



Année Universitaire : 2014-2015

Master Sciences et Techniques GMP

**Génie des Matériaux et des Procédés**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Titre**

**La mise au point d'un procédé de consolidation  
des boues de lavage et de flottation des  
phosphates par floculation**

**Présenté par:**

- **M. KHOUBANE Lahoucine**

**Encadré par:**

- **M. H.SOUHA (FST-Fès)**

- **M. Z.HAFID (OCP)**

**Soutenu Le 25 Juin 2015 devant le jury composé de:**

- **M. K.NOURDDINE IDRISI**

- **M. A.LHASSANI**

- **M. H.SOUHA**

**Stage effectué à : Laboratoire de recherche et développement  
chez OCP-Khouribga**





## Remerciements

Notre projet de Fin d'Etudes n'est nullement le fruit d'un travail personnel, mais collaboration directe ou indirecte d'un certain nombre de personnes auxquelles nous tenons à présenter nos remerciements :

J' exprime ma profonde gratitude à mon encadrant, Mr **Hammou SOUHA**, professeur à FST, pour sa disponibilité tout au long de notre stage, pour son soutien permanent, pour le temps précieux qu'il nous a consacré ainsi que pour les remarques pertinentes qui ont permis l'amélioration continue de ce document.

Mes remerciements également au Professeur, **H.SOUHA** Président du jury, ainsi que nos honorables Professeurs et membres du jury: Mr **K.N.IDRISSI** et Mr **A.LHASSANI** qui m'a fait l'honneur de juger ce travail.

Je tiens vivement à remercier mon encadrant à la recherche et développement du Groupe OCP Monsieur **Z.HAFID** et le Chef du service ICR/GM. Ainsi que Monsieur **A.BOUALI** et Monsieur **A.ELYAZGHI** pour le soutien permanent qu'ils m'ont apporté non seulement par les moyens qu'ils ont mis à ma disposition mais aussi et surtout par leurs conseils constructifs et par leur disponibilité dont ils ont fait preuve afin de résoudre les problèmes qui entravaient l'avancement de mon projet..

Je remercie également Mr **A.MARZOUK**, Mr **I.ATTA**, Mr **M.JAHBLI** pour leur serviabilité. et nous ne saurions oublier dans ces remerciements toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements et ma considération, les plus sincères, vont à tout le corps professoral du Département chimie. Que nos honorables Professeurs trouvent ici l'expression de mon respect et ma reconnaissance, sans oublier de rendre grâce à la gentillesse et les efforts louables dont fait preuve le personnel de l'administration du département chimie afin d'instaurer un échange bénéfique entre les étudiants et les professeurs.

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>8</b>
<b>I. Problématique et description du mode de gestion actuel des boues.....</b>	<b>10</b>
1. Provenance des boues .....	10
2. Stockage des boues .....	11
2.1 Soutirage des boues .....	11
2.2 Bassins de stockage des boues (bassins d'épandage) .....	11
2.2. Bassins de stockage de l'eau récupérée.....	12
3. Solution Proposée .....	12
<b>II. Présentation de l'organisme d'accueil et processus de la laverie de Youssoufia.....</b>	<b>13</b>
1. Présentation de l'organisme d'accueil .....	13
1.1. Le groupe OCP-SA .....	13
1.1.1. Généralités.....	13
1.1.2. Présentation de centre de recherche et développement .....	13
1.1.3. Situation géographique.....	14
1.1.4. Historique .....	14
1.1.5. Organigrammes.....	15
1.1.6. Activité.....	15
1.2. Description de lavage de la laverie d'Youssoufia.....	16
1.2.1. Définition et but de lavage :.....	16
1.2.2. Principales phases de lavage : .....	17
<b>III. Etude bibliographique.....</b>	<b>18</b>
3.1 Flocculation.....	18
3.1.1 Introduction .....	18
3.1.2 Principe : .....	19
3.1.3. Réactifs minéraux .....	19
3.1.4. Doses de réactifs minéraux à employer.....	20
3.1.5. Mise en œuvre des réactifs minéraux.....	20
3.1.6. Mise en œuvre des poly électrolytes.....	20
3.2. Plan d'expérience.....	21
<b>IV. Mise en place d'un mode opératoire de consolidation des boues par flocculation .....</b>	<b>23</b>
4.1. Introduction .....	23
4.2. 1 <sup>ère</sup> partie : Objet et principe de la méthode.....	23
4.2. 2 <sup>ème</sup> partie : Mode opératoire des essais et des calculs.....	24
4.3. Mesure de l'impact des différents paramètres sur la récupération de l'eau.....	25

4.3.1. Réalisation du premier plan de criblage .....	25
4.4. Plan de surface ou plan d'optimisation .....	32
4.1.1. Plan d'expérimentation.....	32
4.1.2. Analyse des données .....	35
4.4. Etude cinétique avec et sans flocculant.....	37
4.4.1. Mode Opérateur .....	37
4.4.2. Courbes de sédimentation.....	38
4.4.3. Interprétation des résultats : .....	39
<b>V. Implantation d'un procédé de consolidation des boues .....</b>	<b>40</b>
5.1. Dimensionnement des équipements.....	40
5.1.1. Station de floculation .....	40
5.1.2. Les Pompes.....	46
<b>VI. Extrapolation industriel du procédé .....</b>	<b>51</b>
6.1. Capitale amortissable .....	51
6.2. Estimation du besoin en capital par la méthode de Peters-Timmerhaus : .....	52
6.3. Gains espéré.....	54
<b>Conclusion.....</b>	<b>56</b>

**Tableaux**

**Tableau 1** : Description des facteurs de premier plan de criblage.....25

**Tableau 2** : Plan d’expérimentation de premier plan de criblage.....28

**Tableau 3** : Description des facteurs de 2<sup>ème</sup> plan de criblage.....30

**Tableau 4** : Description des facteurs de 2<sup>ème</sup> plan de criblage.....30

**Tableau 5** : Plan d’expérimentation de plan de surface.....33

**Tableau 6** : La validité du module.....33

**Tableau 7** : Qualité du modèle .....34

**Tableau 8** : Coordonnées de l’optimum.....35

**Tableau 9** : Le pourcentage de récupération de l’eau trouvé par désirabilité.....35

**Tableau 10** : Les coordonnées de l’optimum.....36

**Tableau 11** : Taux de récupération de l’eau de chaque flocculant testé.....37

**Tableau 12** : Caractéristiques du point optimal du F6.....41

**Tableau 13** : Caractéristiques de la station de floculation.....42

**Tableau 14** : Caractéristiques des pompes.....50

**Tableau 15** : Capital amortissable.....52

**Tableau 16** : Cout opératoire en MDh /an.....54

**Figures**

**Figure 1:** schéma simplifié d'un décanteur .....10

**Figure 2:** schéma simplifié d'une digue .....11

**Figure 3:** Schéma de fonctionnement d'une cheminée.....12

**Figure 4:** bassin de stockage l'eau récupérer.....12

**Figure 5:** Carte des principaux sites d'implantation d'OCP-SA au Maroc.....14

**Figure 6:** Organigramme de l'OCP-SA.....15

**Figure 7:** Etapes de traitement de phosphates.....17

**Figure 8:** Les chaines de lavage avec débourbeur et hydro classificateur.....17

**Figure 9:** Représente le phénomène de formation des floccs.....19

**Figure 10 :** balance et l'agitation de flocculant .....24

**Figure 11:** agitateur et malaxeur .....26

**Figure 12:** drainage a l'aide d'un tamis .....27

**Figure 13:** récupération de l'eau dans un éprouvette de 500 ml .....27

**Figure 14:** essais de sédimentations.....38

**Figure 15:** Courbe de sédimentation des boues avec et sans flocculant.....39

**Figure 16:** Station de floculation à trois bacs.....40

**Figure 17:** Schéma des injections a la conduite.....43

**Figure 18:** Les vecteurs vitesses de la configuration 1.....44

**Figure 19:** Les vecteurs vitesses de la configuration 2.....45

**Figure 20:** Les vecteurs vitesses de la configuration 3.....45

**Figure 21:** pompes centrifuge et volumétrique ..... 46

**Figure 22:** Schéma simplifié du circuit.....47

**Figure 23:** Diagramme de Moody.....50

**Figure 24:** Puissance des pompes centrifuges et alternatives.....52

**Figure 25:** Prix des pompes.....54

## Abréviation

**OCP:** office chérifienne des phosphates.

**BPL:** tri-calcium phosphate (bone phosphate of lime).

**N.B :** Noter Bien

**PME:** Petit et Moyen Entreprise

**DAP :** (Di-Ammonium Phosphate)

**Ts :** Taux de Solide en (%)

**A.N :** Application Numérique

**Ms :** masse du solide dans la pulpe (en g)

**Mp :** masse de la pulpe (en g)

**mf :** masse de flocculant

**Vi:** le volume du flocculant injecté pour l'essai (ml)

**Vr:** volume d'eau lu sur l'éprouvette (ml).

**Vp:** Volume de la pulpe.

**Mp:** Masse de la pulpe.

**Ms:** Masse du solide dans la pulpe

**TR:** Taux de récupération de l'eau.

**C.S :** consommation spécifique en (g/t)

**C.V :** concentration volumique en (g/l)

**tp:** temps d'agitation en (s)

**F6:** Flocculant Numéro 6.

**AF :** Avec Flocculant.

**SF :** Sans Flocculant.

**Q :** débit en (m<sup>3</sup>/h).

**D:** diamètre en (m)

**S:** surface en (m<sup>2</sup>)

**HMT:** Hauteur Manométrique Totale

**Pa:** pression en point A.

**Va:** la vitesse en point A (m/s)

**Za:** distance à partir du point Z=0 en (m).

**Jasp:** Pertes de charges dans la conduite d'aspiration (Pa)

**Jref:** Pertes de charges dans la conduite de refoulement (Pa)

**Jvan:** Pertes de charges dans les vannes de régulation (Pa)

**μ:** viscosité dynamique de l'eau  $\mu_{\text{eau}} = 1.003 \text{ mPa.s}$

**Re:** nombre de Reynolds.

**VA :** Le Bénéfice actualisé ou la valeur actuelle nette

**I:** investissement total.

**fd:** fond de roulement.

**Vr:** valeur résiduelle

**P:** l'indice de l'année p.

**N:** durée de vie du projet.

**CFp:** le cash flow de l'année P.

**Vp:** les recettes de l'année P.

**Dp:** les dépenses de l'année P.

**Ap:** dotation pour provision aux amortissements de l'année P.

**FFp:** le frais financier de l'année P.

**Ip:** l'investissement de l'année P.



### **Introduction Générale**

Au cours des dernières années, l'usage optimisé de l'eau est devenu un élément stratégique de ses projets industriels qui sont en train d'être intégré harmonieusement dans un nouveau concept d'investissement le plus respectueux de l'environnement.

Le Groupe a mis en place des programmes qui valorisent mieux les ressources en eau y compris le transport de minerai liquide depuis le site d'extraction jusqu'à l'usine chimique, la désalinisation d'eau de mer, le retraitement des eaux usées domestiques urbaines, le recyclage de l'eau boueuse, ainsi que la récolte et le stockage des excédents d'eau de pluie.

A Youssoufia, OCP a mis en place des usines de lavage équipées de systèmes de décantation des boues et de traitement des eaux usées, ainsi que des systèmes de recyclage qui permettront d'économiser et de récupérer annuellement environ 5,8 millions des mètres cubes d'eau.

Les décanteurs de la laverie Youssoufia génèrent des quantités importantes de boues minérales concentrées (Taux de solide = 30%) qui sont évacuées par la suite vers des bassins d'épandage appelés digues, dont la surface peut atteindre 174 Hectares.

Le mode de gestion actuel consiste à évacuer ces boues grâce à un système de pompage vers des bassins d'épandage. Après évacuation, la séparation liquide-solide se fait par décantation naturelle ce qui demande beaucoup de temps pour récupérer l'eau que les boues contiennent vu le profil granulométrique fin des particules.

Le phosphate brut tel qu'il extrait de la mine, nécessite un traitement davantage pour atteindre les qualités exigées par les clients. A savoir la teneur en BPL et les autres éléments majeurs constituant le minerai.

Le lavage est un traitement par voie humide qui consiste à éliminer les tranches granulométriques pauvres en minéral.

L'étude dans le cadre du stage a pour objectif d'améliorer la récupération de l'eau utilisée dans le lavage au niveau des digues et pour faire cette étude on a besoin de chercher d'un meilleur flocculant qui joue un rôle très important pour la sédimentation des particules et la récupération des eaux argileuses utilisées pour le lavage de phosphate avec implantation d'une nouvelle station de floculation qui permet de préparer et de faire des injections de flocculant à la conduite qui se situe entre bassin tampon et la digue.

Dans le cadre de l'étude de mise au point d'un procédé de consolidation de ces boues de lavage et flottation des phosphates par floculation et afin d'améliorer leur mode de gestion actuel, il m'est demandé de :

- ✓ Mettre en place un mode opératoire laboratoire de consolidation des dites boues par floculation.
- ✓ Modéliser la consolidation des boues par la méthodologie des plans d'expériences.
- ✓ Déterminer les points de fonctionnements optimaux pour chaque floculant testé.
- ✓ Comparer la cinétique de récupération de l'eau avec utilisation du floculant le plus opportun et sans utilisation de floculant.
- ✓ Faire une étude économique de la consolidation des boues de lavages et flottation par floculation.

Ce manuscrit de stage de fin d'étude, présente un ensemble de travaux portant sur la recherche d'un bon floculant qui a comme fonction principale de la récupération du maximum d'eaux, en se basant sur le plan d'expérience pour minimiser le nombre d'essai à l'échelle laboratoire et ainsi aboutir à un bon résultat.

Une étude cinétique qui permet de prévoir l'effet du floculant sur la sédimentation et le volume de boue qu'on peut gagner avec l'ajout de floculant.

Une étude sur la maîtrise de la station de floculation, son fonctionnement, son rôle et ses composants avec leur dimensionnement.

Ce rapport est organisé en cinq étapes. La première étape présente une description générale sur la laverie Youssoufia : but de lavage, criblage, débouillage, flottation et décantation.

La seconde étape est constituée d'une étude bibliographique sur la floculation son principe et son rôle et une étude sur le plan d'expérience, (plan de criblage, plan de surface ou plan d'optimisation).

La troisième étape présente une description opératoire sur les essais qui ont été faits à l'échelle laboratoire avec l'interprétation des résultats obtenus : taux de récupération de l'eau, taux de solide et le point optimum de chaque floculant testé.

La quatrième étape est constituée d'une implantation d'un procédé de consolidation de boue qui est composée par une station de floculation avec tous les équipements.

Enfin le dernier et la cinquième étape qui constituée d'une extrapolation industrielle du procédé.

## Problématique

### I. Problématique et description du mode de gestion actuel des boues

#### 1. Provenance des boues

La taille des grains inférieurs à  $40\mu\text{m}$  et les rejets de flottation sont envoyées vers le décanteur qui servaient à épaissir les boues et récupéraient l'eau clarifiée. Cette récupération se base sur le phénomène de la sédimentation des particules dans un milieu aqueux, avec une vitesse de la chute qui varie suivant leurs densités. Il y a donc un mouvement des particules vers le fond du décanteur et une remontée du liquide clair vers la surface. Cependant, la séparation solide-liquide dans le décanteur recevant les rejets fins provenant du lavage et de la flottation ne peut en aucun cas être totalement assurée par la seule opération de décantation. Elle est améliorée par l'ajout de flocculant à l'alimentation, car le décanteur a pour rôle de fournir à la fois des sur-verses claires et des boues riches en solides. Le décanteur est constitué d'une grande cuve circulaire de capacité de  $50000\text{ m}^3$  à fond conique. Il est muni d'un mécanisme de raclage animé d'un mouvement rotatif lent (bras mécaniques), qui entraîne les solides sédimentés vers la pointe centrale inférieure de l'appareil. Les boues récupérées sont évacuées par trois orifices de décharge sans créer de turbulence, alors que le débordement de l'eau claire de décanteur déverse respectivement dans les bassins qui alimentent à leur tour les chaînes de production en eau de procédé. (Le complément d'eau de procédé nécessaire est assuré par les eaux d'exhaures).

#### Phénomène de base :

Sédimentation des particules dans un milieu aqueux par ajout de flocculant afin de former des floes avec un diamètre assez grand permettant une décantation plus rapide des particules solides.

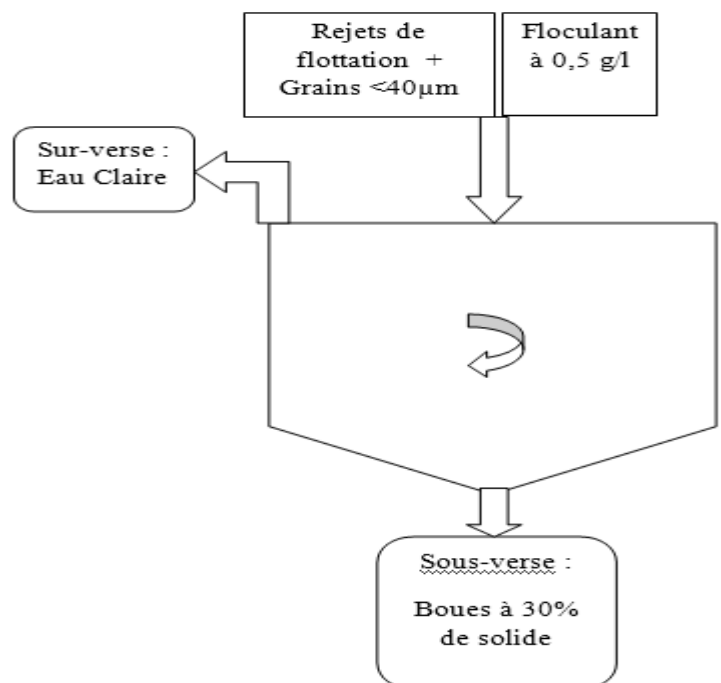
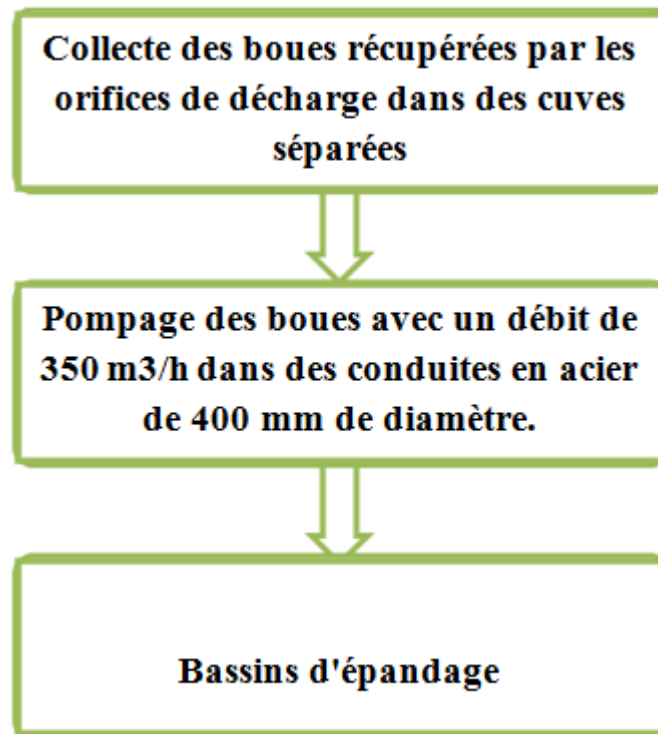


Figure 1 : schéma simplifié d'un décanteur

2. Stockage des boues

2.1 Soutirage des boues



2.2 Bassins de stockage des boues (bassins d'épandage)

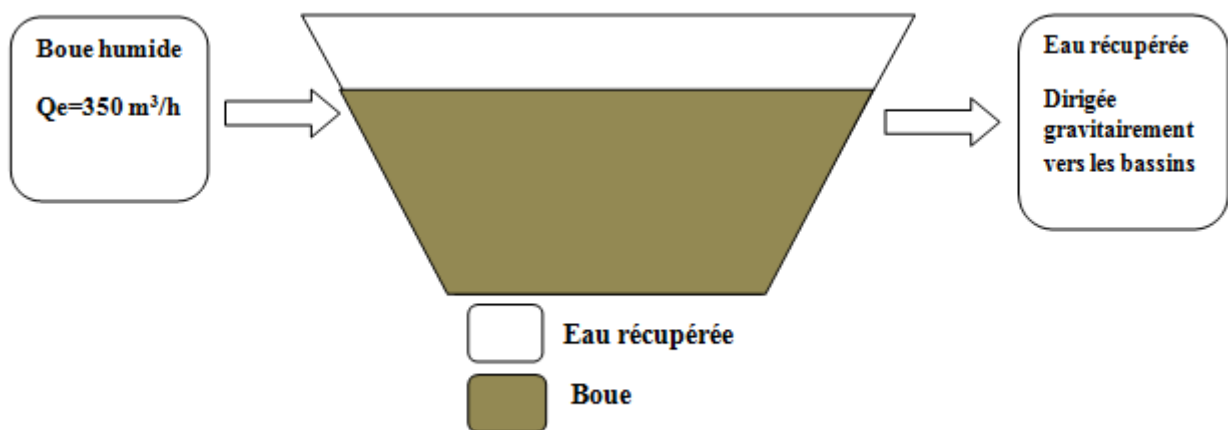
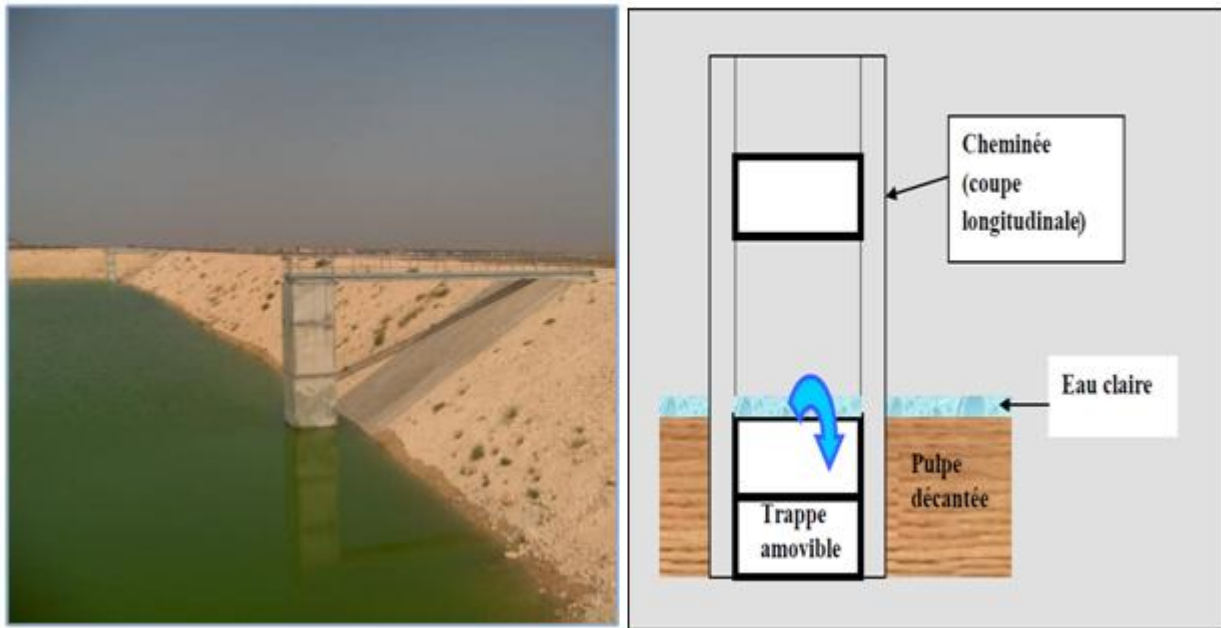


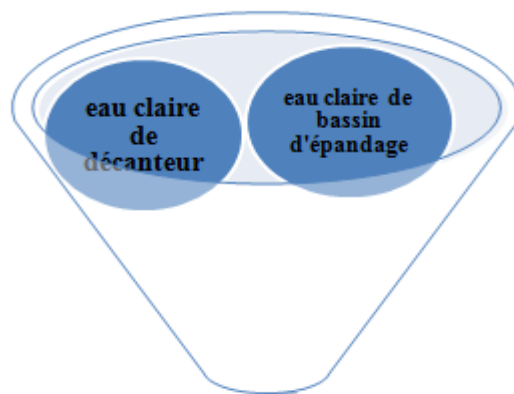
Figure 2 : schéma simplifié d'une digue.

**N.B :** Récupération et évacuation de l'eau claire à l'aide des cheminées dont H= 9 à 10m.



**Figure 3:** Schéma de fonctionnement d'une cheminée

## 2.2. Bassins de stockage de l'eau récupérée



**Figure 4 :** bassin de stockage de l'eau claire.

## 3. Solution Proposée

Implantation d'une station de floculation entre la sortie du décanteur et l'entrée des bassins d'épandage. Pour ce faire, il faut choisir le floculant agissant avec efficacité sur les boues concernées et dimensionner la station c'est-à-dire les équipements nécessaires (pompe, bassin de floculation, etc.). Finalement, il faut choisir la manière la plus adéquate pour injecter ce floculant dans les bassins d'épandage tout en assurant un malaxage et une agitation optimale du floculant dosé et dilué avec les boues soutirées du décanteur.

## **II. Présentation de l'organisme d'accueil et processus de la laverie de Youssoufia**

### **1. Présentation de l'organisme d'accueil**

#### **1.1. Le groupe OCP-SA**

##### **1.1.1. Généralités**

Un des leaders mondiaux sur le marché du phosphate et ses dérivés, OCP-SA opère sur les cinq continents et dispose des plus importantes réserves de phosphate au monde. Avec plus de 90 ans d'expérience dans la mine et 45 ans en chimie, OCP-SA offre l'une des plus larges gammes de roche pour divers usages. Premier exportateur de phosphate brut et d'acide phosphorique dans le monde et l'un des principaux exportateurs d'engrais phosphatés, OCP-SA joue un rôle central dans ses régions d'implantation et emploie directement près de 20 000 personnes ce qui le place dans le peloton de tête des plus grands employeurs du Royaume.

Première entreprise industrielle du Maroc, OCP-SA contribue substantiellement au développement de l'économie nationale par le biais de ses exportations (24 % des exportations nationales). En outre, OCP-SA apporte un soutien indéfectible à l'agriculture marocaine en général et aux PME en particulier, dont le développement impacte significativement la richesse nationale.

##### **1.1.2. Présentation de centre de recherche et développement**

Au cœur de la stratégie de leadership de l'entreprise, il y a la recherche et le développement. La R&D doit porter les projets qui permettront de conquérir de nouveaux marchés et les nouvelles technologies qui amélioreront la compétitivité du groupe. Pour atteindre ces objectifs, l'organisation des services du département a été revue. Alors, que, auparavant les pôles mine et chimie avaient chacun leur R&D, Avec la décentralisation opérationnelle, la recherche a également été rapproché des sites, c'est dans ce cadre que le centre Recherche & Développement Khouribga a été fondé.

Les objectifs des centres Recherche & Développement sont :

- La Recherche opérationnelle qui a pour but d'améliorer les performances de l'exploitant, notamment en matière de rendement et de réduction d'énergie.
- La différenciation dont l'objectif est de lancer des produits différents de ceux de la concurrence.
- La recherche de rupture qui consiste de proposer des produits ou technologies radicalement nouveaux, non, seulement à OCP mais, aussi plus largement, au sein du secteur.

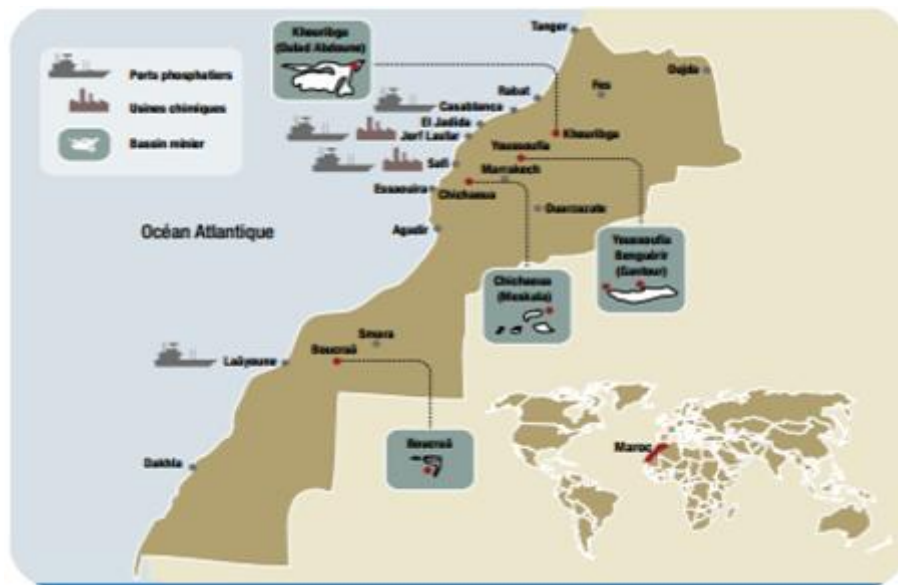
### 1.1.3. Situation géographique

- Le siège social de l'office est situé au Casablanca.
- Les directions d'exploitation et de traitement sont les suivants :

**Ouled Abdoun:** c'est la plus importante mine de production du groupe OCP-SA. Elle est située dans la zone de Khouribga. Sa capacité de production est de 19 milliards de tonnes par année.

**Gontour:** La direction des exploitations minières de Gontour a pour mission l'extraction, le traitement et la livraison du phosphate à partir du gisement de Gontour. Ce gisement s'étend sur 125Km d'est à l'ouest et sur 20Km du Nord au sud. Il couvre une superficie de 2500Km. Il existe deux centres qui sont en exploitation : le centre de Youssoufia (depuis 1939) et le centre de Bengrerir depuis (1980).

**Oued Eddahab (Boucraa-Laayoune):** Situé à 50Km au sud de la ville de Laayoune. Les réserves des gisements des phosphates d'Oued Eddahab sont estimés à 1,13 milliard de m. Seul gisement de Boucraa est en exploitation compte tenu de ses réserves et de sa teneur.



**Figure 5 :** Carte des principaux sites d'implantation d'OCP-SA au Maroc

### 1.1.4. Historique

Les principales dates qui ont marqué l'histoire du Groupe OCP :

- 1920 : début de l'extraction du phosphate à Boujniba dans la zone de Khouribga
- 1944 : la création de la société marocaine d'engrais
- 1952 : mise en œuvre de la méthode d'extraction en découverte à Khouribga
- 1975 : création du groupe OCP organisationnelle intégrant L'OCP et ces entreprises filiales

- 2000 : démarrage de l'unité de flottation à Khouribga
- 2008 : le groupe OCP devient OCP-SA
- 2014 : Démarrage programmé du projet Slurry Pipeline

### 1.1.5. Organigrammes

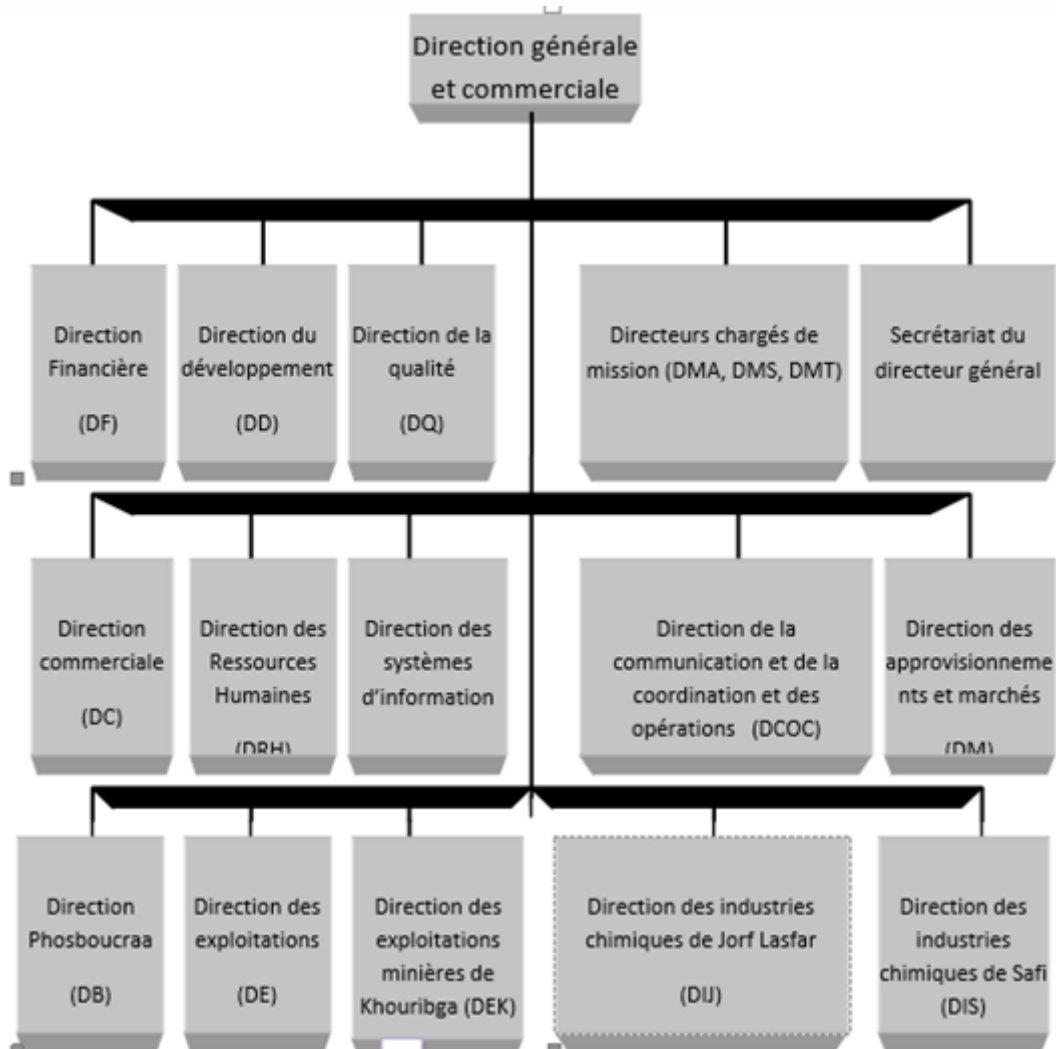


Figure 6 : organigramme de group OCP-SA

### 1.1.6. Activité

Le minerai qui a été traité soit exporté tel quel, ou bien livré aux industries chimiques du Groupe pour être transformé en produits dérivés commercialisables.

Pour répondre au marché international et développer une industrie locale des phosphates, le Groupe OCP s'est doté dès 1965 de complexe chimique. Ces unités d'envergure internationale sont spécialisées dans la production de produits dérivés à savoir l'acide phosphorique de base, l'acide phosphorique purifié et les engrais. La



production de ces produits dérivés est effectuée, au sein du Pôle Chimie : Safi et Jorf Lasfar.

La production annuelle s'élève à 27,25 millions de tonnes. La moitié de ce volume est exportée comme produit semi-fini à destination d'une quarantaine de pays à travers le monde, tandis que l'autre moitié est livrée aux usines locales de transformation. La majeure partie des engrais produits, où le DAP est largement prédominant, est expédiée hors du Maroc. La part vendue aux clients locaux ne dépasse donc pas les 350.000 tonnes.

Le Groupe OCP expédie ses produits par les ports de Casablanca, Laayoune, Safi et Jorf Lasfar.

## **1.2. Description de lavage de la laverie d'Youssoufia**

Au d'enrichir les phosphates à basse teneur en BPL, l'usine Laverie compte cinq processus principaux (lavage, flottation, décantation, stockage des boues et séparation solide-liquide), ce procédé étant développé par le Centre d'Etude et de Recherche des Phosphates Minéraux (CERPHOS).

### **1.2.1. Définition et but de lavage :**

C'est une opération qui consiste à traiter par voie humide du phosphate brut déjà criblé jusqu'à l'obtention d'un produit enrichi dont la teneur en BPL est élevée.

Le but de lavage est d'enrichir le minerai en éliminant les tranches pauvres par simples coupures granulométriques. Ces opérations peuvent être réalisées par criblage à 2500 µm pour éliminer la tranche grossière et par cyclone pour éliminer les fines particules ( $\leq 40$  µm).

1.2.2. Principale phases de lavage :

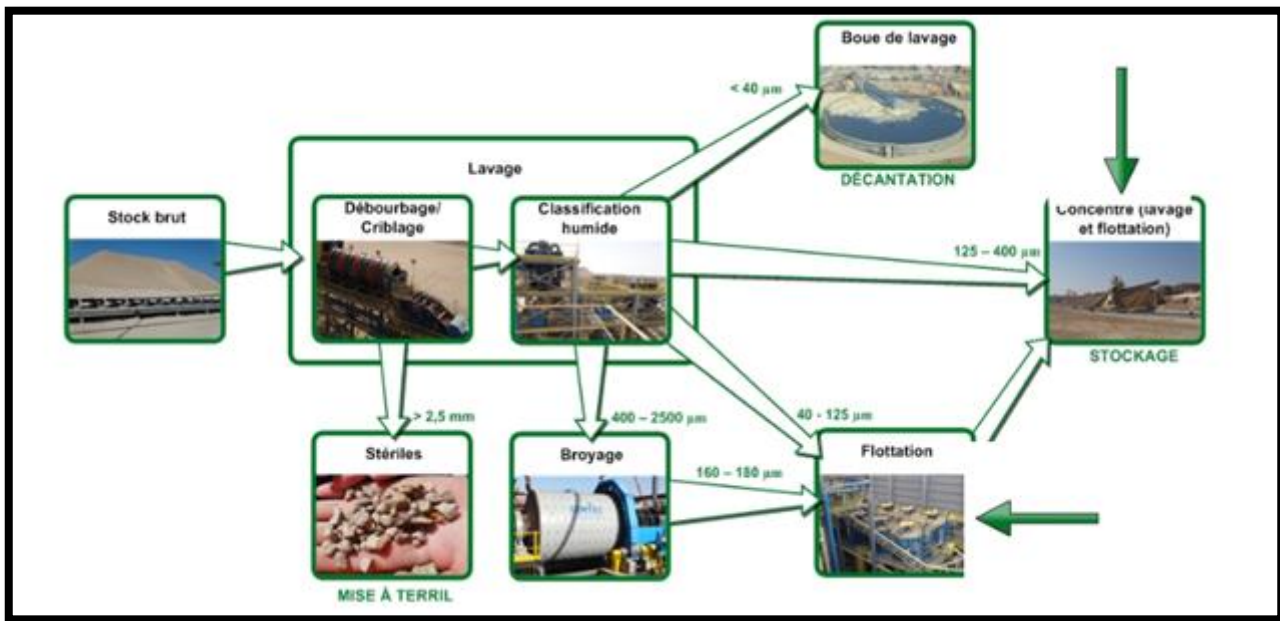


Figure 7 : étapes de traitement de phosphates

• Débourbage

C'est une opération qui consiste à malaxer le minerai de phosphate mis en pulpe dans un débourbeur tournant, afin de libérer par attrition les grains phosphatés de leurs gangues argilo-calcaire.

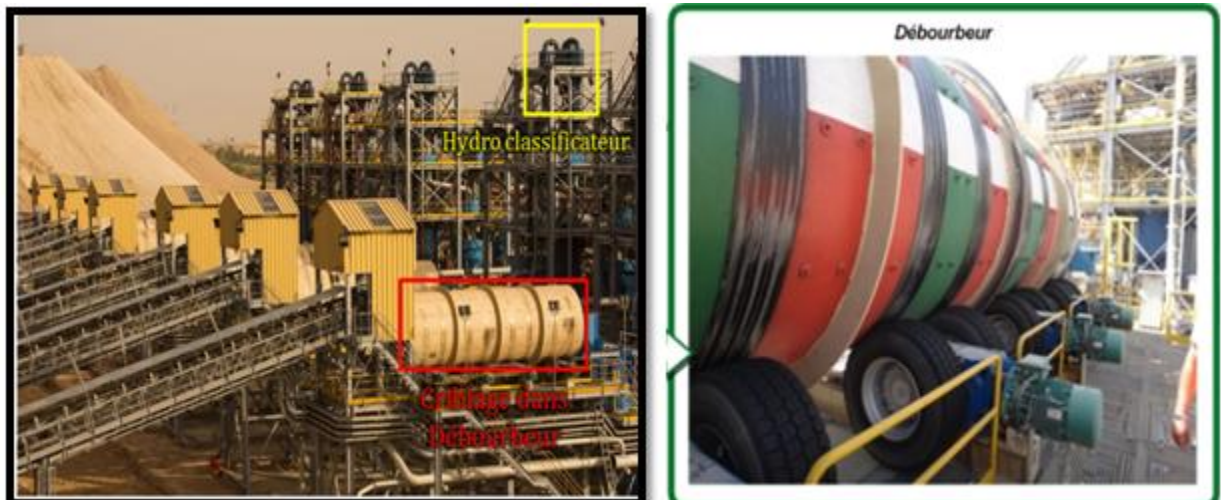


Figure 8 : les chaines de lavage avec déboureur et hydro classificateur

• Criblage

La pulpe ainsi formée au niveau du déboureur, passe au crible par débordement pour subir un traitement physique, il s'agit de la première coupure qui consiste à éliminer les particules de dimensions

supérieures à 3150  $\mu\text{m}$ . L'opération est réalisée au moyen d'un crible vibrant, constitué d'une surface comportant des ouvertures de dimensions bien calibrées. Les particules solides de dimensions inférieures à la maille passent à travers la grille, constituant le passé, tandis que les grosses particules restent au-dessus de la grille, constituant le refus du crible.

L'opération du criblage est facilitée à l'aide d'un système d'arrosage par l'eau sous pression, pulvérisée par les buses, afin de libérer les grains phosphatés adhérents à la surface du crible.

- **Hydro-classification**

Le hydro cyclone est un appareil hydraulique de séparation et de classification. Consiste à éliminer la tranche dont la taille granulométrique des particules inférieure à 40  $\mu\text{m}$  et l'évacuer vers les décanteurs, 40-125  $\mu\text{m}$  vers les cellules de flottation et 125-400  $\mu\text{m}$  est la concentrée de lavage et de flottation.

- **Flottation**

Consiste à éliminer les impuretés (silicates et carbonates) dans le mélange phosphaté par principe de flottation inverse après ajout de trois réactifs chimiques : Amine, Ester et Acide phosphorique.

- **Décantation**

Sous l'effet de la gravité, les boues en provenance des lignes de lavage sont récupérées au fond des décanteurs et pompées ensuite vers les digues.

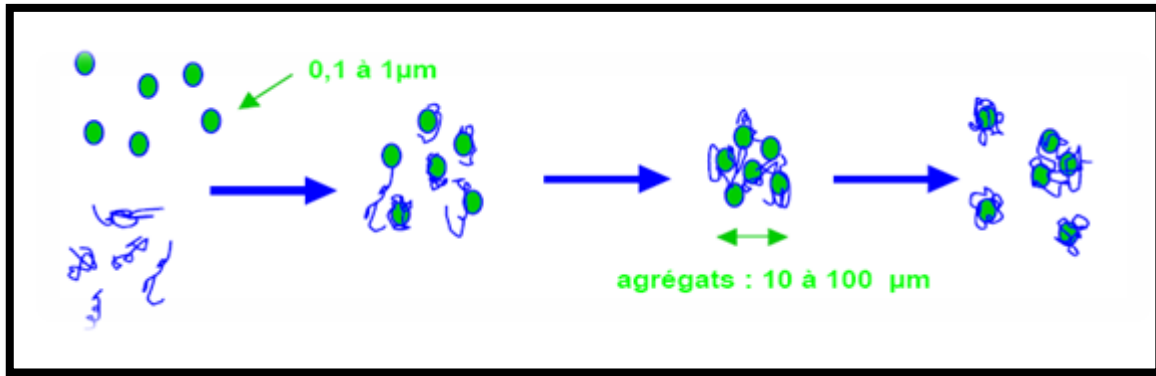
### **III. Etude bibliographique**

#### **3.1 Flocculation**

##### **3.1.1 Introduction**

la flocculation est utilisée dans la majorité des procédés d'épaississement des boues qu'elle soit issue de traitement des minerais ou des rejets liquides urbain ou industriel, l'impact de l'opération en question est très pesant, surtout sur les dimensions des équipements épaisseurs ainsi que sur leurs performances c'est la raison pour laquelle nous tenons à expliciter tous aspects liés à la flocculation par ce qui suit.

- Flocculant et un polymère de haut poids moléculaire à structures linéaires et solubles dans l'eau, les flocculants existent sous forme solide, en billes ou en solution.
- Représente l'ensemble des mécanismes de transport des particules déstabilisées menant à la collision et à l'agrégation de ces dernières.



**Figure 9 :** Représente le phénomène de formation des floccs

### 3.1.2 Principe :

La floculation permet de casser de la stabilité colloïdale et d'augmenter artificiellement la taille des particules, le conditionnement rend donc exploitable les différents équipements de déshydratation. Il a recours à des procédés de nature physique, mais plus souvent de nature chimique par ajout de réactifs minéraux ou de polymères de synthèse. La floculation qui fait appel à des électrolytes minéraux (sels métalliques et chaux notamment) réduit l'hydrophile particulaire. La mise en œuvre des poly-électrolytes ne provoque, quant à elle, aucune baisse du taux d'eau liée et parfois même l'augmente. Le type de conditionnement va donc avoir une influence sur le taux d'hydratation du sédiment obtenu. En outre chaque réactif chimique employé à son efficacité propre en ce qui concerne la dimension des floccs formés : grenus avec les réactifs minéraux et volumineux avec les poly électrolytes.

### 3.1.3. Réactifs minéraux

Ils sont mieux adaptés si l'on veut procéder à une déshydratation par filtres-presses ou filtres sous vide possédant des mailles fines généralement inférieures à 100-200  $\mu\text{m}$ . Ces réactifs minéraux conduisent, en effet, à la formation de floccs fins mais, mécaniquement stables.

Pour des raisons d'économie et d'efficacité, on emploie le plus souvent des sels métalliques tels que des sels de fer et à un degré moindre, des sels d'aluminium. Sur les boues organiques, l'ion  $\text{Fe}^{3+}$  est de loin le plus efficace et le plus utilisé. Le choix entre  $\text{FeCl}_3$  et  $\text{FeSO}_4\text{Cl}$  est généralement d'ordre économique.

L'action de ces électrolytes est double :

- **Action coagulante** : leur charge est souvent opposée à celle des particules boueuses
- **Action floculant** : formation d'hydroxydes complexes hydratés qui jouent le rôle d'un polymère minérale

### 3.1.4. Doses de réactifs minéraux à employer

Elles dépendent bien sûr de la nature des boues à filtrer, mais également de l'efficacité désirée. Pour l'exploitation correcte des filtres, les surdosages sont inutiles, n'améliorant que peu les résultats. Mais il est nécessaire de respecter un dosage minimal pour obtenir une filtrabilité suffisante. Pour cela, on peut déterminer par des essais simples de laboratoire les doses correctes nécessaires. En général, la présence dans une boue de fibres ou matières denses minérales conduit à des doses moindres de réactifs, tandis qu'une forte proportion de matières organiques protidiques agit en sens inverse.

### 3.1.5. Mise en œuvre des réactifs minéraux

La floculation des boues s'effectue dans des bacs agités en série (le 1<sup>er</sup> pour le sel métallique, le 2<sup>ème</sup> pour la chaux). Les temps de séjour sont de l'ordre de 5 à 10 minutes ; ce qui est suffisant pour le grossissement du floc. Un temps supplémentaire de murissement du floc est souvent profitable, mais une agitation prolongée et trop forte peut, dans certains cas, détériorer la filtrabilité de la boue épaissie. Un stockage prolongé avant filtration peut également avoir cet effet défavorable. En outre, le transfert de la boue floculée ne doit pas provoquer la destruction du floc. On doit donc éviter la pompe centrifuge.

### Poly électrolytes

On utilise très peu les polymères naturels (amidons, polysaccharides, alginates,...) dans l'épaississement des boues, du fait de la floculation médiocre obtenue. En revanche, les poly électrolytes (polymère de synthèse) sont beaucoup plus efficaces. Ils forment des floccs volumineux (plusieurs millimètres), bien différenciés dans une eau interstitielle clarifiée.

Les poly électrolytes ont pour effet :

- Une floculation très marquée, par formation de ponts entre particules, grâce aux longues chaînes ramifiées. Cette floculation est renforcée par une action coagulante dans le cas de polymères cationiques.
- Une très forte diminution de la résistance spécifique de la boue, l'eau libre interstitielle libérée étant très rapidement drainable. En revanche, les floccs souvent spongieux et assez hydrophiles, entraînent dans la plupart des cas une augmentation du facteur de compressibilité de la boue.

### 3.1.6. Mise en œuvre des poly électrolytes

La solution mère (4 à 6g/l) est généralement diluée avant introduction dans la boue, mais il n'y a pas de règle précise. Tout dépend des viscosités respectives de la boue et de la solution de poly électrolyte. Le mélange boue-poly électrolyte. S'effectue de façon très simple, car la floculation est

quasi immédiate mais les floes formés sont souvent fragiles. Dans la mise on œuvre de tout procédé déshydratation employant les floes comme réactifs, il faut donc éviter des cuves à agitation très violente, des temps de floculation trop longs et des pompages destructeurs de la boue préalablement floculée. [3]

### **3.2. Plan d'expérience**

La méthodologie des plans d'expériences permet une recherche expérimentale planifiée appelée «plans d'expériences». L'expérimentation ne peut pas être quelconque : elle doit fournir l'information désirée. Cette démarche expérimentale va aider l'expérimentateur à structurer sa recherche de manière différente, à confronter et à valider ses propres hypothèses, à mieux comprendre les phénomènes étudiés et à solutionner les problèmes. Le succès de cette méthodologie est en partie lié aux besoins de compétitivité des entreprises mais aussi, à une envie de changer la manière de faire des expérimentations.

A cela, il faut ajouter les techniques d'aide à la formulation d'un problème qui mettent en évidence l'importance prépondérante de l'étape de «Réflexion» qui devrait précéder toute expérimentation.

#### **3.2.1. Définition :**

La méthodologie des plans d'expériences correspond à une série d'essais définis à partir d'une stratégie optimale permettant la prédiction d'une réponse avec le minimum d'erreurs et un minimum d'essais sur la base d'un modèle postulé.

selon la [Norme ISO 3534-3]:

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences se base sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats.

#### **Définir les entrées (facteurs)**

Un paramètre d'entrée d'un système (variable d'entrée) est appelé facteur X. Ce facteur est une cause possible de variation de la réponse Y. Le choix d'un facteur se fait souvent en plusieurs phases : une phase de recensement faisant appel à la créativité du groupe, une phase de classement et une phase de sélection où les modalités des facteurs devant être étudiés de façon prioritaire seront définies

**Définir les sorties (réponses)**

La réponse Y (variable de sortie) correspond à un paramètre de sortie du système étudié. Une réponse doit être représentative, quantifiable et la moins dispersée possible pour des variables d'entrées maîtrisées et constantes. Pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences, il est conseillé d'avoir une réponse exprimée sous forme quantitative. En effet, les méthodes d'analyses des résultats d'essais telles que l'analyse de variance ou l'analyse de régression au sens des moindres carrés, s'appuient sur des données exclusivement quantitatives. Par ailleurs, les réponses qualitatives comme, par exemple, la morphologie d'un dépôt (lisse, poreux ... etc.) qui n'est pas un critère quantitatif, pourront s'interpréter à partir d'un codage spécifique des modalités des réponses. [1]

**3.2.2. Plan de criblage**

Le premier type de criblage étudié ici consiste à déterminer si, pour chaque facteur envisagé, le passage d'un niveau à un autre provoque une modification significative de la (des) réponse(s) mesurée(s).

Rechercher rapidement, parmi un ensemble de facteurs potentiellement influents, ceux qui le sont effectivement dans un domaine expérimental fixé. [2]

**3.2.3. Plans de surfaces de réponse**

Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues.

Ces plans sont utiles à chaque fois que l'on se trouve près d'un maximum ou d'un minimum. À la fin des essais, on a un système d'équations dont les coefficients sont obtenus grâce à la relation Il existe plusieurs types de plans du second degré dont les principaux vont être décrits :

**Plan de composite**

Un plan composite est constitué de trois parties :

- ✓ un plan factoriel dont les facteurs prennent deux niveaux.
- ✓ au moins, un point expérimental situé au centre du domaine d'étude.
- ✓ des points axiaux ; ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des facteurs

pour les trois facteurs, le plan de composite donne quinze essais dont une au centre et on ajoute trois autres au centre, qui donne enfin dix-huit essais voir l'annexe. [Tableau 1]

**Plan de Doehlert**

La caractéristique principale des plans de Doehlert est d'avoir une répartition uniforme des points expérimentaux dans l'espace expérimental. Tous les points sont à la même distance du centre du domaine d'étude et sont situés sur le cercle trigonométrique. Ils forment un hexagone régulier.

Si l'expérimentateur désire explorer le domaine expérimental il peut facilement ajouter des points d'expériences supplémentaires et retrouver une disposition identique à celle de départ.

Dans notre cas de trois facteurs le plan de Doehlert dans seize essais dont quatre au centre, mais un peu compliquer pour l'application à l'échelle laboratoire voir l'annexe [tableau 2]

#### **Plan de box-behnken**

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube. Ce plan comporte treize essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central. La matrice du tableau indique ces treize essais accompagnés de quatre points centraux. Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier : l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère centrée à l'origine du domaine expérimental. C'est le critère d'isovariance par rotation. Le plus connu des plans de Box-Behnken est celui qui permet d'étudier trois facteurs. [3]

Ce plan de type cubique qu'on a été choisi pour travailler les essais car il porte le minimum des essais avec des paramètres facile à appliquer au laboratoire, et le plus adapté pour les trois facteurs.

## **IV. Mise en place d'un mode opératoire de consolidation des boues par floculation**

### **4.1. Introduction**

Le présent mode opératoire a été mis en place afin de déterminer à l'échelle laboratoire comment maîtriser le taux de récupération de l'eau à partir des boues de lavage et de flottation en le maximisant le plus possible en variant cinq paramètres principaux qui sont : la consommation spécifique du floculant rapportée à une tonne de boue sèche, la concentration volumique du floculant utilisé, le temps d'agitation du floculant avec la boue, le type d'agitation utilisé et finalement le dosage.

### **4.2. 1<sup>ère</sup> partie : Objet et principe de la méthode**

Le principe consiste à réaliser les essais en suivant l'ordre donné par une matrice d'expérience construite avec la méthodologie des Plans d'expérience. En effet Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $X_i$ . Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences.



Après ajout du floculant et mélange avec la boue on effectue un drainage et on calcule le taux d'eau récupéré en se basant sur le volume d'eau récupéré après drainage de la boue humide.

#### 4.2. 2<sup>ème</sup> partie : Mode opératoire des essais et des calculs

##### ❖ Matériel

- Eprouvettes (différents volumes)
- Balance analytique
- Plateau métallique.
- étuve
- Agitateur
- Béchers
- Seringues
- Trémies
- Agitateur malaxeur
- Chronomètre

#### Essais de Consolidation des boues par floculation

##### Préparation du floculant

Dans une balance analytique on pèse 3g de floculant. La quantité de floculant est préparée dans un bécher de 1000 ml d'eau sous agitation pendant une heure. Le floculant préparé nécessite un temps de maturation d'une heure avant son utilisation.



Figure 10 : Balance et l'agitateur de floculant.

**Préparation de la boue**

Dans une éprouvette on prend un litre de la boue, la masse de ce dernier est de 1240 g.

La pulpe étalée dans un plateau métallique est séchée dans une étuve pendant 24 heures à T = 105°C.

La masse de solide est 372 g (la même mesure est répéter 3 fois pour avoir la moyenne des mesures).

$$T_s = \frac{M_s}{M_p} * 100 \quad \text{A.N:} \quad T_s = \frac{372}{1240} * 100 = 30\%.$$

**4.3. Mesure de l'impact des différents paramètres sur la récupération de l'eau**

**4.3.1. Réalisation du premier plan de criblage**

**Réalisation des essais**

✓ **Description des facteurs**

	X1	X2	X3	X4	X5
<b>nom</b>	Temps d'agitation	consommation spécifique	concentration volumique	type d'agitation	dosage fractionnaire
<b>Unité</b>	seconde	g/t	g/l		
<b>niveau bas(-)</b>	30	300	0,4	malaxage	fractionnaire
<b>niveau haut(+)</b>	120	500	1	grande vitesse	complet

**Tableau 1** : description des facteurs

✓ **Calcul de volume du floculant à injecter pour chaque essai**

Exemple de calcul d'un essai avec une consommation spécifique de 500 g/t et une concentration volumique de 1g/l sachant qu'on utilise un volume de pulpe de 400 ml. (1t = 10<sup>6</sup> g)

$$500 \text{ g} \longrightarrow 10^6 \text{ g}$$

$$m_f \longrightarrow 0.4 \text{ (l)} * 350 \text{ (g/l)}$$

Avec  $m_f$  et  $V_i$  : masse et volume, respectivement, du floculant nécessaire avec une consommation spécifique donnée (500 g par tonne de boue séchée à titre d'exemple) du floculant pour le volume de pulpe utilisé.

Donc  $m_f = \frac{(500 * (0.4 * 350))}{10^6} = 0.0744 \text{ g}$

$$1 \longrightarrow 1000 \text{ ml}$$

$$m_f \longrightarrow V_i \text{ ml}$$

$$V_i = \frac{m_f * 1000}{1} = \frac{0.0744 * 1000}{1} = 74.4 \text{ ml}$$

✓ **Dilution de solution de flocculant à injecter**

Exemple : On a  $C_i * V_i = C_f * V_f$

Avec :  $C_i = 1.5 \text{ g/l}$  ;  $C_f = 1 \text{ g/l}$  ;  $V_f = 1000 \text{ ml}$

$$V_i \left( \frac{1 \text{ g}}{\text{l}} \right) = \frac{C_f * V_f}{C_i} = \frac{1 * 1000}{1.5} = 666.66 \text{ ml} = 0.67 \text{ l}$$

Et on ajoute un volume de 333.34 ml d'eau pour préparer la solution flocculant de 1 g/l.

✓ **Les essais**

Les essais sont réalisés selon la matrice du plan expérimental :

- Le volume de flocculant à injecter pris avec des seringues de volumes 5mL, 10mL, 20mL, et 50mL respectivement.
- le volume des boues utilisé est de 400 ml.
- On utilise un malaxeur ou un agitateur pour mélanger le flocculant avec la boue



**Figure 11** : agitateur et malaxeur

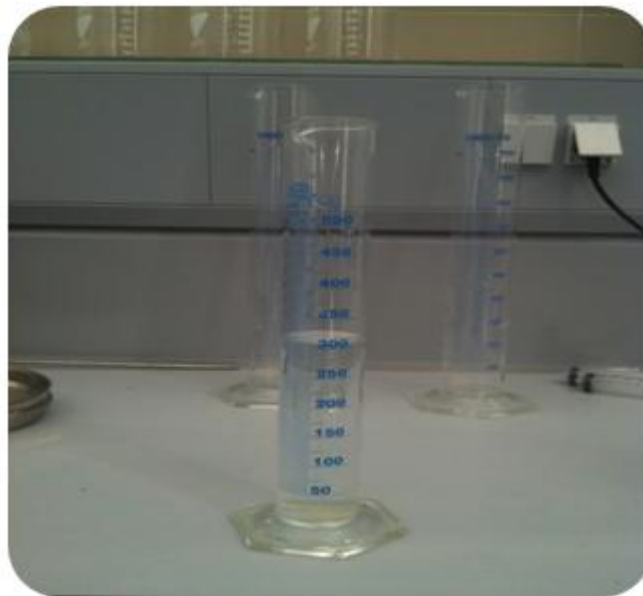
Une opération de drainage se fait à l'aide d'un tamis incliné à peu près de 30° et un fond de tamis qu'on utilise pour récupérer l'eau des boues. On mentionne que la durée du drainage est **30 minutes** qui s'expliquent par le fait que même après une durée supérieure la récupération ne varie pas d'une manière importante.



**Figure 12 :** drainage a l'aide d'un tamis

L'eau récupérée qui constitue notre réponse dans la matrice d'expérimentation est mesurée avec une éprouvette de 500 ml pour calculer le taux de récupération pour chaque essai en se basant sur la formule suivante :

$$\text{Taux d'eau récupérée} = \frac{V_r - V_i}{1240 * 0.4 * 0.7} * 100$$



**Figure 13:** récupération de l'eau dans une éprouvette de 500 ml

Mesure de l'impact des différents paramètres sur la récupération de l'eau

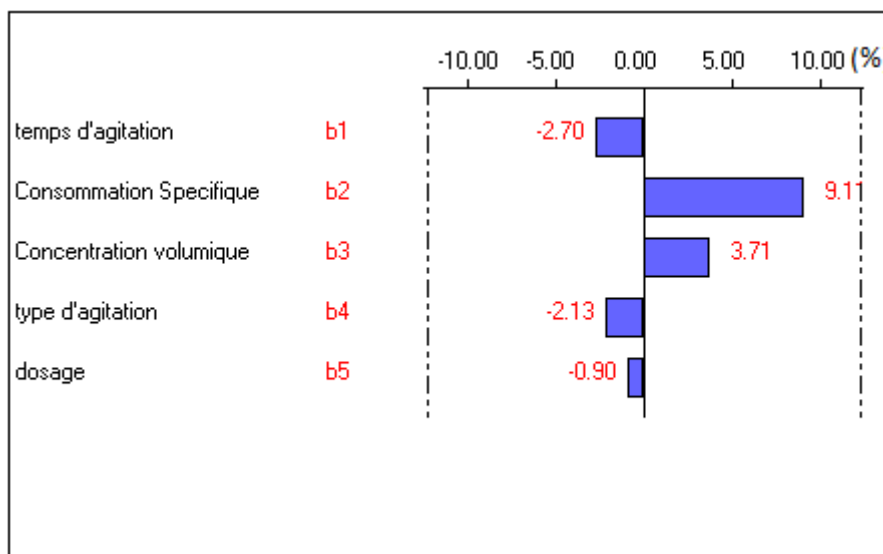
✓ **Plan expérimental**

N°Exp	temps d'agitation	Consommation Spécifique	Concentration volumique	Volume de floculant injecter	type d'agitation	dosage	Taux récupération eau
unité	s	g/t	g/l	ml			%
1	120	500	1	74.4	Malaxage	complet	36.58
2	30	500	1	74.4	agitation forte	fractionnaire	32.83
3	30	300	1	46.6	agitation forte	complet	25.63
4	120	300	0.4	111.6	agitation forte	complet	22.75
5	30	500	0.4	186	malaxage	complet	21.60
6	120	300	1	46.6	malaxage	fractionnaire	29.66
7	120	500	0.4	186	agitation forte	fractionnaire	38.88
8	30	300	0.4	111.6	malaxage	fractionnaire	16.99

**Tableau 2** : plan d'expérimentation de premier plan de criblage

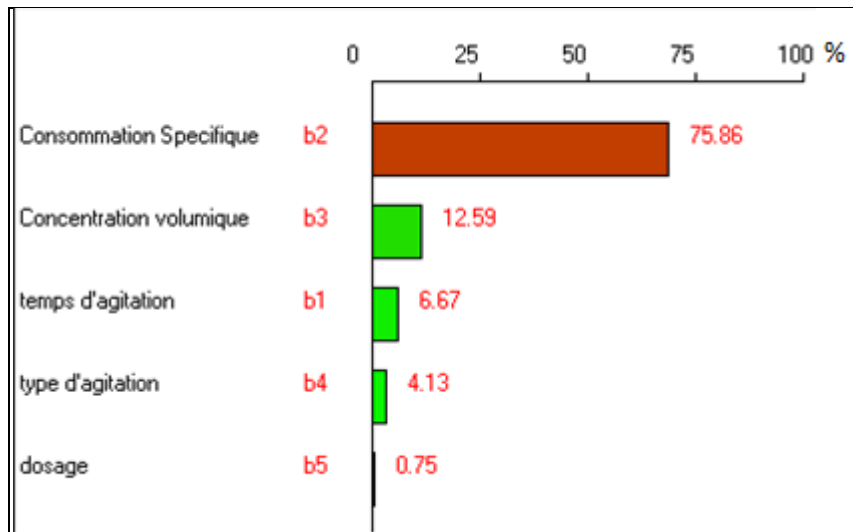
✓ **Analyse des données**

**Etude graphique des effets des facteurs sur la réponse**



L'étude graphique des effets montre que les deux paramètres : Consommation spécifique et concentration volumique du floculant ont un effet positif sur le taux de récupération d'eau contrairement aux autres paramètres qui ont un effet négatif.

Cela se traduit par le fait que les niveaux bas des 3 paramètres suivant : temps d'agitation, type d'agitation et dosage, affectent positivement sur le taux de récupération.

**Classification des facteurs par l'approche Pareto.**

En appliquant l'approche de Pareto pour classer les effets des facteurs, il paraît d'après le graphique que la consommation spécifique du floculant est le paramètre le plus influent car son effet sur la sortie est de **75,86 %**.

**Interprétation des résultats**

D'après les résultats de ce plan, on déduit que :

Une agitation forte nuit au rendement ce qui est logique vu que le phénomène de la floculation nécessite une vitesse d'agitation assez lente pour ne pas casser les floes formés.

Un dosage fractionnaire au lieu d'une injection complète du floculant améliore le taux de récupération.

La nécessité de faire un deuxième plan de criblage en changeant le domaine des vitesses pour voir si le taux de récupération est influencé par d'autres paramètres que la consommation spécifique du floculant. En effet le souci est principalement économique donc on essaiera d'avoir plus de flexibilité sur des paramètres dont la variation ou bien la régulation est non ou bien moins coûteuse.

4.3.2. Réalisation du deuxième plan de criblage

✓ Description des facteurs

	X1	X2	X3	X4	X5
<b>nom</b>	Temps d'agitation	consommation spécifique	concentration volumique	type d'agitation	dosage fractionnaire
<b>Unité</b>	seconde	g/t	g/l		
<b>niveau bas(-)</b>	30	300	0,4	Malaxage à faible vitesse	fractionnaire
<b>niveau haut(+)</b>	120	500	1	Malaxage à grande vitesse	Complet

Tableau 3 : description des facteurs de deuxième plan de criblage

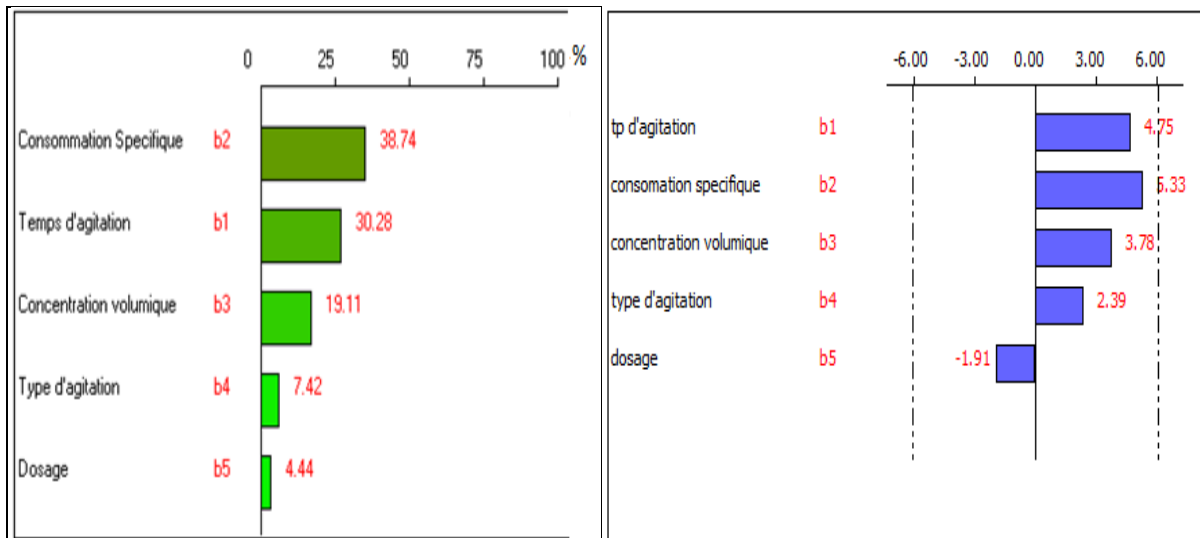
Plan expérimental

N°Exp	temps d'agitation	Consommation Spécifique	Concentration volumique	type d'agitation	dosage	Taux récupération eau
	s	g/t	g/l			%
1	120	500	1	malaxage faible vitesse	complet	36.58
2	30	500	1	malaxage grande vitesse	fractionnaire	32.83
3	30	300	1	malaxage grande vitesse	complet	25.63
4	120	300	0.4	malaxage grande vitesse	complet	22.75
5	30	500	0.4	malaxage faible vitesse	complet	21.60
6	120	300	1	malaxage faible vitesse	fractionnaire	29.66
7	120	500	0.4	malaxage grande vitesse	fractionnaire	38.88
8	30	300	0.4	malaxage faible vitesse	fractionnaire	16.99

Tableau 4 : plan d'expérimentation de deuxième plan de criblage

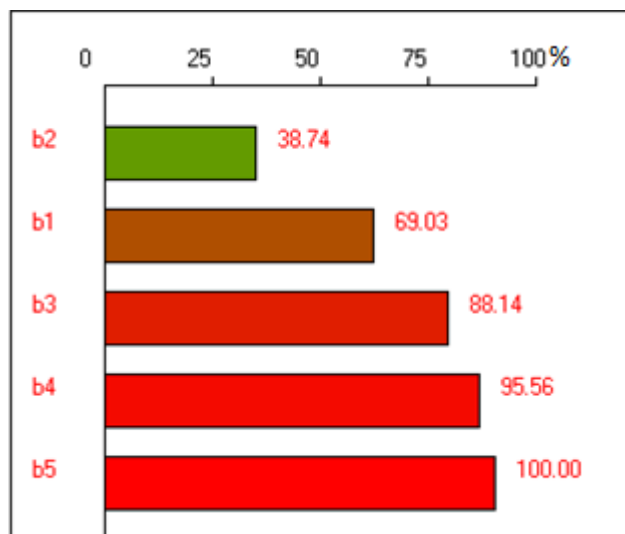
✓ Analyse des données

Etude graphique des effets des facteurs sur la réponse



En changeant le domaine expérimental c'est-à-dire en passant au domaine des faibles vitesses on constate une variation très remarquable des effets de chaque paramètre.

Classification des facteurs par l'approche Pareto



D'après le graphe de effets cumulées et en utilisant l'approche Pareto, on peut dire que les paramètres qui influence à 80% la variable de réponse sont : La consommation spécifique du flocculant, le temps d'agitation et la concentration volumique.

Interprétation des résultats

D'après les résultats de ce plan, on déduit que :



Les paramètres les plus influents sont la consommation spécifique utilisée du floculant, sa concentration volumique et le temps d'agitation du mélange Boue/Floculant. En effet une maximisation du taux de récupération est rendue possible grâce à ce plan qui nous donne la possibilité de faire l'optimisation en jouant sur trois paramètres au lieu d'un seul.

Les deux autres paramètres qui sont le dosage et le type d'agitation vont être fixés dans le niveau qui affecte positivement le taux de récupération d'eau c'est-à-dire dosage fractionnaire pour le paramètre Dosage et malaxage à grande vitesse pour le paramètre Type d'agitation.

#### 4.4. Plan de surface ou plan d'optimisation

Après utilisation plan de criblage on a fixé les paramètres qui ne sont pas influencé sur la réponse, qui sont le dosage fractionnaire et le type d'agitation, et on fait le plan d'optimisation pour les trois paramètres qui reste, alors ce plan fait optimisé les essais afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique.

Pour le plan de surface il existe plusieurs modèles qui sont : modèle de bex-benken, Doehlert et composite, ce qui concerne notre cas de trois paramètres a été choisi le modèle de bex-benken qui nous donne le minimum des essais avec des paramètres facile à appliquer l'échelle laboratoire et le plus adapté a trois paramètres (voir les détails dans la partie bibliographique et les tableaux de chaque modèle dans l'annexe).

Dans ce plan il existe deux types du domaine sont : sphérique et cubique. A été choisir le type cubique l'expérimentateur désire explorer la zone du plan autour de son centre défini comme point de référence, et possibilités de faire des mesures au centre avec les répétitions nécessaires et suffisant pour l'expérience. Par contre le type sphérique l'expérimentateur désire prévoir les variations de la variable de réponse pour des combinaisons du niveau extrême de réponse.

##### 4.1.1. Plan d'expérimentation

unité	s	g/t	g/l	%
1	30.0000	300.0000	0.7000	33.70
2	120.0000	300.0000	0.7000	41.76
3	30.0000	500.0000	0.7000	44.93
4	<b>120.0000</b>	<b>500.0000</b>	<b>0.7000</b>	<b>48.96</b>
5	30.0000	400.0000	0.4000	38.01
6	120.0000	400.0000	0.4000	46.08
7	30.0000	400.0000	1.0000	37.44
8	120.0000	400.0000	1.0000	45.22
9	75.0000	300.0000	0.4000	33.41
10	75.0000	500.0000	0.4000	40.61
11	75.0000	300.0000	1.0000	31.39
12	75.0000	500.0000	1.0000	43.49
13	75.0000	400.0000	0.7000	40.32
14	75.0000	400.0000	0.7000	42.91
15	75.0000	400.0000	0.7000	41.47
16	75.0000	400.0000	0.7000	42.63

**Tableau 5** : plan d'expérimentation de plan de surface (bex-benken)

On observe que le taux de récupération de l'eau est compris entre 33% et 49%. Dans ce flocculant le maximum de récupération est 48.96% à l'essai 4 qui comporte le maximum dans du domaine de temps d'agitation (120 s) et consommation spécifique (500g/t) avec la moitié du domaine de concentration volumique (0.7 g/l).

➤ **Modèle mathématique**

L'étude des plans des surfaces des réponses s'accompagne d'une modélisation du phénomène sous forme d'une équation mathématique de deuxième degré.

Dans notre cas la forme de l'équation mathématique :

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_{1-1} * (X_1 * X_1) + b_{2-2} * (X_2 * X_2) + b_{3-3} * (X_3 * X_3) + b_{1-2} * (X_1 * X_2) + b_{1-3} * (X_1 * X_3) + b_{2-3} * (X_2 * X_3).$$

- **Validité du modèle mathématique**
- **Analyse de la variance : réponse Y1 : TR de F6**

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
<b>Regression</b>	353.6281	9	39.2920	35.0123	<b>0.0166 ***</b>
<b>Résidus</b>	6.7334	6			
<b>Validité</b>	2.5173	3	0.8391	0.5971	<b>65.9</b>

**Tableau 6 : la validité du modèle**

L'analyse de la variance (ANOVA ou ANalysis Of VAriance) permet de comparer les variances des valeurs calculées par le modèle et les résidus. Cette analyse constitue un test statistique (test de Fisher )

➤ **La régression (test de validation 1 ou ANVA 1)**

Le test de Fisher-Snedecor ( $F_1$ ) va nous dire si le modèle nous apporte quelque chose, si l'équation établit bien une relation entre la variation des facteurs et de la réponse, ou si c'est dû à un changement, une fluctuation aléatoire de la réponse dans le domaine expérimental.

➤ **Validité (test de validation 2 ou ANOVA 2)**

Bien que les écarts entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle aient été minimisées par le choix de la méthode des moindres carrés, il faut s'assurer que localement, les résidus ne soient pas anormalement importants.

Alors pour la régression (ANOVA 1) il faut que les résultats a été trouvé soit inférieur à 5% et pour la validité (ANOVA 2) il faut supérieur à 5%.

Dans notre cas ANOVA 1 est égale a  $0.0166 \% \leq 5\%$ , et ANOVA 2 est égale à  $65.9\% \geq 5\%$ . Donc le modèle mathématique qui exprime notre étude est validé.

➤ **Qualité du modèle mathématique :**

<b>Ecart Type de la réponse</b>	<b>1.0593551</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.981</b>
<b>R<sup>2</sup><sub>a</sub></b>	<b>0.953</b>

**Tableau 7 : qualité du modèle**

$R^2$  et  $R^2_a$  sont des calculs statistiques qui nous donne des informations sur le modèle.  $R^2$  est appelé coefficient de détermination, plus  $R^2$  sera grand, meilleur sera le modèle. Il faut que  $R^2$  supérieur ou égale à 0.8, et pour le coefficient de détermination ajusté  $R^2_a$  soit supérieur ou égale à 0.7. (Le coefficient de détermination est toujours supérieur à la valeur de coefficient de détermination ajusté)

La qualité de modèle mathématique est jugé par la valeur de coefficient de détermination qui doit être supérieur à 80% et la valeur de coefficient de détermination ajusté qui doit être supérieur à 70%

#### 4.1.2. Analyse des données

##### Désirabilité-recherche de l'optimum :

- **Coordonnées du maximum de l'optimum**

Variable	Valeur	Facteur	Valeur
<b>X1</b>	0.990516	tp	119.5732
<b>X2</b>	0.970188	c.s	497.0188
<b>X3</b>	0.194928	c.v	0.7585

**Tableau 8** : coordonnées de l'optimum

Dans le domaine de recherche sur l'optimum, on trouve les coordonnées du maximum sont : Temps d'agitation (120s), consommation spécifique (500g/t) et concentration volumique (0.76g/l).

- **Caractéristiques du maximum**

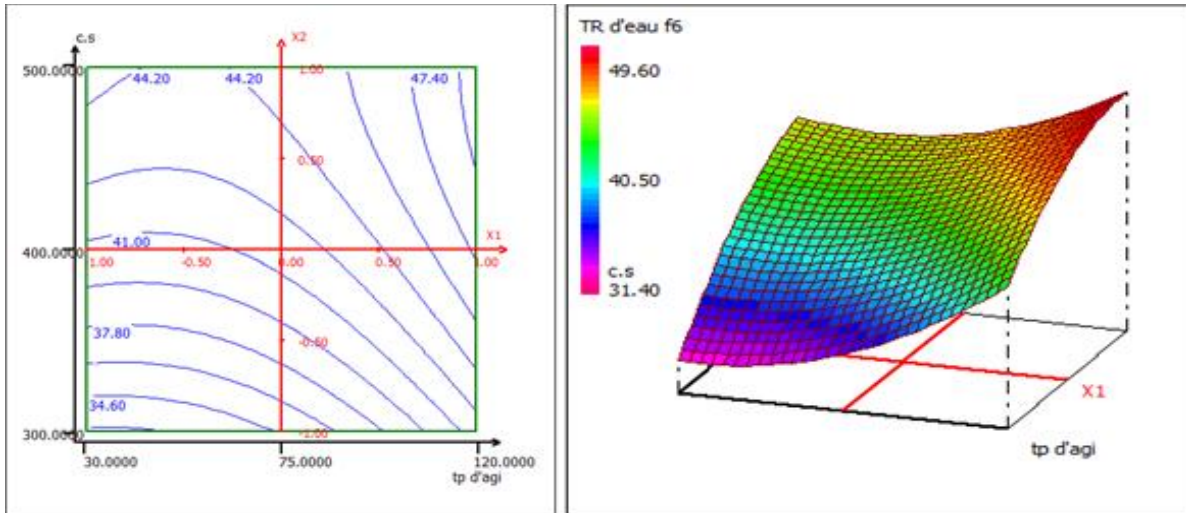
Réponse	Nom de la réponse	Valeur	di %	Poids	di max %
<b>Y1</b>	TR d'eau f6	<b>49.58</b>	100.00	1	100.00
	DESIRABILITE		100.00		100.00

**Tableau 9** : le pourcentage de récupération de l'eau trouvé par désirabilité

Temps d'agitation (120 s), consommation spécifique (500 g/t) et concentration volumique (0.76g/l). Dans c'est coordonnées a été trouvé 49.58%. comme une valeur théorique du taux de récupération de l'eau à une désirabilité de 100%. C-à-d si que vous faites un essai à l'échelle laboratoire avec ces coordonnées, vous trouvez 49.58%. Ce n'est pas une valeur exact mais avec d'une marge de pourcentage de plus ou moins de (+ - 5%).

#### Représentations graphiques de l'optimum

- **Etude graphique 2D et 3D.**



Variation de la réponse - TR de F6 dans le plan : tp, c.s

facteurs fixes : - c.v = 0.7585 g/l

Cette étude graphique de dimension 2D et 3D, qui représente le taux de récupération de l'eau avec un paramètre fixe qu'est la concentration volumique à 0.7585 g/l et on cherchons par l'optimum, on varie la consommation spécifique et le temps d'agitation sur le domaine de la surface jusqu'à une point qui porte le maximum de taux de récupération d'eau, pour trouver des coordonnées de ces deux paramètres.

Calcul du taux de solide pour l'optimum

	Temps d'agitation	Consommation spécifique	Concentration volumique	Taux de récupération de l'eau	Taux de solide
<b>Unité</b>	S	g/t	g/l	%	%
<b>Point optimal</b>	119.5732	497.0188	0.7585	<b>49.58</b>	45.94
<b>Essai de vérification</b>	119.5732	497.0188	0.7585	<b>47.49</b>	44.94

Tableau 10 : Les coordonnées de l'optimum

$$T_r = \frac{V_r - V_i}{1240 * 0.4 * 0.7} * 100$$

$$T_S = \frac{M_p - V_p}{M_p} * 1.55 \quad , \quad M_p = (1240 * 0.4) + (V_i - V_r) \quad \text{et} \quad V_p = 400 + V_i - V_r$$

- Le volume récupéré et taux de solide de tous les flocculant testé :

	Temps d'agitation	Consommation spécifique	Concentration volumique	Taux de récupération de l'eau	Taux de solide
Unité	s	g/t	g/l	%	%
<b>F1</b>	120	453,45	0,72	41.75	42.37
<b>F2</b>	108,66	499,78	0,997	40,35	41,68
<b>F3</b>	108.66	499.78	0.1	40.35	41.80
<b>F4</b>	92.45	499.89	0.99	45.03	43.81
<b>F5</b>	97.69	446.86	0.70	41.52	42.76
<b>F6</b>	119.57	497.02	0.76	49.58	45.94
<b>F7</b>	119.63	499.78	0.50	39.33	41.34
<b>F8</b>	119.10	499.78	0.40	37.46	39.66
<b>F9</b>	119,64	499,78	0,50	39,33	41,34
<b>F10</b>	119,91	452,55	0,40	39,01	41,22
<b>F11</b>	119,97	498,35	0,40	33,41	39,16
<b>F12</b>	120	500	0,40	37,81	40,80
<b>F13</b>	116,58	476,70	0,40	37,75	40,77
<b>F14</b>	118,4698	494,82	0,40	38,21	40,95
<b>F15</b>	118,1867	495,39	0,40	41,45	42,26
<b>F16</b>	119,05	499,66	0,40	38	40,87

Tableau 11 : Taux de récupération de l'eau de chaque floculant testé

#### 4.4. Etude cinétique avec et sans floculant

##### Introduction

Le but de cette étude est de comparer deux mélanges boue avec floculant et boue sans floculant, ainsi que de montrer qu'il y a une influence de floculant sur la sédimentation des particules vers le fond d'éprouvette avec une vitesse rapide, par contre mélange boue sans floculant a une vitesse lent ce qui demande beaucoup de temps pour sédimenter. Avec un écart de différence de boue sédimené entre deux solutions, qui ce dernier est plus important dans notre étude.

##### 4.4.1. Mode Opérateur

On fait une sédimentation de boue par le floculant 6 qui a été déterminé par la méthodologie de plan d'expérience, qui représente l'optimum entre les floculant testé, dont les caractéristiques sont :

- C.S= 450 g/t. et C.V= 0.73g/l.

Pour cela on se base sur ces paramètres pour calculer le volume de flocculant nécessaire à traiter un volume de boue telle que :  $V_p + V_i = 1L$ .

$$\begin{aligned} \text{Alors } 450 \text{ g} &\longrightarrow 10^6 \text{ g} \\ m_f &\longrightarrow V_p \text{ (g)} * 372 \left(\frac{\text{g}}{\text{l}}\right) \end{aligned}$$

$$m_f = \frac{V_p * 372 * 450}{10^6}$$

$$0.73 \text{ g} \longrightarrow 1L.$$

$$m_f \longrightarrow V_i \quad \text{c-à-d} \quad m_f = 0.73 * V_i$$

on trouve après les calculs :

$$m_f = 136 \text{ g} \quad , \quad \text{et} \quad V_p = 813.46 \text{ ml} \quad V_i = 186.53 \text{ ml}$$

Après la préparation de flocculant de concentration de 0.7g/l. on fait deux essais à deux éprouvettes d'un litre, une avec flocculant et l'autre sans flocculant, Et chaque éprouvette contient 813.64 ml de la pulpe à un taux de solide de 30 %.

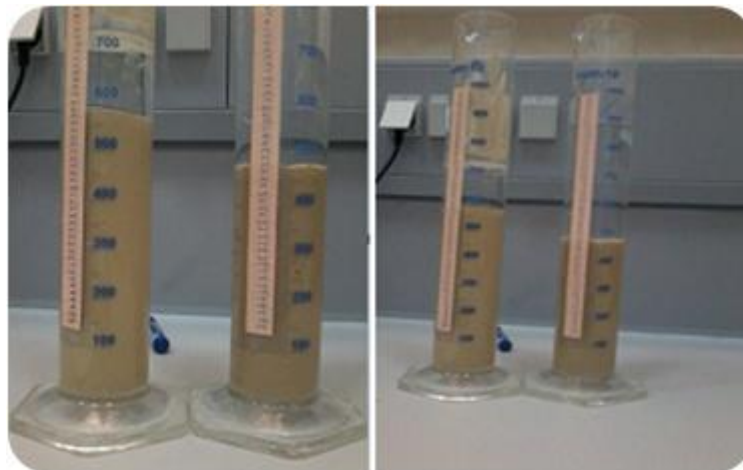
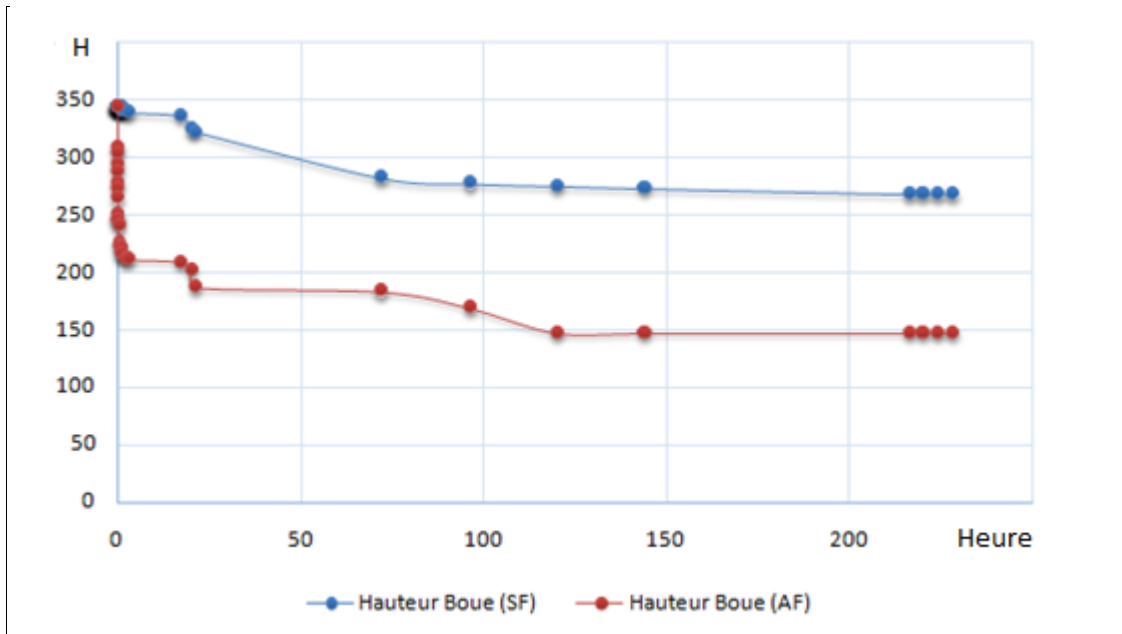


Figure 14 : essais de sédimentation

#### 4.4.2. Courbes de sédimentation

Après avoir versé la pulpe à décanter dans les deux éprouvettes cylindrique de section S, on étudie le comportement de la suspension en sédimentation, en traçant la variation de la hauteur H de l'interface séparant le liquide clair de la suspension, en fonction du temps écoulé depuis le début de la décantation. Ainsi on obtient les courbes suivantes :



**Figure 15 :** Courbe de sédimentation des boues avec et sans flocculant

#### 4.4.3. Interprétation des résultats :

D'après les courbes de sédimentation trouvées ci-dessus on remarque que pour l'éprouvette qui contient la boue sans flocculant atteint une hauteur de 189 mm après 216 h, alors que l'éprouvette qui contient la boue avec flocculant atteint une hauteur de 128 mm après 120 h. après le calcul on trouve un écart de 32 % sans prendre en considération le volume du flocculant introduit.

$$32.27 \% = \frac{189 - 128}{189} * 100$$

#### Conclusion

La valeur 32 % qui représente l'écart de volume de solide avec et sans flocculant paraît petite à l'échelle laboratoire, cependant si on reproduit cette valeur à l'échelle industrielle on obtiendra des volumes importantes d'eau. Dans la partie qui suit-on déterminera le gain en eau avec ce pourcentage et on achèvera ce projet par une évaluation économique pour voir si cette solution proposée est rentable ou non.



## V. Implantation d'un procédé de consolidation des boues

### 5.1. Dimensionnement des équipements

#### 5.1.1. Station de floculation

##### Description du fonctionnement

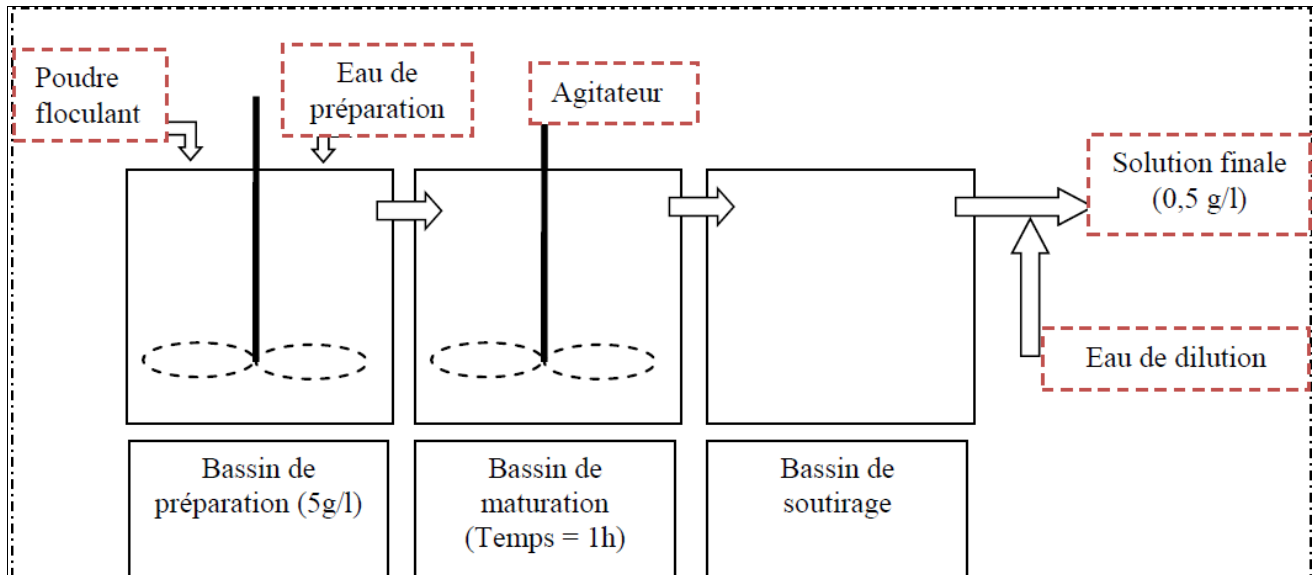


Figure 16 : station de floculation

Le floculant est préparé à froid dans une station de floculation qui comporte 3 bassins dont deux équipés d'un agitateur comme illustré dans la figure ci-dessus :

- **Bassin 1** : Où se fait la préparation de la solution diluée à 5 g/l, le floculant s'ajoute à l'aide d'un extracteur doseur plus l'ajout de l'eau à l'aide d'une électrovanne. La solution obtenue est versée dans le 2ème bassin.
- **Bassin 2** : Assure la maturation, avec un temps de séjour d'une heure qui rend la solution sous l'effet de l'agitation plus homogène, puis elle passe au 3ème bassin.
- **Bassin 3** : C'est la phase de stockage, il assure un débit constant et protège la pompe. Il est équipé de capteurs de niveau ; lorsque la solution atteint le niveau haut l'électrovanne s'arrête et lorsqu'elle atteint le niveau bas l'électrovanne s'ouvre et un nouveau cycle commence.

**Caractéristiques du point optimal du meilleur flocculant**

Variable	facteur	Valeur	Le taux de récupération d'eau maximale pour le flocculant F6
<b>X1</b>	temps d'agitation	120s	théorique
<b>X2</b>	Consommation spécifique du flocculant par tonne de boue sèche	450g/t	<b>49.59</b>
<b>X3</b>	Concentration volumique	0.8g/l	47.49%

**Tableau 12** : caractéristiques du point optimal du F6

**N.B** : Les équipements seront dimensionnés à la base de ce flocculant.

**Caractéristiques de la station de floculation**

- Quantité de flocculant injectée sous forme de poudre par heure :

Le débit de boue issu de décanteur est de 350 m<sup>3</sup>/h, alors pour les deux décanteurs le débit total de la boue dirige vers les bassins d'épandage est Q=700 m<sup>3</sup>/ h et C.V=372 g/l.

- Calculons du débit massique de flocculant nécessaire pour traité 700 m<sup>3</sup>/ h de boue.

$$450 \text{ g} \longrightarrow 10^6 \text{ g}$$

$$Q_m \longrightarrow 700 \text{ (m}^3/\text{h)} * 372 \text{ (g/l)} * 103$$

$$\boxed{Q_m = 117180 \text{ g/h} = 117.18 \text{ Kg/h.}}$$

- Débit volumique de flocculant injecté avec l'eau de dilution par heure :

$$0.8 * 10^{-3} \text{ Kg} \longrightarrow 1\text{L} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$117.18 \text{ Kg/h} \longrightarrow Q_v$$

$$Q_v = 146.475 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Calculons la quantité d'eau de dilution :

$$C_i = 5 \text{ g/l}, Q_i = ? \quad \text{et} \quad C_f = 0.8 \text{ g/l}, Q_f = 146.475 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Selon le relation de conservation de matière on peut calculer le débit volumique de l'eau par heure :

$$Q_i = (Q_f * C_f) / C_i \quad \text{A.N:} \quad Q_i = (146.475 * 0.8) / 5$$

Débit de l'eau de préparation et débit de floculant	$Q_i = 24 \text{ m}^3/\text{h}$
---	---------------------------------

Débit de floculant injecté par heure est :

$$Q_{fi} = 146.475 - 23.44 \quad Q_{fi} = 123 \text{ m}^3/\text{h}$$

Concentration volumique de la solution mère	5 g/l
Quantité de floculant injectée sous forme de poudre par heure	120 kg/h
Quantité d'eau douce nécessaire pour préparer une solution mère de 5g/l par heure	24 m <sup>3</sup> /h
Temps de maturation	1 heure
Débit de sortie de floculant préparé	24 m <sup>3</sup> /h
Volume total de la station	24 m <sup>3</sup> /h

**Tableau 13** : caractéristiques de station de floculation

### Calcul des points d'injection à la conduite

Les injections que ce fait à la conduite à été calculé a partir de débit boue et débit de floculant avec un temps de séjour précise qui est (120s) et correspond à une longueur L précise, dont la conduite a un diamètre de 400 mm.

Le débit de boue est 700m<sup>3</sup>/h et le débit de floculant est 147m<sup>3</sup>/h est divisé par deux injections à la conduit, donc pour la premier injection se fait a une distance L<sub>1</sub>=204 m a partir de l'entré de la la conduite.

- **Calcule de premier point d'injection**

$$\text{On a} \quad Q = \frac{V}{t_s} = \frac{S * L}{t_s}$$

$$L = \frac{Q \cdot t_s}{S} \text{ et } Q = 700 + 73.5 = 773.5 \text{ m}^3/\text{h} \text{ avec } S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 0.1256 \text{ m}^2$$

Avec  $t_s = 60 \text{ s}$ .

$$\text{A.N } L_1 = \frac{\frac{773.5}{3600} \cdot 60}{0.1256} \quad \boxed{L_1 = 103 \text{ m}}$$

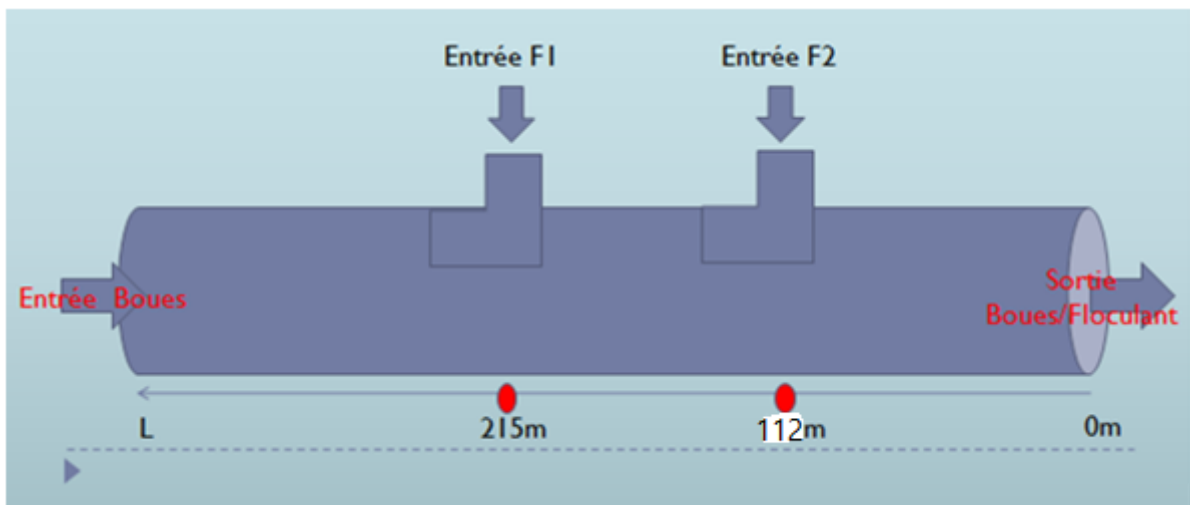
$L_1 = 103 \text{ m}$ , c'est la longueur qui correspond à un temps d'agitation de 60s, a partir de première point d'injection jusqu'à deuxième point d'injection.

- **Calcul de deuxième point d'injection**

$$Q = 847 \text{ m}^3/\text{h} , S = 0.126 \text{ m}^3 \text{ et le temps } t_s = 60 \text{ s} . \quad L_2 = 112 \text{ m}$$

C'est la longueur qui correspond à un temps d'agitation de 60s, alors la longueur de deuxième injection se fait a une distance 112 m, a partir de deuxième point d'injection jusqu'à la sortie de la conduit.

Pour une conduite de longueur L et de section S et afin d'assurer le temps de mélange optimal qui est 120s les injections doivent être faites dans les points suivants :



**Figure 17 :** Schéma des injections a la conduite

Les injections a été testé par logiciel fluent et gambit pour savoir le type de régime d'écoulement qui a été créer pour déférente types d'injections, pour choisir qui assurer une bonne mélange.

**Objectif du fluent**

Après la détermination du floculant optimal par la méthodologie des plans d'expériences, et la vitesse avec laquelle on doit injecter le floculant traité précédemment qui ne répond pas complètement à notre problème. Car on doit définir la manière dont on est censé injecter la solution

diluée du floculant dans la conduite central, contenant la boue, qui a un débit volumique de l'ordre de 700 m<sup>3</sup>/h. Afin d'avoir un bon mélange floculant-boue. D'où la nécessité de la réalisation en amont des simulations via un logiciel CFD (**computational fluid dynamics**) qui permet de résoudre une telle problématique.

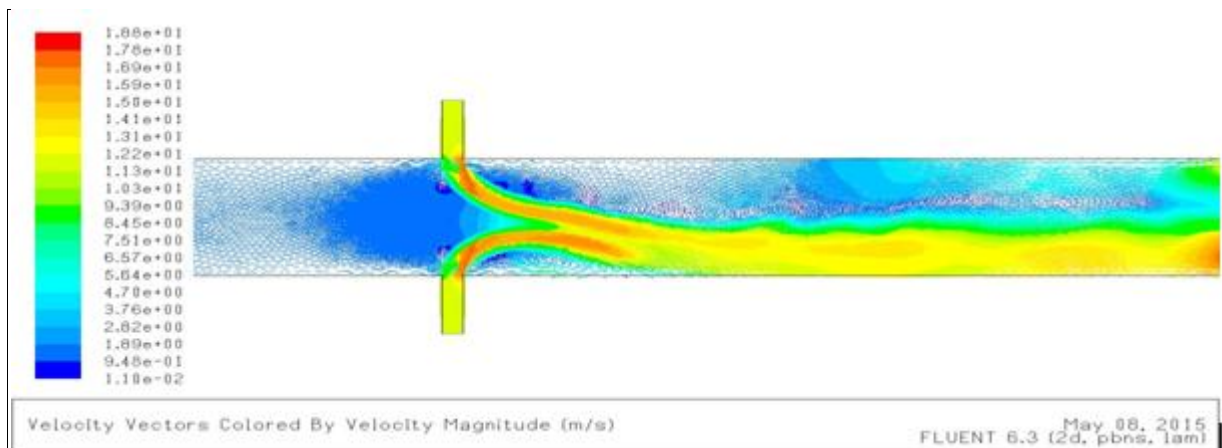
Pour se faire on a opté pour trois configurations :

- **Configuration1** : Une injection du floculant dans une conduite verticale par rapport à la conduite centrale contenant la boue.
- **Configuration 2** : Une injection du floculant dans une conduite verticale par rapport à la conduite centrale contenant la boue, mais immergée dans cette dernière.
- **Configuration 3** : Une injection du floculant dans une conduite immergée dans la conduite centrale et à contre courant.

### Outil de simulation

La simulation des trois configurations citées précédemment sera traitée par le logiciel fluent, ce dernier, largement utilisé dans l'industrie, offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. D'ailleurs, c'est la raison pour laquelle il est pris comme notre premier choix.

La simulation des trois injections proposées avec leurs vecteurs vitesses est la suivante :



**Figure 18** : Les vecteurs vitesses de la configuration 1

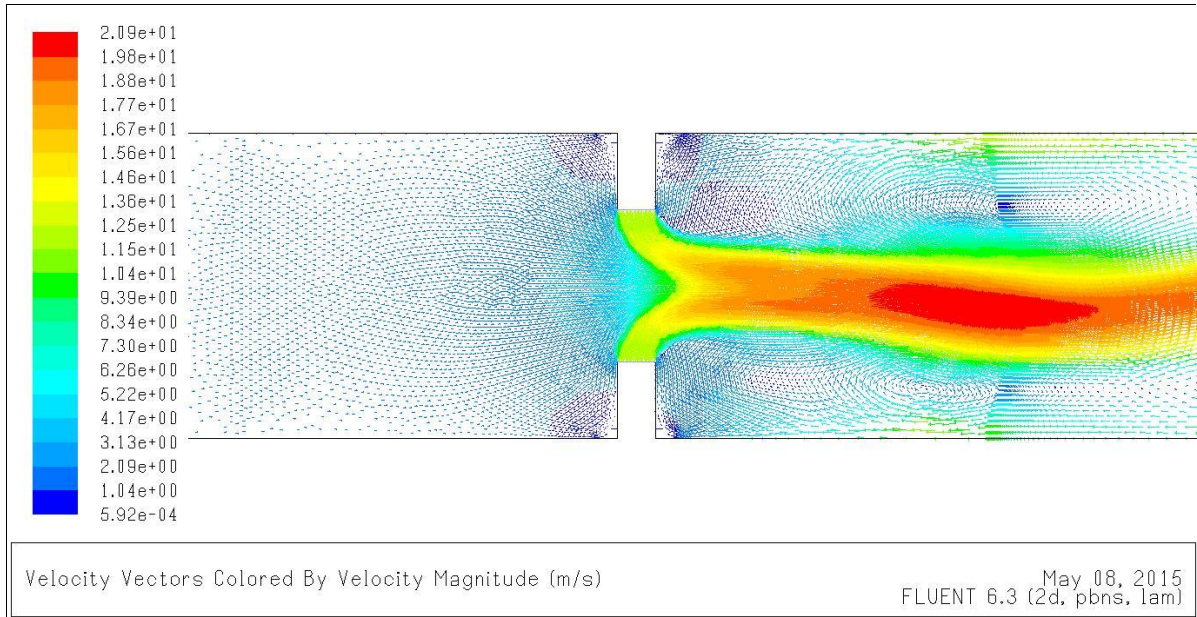


Figure 19: les vecteurs vitesses de la configuration 2

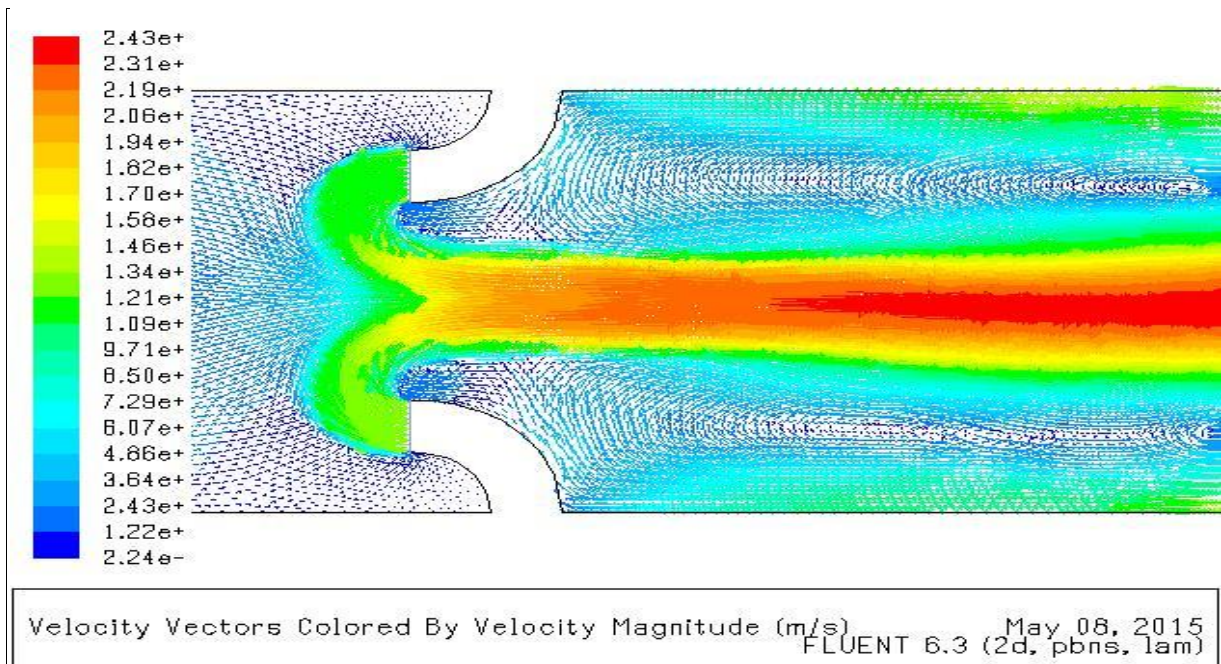


Figure 20 : les vecteurs vitesses de la configuration 3

**Interprétation des résultats**

D'après les trois simulations réalisées ,on constate que l'injection contre-courant immergée est celle qui présente plus de tourbillons au niveau de la région d'injection, ce qui engendrera un bon mélange boue-floculant. Pour conclure c'est cette configuration qui sera adoptée pour réaliser l'injection du floculant.

### 5.1.2. Les Pompes

La station de floculation elle a besoin de deux types de pompes, deux centrifuge et une volumétrique à piston.

La pompe centrifuge a des caractéristiques suivantes : le débit est plus grand et la pression faible par contre la pompe volumétrique a un débit plus faible avec une pression plus grand.

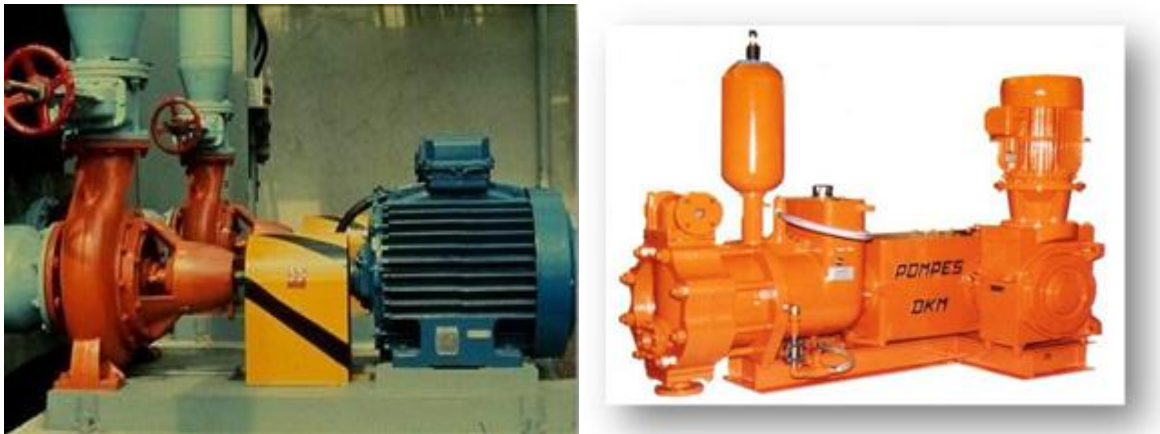


Figure 21 : pompe centrifuge et pompe volumétrique

#### Pompes centrifuge.

Pompe centrifuge a une fonctionnent suivant le principe d'une mise en rotation du fluide à pomper dans une roue tournant à grande vitesse ( $\sim 600 - 3500 \text{ tr.mn}^{-1}$ ).

Le débit pompé est essentiellement fonction: de la différence de pression entre aspiration et refoulement. la vitesse de rotation de la roue, et du diamètre de la roue (vitesse périphérique).

#### Pompe volumétrique

Les pompes volumétriques ont pour caractéristiques de prélever, en un temps donné, un volume de liquide incompressible à l'aspiration, et de l'envoyer au refoulement. Certaines pompes volumétriques sont dites rotatives (cylindrée et vitesse de rotation fixent le débit pompé).

Alors pour dimensionner chacun de ces pompes on a besoin de calculer trois paramètres qui sont : le débit volumique, la hauteur manométriques totale (HMT) et la puissance électrique.

Calcul de hauteur manométrique totale

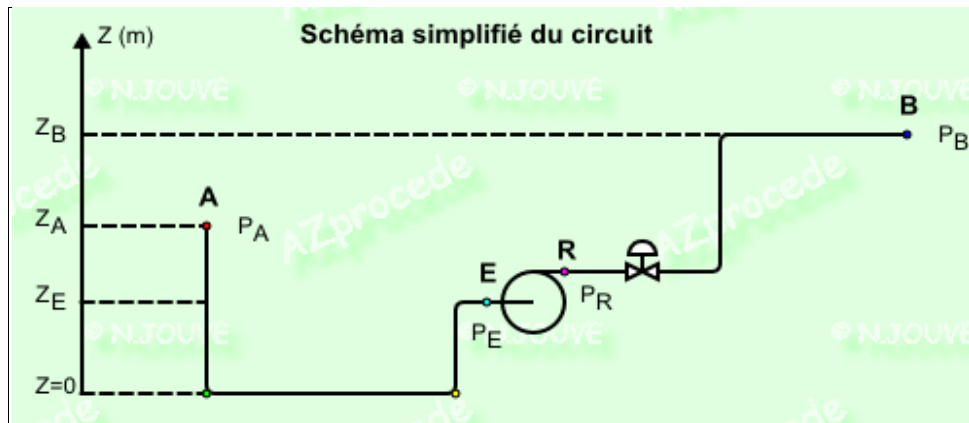


Figure 22 : schéma simplifié du circuit

$$HMT = \frac{P_a - P_b}{\rho g} + (Z_B - Z_a) + (V_b^2 - V_a^2) + J_{asp} + J_{ref} + J_{van}$$

et  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9.28 \text{ m/s}^2$ .

• Pompe d'eau douce de préparation du floculant (P1)

$Q = 24 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $D = 125 \text{ mm}$  et  $S = (\pi D^2/4)$ .

étape 1 : calcul de la vitesse.

$$V_b = \frac{Q}{S} \quad \text{A.N} \quad V_b = \frac{4 * 24}{\pi * 0.126^2 * 3600}$$

$$V_b = 0.54 \text{ m/s} \quad \text{et} \quad V_a = 0$$

étape 2 : calcul de nombre de Reynolds

$$Re = ((e * v * D)/\eta)$$

A.N  $Re = ((1000 * 0.54 * 0.125)/(1.003 * 10^{-3}))$ .

$$Re = 67298.10$$

Re est supérieur à 4000 alors le type d'écoulement est **turbulent**.

et dans ce cas le coefficient  $h = 64/Re$

Les calculs a été fait par Excel, d'après le diagramme de Moody, avec un régime turbulent dans un type d'acier soudé, on trouve  $h = 0.02367$



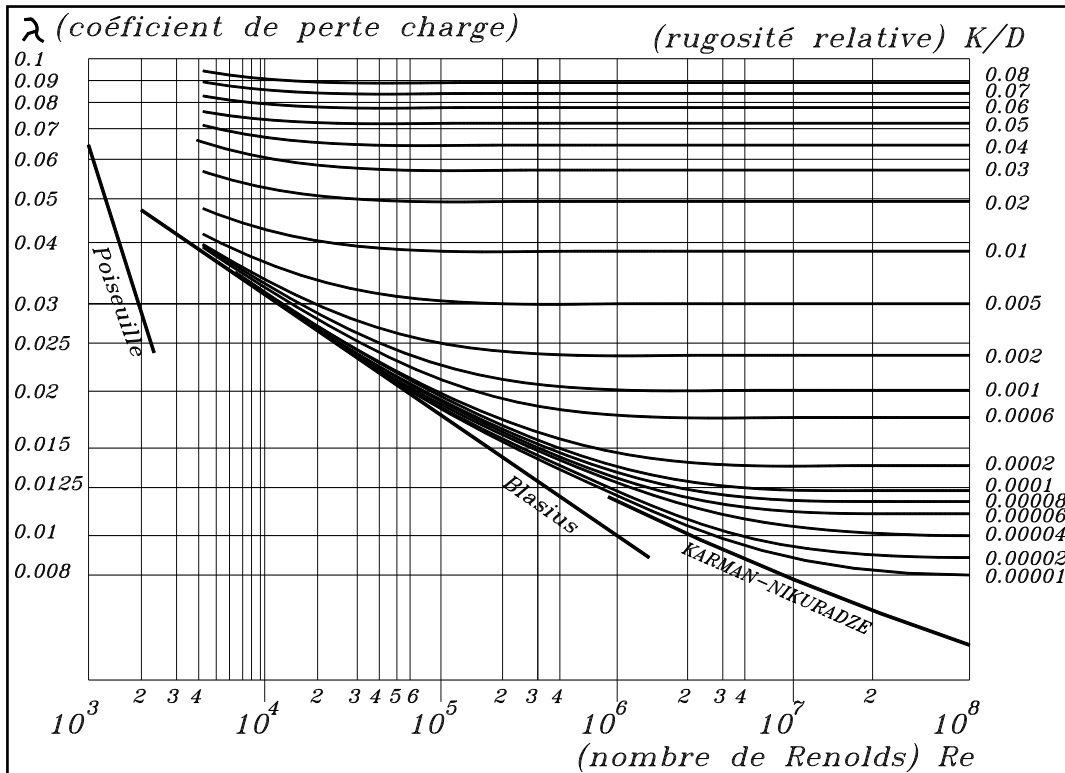


Figure 23 : diagramme de Moody

**Etape 3 : calcul de perte de charge d'aspiration et perte de charge de refoulement.**

	longueur	hauteur	débit	diamètre
<b>unité</b>	m	m	m <sup>3</sup> /h	mm
perte de charge d'aspiration	2	0.75	24	125
Perte de charge de refoulement	3	0.75	24	125

✓ **perte de charge d'aspiration linéaire**

Avec la viscosité de l'eau est  $\mu_{\text{eau}} = 1.003 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$$J_{\text{aspiration linéaire}} = ((h * L * V^2) / (2 * g * D))$$

Les calcul a été fait par Excel selon le diagramme de Moody on trouve  $h = 0.02367$  et la perte de charge d'aspiration est égale :

$$J_{\text{aspiration linéaire}} = 0.07370 \text{ bar}$$

✓ **Perte de charge de refoulement**

$$J_{\text{refoulement linéaire}} = ((h * L * v^2) / (2 * g * D^2))$$

A partir de la courbe on trouve perte de charge de refoulement régulier :

$$J_{\text{refoulement linéaire}} = 0.07399 \text{ bar}$$

✚ Perte de charge linéaire totale de la pompe est :

$$J_{\text{totale linéaire}} = J_{\text{d'aspiration linéaire}} + J_{\text{refoulement linéaire}}$$

$$\text{A.N} \quad J_{\text{totale linéaire}} = 0.14969 \text{ bar}$$

✚ Perte de charge singulier totale de la pompe est :

Pour ce type de perte de charge on n'a pas des données suffisante pour le calculer alors, on peut prend 20% de perte de charge linéaire.

$$\text{Alors la perte de charge totale est } J_{\text{totale singulier}} = 0.2 * J_{\text{totale aspiration}}$$

$$\text{A.N} \quad J_{\text{totale}} = 0.2 * 0.14969$$

$$J_{\text{totale singulier}} = 0.029538 \text{ bar}$$

Enfin la somme de ces derniers est la perte de charge totale de la pompe :

$$J = 0.029538 + 0.14969 = 0.179228 \text{ bar}$$

✚ Calcule de l'hauteur manométrique totale :

$$HMT = (\rho g(P_b - P_a) + \rho g(Z_b - Z_a) + \rho(V_b^2 - V_a^2)/2) * 10^{-5} + J_{\text{asp}} + J_{\text{ref}}$$

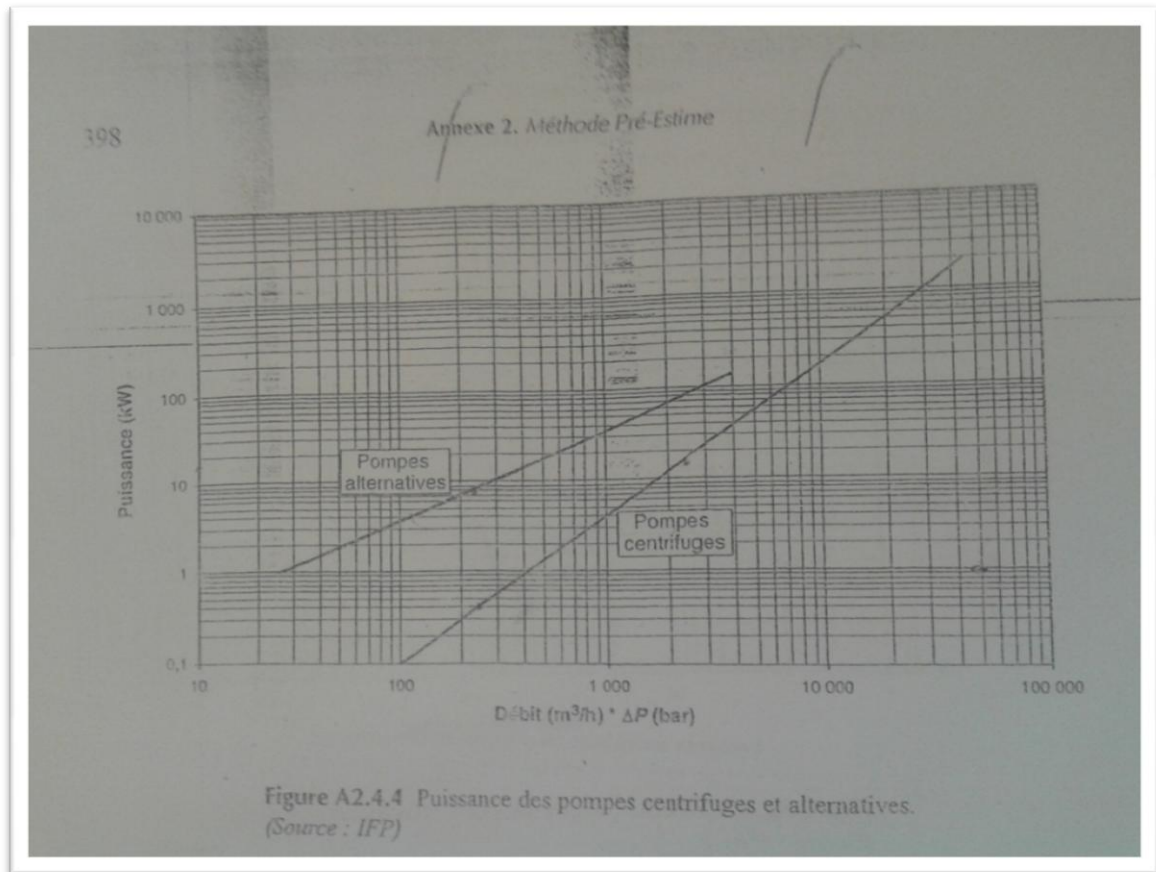
Avec  $P_b = P_a = P_{\text{atm}}$      $Z_b - Z_a = 1.5 \text{ m}$ , et  $V_a = 0$  (liquide stable)

$$HMT = 0.327836 \text{ bar}$$

### Consommation énergétique

Pour calculer la consommation énergétique ou bien la quantité d'exploitation de l'énergie de chaque pompe, il suffit de connaitre le débit et la hauteur manométrique totale (HMT).

A partir de diagramme de chauvel et type de pompe on peut distinguer la consommation énergétique de chaque pompe.



**Figure 24 :** Puissance des pompes centrifuges et alternatives

✓ **pompe 1 : pompe centrifuge**

$Q = 24 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $\text{HMT} = 0.32 \text{ bar}$ .  $Q * \text{HMT} = 7.68$

Alors d’après le diagramme de chauvel on trouve que la puissance de cette pompe est **0.1 Kw**.

C’est la même calcule pour deux autre pompes

Pompe	type	Débit (m³/h)	HMT (bar)	Puissance électrique (kW)
<b>P1</b>	centrifuge	24	0.32	0.1
<b>P2</b>	Volumétrique à piston	24	8.37	7
<b>P3</b>	Centrifuge	123	20.29	16

**Tableau 14 :** caractéristiques des pompes

## VI. Extrapolation industriel du procédé

Pour l'évaluation de la rentabilité de ce projet on utilisera **Le Bénéfice actualisé ou la valeur actuelle nette (VAN)** comme critère.

Pour alléger les calculs on adopte les hypothèses suivantes :

- Le taux d'actualisation est constant et égal à 10 %.
- L'année de référence est l'année de mise en marche effective de l'installation.
- La durée du projet est égale à la période d'amortissement, dans notre cas 10 ans.
- Prise en compte de taxation  $t=30\%$ .
- Valeur résiduelle des installations est considérée nulle  $V_r=0$ .
- Les recettes totales annuelles et les charges d'exploitation sont constantes.
- L'investissement du projet est financé par des fonds propres ( $FF=0$ ).

### 6.1. Capitale amortissable

Capitale amortissable est le budget total des équipements de l'installation (la station de floculation et les pompes).

D'après les expériences des agents du domaine le prix de station de floculation est à peu près de **300 000 dollars**, avec un dollars est équivalant de 8 Dh.

Alors le cout total de station de floculation est 2 400 000 Dh.

#### Pompes :

##### Pompe 1

La pompe 1 à un débit de  $24 \text{ m}^3/\text{h}$  et une perte de charge totale est de 0.32 bar, d'après le diagramme ci-dessous :

On trouve que le prix de cette pompe est 700 euro en 2001, ce qu'il faut actualiser ce prix en 2015, avec un taux d'inflation est de 2.32% par année.

Alors Prix de pompe en 2015 est égale le prix de pompe en 2001 multiple par  $(1+0.0232)^{14}$ .

$$\boxed{\text{Prix pompe}(2015) = 700 * (1 + 0.0232)^{14}}$$

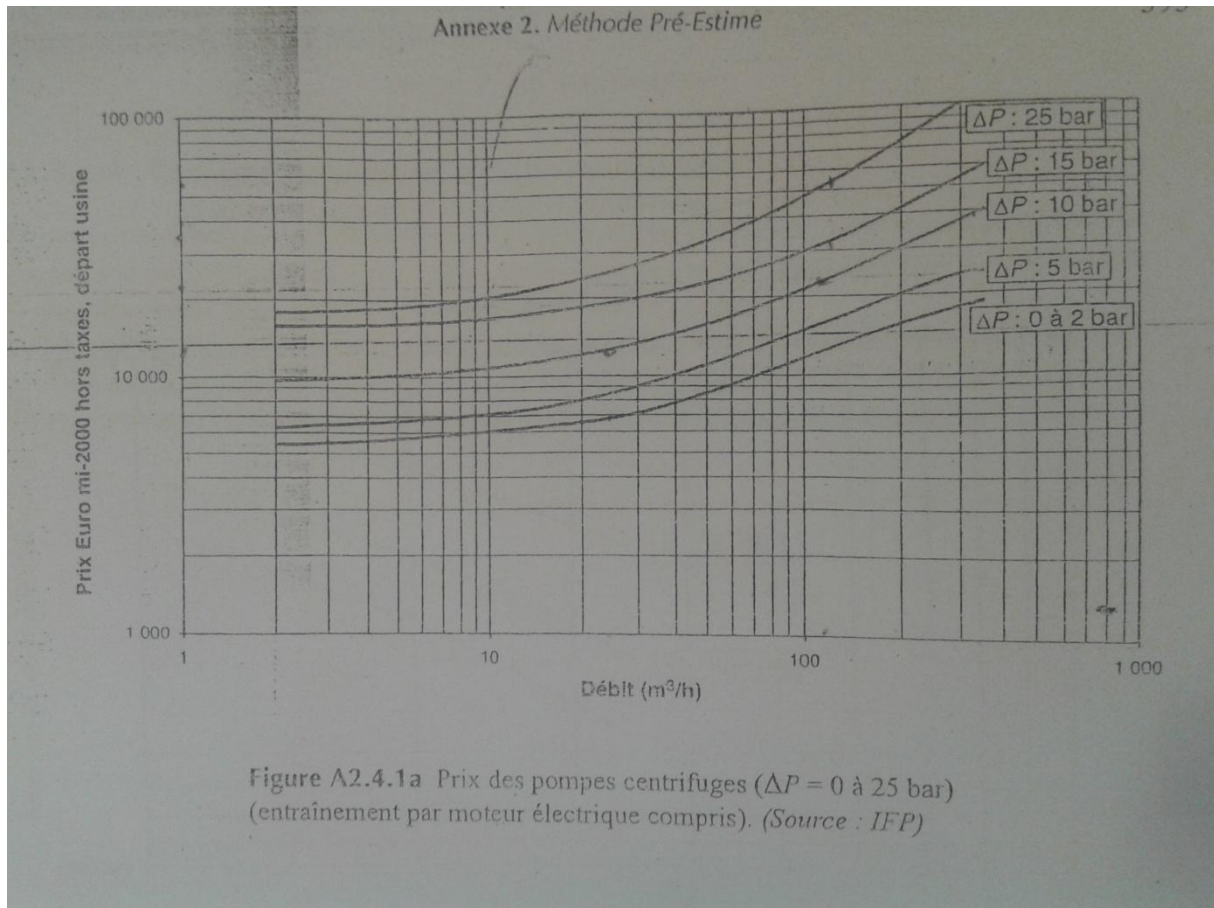


Figure 25 : prix des pompes

Prix p1= 106 154. 44 Dh et Prix p3 = 1 061 544.40 Dh

Capital Amortissable (MDh)				3.57
Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix Unitaire (MDh)	Prix Total (MDh)
Acquisition et installation de la station de floculation	---	1	2.4	2.4
Acquisition et Installation des Pompes	---	2	1.17	1.17

Tableau 15 : Capital amortissable

### 6.2. Estimation du besoin en capital par la méthode de Peters-Timmerhaus :

Cette méthode commence par des couts d'équipements à l'achat ou à la livraison. Le procédé est classé selon qu'il s'agit d'une unité de traitement de solide, fluide ou bien solide-fluide.

Les 12 facteurs des coûts directs et indirects sont explicités dans le **Tableau [3]** de Méthode de Peters et Timmerhaus (voir annexe)

Cette méthode consiste à multiplier le capital amortissable par un coefficient estimatif qui est la somme des facteurs (explicités dans le tableau [3] à l'annexe) choisi par l'estimateur et selon le type de du procédé.

Dans notre cas on prendra en considération tous les facteurs sauf celui du Terrain, puisque le projet s'effectuera dans un site déjà existant, et on a à faire à une unité de traitement solide-fluide.

Donc :

$$C_{totale} = 4.07 * 3.57$$

A.N :	$C_{totale} = 14.5299 MDh$
-------	----------------------------

$$I_{total} = C_{totale} + 0.15C_{totale}$$

$$I_{total} = 16.71 MDh$$

Détermination des charges d'exploitation

✓ **Pompe 1**

la pompe 1 a une puissance de 0.1 kw.

**-Hypothèse**

-Taux de disponibilité : 95%

-Taux d'utilisation : 90%.

La consommation annuelle est = puissance * 24h * 365j * 0.90 * 0.95
---

A N consommation annuelle = 748.98 kwh/an

✓ **Pompe 3**

Consommation annuelle = 119 836.8 Kwh/an

✓ **Station de floculation :**

La consommation énergétique de station de floculation est 17/4 **HP (horsepower)**

avec 1 HP = 0.75 kw.

Alors la consommation est (17/4) \* 0.75 = 3.1875 Kw

Consommation annuelle de station de floculation est : **23 873.7375 Kwh/an.**

La consommation énergétique annuelle totale des pompes avec station de floculation est : **144 459.5175 Kwh.**

1 Kwh —————> 0.8374 Dh

144 459.5175 Kwh —————> consommation totale (Dh).

$$C_{totale} = 120 970.40Dh = 0.121 MDh$$

✓ **Consommation de floculant :**

La Station de floculation consommer 120kg/h, la consommation annuelle totale par année est :

$$C.A = 120 * 24 * 365 * 0.90 * 0.95 = 899\ 776\ \text{Kg/an.}$$

Alors la consommation totale par année est : **899 tonnes/an.**

un tonne → 25 000 Dh

899 tonnes → 22 469 400 Dh/an = 22.47 MDh/an

Coût Opérateur (MDh/an)				22.95
Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix Unitaire (Dh)	Total (MDh/an)
<b>Frais Opérateurs</b>				
Frais d'énergie	KWh	144 460	0.8374	<b>0.121</b>
Consommation de floculant	T	899	25000	<b>22.47</b>
<b>Main d'œuvre</b>				<b>0.36</b>
Agent de Maitrise		3	10000	360000

**Tableau 16 : cout opérateur en MDh/an.**

**6.3. Gains espéré**

Les gains relatifs à l'installation de la nouvelle station de floculation sont liés à la récupération d'eau :

- Le volume d'eau susceptible d'être récupéré est d'environ **819 144.4464 m<sup>3</sup>/an.**

Les deux décanteurs génèrent des boues avec un débit de **700 m<sup>3</sup>/h** et un taux de solide de 30%, alors elles contiennent 70% de l'eau ce que correspond un débit de **607 m<sup>3</sup>/h** de l'eau.

Alors le débit de l'eau annuelle est :  $Q_{EAU}(m^3/h) = 607.6 * 24 * 365 * 0.90 * 0.95 * 0.18$

<b>Q= 819 144.4464 m<sup>3</sup>/an</b>
---

- Le prix du m<sup>3</sup> d'eau étant **3.8 Dh**, l'on réalise des économies de **3.113 MDh/an.**

En plus de ces gains, le recyclage de cette quantité d'eau assure la continuité de la marche de la laverie et préserve l'image de marque de l'OCP par la protection de l'environnement.

- L'espace que l'on peut gagner à partir de la digue est : **14.08 MDh/an**

Le prix d'une digue est d'environ 440 MDh pour 10 ans, alors le volume gagné qui a été démontré par l'étude cinétique est 32%.

$$((440 * 0.32) / 10) = 14.08\ \text{MDh/an}$$

Les recettes totales sont : <b>17.193MDh/an</b>
---

Le Bénéfice actualisé ou la valeur actuelle nette:

La VAN ou le bénéfice actualisé s'écrit de la forme suivante :

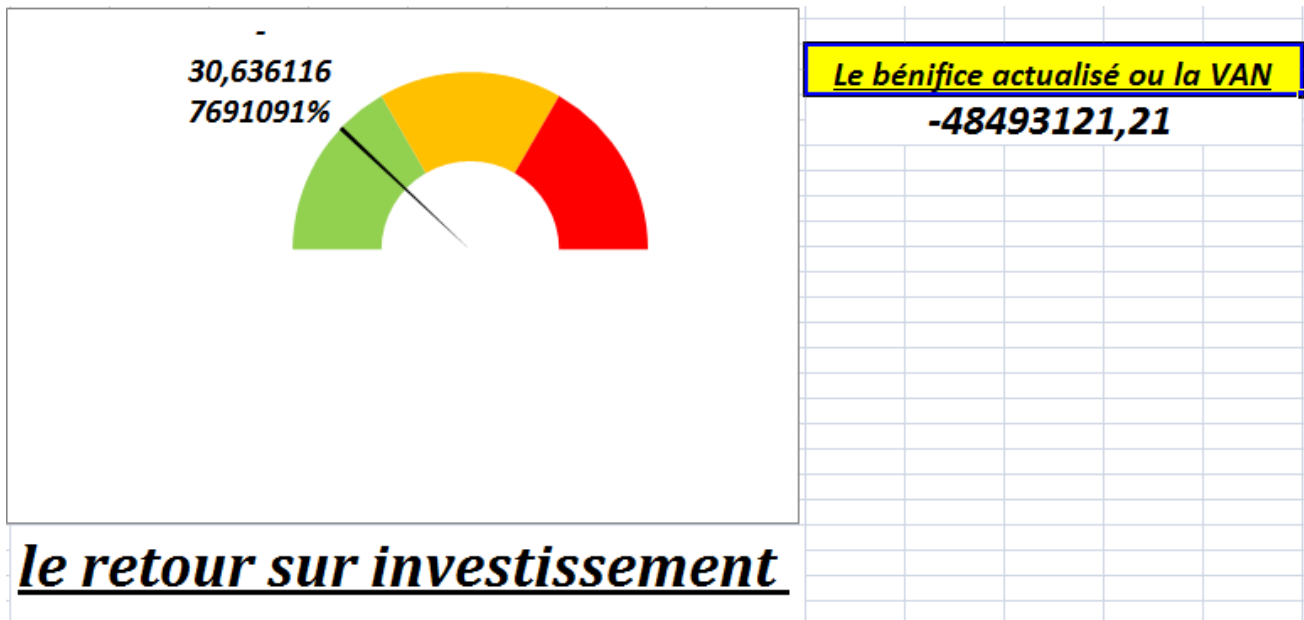
$$VAN = -(I + f_d) + \frac{V_r + f_d}{(1 + i)^N} + \sum_1^9 \frac{CF_P}{(1 + i)^P}$$

Avec : **V<sub>r</sub>** est nulle dans notre cas.

$$CF_P = (V_P - D_P) + A_P - FF_P - I_P$$

- et
- **FF<sub>p</sub>** : le frais financier de l'année P qui sont nuls tous au long du projet.
  - **I<sub>p</sub>** : l'investissement de l'année P (I<sub>p</sub>=0 pour toute la durée du projet).

Les calculs a été fait par Excel et on trouve les résultats suivant :



AN : **VAN = -48 MDh/an**



## Conclusion

La description du mode de gestion actuel des boues nous a permis de saisir l'importance des quantités d'eau qui demeurent non récupérables au sein des digues à cause du rendement médiocre de la séparation Eau-Boues qui ne dépasse pas 30% ajoutant à cela le fait que la vitesse de séparation est très lente. L'enjeu est donc à la fois environnemental et économique. Notre mission a consisté donc en la mise en place d'un procédé de consolidation des boues de lavage et de flottation des phosphates par floculation. Cette solution a pour objectif d'optimiser la quantité du flocculant utilisé afin d'obtenir le meilleur taux de récupération d'eau possible.

La recherche bibliographique effectuée lors de ce travail a mis en évidence l'importance de la floculation dans l'accélération de la vitesse de sédimentation ainsi les paramètres qu'il faut prendre en compte afin de décrire le procédé de consolidation des boues. Nous avons pu constater que durant la phase de consolidation l'eau est libérée sous l'effet du poids de la sédimentation ce qui constitue un gain de plus. Ceci a été montré aussi par l'étude de la cinétique de récupération qu'on a réalisé au cours de ce travail.

Grace à des outils tels que les Plans d'Expérience, nous avons pu déterminer les facteurs les plus influents du procédé. Nous avons pu modéliser le procédé et optimiser les facteurs de telles façons à obtenir un taux de récupération d'eau maximal avec une configuration optimale des paramètres mis en jeu.

Au lieu de d'un  $Tr.eau=30\%$  réalisé par le mode de gestion actuel, nous avons pu atteindre un  $Tr.eau=48\%$  et nous avons réalisé une extrapolation industrielle du procédé qu'on a mis en place, tout d'abord à l'échelle laboratoire, tout en dimensionnant tout les équipements nécessaires à sa réalisation sur le terrain. En fin de compte nous avons effectué une étude économique du projet et nous avons constaté qu'à ce niveau et avec les technologies utilisées, il est non rentable.

## Référence

[1] : Thèse de doctorat [Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt] à l'université de Limoges faculté de des sciences et techniques, 2004, nombre de page 234.

[2] : technique d'ingénieurs. j2

[3] : technique d'ingénieurs. r2

[4]: [http://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich9\\_10.htm](http://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich9_10.htm)

➤ [www.ocpgroup.ma](http://www.ocpgroup.ma) (présentation de l'organisme d'accueil)

### Les logiciels utilisés sont :

- Nemrodw : plan d'expérience.
- Fluent et Gambit.
- Excel.

Annexe

N°Exp	X1	X2	X3
1	-1.00000	-1.00000	-1.00000
2	1.00000	-1.00000	-1.00000
3	-1.00000	1.00000	-1.00000
4	1.00000	1.00000	-1.00000
5	-1.00000	-1.00000	1.00000
6	1.00000	-1.00000	1.00000
7	-1.00000	1.00000	1.00000
8	1.00000	1.00000	1.00000
9	-1.00000	0.00000	0.00000
10	1.00000	0.00000	0.00000
11	0.00000	-1.00000	0.00000
12	0.00000	1.00000	0.00000
13	0.00000	0.00000	-1.00000
14	0.00000	0.00000	1.00000
15	0.00000	0.00000	0.00000
16	0.00000	0.00000	0.00000
17	0.00000	0.00000	0.00000
18	0.00000	0.00000	0.00000

Tableau 1 : plan de composite

N°Exp	X1	X2	X3
1	1.00000	0.00000	0.00000
2	-1.00000	0.00000	0.00000
3	0.50000	0.86603	0.00000
4	-0.50000	-0.86603	0.00000
5	0.50000	-0.86603	0.00000
6	-0.50000	0.86603	0.00000
7	0.50000	0.28868	0.81650
8	-0.50000	-0.28868	-0.81650
9	0.50000	-0.28868	-0.81650
10	0.00000	0.57735	-0.81650
11	-0.50000	0.28868	0.81650
12	0.00000	-0.57735	0.81650
13	0.00000	0.00000	0.00000
14	0.00000	0.00000	0.00000
15	0.00000	0.00000	0.00000
16	0.00000	0.00000	0.00000

Tableau 2 : plan de Doehlert

Coûts indirects	Solide	Solide-Fluide	Fluide
<b>1- Équipement acheté et livré incluant équipement fabriqué et machine du procédé</b>	100	100	100
<b>2- Installation de l'équipement acheté</b>	45	39	47
<b>3- Instrumentation et contrôle (installé)</b>	9	13	18
<b>4- Canalisation, conduite (installée)</b>	16	31	66
<b>5- Electricité (installée)</b>	10	10	11
<b>6- Construction (service inclus)</b>	25	29	18
<b>7- aménagement de chantier</b>	13	10	10
<b>8- les installations de service</b>	40	55	70
<b>9- Terrain (si achat est nécessaire)</b>	6	6	6
<b>10-coût total direct de l'unité</b>	264	293	346
<b>11- Ingénierie et supervision</b>	33	32	33
<b>12- Frais de construction</b>	39	34	41
<b>13- Coût total direct et indirect</b>	336	359	420
<b>14- frais d'entrepreneur</b>	17	18	21
<b>15- imprévues</b>	34	36	42
<b>16- total du capital fixe + terrain</b>	387	413	483

Tableau 3: Méthode de Peters et Timmerhaus

**Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés****Nom et prénom:** KHOUBANE Lahoucine**Titre:** La mise on place d'un procédé de consolidation des boues de lavage et flottation des phosphates par floculation.**Résumé**

Les particules de la pulpe (boue et eau) se sédimentent rapidement vers le fond sous l'effet de la floculation. Le but de cette dernière est l'augmentation de la densité des particules dans le but de récupérer le maximum d'eau existant dans la pulpe et en même temps d'augmenter le taux de solide.

Notre travail qui est axé sur une étude d'une deuxième floculation mit en place un procédé de consolidation des boues de lavage ( $\leq 40\mu\text{m}$ ) après la première floculation qui a été déjà faite dans un décanteur. Notre floculation se fait dans une conduite qui soutire les boues à partir de décanteur vers bassin d'épandage.

Pour faire cette étude on a besoin d'une nouvelle station de floculation qui permet de préparer la quantité suffisant de flocculant pour traiter le débit de boue contenant dans la conduite. On cherche la méthode efficace d'injection tout on assurant un bon mélange. On prend en considération un temps suffisant pour flocculer ce débit avant de sortir de la conduite.

Pour optimiser ces paramètres qui sont: la quantité de flocculant, temps d'agitation et le type de dosage, il est indispensable de faire une optimisation par plan d'expérience, qui nous donne le minimum d'essai d'aboutir à un bon résultat

**Mots clés:** floculation, sédimentation, consolidation, séparation solide-liquide, taux de récupération de l'eau, taux de solide