vide ..... | 19 |
| 1.10 Amélioration de la filtrabilité .....     | 20 |

## **Chapitre 2. Théorie de la filtration et déshydratation mécanique**

|   |    |
|---|----|
| 2.1 But de la filtration .....  | 22 |
| 2.2 Clarification .....   | 22 |
| 2.3 Extraction .....  | 23 |
| 2.4 Aspects théoriques de la filtration sur support .....             | 24 |
| 2.4.1 Définition de la résistance spécifique réelle et apparente..... | 24 |
| 2.4.2 Gâteaux incompressibles .....                                   | 26 |
| 2.4.3 Les gâteaux Compressibles .....                                 | 26 |
| 2.5 Facteurs affectant la résistance du milieu filtrant .....         | 31 |
| 2.6. Amélioration du taux de filtration .....                         | 32 |
| 2.6.1 Viscosité .....   | 32 |
| 2.6.2 Gradient de pression hydraulique .....                          | 32 |
| 2.6.3 Réduction de la résistance au gâteau .....                      | 33 |
| 2. 6. 3. 1 Adjuvants de filtration .....                              | 33 |
| 2. 6. 3. 2 Dimension des particules .....                             | 33 |
| 2. 6. 3. 3 Effet de concentration solide .....                        | 34 |
| 2.7. Aspect théorique de la déshydratation mécanique .....            | 34 |
| 2.7.1. Classification de l'eau dans le gâteau de filtration .....     | 35 |
| 2.7.2. Théorie de Déshydratation par déplacement à air .....          | 37 |

|   |    |
|---|----|
| 2.8 Équilibre de saturation .....                                     | 37 |
| 2. 8. 1 Saturation et humidité .....                                  | 37 |
| 2. 8. 2 Fluide mouillant et non mouillant dans un milieu poreux ..... | 37 |
| 2. 8. 3 Système Solide - Gaz – Liquide .....                          | 40 |
| 2. 8. 4 Méthodes pratiques de déshydratation .....                    | 42 |
| 2. 8. 5 Amélioration de la déshydratation .....                       | 43 |
| 2.9 Cas d'étude expérimentale .....                                   | 44 |
| 2.9.1 Aciérie à Oxygène II .....                                      | 44 |
| 2.9.2 Système OG .....  | 44 |
| 2.9.3 Traitement de l'eau .....                                       | 46 |

### **Chapitre 3. Matériels et Méthodes**

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Introduction .....  | 48 |
| 3.2. Préparation de l'échantillon .....                         | 48 |
| 3.2.1 Caractéristiques des billes de verre .....                | 49 |
| 3.3 Préparation de la suspension .....                          | 50 |
| 3.3.1 Distribution granulométrique I .....                      | 51 |
| 3.3.2 Distribution granulométrique II .....                     | 51 |
| 3.3.3 Distribution granulométrique III .....                    | 51 |
| 3.3.4 Distribution granulométrique IV .....                     | 52 |
| 3.4 Appareil de filtration « Entonnoir Buchner » .....          | 52 |
| 3.4.1 Procédure expérimentale .....                             | 53 |
| 3.4.2 Procédure expérimentale de déshydratation Mécanique ..... | 55 |
| 3.5 Évaluation de la résistance spécifique apparente.....       | 55 |
| 3.6 Évaluation de l'humidité .....                              | 56 |

### **Chapitre 4. Résultats et discussions des essais de filtration et déshydratation**

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Introduction .....                    | 63 |
| 4.2 Résultats du test de filtration ..... | 63 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3. Résultats des tests de déshydratation mécanique ..... | 65 |
| 4.3.1. Distribution granulométrique I .....                | 65 |
| 4.3.2. Distribution granulométrique II.....                | 67 |
| 4.3.3. Distribution granulométrique III .....              | 67 |
| 4.3.4. Distribution granulométrique IV .....               | 70 |
| 4.4. Discussion des résultats de filtration .....          | 72 |
| 4.5. Discussion des tests de déshydratation .....          | 73 |
| <b>Conclusions générales</b> .....                         | 74 |
| <b>Nomenclature</b> .....                                  | 76 |
| <b>Références bibliographiques</b> .....                   | 78 |
| <b>Annexe I</b>  |    |
| <b>Annexe II</b>   |    |

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'axe d'étude concerne les procédés de séparation solide – liquide, notamment la filtration et déshydratation mécanique. Ces deux opérations sont souvent complémentaires, sont très répandues dans l'industrie et trouvent leurs application dans les domaines de traitement des eaux usées, dans l'agroalimentaire, dans l'industrie pharmaceutique etc.....

La séparation solide liquide est une opération unitaire au centre de nombreux processus industriels en génie des procédés. Selon la phase du mélange que l'on cherche à valoriser, elle peut avoir pour but d'obtenir une phase solide appauvrie en liquide ou une phase liquide sans solide. Cette différence sur la phase valorisable va déterminer, avec des considérations économiques, les opérations unitaires utilisées et leurs paramètres (température en séchage, surface du filtre en filtration,...). Le choix est conditionné, entre autres, par la taille des particules solides, la teneur en liquide finale souhaitée ainsi que par la consommation énergétique.

Leur complémentarité repose généralement sur les exigences énergétiques et économiques. Généralement, la voie mécanique permet de réduire la phase liquide avec une demande énergétique beaucoup moins forte que le séchage thermique.

Les produits utilisés pour cette étude sont des suspensions réalisées à partir de matériaux classiquement considérés dans la littérature, à savoir les billes de verres, outre le caractère modèle de ces produits; ce choix a été fait dans le concept de se rapprocher du cas pratique des boues produites par l'industrie sidérurgique d'El Hadjar.

Pour atteindre ces objectifs, notre travail est articulé autour de deux grandes parties respectives, l'étude des paramètres influençant la filtration sous pression constante et la déshydratation mécanique des gâteaux de filtration.

Cette étude menée a été développée en quatre volets comportant les principaux travaux réalisés à savoir :

Le chapitre 1 décrit le contexte général dans lequel se situe le travail c'est-à-dire les différents procédés de filtration et de déshydratation mécanique utilisés lors du traitement des boues.

Le chapitre 2 est consacré aux aspects théoriques et notions essentielles à l'étude de la filtration à pression constante et déshydratation mécanique. Il permet de dégager les aspects essentiels de la séparation et de mettre en évidence l'intérêt de l'opération. Les boues soutirées en pied de décanteurs subissent des opérations successives de concentration : L'épaississement, la filtration et la déshydratation. L'épaississement est une opération complémentaire optionnelle de décantation qui permet de concentrer les boues liquides selon le procédé et la nature de départ de la boue. L'étape de déshydratation mécanique permet de donner une consistance plus solide à la boue en atteignant des siccités variant de 15 à 40%.

Le volet 3 est consacré à la description des dispositifs expérimentaux développés au laboratoire et à la préparation des suspensions utilisées pour les tests de filtration et pour les tests de déshydratation mécanique. Pour les tests de filtration nous avons utilisés six échantillons de particules synthétisées en verre de forme sphérique (Potters- Barlotini Co, Ltd) dont la granulométrie varie de 45 à 450 microns, utilisant quatre concentrations de solides sous une pression constante de 100 KPa.

Les tests de déshydratation mécanique ont été réalisés sur quatre échantillons de distributions granulométriques différentes d'après la granulométrie. Ces échantillons ont été préparés à trois concentrations solides. Ces tests ont été réalisés en utilisant trois niveaux de pression appliquée. La démarche suivie est consacré au développement d'une procédure qui consiste à faire évoluer un dispositif classique de filtration sous vide représenté par un entonnoir Buchner afin d'évaluer l'humidité, la résistance spécifique et le taux de filtration des gâteaux de filtration.

Le dernier chapitre 4 présente l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus en filtration et déshydratation mécanique. A l'issue de l'analyse des résultats qui met en évidence l'influence de la dimension de la particule, la concentration en solides des suspensions et la pression de filtration appliquée; suivie d'une discussion sur les résultats obtenus pendant la phase de filtration et la phase de déshydratation mécanique. Les conclusions générales tirées à partir des résultats d'expériences de filtration et déshydratation mécanique réalisées dans cette thèse viennent clore ce manuscrit.

# CHAPITRE 1. PROCÉDES ET TECHNIQUES DE FILTRATION

## 1.1 Généralités sur les procédés de séparation

L'eau est utilisée dans la plupart des étapes de la valorisation des minéraux pour traiter la plus grande partie (environ 80% - 90%) du tonnage de minerais. Les processus d'enrichissement utilisent habituellement l'eau car elle permet d'avoir une plus grande efficacité accompagnée d'une récupération plus élevée. En outre, l'eau élimine la pollution de l'air [1].

L'utilisation de l'eau nécessite alors que les solides soient séparés du liquide. En général, lorsque les particules à séparer diminuent en taille, les augmentations de coût diminuent. Lorsque les solides sont des colloïdes (généralement considérés comme étant de  $-10\ \mu\text{m}$  ou moins), les coûts augmentent encore plus vite. Ils sont difficiles à éliminer par filtration ou centrifugation. Habituellement, un flocculant est ajouté au mélange pour amener les colloïdes à former de plus grands flocons ou agglomérats; sinon les colloïdes restent en suspension à cause du mouvement brownien [2]. En conséquence, la séparation liquide-solide est un coût majeur dans le traitement des minéraux, probablement dépassée seulement par le coût de la fragmentation, de la flottation et des réactions endothermiques.

La séparation solide - liquide est une opération unitaire au centre de nombreux processus industriels en génie des procédés. Selon la phase du mélange que l'on cherche à valoriser, elle peut avoir pour but d'obtenir une phase solide appauvrie en liquide ou une phase liquide sans solide. Cette différence sur la phase valorisable va déterminer, avec des considérations économiques, les opérations unitaires utilisées et leurs paramètres. Le choix est conditionné, entre autres, par la taille des particules solides, la teneur en liquide finale souhaitée ainsi que par la consommation énergétique.

La séparation liquide-solide est également essentielle dans les réseaux de récupération d'eau et des circuits d'eau alimentée en circuit fermée [3]. L'eau qui a été utilisée pour le traitement et l'enrichissement des minéraux contient des solides dont la taille peut varier du micromètre à 6.36 mm ou plus. Certains cours d'eau contiendront les solides valorisable et d'autres les déchets ou les résidus. Dans les deux cas, les solides doivent être séparés si l'eau doit être réutilisée. De plus, la concentration de solides en suspension dans l'eau recyclée doit être suffisamment faible pour que l'eau ne contamine pas le produit suivant.

La séparation solide – Liquide est une condition préalable pour un circuit d'eau fermé. Il sera également nécessaire avant que tout effluent soit éliminé dans les lacs, les cours d'eau ou d'autres sources d'eau publiques. Les réglementations nationales et fédérales européennes exigent généralement que ces effluents ne contiennent pas plus de 10 à 50 mg / L de solides en suspension [4].

En même temps, la séparation liquide-solide par des moyens mécaniques (c'est-à-dire la sédimentation, la filtration et la centrifugation) est beaucoup moins coûteuse que le séchage thermique, principalement parce que ces moyens consomment moins d'énergie. En outre, le séchage thermique nécessite généralement des combustibles plus coûteux, tels que le gaz ou le pétrole, tandis que les méthodes mécaniques peuvent utiliser l'énergie électrique générée par des combustibles moins coûteux [4].

## **1.2 Procédé de filtration**

Dans le cadre de notre étude, le procédé de filtration a été étudié du point de vue aspect théorique, et accompagné par une section qui traite les différents types de filtres utilisés à l'échelle industrielle et leur domaine d'utilisation.

D'après la proportion de solides en suspension dans la solution à filtré, on distingue deux types de filtrations :

- soit une clarification de liquide lorsqu'il contient, en suspension, une très faible quantité d'impuretés solides ou colloïdales ;
- soit une rétention ou extraction de solides lorsque la proportion de solides en suspension atteint une certaine valeur, chacune des deux phases, solide ou liquide, pouvant être récupérée pour un traitement ultérieur ou rejetée.

Il faut mentionner également les filtrations dites de dégrossissage et de sécurité :

- la première a pour but d'éliminer des impuretés grossières (quelques centaines de microns), contenues en très faible quantité dans le liquide; on l'utilise soit en prétraitement avant une filtration plus poussée (dégrossissage avant filtration sur cartouches ou sur membranes), soit en protection d'appareils (échangeurs, pompes, etc.) ou de circuits ;
- la seconde est utilisée pour retenir des impuretés pouvant se trouver accidentellement dans un liquide déjà propre (par exemple : filtration d'huile de table avant embouteillage).

### 1.3 Techniques de filtration

La filtration a été reconnue comme l'une des opérations unitaires les plus anciennes, directement ou indirectement lié aux industries vinicoles. Le principe de la filtration implique essentiellement la séparation d'un solide du liquide dans lequel il est suspendu par passage du liquide à travers un milieu poreux avec des tailles de pores trop petites pour permettre le passage des particules solides [5].

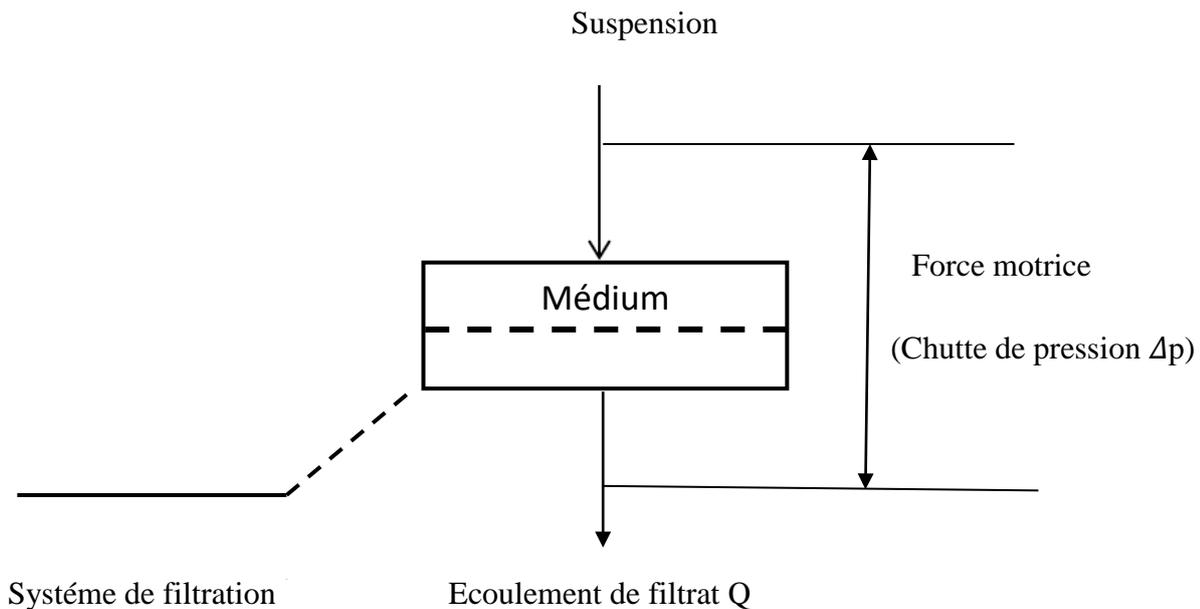


Figure 1. Diagramme schématisé d'un système de filtration [6].

La filtration est une étape très importante dans tout le processus de séparation solide-liquide qui peut être subdivisée en quatre étapes majeures comme le montre la Figure 1.

- Prétraitement : Les propriétés d'une suspension sont modifiées pour augmenter sa taille de particule et filtrabilité, par exemple par traitement chimique, floculation ou coagulation.
- Concentration de solides : Une partie du liquide dans une suspension est éliminée en utilisant des épaisseurs ou des hydrocyclone pour réduire la charge sur le filtre, par exemple des aides de filtration telles que la diatomée ou de la perlite expansée est ajoutée à la suspension pour augmenter sa perméabilité.
- Séparation des solides : les solides sont séparés des liquides soit par la filtration sur support ou par la filtration profonde.

- Post – traitement : Le gâteau est lavé ou essoré pour éliminer tout liquide résiduel ou solvant.

Afin d'obtenir un écoulement de fluide à travers le milieu filtrant, une chute de pression  $\Delta p$  doit être appliquée à travers le milieu. Il existe quatre types de forces motrices qui sont respectivement : la force de gravité, le vide, la pression et la force Centrifuge.

Il existe deux types de filtration utilisés dans la pratique industrielle [7].

### 1.3.1 Filtration en surface

Elle repose sur un effet de tamisage. Les matières solides ne pénètrent pas dans le filtre, mais sont retenues à sa surface. Cela n'est possible que si la taille des pores du filtre est inférieure à la taille des particules solides. Les tamis, les toiles filtrantes, le papier-filtre ou les membranes peuvent être des filtres. Si l'écoulement est perpendiculaire à la surface, on parle de filtration sur gâteau. L'inconvénient réside dans le fait qu'un gâteau de filtration se forme au fil du temps sur le filtre, réduisant ainsi le débit du filtrat. La filtration sur support est également appelée filtration en surface, sur membrane, ou à gâteau (cake filtration).

On l'utilise en général pour la filtration de suspensions assez fortement chargées en matières solides [8].

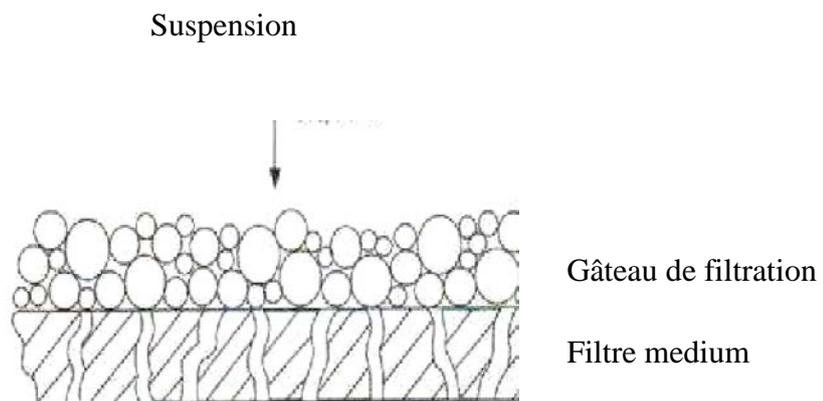


Figure 2. Mécanisme de la filtration sur support [9].

### 1.3.2 Filtration en profondeur

Lors de la filtration en profondeur, l'eau brute traverse un filtre sous la forme d'un lit de particules (lit filtrant). Le sable et le gravier sont des filtres très souvent utilisés. L'eau brute s'écoule dans les interstices du lit filtrant, les matières solides étant retenues. L'eau purifiée traverse quant à elle le lit filtrant. Progressivement, un nombre croissant des matières solides se dépose dans les interstices du lit filtrant. Cela entraîne un rétrécissement de la section de passage. Ainsi, la résistance du filtre à l'écoulement s'accroît. Cette résistance se manifeste par une augmentation de la perte de pression. Le débit du filtre diminue ou ne peut être maintenu qu'en augmentant la pression au niveau de l'entrée du filtre. Les matières solides déposées peuvent à nouveau être éliminées par un rinçage à contre-courant [10]. Le filtrat sortira plus ou moins pur suivant la texture de cette masse, la forme des particules à retenir et leur répartition granulométrique, les propriétés physico-chimiques des particules et du filtrat, l'épaisseur de la couche filtrante, le temps, le débit de suspension, etc.

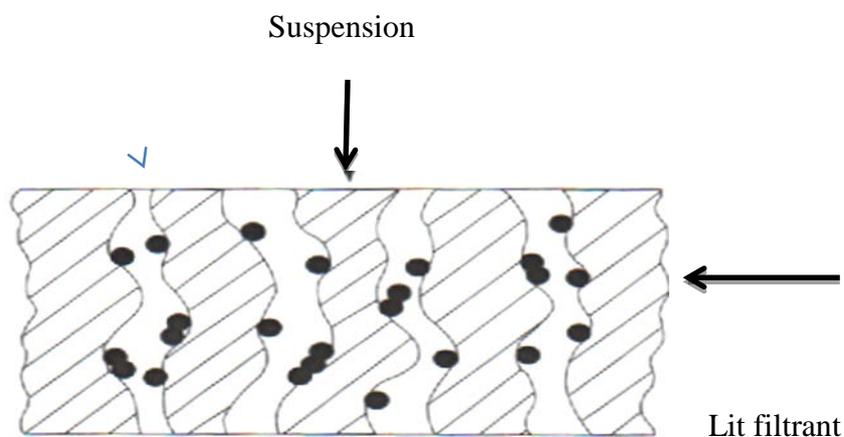


Figure 3. Mécanisme de la filtration en profondeur [11]

## 1.4 Pression de filtration

On distingue les types de filtrations suivantes:

- la filtration par gravité: le mélange est soumis uniquement à la pression atmosphérique. Le liquide passe à travers le support filtrant, qui peut être du sable par exemple, tandis que le solide est récupéré sur le support filtrant.
- la filtration par surpression: la suspension arrive sous pression dans le filtre.
- la filtration sous pression réduite: le mélange est soumis d'un côté du filtre à la pression atmosphérique, et de l'autre côté, où sort le filtrat, à une dépression réalisée grâce à une pompe à vide. Lors du passage d'une suspension à travers un milieu filtrant, le fluide circule à travers les ouvertures tandis que les particules sont arrêtées. En s'enchevêtrant, ces dernières finissent par former un second milieu filtrant pour les autres particules qui se déposent d'une manière continue sous forme de gâteau dont l'épaisseur va en croissant au fur et à mesure de l'écoulement de la suspension.

La différence de pression entre l'amont et l'aval (perte de charge) a une grosse importance car elle règle la vitesse de filtration. On peut concevoir deux types de filtration:

- filtration à pression constante: on régule la différence de pression amont-aval à une valeur constante. L'épaisseur du gâteau augmentant au cours du temps, la vitesse de filtration va donc diminuer sous l'effet de l'augmentation de la perte de charge. C'est la filtration la plus utilisée dans l'industrie.
- filtration à débit constant : on augmente au cours du temps la différence de pression amont-aval pour garder un débit constant malgré l'augmentation de perte de charge.

## 1.5 Pratique de la filtration

Le choix des milieux filtrants est vaste. Il dépend de plusieurs facteurs: le débit et la concentration de la suspension, les caractéristiques physiques et chimiques des liquides et des solides. On peut citer:

- les tissus filtrants: textiles naturels (coton, jute), toiles métalliques (fer, laiton, inox), tissus en matière plastique (nylon, PVC, polyester, téflon)
- les milieux filtrants pulvérulents: sable, charbon, diatomite

- les matières poreuses: porcelaine, verre, charbon, silice, métaux

Il faut éviter le colmatage qui peut avoir lieu avec des particules aux formes particulières (bâtonnet par exemple) pouvant pénétrer dans les ouvertures sans les traverser. Il vaut donc mieux choisir des ouvertures plus larges qui laissent passer ces particules et reprendre la fraction de filtrat les comprenant pour une nouvelle filtration avec un gâteau déjà constitué qui les arrête [12].

Pour arrêter les petites particules, on a intérêt à procéder à la floculation de ces particules pour l'obtention de particules plus grosses et donc plus faciles à filtrer (application des flocculant dans le traitement des eaux). On peut aussi agglomérer les particules par adsorption sur des coagulants (chaux, sulfate ferreux, magnésie).

La meilleure technique consiste à faire appel aux adjuvants de filtration qui sont des produits destinés à faciliter la formation du gâteau et le nettoyage du filtre. Les principaux adjuvants sont la diatomite (Kieselguhr) et la cellulose. Ces composés ne peuvent être employés que si le liquide seul est à récupérer.

La filtration est souvent suivie d'un lavage par un solvant miscible au filtrat afin d'éliminer les eaux-mères du gâteau qui contiennent des impuretés.

Dans le cas de la filtration sur support comme dans celui de la filtration en profondeur, il est nécessaire de fournir une certaine énergie à la suspension pour arriver à lui faire traverser le filtre : lorsqu'un filtre dans la masse se colmate, sa résistance à l'écoulement croît et il en est de même quand l'épaisseur du gâteau augmente lors d'une filtration sur support.

Une pression n'étant pas autre chose que l'énergie du fluide par unité de volume, il faut donc qu'il existe une différence de pression (désormais, on parlera simplement de pression) positive entre l'amont et l'aval de l'élément filtrant.

Cette pression peut découler du simple poids (par unité de surface) de la suspension au-dessus du filtre. Mais on peut aussi remplacer la gravité par la force centrifuge, mettant ainsi en jeu des énergies très supérieures (filtres et essoreuses centrifuges).

On peut accroître la pression à l'entrée du filtre en l'alimentant par une pompe (à piston plongeur, à membrane, centrifuge, etc.). La sortie du filtre est mise en dépression par rapport à l'atmosphère (filtres sous vide). Par ailleurs, la résistance à l'écoulement croissant avec le temps, on conçoit que, si le filtre est alimenté sous pression constante, le débit diminue dans le temps, tandis que, si l'on désire un débit constant, il est nécessaire d'accroître régulièrement la pression de filtration.

Schématiquement donc, on peut envisager des filtres fonctionnant sous pression constante, à débit constant, ou à débit et pression variables.

Les filtres sous vide travaillent généralement sous pression constante, cette pression étant l'écart entre la pression atmosphérique et le vide sensiblement constant fourni par une pompe à vide, un éjecteur, une jambe barométrique, etc.

Un filtre alimenté par gravité fonctionne soit sous pression variable, si la suspension est amenée sur le filtre en une fois et que sa hauteur diminue donc dans le temps, soit sous pression constante si un système de trop-plein, par exemple, maintient cette hauteur toujours à la même valeur au-dessus du filtre.

### **1.5.1 Modes d'alimentation des filtres**

Si la suspension est amenée sur le filtre par pompe, plusieurs modes d'alimentation peuvent être envisagés. Si l'on utilise une pompe volumétrique (à piston plongeur ou à membrane par exemple, donc à vitesse relativement lente, en particulier lorsque la suspension a été floculée et contient donc des agglomérats relativement fragiles), l'alimentation sera faite, en principe, à débit moyen constant, deux cas pratiques sont cependant concevables, essentiellement dans le domaine de la filtration sur support :

- si le gâteau formé est peu compressible, l'alimentation à débit constant (donc à pression croissante) sera poursuivie jusqu'à ce que la pression atteigne la valeur maximale compatible avec la résistance mécanique du filtre. Au-delà, le système de sécurité de l'installation (soupape de décharge ou de retour, cloche à membrane, etc.) se met en action, et c'est alors la pression qui reste constante ;
- si le gâteau formé est compressible, on a intérêt à régler le système de sécurité à une pression assez basse pour que, très vite, l'alimentation se fasse à pression constante faible, afin de ne pas écraser le gâteau. En fin de filtration, lorsque le gâteau a atteint son épaisseur maximale, on repasse parfois à une alimentation à débit constant, jusqu'au maximum de pression admissible, ce qui se traduit par un tassement du gâteau conduisant à la formation d'un tourteau moins humide qu'avant l'application de cette forte pression [13].

Les pompes volumétriques fournissant un débit relativement faible, les filtres de grosse capacité sont généralement alimentés par des pompes centrifuges et fonctionnent donc sous pression et débit variables.

Il est évident que les lois de la filtration sont différentes suivant le mode d'alimentation ou la combinaison des modes d'alimentation adoptés.

## **1.6 Compléments de filtration**

### **1.6.1 Décanteurs**

Lorsque l'on doit filtrer de gros volumes de suspensions très diluées, ce qui nécessiterait l'installation d'un filtre de grosse capacité, il est souvent rentable de faire subir à la suspension un épaissement préalable (décanteur statique ou centrifuge, filtre épaisseur, hydrocyclone), afin de n'avoir à utiliser qu'un filtre de dimension raisonnable.

### **1.6.2 Flocculants**

Si les particules de la suspension sont très fines, donc difficilement filtrables, il peut être nécessaire de les faire flocculer avant filtration. L'addition de flocculants adaptés à la suspension donne en effet naissance à de gros flocons formés par l'agglomération des petites particules. Moyennant certaines précautions, on observe alors en général une nette amélioration de la filtrabilité du produit et de la clarté du filtrat.

Les flocculants ont certainement apporté, lors de ces dernières années, les plus grands progrès dans les domaines de la séparation des constituants d'une suspension, que ce soit par décantation ou par filtration. Leur mode d'action est relativement complexe. De façon très schématique et simplifiée, on peut imaginer que certains de ces produits ont une action un peu mécanique, en créant des ponts entre les particules. D'autres produits agissent par modification des caractéristiques électriques superficielles des particules (neutralisation des charges de mêmes signes, qui tendent à faire se repousser les particules).

L'efficacité de ces produits dépend très souvent du pH de la suspension, et leur choix devient très délicat pour les pH extrêmes. Leur dosage [quelques p. p. m. ( $10^{-6}$  en masse) ou quelques mg par litre] doit être soigné, leur efficacité passant souvent par un maximum pour une certaine concentration.

On trouve ainsi, dans le commerce, des poly électrolytes, des hydrates de carbone, des polymères soit anioniques, soit cationiques, soit non ioniques, du type polysaccharides par exemple.

### 1.6.3 Adjuvants de filtration

Si la floculation des fines est impossible ou trop onéreuse et si la clarté du filtrat est le seul impératif recherché, il convient, pour la filtration sur support, d'utiliser des adjuvants de filtration, matériaux caractérisés par un grand pouvoir de rétention fine, joint à une grande perméabilité.

C'est ainsi que, pour retenir de très petites particules, au lieu d'utiliser un support de grande finesse qui freinerait considérablement l'écoulement, on filtre sur une précouche d'adjuvants déposée sur un support de finesse moyenne. C'est l'opération d'enrobage [14].

Si la précouche a tendance à être colmatée en surface par les particules de la suspension, on peut rajouter des adjuvants à la suspension et former ainsi un gâteau constitué d'un mélange de fines particules et d'adjuvants, dont la filtrabilité est très supérieure à celle d'un gâteau de particules seules. C'est l'opération de nourrissage. Toujours dans le même cas de tendance au colmatage de la précouche, on peut, si l'on utilise un filtre rotatif à tambour sous vide, former une précouche épaisse (de 5 à 10 cm), un couteau à avance micrométrique éliminant progressivement les couches superficielles colmatées.

Les principaux adjuvants sont les kieselguhrs et les perlites. Les fibres de cellulose ou d'amiante, la poudre de charbon, la sciure de bois sont également parfois utilisées.

- **Kieselguhrs** : ce sont des carapaces siliceuses de diatomées fossiles microscopiques dont les dépôts se sont formés il y a quelques milliers de siècles. Le produit brut, après simple broyage, est rarement utilisé comme adjuvant car il est formé de particules de dimensions très variées et contient encore des sels minéraux, du sable et quelques matières organiques (ce produit brut sera éventuellement utilisé comme calorifuge en vrac). Les diverses qualités de kiesel-guhrs rencontrées dans le commerce correspondent aux traitements plus ou moins poussés apportés à ce produit brut : calcination, lavage à l'acide, frittage en présence de fondant, tamisage ou élutriation. Leur porosité globale est de l'ordre de 70 à 85 %, une part importante correspondant à la porosité des débris de carapaces criblées de très fines perforations.
- **Perlites** : ce sont des roches vitreuses d'origine volcanique, de la même famille que les ponces et les obsidiennes. La roche est constituée de lamelles entre lesquelles s'interpose de l'eau interstitielle (de 3 à 4 %). Après broyage et tamisage, un chauffage brutal jusqu'aux environs de la température de ramollissement du produit (900 à 1 000 °C) vaporise cette eau

et gonfle les grains. Après un nouveau broyage et de nouvelles séparations, on obtient des perlites de diverses perméabilités, dont les masses volumiques apparentes varient de 150 à 200 kg/m<sup>3</sup> et sont donc, en moyenne, inférieures à celles des diatomées (300 à 350 kg/m<sup>3</sup>).

## **1.7 Auxiliaires de filtration**

Après la phase de filtration sur support proprement dite, le gâteau devra être lavé pour éliminer le plus possible de filtrat contenu dans ses pores, soit pour récupérer l'essentiel de ce filtrat, soit au contraire pour obtenir un gâteau qui en sera sensiblement exempt. L'élimination des dernières traces de filtrat hors des interstices du gâteau exigeant le passage de volumes importants de liquide de lavage, il est parfois plus intéressant de refaire une ou plusieurs filtrations après avoir remis en suspension le gâteau dans du liquide de lavage.

Souvent, on cherche également à obtenir le gâteau le moins humide possible pour réduire les frais ultérieurs de transport, séchage, etc. On prévoit alors, après les opérations de filtration et de lavage éventuel, un essorage du gâteau, soit mécanique (écrasement du gâteau par un coussin gonflé à l'air comprimé ou par accroissement important de la pression de filtration), soit par passage de vapeur d'eau ou d'air [15].

Dans les opérations de lavage et dans les opérations d'essorage par passage d'un gaz, il est nécessaire de veiller à l'absence de craquelures ou fissures dans le gâteau, à travers lesquelles se produirait un écoulement important de fluide qui ne participerait sensiblement pas au lavage ou à l'essorage.

## **1.8 Filtration sous vide**

Dans les filtres à vide, la force d'entraînement pour la filtration résulte de l'application d'une aspiration du côté filtrat du fluide. Bien que la perte de charge théorique disponible pour la filtration sous vide soit de 100 kPa, dans la pratique, elle est souvent limitée à 70 ou 80 kPa ou même moins.

Dans les applications où la fraction solide composée de particules fines dans une suspension d'alimentation est faible, un filtre à vide simple et peu coûteux peut produire des gâteaux avec des teneurs en humidité comparables à celles déchargées par des filtres sous pression. En outre, cette catégorie comprend les filtres uniques construits en grandes dimensions qui peuvent assurer le lavage, le séchage et d'autres exigences de processus [16].

Il existe une large variété de type de filtres à vide, ils fonctionnent en continu ou en discontinu. Une caractéristique distinctive importante est la position de la zone de filtration par rapport à la gravité. Un certain nombre de types de filtres à vide utilisent une surface de filtration horizontale avec le gâteau qui se forme sur le dessus. Cet arrangement offre les avantages suivants:

- La sédimentation par gravité commence avant l'application du vide. Ceci évite aveuglement excessif de la toile filtrante dû à l'action d'une précouche formée par les particules grossières.
- Les matériaux lourds ou grossiers peuvent être filtrés car s'ils se déposent à partir de l'alimentation, ils le font sur la surface du filtre.
- La pénétration des particules fines à travers le milieu peut être tolérée car le filtrat initial peut être recyclé sur la bande.
- Les filtres à alimentation par le haut sont parfaits pour le lavage des gâteaux, leur déshydratation et d'autres opérations telles que la lixiviation.
- Un degré élevé de contrôle peut être exercé lors de la formation du gâteau. Des tolérances peuvent être prises pour les aliments modifiés et / ou les différentes exigences de qualité du gâteau. Ceci est particulièrement vrai pour les filtres à vide à bande horizontale. Avec ces unités, les proportions relatives de la bande attribuée à la filtration, au lavage, au séchage, etc., ainsi que la vitesse de la bande et la qualité du vide, peuvent être facilement modifiées pour s'adapter aux changements de processus.

Cependant, il y'a deux inconvénients majeurs:

- Ces filtres nécessitent généralement de grandes surfaces.
- Leur coût économique est relativement élevé.

Les filtres à vide les plus importants et les plus utilisés sont considérés dans la section suivante :

Le procédé de filtration utilise des filtres qui fonctionnent soit en continu ou en discontinu.

**Filtre discontinu:** l'opération à lieu par charge c'est à- dire que l'alimentation de la suspension et le chargement du solide se font par intermittence. La filtration est arrêtée quand la capacité au-dessus de la surface filtrante est remplie ou que le colmatage du filtre atteint une valeur limite.

**Filtre continu:** dans les filtres continus, la surface filtrante fermée sur elle-même se déplace lentement devant l'alimentation; le gâteau atteint une certaine épaisseur et dès qu'il sort de la partie

filtrante il est détaché par un système raclant. Un cycle de lavage puis d'essorage est souvent adjoint [17]. Ces filtres constituent un investissement plus important mais ils ont un coût de fonctionnement moindre: ils conviennent donc aux productions importantes. Les filtres à vide les plus importants et les plus utilisées seront considérés dans la section suivante.

### 1.8.1 Filtres statiques Nutsche

Le filtre de Nutsche est simplement un équivalent industriel du laboratoire Buchner entonnoir. Ils sont constitués d'une cuve comportant une plaque perforée servant de support à un élément filtrant, généralement en tissu naturel ou synthétique. Le vide est appliqué au compartiment inférieur dans lequel le filtrat est recueilli. Ces appareils, qui permettent la filtration de la totalité du liquide, sont utilisés lorsque la filtrabilité du gâteau est très grande et que l'on peut réaliser une couche épaisse de solides (cette couche peut atteindre 40 à 50 cm dans le cas de certains cristaux) car la surface filtrante est très limitée (standard : de 0,5 à 3 m<sup>2</sup>). Le gâteau est retiré manuellement. Selon la nature chimique de la suspension à filtrer, les matériaux de construction varient du bois, du plastique, terre cuite, acier, acier plombé, à la fonte bordée de briques. Ces filtres sont particulièrement avantageux lorsqu'il est nécessaire de séparer les lots et lorsqu'un lavage important est nécessaire. Le lavage est effectué soit par déplacement, soit par remise en suspension. Ces appareils peuvent fonctionner, en enceinte fermée, sous pression.

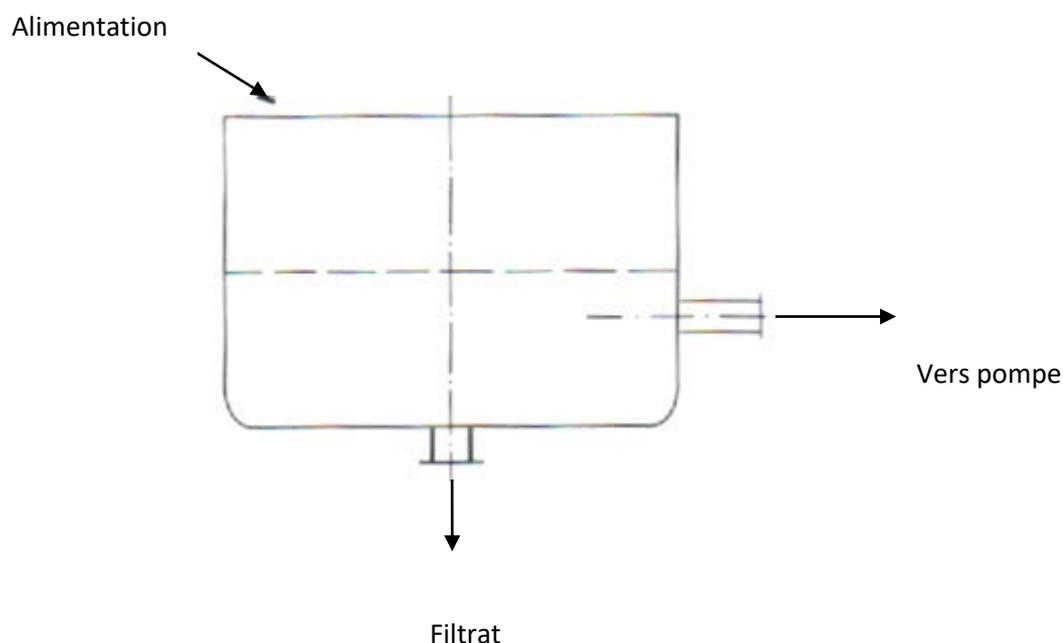


Figure 4. Filtre de Nutsche [18].

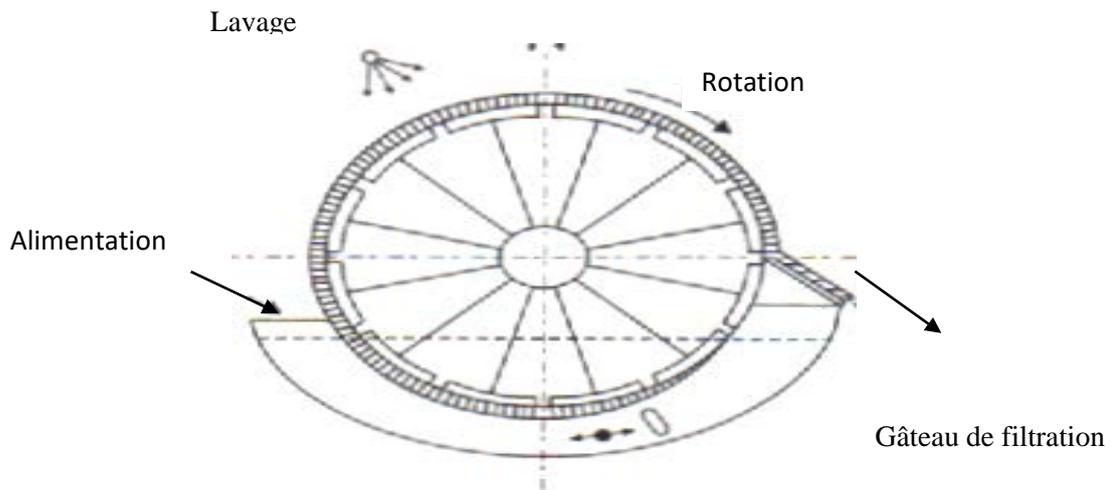


Figure 5. Filtres rotatifs à tambour [20].

### 1.8.2 Filtres rotatifs à tambour

Actuellement, c'est le filtre à vide le plus populaire. Il existe de nombreuses versions disponibles et elles comprennent toutes un tambour qui tourne lentement (1 à 10 minutes par tour) autour de son axe horizontal. Il est composé de cellules indépendantes, est revêtu d'une toile filtrante tendue sur un support perforé en métal, ébonite ou plastique, et immergé partiellement dans une auge alimentée en produit à filtrer. Les cellules sont reliées en bout d'arbre à une valve de distribution par une araignée de tuyauteries. Cette valve communique elle-même avec une pompe à vide par l'intermédiaire du ballon de séparation de filtrat, et avec un compresseur. Pendant la rotation lente du tambour, les cellules sont immergées à tour de rôle dans l'auge. Sous l'action du vide, le liquide traverse la toile filtrante, et les sédiments se déposent en gâteaux sur la toile. Le tambour continuant son mouvement de rotation, le gâteau émerge et reste maintenu à la surface de la cellule sous l'action de la dépression régnant dans ce secteur. Si on le désire, on peut, dans cette position, le laver en pulvérisant à sa surface le liquide approprié. La cellule sort ensuite de la zone de lavage et, l'action du vide continuant, l'air aspiré à travers le gâteau entraîne une grande partie du liquide d'imprégnation. Lorsque le compartiment se présente devant le couteau racleur, l'action du vide cesse et la valve de distribution envoie de l'air comprimé, à contre-courant, facilitant le décrochage du gâteau [19].

La submersion du tambour dans l'auge, c'est-à-dire la proportion de surface mise en contact avec le produit à filtrer, et la vitesse de rotation sont définies en fonction de la filtrabilité du gâteau. Généralement, la submersion varie de 25 à 45 %, mais peut atteindre 70 % pour des produits particulièrement difficiles, et la vitesse de rotation varie de 10 à 70 tr/h (suivant le diamètre du tambour). Les filtres à tambour rotatif sont réalisés en acier doux (parfois recouvert de caoutchouc), en acier inoxydable, en le nickel, en le tantale ou en plastique. Le procédé de filtration peut être suivi d'une déshydratation, d'un lavage et d'un séchage [21].

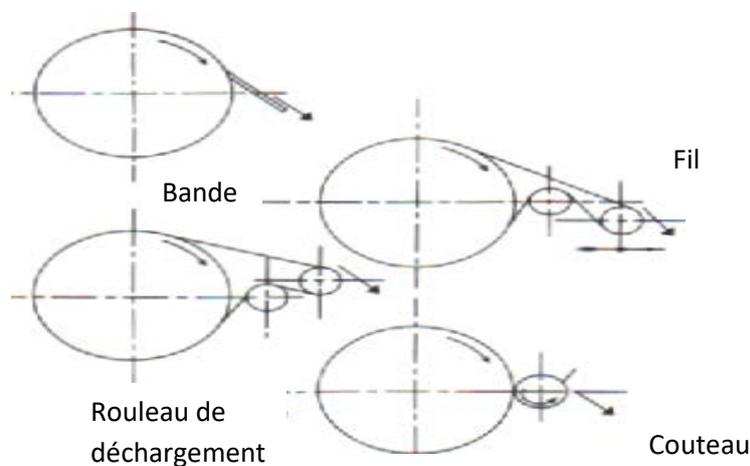


Figure 6. Types de déchargement du gâteau dans les filtres à tambour rotatif [22].

### 1.8.2.2 Mode de déchargement

Plusieurs systèmes différents sont utilisés pour le déchargement du gâteau (Figure 6), qui peuvent tous être assistés par un soufflage d'air: le déchargement est réalisé à l'aide : d'un simple un couteau, d'une bande ou de chaîne, et d'un rouleau.

Le type choisi de déchargement du gâteau de filtration dépend de la nature du matériau filtré. Le racloir ou le couteau consiste en une lame qui enlève le gâteau du tambour par contact direct avec le gâteau de filtration. Il est normalement utilisé pour les matériaux granulaires avec une épaisseur de gâteau supérieure à environ 6 mm. Afin de ne pas endommager la toile filtrante, une distance de sécurité de 1 à 3 mm entre la lame et la toile doit être respectée.

Le dispositif de déchargement à cordes utilise un certain nombre de cordes parallèles (des fils ou des ressorts hélicoïdaux ont également été utilisés) attachés complètement autour du filtre à un pas de 1 à 2 cm, passant sur les rouleaux de décharge et de retour. Lorsque les cordes quittent le tambour avant le point de décharge, elles soulèvent le gâteau de filtre du support et le déchargent au rouleau de décharge. Ce type de décharge est recommandé pour les gâteaux gélatineux ou cohésifs. La décharge du ressort hélicoïdal a été appliquée avec succès sur des solides fibreux tels que les déchets d'une usine de pâte à papier ou des boues hautement flocculées, comme dans le traitement des eaux usées.

### **1.8.3 Filtres à bande sans fin**

Ces filtres sont constitués essentiellement d'un ensemble d'une ou deux bandes en caoutchouc, supportant une bande de toile filtrante, enroulée sur deux tambours, le tout analogue à un transporteur à courroie. Des boîtes à vide fixes, placées sous la bande, créent une dépression permanente qui permet le passage du liquide à travers la toile filtrante.

Le rôle des bandes en caoutchouc est triple : réaliser une étanchéité dynamique entre la boîte à vide et la toile, assurer la transmission du mouvement, drainer et collecter vers la partie axiale le liquide filtré à travers la toile. Le filtrat est recueilli dans les boîtes à vide et évacué par ballons séparateurs. La bouillie à filtrer est déversée à une extrémité du filtre et pas successivement par un secteur filtration, lavage, essorage, une boîte à vide recueillant pour chaque secteur le filtrat et les liquides provenant du lavage et de l'essorage. La bande de toile avance en mouvement continu à une vitesse de 1 à 6 m/min, et les gâteaux peuvent atteindre une épaisseur de 8 cm. Ces filtres sont fabriqués avec des surfaces variant de 0,5 à 200 m<sup>2</sup>.

Dans une version différente, le filtre est constitué d'un ensemble de caissons sous vide en polypropylène équipés d'une grille, en polypropylène ou acier inoxydable, sur laquelle glisse la toile filtrante (figure 7). La bande de toile avance d'une longueur de 0,50 m de façon discontinue pendant un temps déterminé par une minuterie. Durant l'avance, le vide est interrompu pour permettre un déplacement rapide en limitant l'effet de frottement.

Le gâteau est débâti pendant cette séquence et la toile est lavée avant son retour en tête du filtre. Lorsque la toile s'immobilise, les caissons sont remis sous vide permettant de réaliser simultanément les opérations de filtration, de lavage et d'essorage. La conception modulaire de cet appareil offre la possibilité de modifier à volonté la surface du filtre en conservant les modules de tête (alimentation)

et d'extrémité (déchargement) et en interposant des modules intermédiaires. La surface varie entre 0,5 et 50 m<sup>2</sup>.

La construction en polypropylène présente également un grand intérêt dans le cas de filtration de produits corrosifs.). L'alimentation des filtres à bande sans fin par gravité facilite la sédimentation et améliore le rendement en filtration et lavage. Ils permettent également de procéder à des lavages méthodiques par réutilisation, en premier lavage, des petites eaux provenant du deuxième secteur de lavage.

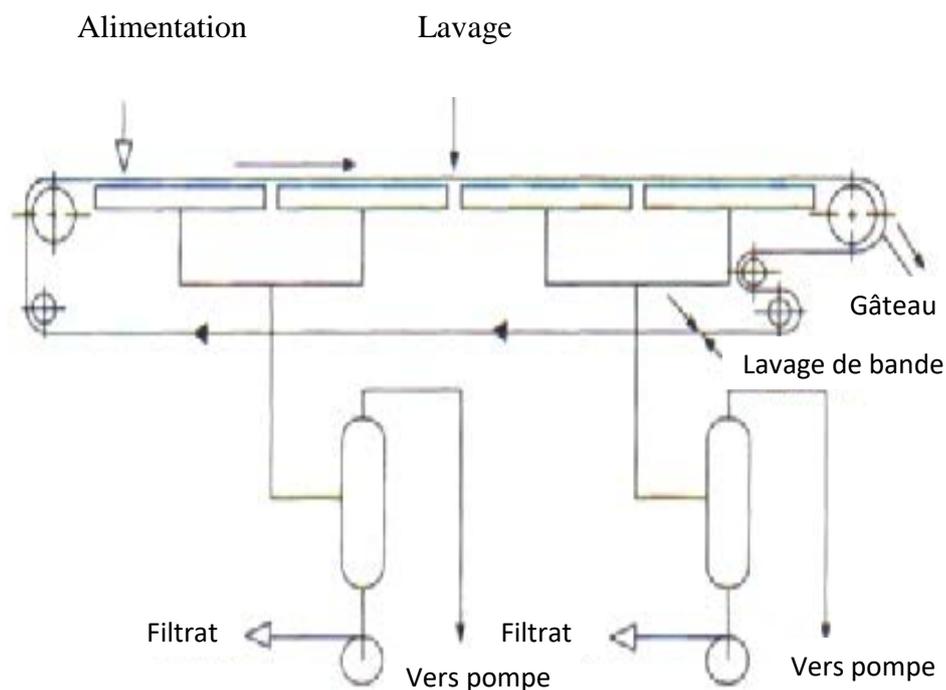


Figure 7. Filtres à bande sans fin [23].

## 1.9 Choix des filtres continus sous vide

Les appareils travaillant sous vide sont utilisés comme extracteurs avec des clarifications de filtrat moins poussées que dans les filtres sous pression. On a le choix entre les filtres à surface horizontale (à bande, à trémie) et les filtres à surface cylindrique (rotatifs).

Les filtres à surface horizontale seront choisis pour des produits pondéreux à sédimentation rapide, ou des suspensions à forte concentration et de grande filtrabilité dont on désire épuiser le gâteau en

liqueur mère par une série de lavages méthodiques avec reprise en tête des eaux de lavage intermédiaires ou finales.

Les filtres cylindriques donnent des lavages moins poussés, mais du fait de leurs différents systèmes d'extraction, permettent des applications beaucoup plus générales soit sur des sédiments de nature cristalline, soit sur des sédiments amorphes de faible filtrabilité, donnant des couches très minces, mais éliminables facilement par ficelles ou par rouleaux.

On constate que la dimension, la répartition granulométrique et la structure des particules à retenir sont des éléments primordiaux car ils dépendent :

- la compressibilité du gâteau formé sur le filtre ;
- la perméabilité qui conditionnent, elles-mêmes :
- le taux de production des appareils, c'est-à-dire le débit spécifique de filtration et donc la grandeur de la surface filtrante nécessaire ;
  
- la perte de charge ou résistance du gâteau à l'écoulement du liquide, c'est-à-dire à la fois les forces devant être utilisées pour vaincre cette résistance (vide ou pression) et la longueur du cycle de filtration. En effet, de grosses particules à structure cristalline, réparties dans un champ granulométrique étroit, permettront, généralement, d'obtenir un gâteau de forte épaisseur offrant une faible résistance à l'écoulement du liquide. Par contre, si la courbe granulométrique fait apparaître, à côté de ces mêmes particules, une proportion importante de fines, celles-ci colmateront rapidement d'abord les pores du gâteau puis le support filtrant, entraînant ainsi une forte résistance du système, et donc un faible débit et des cycles courts. Dans le premier cas, la filtration pourra, après étude des autres critères de choix, relever d'un filtre rotatif sous vide ou monoplaque sous pression ; dans le second cas, on sera conduit, vraisemblablement, à envisager l'utilisation d'un filtre sous pression, avec utilisation d'adjuvants.

### **1.10 Amélioration de la filtrabilité**

En même temps que l'on définit les caractéristiques du produit, on doit toujours rechercher la possibilité éventuelle d'améliorer le rendement des appareils et d'optimiser le procédé :

- a) en modifiant les phases, par actions :
  - sur la température : une augmentation de la température diminuera la viscosité et augmentera le débit de filtration ;
  - sur le solide : grossissement des particules, emploi de flocculants, décantation préalable, etc. ;

- sur le pH : en modifiant ainsi les caractéristiques physiques de l'une ou l'autre des phases ou des deux ;

b) en modifiant les caractéristiques du gâteau, par un apport continu d'adjuvants, qui, en augmentant la porosité et en diminuant la compressibilité du gâteau, influera directement sur la perméabilité et permettra d'améliorer à la fois la vitesse et la durée de filtration ;

c) en combinant plusieurs appareils, par exemple préfiltration plus grossière en protection de filtres à membranes, permettant ainsi d'augmenter la durée de vie de ces derniers [24].

## **CHAPITRE 2. THEORIE DE LA FILTRATION ET DESHYDRATATION MECANIQUE**

### **2.1 But de la filtration**

Suivant la proportion de solides en suspension dans le préfilt (solution à filtrer), on distingue deux types de filtrations :

- soit une clarification de liquide lorsqu'il contient, en suspension, une très faible quantité d'impuretés solides ou colloïdales ;
- soit une rétention ou extraction de solides lorsque la proportion de solides en suspension atteint une certaine valeur, chacune des deux phases, solide ou liquide, pouvant être récupérée pour un traitement ultérieur ou rejetée.

Il faut mentionner également les filtrations dites de dégrossissage et de sécurité :

- la première a pour but d'éliminer des impuretés grossières (quelques centaines de microns), contenues en très faible quantité dans le liquide ; on l'utilise soit en prétraitement avant une filtration plus poussée (dégrossissage avant filtration sur cartouches ou sur membranes), soit en protection d'appareils (échangeurs, pompes, etc.) ou de circuits ;
- la seconde est utilisée pour retenir des impuretés pouvant se trouver accidentellement dans un liquide déjà propre (par exemple : filtration d'huile de table avant embouteillage).

### **2.2 Clarification**

On appelle clarification l'élimination d'une quantité de solides relativement faible, ou de colloïdes, en suspension dans un liquide. On considère généralement cette quantité comme devant être inférieure à une valeur comprise entre 0,10 et 0,15 % (en masse). Cette opération est effectuée :

- soit pour obtenir un liquide final commercialisé, propre, clair, brillant ou stérile ;
- soit pour faciliter des traitements ultérieurs de la liqueur et améliorer leur rendement (réaction, évaporation, échange d'ions, etc.) ;

— soit pour protéger des installations contre l'usure mécanique. La première démarche de toute étude de filtration doit consister à préciser le degré de clarification que l'on veut atteindre et qui dépend exclusivement de l'utilisation ultérieure du produit.

## 2.3 Extraction

Dans le cas de concentration de solides supérieure à une valeur comprise entre 0,10 et 0,15 %, l'objectif de la filtration consiste nécessairement à :

- récupérer le solide et éliminer le liquide (récupération de métaux lourds en hydrométallurgie) ;
- récupérer le liquide et éliminer le solide (terres de traitement en huilerie, carbonate de calcium dans les jus de sucrerie) ;
- récupérer les deux phases (moûts d'antibiotiques) ;
- éliminer les deux phases (eaux résiduaires) ; le choix de l'opération étant conditionné par la valeur respective des phases.

L'objectif de la filtration étant une opération dans laquelle des particules solides insolubles sont séparées d'une suspension liquide appelée pulpe; en contactant la pulpe avec un côté du milieu filtrant. En présence de certaines forces motrices, le milieu filtrant permet au liquide de circuler à travers les canaux capillaires et de retenir les particules solides sur sa surface. Selon le mécanisme d'arrêt et d'accumulation de particules solides, le procédé de filtration peut être divisé en deux classes: filtration en profondeur et filtration sur support [24].

La filtration en profondeur est connue sous différents termes tel que la clarification et l'ultrafiltration (lorsque les particules à récupérer sont très petites).

La filtration en profondeur est généralement utilisée lorsque la teneur en solides dans la suspension est très faible. La plupart des opérations de filtration liquide optent pour le mécanisme de filtration sur support.

Dans cette méthode, les solides filtrés sont introduits à l'amont du milieu filtrant. Dans la plupart des cas, le côté amont est à une pression plus élevée (au-dessus de la pression atmosphérique à l'atmosphérique), tandis que le côté aval est à une pression inférieure (atmosphérique ou sous-atmosphérique); Les particules dont le diamètre est supérieur au diamètre des pores du milieu

filtrant sont stoppées à sa surface. Tandis que les particules dont le diamètre est inférieure à celui des pores pénètrent à travers le milieu filtrant et peuvent bloquer complètement les pores du milieu ou adhérer à ces parois, réduisant ainsi progressivement le diamètre interne des pores. Lors de la filtration, les particules retenues sur la surface du milieu filtrant forment un gâteau d'une épaisseur croissante [25].

Ce gâteau va se comporter comme le milieu filtrant réel. À la fin de l'opération de filtration découlera un gâteau contenant du filtrat piégé dans le vide entre les particules. Dans de nombreux cas, où la récupération des solides est exigée, il est impératif que l'humidité soit aussi faible que possible.

## 2.4 Aspects théoriques de la filtration sur support

### 2.4.1 Définition de la résistance spécifique réelle et apparente.

La rationalisation d'un écoulement liquide à travers un gâteau de filtration déposé sur un milieu filtrant [26] est définie par l'équation de Darcy:

$$Q = \frac{dv}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu R} \quad (1)$$

Où,  $v$  est le volume de liquide par unité de surface,  $t$  est le temps,  $\Delta p$  est la différence de pression totale à travers le gâteau et le milieu filtrant et  $\mu$  est la viscosité dynamique du filtrat.

La résistance totale à l'écoulement du gâteau et du milieu filtrant  $R$  est définie par cette équation. Si l'écoulement ( $dv / dt$ ) est constant à travers la profondeur du gâteau et du milieu filtrant, alors on peut déduire que la résistance totale  $R$  est égale à la somme de la résistance du gâteau  $R_c$  et du milieu filtrant  $R_m$ .

Alors ;

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(R_c + R_m)} \quad (2)$$

Rc n'est pas une constante, car au fur et à mesure que la filtration se déroule, l'épaisseur du gâteau augmente et sa résistance à l'écoulement augmente également. Cependant, plutôt que d'utiliser l'augmentation de l'épaisseur du gâteau en tant que mesure de l'augmentation de la résistance, il est préférable alors de considérer la masse de solides secs dans le gâteau. Si w est la masse de solides secs dans le gâteau par unité de surface de filtration, alors Rc peut être exprimé en fonction de ceci et l'équation (2) deviendra :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\Delta p}{\alpha \mu w + \mu R_m} \quad (3)$$

Cette équation détermine la résistance spécifique  $\alpha$ . En termes physiques, c'est la résistance d'un gâteau ayant un poids unitaire de solides secs par unité de surface. La chute de pression totale  $\Delta p$  peut être divisée en deux parties:

- $\Delta p_c$  la différence de pression dans le gâteau
- $\Delta p_m$  la différence de pression dans le milieu filtrant.

Par conséquent,  $\Delta p = (\Delta p_c + \Delta p_m)$ , on peut démontrer tout simplement que la proportion de  $\Delta p$  qui se produit dans le gâteau est liée à la résistance. Elle est donnée par l'équation suivante:

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p} = \frac{R_c}{R_c + R_m} = \frac{R_c}{R_c + R_m} \quad (4)$$

Ceci indique que si la résistance du milieu est nulle, la totalité de la chute de pression se produit dans le gâteau. D'autre part, si la résistance du milieu est relativement élevée, lors du colmatage du filtre ou toile, alors la chute de pression à travers le gâteau  $\Delta p_c$  n'est qu'une petite fraction de la pression totale disponible  $\Delta p$ . Cette propriété des variations de la résistance spécifique du médium modifiant la chute de pression à travers le gâteau peut avoir un effet important sur les propriétés des gâteaux compressibles.

En supposant que la résistance du milieu filtrant est nulle (égale à zéro), l'équation (3) devient :

$$\alpha = \Delta p \left( \frac{1}{\mu} \frac{1}{w} \frac{1}{dv/dt} \right) \quad (5)$$

La résistance spécifique peut être définie d'une manière facile à visualiser dans les termes pratiques [27]. C'est la pression nécessaire pour produire une vitesse d'écoulement unitaire à travers un gâteau

ayant un poids unitaire de solides secs par unité de surface lorsque la viscosité du liquide est l'unité. Ainsi, pour toute valeur donnée de  $\mu$  et  $w$ , plus la résistance spécifique est élevée, plus la pression est nécessaire pour produire un débit donné ( $dv / dt$ ).

### 2.4.2 Gâteaux incompressibles

Puisque  $w$  n'est pas une quantité facilement mesurable, pour utiliser l'équation (3) à des fins pratiques,  $w$  est mis en termes de  $v$ , le volume de filtrat par unité de surface, qui définit  $c$ , en utilisant l'équation suivante:

$$w = cV \quad (6)$$

A partir de cette définition,  $c$  est le poids des solides secs déposés sur le gâteau lorsqu'un volume unitaire de filtrat est obtenu. C'est un paramètre critique car il détermine le poids des solides dans le gâteau lorsqu'un volume de filtrat donné a traversé le gâteau. Par conséquent, par substitution de l'équation (6), l'équation (3) devient:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu} \frac{1}{(\alpha cV + R_m)} \quad (7)$$

Comme  $\Delta p$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$ ,  $c$  et  $R_m$  sont tous constants, par intégration de l'équation (7), on aboutit à:

$$\frac{t}{v} = V \left( \frac{\mu \alpha c}{2 \Delta p} \right) + \frac{\mu R_m}{\Delta p} \quad (8)$$

Le terme entre parenthèses est la pente de la courbe  $(t / v)$  versus  $v$  est utilisé pour le calcul de la résistance spécifique dans le test Buchner-Entonnoir.

### 2.4.3 Gâteaux compressibles

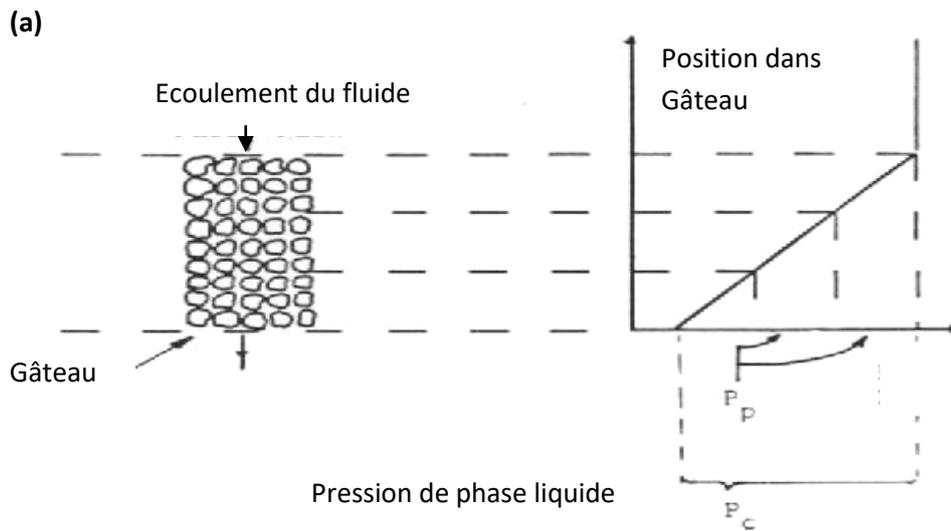
Afin de comprendre les équations utilisées pour les gâteaux compressibles, il est nécessaire de prendre en considération l'action des forces agissantes sur les particules composant le gâteau, à travers la profondeur du gâteau [28]. Cela sera considéré d'abord pour un gâteau incompressible

puis pour un gâteau compressible, un gâteau de filtration idéal avec des particules rigides de même taille reposant l'une sur l'autre est représenté par la figure 2a. Il en découle, s'il n'y a pas un écoulement de fluide, et que la masse des particules et leur flottabilité sont négligeables, Il y aura des forces de compression nulles aux points de contact entre les particules. Si le fluide s'écoule maintenant à travers le gâteau avec une chute de pression  $\Delta p$ , il y aura un gradient de pression à travers le gâteau, comme le montre la figure 2a. Une particule située dans la couche supérieure du gâteau subira l'action d'une force dirigées vers le bas proportionnelle à  $\Delta p$ , c.à.d. une partie de la différence de pression totale qui est absorbée lors du déplacement du liquide autour de la particule. Cette force sera transmise à la particule ci-dessous. Cette particule recevra cependant, en plus de la force de la particule ci-dessus, une force supplémentaire, de même amplitude, due à la différence de pression du liquide autour d'elle-même. Cette double force est transmise à la particule suivante ci-dessous. Ceci est répété au fur et à mesure que les particules se déplacent vers le bas à travers le gâteau; ainsi les forces entre les particules augmentent. Si le gâteau est incompressible, ces forces ne modifieront pas la structure du gâteau et le gradient de pression sera linéaire comme le montre la figure 2a. Si les particules se déforment sous les forces appliquées, alors les particules de la couche supérieure du gâteau se déforment le moins car elles ne subissent qu'une faible force, et les particules situées dans la couche inférieure du gâteau se déforment le plus car elles transmettent la force maximale (Figure 2b). La déformation des particules va réduire le vide entre les particules composant le gâteau, ce qui entrainera donc une augmentation de la résistance spécifique et elle est plus prononcée dans les régions où la déformation est la plus grande. Les régions les plus comprimées absorberont donc une proportion accrue de la différence de pression totale, ce qui signifie qu'elles seront encore plus comprimées. Quantitativement les prédictions de cette théorie sont que, la teneur en solides du gâteau devient progressivement plus grande au fur et à mesure que l'on descend à travers le gâteau. Même dans une filtration à pression constante normale à travers un Buchner, les variations qui se produisent dans un gâteau compressible sont assez complexes. Au début, la résistance du milieu contrôle le débit d'écoulement, et la totalité de la différence de pression prend place dans le milieu. La résistance du gâteau commence à exercer une influence sur la vitesse d'écoulement lors de la formation du gâteau. A titre d'exemple, si la résistance du gâteau est égale à la résistance du milieu, le débit sera la moitié de celui avec la résistance du milieu seul. Dans ces conditions la moitié de la chute de pression se produira dans le milieu et la moitié dans le gâteau, et le gâteau lui-même ne sera comprimé que par la partie de la chute de pression se produisant dans le gâteau. Au fur et à mesure que le gâteau continue de s'accumuler, la résistance augmente et un point est atteint lorsque la résistance du gâteau est de 99 fois la résistance du milieu et que 99% de la chute de pression totale sera absorbée par le gâteau. Une accumulation

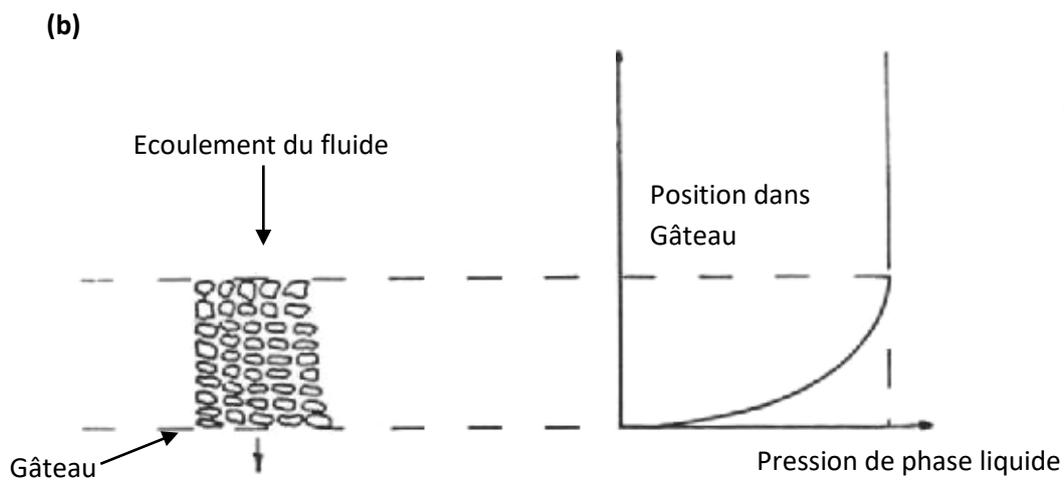
supplémentaire de gâteau va ensuite continuer à augmenter la résistance, mais la chute de pression à travers le gâteau augmentera légèrement, passant progressivement du niveau de 99% à 100% de la chute de pression totale. Sous ces circonstances, il pourrait être raisonnable de supposer que la résistance du milieu est négligeable. Ainsi, au fur et à mesure de la filtration, une particule particulière recevra régulièrement augmentation de la charge des particules ci-dessus, et deviendra de plus en plus déformée, et à ce moment la concentration en solides augmentera, avec déplacement du liquide.

Sjenitzer montre que, bien qu'il y ait un gradient de concentration de solides à travers le gâteau, la concentration moyenne de solide reste constante, alors que le gâteau s'accumule. En outre, la résistance spécifique moyenne  $\bar{\alpha}$  est une constante, c'est-à-dire indépendante de l'épaisseur du gâteau. Cependant, ces conditions ne sont valables que si la perte de charge à travers le gâteau est constante. Même en pratique, la pression de filtration constante  $P$ , cette condition n'est jamais complètement satisfaite, puisque la résistance inhérente du milieu absorbera toujours une partie de la perte de charge. Cependant, lorsque le gâteau est suffisamment épais, la résistance du milieu peut être considérée comme négligeable.

En tant que tel, dans les tests réalisés en utilisant l'entonnoir Buchner dont l'objectif est de mesurer  $\alpha_{ap}$ , l'élimination initiale du filtrat est exclue. C'est afin de se conformer aux critères que la résistance du milieu, comparé à celui du gâteau, est négligeable. Une autre condition inhérente à ce traitement [29] est que chaque partie du gâteau se déforme instantanément à une teneur en solides en équilibre avec le régime de pression à l'intérieur de celui-ci. En outre, il est supposé que la quantité d'eau pressée du gâteau pendant la filtration est négligeable par rapport au filtrat total circulant dans le gâteau. Ces restrictions ont été soulignées ici car il est important de les garder à l'esprit lors de l'application de la théorie aux problèmes pratiques. Donc, pour le cas où  $R_m$  est négligeable. L'équation différentielle pour la filtration d'un gâteau compressible est déduite de l'équation (7).



(a) Gâteau incompressible



(b) Gâteau compressible

Figure 8. Différence de pression à travers un gâteau de filtration idéale [30].

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu R} \frac{1}{\alpha c V} \quad (9)$$

C'est fonction des concentrations en solides de la suspension et du gâteau, et peut être considérée comme constante, pour une suspension et une pression de filtration particulière, puisque  $R_m$  est négligeable,  $\alpha$  peut aussi être considéré comme constant si  $\Delta p$  est constant. D'où par l'intégration de l'équation (9) nous arrivons à

$$\frac{t}{v} = \frac{\mu \alpha c}{2 \Delta p} V \quad (10)$$

Si  $V$  est le volume du filtrat obtenu à travers la surface filtrante  $A$ , on aura

$$\frac{t}{v} = \frac{\mu \alpha c}{2 A \Delta p A} V = BV \quad (11)$$

Ainsi, une ligne droite est obtenue;  $t/v$  est tracée en fonction de  $v$ , et à partir de la pente  $B$ , alors  $\alpha$  peut être calculé si  $\mu$ ,  $\Delta p$ ,  $A$  et  $c$  sont connus.

Cependant, lors de l'essai subséquent utilisant l'entonnoir Buchner, la teneur en solides du gâteau pendant sa formation n'est pas mesurée; et ainsi la valeur de la résistance spécifique n'est pas la résistance spécifique réelle  $\alpha$ , mais une valeur apparente; dont la définition dépend de l'approximation utilisée pour " $c_1$ " [30], la quantité de solides secs en suspension par unité de volume de matière évaporable qui est représentée par l'eau est égale à " $c$ " seulement dans la condition hypothétique où il n'y a pas de matière évaporable dans le gâteau. Il en découle que la résistance spécifique apparente " $\alpha_{ap}$ " n'est pas indépendante de la teneur en solides de la suspension comme " $\alpha$ " devrait théoriquement l'être.

La relation entre " $c$ " et " $c_1$ " est représentée par les équations suivantes:

$$c = \frac{w_e w_s \rho_l}{w_e - w_s} \quad (12)$$

Et

$$c_1 = \frac{w_s \rho_l}{(1 - w_s)} \quad (13)$$

Où ;

$w_c$  et  $w_s$  sont la masse moyenne des solides en suspension secs par unité de masse du gâteau et la masse moyenne de la pulpe,  $\rho_f$  et  $\rho_l$  sont la densité du filtrat et la densité du liquide dans la suspension.

Par conséquent, par substitution dans l'équation (11) pour  $c$  et  $\alpha$ , on obtient la résistance spécifique apparente.

$$\alpha_{ap} = \frac{2 A^2 \Delta p B}{c_1 \mu} \quad (14)$$

Où  $c_1$  est la composition de la pulpe,  $A$  est la surface de la section transversal du filtre,  $\mu$  est la viscosité de l'eau,  $\Delta p$  est la différence de pression de filtration, et  $B$  est le gradient de la courbe  $t / v$  versus  $v$ .

## 2.5 Facteurs affectant la résistance du milieu filtrant

Le milieu filtrant est l'essence du filtre, en le considérant de manière composite avec son support perméable, et ses solides filtrés, c'est là où se déroule tout le travail du procédé de filtration [31]. Les solides étant collectés du côté de l'alimentation du milieu, et le filtrat étant forcé à travers le milieu et emporté de l'autre côté. La résistance offerte par le milieu filtrant dépendra de :

- La structure du média filtrant.
- La distribution granulométrique et la concentration dans la suspension.
- Le taux de dépôt des particules.
- La nature des forces motrices.

La structure interne d'une grande variété de milieux filtrants a été étudiée par Grace. Il a appliqué les méthodes de perméabilité et de pression des bulles pour mesurer le rayon des pores et la distribution de la taille des pores du milieu et les a reliées aux variables de construction caractéristiques des milieux. Les performances de ces milieux filtrants ont ensuite été déterminées par la filtration d'une suspension très diluée contenant des particules sphériques de distribution granulométrique connue. Les lois de filtration qui ont été appliquées pour étudier la filtration avant la formation du gâteau macroscopique ont été proposées par Herman et Bredee [32]; et des zones de filtration "à blocage - standard" se sont produites, alors les particules de solides adhèrent aux parois du pore et réduisent progressivement le diamètre interne de ce dernier. On distingue généralement que la pression initiale de filtration et la concentration de solides ont une influence considérable sur la résistance effective

du milieu. Plus la concentration de la suspension sera grande, plus la distance moyenne entre les particules sera faible, et plus la tendance des particules à être attirées dans les lignes de courant dirigées vers des pores ouverts seront faible. Les particules en suspension concentrée ont tendance à se répartir assez uniformément sur la surface du filtre et à former des ponts. En conséquence, les suspensions de forte concentration donnent des gâteaux de faible résistance que ceux formés à partir de suspensions diluées. La nature des forces motrices peut également affecter la vitesse de filtration. Il a été observé que pendant la filtration continue sous vide, en raison de la pression différentielle négative imposée à la suspension, les bulles de gaz se dégagent soit de l'air dissous dans le liquide ou absorbées sur des surfaces solides ou piégées dans les fines fissures sur la surface solide du gâteau. Le mouvement des bulles à travers les canaux du milieu filtrant est restreint et, par conséquent, il empêche l'écoulement du filtrat à travers ces canaux. Ce phénomène affecte la résistance offerte par le média filtrant, mais la résistance du média filtrant passe d'une valeur très faible à une valeur constante sur des périodes de filtration initiales très courtes.

## **2.6 Amélioration du taux de filtration**

Comme mentionné dans les sections ci-dessus, le taux de filtration peut être amélioré de plusieurs manières. Le taux de filtration est:

- inversement proportionnel à la viscosité du filtrat,
- directement proportionnel au gradient de pression hydraulique appliqué, et
- inversement proportionnel à la résistance offerte par le gâteau.

Ces paramètres et leur effet sur la filtration sont considérés ci-dessous.

### **2.6.1 Viscosité**

La diminution de la viscosité du filtrat tend à augmenter la vitesse de filtration [33]. Ceci peut être réalisé en chauffant la suspension, mais ceci peut ne pas être économiquement réalisable lorsque de grandes quantités de suspension doivent être traitées. La viscosité peut également être diminuée en diluant la suspension par un liquide moins visqueux.

### **2.6.2 Gradient de pression hydraulique**

Plus élevée est la chute de pression à travers le gâteau de filtration, plus élevé sera le taux de filtration; mais il existe une limite supérieure du gradient de pression dans la filtration sous vide en

raison de la nature du procédé. La limite supérieure sera fixée par l'impact économique et la résistance du gâteau de filtration. Comme mentionné précédemment, lorsque le gradient de pression augmente, la résistance du gâteau de filtration augmente également, et dans certains cas, une diminution du taux de filtration est observée avec une augmentation de la pression. Une fois qu'une fissure est formée, toute augmentation supplémentaire de la pression n'influe guère sur le taux de filtration.

### **2.6.3 Réduction de la résistance au gâteau**

La résistance offerte par le gâteau dépend de sa structure, et peut être diminuée en augmentant la porosité du gâteau. Plusieurs procédés peuvent être utilisés afin d'atteindre une porosité optimale [34]:

#### **2.6.3.1 Adjuvants de filtration**

Les adjuvants de filtration sont utilisés de deux manières:

- en pré-enduisant le milieu filtrant avec une précouche, et
- par addition d'un adjuvant de filtration tel que de la terre de diatomées, ou matériau poreux inerte à la suspension.

Les adjuvants de filtration fournissent une structure de gâteau poreuse, et donnent des gâteaux de texture plus ouverte qui permet un taux plus élevé d'écoulement, une plus grande rigidité, et une pression plus élevée de filtration. La présence des adjuvants de filtration réduit la résistance spécifique du gâteau et entraîne également la formation d'un gâteau plus épais. Cependant, si l'on utilise trop d'adjuvant de filtration, l'augmentation de l'épaisseur du gâteau tend à contrebalancer ces avantages.

#### **2.6.3.2 Dimension des particules**

Si les particules formant le gâteau sont de grande dimension, le gâteau formé aura des pores plus grands et offrira donc moins de résistance, ce qui améliore le taux de filtration. La taille des particules peut être augmentée à l'aide de la coagulation ou de la floculation par addition de produits chimiques, ou en changeant le pH de la suspension. Les suspensions floculées donnent naissance à

un gâteau plus poreux, mais elles augmentent également la compressibilité du gâteau. La variation pH aiderait seulement dans les cas où il mène à la précipitation des particules solides.

### **2.6. 3. 3 Effet de concentration solide**

L'effet de la concentration solide de la suspension sur le taux de filtration est complexe. L'augmentation de la concentration de la suspension peut réduire la résistance spécifique du gâteau en raison de la formation d'un gâteau plus uniforme en raison des répartitions régulières des particules. Ce qui provoquera une augmentation de la filtrabilité. D'autre part, une augmentation de la concentration en solides se traduira par un dépôt accru de particules sur le support filtrant et donc entraînera la formation de gâteaux plus épais, à mesure que la longueur à travers laquelle se déplace le filtrat augmente, la filtrabilité va diminuée considérablement.

## **2.7 Aspect théorique de la déshydratation mécanique**

Les opérations de déshydratation (déliquorage) ont pour but d'enlever une partie du filtrat résiduel en diminuant l'humidité du gâteau [35]. A cet effet, dans un nombre limité de cas, un accroissement de la pression en fin de filtration suffit. Cependant bien souvent les caractéristiques recherchées imposent l'utilisation de techniques spécifiques. Les différentes techniques classiquement utilisées, seules ou combinées, qui n'impliquent pas de changement de phase du liquide, sont les suivantes.

— Drainage:

- soufflage de gaz comprimé ou d'air ou de vapeur ;
- succion à l'air ;
- centrifugation ;
- vibration ;
- électro - osmose.

— Expression ou pressage hydraulique :

- consolidation par augmentation de la pression de filtration ;
- utilisation d'un liquide de lavage forcé à contre - courant ;
- perméation de liquide visqueux.

— Expression mécanique:

- par presses hydrauliques;
- par membranes de compression;
- par presses à courroies ou à rouleaux;
- par presse à vis.

Elles peuvent être rangées en deux classes, suivant que :

— les forces de désaturation sont appliquées sur le liquide par effet centrifuge, soufflage ou succion d'air. Ces forces ont un faible effet sur la structure du gâteau et la porosité reste constante [36]. Seule une diminution de la saturation est recherchée. Le terme de « désaturation » convient pour désigner ces méthodes;

— les forces mises en œuvre tendent à réduire le volume des vides au sein du gâteau et modifient donc significativement sa structure. Le volume de liquide contenu dans la masse poreuse diminue, mais le réseau de pores reste saturé. Cette action de pressage ou « d'expression » est obtenue soit par compression mécanique sur des presses ou des filtres presseurs, soit en augmentant la pression de filtration en fin d'opération.

Les méthodes qui mettent en œuvre un drainage hydrodynamique (gravitaire ou forcé) ne sont efficaces que lorsque la structure du gâteau est « ouverte », ce qui impose une taille moyenne minimale pour les particules constituant la masse poreuse. La limite de taille peut être fixée aux environs de  $50 \mu\text{m}$  et la valeur de la perméabilité est comprise entre  $10^{-10}$  et  $10^{-15} \text{m}^2$ . Lorsque le drainage a lieu uniquement sous l'effet de la pesanteur, les particules doivent être beaucoup plus grosses, de l'ordre de  $500 \mu\text{m}$ . L'exposé sera limité au drainage par de l'air, qui est une technique très utilisée pour déshydrater le gâteau sur le filtre lui-même dans le cas des filtres sous vide (rotatif ou à bande) et des filtres presses. L'emploi de ces opérations complémentaires à la filtration revêt une importance croissante, qu'il s'agisse de produire des solides de plus en plus purs, de récupérer le plus possible de soluté ou de diminuer les coûts de transport et de séchage thermique [37].

### **2.7.1 Classification de l'eau dans le gâteau de filtration**

Afin de retirer l'eau d'un gâteau de filtration, il est important de connaître les différents "types" d'eaux contenues dans ces gâteaux. Ils peuvent être classés en deux types:

- celle qui peut être éliminé par pression, et
- celle qui est maintenue au point de contact entre les particules, on l'appelle aussi eau pendulaire.

La plus grande teneur en eau des gâteaux de filtration est habituellement due au fait que les plus petits capillaires ne sont pas complètement égouttés avant le passage de l'air à travers de plus grands capillaires, succédant ainsi au drainage de l'eau [38]. Par conséquent, il est évident que si l'élimination de toute l'eau pendulaire pouvait être effectuée, une réduction de la teneur finale en humidité du gâteau serait atteinte. La condition dans laquelle l'eau est contenue dans un lit de particules a été subdivisée d'après les types représentés par la Figure 9.

- Capillaires: c'est la situation où l'eau remplit complètement tous les vides du lit.
- Funiculaire: dans cette situation, tous les vides du lit ne sont pas pleins, mais une pellicule continue d'eau recouvre la surface de la particule.
- Pendulaire dans cette situation, l'eau n'est présente qu'au point de contact entre les particules solides.

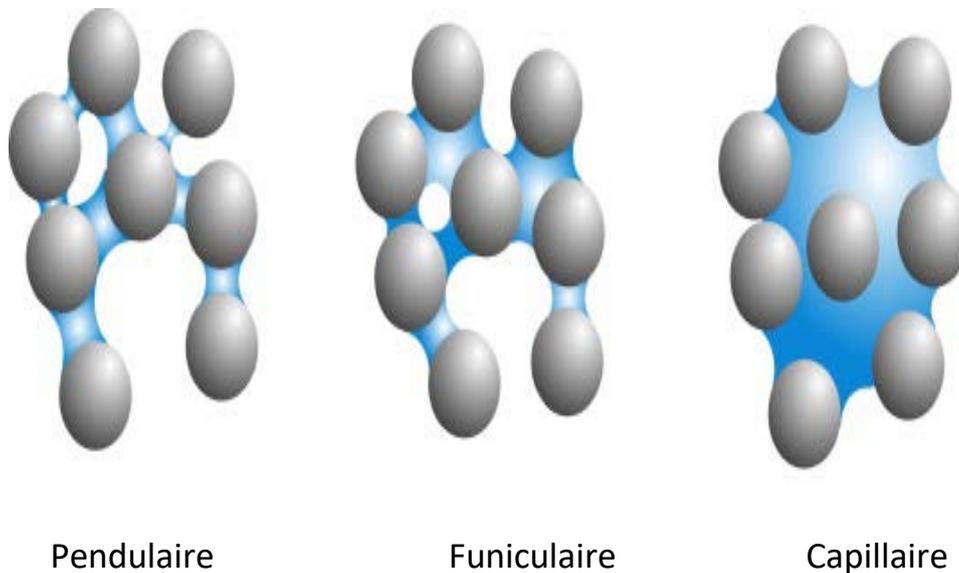


Figure 9. Classification des types d'eau contenue dans un lit de particules [39].

## 2.7.2 Théorie de Déshydratation par déplacement à air

Le soufflage de gaz comprimé dans le gâteau de filtration est une méthode de déshydratation pratiquée dès que le milieu est suffisamment perméable (perméabilité de  $10^{-10}$  à  $10^{-15}$  m<sup>2</sup>), car l'opération se déroule sur le filtre lui-même, ce qui réduit les investissements [40]. La prévision des performances nécessite alors de déterminer :

- l'équilibre de saturation atteint en fin d'opération;
- le débit de gaz consommé;
- la prévision des profils d'humidité dans le gâteau.

## 2.8 Équilibre de saturation

### 2.8.1 Saturation et humidité

La saturation  $S$  en un fluide donné dans le milieu poreux (de porosité  $\varepsilon$ , de masse volumique du solide  $\rho_s$ ) est le rapport entre le volume occupé par ce fluide (un liquide, par exemple, de masse volumique  $\rho_l$ ) et le volume des pores :

$$S = \frac{1 - \varepsilon \frac{\rho_s}{\rho_l} H}{\varepsilon \frac{\rho_s}{\rho_l} (1 - H)} \quad (15)$$

L'humidité  $H$  est définie comme étant le rapport de la masse d'eau retenue à la masse totale. Saturation et humidité sont donc des grandeurs complémentaires. Dans le cas d'un gâteau rigide, la valeur de la saturation  $S$  est la plus utile, puisqu'elle varie de 1 à 0 et ne dépend pas de la masse volumique du solide. Ainsi  $S$  permet une comparaison directe de l'efficacité d'une opération de déshumidification pour deux solides différents. Par contre, dans le cas de gâteaux compressibles, l'humidité a plus de signification, puisque le volume des pores varie au cours de la compression [41].

### 2.8.2 Fluide mouillant et non mouillant dans un milieu poreux

L'interface entre deux fluides non miscibles en contact dans un milieu poreux (de tension superficielle  $\sigma$ , d'angle de mouillage  $\theta$ ), forme la surface la plus petite possible. Cela engendre une différence de pression de part et d'autre de l'interface, ce qui induit une courbure.

**La loi de Laplace** donne l'excès de pression totale à la traversée du ménisque dénommé pression capillaire :

$$p_c = 2\sigma(\cos\theta)(1/R) \quad (16)$$

$p_c$  Pression capillaire

$\theta$  Angle de contact

$\sigma$  Tension superficielle du liquide

R Rayon du pore

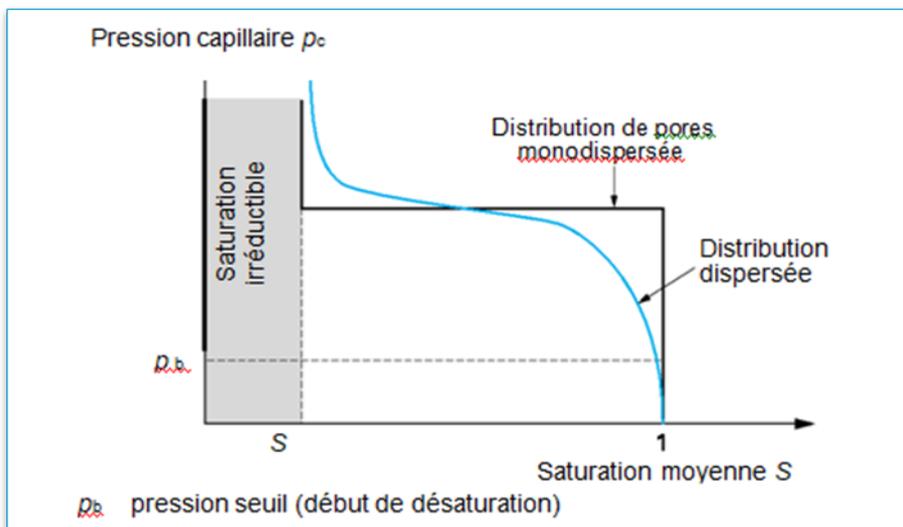


Figure 10 – Représentation schématique d'une courbe de pression capillaire [42].

Dans le cas présent, les eaux mères représentent le fluide mouillant et l'air est le fluide non mouillant. Le fluide mouillant est retenu dans les pores par capillarité et, pour le déplacer, il faut exercer une pression supérieure à la pression capillaire  $P_c$ . Le liquide s'écoule sous l'effet d'une pression effective inférieure à la pression appliquée :

$$\Delta P_{effective} = \Delta P \text{ appliquée} - P_c \quad (17)$$

Le milieu poreux, initialement complètement saturé, commence à être désaturé à partir d'une valeur de pression seuil  $P_b$  des dépressions (Figure 10) permettent d'expulser progressivement le liquide. Pour chaque valeur de pression, le volume de liquide recueilli est mesuré et à chaque valeur de la

saturation correspond une valeur de la pression. En effet, si pour

$R > \frac{2\sigma}{P_c}$  le pore est vidé;

Par contre pour

$R < \frac{2\sigma}{P_c}$  le pore reste plein.

La forme caractéristique d'une courbe de pression capillaire classique est représentée sur la figure 10. On remarque qu'à partir d'une certaine valeur de saturation, l'augmentation de pression ne permet plus de désaturer le milieu poreux :  $S_{I\infty} < S < 1$

$S_{I\infty}$  est appelée saturation « irréductible » en fluide mouillant. Elle est assimilée à l'état pendulaire, zone du gâteau où le liquide se trouve piégé à l'intérieur des pores [43] à [44].

Ainsi, en appliquant une pression donnée à un lit de particules, il apparaît que la saturation résiduelle dépendra des facteurs suivants:

- l'angle de contact entre les trois phases (solide, l'eau et l'air),
- la tension superficielle du liquide.

Bien que l'équation d'ascension capillaire ne soit pas rigoureusement applicable au processus de déshydratation en raison des interconnexions des pores et de l'écoulement de deux fluides (Air et eau), à travers le lit simultanément, il souligne l'importance de la tension de superficielle et de l'angle de contact sur le processus de déshydratation. En considérant davantage l'équation (16), il devient évident qu'en réduisant la tension de surface de l'eau, conjointement avec l'augmentation de l'angle de contact à la surface solide, il serait possible d'enlever plus d'eau du lit. En pratique, il est possible de réduire la tension de surface de l'eau par l'addition d'impuretés. Cependant, une telle action entraîne souvent une diminution de l'angle de contact, ce qui est contre-productif. Cependant, il est possible d'augmenter l'angle de contact sans aucun effet négatif sur la tension de surface, en ajoutant des réactifs chimiques dans le système. A ce stade, les réactifs qui se sont révélés efficaces dans le processus de déshydratation sont ceux qui sont hétéropolaires, avec un groupe alkyle organique non polaire (chaîne carbonée de longueur de 10 à 18) relié à un groupe polaire. La plupart des minéraux sont chargés électriquement et absorberont ainsi à leur surface des radicaux de charge opposée et dans le cas de la longue chaîne hydrocarbonée, les réactifs hétéropolaires absorberont le radical polaire à la surface s'il est de charge opposée au solide, présentant la longue chaîne hydrocarbonée à l'eau environnante.

Puisque les hydrocarbures sont naturellement hydrophobe l'action de la couche d'hydrocarbure qui se projette dans l'eau entrainera une augmentation de l'angle de contact et l'hydrophobicité de la particule, accompagné d'une augmentation de la tension interfaciale entre le minéral et l'eau (S / L), ces deux effets sont favorables à la déshydratation.

### 2. 8. 3 Système Solide - Gaz - Liquide

Considérant les forces agissant lors de la phase de déshydratation d'un lit de particules. La mouillabilité des particules minérales et les modifications de leur mouillabilité provoquées par l'adsorption sont généralement exprimées en termes de contact, défini comme l'angle  $\theta$ . L'angle de contact est l'angle mesuré dans la phase aqueuse, entre l'interface solide – liquide et l'interface liquide – gaz (figure 11).

L'angle de contact est lié à la tension interfaciale

$$\delta_{S/G} = \delta_{S/L} + \delta_{L/G} \cos \theta \quad (18)$$

Où

$\delta_{S/L}$  La tension interfaciale S, L et G étant le solide, liquide et gaz;

$\delta_{L/G}$  La tension interfaciale entre le solide et le gaz.

Si l'eau rétrécit dans l'orientation indiquée par la flèche de la figure 11, alors:

$\delta_{S/L} + \delta_{L/G} \cos \theta$  est supérieur à  $\delta_{S/G}$  et le film est étiré tel que  $\theta = 0$ ,

alors  $\delta_{S/G} < \delta_{S/L} + \delta_{L/G}$ .

Si nous définissons maintenant un coefficient d'étirement Y tel que:

$$Y = \delta_{S/G} - (\delta_{L/G} + \delta_{S/L}) \quad (19)$$

On remarque si Y est positif, le film s'étirera, et il disparaîtra si Y est négatif; qui dans ce cas est favorable à la déshydratation. Donc l'équation (18) deviendra :

$$\cos \theta = \frac{\delta_{S/G} - \delta_{S/L}}{\delta_{L/G}} \quad (20)$$

Afin d'augmenter l'angle  $\theta$ , Ceci peut être obtenu en modifiant la surface du solide et des interfaces, en optimisant l'interface  $\delta_{S/L}$  et en réduisant le  $\cos \theta$ , augmentant ainsi l'angle de contact, ce qui facilite la déshydratation..

Au lieu d'examiner les tensions interfaciales, le système peut être examiné en termes d'énergie [45]. considérer l'énergie d'adhésion  $\beta_A$ , qui est ce gain d'énergie quand un mètre carré de surface solide est mouillé par un liquide, la surface étant l'interface de phase avec un gaz; tandis que ce processus deux interfaces solide / gaz et liquide / gaz disparaît dans le mètre carré et une nouvelle interface solide / liquide est formée, qui se traduit par la dégagement d'énergie  $\Delta G$ , qui selon Dupré consiste en l'énergie interfaciale libre des deux interfaces précédentes et l'interface nouvellement formée, à savoir.

$$\Delta G = \delta_{S/G} + \delta_{L/G} - \delta_{S/L} \quad (21)$$

La même quantité d'énergie dégagée à l'adhésion et lors du mouillage doit être appliquée à nouveau lorsque le liquide doit être éliminé de la surface minérale. Plus l'énergie requise est grande, plus l'adhérence entre le minéral et l'eau est forte, ce qui se traduit par une plus grande l'attraction entre les molécules solides et liquides. Une énergie d'adhésion minimale implique une déshydratation facile. Parce que les énergies interfaciales du matériau solide et  $\delta_{S/G}$  et  $\delta_{S/L}$  ne peuvent pas être mesurées directement. Il est impossible de calculer l'énergie d'adhésion du Dupré d'après l'équation (20). Cependant, l'angle de contact  $\theta$  offre un critère pour la grandeur de l'énergie d'adhésion et la valeur de l'énergie d'adhésion peut être établie en utilisant l'équation de Young - Dupré comme suit:

$$\Delta G = \delta_{L/G}(1 + \cos \theta) \quad (22)$$

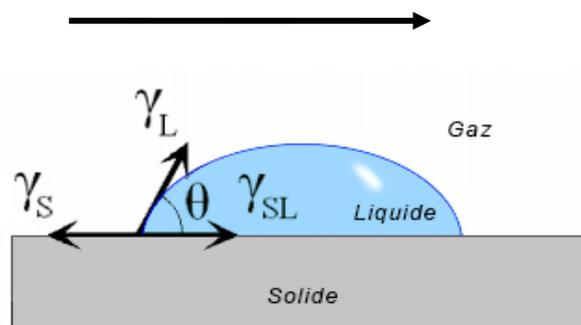


Figure 11. Diagramme des forces du système Liquide/Solide/Gaz [46].

Montrant que l'énergie d'adhésion diminue avec l'augmentation de l'angle de contact donnant lieu à une déshydratation optimale.

#### **2. 8. 4 Méthodes pratiques de déshydratation**

La déshydratation du gâteau de filtration par déplacement d'air est une méthode très couramment utilisée. Dans ce cas, le gâteau de filtration peut être considéré comme une matrice de particules solides dans un mélange liquide et gazeux. Par conséquent, ce mode d'élimination des liquides se réduit à un problème d'écoulement diphasique à travers un milieu poreux. Lorsque deux fluides s'écoulent à travers un milieu poreux, le fluide mouillant s'écoule sur la surface des solides et empêche ainsi le contact du second fluide, le fluide non mouillant, avec le solide. Cela est vrai tant qu'il y a un film de liquide sur la surface des particules. Il y a une quantité définie du liquide de mouillage retenu dans les capillaires, pour une chute de pression spécifiée sur le gâteau de filtration. La quantité de fluide retenue dépend d'un certain nombre de paramètres:

- taille des capillaires,
- gradient de pression du fluide non mouillant à travers les milieux poreux,
- tension interfaciale du fluide.

La rétention du fluide mouillant dans le lit poreux est associée à trois paramètres importants :

- La saturation est définie comme le rapport entre le volume des vides remplis de liquide mouillant et le volume total des vides.
- La saturation résiduelle est la fraction du volume total de vide occupée par le fluide résiduel, c'est-à-dire le fluide qui ne peut pas être éliminé par drainage sous le gradient de pression appliqué.
- La saturation réduite est la fraction du volume de vide disponible occupée par le fluide de mouillage, où le volume de vide disponible est le volume de vide total moins le volume occupé par le fluide de mouillage résiduel.

### **2. 8. 5 Amélioration de la déshydratation**

Le taux de déshydratation et la teneur finale en eau des tourteaux filtrants sont deux aspects importants de la déshydratation. Il est souhaitable d'avoir un taux élevé de déshydratation et une teneur en humidité approchant la teneur en humidité à l'équilibre.

Comme discuté ci-dessus, le taux de déshydratation est augmenté comme suit:

- les forces motrices augmentent,
- la perméabilité du milieu augmente,
- la viscosité du filtrat diminue,
- la surface du média filtrant augmente,
- l'épaisseur du gâteau diminue.

Cependant la saturation résiduelle diminuera avec:

- force motrice croissante,
- diminution de la tension superficielle du filtrat,
- augmentation de l'angle de contact.

Parmi ces facteurs, la force motrice et la surface du média filtrant seront dictées par les conditions du processus et les aspects économiques. L'épaisseur du gâteau sera déterminée par la géométrie du filtre et la concentration de solides dans la suspension. La perméabilité du lit est augmentée en ajoutant des flocculant à la suspension. Dahlstrom et Silverblatt [47] ont trouvé que la viscosité affecte la déshydratation plus que la tension superficielle. Une diminution significative de la teneur en humidité résiduelle du gâteau peut être observée en raison de la réduction de la tension superficielle. Lloyd et Dodds [47] sont arrivés à la conclusion que bien que la viscosité du liquide retenu dans le gâteau soit importante lorsque le+ temps de déplacement du liquide est faible, le filtrat ne peut pas être déplacé en soufflant ou en aspirant de l'air à travers le gâteau pour des particules inférieures à 50  $\mu\text{m}$ , car la pression de l'air dépassera une atmosphère. Pour les particules supérieures à 50  $\mu\text{m}$ , le déplacement du filtrat contenu dans les pores, par l'air est plus susceptible de conduire à une teneur en humidité plus faible. Un autre facteur qui affectera la déshydratation est l'angle de contact du filtrat dans les capillaires du gâteau (ceci est discuté dans la section 2.2.4).

Il ressort clairement des chapitres précédents que la filtration et la déshydratation sont des processus complexes. La méthode traditionnelle et la plus couramment utilisée pour déterminer La filtrabilité d'une suspension implique la conduite d'une série d'expériences de filtration utilisant un

entonnoir Büchner [48]. Ces tests sont divisés en deux sections, la filtration et la déshydratation. La première étape implique la filtration d'un volume donné de suspension, sous vide jusqu'à la formation d'un gâteau. L'étape suivante nécessite l'application de forces de désaturation au gâteau, pour déplacer le filtrat restant, piégé dans les pores. Dans la filtration sous vide, la déshydratation est induite par un déplacement d'air avec des forces hydrodynamiques, dans ce cas l'air est aspiré à travers le gâteau pour réduire sa teneur en humidité.

## **2.9 Cas d'étude expérimentale**

Le complexe sidérurgique d'El Hadjar a deux ateliers d'élaboration de l'acier I et II. L'aciérie à Oxygène I a été conçue durant les années 70 par les soviétiques tandis que l'aciérie à oxygène II a été réalisée par KAWASAKI une société japonaise en 1981.

### **2.9.1 Aciérie à Oxygène II**

En première phase, l'équipement de fabrication de l'acier était constitué de trois convertisseurs surmontés d'une hotte de refroidissement et d'un système classique de captation des gaz et poussières. Rapidement, il s'est avéré que le système de traitement des gaz et poussières installé en première instance était inefficace et cela s'est traduit par une forte pollution atmosphérique. Un énorme nuage composé de fines poussières était rejeté dans l'atmosphère, lors de chaque soufflage.

Afin de remédier à cette pollution les pouvoirs publics, on installés par l'intermédiaire de KAWASAKI, entreprise japonaise, un nouveau système de traitement des gaz et poussières sur les convertisseurs. Le système OG a été installé à l'aciérie à Oxygène I et plus tard, au vu de son efficacité il fut directement adopté par l'aciérie à Oxygène II.

### **2.9.2 Système OG**

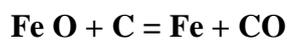
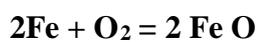
C'est un procédé qui associe à la fabrication de l'acier par soufflage d'Oxygène pur sur de la fonte liquide, la récupération du gaz CO afin de l'utilisé comme combustible. Généralement, on peut dire que simplement que le système OG est une usine à gaz qui surplombe le convertisseur. Cette méthode a été mise au point grâce à l'adaptation d'une jupe mobile sur la hotte de refroidissement des gaz et poussières provenant des convertisseurs lors de l'élaboration de l'acier. Le rôle principal de la jupe est d'empêcher l'air atmosphérique de s'engouffrer dans la hotte fixe pendant la production du gaz CO ; l'extraction du gaz produit se fait par l'intermédiaire d'un ventilateur à tirage

forcé (VTF). La pression des gaz à l'intérieure de la hotte est régulé par le col variable. Ce dernier se compose de volets mobiles qui s'ajustent automatiquement suivant l'indication  $P_0$  transmise par les capteurs de la jupe pour maintenir à l'intérieure du système OG une pression légèrement supérieure la pression atmosphérique.

$$P_0 = P_{atm} - P_{gaz}$$

Cette indication est introduite par l'opérateur de soufflage dans le système du col variable.

La réaction de décarburation de la fonte lors de la production de l'acier se fait selon le processus suivant :



Les poussières et le gaz généré dans le réacteur ne doivent en aucun cas entrer en réaction avec de l'air ambiant car cela entrainera une combustion partiel du gaz CO et ferait passer la température au niveau de la hotte fixe à une température supérieure à 1800° C. Dans ce cas, les conditions optimales nécessaires pour une exploitation correcte du système OG ne seront plus réunies, ce qui entrainera l'apparition des inconvénients suivants :

La quantité de gaz CO prévue à l'origine avoisinant les 60%, chutera et la température très élevée favorisera la transformation du FeO en Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub>. La granulométrie du FeO est de l'ordre du millimètre alors que celle du Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est de l'ordre de dizaine de microns ce qui génèrera la production de fines. Cette défaillance influencera négativement le dépoussiérage du gaz combustible produit.

Dans les conditions normales d'utilisation du système OG, le gaz CO obtenu aura une teneur de 60% et sera pratiquement exempt de poussières. Au Japon, le gaz est envoyer vers les réservoirs de stockage et sera comptabilisé dans le bilan globale de l'énergie du complexe. Le dépoussiérage du gaz dans le système OG est réalisé par voie humide.

Au faite de la hotte fixe se trouve un venturi (1<sup>er</sup> dépoussiérage), environ 75% des particules de FeO seront récupérés par aspersion d'eau provenant du col variable (2<sup>ème</sup> dépoussiérage) où s'effectue la second opération de récupération des poussières échappées du premier traitement.

La circulation de l'eau de dépoussiérage se fait de façon cyclique dans l'ordre suivant :

L'eau propre ou déchargé après traitement est dirigée vers le col variable (2<sup>ème</sup> dépoussiérage), là ; les poussières échappées de la première récupération environ 25% seront captées. Après, l'eau partiellement chargée passera au premier dépoussiérage pour récupérer les 75% de FeO généré. En dernier ressort l'eau est envoyée au traitement.

### **2.9.3 Traitement de l'eau**

Les particules de dimension grossière sont récupérées à l'aide d'un classificateur à spirale au niveau de la sousverse puis stockées dans une trémie. Ensuite, les particules fines subissent une précipitation dans des décanteurs à raclettes où elles seront récupérées au niveau de la sousverse sous formes de boues. La surverse du décanteur sera acheminée vers le bac de stockage et sera utilisée comme eau de dépoussiérage. Les boues du décanteur seront acheminées par convoyeur à bande vers la filtration sous vide. Le filtrat obtenu à ce stade ira rejoindre le circuit de l'eau de dépoussiérage; tandis que les gâteaux de filtration et les grosses particules seront acheminées vers la PMA pour recyclage, ainsi les poussières, très riche en oxyde de fer seront récupérées. L'eau après traitement sera immédiatement réutilisée dans la chaîne de production.

Le gaz produit par le système OG sera brûlé en torchère car l'Algérie n'a pas jugée utile son utilisation.

La décision d'opter pour l'utilisation des aciéries dotées de système OG a permis d'éliminer un problème environnementale qui est la pollution atmosphérique par les fines poussières. Le recyclage de l'eau réduit le gaspillage de l'eau.

Mais la décision de brûlé le gaz en torchère, a poussé les gens à moins de rigueur dans l'exploitation du système OG ce qui entraîné la génération d'une quantité importante de fine dans les gaz; alors les problèmes suivant sont apparus :

La difficulté de déchargé à un niveau satisfaisant la surverse du décanteur qui à la longue fini par boucher les conduites d'alimentation en eau. Les fines se déposant sur la turbine du ventilateur à tirage forcé (VTF) provoquent des vibrations de très haut niveau qui entraînent des arrêts de cet équipement synonyme d'arrêt de production.

Les perturbations du à l'émission des fines était prévu dans cette étude afin d'identifier les causes précises à leur apparition, de les quantifier et étudier leur caractéristiques précises.

Malheureusement cela n'a pas pu être réalisé car l'atelier était en arrêt pendant de très longue durée. De ce fait, ce travail a été reporté à une date ultérieure.

Devant l'incapacité d'évaluer le degré de fines, nous avons décidé de traiter un problème similaire à l'échelle du laboratoire.

Les produits utilisés pour cette étude sont des suspensions réalisées à partir de matériaux classiquement considérés dans la littérature à savoir les billes de verre. Outre le caractère un peu modèle de ces produits, ce choix a été fait dans l'idée de s'approcher du cas des boues résiduelles produites par l'aciérie à oxygène II lors du dépoussiérage humide.

## **CHAPITRE 3. Matériels et Méthodes**

### **3.1 Introduction**

Les essais réalisés au niveau du laboratoire sur des particules synthétisées ont permis d'optimiser l'influence de chaque paramètre opératoire sur la siccité des gâteaux de filtration. A savoir la distribution granulométrique, la concentration en solides de la suspension et la force motrice appliquée (filtration sous vide). Le matériau utilisé pour réaliser les tests de filtration et de déshydratation mécanique était des billes de verre de forme sphériques (Figure 12), afin de réduire l'effet de la forme des particules. Cependant, un certain nombre d'expériences a été réalisé en utilisant des particules ultrafines de sable de silice de formes irrégulières. La majorité des expériences ont été réalisées en utilisant un matériau solide d'une dimension de 425  $\mu\text{m}$ .

Les tests initiaux ont été réalisés sur des gammes de tailles sélectionnées afin d'étudier leur effet sur la résistance spécifique apparente et la teneur en humidité du gâteau formé.

### **3.2 Préparation de l'échantillon**

Compte tenu de la nature de cette étude, la première étape à considérer était la préparation de l'échantillon pour le test de filtration. Pour simplifier le travail, le matériau utilisé était déjà dimensionné et généralement de forme sphérique (figure 12). Ce matériau a été obtenu auprès de Potters - Barlotini Ltd [49] et consistait en six sacs pesant chacun 25 kg. Ce matériau a été transféré et stocké dans des récipients hermétiques en plastique. La gamme de tailles de ce matériau est donnée dans le tableau 1. A ce stade, il a été décidé que tous les échantillons pour l'essai de filtration pourraient être prélevés sur ce matériau. Des sous-échantillons de l'ordre de 1,5 à 2,0 kg ont été obtenus en recourant au riffing. Certaines analyses initiales sur un laser « Sizer Malvern » ont indiqués que l'échantillon 6A (matériau de 45  $\mu\text{m}$ ) contenait très peu de matériau en dessous de 10  $\mu\text{m}$ . Il a été considéré que le matériau ultrafin était un facteur important dans cette étude. Pour cela, du sable de silice fin a été passé à travers un hydrocyclone de petit diamètre (2 pouces) avec le débordement, contenant principalement 10  $\mu\text{m}$ , récupéré et utilisé pour les essais suivants. Cet échantillon a été appelé 10A. Deux autres échantillons de billes de verre ont également été obtenus avec des dimensions de 6 à 20  $\mu\text{m}$  et 20 à 40  $\mu\text{m}$ . Ceux-ci provenaient des Poudre de Derby (Angleterre) et sont représentés dans le tableau 1 comme échantillons 7A et 9A.

### 3.2.1 Caractéristiques des billes de verre

Les perles de verre sont des matériaux respectueux de la nature avec d'excellentes caractéristiques.

#### - Matériel chimiquement stable et solide

Certaines caractéristiques excellentes du verre comprennent la transparence, la résistance à l'eau et aux produits chimiques, la stabilité thermique et la dureté. En particulier, lorsque le verre est fabriqué en particules sphériques, il peut résister aux chocs et produire un matériau extrêmement stable. Comme le verre contient des composants non toxiques et qu'il est recyclable, il devrait être appliqué dans de nombreuses régions. Les billes de verre sont chimiquement stables et ne provoquent pas de réaction chimique avec d'autres substances, elles sont donc également idéales comme matériau pour les additifs polymères. Les perles de verre sont dures et ont une faible dilatation thermique. Ces caractéristiques des billes de verre peuvent rendre les composites plastiques plus résistants avec moins de déformation.

#### - Caractéristiques chimiques du verre

Le verre est chimiquement stable et *possède une excellente résistance à l'eau* et aux produits chimiques. Les caractéristiques chimiques du verre sont représentées par le tableau suivant

Tableau 1. Caractéristiques chimiques du verre

| Composition chimique               | Exemple de valeurs d'analyses (%) |               |
|------------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| Matériaux                          | Verre sodo-calcique               | Verre alcalin |
| SiO <sub>2</sub>                   | 72.0                              | 55.5          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 2.0                               | 14.0          |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | -                                 | 5.7           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 0.1                               | 0.2           |
| Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O | 13.5                              | 0.5           |
| MgO                                | 3.4                               | 1.0           |
| CaO                                | 9.0                               | 23.1          |
| Total                              | 100.0                             | 100.0         |

## - Caractéristiques physiques du verre

Le verre est un matériau transparent et dur avec une excellente résistance à haute température.

**Tableau 2. Caractéristiques physiques du verre**

| <b>Caractéristiques physiques</b>  | <b>Valeurs Standard (%)</b> |           |
|--|-----------------------------|-----------|
| <b>Densité</b>   | 2.5                         | 2.6       |
| <b>Indice de réfraction</b>  | 1.50~1.53                   | 1.53~1.57 |
| <b>Dureté (Echelle de Mohs)</b>  | 6.5                         | 6.5       |
| <b>Point de ramollissement (°C)</b>  | 720                         | 830       |
| <b>Coefficient d'Expansion Thermique (<math>\alpha \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}</math>)</b> | 90                          | 51        |
| <b>Conductivité thermique (kcal/m h°C)</b>   | 0.81                        | 0.89      |
| <b>Chaleur spécifique (kcal/kg°C)</b>  | 0.28                        | 0.20      |

### 3.3 Préparation de la suspension

Les tests de filtration ont été réalisés pour chacun des six échantillons initiaux (1A à 6A) individuellement, à quatre concentrations de solides; 30, 40, 50 et 60% (w. /w.). Les tests ont été répétés quatre fois pour chaque échantillon représentatif afin d'obtenir un ensemble de données reproductibles. Par conséquent, à partir de chaque échantillon représentatif, 4 sous-échantillons ont été obtenus pour chaque concentration de solides. Pour éviter les impuretés, présentes dans l'eau du robinet, de l'eau distillée a été utilisée pour préparer les échantillons de suspension de billes de verre

pour les expériences de filtration. Cependant, la préparation de la suspension pour les essais de déshydratation a été effectuée en mélangeant les échantillons ensemble pour obtenir un échantillon avec une large gamme de tailles. Par conséquent, en diminuant ou en augmentant la quantité de particules fines ou grossières dans la suspension, l'influence de la taille des particules sur la résistance spécifique apparente et la teneur en humidité pourraient être étudiées.

### **3.3.1 Distribution granulométrique I**

Un certain nombre d'échantillons ont été mélangés ensemble afin de créer un échantillon avec une large gamme de tailles. Une certaine quantité de particules a été prélevée dans chaque échantillon représentatif, à l'exception des échantillons 4A et 10A. Les poids prélevés de chaque échantillon sont indiqués dans le tableau 3a. Le nouvel échantillon mélangé obtenu a ensuite été tamisé à sec pendant 20 minutes à 425, 300, 212, 150, 106, 75 et 63 microns; la fraction de 63 microns a ensuite été tamisée à l'état humide à 56, 40 et 20 microns. Ce travail a été effectué pour déterminer la nouvelle distribution granulométrique de l'échantillon mélangé qui est représenté sur la figure 6, et donné dans le tableau 3b. Bien qu'environ 12% soit inférieur à 20  $\mu\text{m}$ , comme le montre le tableau 3b, la taille réelle du fond était 6  $\mu\text{m}$  avec pratiquement aucun matériau en dessous de cette taille. A partir de ces données, quatre échantillons ont été préparés à des concentrations en solides de 20, 40 et 60% solides en masse.

### **3.3.2 Distribution granulométrique II**

L'échantillon 10A qui a été obtenu à partir du débordement de cyclone et était principalement d'une taille inférieure à 10  $\mu\text{m}$  a été ajouté à l'échantillon précédent pour remplacer l'échantillon 6A afin d'augmenter la quantité de particules fines dans la suspension. Ceci, afin d'étudier l'effet de cette fraction de taille sur la résistance spécifique apparente et la teneur en humidité des gâteaux de filtration. Comme décrit précédemment, la quantité de particules prélevée dans chaque échantillon représentatif est indiquée dans le tableau 4a. La même opération de criblage que celle décrite à la section 3.2 a été utilisée pour déterminer la nouvelle distribution granulométrique de l'échantillon qui est donnée dans le tableau 4b et montrée dans la figure 6. A partir de ces données, trois échantillons ont été préparés à 40% solides en masse.

### **3.3.3 Distribution granulométrique III**

Pour cette étape, l'échantillon 10A n'a pas été inclus et la quantité de particules prélevée dans chaque échantillon représentatif est indiquée dans le tableau 5a. L'analyse de tamisage de cette

nouvelle gamme de tailles est donnée dans le tableau Sb et montrée sur la figure 6. Les 4 échantillons ont été constitués tous à une concentration en solides de 40% solide en masse en utilisant la distribution granulométrique III.

### **3.3.4 Distribution granulométrique IV**

À ce stade, l'échantillon 9A (fraction de 20 à 6  $\mu\text{m}$ ) a été retiré afin d'étudier l'effet du matériau de dimension plus grossier sur les processus de filtration et de déshydratation. En enlevant cette classe granulométrique, la dimension moyenne des particules dans la suspension augmente. Le nouvel échantillon obtenu a été constitué suivant la même procédure décrite ci-dessus, à partir de l'échantillon représenté dans le tableau 6a. L'analyse de tamisage de cette nouvelle distribution de granulométrique est montrée sur la figure 6, et donnée dans le tableau 6b; quatre échantillons ont été préparés à une concentration de 40% solides en masse.

## **3.4 Appareil de filtration « Entonnoir Buchner »**

Lors de la définition des caractéristiques du produit et de l'étude préliminaire du problème, on peut effectuer quelques essais dans des Büchner (sous vide), sous pression, lesquels fourniront souvent des indications extrêmement intéressantes sur la perméabilité du gâteau.

Plusieurs agencements d'appareils peuvent être utilisés pour la détermination de la résistance spécifique apparente du gâteau de filtration. Pour les essais menés tout au long de ce projet, une version de l'appareil comprenant un manostat permettant un contrôle précis du niveau de vide a été utilisée. Ceci est représenté sur la planche 1.

L'appareil consistait en un Büchner de 75 mm de diamètre et de 40 mm de profondeur avec un volume d'échantillon pratique maximum de 170 ml, dans lequel des papiers filtres de 70 mm étaient placés. Les papiers filtres utilisés étaient des papiers filtres Whatman No 542, choisis pour leur capacité à retenir même les particules les plus fines. L'entonnoir Buchner est déversé dans un cylindre de 250 ml marqué à des intervalles de 2 ml. Le niveau de vide a été contrôlé par le réglage de la soupape à pointeau (I) jusqu'à ce que le niveau souhaité soit atteint et le vide appliqué par réglage de la soupape à pointeau (II), le vide appliqué étant mesuré sur un comparateur gradué de 0 à 30 pouces de mercure à des intervalles de 2 pouces. Le vide a été fourni par la pompe à vide à piston rotatif N.G.N.

### 3.4.1 Procédure expérimentale

Le manostat a été ajusté pour donner le degré de vide requis (28 pouces de mercure), un papier filtre de 70 mm a été placé dans l'entonnoir Buchner et humidifié avec une petite quantité d'eau distillée. La pompe à vide a été mise en marche et la soupape à pointeau s'est partiellement ouverte pour aspirer l'excédent d'eau du papier filtre. Une fois réalisé, le cylindre dans lequel l'entonnoir Büchner s'est déchargé a été déconnecté, vidé de l'eau excédentaire et reconnecté avant de commencer l'essai. Les mesures de filtration ont été effectuées en transférant la suspension dans l'entonnoir et la vanne à pointeau s'est ouverte progressivement de sorte que le niveau de vide préétabli a été rapidement atteint. Lors de l'ouverture de la vanne, un chronomètre numérique, précis à 0,01 seconde a été démarré. Le temps de filtration a ensuite été enregistré à des intervalles de 5 ml, commençant à 20 ml à un certain niveau (qui dépendait de la concentration en solides de la suspension) variant de 125 ml à 4 ml, le niveau de vide étant noté à la moitié du test. Cependant, en raison de la nécessité que l'excès de suspension non filtrée soit présent pour chaque lecture, un contrôle du niveau de cette dernière dans l'entonnoir a été effectué au stade où la dernière goutte de filtrat a disparu de la surface du gâteau. Il n'y avait pas besoin de vide appliqué au-delà de cette étape et la soupape à pointeau était fermée. L'entonnoir a ensuite été déconnecté, le gâteau de filtration a été retiré et le cylindre a été vidé. Il est à noter que la filtration rapide a perturbé la surface du filtrat et que l'on a trouvé certaines difficultés à lire le volume. Pour cela, un morceau de tuyau en caoutchouc a été relié à la sortie du Buchner afin de décharger le filtrat contre la paroi du cylindre. Ceci a réduit la turbulence à la surface du liquide, ce qui a permis une lecture plus facile et plus précise du volume du filtrat.

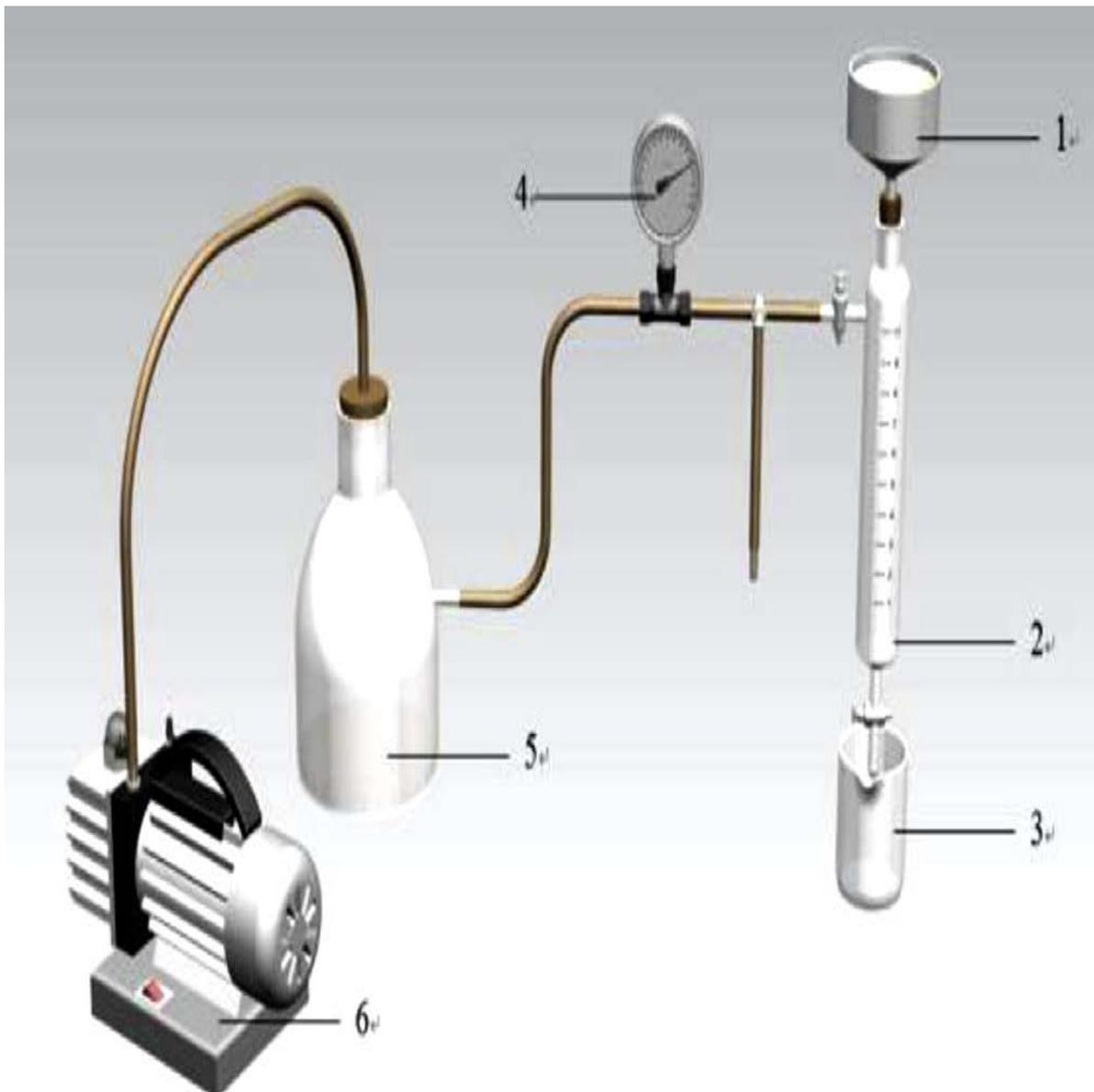


Figure 13. Dispositif de filtration sous vide – entonnoir Buchner.

- 1 - Entonnoir Buchner;
- 2 - Cylindre gradué;
- 3 - Fiole à vide
- 4 - Manostat;
- 5 - Flacon de garde;
- 6 - Pompe à vide.

### 3.4.2 Procédure expérimentale de déshydratation mécanique

Comme décrit précédemment dans la section 3.4.1, ces tests ont été effectués en utilisant la même procédure pour les tests de filtration. Cependant, à ce stade du projet, la filtration a été suivie par l'étape de déshydratation. Lorsque la dernière goutte de filtrat disparaît de la surface du gâteau, il reste un gâteau de filtration saturé. L'application continue du vide au-delà de ce point a déclenché la période de déshydratation et l'air a commencé à pénétrer dans le gâteau de filtration. Pendant cette période de déshydratation, le taux de filtrat a été enregistré. L'essorage a été poursuivi pendant une période de 15 minutes à la fin de laquelle le gâteau a été retiré du Buchner, l'épaisseur et le diamètre du gâteau étant mesurés. Il a ensuite été séché dans un four à 105 ° C pendant une nuit pour obtenir sa teneur en humidité finale. Chaque expérience a été répétée afin d'obtenir une lecture moyenne. La pression appliquée a été modifiée pour chaque concentration de solides; quatre valeurs de pressions ont été appliquées à 20, 40, 60 et 80 KPa.

### 3.5 Évaluation de la résistance spécifique apparente

La résistance spécifique apparente est importante car le rendement pour le filtre à vide est inversement proportionnel à la racine carrée de la résistance spécifique. La résistance spécifique apparente d'un gâteau de filtration,  $\alpha_{ap}$  est représentée par l'équation (15) de la section 2.5 comme :

$$\alpha_{ap} = \frac{2 A^2 \Delta p B}{c_1 \mu},$$

Où

$c_1$  Composition de la pulpe,

A Surface de la section transversale du filtre,

$\mu$  Viscosité de l'eau,

$\Delta p$  Différence de pression de filtration, et

B Gradient de la courbe  $t/v$  versus  $v$ .

Cependant, en raison du changement de conditions au cours de la phase initiale de filtration, une correction doit être apportée à toutes les données brutes. Un exemple de ceci est représenté dans le Tableau 2. De plus, pour supprimer les erreurs associées au tracé et aux calculs manuels de la pente de cette ligne, un programme informatique utilisant des techniques de régression linéaire a calculé la pente requise. De plus amples détails sur ce programme figurent à l'annexe I.

### 3.6 Évaluation de l'humidité

Une fois les tests de filtration achevés, l'extraction du gâteau s'est révélée être un processus relativement simple et réalisé rapidement pour la majorité des essais réalisés. La masse du gâteau final est mesurée et sa teneur en eau déterminée par séchage en étuve à 105°C. La masse restant dans le gâteau sec est déterminée à partir de la masse d'eau évaporée lors du passage à l'étuve, puis retranchée de la masse sèche mesurée. Le procédé a été répété pour chaque concentration en solides. Le tableau 4 montre un exemple des données de teneur en humidité obtenues pour un gâteau de filtration formé avec les billes de verre de granulométrie 425 - 250 microns à une concentration en solides de 30% solides en masse.

**Tableau 3. Echantillons utilisés pour les essais de filtration et déshydratation**

| <b>Echantillons</b> | <b>Dimensions des particules<br/>(microns)</b> |
|---------------------|--|
| 1A                  | 425 – 250                                      |
| 2A                  | 250 – 150                                      |
| 3A                  | 150 – 75                                       |
| 4A                  | 106 – 53                                       |
| 5A                  | 90 – 45  |
| 6A                  | > 45   |
| 7A                  | 40 – 20  |
| 8A                  | 50 – 15  |
| 9A                  | 20 – 6   |
| 10A                 | 10 – 0   |

**Tableau 4. Exemple d'un test de filtration**

Echantillon : 1A (425 – 250 micron)

Pression appliquée : 100 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 30% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 9                         | 10     | 8      | 8      |
| 25                        | 14                        | 15     | 13     | 13     |
| 30                        | 18                        | 19     | 17     | 17     |
| 35                        | 23                        | 24     | 22     | 21     |
| 40                        | 28                        | 29     | 27     | 26     |
| 45                        | 33                        | 34     | 33     | 32     |
| 50                        | 37                        | 38     | 37     | 36     |
| 55                        | 41                        | 41     | 41     | 40     |
| 60                        | 48                        | 49     | 47     | 46     |
| 65                        | 54                        | 54     | 53     | 53     |
| 70                        | 61                        | 62     | 60     | 60     |
| 75                        | 69                        | 69     | 68     | 68     |
| 80                        | 77                        | 78     | 77     | 77     |
| 85                        | 85                        | 86     | 84     | 84     |
| 90                        | 92                        | 93     | 91     | 91     |
| 95                        | 98                        | 99     | 97     | 96     |
| 100                       | 104                       | 105    | 103    | 102    |
| 105                       | 112                       | 113    | 111    | 110    |
| 110                       | 120                       | 119    | 118    | 117    |
| 115                       | 130                       | 129    | 128    | 127    |
| 120                       | 139                       | 138    | 137    | 137    |
| 125                       | 148                       | 147    | 145    | 146    |
| Humidité (%)              | 19.12                     | 19.70  | 19.20  | 19.44  |

**Tableau 5a. Composition de l'échantillon pour la distribution granulométrique I**

| <b>Echantillon</b> | <b>Dimension<br/>(micron)</b> | <b>Poids<br/>(%)</b> |
|--------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1A                 | 425 – 250                     | 10,24                |
| 2A                 | 250 – 150                     | 12,35                |
| 3A                 | 150 – 75                      | 14,44                |
| 6A                 | 98 – 48                       | 18,05                |
| 7A                 | 40 – 20                       | 18,51                |
| 9A                 | 20 – 6                        | 16,06                |

**Tableau 5b. Analyse de Tamisage de la distribution granulométrique I**

| <b>Ouvertures de<br/>maille du tamis<br/>(micron)</b> | <b>% retenu<br/>(%)</b> | <b>% cumulé passant<br/>(%)</b> |
|---|-------------------------|---------------------------------|
| + 425   | 1,39                    | 1,39                            |
| - 425 + 300   | 8,49                    | 9,88                            |
| - 300 + 212   | 4,66                    | 14,54                           |
| - 212 + 150   | 11,92                   | 26,46                           |
| - 150 + 106   | 9,16                    | 35,62                           |
| - 106 + 75  | 9,85                    | 45,47                           |
| - 75 + 63   | 7,33                    | 52,80                           |
| - 63 + 56   | 1,89                    | 54,69                           |
| - 56 + 40   | 7,43                    | 62,12                           |
| - 40 + 20   | 25,83                   | 87,95                           |
| - 20 + 0  | 12,04                   | 99,99                           |

**Tableau 6a. Composition de l'échantillon pour la distribution granulométrique II**

| <b>Echantillon</b> | <b>Dimension<br/>(micron)</b> | <b>Poids<br/>(%)</b> |
|--------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1A                 | 425 – 250                     | 8,06                 |
| 2A                 | 250 – 150                     | 9,70                 |
| 3A                 | 150 – 75                      | 11,36                |
| 5A                 | 90 – 45                       | 9,70                 |
| 7A                 | 40 – 20                       | 14,56                |
| 9A                 | 20 – 6                        | 33,98                |
| 10A                | 10 – 0                        | 12,63                |

**Tableau 6b. Analyse de tamisage de la distribution granulométrique II**

| <b>Ouvertures de maille<br/>du tamis<br/>(micron)</b> | <b>% retenu<br/>(%)</b> | <b>% cumulé passant<br/>(%)</b> |
|---|-------------------------|---------------------------------|
| + 425   | 2,82                    | 2,82                            |
| - 425 + 300   | 9,40                    | 12,22                           |
| - 300 + 212   | 5,97                    | 18,19                           |
| - 212 + 150   | 10,93                   | 29,12                           |
| - 150 + 106   | 8,13                    | 37,25                           |
| - 106 + 75  | 6,75                    | 44,00                           |
| - 75 + 63   | 4,65                    | 48,65                           |
| - 63 + 56   | 4,86                    | 53,51                           |
| - 40 + 20   | 13,89                   | 67,44                           |
| - 20 + 0  | 32,56                   | 99,99                           |

**Tableau 7a. Composition de l'échantillon pour la distribution granulométrique III**

| <b>Echantillon</b> | <b>Dimension<br/>(micron)</b> | <b>Poids<br/>(%)</b> |
|--------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1A                 | 425 – 250                     | 9,22                 |
| 2A                 | 250 – 150                     | 11,11                |
| 3A                 | 150 – 75                      | 13,00                |
| 5A                 | 90 – 45                       | 11,13                |
| 7A                 | 40 – 20                       | 16,66                |
| 9A                 | 20 – 6                        | 38,89                |

**Tableau 7b. Analyse de tamisage de la distribution granulométrique III**

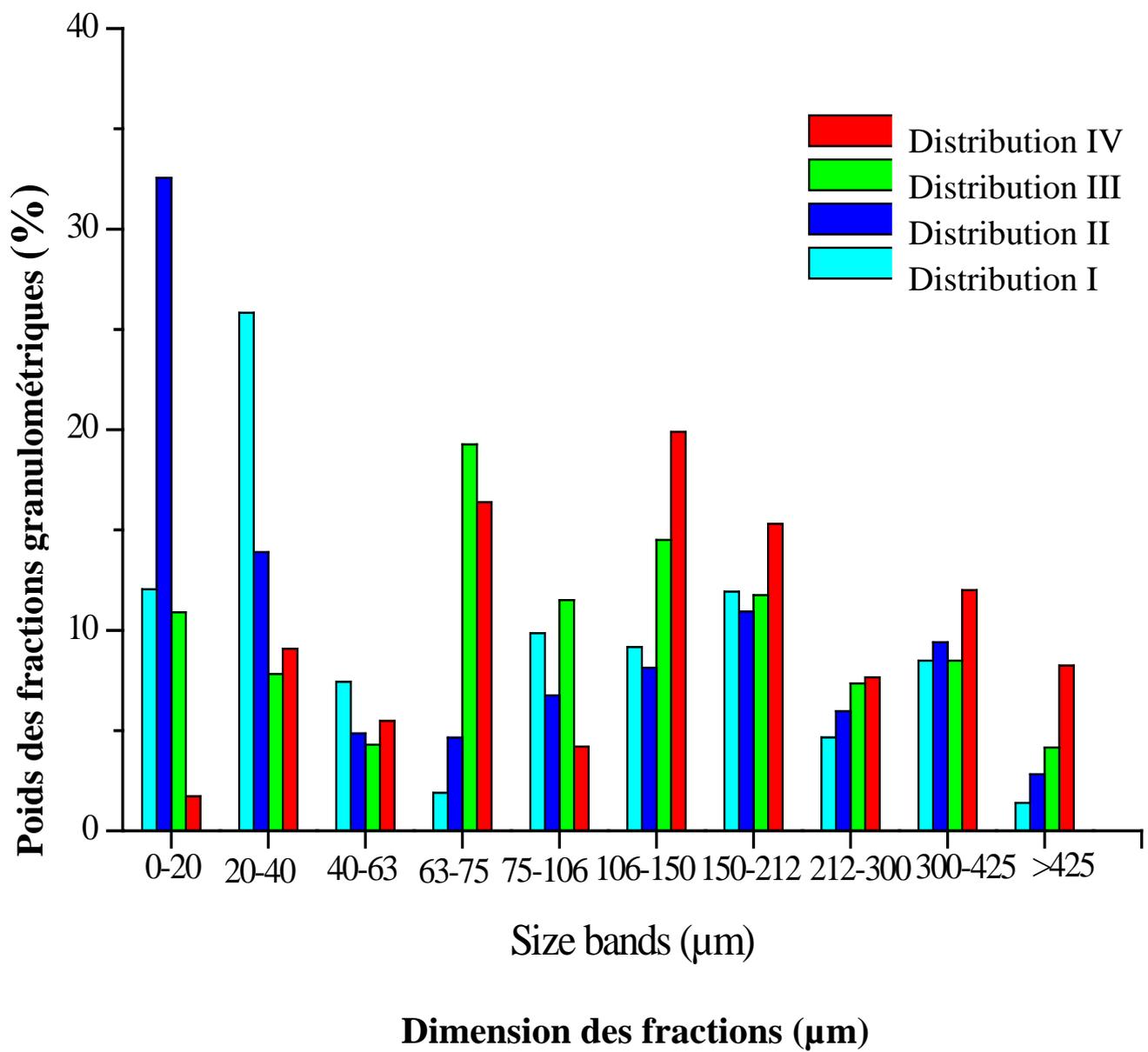
| <b>Ouvertures de maille du<br/>tamis (micron)</b> | <b>% retenu<br/>(%)</b> | <b>% cumulé passant<br/>(%)</b> |
|---|-------------------------|---------------------------------|
| + 425   | 4,15                    | 4,15                            |
| - 425 + 300                                       | 8,49                    | 12,64                           |
| - 300 + 212                                       | 7,35                    | 20,00                           |
| - 212 + 150                                       | 11,75                   | 31,74                           |
| - 150 + 106                                       | 14,50                   | 46,24                           |
| - 106 + 75  | 11,50                   | 57,74                           |
| - 75 + 63   | 19,26                   | 77,00                           |
| - 63 + 40   | 4,30                    | 81,30                           |
| - 40 + 20   | 7,82                    | 89,12                           |
| - 20 + 0  | 10,90                   | 99,99                           |

**Tableau 8a. Composition de l'échantillon pour la distribution granulométrique IV**

| <b>Echantillon</b> | <b>Dimension<br/>(micron)</b> | <b>Poids<br/>(%)</b> |
|--------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1A                 | 425 – 250                     | 15,10                |
| 2A                 | 250 – 150                     | 18,18                |
| 3A                 | 150 – 75                      | 13,00                |
| 5A                 | 90 – 45                       | 18,18                |
| 7A                 | 40 – 20                       | 27,27                |

**Tableau 8b. Analyse de Tamisage de la distribution granulométrique IV**

| <b>Ouvertures de maille<br/>du tamis<br/>(micron)</b> | <b>% retenu<br/>(%)</b> | <b>% cumulé passant<br/>(%)</b> |
|---|-------------------------|---------------------------------|
| + 425   | 8,24                    | 8,24                            |
| - 425 + 300   | 12,00                   | 20,24                           |
| - 300 + 212   | 7,65                    | 27,89                           |
| - 212 + 150   | 15,31                   | 43,20                           |
| - 150 + 106   | 19,90                   | 63,10                           |
| - 106 + 75  | 4,20                    | 67,31                           |
| - 75 + 63   | 16,38                   | 83,68                           |
| - 63 + 40   | 5,48                    | 89,16                           |
| - 40 + 20   | 9,08                    | 98,24                           |
| - 20 + 0  | 1,72                    | 99,99                           |



**Figure 14. Distribution granulométrique des échantillons**

## CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS DES ESSAIS DE FILTRATION ET DESHYDRATATION

### 4.1 Introduction

Les résultats obtenus lors des essais de filtration et de déshydratation ont montré qu'en général, la taille des particules, la concentration en solides et le vide appliqué influencent à la fois la résistance spécifique apparente et la teneur en humidité finale du gâteau de filtration.

### 4.2 Résultats du test de filtration

Comme indiqué, le test de filtration a été réalisé en utilisant six échantillons initiaux (1A à 6A) à une concentration en solides de 30%, 40%, 50% et 60% solides en masse, la pression appliquée est restée constante à 28 pouces de mercure tout au long du processus de filtration. Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux I.1 à I.24 de l'annexe I et représentés graphiquement d'après les figures de 15 à 17.

La figure 15 montre la teneur en humidité des gâteaux de filtration obtenus en utilisant les fractions granulométriques de  $-425+250\ \mu\text{m}$  jusqu'à  $-45\ \mu\text{m}$  à quatre concentrations de solides. En comparant ces résultats, on observe que la teneur en humidité du gâteau de  $-425+250\ \mu\text{m}$  est inférieure celle de la fraction  $-45\ \mu\text{m}$ , la différence d'humidité étant d'environ 3%. Il semble n'y avoir aucune corrélation entre l'humidité et la concentration en solides; dans certains cas, la teneur en humidité diminue avec la concentration de solides et dans d'autres, elle augmente. La figure 16 représente la résistance spécifique apparente du gâteau de filtration par rapport à la concentration en solides pour les six échantillons différents. Généralement, avec les échantillons de granulométrie plus fine, la résistance spécifique augmente considérablement, ceci est particulièrement notable avec les échantillons 6A ( $-45\ \mu\text{m}$ ) et 3A ( $150 - 75\ \mu\text{m}$ ). Aussi, la résistance spécifique apparente augmente avec l'augmentation de la concentration en solides supérieure à 50% solides en masse. Au-delà de cette concentration en solides et pour tous les échantillons, la résistance spécifique diminue et atteint une très faible valeur. Cependant, le taux de filtrat recueilli augmente avec l'augmentation de la taille des particules dans la suspension. Ceci est représenté graphiquement sur la figure 17 en tant que volume de filtrat collecté (ml) en fonction du temps (s) pour les six échantillons initiaux (1A à 6A) à 30% solides en masse.

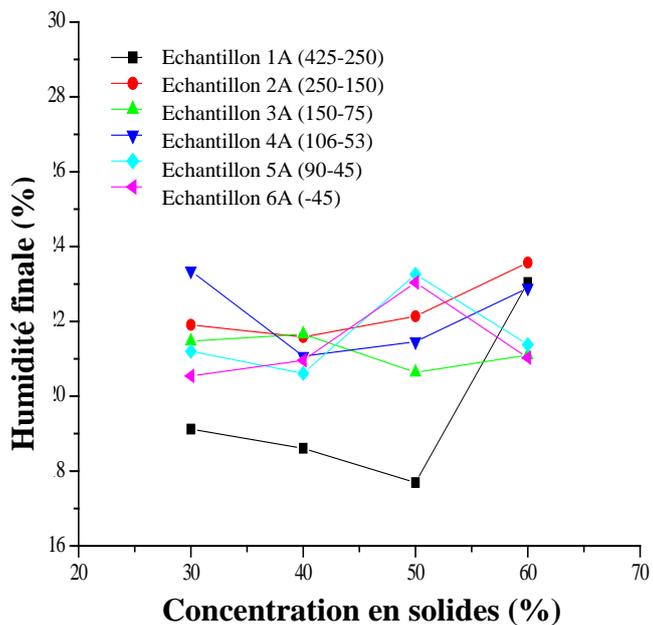


Figure 15: Effet de la concentration en solides sur l'humidité finale des échantillons initiaux

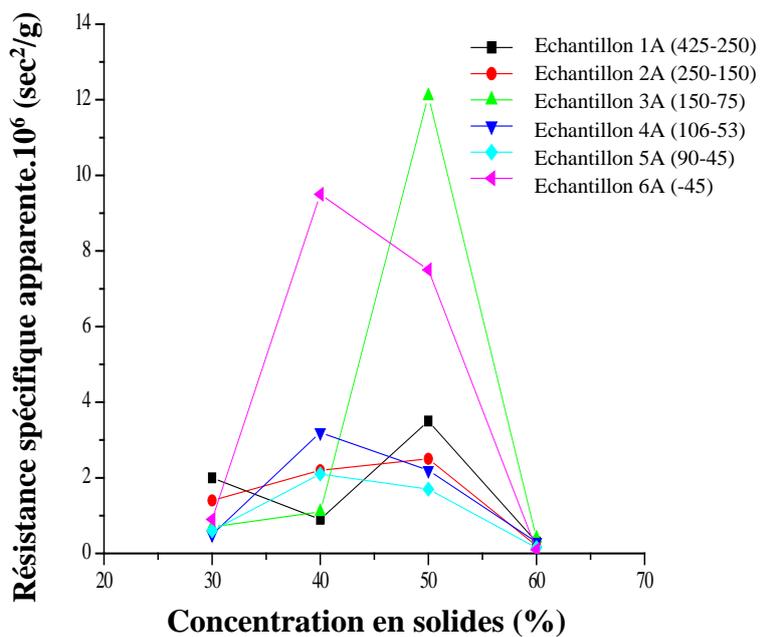


Figure 16 : Effet de la concentration en solides sur la résistance spécifique apparente des 6 échantillons initiaux

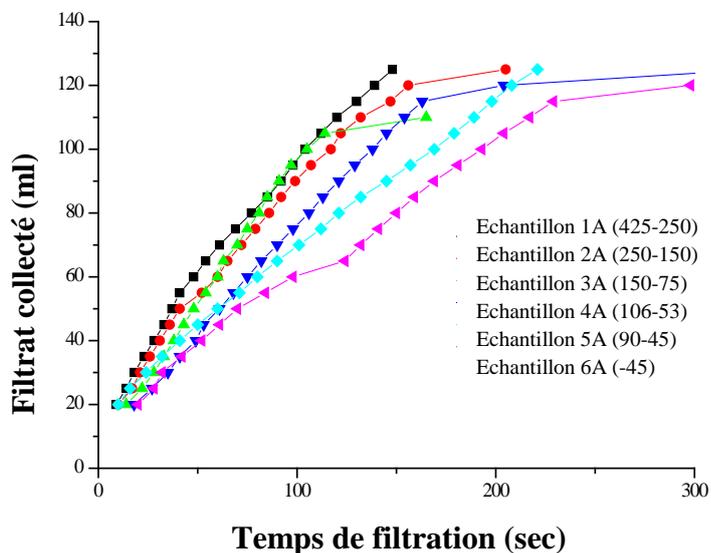


Figure 17: Volume de filtrat collecté pour les 6 échantillons initiaux versus temps

## 4.3 Résultats des tests de déshydratation mécanique

Comme mentionné, le matériau ultrafin était un facteur important dans cette étude. Dans les tests de déshydratation ont été utilisés quatre échantillons composés d'une gamme de particules de dimension plus élargie que celles utilisées précédemment dans les essais de filtration. La concentration en solides et la pression appliquée pendant ces essais ont été également variés.

### 4.3.1 Distribution granulométrique I

Les tests de déshydratation conduit pour la distribution granulométrique I avec une suspension à 20% , 40% et 60% de concentration en solides et sous une pression appliquée de 40, 60, et 80 KPa sont compris dans l'annexe II, du Tableau II.1 au Tableau II.9, et représentés sur les figures 18 à 20. La figure 18 montre habituellement qu'avec l'augmentation de la concentration en solides dans la suspension et la pression appliquée, la teneur en humidité finale des gâteaux de filtration a tendance à diminuée. Cependant, lorsque la pression appliqué était augmentée au-delà de 60 KPa, une augmentation de la teneur en humidité finale du gâteau de filtration a été noté voir l'échantillon de concentration 60% solides en masse. La figure 19 montre l'effet de la variation des niveaux de pression appliqués sur la résistance spécifique apparente pour les échantillons 20, 40 et 60% de solides en masse. Ce graphique indique qu'il n'y avait guère de différence entre les résultats et que les résistances spécifiques étaient environ toutes inférieures à  $1 \text{ sec}^2 \text{ g}^{-1}$ .

Il n'est probablement pas surprenant que ces valeurs soient faibles car il y avait peu de matière ultrafine présente dans la distribution I. Comme décrit précédemment, la période de déshydratation a été poursuivie pendant 15 minutes après la disparition de la dernière goutte de filtrat de la surface du gâteau. La figure 20 montre le volume de filtrat recueilli pendant ce temps avec l'échantillon de concentration 60% solides en masse, sous une pression de filtration appliqué de 60 KPa. On peut voir sur cette figure qu'en général, la plus grande partie de la déshydratation ou essorage a eue lieu dans les cinq premières minutes.

## Distribution granulométrique I

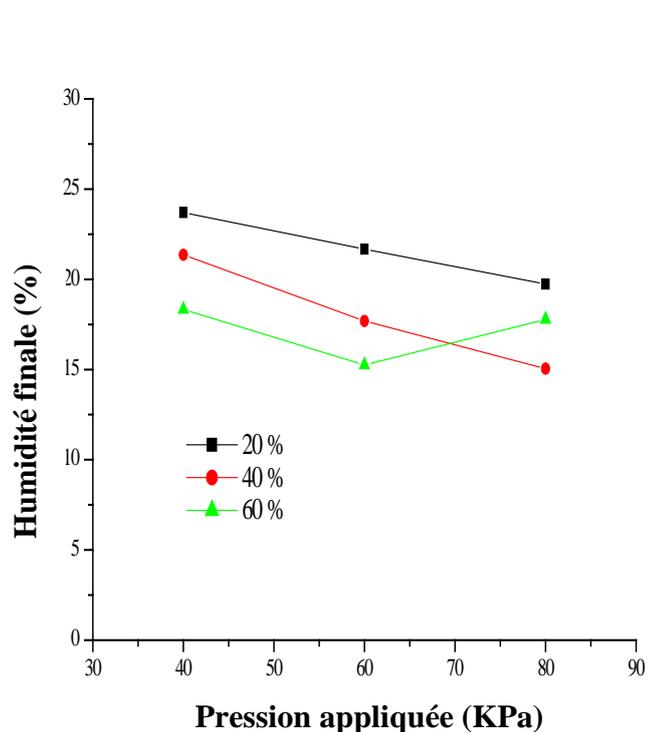


Figure 18: Effet de la pression appliquée sur l'humidité finale des 3 concentrations en solides

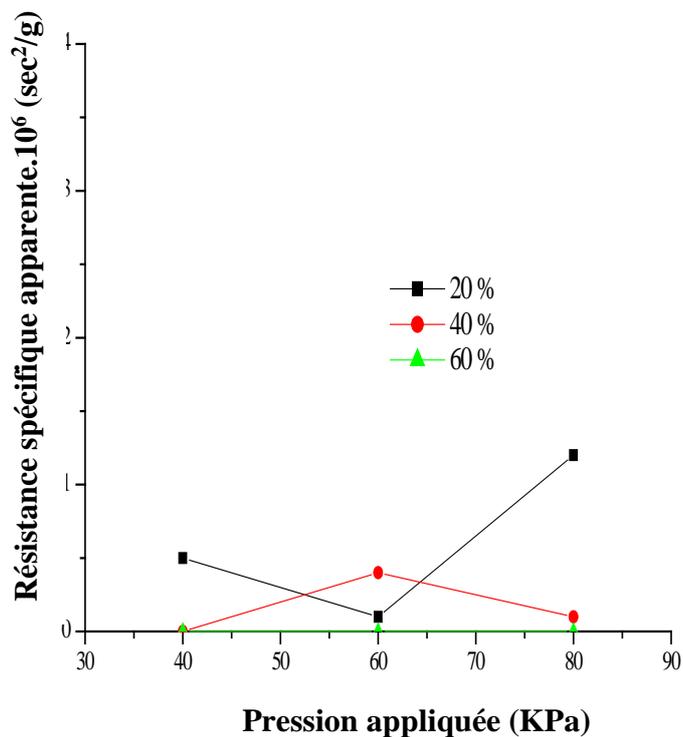


Figure 19 : Effet de la pression appliquée sur la résistance spécifique apparente des 3 concentrations en solides

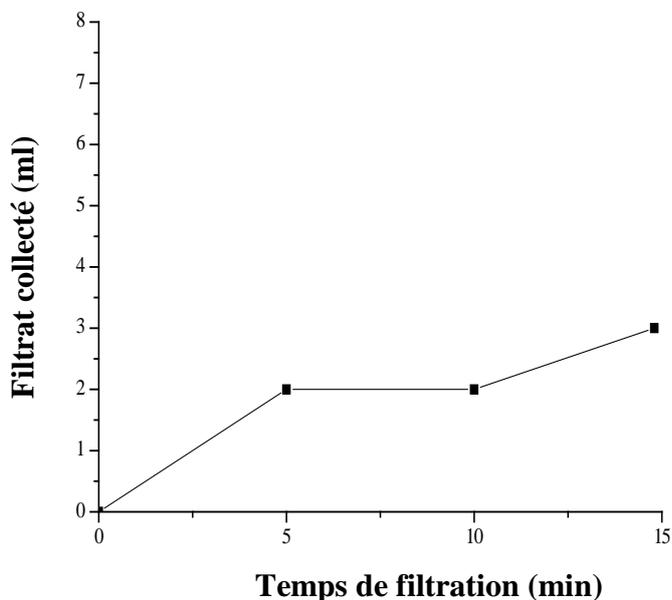


Figure 20: volume de filtrat récupéré pendant 15 min de déshydratation mécanique à 60 % Solides en masse sous une pression appliquée de 60 KPa

### **4.3.2 Distribution granulométrique II**

Les expériences réalisées pour les essais de déshydratation mécanique en utilisant la distribution de taille II sont présentées à l'annexe II, tableaux 11.10 à 11.13, et représentées graphiquement sur les figures 21 à 23. Ces essais ont été réalisés à une concentration en solides de 40% solides en masse sous une pression de filtration variant de 34 à 80 KPa. La teneur en humidité finale, telle qu'illustrée sur la figure 21, s'est avérée diminuer de la valeur 19 % à 15 % lorsque la pression de filtration augmentait de 34 à 60 KPa et tendait à se stabiliser à mesure que celle-ci augmentait de 60 à 80 KPa. La résistance spécifique apparente représentée sur la figure 22 a légèrement diminué dans l'intervalle de 34 à 60 KPa, mais a eu tendance à augmenter avec l'augmentation de la pression appliqués au-dessus de cette valeur. Pour l'échantillon de concentration 60% solides en masse, sous une pression de filtration appliqué de 60 KPa, qui est représenté sur la figure 23, on remarque que la déshydratation ou essorage augmente avec l'augmentation du temps de déshydratation.

### **4.3.3 Distribution granulométrique III**

Les essais effectués pour le procédé de déshydratation en utilisant la distribution de taille III sont représentés à l'annexe II, tableaux II.14 à II.17, et représentés graphiquement de la figure 24 à la figure 26. Les essais de déshydratation ont été effectués à une concentration de 40% solides en masse, sous une pression appliquée de 20, 40, 60 et 80 KPa. La figure 24 montre que la teneur en humidité finale augmente faiblement dans l'intervalle de pression appliquée. La différence de la teneur en humidité finale était environ de 1%. Cependant, les résistances spécifiques apparentes des gâteaux de filtration, comme le montre la figure 25, augmentaient régulièrement lorsque la pression appliquée augmentait de 20 à 80 KPa ( $3,67 \times 10^6$  contre  $21,17 \times 10^6$  ( $\text{sec}^2 \text{g}^{-1}$ )). On peut voir sur la figure 26 la déshydratation mécanique ou essorage a atteint une valeur maximale dans les cinq premières minutes pour devenir stationnaire jusqu'à la fin de la période de déshydratation mécanique.

## Distribution granulométrique II

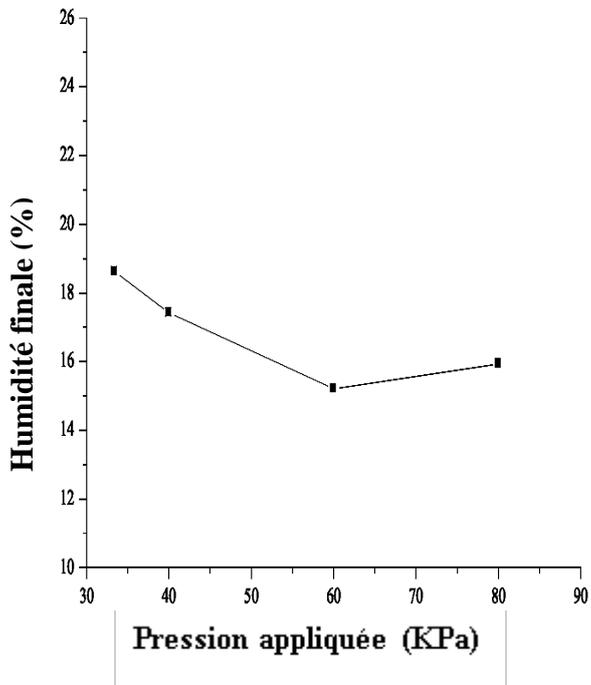


Figure 21 : Effet de la pression appliquée sur l'humidité finale à une concentration 40% solides en masse

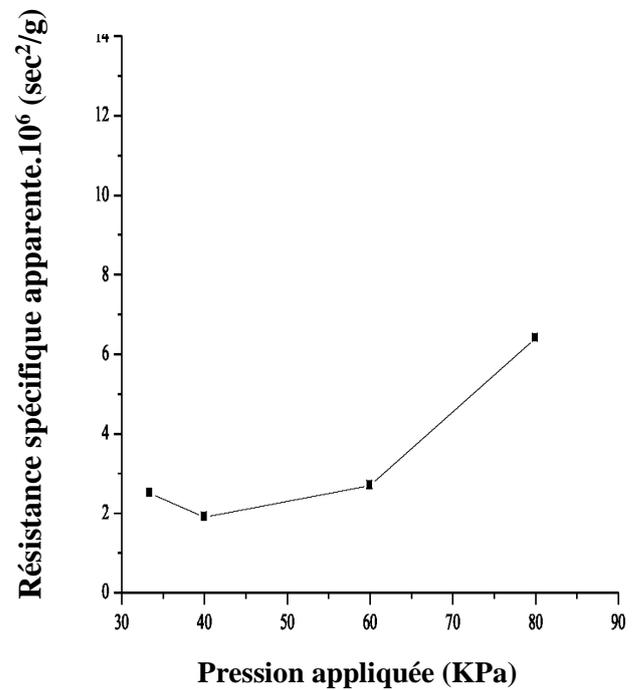


Figure 22 : Effet de la pression appliquée sur la résistance apparente spécifique à une concentration 40 % solides en masse

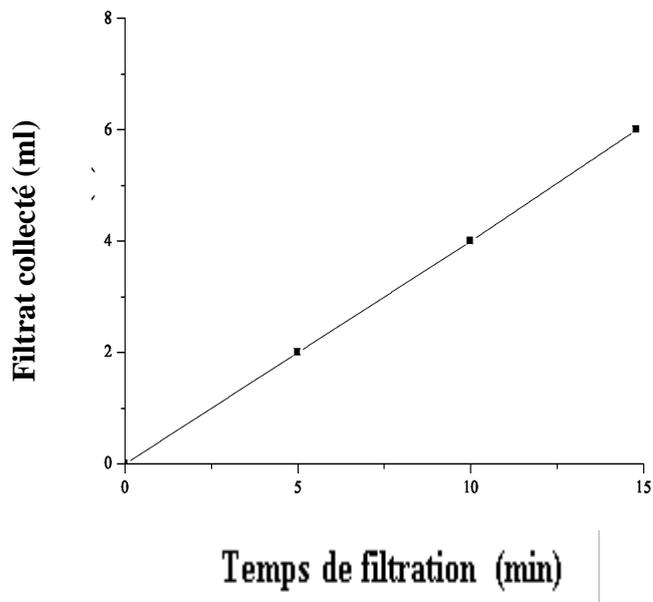


Figure 23: volume de filtrat récupéré pendant 15 min de déshydratation mécanique à 60 % Solides en masse sous une pression appliquée 60 KPa

### Distribution granulométrique III

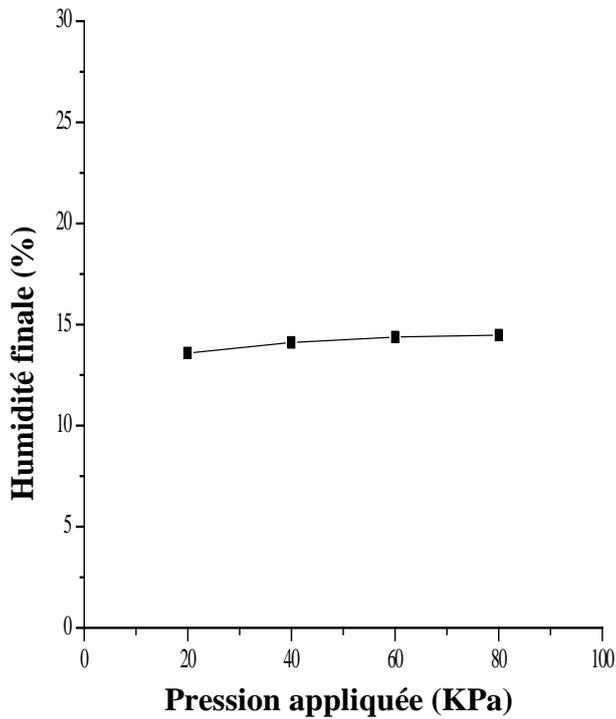


Figure 24: Effet de la pression appliquée sur l'humidité finale à une concentration de 40 % solides en masse.

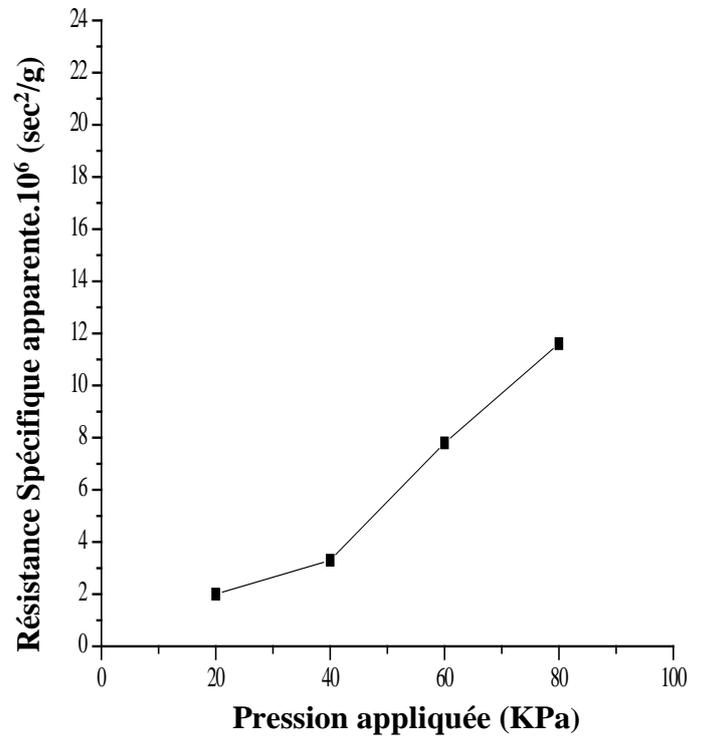


Figure 25 : Effet de la pression appliquée sur la résistance spécifique apparente à une concentration 40 % solides en masse.

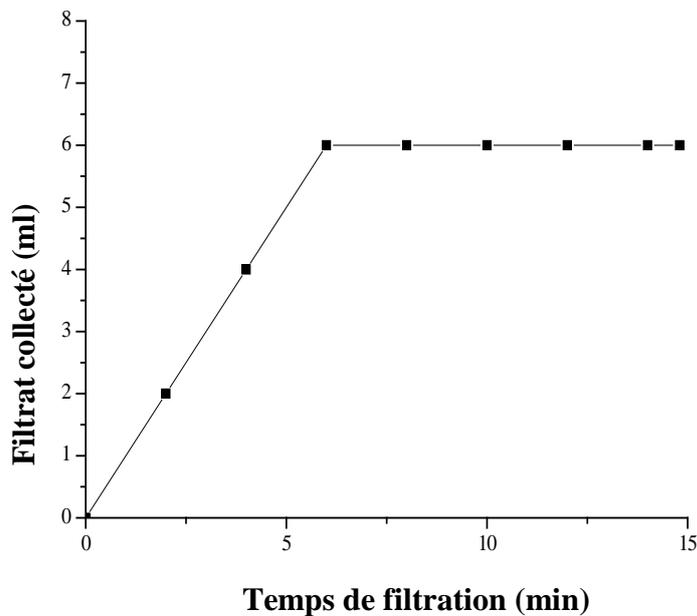


Figure 26: Volume de filtrat collecté pendant 15 min de déshydratation mécanique à une concentration 60 % Solides en masse

#### 4.3.4 Distribution granulométrique IV

Les essais réalisés pour le procédé de déshydratation en utilisant la distribution granulométrique IV sont représentés à l'annexe II, tableaux II.18 à II.21 et les résultats obtenus sont représentés graphiquement de la figure 27 à la figure 29. Comme mentionné à la section 4.3.4, les expériences de déshydratation ont été réalisées à une concentration de 40% solides en masse solides ; sous une pression à vide appliquée 20, 40, 60 et 80 KPa.

La figure 27 représente la teneur en humidité finale des gâteaux de filtration par rapport aux variations de pression vide appliqué. On distingue sur cette figure une augmentation de la teneur en humidité de 12%, à 20% lorsque la pression appliquée variée de 20 à 40 KPa, puis on remarque une diminution jusqu'à la valeur de 11% pour maintenir une valeur constante indépendamment des augmentations plus élevées de pression.

La résistance spécifique apparente du gâteau représentée sur la figure 28 est passée d'environ  $0,5 \cdot 10^6 \text{ sec}^2 \text{ g}^{-1}$  à environ  $2 \cdot 10^6 \text{ sec}^2 \text{ g}^{-1}$  lorsque la pression appliquée a été modifiée de 20 à 40 KPa, puis a diminuée jusqu'à la valeur de  $1 \cdot 10^6 \text{ sec}^2 \text{ g}^{-1}$  à 60 KPa. Finalement, on distingue une augmentation rapide pour atteindre la valeur de  $9 \cdot 10^6 \text{ sec}^2 \text{ g}^{-1}$  à 80 KPa.

La courbe de déshydratation obtenue pour le gâteau de filtration à 40% solides en masse de sous la pression sous vide 60 KPa est représentée sur la figure 29. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la majeure partie de la période de déshydratation a lieu dans les deux premières minutes et devient stationnaire pendant la période restante.

## Distribution granulométrique IV

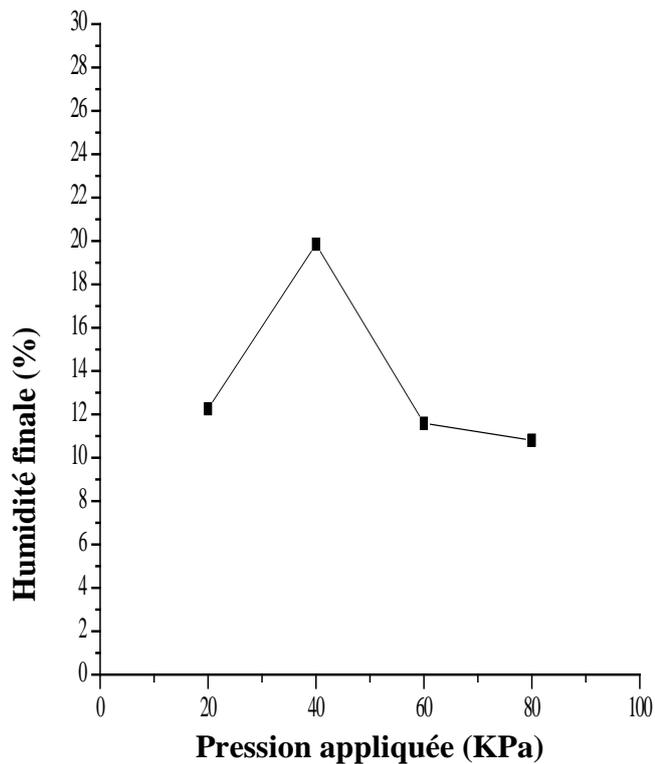


Figure 27. Effet de la pression appliquée sur L'humidité finale à 40% solides en masse

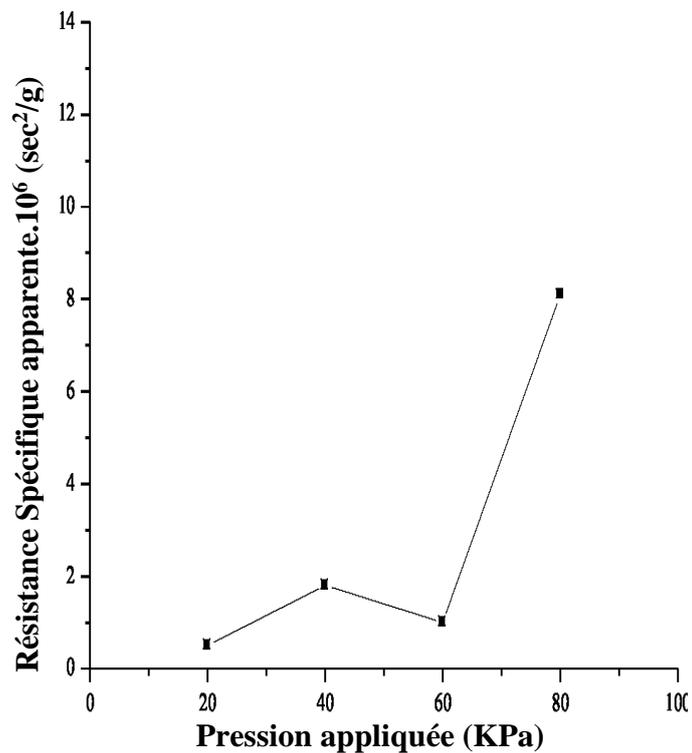


Figure 28. Effet de la pression appliquée sur la résistance spécifique apparente à une concentration 40 % solides en masse

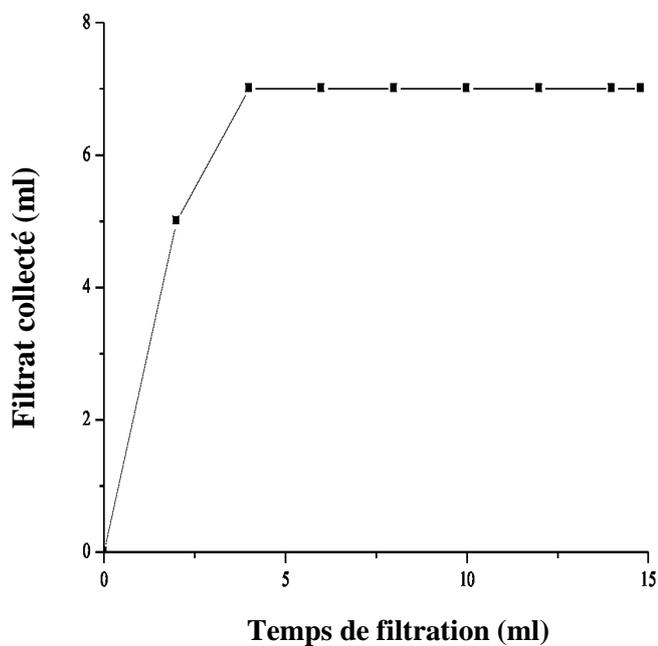


Figure 29: Distribution granulométrique IV: Filtrat Collecté pendant 15 min de déshydratation mécanique à une concentration 60 % Solides en masse

#### 4.4 Discussion des résultats de filtration

Initialement, il a été décidé de tester individuellement les six échantillons initiaux (1A à 6A représentés dans le Tableau 3), à des concentrations différentes respectivement 30%, 40%, 50% et 60% solides en masse, sous une pression de filtration de 100 KPa tout au long du processus de filtration. Le statut actuel de la filtration est discuté, particulièrement en ce qui concerne l'effet de divers paramètres, à savoir la dimension des particules, et la concentration en solides dans la suspension sur la résistance spécifique apparente et sur la teneur en humidité finale des gâteaux de filtration. Comme prévu, la dimension des particules influe fortement sur la teneur en humidité finale du gâteau de filtration (voir Figure 15). La teneur en humidité finale s'est avérée augmenter lorsque la dimension des particules dans la suspension a diminué. Comme discuté précédemment, la présence de particules fines dans la suspension d'alimentation affectait significativement la structure du gâteau. Cela conduit à un gâteau contenant un grand nombre de pores. Ces petits pores produisent une plus grande résistance à l'écoulement du filtrat. Ils ont également tendance à piéger l'eau dans le gâteau. En conséquence, le taux de filtrat a diminué de manière significative et un gâteau de haute teneur en humidité a été obtenu.

En général, la teneur en humidité finale des gâteaux de filtration diminuait avec une augmentation de la concentration en solides dans la suspension mais tendait à se stabiliser à une concentration de solides plus élevée. La figure 15 a montré qu'il n'y avait pas de corrélation entre la teneur en humidité et la concentration en solides. Les résultats obtenus à partir de l'échantillon 3A (150-75  $\mu\text{m}$ ) indiquaient que la teneur en humidité diminuait à 40% solides en masse, mais augmentait à une valeur plus élevée de 60% solides en masse.

La résistance spécifique apparente s'est révélée augmenter avec l'augmentation de la concentration de solides dans la suspension. Lorsque la concentration de solides augmente dans la suspension d'alimentation, Les particules ont moins de temps à ségréger pendant la formation du gâteau (en raison d'une période de formation de gâteau plus courte pour une concentration de solides plus élevée), ce qui donne un gâteau de porosité inférieure présentant une résistance spécifique apparente élevée. Lorsque la taille des particules dans la suspension d'alimentation diminue, la résistance spécifique apparente augmente jusqu'à une valeur optimale. Ceci peut être distingué sur la figure 16 pour l'échantillon 6A (-45  $\mu\text{m}$ ) et 3A (150-75  $\mu\text{m}$ ).

## 4.5 Discussion des tests de déshydratation

Comme mentionné précédemment, l'essai de déshydratation a été réalisé en utilisant quatre échantillons d'un éventail de taille plus élargie que ceux utilisés dans les tests de filtration. L'ensemble des résultats est représenté à l'annexe II, tableaux II.1 à II.21 et représenté graphiquement sur les figures 18 à 29. On peut voir sur ces figures que la structure du gâteau, la dimension des particules, la concentration en solides et l'augmentation de la pression de filtration ont une influence significative sur la résistance spécifique apparente et sur la teneur en humidité finale des gâteaux de filtration.

Comme prévu, la distribution granulométrique et l'augmentation de la pression appliquée ont eu un effet significatif sur le processus de déshydratation mécanique (essorage).

Il a été observé que lorsque la dimension des particules diminuait dans la suspension, la teneur en humidité finale et que la résistance spécifique apparente des gâteaux de filtration augmentait fortement. La présence de particules fines dans la suspension conduisait à un gâteau contenant un grand nombre de petits pores. Ces petits pores offrent plus de résistance à l'écoulement du filtrat et également tendent à piéger le filtrat dans le gâteau. En conséquence, le taux de filtrat a tendance à diminué de manière significative d'où l'obtention d'un gâteau de haute teneur en humidité et ainsi qu'une résistance spécifique apparente élevée a été obtenue. Comme discuté précédemment, des forces de désaturation seraient nécessaires pour obtenir une vitesse de déshydratation satisfaisante à partir du gâteau formé par les particules de granulométrie fine. Cependant, dans le cas de la distribution granulométrique III et IV, la suspension formée principalement avec des particules relativement grossières (c'est-à-dire la distribution granulométrique III, 6 - 425  $\mu\text{m}$ , et la distribution granulométrique IV, 20 - 425  $\mu\text{m}$ ). Avec la distribution granulométrique IV, la teneur en humidité finale a été réduite à environ 11% et pendant la période de déshydratation mécanique, l'écoulement de filtrat a augmenté avec l'augmentation des forces de désaturation. Cependant, lorsque la pression appliquée a été augmenté au-delà de 70 KPa, la réduction de la teneur en humidité était très faible et la résistance spécifique apparente a chuté à une valeur très faible. En comparant les résultats de la résistance spécifique apparente obtenus en utilisant la distribution granulométrique III et la distribution granulométrique IV  $5.99 \cdot 10^6$  ( $\text{sec}^2 \text{g}^{-1}$ ) comparé à  $1.89 \cdot 10^6$  ( $\text{sec}^2 \text{g}^{-1}$ ) sous une pression appliquée de 40 et 70 KPa; on peut voir que la résistance spécifique apparente a tendance à augmenter brusquement avec une pression appliquée croissante et au-delà de 70 KPa ( $21,17 \cdot 10^6$  ( $\text{sec}^2 \text{g}^{-1}$ ) comparé à  $8,59 \cdot 10^6$  ( $\text{sec}^2 \text{g}^{-1}$ )).

La déshydratation dépend de la structure du gâteau de filtration et principalement de la taille des particules dans la suspension. Les gâteaux de filtration contenant seulement des particules de verre étaient beaucoup plus faciles à déshydrater et ainsi la majeure partie de la déshydratation a eu lieu pendant la période des cinq premières minutes.

## Conclusions générales

A partir des expériences de filtration réalisées dans cette thèse, les caractéristiques des gâteaux de filtration obtenus tels que la siccité ou humidité finale, résistance spécifique, tailles des particules ont été comparé pour différentes concentrations. D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes:

1. La taille et la distribution des particules, la concentration en solides et la pression de filtration appliquée ont une influence considérable sur les caractéristiques du procédé de filtration, telles que la variation de la teneur en humidité finale et de la résistance spécifique apparente des gâteaux de filtration.
2. L'augmentation de la dimension des particules dans la suspension a entraîné une diminution de la teneur en humidité finale et une réduction de la résistance spécifique apparente. La réduction de la teneur en humidité finale pour le gâteau de filtration - 425  $\mu\text{m}$  par rapport au gâteau de filtration - 45  $\mu\text{m}$  à une concentration de 40% solides en masse était d'environ 3 points de pourcentage. Cependant, la résistance spécifique apparente pour le gâteau de filtration - 425  $\mu\text{m}$  était cinq fois plus faible que celle obtenue pour - 45  $\mu\text{m}$  ( $0,93 \cdot 10^6 \text{ sec}^2 \text{ g}^{-1}$  comparé à  $5,11 \cdot 10^6 \text{ sec}^2 \text{ g}^{-1}$ ).
3. L'augmentation de la concentration en solides de la suspension réduit la résistance spécifique apparente, ce qui contribue à augmenter la vitesse d'écoulement du filtrat.

La seconde étape de ce travail comprend la déshydratation mécanique (essorage) des gâteaux de filtration. Une investigation des paramètres influençant tel processus a été considéré et a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. Taille et forme des particules. L'augmentation de la quantité de particules fines dans la suspension a donné des gâteaux de filtration ayant une teneur en humidité plus élevée et des résistances de gâteaux plus importantes qui ont réduit l'écoulement du filtrat. L'augmentation de la quantité de

particules grossières dans la suspension a réduit l'humidité du gâteau de 3 à 4 points de pourcentage et a également augmenté l'écoulement du filtrat.

2. Concentration de solides. Au fur et à mesure que celle-ci augmentait, l'épaisseur du gâteau augmentait, ce qui entraînait une diminution du taux de déshydratation.

3. Pression appliquée. Les augmentations de ce paramètre ont entraîné une diminution de la teneur en humidité, mais à une pression appliquée au-delà de 70 KPa, la réduction de la teneur en humidité était très faible.

4. La période de déshydratation mécanique. La plus grande partie de la déshydratation mécanique (l'essorage) a eu lieu dans les cinq à six premières minutes sur la période qui se déroulait pendant une durée de 15 minutes.

D'après les essais effectués, il était clair que la présence de particules fines avait un effet négatif sur les processus de filtration et de déshydratation.

## Nomenclature

A - surface de la section transversale du filtre

(38,48 cm<sup>2</sup> pour un papier-filtre de 7.0 cm)

B gradient de la courbe t/v versus v

C masse du gâteau humide / masse du gâteau sec (g cm<sup>-3</sup>)

C<sub>1</sub> composition de la pulpe (g cm<sup>-3</sup>)

Q débit volumétrique d'écoulement (ml min<sup>-1</sup>)

R résistance totale d'écoulement du gâteau medium

R<sub>c</sub> résistance du gâteau (cm<sup>-1</sup>)

R<sub>m</sub> résistance du media (cm<sup>-1</sup>)

t temps (min)

V volume de filtrat récupéré (ml)

w masse moyenne de solides en suspension par unité de masse de gâteau  
(% w. /w.)

w<sub>s</sub> masse moyenne de solides secs en suspension par unité de  
masse de pulpe (% w. /w.)

## Lettres grecques

Δp perte de charge dans le gâteau (KPa)

ρ<sub>f</sub> densité du filtrat (g cm<sup>-3</sup>)

ρ<sub>l</sub> densité du liquide dans la suspension (g cm<sup>-3</sup>)

μ viscosité de l'eau à 20°.4 (1 centipoise = 0.01 g cm<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup>)

α résistance spécifique du gâteau (sec<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>)

α<sub>ap</sub> résistance spécifique apparente du gâteau (sec<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>)

$\epsilon$  porosité

$P_c$  pression capillaire

$R$  rayon du pore

## Références Bibliographiques

- [1] Dahlstrom, D.A., et Silverblatt.1977. Continuous Vacuum and Pressure Filtration. In Solid-Liquid Separation Equipment Scale-Up. Edited by D.B, Purchas. Croyden, England; Uplands press.
- [2] Baczek, F.A. et al. 1997. Sedimentation. In Handbook of Separations Techniques for Chemical Engineers, 3rd ed. Edited by P.A. Schweitzer. New York: Mc Graw. Hill.
- [3] Bosley, R. 1974. Vacuum Filtration Equipment Innovation. Filtr. Sep.,11 138-149.
- [4] Wolf, J., et al. 1971. Present Methods and future needs in Iron Concentrate Dewatering The process Water Reclamation. SME-AIME. March 1-4.
- [5] Purchas, D.B. 1971. Industrial Filtration of Liquids, 2<sup>nd</sup> Edition, Leonard Hill Books, London.
- [6] Svarovsky, L., 2000. Solid Liquid Separation, Fourth edition. Oxford, Butterworth-Heinemann, UK, ISBN 07506 45687.
- [7] Tiller. F.M and Cheng, K.S. 1977. Delayed cake filtration, Filtration and Separation, 14(1), 13-18.
- [8] Jahreis, C.A. 1965. Filtration and Separation, 2(4), 308.
- [9] Svarovsky, L., 1985. Solid-liquid Separation Processes and Technology, Volume 5 in the Handbook of Powder Technology, Elsevier, Amsterdam.
- [10] Wakeman, R.J., Tarleton, E.S., 2005. Solid/Liquid Separation Scale-up of Industrial Equipment, 1<sup>st</sup> ed. Elsevier Ltd., Oxford, UK, ISBN 1 8561 74204.
- [11] Svarovsky, L., 2000. Solid Liquid Separation, Fourth edition. Oxford, Butterworth-Heinemann, UK, ISBN 07506 45687.
- [12] Leclerc, D and Baluais .G. 1997. Filtration - Aspects généraux. Techniques de l'Ingénieur. Réf. : J3499 V1.
- [13] Poole, J.B et Doyle, D. 1966. Solid-liquid separation: a review and bibliography .Her Majesty's Stationery Office.
- [14] Le Lec. P., 1962. Variations de perméabilité des gâteaux de filtration. Génie Chim. F 87 no 3, p. 61-83.
- [15] Dullien. F.A.L., 1979. Porous media: fluid transport and pore structure Academic Press, New York.
- [16] Gyure .C.D. 1992., Set realistic goals for crossflow filtration . Chem. Eng. Progress, 1992, 88 no 11 p. 60.
- [17] Rushton .A. Ward .A.S and Holdich .R.G. 1997 Solid - liquid filtration and separation technology. ISBN 3-527-28613-6, 1st Edition.

- [18] Svarovsky, L., 2000. Solid Liquid Separation, Fourth edition. Oxford, Butterworth - Heinemann, UK, ISBN 07506 45687.
- [19] Rivet. P. 1981, Guide de la séparation liquide solide. ISBN 2-903714-002, idexpo.
- [20] Svarovsky, L., 2000. Solid Liquid Separation, Fourth edition. Oxford, Butterworth - Heinemann, UK, ISBN 07506 45687.
- [21] Carleton, A.J and Cousens, T.W. 1982, the performance of industrial vacuum filters, Filtration & Separation, 136-142.
- [22] Mériguet, G. 1997. Filtration – Technologie, Technique de l'Ingénieur, Procédés chimie - bio - agro | Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique, Réf. : J3510 V1
- [23] Svarovsky, L., 2000. Solid Liquid Separation, Fourth edition. Oxford, Butterworth - Heinemann, UK, ISBN 07506 45687.
- [24] Gale, R.S., 1967. Filtration Theory with Special Reference to Sewage Sludge. J. Wat. Pollut. Control fed, Volume 66, p 622.
- [25] Le Lec .P. 1971, La filtration sur support. Thèse de Doctorat Université de Nancy.
- [26] Darcy., 1856. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Dalmont
- [27] Holdich, R.G., 2012. Fundamentals of Particle Technology. Midland Information Technology & Publishing, UK, ISBN 0954388100.
- [28] Tiller, F.M. and CRUMP J.R.. 1977. Solid - liquid separation, an overview Chem. Eng. Progress, 73 no 10 p. 65.
- [29] Sjenitzer, F., 1955. Contribution to the Theory of Filtration. Trans. Inst. Chem. Eng., Volume 33; p 289.
- [30] Irwin, M. Hutten., 2007. Filtration Mechanisms and Theory. Hand Book of Non- Woven Filter Media, chapter 2, p 29-79.
- [31] Catchpole, K.W., Norman, J.R., Sergeant, G.D., 1970. Use of Optimal Techniques to Minimize Moisture Content Retention in the Fine Coal Filtration. Proc. Aust. Inst. Min and Met. Volume 234, p 37 - 42.
- [32] Hermans, P. H. And Bredee, H. L. 1936. Principle of the Mathematical Treatment of Constant-Pressure Filtration. J. Soc. Chem. Ind., Volume 55, p 1.
- [33] Carman, P.C., 1947. Slip Flow in Granular Beds. Nature 160(4061), p 301-302.
- [34] Brooks, R. H. and Corey, A. T, 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap 3, Colorado State Univ., Fort Collins.

- [35] Allen, T.R., 2013. Powder Sampling and Particle Size Determination. Amsterdam: Elsevier, p 682
- [36] Carleton, A. J and Salway, A. G. 1993. Dewatering of cakes. Filtration & Separation, November, p. 641-646.
- [37] Wakeman, R. J. 1982. An improved analysis for the forced gas deliquoring of filter cakes and porous media. Jour. Sepn Proc. Tech., 3 , p. 3238.
- [38] Dombrowsky, H. S. and Brownell, L. E. 1954. Residual equilibrium saturation of porous media. Industrial Engineering Chemical, p. 1207-1218.
- [39] Buckley, S. E and Leverett, M. C. 1942. Mechanism of fluid displacement in sands. Trans AIME, 146, p. 107-116, 1942.
- [40] Chatzis, I. and Morrow, N. R. 1981. Correlation of capillary number relationships for sandstones. Society of Petroleum Engineers of AIME, no 10114, p. 1-15.
- [41] Simons, C. S and Dahlstrom, D. A. 1966. Steam dewatering of filter cakes. Chem Eng. Prog. 62, 1, p. 75-81.
- [42] Baluais, G. Dodds, J. and Tondeur, D. 1983. Un modèle de désaturation des milieux poreux appliqué aux gâteaux de filtration. Entropie, 112, p. 36-45, 1983.
- [43] Couper, J. R., Fair, J. R., Penney, W. R., Walas, S. M., 2010. Chemical Process Equipment: Selection and Design, third ed. Elsevier Inc., Oxford, UK (p 337, chapter 11).
- [44] Silverblatt, C. E and Dahlstrom, D. A. 1954. Moisture content of fine coal filter cake. Effect of viscosity and surface tension. Ind. Eng. Chem., 46 , p. 1201-1207.
- [45] BALUAIS, G. 1987. Écoulements dans les milieux poreux déformables. Déshydratation des gâteaux de filtration par drainage forcé à l'air et par compression mécanique. Thèse de doctorat d'État-Sciences, Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, France.
- [46] Mouillage : contact à trois phases. Loi de Young-Dupré.
- [47] Sparks, T.; Chase, G.; 2016. Filters and Filtration Handbook, Six Editions, Section 4: Liquid Filtration. p 199-295
- [48] Christensen et al, C.H. Chen, P.L, Yue., A.S. Mujumdar., 2002. Sludge Dewatering and Drying. Dry. Technol., 20 (4-5), p 883-916.
- [49] Couper, J. R., Fair, J. R., Penney, W. R., Walas, S. M., 2010. Chemical Process Equipment: Selection and Design, third ed. Elsevier Inc., Oxford, UK (p 337, chapter 11).

**Tableau N° I.1.1**

**Echantillon utilisé: 1A**

**Pression appliquée: 28 pouces de mercure**

**Température de la suspension: 20° C**

**Concentration en solides: 30 % solides en masse**

| Volume<br>Filtration<br>(ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                              | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                           | 9                         | 10     | 8      | 8      |
| 25                           | 14                        | 15     | 13     | 13     |
| 30                           | 18                        | 19     | 17     | 17     |
| 35                           | 23                        | 24     | 22     | 21     |
| 40                           | 28                        | 29     | 27     | 26     |
| 45                           | 33                        | 34     | 33     | 32     |
| 50                           | 37                        | 38     | 37     | 36     |
| 55                           | 41                        | 41     | 41     | 40     |
| 60                           | 48                        | 49     | 47     | 46     |
| 65                           | 54                        | 54     | 53     | 53     |
| 70                           | 61                        | 62     | 60     | 60     |
| 75                           | 69                        | 69     | 68     | 68     |
| 80                           | 77                        | 78     | 77     | 77     |
| 85                           | 85                        | 86     | 84     | 84     |
| 90                           | 92                        | 93     | 91     | 91     |
| 95                           | 98                        | 99     | 97     | 96     |
| 100                          | 104                       | 105    | 103    | 102    |
| 105                          | 112                       | 113    | 111    | 110    |
| 110                          | 120                       | 119    | 118    | 117    |
| 115                          | 130                       | 129    | 128    | 127    |
| 120                          | 139                       | 138    | 137    | 137    |
| 125                          | 148                       | 147    | 145    | 146    |
| Humidité<br>(%)              | 19.12                     | 19.70  | 19.20  | 19.44  |

Tableau N° I.2.1

Echantillon utilisé: 2A

Pression appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 30 % solides en masse

| Volume de filtration<br>(ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |        |
|------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                              | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                           | 10                        | 13     | 14     | 13     |
| 25                           | 17                        | 21     | 20     | 19     |
| 30                           | 21                        | 26     | 24     | 23     |
| 35                           | 26                        | 31     | 30     | 29     |
| 40                           | 31                        | 37     | 35     | 34     |
| 45                           | 36                        | 42     | 39     | 39     |
| 50                           | 41                        | 47     | 45     | 44     |
| 55                           | 52                        | 54     | 57     | 56     |
| 60                           | 60                        | 60     | 65     | 64     |
| 65                           | 65                        | 65     | 70     | 69     |
| 70                           | 72                        | 70     | 76     | 75     |
| 75                           | 79                        | 75     | 83     | 82     |
| 80                           | 86                        | 80     | 89     | 89     |
| 85                           | 92                        | 84     | 95     | 94     |
| 90                           | 99                        | 89     | 102    | 101    |
| 95                           | 107                       | 93     | 109    | 109    |
| 100                          | 115                       | 98     | 118    | 118    |
| 105                          | 122                       | 101    | 127    | 126    |
| 110                          | 132                       | 108    | 137    | 136    |
| 115                          | 147                       | 114    | 154    | 152    |
| 120                          | 156                       | 119    | 204    | 202    |
| 125                          | 205                       | 124    | 214    | 210    |
| Humidité (%)                 | 21.91                     | 22.35  | 21.94  | 22.32  |

Tableau I.3.1

Echantillon utilisé: 3A

Pression appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 30 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 14                        | 14     | 11     | 11     |
| 25                        | 22                        | 22     | 18     | 18     |
| 30                        | 28                        | 28     | 24     | 24     |
| 35                        | 33                        | 33     | 29     | 31     |
| 40                        | 38                        | 38     | 34     | 36     |
| 45                        | 43                        | 43     | 39     | 42     |
| 50                        | 48                        | 48     | 45     | 48     |
| 55                        | 54                        | 54     | 52     | 53     |
| 60                        | 60                        | 61     | 58     | 61     |
| 65                        | 63                        | 64     | 64     | 68     |
| 70                        | 70                        | 71     | 70     | 75     |
| 75                        | 75                        | 76     | 76     | 82     |
| 80                        | 81                        | 82     | 81     | 89     |
| 85                        | 85                        | 86     | 87     | 96     |
| 90                        | 91                        | 92     | 93     | 104    |
| 95                        | 97                        | 99     | 98     | 113    |
| 100                       | 105                       | 107    | 104    | 120    |
| 105                       | 114                       | 117    | 112    | 128    |
| 110                       | 165                       | 167    | 119    | 137    |
| 115                       | -                         | -      | 124    | 146    |
| 120                       | -                         | -      | 132    | -      |
| Humidité (%)              | 21.47                     | 21.55  | 21.65  | 21.60  |

Tableau I. 4. 1.

Echantillon utilisé: 4A

Pression appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 30 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 18                        | 17     | 17     | 17     |
| 25                        | 27                        | 25     | 25     | 23     |
| 30                        | 35                        | 32     | 32     | 29     |
| 35                        | 41                        | 40     | 41     | 37     |
| 40                        | 49                        | 47     | 48     | 44     |
| 45                        | 53                        | 55     | 54     | 51     |
| 50                        | 61                        | 62     | 61     | 58     |
| 55                        | 68                        | 70     | 69     | 65     |
| 60                        | 75                        | 80     | 80     | 73     |
| 65                        | 82                        | 86     | 86     | 81     |
| 70                        | 90                        | 95     | 95     | 89     |
| 75                        | 98                        | 104    | 104    | 98     |
| 80                        | 106                       | 113    | 113    | 108    |
| 85                        | 113                       | 121    | 121    | 118    |
| 90                        | 121                       | 131    | 131    | 127    |
| 95                        | 129                       | 141    | 141    | 137    |
| 100                       | 138                       | 150    | 150    | 147    |
| 105                       | 145                       | 161    | 161    | 157    |
| 110                       | 154                       | 170    | 170    | 168    |
| 115                       | 163                       | 181    | 181    | 179    |
| 120                       | 204                       | 191    | 191    | 189    |
| 125                       | 331                       | 312    | 312    | 308    |
| Humidité (%)              | 23.35                     | 22.88  | 22.82  | 23.25  |

Tableau I. 5.1

Echantillon Utilisé: 5A

Pression appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 30 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 10                        | 12     | 14     | 14     |
| 25                        | 16                        | 20     | 22     | 22     |
| 30                        | 24                        | 27     | 29     | 30     |
| 35                        | 32                        | 35     | 37     | 38     |
| 40                        | 41                        | 43     | 47     | 48     |
| 45                        | 50                        | 55     | 58     | 59     |
| 50                        | 60                        | 64     | 66     | 67     |
| 55                        | 71                        | 74     | 76     | 76     |
| 60                        | 80                        | 85     | 86     | 86     |
| 65                        | 90                        | 96     | 97     | 97     |
| 70                        | 101                       | 105    | 107    | 108    |
| 75                        | 112                       | 116    | 118    | 119    |
| 80                        | 121                       | 125    | 128    | 129    |
| 85                        | 132                       | 136    | 139    | 140    |
| 90                        | 145                       | 148    | 150    | 151    |
| 95                        | 157                       | 160    | 161    | 162    |
| 100                       | 169                       | 172    | 171    | 173    |
| 105                       | 179                       | 181    | 183    | 184    |
| 110                       | 189                       | 190    | 194    | 194    |
| 115                       | 198                       | 200    | 205    | 206    |
| 120                       | 208                       | 214    | 216    | 217    |
| 125                       | 221                       | 231    | 228    | 229    |
| Humidité (%)              | 21.2                      | 21.56  | 21.06  | 21.48  |

Tableau I. 6. 1

Echantillon utilisé: 6A

Pression appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 30 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 20                        | 18     | 18     | 19     |
| 25                        | 28                        | 26     | 26     | 27     |
| 30                        | 32                        | 30     | 30     | 31     |
| 35                        | 42                        | 40     | 41     | 40     |
| 40                        | 52                        | 50     | 50     | 51     |
| 45                        | 61                        | 60     | 61     | 62     |
| 50                        | 70                        | 69     | 70     | 72     |
| 55                        | 84                        | 82     | 82     | 85     |
| 60                        | 98                        | 96     | 97     | 99     |
| 65                        | 124                       | 122    | 124    | 126    |
| 70                        | 132                       | 129    | 132    | 134    |
| 75                        | 141                       | 136    | 140    | 142    |
| 80                        | 150                       | 146    | 151    | 149    |
| 85                        | 159                       | 157    | 159    | 159    |
| 90                        | 169                       | 168    | 169    | 170    |
| 95                        | 181                       | 182    | 183    | 182    |
| 100                       | 193                       | 192    | 194    | 194    |
| 105                       | 204                       | 203    | 205    | 203    |
| 110                       | 217                       | 215    | 218    | 216    |
| 115                       | 229                       | 227    | 230    | 227    |
| 120                       | 298                       | 297    | 299    | 298    |
| 125                       | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 20.54                     | 22.57  | 22.07  | 22.51  |

Tableau. 1.7.1

Echantillon utilisé: 1A

Pression appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 40 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 10                        | 10     | 9      | 10     |
| 25                        | 14                        | 14     | 13     | 14     |
| 30                        | 18                        | 19     | 17     | 18     |
| 31                        | 22                        | 22     | 21     | 22     |
| 40                        | 27                        | 26     | 26     | 27     |
| 45                        | 31                        | 30     | 30     | 30     |
| 50                        | 35                        | 34     | 34     | 35     |
| 55                        | 39                        | 38     | 38     | 40     |
| 60                        | 45                        | 44     | 44     | 45     |
| 65                        | 49                        | 48     | 48     | 49     |
| 70                        | 14                        | 14     | 53     | 54     |
| 71                        | 60                        | 60     | 59     | 19     |
| 80                        | 66                        | 66     | 65     | 66     |
| 85                        | 70                        | 70     | 69     | 70     |
| 90                        | 76                        | 76     | 75     | 76     |
| 95                        | 80                        | 80     | 79     | 80     |
| 100                       | 86                        | 87     | 85     | 86     |
| 101                       | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 18.61                     | 19.38  | 18.69  | 19.32  |

Tableau. I. 8. 1

Echantillon utilisé: 2A

Pression appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 40 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 11                        | 10     | 11     | 12     |
| 25                        | 19                        | 16     | 19     | 20     |
| 30                        | 22                        | 20     | 22     | 23     |
| 35                        | 28                        | 24     | 29     | 30     |
| 40                        | 32                        | 28     | 33     | 34     |
| 45                        | 37                        | 32     | 37     | 38     |
| 50                        | 40                        | 36     | 41     | 42     |
| 55                        | 45                        | 40     | 45     | 46     |
| 60                        | 50                        | 45     | 51     | 52     |
| 65                        | 54                        | 50     | 55     | 56     |
| 70                        | 60                        | 55     | 61     | 62     |
| 75                        | 65                        | 61     | 69     | 66     |
| 80                        | 68                        | 67     | 69     | 70     |
| 85                        | 73                        | 73     | 74     | 75     |
| 90                        | 78                        | 80     | 79     | 80     |
| 95                        | 84                        | 87     | 85     | 86     |
| 100                       | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 21.58                     | 22.47  | 22.11  | 22.13  |

Tableau. I. 9. 1

Echantillon utilisé: 3A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 40 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 14                        | 15     | 16     | 16     |
| 25                        | 19                        | 20     | 21     | 21     |
| 30                        | 23                        | 24     | 25     | 25     |
| 31                        | 26                        | 26     | 27     | 27     |
| 40                        | 30                        | 31     | 32     | 32     |
| 45                        | 34                        | 34     | 36     | 36     |
| 50                        | 39                        | 40     | 42     | 42     |
| 55                        | 47                        | 47     | 49     | 49     |
| 60                        | 51                        | 52     | 54     | 54     |
| 65                        | 55                        | 56     | 58     | 58     |
| 70                        | 60                        | 61     | 63     | 64     |
| 75                        | 65                        | 66     | 69     | 69     |
| 80                        | 70                        | 71     | 73     | 73     |
| 85                        | 76                        | 78     | 80     | 80     |
| 90                        | 82                        | 84     | 86     | 85     |
| 95                        | 90                        | 91     | 93     | 93     |
| 100                       | 96                        | 99     | 101    | 101    |
| Humidité (%)              | 21.66                     | 21.12  | 21.18  | 21.35  |

Tableau. I. 10. 1

Echantillon utilisé: 4A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 40 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 17                        | 17     | 17     | 17     |
| 25                        | 28                        | 29     | 29     | 30     |
| 30                        | 37                        | 38     | 38     | 39     |
| 35                        | 44                        | 45     | 45     | 46     |
| 40                        | 52                        | 54     | 53     | 54     |
| 45                        | 60                        | 62     | 61     | 62     |
| 50                        | 66                        | 68     | 67     | 68     |
| 55                        | 77                        | 78     | 78     | 80     |
| 60                        | 84                        | 86     | 85     | 86     |
| 65                        | 91                        | 92     | 92     | 93     |
| 70                        | 104                       | 105    | 105    | 106    |
| 75                        | 108                       | 109    | 110    | 112    |
| 80                        | 114                       | 115    | 116    | 118    |
| 85                        | 125                       | 126    | 128    | 130    |
| 90                        | 134                       | 135    | 137    | 140    |
| 95                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 21.07                     | 20.81  | 21.05  | 20.71  |

Tableau. I. 11. 1

Echantillon utilisé: 5A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 40 % solides en masse

| Volume de Filtration | Temps de Filtration (secs) |        |        |        |
|----------------------|----------------------------|--------|--------|--------|
|                      | Test 1                     | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                   | 16                         | 15     | 16     | 15     |
| 25                   | 28                         | 27     | 28     | 27     |
| 30                   | 37                         | 37     | 37     | 37     |
| 35                   | 48                         | 49     | 48     | 49     |
| 40                   | 62                         | 62     | 62     | 63     |
| 41                   | 73                         | 74     | 73     | 74     |
| 50                   | 87                         | 86     | 87     | 86     |
| 55                   | 100                        | 101    | 100    | 101    |
| 60                   | 113                        | 114    | 113    | 114    |
| 65                   | 126                        | 127    | 126    | 127    |
| 70                   | 139                        | 139    | 139    | 139    |
| 75                   | 153                        | 152    | 153    | 152    |
| 80                   | 167                        | 166    | 167    | 166    |
| 85                   | 182                        | 180    | 182    | 180    |
| 90                   | 195                        | 194    | 195    | 194    |
| 100                  | 281                        | 272    | 282    | 220    |
| 105                  | -                          | -      | -      | -      |
| Humidité (%)         | 20.61                      | 21.61  | 20.55  | 20.51  |

Tableau. I. 12. 1

Echantillon utilisé: 6A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 40 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 22                        | 22     | 23     | 24     |
| 25                        | 35                        | 35     | 36     | 37     |
| 30                        | 48                        | 98     | 48     | 48     |
| 35                        | 65                        | 65     | 66     | 66     |
| 40                        | 78                        | 78     | 79     | 79     |
| 45                        | 95                        | 95     | 96     | 96     |
| 50                        | 114                       | 115    | 116    | 116    |
| 55                        | 135                       | 135    | 136    | 136    |
| 60                        | 155                       | 155    | 156    | 156    |
| 65                        | 171                       | 171    | 172    | 173    |
| 70                        | 192                       | 192    | 192    | 193    |
| 75                        | 223                       | 223    | 224    | 224    |
| 80                        | 255                       | 253    | 254    | 254    |
| 85                        | 273                       | 273    | 274    | 274    |
| 90                        | 295                       | 295    | 296    | 296    |
| 95                        | 316                       | 316    | 317    | 317    |
| 100                       | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 20.96                     | 21.64  | 21.85  | 21.09  |

Tableau. I. 13. 1

Echantillon utilisé: 1A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 50 % solides en masse

| volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 12                        | 11     | 10     | 12     |
| 25                        | 17                        | 16     | 15     | 17     |
| 30                        | 21                        | 20     | 19     | 21     |
| 35                        | 27                        | 26     | 25     | 27     |
| 40                        | 32                        | 31     | 30     | 32     |
| 45                        | 38                        | 37     | 36     | 38     |
| 50                        | 43                        | 42     | 41     | 43     |
| 55                        | 52                        | 52     | 51     | 52     |
| 60                        | 61                        | 62     | 63     | 61     |
| 65                        | 70                        | 72     | 73     | 70     |
| 70                        | 81                        | 82     | 83     | 81     |
| 75                        | 95                        | 96     | 97     | 95     |
| 80                        | 112                       | 119    | 122    | 115    |
| 85                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 17.69                     | 14.70  | 17.14  | 17.62  |

Tableau. I. 14. 1

Echantillon utilisé: 2A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 50 % solides en masse

| volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 23                        | 22     | 21     | 20     |
| 25                        | 30                        | 29     | 28     | 27     |
| 30                        | 37                        | 36     | 35     | 34     |
| 35                        | 42                        | 43     | 42     | 41     |
| 40                        | 50                        | 49     | 48     | 47     |
| 45                        | 57                        | 56     | 55     | 54     |
| 50                        | 66                        | 65     | 64     | 63     |
| 55                        | 74                        | 73     | 75     | 74     |
| 60                        | 83                        | 83     | 84     | 84     |
| 65                        | 94                        | 94     | 95     | 95     |
| 70                        | 111                       | 112    | 112    | 113    |
| 75                        | –                         | –      | –      | –      |
| Humidité (%)              | 22.14                     | 19.59  | 22.12  | 22.23  |

Tableau. I. 15. 1

Echantillon utilisé: 3A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 50 % solides en masse

| volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 23                        | 25     | 24     | 23     |
| 25                        | 50                        | 52     | 51     | 50     |
| 30                        | 68                        | 68     | 69     | 68     |
| 35                        | 81                        | 80     | 81     | 80     |
| 40                        | 98                        | 97     | 98     | 97     |
| 45                        | 111                       | 110    | 111    | 110    |
| 50                        | 122                       | 121    | 122    | 121    |
| 55                        | 138                       | 136    | 138    | 137    |
| 60                        | 154                       | 151    | 154    | 153    |
| 65                        | 166                       | 162    | 166    | 165    |
| 70                        | 182                       | 178    | 182    | 181    |
| 75                        | 303                       | 353    | 366    | 361    |
| 80                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 20.64                     | 18.95  | 20.40  | 19.87  |

Tableau. I. 16. 1

Echantillon utilisé: 4A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 50 % solides en masse

| volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 14                        | 14     | 13     | 14     |
| 25                        | 22                        | 23     | 22     | 23     |
| 30                        | 30                        | 31     | 30     | 31     |
| 35                        | 37                        | 38     | 37     | 38     |
| 40                        | 44                        | 43     | 44     | 43     |
| 45                        | 52                        | 50     | 54     | 50     |
| 50                        | 60                        | 58     | 61     | 58     |
| 55                        | 66                        | 64     | 67     | 64     |
| 60                        | 72                        | 70     | 73     | 70     |
| 65                        | 78                        | 76     | 79     | 76     |
| 70                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 21.46                     | 22.84  | 21.80  | 21.95  |

Tableau. I. 17. 1

Echantillon utilisé: 5A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 50 % solides en masse

| volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 13                        | 15     | 16     | 15     |
| 25                        | 25                        | 27     | 28     | 27     |
| 30                        | 35                        | 36     | 37     | 36     |
| 35                        | 46                        | 47     | 48     | 47     |
| 40                        | 59                        | 60     | 61     | 60     |
| 45                        | 72                        | 72     | 72     | 72     |
| 50                        | 84                        | 85     | 86     | 85     |
| 55                        | 97                        | 97     | 98     | 97     |
| 60                        | 109                       | 109    | 110    | 109    |
| 65                        | 124                       | 123    | 124    | 123    |
| 70                        | 137                       | 138    | 139    | 138    |
| 75                        | 152                       | 154    | 156    | 154    |
| 80                        | 466                       | 472    | 481    | 472    |
| 85                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 23.26                     | 22.50  | 22.58  | 22.59  |

Tableau. I. 18. 1

Echantillon utilisé: 6A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 50 % solides en masse

| volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 19                        | 19     | 17     | 19     |
| 25                        | 28                        | 27     | 27     | 28     |
| 30                        | 40                        | 38     | 39     | 40     |
| 35                        | 60                        | 51     | 61     | 60     |
| 40                        | 70                        | 61     | 71     | 70     |
| 45                        | 83                        | 72     | 85     | 72     |
| 50                        | 84                        | 85     | 86     | 83     |
| 55                        | 111                       | 92     | 113    | 111    |
| 60                        | 130                       | 106    | 132    | 130    |
| 65                        | 182                       | 121    | 184    | 182    |
| 70                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 23.04                     | 22.59  | 23.21  | 22.74  |

Tableau. I. 19. 1

Echantillon utilisé: 1A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 60 % solides en masse

| Volume de Filtration (m1) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 13                        | 15     | 12     | 14     |
| 22                        | 17                        | 21     | 15     | 20     |
| 24                        | 19                        | 26     | 19     | 26     |
| 26                        | 23                        | 29     | 22     | 30     |
| 28                        | 28                        | 32     | 26     | 33     |
| 30                        | 32                        | 35     | 31     | 36     |
| 32                        | 34                        | 38     | 35     | 39     |
| 34                        | 37                        | 40     | 38     | 42     |
| 36                        | 40                        | 42     | 41     | 45     |
| 38                        | 42                        | 47     | 47     | 48     |
| 40                        | 47                        | 64     | 61     | 62     |
| 42                        | 63                        | 80     | 75     | 76     |
| 44                        | 84                        | 96     | 91     | 92     |
| 46                        | 128                       | 133    | 130    | 132    |
| 48                        | 158                       | 163    | 160    | 163    |
| 50                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 23.04                     | 22.59  | 23.21  | 22.74  |

Tableau. I. 20. 1

Echantillon utilisé : 2A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 60 % solides en masse

| volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
| 20                        | 12                        | 15     | 13     | 15     |
| 22                        | 16                        | 18     | 18     | 17     |
| 24                        | 20                        | 25     | 22     | 24     |
| 26                        | 22                        | 29     | 25     | 29     |
| 28                        | 24                        | 32     | 27     | 32     |
| 30                        | 27                        | 34     | 29     | 34     |
| 32                        | 30                        | 38     | 31     | 38     |
| 34                        | 33                        | 41     | 35     | 42     |
| 36                        | 37                        | 44     | 38     | 45     |
| 38                        | 39                        | 47     | 43     | 49     |
| 40                        | 42                        | 52     | 45     | 54     |
| 42                        | 44                        | 58     | 52     | 59     |
| 44                        | 60                        | 61     | 61     | 62     |
| 46                        | 68                        | 66     | 65     | 67     |
| 48                        | 75                        | 71     | 70     | 75     |
| 50                        | 86                        | 78     | 76     | 84     |
| 52                        | 92                        | 90     | 88     | 91     |
| Humidité (%)              | 23.57                     | 21.54  | 23.13  | 23.60  |

Tableau. I. 21. 1

Echantillon utilisé: 3A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 60 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | test 2 | Test 3 | test 4 |
| 20                        | 20                        | 21     | 22     | 20     |
| 22                        | 26                        | 25     | 27     | 26     |
| 24                        | 32                        | 31     | 32     | 32     |
| 26                        | 38                        | 37     | 37     | 38     |
| 28                        | 44                        | 43     | 42     | 44     |
| 30                        | 49                        | 48     | 47     | 49     |
| 32                        | 58                        | 57     | 52     | 58     |
| 34                        | 67                        | 67     | 59     | 67     |
| 36                        | 76                        | 76     | 72     | 76     |
| 38                        | 84                        | 84     | 82     | 84     |
| 40                        | 94                        | 96     | 92     | 94     |
| 42                        | 104                       | 106    | 104    | 104    |
| 44                        | 116                       | 116    | 115    | 117    |
| 46                        | 127                       | 129    | 131    | 127    |
| 48                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 21.10                     | 20.70  | 21.08  | 20.84  |

Tableau. I. 22. 1

Echantillon utilisé: 4A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° C

Concentration en solides: 60 % solides en masse

| Volume de Filtration (m1) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | test 2 | Test 3 | test 4 |
| 20                        | 25                        | 25     | 25     | 29     |
| 22                        | 31                        | 31     | 32     | 33     |
| 24                        | 38                        | 38     | 38     | 37     |
| 26                        | 41                        | 40     | 40     | 39     |
| 28                        | 43                        | 43     | 43     | 50     |
| 30                        | 49                        | 49     | 49     | 55     |
| 32                        | 61                        | 51     | 51     | 60     |
| 34                        | 68                        | 53     | 53     | 67     |
| 36                        | 79                        | 64     | 64     | 80     |
| 38                        | 85                        | 70     | 70     | 85     |
| 40                        | 102                       | 89     | 89     | 102    |
| 42                        | 121                       | 115    | 115    | 119    |
| 44                        | 221                       | 203    | 205    | 207    |
| 46                        | 256                       | 235    | 235    | 256    |
| 48                        | -                         | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 22.89                     | 22.77  | 21.91  | 23.05  |

Tableau. I. 23. 1

Echantillon utilisé: 5A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20<sup>0</sup> C

Concentration en solides: 60 % solides en masse

| Volume de Filtration (m1) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | test 2 | Test 3 | test 4 |
| 20                        | 16                        | 15     | 20     | 20     |
| 22                        | 22                        | 19     | 27     | 30     |
| 24                        | 30                        | 24     | 40     | 41     |
| 26                        | 38                        | 30     | 50     | 52     |
| 28                        | 44                        | 33     | 65     | 65     |
| 30                        | 50                        | 38     | 62     | 76     |
| 32                        | 60                        | 44     | 70     | 84     |
| 34                        | 66                        | 54     | 78     | 91     |
| 36                        | 73                        | 61     | 85     | 99     |
| 38                        | 79                        | 69     | 93     | 109    |
| 40                        | 85                        | 74     | 100    | 117    |
| 42                        | 95                        | 89     | 109    | 125    |
| 44                        | 111                       | 109    | 127    | 134    |
| 46                        | 174                       | 168    | 140    | 156    |
| 48                        | <b>580</b>                | -      | -      | -      |
| Humidité (%)              | 21.38                     | 21.57  | 21.13  | 21.27  |

Tableau. I. 24. 1

Echantillon utilisé: 6A

Pression Appliquée: 28 pouces de mercure

Température de la suspension: 20° ° C

Concentration en solides: 60 % solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | test 2 | Test 3 | test 4 |
| 20                        | 21                        | 24     | 22     | 21     |
| 22                        | 30                        | 33     | 31     | 30     |
| 24                        | 39                        | 41     | 39     | 39     |
| 26                        | 48                        | 49     | 48     | 49     |
| 28                        | 60                        | 59     | 61     | 61     |
| 30                        | 72                        | 71     | 72     | 73     |
| 32                        | 86                        | 84     | 87     | 86     |
| 34                        | 102                       | 97     | 103    | 102    |
| 36                        | 118                       | 111    | 119    | 118    |
| 38                        | 136                       | 125    | 137    | 138    |
| 40                        | 154                       | 141    | 156    | 155    |
| 42                        | 173                       | 159    | 174    | 174    |
| 44                        | 192                       | 177    | 194    | 192    |
| 46                        | 211                       | 206    | 214    | 211    |
| 48                        | 231                       | 226    | 323    | 321    |
| Humidité (%)              | 21.10                     | 20.70  | 21.08  | 20.84  |

**Tableau. 11. 1. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Pression appliquée : 40 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 20% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 |
| 20                        | 34                        | 31     |
| 25                        | 40                        | 37     |
| 30                        | 46                        | 43     |
| 35                        | 51                        | 48     |
| 40                        | 56                        | 53     |
| 45                        | 61                        | 58     |
| 50                        | 68                        | 65     |
| 55                        | 72                        | 70     |
| 60                        | 79                        | 77     |
| 65                        | 84                        | 82     |
| 70                        | 91                        | 89     |
| 75                        | 97                        | 95     |
| 80                        | 104                       | 102    |
| 85                        | 111                       | 109    |
| 90                        | 118                       | 116    |
| 95                        | 125                       | 123    |
| 100                       | 133                       | 131    |
| 105                       | 140                       | 138    |
| 110                       | 147                       | 145    |
| 115                       | 155                       | 153    |
| 120                       | 162                       | 160    |
| 125                       | 170                       | 168    |
| 130                       | 178                       | 176    |
| 135                       | 185                       | 183    |
| 140                       | 193                       | 191    |
| 145                       | 202                       | 200    |
| 150                       | 212                       | -      |
| Humidité (%)              | 23,60                     | 23,80  |

**Tableau. 11. 2. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Pression appliquée : 60 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 20% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 |
| 20                        | 25                        | 24     |
| 25                        | 37                        | 36     |
| 30                        | 47                        | 46     |
| 35                        | 57                        | 56     |
| 40                        | 67                        | 66     |
| 45                        | 77                        | 76     |
| 50                        | 88                        | 87     |
| 55                        | 99                        | 98     |
| 60                        | 110                       | 109    |
| 65                        | 121                       | 120    |
| 70                        | 136                       | 135    |
| 75                        | 146                       | 145    |
| 80                        | 160                       | 150    |
| 85                        | 171                       | 162    |
| 90                        | 185                       | 177    |
| 95                        | 199                       | 192    |
| 100                       | 212                       | 206    |
| 105                       | 228                       | 222    |
| 110                       | 242                       | 236    |
| 115                       | 252                       | 246    |
| 120                       | 268                       | 256    |
| 125                       | 282                       | 268    |
| 130                       | 299                       | 280    |
| 135                       | -                         | 292    |
| 140                       | -                         | 304    |
| Humidité (%)              | 22,19                     | 21,15  |

**Tableau. 11. 3. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Température de la suspension : 20° C

Pression appliquée : 80 KPa

Concentration en solides : 20% solides en masse

| Volume de Filtration<br>(ml) | Temps de Filtration<br>(sec) |        |
|------------------------------|------------------------------|--------|
|                              | Test 1                       | Test 2 |
| 20                           | 21                           | 23     |
| 25                           | 27                           | 29     |
| 30                           | 34                           | 36     |
| 35                           | 41                           | 43     |
| 40                           | 48                           | 50     |
| 45                           | 56                           | 58     |
| 50                           | 64                           | 66     |
| 55                           | 73                           | 74     |
| 60                           | 82                           | 83     |
| 65                           | 91                           | 92     |
| 70                           | 101                          | 103    |
| 75                           | 111                          | 114    |
| 80                           | 121                          | 125    |
| 85                           | 131                          | 136    |
| 90                           | 141                          | 149    |
| 95                           | 153                          | 162    |
| 100                          | 165                          | 172    |
| 105                          | 175                          | 184    |
| 110                          | 187                          | 196    |
| 115                          | 199                          | 206    |
| 120                          | 211                          | 216    |
| 125                          | 221                          | 228    |
| 130                          | 231                          | 240    |
| 135                          | 243                          | 252    |
| 140                          | 257                          | 263    |
| 145                          | 267                          | 274    |
| Humidité (%)                 | 19,65                        | 19,81  |

**Tableau. 11. 4. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Pression appliquée : 40 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 |
| 20                        | 26                        | 28     |
| 25                        | 45                        | 47     |
| 30                        | 63                        | 65     |
| 35                        | 81                        | 83     |
| 40                        | 101                       | 103    |
| 45                        | 123                       | 124    |
| 50                        | 145                       | 146    |
| 55                        | 169                       | 170    |
| 60                        | 193                       | 194    |
| 65                        | 215                       | 216    |
| 70                        | 241                       | 241    |
| 75                        | 267                       | 266    |
| 80                        | 291                       | 290    |
| 85                        | 315                       | 314    |
| 90                        | 341                       | 340    |
| 95                        | 367                       | 364    |
| 100                       | -                         | -      |
| Humidité (%)              | 21,58                     | 21,15  |

**Tableau. 11. 5. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Pression appliquée : 60 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 |
| 20                        | 25                        | 24     |
| 25                        | 33                        | 32     |
| 30                        | 39                        | 40     |
| 35                        | 45                        | 46     |
| 40                        | 51                        | 52     |
| 45                        | 61                        | 60     |
| 50                        | 71                        | 70     |
| 55                        | 83                        | 80     |
| 60                        | 93                        | 90     |
| 65                        | 105                       | 102    |
| 70                        | 117                       | 114    |
| 75                        | 131                       | 126    |
| 80                        | 145                       | 146    |
| 85                        | 161                       | 156    |
| 90                        | 171                       | 167    |
| 95                        | 191                       | 178    |
| 100                       | -                         | 194    |
| Humidité (%)              | 17,03                     | 18,36  |

**Tableau. 11. 6. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Pression appliquée : 80 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 |
| 20                        | 23                        | 21     |
| 25                        | 37                        | 35     |
| 30                        | 49                        | 47     |
| 35                        | 61                        | 59     |
| 40                        | 75                        | 73     |
| 45                        | 89                        | 87     |
| 50                        | 105                       | 102    |
| 55                        | 120                       | 117    |
| 60                        | 135                       | 132    |
| 65                        | 152                       | 150    |
| 70                        | 169                       | 167    |
| 75                        | 187                       | 186    |
| 80                        | 205                       | 204    |
| 85                        | 222                       | 222    |
| 90                        | 245                       | 239    |
| 95                        | 267                       | 262    |
| 100                       | -                         | 276    |
| Humidité (%)              | 14,19                     | 15,91  |

**Tableau. 11. 7. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Pression appliquée : 40 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 60% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 |
| 20                        | 46                        | 48     |
| 25                        | 76                        | 80     |
| 30                        | 108                       | 112    |
| 35                        | 148                       | 146    |
| 40                        | 188                       | 180    |
| 45                        | 230                       | 220    |
| 50                        | 270                       | 262    |
| 55                        | 320                       | 306    |
| 60                        | -                         | -      |
| 65                        | -                         | -      |
| Humidité (%)              | 18,80                     | 17,86  |

**Tableau. 11. 8. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Pression appliquée : 60 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 60% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 |
| 20                        | 38                        | 40     |
| 25                        | 62                        | 64     |
| 30                        | 88                        | 90     |
| 35                        | 128                       | 130    |
| 40                        | 162                       | 164    |
| 45                        | 202                       | 206    |
| 50                        | 246                       | 250    |
| 55                        | 292                       | 294    |
| 60                        | -                         | -      |
| 65                        | -                         | -      |
| 70                        | -                         | -      |
| Humidité (%)              | 15,05                     | 15,00  |

**Tableau. 11. 9. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique I

Pression appliquée : 80 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 60% solides en masse

| Volume de Filtration (ml) | Temps de Filtration (sec) |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 |
| 20                        | 26                        | 29     |
| 25                        | 50                        | 52     |
| 30                        | 72                        | 72     |
| 35                        | 96                        | 92     |
| 40                        | 126                       | 112    |
| 45                        | 156                       | 133    |
| 50                        | 186                       | 154    |
| 55                        | 218                       | -      |
| 60                        | 238                       | -      |
| 65                        | -                         | -      |
| 70                        | -                         | -      |
| Humidité (%)              | 17.54                     | 18.02  |

**Tableau. 11. 10. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique II

Pression appliquée : 33.4 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration<br>(ml) | Temps de filtration<br>(sec) |        |        |
|------------------------------|------------------------------|--------|--------|
|                              | Test 1                       | Test 2 | Test 3 |
| 20                           | 89                           | 88     | 87     |
| 25                           | 186                          | 184    | 182    |
| 30                           | 276                          | 271    | 271    |
| 35                           | 367                          | 364    | 362    |
| 40                           | 487                          | 484    | 482    |
| 45                           | 598                          | 596    | 594    |
| 50                           | 747                          | 745    | 744    |
| 55                           | 897                          | 895    | 894    |
| 60                           | 1069                         | 1067   | 1065   |
| 65                           | 1225                         | 1226   | 1225   |
| 70                           | 1385                         | 1387   | 1385   |
| 75                           | 1567                         | 1567   | 1565   |
| 80                           | 1764                         | 1769   | 1766   |
| 85                           | 1909                         | 1909   | 1906   |
| 90                           | 2097                         | 2098   | 2096   |
| 95                           | 2294                         | 2296   | 2292   |
| 100                          | 2497                         | 2498   | 2494   |
| Humidité<br>(%)              | 18,98                        | 18,62  | 18,58  |

**Tableau. 11. 11. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique II

Pression appliquée : 40 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration<br>(ml) | Temps de filtration<br>(sec) |        |        |
|------------------------------|------------------------------|--------|--------|
|                              | Test 1                       | Test 2 | Test 3 |
| 20                           | 85                           | 83     | 82     |
| 25                           | 140                          | 136    | 134    |
| 30                           | 203                          | 197    | 196    |
| 35                           | 271                          | 266    | 266    |
| 40                           | 331                          | 326    | 326    |
| 45                           | 407                          | 400    | 402    |
| 50                           | 475                          | 468    | 470    |
| 55                           | 554                          | 558    | 560    |
| 60                           | 647                          | 649    | 652    |
| 65                           | 741                          | 749    | 752    |
| 70                           | 842                          | 849    | 852    |
| 75                           | 963                          | 969    | 974    |
| 80                           | 1072                         | 1078   | 1080   |
| 85                           | 1199                         | 1208   | 1212   |
| 90                           | 1317                         | 1328   | 1332   |
| 95                           | 1462                         | 1469   | 1472   |
| 100                          | -                            | 1609   | -      |
| Humidité<br>(%)              | 17,09                        | 17,42  | 17,90  |

**Tableau. 11. 12. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique II

Pression appliquée : 60 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 80                        | 115    | 81     |
| 25                        | 128                       | 188    | 126    |
| 30                        | 188                       | 247    | 186    |
| 35                        | 258                       | 308    | 258    |
| 40                        | 317                       | 367    | 316    |
| 45                        | 397                       | 438    | 394    |
| 50                        | 467                       | 512    | 462    |
| 55                        | 557                       | 593    | 552    |
| 60                        | 637                       | 673    | 632    |
| 65                        | 737                       | 765    | 734    |
| 70                        | 847                       | 858    | 847    |
| 75                        | 965                       | 965    | 966    |
| 80                        | 1075                      | 1058   | 1076   |
| 85                        | 1205                      | 1181   | 1205   |
| 90                        | 1325                      | 1286   | 1327   |
| 95                        | 1462                      | 1406   | 1407   |
| 100                       | 1602                      | 1523   | 1607   |
| 105                       | -                         | 1649   | -      |
| Humidité (ml)             | 15,27                     | 15,05  | 15,32  |

**Tableau. 11. 13. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique II

Pression appliquée : 80 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 98                        | 96     | 126    |
| 25                        | 186                       | 182    | 219    |
| 30                        | 266                       | 262    | 368    |
| 35                        | 387                       | 382    | 400    |
| 40                        | 489                       | 484    | 506    |
| 45                        | 607                       | 602    | 597    |
| 50                        | 757                       | 752    | 686    |
| 55                        | 909                       | 902    | 786    |
| 60                        | 1079                      | 1074   | 888    |
| 65                        | 1227                      | 1224   | 1005   |
| =70                       | 1402                      | 1398   | 1123   |
| 75                        | 1587                      | 1584   | 1263   |
| 80                        | 1767                      | 1764   | 1392   |
| 85                        | 1920                      | 1918   | 1560   |
| 90                        | 2109                      | 2102   | 1711   |
| 95                        | 2312                      | 2308   | 1879   |
| 100                       | 2500                      | 2496   | 2035   |
| 105                       | -                         | -      | -      |
| Humidité (ml)             | 15,85                     | 15,88  | 16,06  |

**Tableau. 11. 14. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique III

Pression appliquée : 20 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 37                        | 46     | 34     |
| 25                        | 77                        | 100    | 75     |
| 30                        | 107                       | 137    | 104    |
| 35                        | 144                       | 177    | 140    |
| 40                        | 189                       | 227    | 182    |
| 45                        | 234                       | 283    | 230    |
| 50                        | 269                       | 334    | 261    |
| 55                        | 309                       | 387    | 302    |
| 60                        | 369                       | 451    | 362    |
| 65                        | 422                       | 516    | 418    |
| 70                        | 469                       | 582    | 462    |
| 75                        | 529                       | 662    | 529    |
| 80                        | 589                       | 730    | 582    |
| 85                        | 649                       | 805    | 642    |
| 90                        | 709                       | 886    | 701    |
| 95                        | 769                       | 966    | 761    |
| 100                       | 834                       | 1039   | 830    |
| 105                       | -                         | 1175   | -      |
| Humidité (ml)             | 13,79                     | 13,34  | 13,65  |

**Tableau. 11. 15. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique III

Pression appliquée : 40 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 25                        | 29     | 26     |
| 25                        | 45                        | 49     | 46     |
| 30                        | 61                        | 65     | 63     |
| 35                        | 73                        | 74     | 75     |
| 40                        | 90                        | 92     | 94     |
| 45                        | 103                       | 105    | 108    |
| 50                        | 120                       | 123    | 125    |
| 55                        | 142                       | 143    | 148    |
| 60                        | 172                       | 176    | 178    |
| 65                        | 207                       | 208    | 211    |
| 70                        | 240                       | 241    | 248    |
| 75                        | 278                       | 280    | 282    |
| 80                        | 314                       | 318    | 320    |
| 85                        | 354                       | 358    | 360    |
| 90                        | 390                       | 394    | 394    |
| 95                        | 437                       | 440    | 441    |
| 100                       | -                         | -      | 521    |
| 105                       | -                         | -      | -      |
| Humidité (ml)             | 14,14                     | 14,06  | 14,13  |

**Tableau. 11. 16. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique III

Pression appliquée : 60 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 34                        | 30     | 35     |
| 25                        | 69                        | 57     | 71     |
| 30                        | 99                        | 84     | 101    |
| 35                        | 135                       | 145    | 138    |
| 40                        | 175                       | 183    | 178    |
| 45                        | 211                       | 214    | 218    |
| 50                        | 241                       | 234    | 244    |
| 55                        | 281                       | 296    | 284    |
| 60                        | 325                       | 338    | 329    |
| 65                        | 372                       | 383    | 377    |
| 70                        | 424                       | 432    | 429    |
| 75                        | 490                       | 486    | 496    |
| 80                        | 564                       | 536    | 570    |
| 85                        | 644                       | 584    | 649    |
| 90                        | 731                       | 644    | 741    |
| 95                        | 831                       | 696    | 838    |
| 100                       | 927                       | 751    | 932    |
| 105                       | -                         | 816    | -      |
| Humidité (ml)             | 15,18                     | 13,77  | 14,19  |

**Tableau. 11. 17. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique III

Pression appliquée : 80 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 51                        | 51     | 56     |
| 25                        | 117                       | 111    | 116    |
| 30                        | 167                       | 161    | 166    |
| 35                        | 227                       | 222    | 226    |
| 40                        | 285                       | 280    | 283    |
| 45                        | 346                       | 342    | 344    |
| 50                        | 409                       | 406    | 406    |
| 55                        | 489                       | 486    | 486    |
| 60                        | 558                       | 556    | 557    |
| 65                        | 639                       | 634    | 638    |
| 70                        | 723                       | 716    | 720    |
| 75                        | 843                       | 836    | 840    |
| 80                        | 986                       | 978    | 984    |
| 85                        | 1047                      | 1039   | 1043   |
| 90                        | 1100                      | 1080   | 1083   |
| 95                        | 1155                      | 1146   | 1144   |
| 100                       | 1211                      | 1204   | 1208   |
| 105                       | 1271                      | 1264   | 1268   |
| Humidité (ml)             | 14.45                     | 14.56  | 14.44  |

**Tableau. 11. 18. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique IV

Pression appliquée : 20 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 22                        | 23     | 24     |
| 25                        | 35                        | 36     | 38     |
| 30                        | 45                        | 46     | 47     |
| 35                        | 55                        | 56     | 57     |
| 40                        | 64                        | 66     | 67     |
| 45                        | 72                        | 74     | 73     |
| 50                        | 81                        | 83     | 82     |
| 55                        | 90                        | 91     | 92     |
| 60                        | 101                       | 102    | 101    |
| 65                        | 109                       | 111    | 110    |
| 70                        | 120                       | 122    | 120    |
| 75                        | 129                       | 131    | 128    |
| 80                        | 138                       | 140    | 136    |
| 85                        | 149                       | 151    | 148    |
| 90                        | 160                       | 161    | 160    |
| 95                        | 170                       | 171    | 168    |
| 100                       | 181                       | 183    | 178    |
| 105                       | -                         | -      | -      |
| Humidité (ml)             | 12,20                     | 12,09  | 12,51  |

**Tableau. 11. 19. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique IV

Pression appliquée : 40 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 27                        | 30     | 32     |
| 25                        | 39                        | 42     | 44     |
| 30                        | 44                        | 48     | 50     |
| 35                        | 48                        | 52     | 54     |
| 40                        | 52                        | 57     | 59     |
| 45                        | 56                        | 62     | 64     |
| 50                        | 61                        | 67     | 69     |
| 55                        | 65                        | 71     | 73     |
| 60                        | 70                        | 75     | 77     |
| 65                        | 74                        | 79     | 81     |
| 70                        | 79                        | 83     | 85     |
| 75                        | 84                        | 87     | 90     |
| 80                        | 89                        | 92     | 95     |
| 85                        | 94                        | 98     | 102    |
| 90                        | 100                       | 104    | 107    |
| 95                        | 105                       | 110    | 113    |
| 100                       | 110                       | 116    | 119    |
| 105                       | 116                       | 120    | 123    |
| Humidité (ml)             | 10,81                     | 10,70  | 10,79  |

**Tableau. 11. 20. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique IV

Pression appliquée : 60 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 16                        | 17     | 16     |
| 25                        | 23                        | 24     | 23     |
| 30                        | 30                        | 31     | 30     |
| 35                        | 36                        | 37     | 37     |
| 40                        | 45                        | 46     | 46     |
| 45                        | 51                        | 52     | 52     |
| 50                        | 59                        | 60     | 60     |
| 55                        | 67                        | 69     | 68     |
| 60                        | 76                        | 78     | 77     |
| 65                        | 84                        | 86     | 85     |
| 70                        | 93                        | 95     | 94     |
| 75                        | 101                       | 103    | 102    |
| 80                        | 110                       | 113    | 111    |
| 85                        | 120                       | 123    | 121    |
| 90                        | 127                       | 130    | 128    |
| 95                        | 137                       | 140    | 138    |
| 100                       | 145                       | 148    | 146    |
| 105                       | 155                       | 158    | 156    |
| Humidité (ml)             | 11,36                     | 11,14  | 11,59  |

**Tableau. 11. 21. 1**

Echantillon utilisé : Distribution granulométrique IV

Pression appliquée : 80 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Volume de filtration (ml) | Temps de filtration (sec) |        |        |
|---------------------------|---------------------------|--------|--------|
|                           | Test 1                    | Test 2 | Test 3 |
| 20                        | 39                        | 34     | 33     |
| 25                        | 69                        | 61     | 60     |
| 30                        | 109                       | 88     | 87     |
| 35                        | 140                       | 117    | 116    |
| 40                        | 175                       | 146    | 145    |
| 45                        | 210                       | 178    | 177    |
| 50                        | 241                       | 210    | 209    |
| 55                        | 281                       | 249    | 247    |
| 60                        | 314                       | 288    | 286    |
| 65                        | 354                       | 331    | 329    |
| 70                        | 394                       | 374    | 372    |
| 75                        | 429                       | 417    | 414    |
| 80                        | 469                       | 456    | 451    |
| 85                        | 515                       | 495    | 492    |
| 90                        | 559                       | 533    | 531    |
| 95                        | 603                       | 568    | 565    |
| 100                       | 651                       | 611    | 609    |
| 105                       | 698                       | 654    | 651    |
| Humidité (ml)             | 19,85                     | 19,42  | 19,61  |

Tableau II. 1. 2

Pression appliquée : 40KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 20 % solides en masse

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 4           | 2      |
| 10                     | 4           | 3      |
| 15                     | 6           | 3      |

Tableau II. 2. 2

Pression appliquée : 60KPa

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 1           | 4      |
| 10                     | 2           | 4      |
| 15                     | 2           | 5      |

Tableau II. 3. 2

Pression appliquée : 80KPa

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 3           | 2      |
| 10                     | 4           | 4      |
| 15                     | 4           | 4      |

Tableau II. 4. 2

Pression appliquée : 40KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 2           | 2      |
| 10                     | 3           | 3      |
| 15                     | 3           | 2      |

Tableau II. 5. 2

Pression appliquée : 60KPa

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 2           | 4      |
| 10                     | 4           | 4      |
| 15                     | 4           | 5      |

Tableau II. 6. 2

Pression appliquée : 80KPa

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 2           | 2      |
| 10                     | 2           | 3      |
| 15                     | 3           | 4      |

Tableau II. 7. 2

Pression appliquée : 60 KPa

Température de la suspension : 20°C

Concentration en solides : 60 % solides en masse

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 1           | 2      |
| 10                     | 2           | 3      |
| 15                     | 2           | 3      |

Tableau II. 8. 2

Pression appliquée : 60KPa

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 2           | 2      |
| 10                     | 3           | 3      |
| 15                     | 3           | 3      |

Tableau II. 9. 2

Pression appliquée : 80KPa

| Test de Déshydratation |             |        |
|------------------------|-------------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |
|                        | Test 1      | Test 2 |
| 0                      | 0           | 0      |
| 5                      | 1           | 2      |
| 10                     | 2           | 2      |
| 15                     | 2           | 3      |

Tableau II. 10. 2

Pression appliquée : 33.40 KPa

Température de la suspension : 20° C

Concentration en solides : 40 % solides en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 5                      | 2           | 2      | 2      |
| 10                     | 4           | 2      | 3      |
| 15                     | 4           | 3      | 3      |

Tableau II. 11. 2

Pression appliquée : 40 KPa

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 5                      | 1           | 2      | 2      |
| 10                     | 2           | 4      | 2      |
| 15                     | 2           | 5      | 2      |

Tableau II. 12. 2

Pression appliquée : 60 KPa

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 5                      | 2           | 2      | 2      |
| 10                     | 4           | 4      | 4      |
| 15                     | 6           | 5      | 6      |

Tableau II. 13. 2

Pression appliquée : 80 KPa

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 5                      | 4           | 4      | 4      |
| 10                     | 8           | 7      | 6      |
| 15                     | 9           | 8      | 7      |

Tableau II. 14. 2

Pression appliquée : 20 KPa

Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 3           | 3      | 3      |
| 4                      | 6           | 4      | 4      |
| 6                      | 8           | 5      | 5      |
| 8                      | 8           | 5      | 5      |
| 10                     | 9           | 5      | 6      |
| 12                     | 9           | 5      | 6      |
| 14                     | 9           | 5      | 6      |
| 15                     | 9           | 5      | 6      |

Tableau II. 13. 2

Pression appliquée : 80 KPa

Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 3           | 3      | 3      |
| 4                      | 6           | 4      | 4      |
| 6                      | 8           | 5      | 5      |
| 8                      | 8           | 5      | 5      |
| 10                     | 9           | 5      | 6      |
| 12                     | 9           | 5      | 6      |
| 14                     | 9           | 5      | 6      |
| 15                     | 9           | 5      | 6      |

Tableau II. 14. 2

Pression appliquée : 20 KPa

Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 3           | 3      | 3      |
| 4                      | 6           | 4      | 4      |
| 6                      | 8           | 5      | 5      |
| 8                      | 8           | 5      | 5      |
| 10                     | 9           | 5      | 6      |
| 12                     | 9           | 5      | 6      |
| 14                     | 9           | 5      | 6      |
| 15                     | 9           | 5      | 6      |

Tableau II. 15. 2

Pression appliquée : 40 KPa

Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 4           | 4      | 4      |
| 4                      | 6           | 5      | 5      |
| 6                      | 8           | 7      | 7      |
| 8                      | 9           | 8      | 8      |
| 10                     | 10          | 10     | 9      |
| 12                     | 10          | 10     | 9      |
| 14                     | 10          | 10     | 9      |
| 15                     | 10          | 10     | 9      |

Tableau II. 16. 2

Pression appliquée : 40 KPa

Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 2           | 6      | 2      |
| 4                      | 3           | 6      | 4      |
| 6                      | 3           | 6      | 6      |
| 8                      | 4           | 6      | 6      |
| 10                     | 4           | 6      | 6      |
| 12                     | 4           | 6      | 6      |
| 14                     | 4           | 6      | 6      |
| 15                     | 4           | 6      | 6      |

Tableau II. 17. 2  
 Pression appliquée : 80 KPa  
 Concentration en solides : 4 0% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 1           | 2      | 2      |
| 4                      | 3           | 4      | 4      |
| 6                      | 4           | 5      | 5      |
| 8                      | 4           | 6      | 6      |
| 10                     | 5           | 6      | 6      |
| 12                     | 6           | 6      | 6      |
| 14                     | 6           | 6      | 6      |
| 15                     | 6           | 6      | 6      |

Tableau II. 18. 2  
 Pression appliquée : 20 KPa  
 Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 2           | 2      | 3      |
| 4                      | 4           | 4      | 5      |
| 6                      | 8           | 7      | 7      |
| 8                      | 8           | 8      | 7      |
| 10                     | 9           | 9      | 8      |
| 12                     | 9           | 9      | 8      |
| 14                     | 9           | 9      | 8      |
| 15                     | 9           | 9      | 8      |

Tableau II. 19. 2

Pression appliquée : 40 KPa

Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 5           | 4      | 5      |
| 4                      | 8           | 7      | 7      |
| 6                      | 9           | 8      | 8      |
| 8                      | 9           | 9      | 8      |
| 10                     | 9           | 9      | 8      |
| 12                     | 9           | 9      | 9      |
| 14                     | 9           | 9      | 9      |
| 15                     | 9           | 9      | 9      |

Tableau II. 20. 2

Pression appliquée : 60 KPa

Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 6           | 6      | 5      |
| 4                      | 6           | 6      | 7      |
| 6                      | 7           | 7      | 7      |
| 8                      | 7           | 8      | 7      |
| 10                     | 7           | 8      | 7      |
| 12                     | 7           | 8      | 7      |
| 14                     | 7           | 8      | 7      |
| 15                     | 7           | 8      | 7      |

Tableau II. 21. 2

Pression appliquée : 80 KPa

Concentration en solides : 40% solide en masse

| Test de Déshydratation |             |        |        |
|------------------------|-------------|--------|--------|
| Temps (min)            | Volume (ml) |        |        |
|                        | Test 1      | Test 2 | Test 3 |
| 0                      | 0           | 0      | 0      |
| 2                      | 3           | 2      | 3      |
| 4                      | 4           | 4      | 4      |
| 6                      | 4           | 4      | 4      |
| 8                      | 4           | 4      | 5      |
| 10                     | 4           | 4      | 5      |
| 12                     | 4           | 4      | 5      |
| 14                     | 4           | 4      | 5      |
| 15                     | 4           | 4      | 5      |