



## LISTE DES TABLEAUX

---

○ Tableau 1 : Fiche technique de l'OCP.....	3
○ Tableau 2 : La situation actuelle des bassins d'épandage.....	13
○ Tableau 3 : Description des niveaux des facteurs de plan de criblage.....	21
○ Tableau 4 : Le plan d'expérience.....	21
○ Tableau 5 : Le temps de drainage .....	22
○ Tableau 6 : Plan d'expérimentation de plan de criblage 1.....	23
○ Tableau 7 : Plan d'expérimentation de plan de criblage 2.....	25
○ Tableau 8 : Plan d'expérimentation de Box Benkhen.....	26
○ Tableau 9 : Plan d'expérimentation d'un flocculant.....	27
○ Tableau 10 : L'analyse de la variance.....	28
○ Tableau 11 : La qualité de modèle mathématique.....	28
○ Tableau 12 : La réponse de différentes flocculant.....	29
○ Tableau 13 : Les critères de flocculant utilisés dans l'essai de sédimentation.....	30
○ Tableau 14 : Résultats de concentration finale d'essai de sédimentation.....	32
○ Tableau 15 : Données relatives aux pompes.....	36
○ Tableau 16 : Résultats des pertes de charge.....	36
○ Tableau 17 : Résultats des HMT des pompes.....	37
○ Tableau 18 : Résultats des puissances hydraulique des pompes.....	37
○ Tableau 19 : Les facteurs de méthode Peters-Timmerhaus.....	41
○ Tableau 20: Estimation de capital total du projet.....	42
○ Tableau 21 : Les recettes totales du projet.....	43



## Liste des figures :

---

○ Figure 1 : Historique de l'OCP.....	4
○ Figure 2 : Organigramme de l'OCP.....	4
○ Figure 3 : Organigramme de Khouribga.....	5
○ Figure 4 : Crible vibrant + Débourbeur.....	9
○ Figure 5 : Hydro cyclone.....	9
○ Figure 6 : Schéma de décanteur.....	10
○ Figure 7 : La procédure de la floculation.....	11
○ Figure 8 : Les composants de la station de floculation.....	12
○ Figure 9 : Schéma d'un bassin d'épandage.....	12
○ Figure 10 : Schématisation de procédés.....	14
○ Figure 11 : Schéma d'implantation d'une pompe dans un circuit process.....	17
○ Figure 12 : Photographie d'un bassin d'épandage.....	18
○ Figure 13 : Dispositif expérimentale.....	19
○ Figure 14 : La méthode de drainage .....	21
○ Figure 15: Graphe des effets.....	23
○ Figure 16: Approche de Pareto cumulé 1.....	24
○ Figure 17 : Graphe des effets 2.....	25
○ Figure 18 : Approche de Pareto 2.....	25
○ Figure 19 : Les normalités des données selon la droite d'Henry.....	28
○ Figure 20: Présentation graphique de l'optimum en 2D et 3D.....	29
○ Figure 21 : Essai de sédimentation.....	31
○ Figure 22: L'allure de la courbe de sédimentation.....	31
○ Figure 23: Diagramme de Moody.....	35
○ Figure 24: Estimation des puissances hydrauliques des pompes.....	37
○ Figure 25: Schématisation de conduite .....	38
○ Figure 26 : Résultats de simulation des trois configurations.....	40



---

## LISTE DES ABREVIATIONS

---

OCP : Office chérifienne de phosphate

RD : Recherche et développement

BPL : Bone Phosphate of lime (phosphate de surface)

C.S : Consommation spécifique

C.M : Concentration massique

$Q_m$  : débit massique

$Q_v$  : débit volumique

$R_e$  : nombre de Reynolds

Plan d'ex : plan d'expérience

HMT : la hauteur manométrique totale



## SOMMAIRE

**Dédicace et Remerciements**  
**Liste des figures et des tableaux**  
**Liste des abréviations**

**INTRODUCTION GENERALE.....1**

### **CHAPITRE I : Présentation de l'organisme d'accueil**

**I - Présentation de l'office chérifienne du phosphate SA .....3**

I-1 Généralités.....3

I-2 Historique du groupe OCP.....4

I-3 L'Organisation de l'OCP.....4

I- 4 Les divisions et services des exploitations minières de Khouribga.....5

**II - Centre de recherche en minéralurgie et procédés de traitement.....6**

II-1 La recherche et développement au sein de l'OCP.....6

II-2 Démarrage du centre ICR.....6

### **CHAPITRE II : Etude Bibliographique.**

**Introduction.....8**

**I - Description des processus.....8**

I-1 Processus lavage.....8

I-2 Processus flottation.....9

I-3 Processus décantation-sédimentation.....10

**II - Généralités sur la floculation.....11**

II-1 Principe de floculation.....11

II-2 La station de floculation au sein de l'OCP.....11

**III - Mode de gestion actuel des boues de soutirage.....12**

III-1 Le soutirage des boues.....12

III-2 La situation actuel des bassins d'épandage.....13

**IV - Généralités sur les plans d'expériences.....13**

IV-1 Définition.....13

IV-2 Méthodologies.....13

IV-3 La réalisation des plans d'expérience.....14

**V - L'écoulement fluide et Simulation.....15**

V-1 Introduction.....15

V-2 Les calculateurs d'écoulement fluide.....16

V-3 Les caractéristiques d'un système de pompage.....16



## CHAPITRE III : Etude de consolidation des boues de lavage et flottation des phosphates par floculation

<b>I - La Consolidation des boues de lavage et application d'un plan de criblage</b>	
I-1 Introduction.....	19
I-2 La consolidation des boues de lavage par floculation.....	19
I-3 Résultats et interprétation.....	22
<b>II - La modélisation de la consolidation des boues de lavage par application d'un plan de surface de réponse</b>	
II-1 Introduction.....	26
II-2 Domaine expérimentale.....	26
II-3 Résultats : Critères d'optimalités d'un floculant .....	26
II-3 Comparaison des réponses des floculants .....	29
<b>III - Etude de la cinétique de récupération d'eau avec utilisation et sans utilisation de floculant</b>	
III-1 Introduction .....	30
III-2 L'essai de sédimentation.....	30
III-3 Résultats.....	32
<b>IV - Extrapolation industrielle du procédé</b>	
IV-1 Dimensionnement des équipements.....	33
IV-2 L'injection de floculant.....	38
<b>V - Evaluation économique du projet</b>	
V-1 Introduction.....	41
V-2 Estimation de capital du projet.....	41
V-3 Les charges d'exploitation.....	42
V-4 Les recettes totales du projet.....	43
V-5 Tableau de bord.....	43
V-6 Conclusion et recommandation.....	45
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>46</b>



## Introduction générale

L'effort émis par le groupe OCP afin de développer ses capacités minières et industrielles s'accompagne par l'augmentation des besoins en eau ; cette demande en eau est prise en compte de manière responsable dans la stratégie de développement du groupe OCP, pour la sauvegarde des ressources souterraines stratégiques. D'ailleurs l'eau est la matière vitale utilisée dans la majorité des procédés au sein de l'OCP à savoir : lavage, flottation...

Ces procédés génèrent des quantités colossales des boues, ce qui entraîne des pertes importantes en eau. Face à cette problématique le recyclage d'eau est la solution idéale.

En effet, les boues soutirées de décanteur sont collectées dans des bassins tampon puis pompées aux bassins de stockage (digues) ; ces bassins comportent des points d'alimentation en boue ainsi que des cheminés permettant la récupération d'eau claire par décantation naturelle des boues. Puis l'eau est récupérée de chaque digue est collectée de manière gravitaire jusqu'à un bassin de stockage d'eau clair. Mais la récupération d'eau actuelle reste insuffisante (juste 30%).

L'état actuel des boues au sein de ces bassins ne permet pas une bonne récupération d'eau (emprisonnement d'eau dans la boue) et face à cette situation beaucoup d'hectares de terre sont exploités pour la construction des bassins de stockage des boues (parfois l'exploitation des terres agricoles).

La méthode de stockage actuelle des boues, issue des procédés de traitement de phosphate, impose une manifestation rapide, car la gestion actuelle de ces boues coûte très chère.

Pour cela notre objectif dans ce projet est de mettre en place un procédé qui permet de maximiser le taux de récupération d'eau au sein des bassins de stockage et de minimiser la superficie exploitée pour le stockage des boues dans ces bassins.



## CHAPITRE I :

### PRESENTATION GENERALE

*I : Présentation de l'OCP SA*

*II : Centre RD de Khouribga*

Rapport-Gratuit.com



## I - Présentation de l'office chérifienne de phosphate

### I-1 Généralités

#### I-1-1 fiche technique

Tableau 1 : Fiche technique de l'OCP [1]

Raison sociale	Group OCP
Forme juridique	Société anonyme
Date de création	7 aout 1920
Siège social	2, rue AL Abtal, Hay Erraha Casablanca (Maroc)
Direction	Mostafa Terrab (PDG)
Activité(s)	Production du phosphate et ses dérivés
Effectif	20 000 collaborateurs
Chiffre d'affaires	59.4 milliard de dirhams (2012)

L'office chérifien des phosphates est une société anonyme à caractère industriel, doté d'une organisation lui permettant d'agir avec dynamisme et souplesse, il détient le monopole de la recherche, de l'exploitation de la valorisation et de la commercialisation du phosphate et de ces dérivés au Maroc.

Le groupe OCP joue un rôle très important dans l'économie nationale, il livre aux cinq continents de la planète : sa capacité de production dépasse 23 millions de tonnes de phosphates par an, et ces exploitations représentent plus de 30% du commerce international du phosphate, ce qui permet au Maroc d'occuper la première place dans le domaine d'exploitation et d'exportation. [2]

#### I-1-2 Statut juridique.

L'office chérifien des phosphates est une société Anonyme ayant pour mission l'extraction, le traitement, la valorisation ainsi que l'exportation du phosphate et ces dérivés aux pays demandeurs. Etant donné ses activités industrielles et commerciales intenses et critiques pour l'économie du pays, le législateur l'a doté d'une organisation spécifique lui permettant d'agir avec une grande liberté indépendamment de l'état et ceci bien sûr dans des limites bien déterminées.

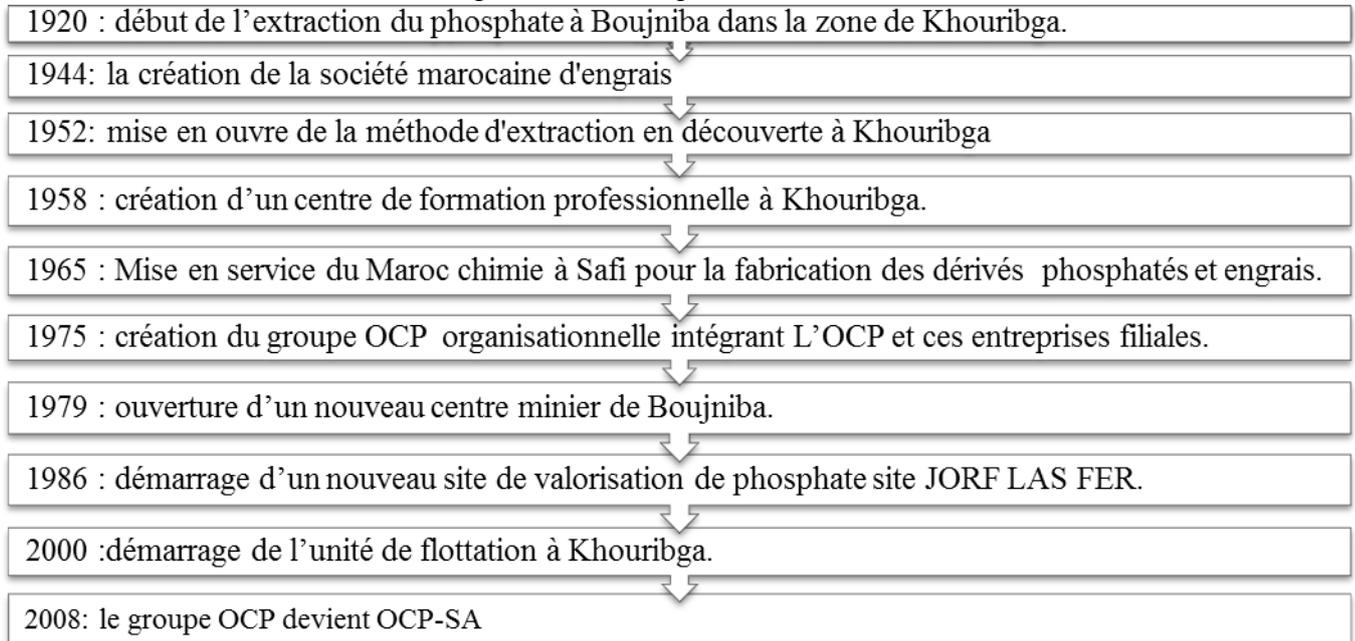
L'OCP est inscrit au registre du commerce et soumis sur le plan fiscal aux mêmes obligations que n'importe quelle entreprise privée (patente, droit de douane, taxes à l'exportation, impôt sur les salaires, impôts sur les bénéfices etc...). Cependant, il a une gestion financière séparée de l'état, ainsi, chaque année il établit ses prix de revient, son compte d'exploitation, son bilan et participe au budget de l'état. [3]

### I-2 Historique



Depuis sa création, le 7 AOUT 1920, L'OCP a joué un rôle primordial dans l'économie Marocaine que voici son histoire : [3]

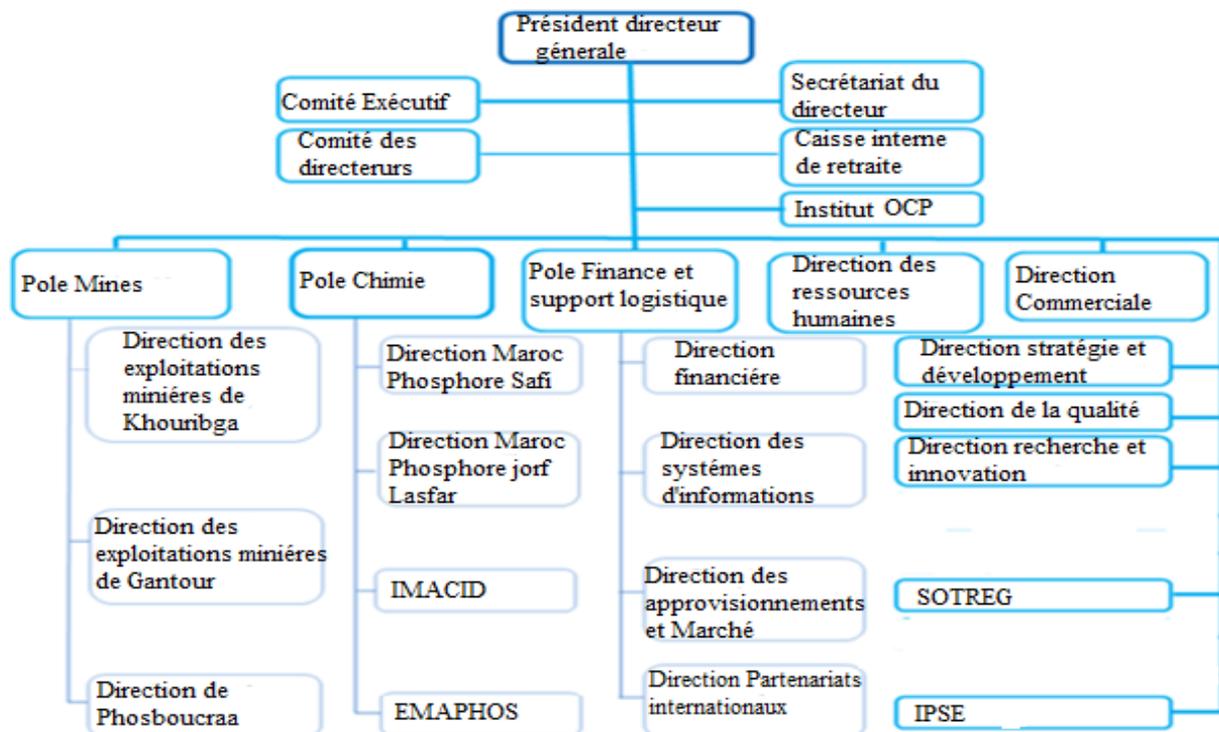
Figure 1 : Historique de l'OCP



### I-3 L'Organisation de l'OCP

#### I-3-1 Organigramme de l'OCP

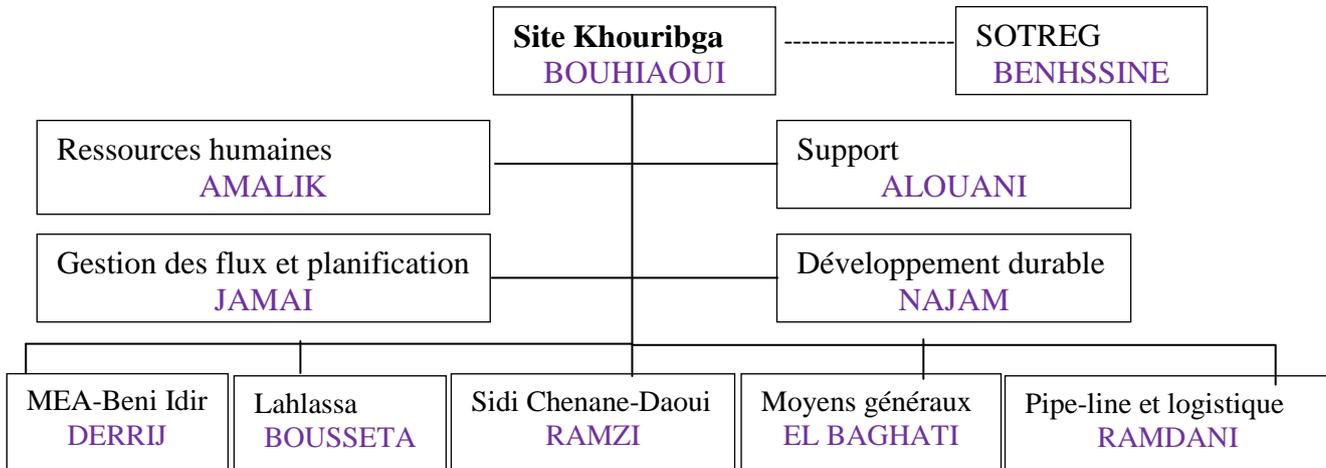
Figure 2 : Organigramme de l'OCP





### 1-3-2 Organigramme au niveau de la région KHOURIBGA

Figure 3 : Organigramme de Khouribga



### I-4 Les divisions des exploitations minières de Khouribga

L'OCP à Khouribga est représenté par l'exploitation minière de Khouribga (Pole Mine : PMK) à laquelle sont rattachés cinq divisions : quatre à Khouribga et une à Casablanca.



Division extraction (PMK/EK)

Chargée de l'extraction du phosphate de la zone de Khouribga



Division administrative (PMK/AK)

Chargée de tout ce qui est social et public dans la zone de Khouribga.



Division de maintenance centralisée (PMK/MK)

Elle s'occupe de la révision et entretien partiel ou général des matériels à Khouribga.



Division des embarquements (PMK/PC)

Chargée d'exploitation du phosphate du port de Casa vers les différents points du monde.



Division traitement (PMK/T)

C'est une division opérationnelle chargée de traiter le phosphate extrait dans le but de fabriquer des qualités spéciales, pour l'enrichir et l'acheminer vers l'embarquement de Casablanca pour exportation, ou vers la direction de JORF LASFA pour la valorisation du phosphate en acide phosphorique et en engrais. [3]



## II - Centre de recherche en minéralurgie et procédés de traitement (RD)

### II-1 La recherche et développement au sein de l'OCP

L'office met l'innovation et la recherche et développement au cœur de sa stratégie industrielle. Grâce aux deux composantes, il arrivera à déployer sa stratégie de valorisation du phosphate.

Le Maroc dispose de 80 % des réserves mondiales de phosphate. Un gisement que l'OCP veut préserver et valoriser en se basant sur l'innovation et la Recherche et Développement. Il s'agit en effet de deux éléments clé de la stratégie industrielle du groupe.

Une grande partie des investissements à l'horizon 2020, et dont il a prévu une enveloppe de plus de 140 milliards de dirhams sera dédiée à ces deux volets. Car, il faut savoir que dans un secteur tel que le phosphate où la compétition est de plus en plus forte, l'innovation a un rôle capital pour améliorer l'avantage compétitif et pour trouver de nouveaux relais de croissance.

La R&D à l'OCP couvre toute la chaîne de valeur, (de la géologie aux produits finis) et se déploie sur trois axes: le volet opérationnel, qui est étroitement lié à la production et aux processus industriels, le volet différenciation, qui concerne les produits dont elle cherche à améliorer le nombre et la qualité, ainsi que le volet de rupture qui vise à mettre au point de nouveaux produits.

[4]

### I-2 démarrage du centre recherche et développement

Le nouveau centre de recherche en minéralurgie et procédés de traitement est démarré le moins décembre 2015 en ouvrant ces portes vers l'innovation, la recherche et le développement. Auparavant les pôles mine et chimie avaient chacun leur centre R&D, Avec la décentralisation opérationnelle, la recherche a également été rapproché des sites, c'est dans ce cadre que le nouveau centre Recherche & Développement de Khouribga dont j'ai effectué mon stage a été fonder.

Les objectifs de ce centre sont multiples :

- 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 nouveaux au sein de l'OCP



---

## *CHAPITRE II : Etude Bibliographique*

*I : Description des processus*

*II : Généralités sur la floculation*

*III : Mode de gestion actuel des boues*

*IV : Les plans d'expériences*

*V : L'écoulement fluide et simulation*

---



## CHAPITRE II : Etude Bibliographique

### Introduction

Dans la partie bibliographique, nous allons présenter une description de phénomène de consolidation des boues de lavage et flottation des phosphates par floculation en ce qui concerne :

- ★ La description, des processus qui demandent la présence d'eau tel que : le lavage avec ces différentes phases (débouillage, criblage, cyclonage, broyage) ; la flottation ; la floculation, puis la sédimentation au sein de décanteur
- ★ La description du mode de gestion actuelle des boues pour analyser la problématique.
- ★ La présentation de la méthodologie des plans d'expérience (criblage + plan de surface de réponse) comme démarche utilisés afin de remédier au problème.
- ★ La présentation de deux logiciels GAMBIT et FLUENT pour la simulation de l'écoulement de la boue dans les conduites.

### I : description des processus.

#### I-1 Processus lavage

##### I-1-1 Définition

Le procédé de traitement d'un minerai de phosphate par lavage est un procédé qui consiste à l'enrichir jusqu'à obtention avec un teneur en BPL élevée. Ce procédé consiste en l'élimination des fractions grossières par deux moyens (annexes ; flowsheet 1) qui sont :

- ♣ Les coupures volumétriques : c'est la haute coupure sur crible vibrant à 2500mm.
- ♣ L'hydro-classification des fractions fines : c'est la basse coupure, ce niveau de coupure peut être situé de 40 à 400  $\mu\text{m}$  selon les teneurs désirées du concentré final [5].

Le processus de lavage comprend quatre phases importantes: le débouillage, le criblage, le cyclonage et le broyage.

##### I-1-2 Les Principales phases de lavage

###### I-1-2-1 Débouillage

C'est la première phase de la préparation du lavage de phosphate. Il se fait dans un appareil dit débouilleur. Le minerai et l'eau de dilution sont introduits dans le débouilleur ce qui engendre la formation de la pulpe. Durant le temps de séjour, le minerai subit des opérations de malaxage, d'attrition et de libération des grains de phosphate.

###### I-1-2-2 Criblage

Le criblage est l'opération de séparation volumétrique de la pulpe débouillée auparavant. Il assure la haute coupure en générant deux produits : le passant (diamètres des particules  $<2500\mu\text{m}$ )

et le refus qui constitue le stérile (diamètres des particules  $> 2500 \mu\text{m}$ ) est évacué vers la mise à terril. Cette opération est réalisée au moyen d'un crible vibrant. 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.



Figure4 : Crible vibrant + Débourbeur

### I-1-2-3 Cyclonage

L'Hydro cyclone est un appareil de classification hydraulique qui est basé sur le principe de la force centrifuge pour faire une séparation entre les fines particules et les grosses particules. C'est une séparation par équivalence de densité et de granulométrie.

Un hydro cyclone se compose de deux parties principales : une partie cylindrique où se fait l'alimentation tangentielle en pulpe et une partie conique où se fait l'évacuation des grosses particules.

Figure5 : Hydro cyclone



### I-1-2-4 Broyage

Le broyage est l'opération qui consiste à réduire les dimensions des grains, afin de libérer les constituants du minerai les uns des autres dans le but de faciliter la séparation par la suite. Le procédé de broyage (humide) a été installé pour produire une tranche granulométrique ( $< 180 \mu\text{m}$ ) destinée à être enrichi par flottation. [5]

## I-2 Processus de flottation

Le principe de la flottation est basé sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces des solides. Ces propriétés peuvent être naturelles ou stimulées à l'aide d'un réactif approprié, qui est ajouté dans l'eau où baignent les particules solides. Lorsque l'air est introduit sous forme de petites bulles dans un tel milieu, il se produit un transport sélectif des particules hydrophobes. Les particules présentant des surfaces hydrophobes se fixent aux bulles d'air lorsqu'elles entrent en contact avec elles.

Les principales phases de flottation sont : la préparation de la pulpe, le conditionnement et la flottation inverse.

### I-3 Processus décantation-sédimentation

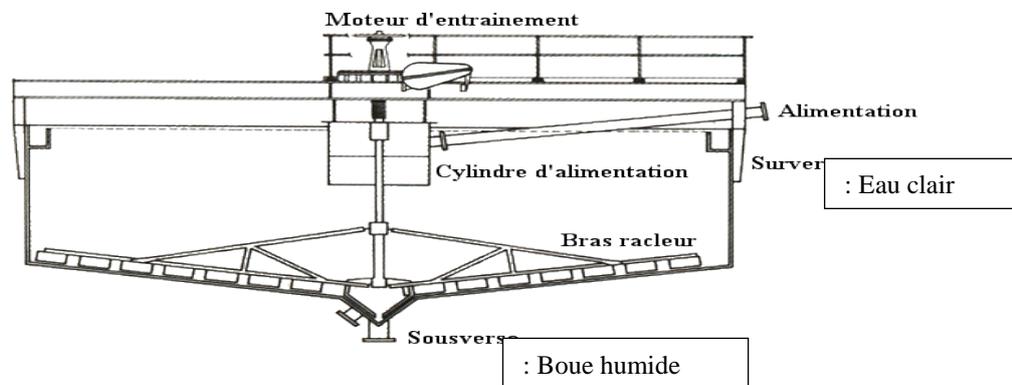
#### I-3-1 la décantation

Le traitement du minerai du phosphate par lavage et flottation consomme une grande quantité en eau. Pour pallier ce problème et éviter une consommation abusive, l'importance est de plus en plus donnée au recyclage des eaux comme ressources intéressante par l'installation de décanteur pour la clarification des rejets fins.

Les eaux chargées de fines particules issues de boues de lavage et d'attrition, sont constituées des grains de dimension inférieurs à 40  $\mu\text{m}$ , vont être épaissies ; ainsi les boues décantées vont être soutirées et stockée au niveau des digues d'épandages avec récupérations maximum d'eau claire : Les eaux récupérées seront recyclés dans le bassin d'eau claire pour l'alimentation des lignes de lavage et de flottation. [6]

On distingue deux types de décantation : Naturelle et artificielle. La décantation naturelle se fait sans l'ajout des produits accélérant la décantation ce qui demande un temps long, par contre la décantation artificielle demande la présence d'un flocculant qui augmente la vitesse de décantation ; et c'est la méthode utilisés dans les décanteurs d'OCP.

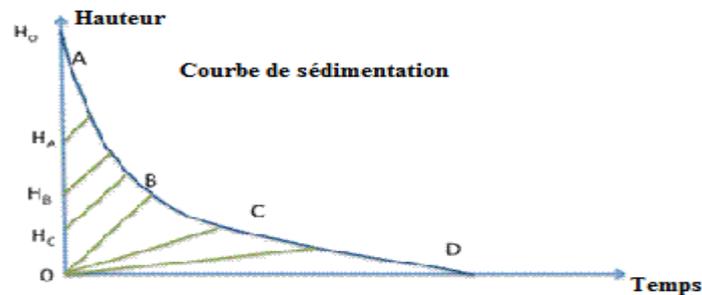
Figure 6 : schéma de Décanteur



#### I-3-2 Théorie de KYNCH

La modélisation de la sédimentation est due à Kynch (1952), qui propose la théorie suivante : la vitesse de chute de particules rigides en sédimentation libre ne dépend que de la concentration locale en solide de la suspension. Elle est une fonction décroissante de la concentration en solide. Les particules de même dimension, de même forme et de même masse volumique sont équitombantes et leur concentration est uniforme pour chaque niveau de la colonne de sédimentation. Ainsi, à partir d'essais en éprouvette, KYNCH trace dans le diagramme (h, t) les

droites d'iso concentration correspondant aux niveaux où la concentration a une valeur  $C$  donnée, et à leur déplacement dans le temps. La pente de ces droites est donnée par la relation :  $V(c) = d_h / d_t$  avec  $V(c)$  vitesse de déplacement d'un plan de concentration constante ( $C$ ), par rapport à l'éprouvette. [7]

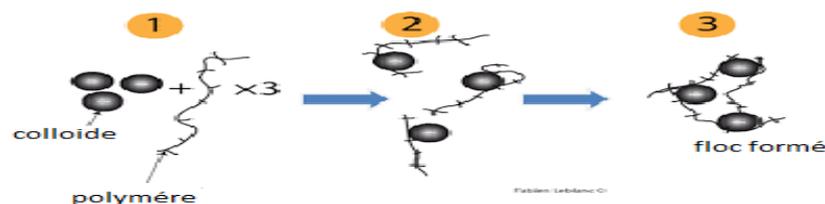


## II : Généralités sur la floculation

### II-1 Principe de floculation

La floculation est un phénomène physico-chimique menant à l'agrégation des particules stabilisées pour former des agrégats appelés floccs ; c'est un phénomène réversible c'est à dire que l'on peut casser les floccs si l'agitation est forte. Il a recours à des procédés de nature physique, mais plus souvent de nature chimique par ajout de réactifs minéraux ou polymères appelés flocculant. Les flocculants doivent être solubles dans l'eau, et se présentent généralement sous forme de poudre. Ils se différencient les uns des autres par leur masse molaire, mais surtout par le signe et le degré de leur ionicité en solution aqueuses.

Figure7 : la procédure de la floculation

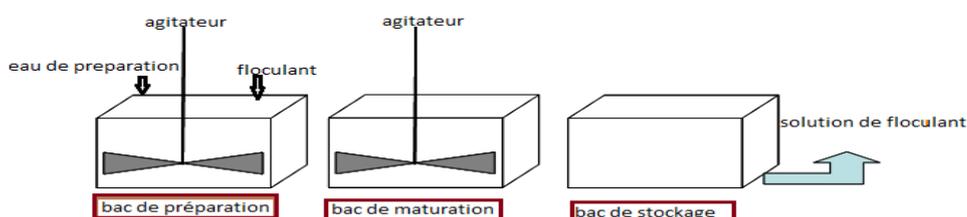


La station de floculation joue un rôle important dans le recyclage des eaux industrielles, par clarification et augmentation de vitesse de décantation des boues argileuses ; la formation des floccs favorise la sédimentation des particules dans un temps réduite.

### II-2 La station de floculation au sein de l'OCP

La station de floculation est composée de trois bacs : bac de préparation, bac de maturation et bac de stockage. [8]

Figure 8 : les composants de la station de floculation (Annexe 2)



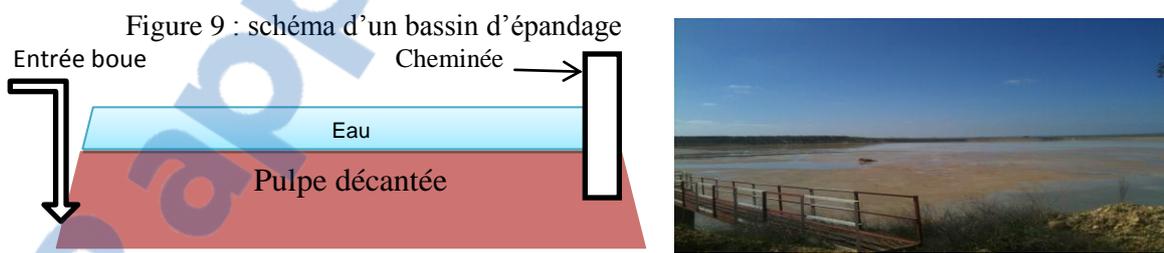
Bac de préparation	<ul style="list-style-type: none"><li>le bac de préparation reçoit l'eau régulée et le floculant.</li><li>la solution mère de 5g/l est diluée par agitation à vitesse lente provoqué par une hélice à 4 pales.</li><li>les ingrédients sont dosés par vice doseuse pour le réactif, par électrovanne et débitmètre pour l'eau.</li></ul>
Bac de maturation	<ul style="list-style-type: none"><li>la maturation se fait à un temps de séjour d'une heure.</li><li>sous l'effet de l'agitation la solution devient stable et plus homogène grâce à l'action d'un agitateur.</li><li>le passage d'un bac à un autre se fait par cloison syphoidale.</li></ul>
Bac de stockage	<ul style="list-style-type: none"><li>le bac de stockage est équipé d'un capteur de niveau qui assure un débit constant et protège la pompe.</li><li>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.</li></ul>

### III : Mode de gestion actuel des boues de soutirage

#### III-1 Le soutirage des boues

Les boues issues de décanteur sont collectée dans des cuves appelée bassins de stockage, puis pompés dans des conduites en acier de 400mm de diamètre vers les bassins d'épandage ou bien les digues avec un débit de 700m<sup>3</sup>/h.

Les bassins d'épandage comportent chacune des points d'alimentations en boue et des cheminées par laquelle se fait la récupération d'eau vers les bassins de stockage d'eau par gravité. La récupération d'eau de ces digues se fait par une sédimentation naturelle.



#### III-2 la situation actuel des bassins d'épandage

Dans la laverie de Youssoufia, il y'a dix bassins d'épandage dont huit sont déjà remplis et deux bassins sont en cours d'utilisation. Le volume, la surface ainsi la hauteur de chacun de ces bassins sont regroupés dans le tableau ci-dessous.



Tableau 2 : la situation actuelle des bassins d'épandage

Bassin des boues	Volume total (m3)	Hauteur initial à la construction (m)	Surface (m2)
1	950 000	7	135 714
2	1 000 000	7,95	125 786
3	1 300 000	8,09	160 792
4	1 550 000	10,05	154 229
5	1 500 000	10	150 000
6	580 000	10,87	53 382
7	3 319 735	9	368 859
8	3 332 931	9,33	357 227
9	486 687	10,72	45 400
10	630 733	10,57	59 672
Total	14 650 086		1 611 062

La surface totale de terre exploitée actuellement pour les bassins de stockage des boues est de **161 ha**, ce chiffre très alarmant, il nous oblige à la recherche d'une solution pour réduire la surface de terre exploitée pour la construction des bassins.

 La solution proposée actuellement est la consolidation des boues par floculation et sera l'un des objectifs de notre projet.

## IV : Généralités sur les plans d'expériences.

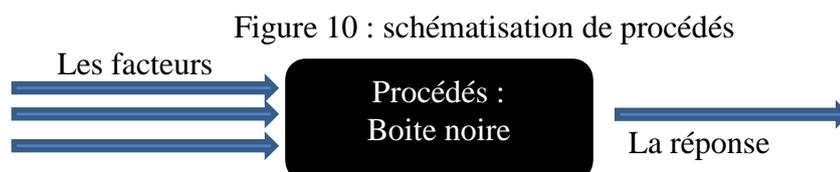
### IV-1 Définition

Les plans d'expériences sont des plans d'essai utilisés dans les différents domaines industriels.

Selon la norme ISO 3534-3 les plans d'expériences constituent une planification des expériences pour avoir des résultats solides et économiques.

### IV-2 Méthodologie

La méthodologie des plans d'expériences permet de relier, pour un procédé, les facteurs (ou paramètres d'entrée) à la réponse (paramètre de sortie) par un modèle mathématique.



La réalisation des plans d'expériences s'effectue par la classification de tous les facteurs qui peuvent avoir un effet sur la réponse. A chaque facteur on définit le domaine expérimental adéquat,



puis la réalisation d'une matrice d'expérimentation selon laquelle on effectue les expériences. La modélisation se fait par la recherche des formes d'influences des facteurs sur le phénomène étudié sous forme d'une équation mathématique qui décrit la variation de phénomène en fonction des facteurs influents. Après la recherche des facteurs influents et la modélisation via l'étape de l'optimisation dans laquelle on fait le réglage des conditions expérimentales pour avoir le meilleur résultat possible.



### IV-3 La réalisation des plans d'expérience

#### IV-3-1 Criblage

- Un plan de criblage permet de déterminer expérimentalement le poids de chaque facteur.
- Le criblage est réalisé avec une matrice expérimentale appelée Matrice d'HADAMARD.
- Le plan de criblage offre la possibilité d'estimer les effets moyens des facteurs par l'intermédiaire d'un modèle additif sans couplage.

#### IV-3-2 Les plans de surface de réponse

Les plans d'optimisations ou plans de surface de réponse permettent à partir d'un modèle mathématique polynomial de déterminer les valeurs des facteurs influents correspondant à une réponse particulière de système.

Le plan de surface de réponse permet aussi la recherche des niveaux optimaux des facteurs pour atteindre un niveau de réponse souhaité.

La matrice d'expérience de plan de surface de réponse peut être établie selon un domaine sphérique ou cubique

- Domaine sphérique : l'expérimentateur désire explorer la zone du plan autour de son centre défini comme point de référence.
- Domaine cubique : l'expérimentateur désire prévoir les variations de la variable de réponse pour des combinaisons du niveau extrême de réponse [9].

Il y'a plusieurs plans d'expérience par surface de réponse: plan de composite centré, plan de Box Benkhen; plan de Doehlert ; plan Hybride...

Le choix entre ces plans doit être adéquat au phénomène sujet d'étude et aux conditions expérimentales.

Dans notre projet on s'intéressera au plan de surface de : **BOX BENKHEN**.

#### IV-3-3 Les critères d'optimalités





1. La qualité de modèle : déterminée par l'étude de 2 coefficients qui sont :

Le coefficient de détermination :  $R^2 = \frac{SCE_L}{SCE_R} = 1 - \frac{SCE_L}{SCE_T}$  avec  $0 \leq R^2 \leq 1$

$SCE_L$  : la somme des carés des écart de liaison (ou de regression)

$SCE_R$  : la somme des carés des écart de résidu

$SCE_T$  : la somme des carés des écart totale

Le coefficient de détermination nous permet de savoir si le modèle est explicatif.

Le coefficient de détermination ajusté:  $R^2 = 1 - \frac{SCE_R/(n-p)}{SCE_T/(n-1)}$

avec n : nombre des essais ; P : nombre des coefficients

Le coefficient de détermination ajusté est une mesure de la garantie que le modèle est déterminé avec un nombre suffisant de données.

2. La validité de modèle mathématique : décrit par deux tests appelés ANOVA 1 et ANOVA 2.

ANOVA 1 : c'est une comparaison de la variance due à la régression avec la variance résiduelle qui se traduit par la recherche d'un lien significatif entre les variables et la réponse pour cela la valeur de p-value doit être inférieure à 5%.

ANOVA 2 : c'est une comparaison de l'erreur due au modèle ( $V_{LOF}$ ) avec l'erreur pur ( $V_{PE}$ ) ; la valeur de p-value doit être supérieur à 5%.

## V - L'écoulement fluide et simulation

### V-1 Introduction

L'étude d'écoulement des fluides dans les canalisations est dans notre cas, indispensable pour le choix des critères optimaux de fonctionnement. C'est pour cela nous avons utilisés pour l'étude d'écoulement de fluide (la simulation) transportant les boues de bassins tampon jusqu'au bassin d'épandage des calculateurs performant permettent la prédiction de transport fluide.

### V- 2 Les calculateurs d'écoulement fluide

Il existe plusieurs calculateurs qui permettent la simulation et la prédiction d'écoulement des fluides dans les canalisations. Dans notre projet on s'intéressera a deux logiciels appelés : GAMBIT et FLUENT.

#### V -2-1 Logiciel GAMBIT

GAMBIT est un logiciel permettant la réalisation des simulations en 2D et 3D en mécanique de fluide par la création des modèles d'études désirées (surface ou volume). La construction de maillage pour la simulation de la couche désirée puis la définition des conditions au limites du domaine (l'entrée et la sortie de fluide, la surface libre, les murs...) [10].

## V -2-2 Logiciel FLUENT

FLUENT est un code commercial très utilisés dans l'industrie. Il permet de résoudre les écoulements fluides (champs de vitesse, de température). La résolution avec FLUENT peut se faire à 2D comme à 3D par importation de maillage réalisée avec GAMBIT. La simulation est réalisée par la définition des caractéristiques de fluide et des conditions limites usuelles. [10]

## V- 3 Les caractéristiques d'un système de pompage

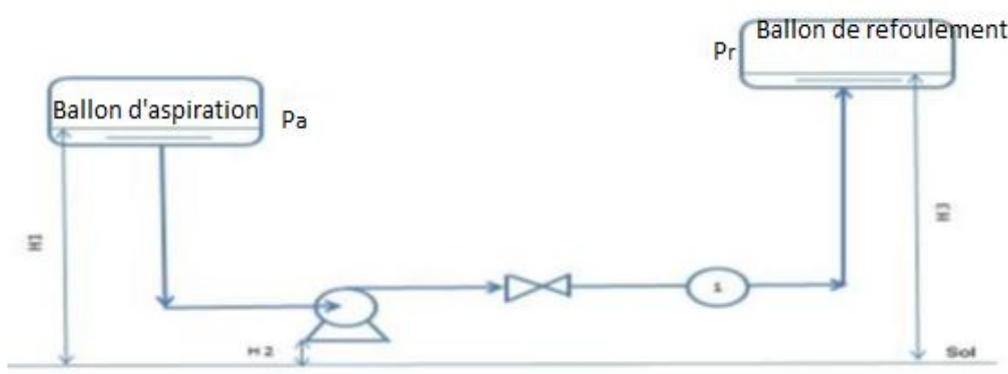
### V -3-1 Définition

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. On distingue principalement deux types de pompes : les pompes volumétriques et les pompes centrifuges.

➡ Les pompes centrifuges : 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 (en mètre de colonne d'eau (MCL)), de la vitesse de rotation de la roue et du diamètre de la roue (vitesse périphérique).

➡ Les pompes volumétriques : permettant le transfert d'un volume donné de liquide de consistance plus ou moins pâteuse, ou de gaz, depuis l'aspiration vers le refoulement. Parmi l'ensemble des types de pompes volumétriques pour liquides existant sur le marché, on peut distinguer : pompes rotatives ou alternatives [11].

Figure 11: Schéma d'implantation d'une pompe dans un circuit process



\* La pompe aspire le liquide du ballon A à une pression donnée ( $P_a$ ) pour ensuite la refouler dans le ballon B à une pression  $P_r$ .



\*Des équipements sont installés au refoulement de la pompe en plus de la vanne de régulation ; Ces équipements sont représentés par un cercle où "1" est inscrit.

### V -3-2 dimensionnement d'une pompe

Les pompes sont des machines qui réalisent l'écoulement d'un fluide dans un réseau en utilisant certaine énergie fournie par un moteur. Les caractéristiques de débit et de pression de la pompe déterminent une courbe de fonctionnement de pompe à comparer avec les pertes de charges et le dénivelé de réseau. La comparaison de la courbe de la pompe et de réseau permet de trouver un point de fonctionnement du système pompe réseau.

Les paramètres caractérisant le point de fonctionnement d'une pompe sont :

Le débit volumique ( $m^3/s$ ) ;

La hauteur d'aspiration et de refoulement ;

Les pertes de charges à l'aspiration et au refoulement (perte de charges régulier et singulier) ;

Le rendement de la pompe pour le calcul de consommation d'énergie et de force motrice ;

### **CHAPITRE III : PROBLEMATIQUE**

#### ***Etude de consolidation des boues de lavage et flottation des phosphate par floculation***

##### ***I - La consolidation des boues de lavage et réalisation d'un plan de criblage***

##### ***II - La modélisation de la consolidation des boues par application d'un plan de surface de réponse***

##### ***III - Etude cinétique de la récupération d'eau avec utilisation et son utilisation de flocculant***

##### ***IV - Extrapolation industrielle du procédé***

##### ***V - Evaluation économique du projet***

Figure 12 : Photographie d'un bassin d'épandage



##### **I - La consolidation des boues de lavage et réalisation d'un plan de criblage**

## I-1 Introduction

La première démarche utilisée pour étudier la consolidation des boues de lavage c'est la floculation. La réalisation et la planification des essais de floculation sont effectuées par application de la méthodologie des plans d'expérience, pour étudier les effets ou les paramètres qui influencent la réponse de notre étude (plan de criblage).

Dans ce chapitre nous allons exposer le mode opératoire de la consolidation des boues de lavage par floculation (matériels et méthode) puis nous allons présenter les plans de criblage réalisés afin de déterminer les effets des facteurs influents. A la fin de chapitre nous allons exposer les différents résultats obtenus avec les interprétations.

## I-2 La consolidation des boues de lavage par floculation

### I-2-1 Matériels

- Eprouvettes
- Balance analytique et balance de précision
- Plateau métallique
- Etuve
- Diviseur d'échantillon
- Bêchers
- Trémies (500 $\mu$ m et 600 $\mu$ m)
- Agitateur malaxeur
- Chronomètre

Figure 13 : dispositif expérimentale



### I-2-2 Méthode : réalisation d'un plan de criblage

#### ● phase 1 : calcul de taux de solide

Dans une éprouvette nous avons pris un litre de pulpe (boue humide), la masse de ce dernier est de 1240 g/l ; la pulpe est étalée dans un plateau métallique puis séchée dans un four de séchage à 100°C. Après séchage la masse de la boue devient égale à 372 g.

- Le calcul de taux de solide par la méthode expérimentale se fait comme suit :

$$\text{Taux de solide} = (M_{\text{solide}} / M_{\text{pulpe}}) * 100$$

A.N : Le taux de solide  $\approx (372/1240) * 100 = 30\%$

- Le calcul de taux de solide par la méthode théorique : (Annexe a)

$$\text{Taux de solide} = (M_s / M_p) * 100 = ((M_p - V_p) * 1.55 / M_p) * 100$$

Avec  $M_p$  : masse pulpe ;  $V_p$  : volume pulpe ;  $d_s$  : densité de solide et  $d_e$  : densité de l'eau

$$1,55 = d_s / (d_s - d_e) = 2.8 / 1.8$$



A.N : le taux de solide =  $((1240-1000)*1.55/1240)*100 = 30\%$

Donc le taux de solide avec laquelle on va travailler dans le plan expérimental et de 30%.

 Phase 2 : préparation de flocculant

Dans une balance analytique (de précision) nous avons pris une masse de 3g de flocculant. Ce dernier est mélangé avec un litre d'eau sous agitation puis laissé reposer pendant au moins une heure pour la maturation de mélange.

Le flocculant préparé est dilué a deux concentrations différentes : 0.4g/l et 1g/l afin de réaliser un plan de criblage selon la matrice d'HADAMARD. La méthode de préparation de flocculant dilué et comme suit :

1<sup>er</sup> Cas :  $C_f = 1g/l$

$$C_i V_i = C_f V_f \quad \text{avec} \quad C_i = 3g/l ; \quad C_f = 1g/l ; \quad V_f = 1 L$$

$V_i = 333.33 \text{ ml}$  : c'est le volume de flocculant pris de la solution de 3g/l.

Veau (ml) =  $1000 - 333.33 = 667.67 \text{ ml}$  : c'est le volume d'eau nécessaire pour obtenir une solution diluée à 1g/l.

2<sup>ème</sup> Cas :  $C_f = 0,4g/l$

$$C_i V_i = C_f V_f \quad \text{avec} \quad C_i = 3g/l ; \quad C_f = 0.4g/l ; \quad V_f = 1 L$$

$V_i = 133.33 \text{ mL}$  : c'est le volume de flocculant pris de la solution de 3g/l.

Veau (ml) =  $1000 - 133.33 = 866.67$  : c'est le volume d'eau nécessaire pour obtenir une solution diluée à 0,4g/l.

 Phase 3: Plan d'expériences (criblage).

Le plan de criblage nous permet de déterminer les effets des facteurs sur la réponse (le taux de récupération d'eau). Notre choix s'est porté sur l'étude de 5 paramètres :

- \* le temps d'agitation
- \* la consommation spécifique
- \* la concentration volumique
- \* le type d'agitation
- \* le dosage fractionnaire

Les niveaux (niveau bas et haut) de ces paramètres sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 3 : description des niveaux des facteurs de plan de criblage

	U1	U2	U3	U4	U5
nom	Temps d'agitation	consommation spécifique	concentration volumique	type d'agitation	dosage fractionnaire

Unité	Seconde	g/t de boue sèche	g/l	-	-
Niveau bas (-)	30	300	0,4	Malaxage	fractionnaire
Niveau haut(+)	120	500	1	Agitation forte	complet

Le plan d'expérience selon HADAMARD contient huit essais présentés dans le tableau 4.

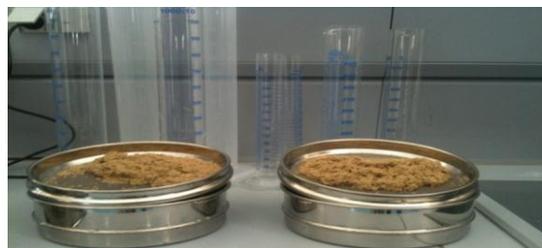
Tableau 4 : le plan d'expérience

N° d'Exp	Temps d'agitation	Consommation spécifique	Concentration volumique	Type d'agitation	Dosage fractionnaire
	Second	g/t	g/l		
1	120	500	1	malaxage	complete
2	30	500	1	Agitation forte	fractionnaire
3	30	300	1	Agitation forte	complete
4	120	300	0.4	Agitation forte	complete
5	30	500	0.4	malaxage	complete
6	120	300	1	malaxage	fractionnaire
7	120	500	0.4	Agitation forte	fractionnaire
8	30	300	0.4	malaxage	fractionnaire

**Note :**

La consolidation des boues de lavage est une méthode qui possède un autre nom technique: **le drainage « Dry stacking »**. Dans notre cas cette dernière demande 30 min comme temps suffisant pour avoir le maximum d'eau récupérée. (Annexe 3 : courbe présentant le volume d'eau récupérée au cours du temps).

Figure 14 : la méthode de drainage



Le tableau 5 présente le volume et le taux d'eau récupéré au cours du temps de drainage.

Tableau 5 : Le temps de drainage

temps (min)	Volume total de l'eau récupérée (ml)	Taux total récupéré
0	0	0,00



10	150	72,12
15	184	88,46
20	192	92,308
25	200	96,15
<b>30</b>	<b>206</b>	<b>99,04</b>
40	207	99,52
45	208	100
50	208	100

### I- 3 Résultats et interprétation

#### I-3-1 Résultats

##### **Plan de criblage 1 :**

- La réponse traitée dans ce projet est le taux de récupération d'eau(%). La méthode de calcul de ce dernier après le drainage est comme suit.

Exemple : volume d'eau récupéré = 208 ml

: volume de floculant injecté = 74 ml

: volume de boue humide = 400 ml

: masse volumique de la boue = 1.24g/l

$$\text{Taux de récupération d'eau} = V_f(\text{eau}) / V_i(\text{eau})$$

$V_f(\text{eau})$  = volume d'eau récupéré – le volume de floculant injecté

$V_f(\text{eau}) = 208 - 74 = 134$  ml donc  $m_f(\text{eau}) = 0.134$  (g)

$V_i(\text{eau}) = m_i(\text{eau})/\rho(\text{eau})$  donc on cherche  $m_i(\text{eau})$

$m_i(\text{eau})$  = le taux d'eau dans la pulpe \* masse volumique de pulpe \* volume de boue

$$m_i(\text{eau}) = (1-0.3) * 1.24 \text{ (g/l)} * 0.4 \text{ (l)} = 0.3472 \text{ (g)}$$

donc le % d'eau récupéré =  $m_f / m_i(\text{eau})$

$$\text{\% d'eau} = (0.134 / 0.3472) * 100 = 38.59\%$$

-d'une autre manière la méthode de calcul de taux de solide issue après le drainage est comme suit.

$$T_s = (M_s/M_p) * 100$$

$$T_s = ((M_p - V_p) * 1.55 / M_p) * 100$$

$M_p$  = (masse de boue humide \* volume de boue) + volume de floculant injecté – le volume d'eau récupéré.

$V_p$  = volume de boue + volume de floculant injecté – volume d'eau récupéré.

Exemple de calcul de taux de solide pour les mêmes données ci-dessus:

$$m_p = (1240 * 0.4) + 74 - 201 \quad ; \quad V_p = 400 + 74 - 201$$

$$m_p = 369 \text{ g} \quad ; \quad V_p = 273 \text{ ml}$$

$$T_s = (369 - 273) * 1.55 / 369 * 100 = 40.32\%$$



Le tableau ci-dessous présente les résultats du plan de criblage.

Tableau 6 : Plan d'expérimentation de plan de criblage 1

N° Exp	X1	X2	X3	X4	X5	V récupérée	Y=Taux de récupération d'eau
	s	g/t	g/l	-	-	ml	%
1	120	500	1	malaxage	Complet	208	38,59
2	30	500	1	Agitation forte	Fractionnaire	74	34,85
3	30	300	1	Agitation forte	Complete	45	16,7
4	120	300	0.4	Agitation forte	Complete	112	2
5	30	500	0.4	malaxage	Complete	186	25,06
6	120	300	1	malaxage	Fractionnaire	45	10,66
7	120	500	0.4	Agitation forte	Fractionnaire	186	23,9
8	30	300	0.4	malaxage	Fractionnaire	112	20,16

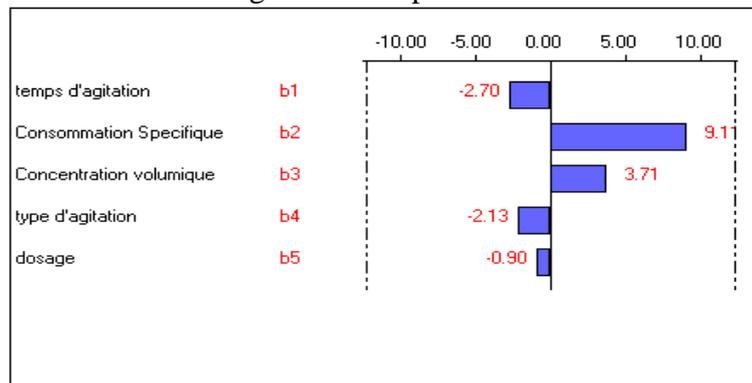
**X1** : temps d'agitation ; **X2** : consommation spécifique ; **X3** : concentration volumique ;  
**X4** : type d'agitation ; **X5** : type de dosage.

Après exécution du plan de criblage, nous avons analysé les données de ce plan.

### I-3-2 Analyse et interprétation des résultats

Les résultats de l'analyse sont comme suit :

Figure 15: Graphe des effets



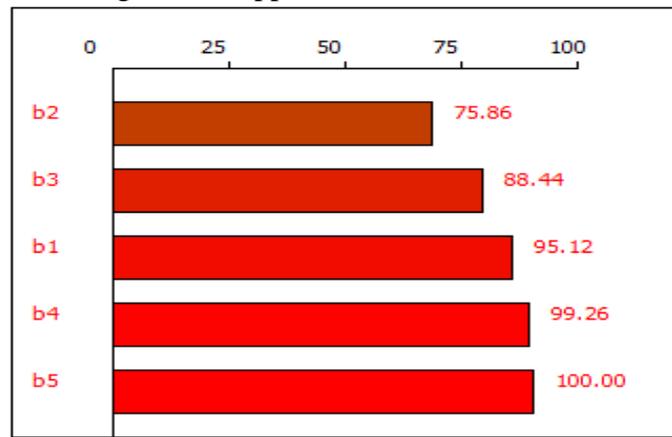
L'analyse des résultats mentionnés dans la figure 15 montre clairement que :

- ✚ la consommation spécifique à un effet positif très marquant sur le taux de récupération d'eau.
- ✚ La concentration volumique a un effet positif significatif sur la réponse.

L'analyse du diagramme de Pareto, figure ci-dessous, confirme les résultats précédents. En effet, ces deux paramètres contribuent sur ce procédé à hauteur de 88.44%.



Figure 16: Approche de Pareto cumulé 1



Nous remarquons que le paramètre type d'agitation n'a pas d'effet. Les responsables du projet souhaitent exploiter davantage ce paramètre. Nous avons estimé que peut être ce paramètre est sans influence dans ce domaine d'expérience ; ce qui nous poussé à proposer un autre plan de criblage avec d'autres réglages pour ce paramètre.

Pour cela nous allons faire un autre plan de criblage (plan de criblage 2) tout en gardant les mêmes niveaux des autres facteurs. Cependant nous allons changer le domaine de vitesse d'agitation ; nous allons travailler avec malaxage à faible vitesse dans le niveau bas et malaxage à grande vitesse dans le niveau haut.

### **Plan de criblage 2:**

Le nouveau plan de criblage est mentionné dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : Plan d'expérimentation de plan de criblage 2

N°Exp	X1	X2	X3	X4	X5	Taux de recuperation %
1	120	500	1	malaxage faible vitesse	complete	36.58
2	30	500	1	malaxage grande vitesse	fractionnaire	32.83
3	30	300	1	malaxage grande vitesse	complete	25.63
4	120	300	0.4	malaxage grande vitesse	complete	22.75
5	30	500	0.4	malaxage faible vitesse	complete	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

Figure 17 : Graphe des effets 2

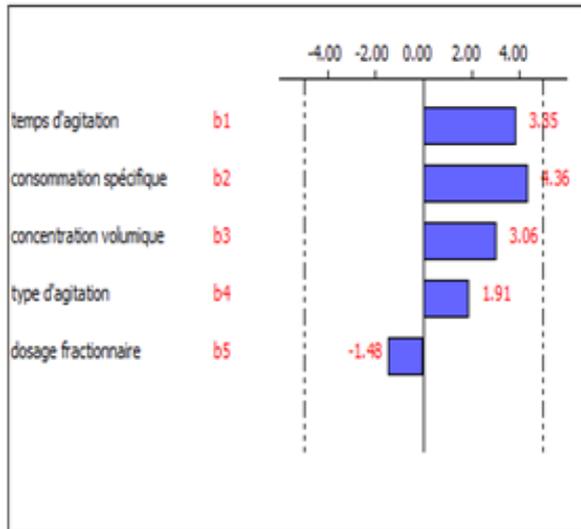
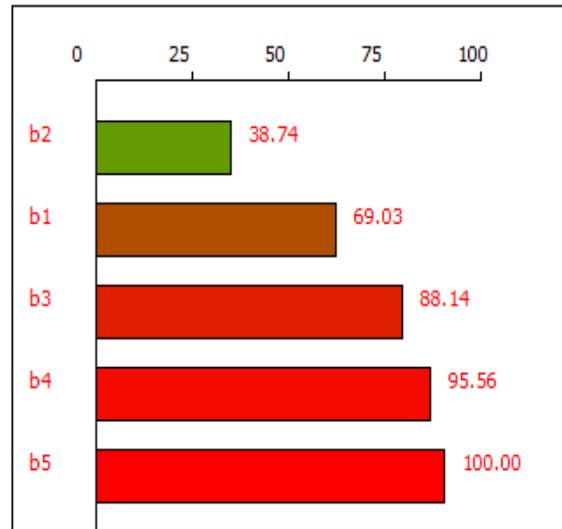


Figure 18: Approche de Pareto cumulé 2



Le travail dans un domaine de vitesse sous forme de malaxage a pu changer notre prise de décision concernant les facteurs influents ; donc et d'après la figure 17 on déduit que :

- ✚ Le temps d'agitation, la consommation spécifique et la concentration volumique ont l'effet le plus significatif et influencent positivement le taux de récupération d'eau.
- ✚ Le type d'agitation et le dosage fractionnaire ne présentent pas un effet significatif.

L'analyse de Pareto cumulé, présenté dans la figure 18, confirme ces résultats puisque ces trois paramètres (le temps d'agitation, la consommation spécifique et la concentration volumique) constituent **88.14%** de la variable de réponse.

### Note

Une maximisation de taux de récupération d'eau est réaliste avec les trois facteurs : le temps d'agitation, la consommation spécifique et la concentration volumique ; donc dans le plan d'optimisation qui sera sujet de chapitre suivant on va travailler avec ces trois facteurs tous en gardant les deux autres facteurs au niveau optimale c'est à dire le type d'agitation est malaxage à grande vitesse et le type d'injection de flocculant est fractionnaire.

## II - La modélisation de la consolidation des boues de lavage par application d'un plan de surface de réponse

### II-1 Introduction

Le plan de criblage traité dans le chapitre précédent nous a permis de faire une classification des facteurs selon leur effet sur la réponse (le taux de récupération d'eau). Dans ce chapitre nous



souhaitons trouver le bon réglage de ces paramètres et nous sommes intéressés à l'optimisation de la réponse par l'application des plans d'expériences pour les surfaces de réponse.

## II-2 Domaine expérimentale

### II-2-1 Le choix de modèle

Il y'a plusieurs plans d'expériences qui permettent de faire les essais, afin d'avoir les données pour déterminer un modèle quadratique. En particulier : dans notre projet notre choix s'est porté sur le plan de BOX BENKHEN.

### II-2-2 Le plan d'expérimentation

Afin d'optimiser les conditions opératoire du floculant ; nous avons produites un modèle de second degré qui s'écrit sous la forme :  $Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum \sum b_{ij} X_i X_j$ .

Afin de résoudre ce modèle, nous avons proposé un plan d'expérience, ci-dessous, afin d'organiser les essais pour avoir des données.

Tableau 8 : Plan d'expérimentation de Box Benkhen

N°Exp	temps d'agitation	consommation spécifique	concentration volumique
	s	g/t	g/l
1	30.0000	300.0000	0.7000
2	120.0000	300.0000	0.7000
3	30.0000	500.0000	0.7000
4	120.0000	500.0000	0.7000
5	30.0000	400.0000	0.4000
6	120.0000	400.0000	0.4000
7	30.0000	400.0000	1.0000
8	120.0000	400.0000	1.0000
9	75.0000	300.0000	0.4000
10	75.0000	500.0000	0.4000
11	75.0000	300.0000	1.0000
12	75.0000	500.0000	1.0000
13	75.0000	400.0000	0.7000
14	75.0000	400.0000	0.7000
15	75.0000	400.0000	0.7000
16	75.0000	400.0000	0.7000

## II-3 Résultats : critères d'optimalités d'un floculant

### II-3-1 Plan d'expérimentation

Le déroulement des essais d'un floculant que nous avons choisi comme exemple, pour étudier ces critères d'optimalités, se fait selon le plan d'expérimentation ci-dessous.



Tableau 9 : Plan d'expérimentation d'un flocculant

N°Exp	T.A	C.S	C.V	Y
	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	120.0000	500.0000	0.7000	48.96
5	30.0000	400.0000	0.4000	38.02
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

### II-3-2 Modèle mathématique

Après la réalisation des essais, nous avons procédé au traitement des données de ce plan de surface de réponse. Le modèle trouvé est :

$$Y_{T.R \text{ d'eau}} = b_0 + b_{t.a} * X_1 + b_{c.s} * X_2 + b_{c.v} * X_3 + b_{t.a-t.a} * (X_1 * X_1) + b_{c.s-c.s} * (X_2 * X_2) + b_{c.v-c.v} * (X_3 * X_3) + b_{t.a-c.s} * (X_1 * X_2) + b_{t.a-c.v} * (X_1 * X_3) + b_{c.s-c.v} * (X_2 * X_3)$$



$$\text{Taux de récupération d'eau} = 41.83 + 3.491 * X_1 + 4.716 * X_2 - 0.072 * X_3 + 2.485 * X_1^2 - 1.980 * X_2^2 - 2.628 * X_3^2 - 1.007 * X_1 * X_2 - 0.070 * X_1 * X_3 + 1.225 * X_2 * X_3$$

### II-3-3 La validation de réponse

L'analyse de ce type de plan passe par la validation du modèle mathématique postulé a priori.

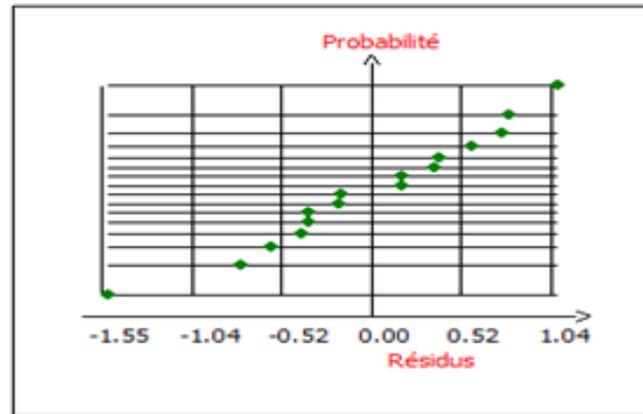
Les différents tests sont :

- Analyse de la normalité des résidus ;
- Analyse de la variance ANOVA ;
- Coefficient de détermination  $R^2$  ;
- Coefficient de détermination ajusté  $R^2_{ajs}$ .

#### Graphes des résidus

L'analyse du graphe des résidus, représenté dans la figure 19, montre que ces résidus sont distribués selon la loi normale puisque tous les points s'alignent sur la droite d'Henry.

Figure 19 : La normalité des données selon la droite d'Henry



### L'analyse de la variance

Tableau 10 : L'analyse de la variance

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Regression	353.5766	9	39.2863	35.0262	<b>0.0166</b>
Residues	6.7298	6	1.1216		
Validité	2.5137	3	0.8379	0.5962	<b>65.9</b>
Erreur	4.2161	3	1.4054		
Total	360.3064	15			

Les deux tests de l'analyse de la variance : ANOVA 1 et ANOVA 2 permettent de juger si le modèle est descriptif (ANOVA 1) et prédictif (ANOVA 2).

D'après les résultats mentionnés dans le tableau 13, les deux tests confirment la validité du modèle postulé à priori.

En conclusion nous pouvons considérer que le modèle est validé. Nous pouvons l'utiliser avec confiance pour la description et la prédiction du taux de récupération d'eau dans le domaine de l'étude.

### R<sup>2</sup> et R<sup>2</sup>ajs

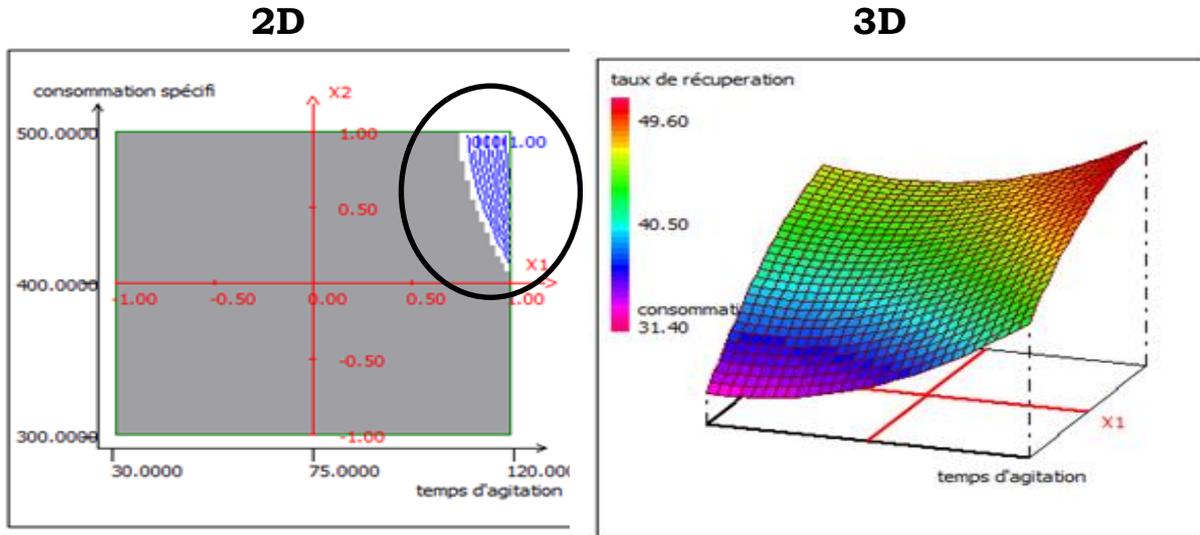
Tableau 11 : La qualité de modèle mathématique

<b>Ecart Type de la réponse</b>	1.059068
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.981</b>
<b>R<sup>2</sup>A</b>	<b>0.953</b>

La qualité de modèle mathématique est jugée par la valeur de coefficient de détermination qui doit être supérieure à 80% et la valeur de coefficient de détermination ajusté qui doit être supérieure à 70% (le coefficient de détermination est toujours supérieur à la valeur de coefficient de détermination ajusté), ce qui est éprouvé par le tableau ci-dessus.

➔ L'exploitation du modèle mathématique à priori ; livrer plusieurs solution comme le montre la figure 20.

Figure 20: Présentation graphique de l'optimum en 2D et 3D



#### II-4 comparaison des réponses des flocculants

Le flocculant efficace est celui qui a le taux de récupération d'eau ou bien le taux de solide le plus élevée après le drainage. Les résultats de différents flocculant que nous avons manipulés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 12 : La réponse de différentes flocculant

flocculant	T. R d'eau(%)	T.S (%)	flocculant	T.R d'eau(%)	T.S (%)
1	40,8	41,99	9	35,58	39,95
2	41,92	42,46	10	41,27	39,01
3	40,21	41,75	11	39,16	33,41
4	39,92	41,63	12	40,8	37,81
5	41,92	42,46	13	40,77	37,75
<b>6</b>	<b>49,61</b>	<b>45,97</b>	14	40,95	38,21
7	43,53	43,15	15	42,26	41,45
8	39,37	41,41	16	40,87	38

D'après les résultats mentionnés dans le tableau ci-dessus, on distingue que le flocculant 6 a le taux de récupération d'eau la plus élevée. Pour cela nous avons utilisés les critères d'optimalités de ce flocculant dans le chapitre suivant de notre étude.



### III - Etude de la cinétique de récupération d'eau avec utilisation et sans utilisation de flocculant

#### III-1 Introduction

Afin de démontrer l'effet de compression (l'effet de poids), dans les bassins de stockage des boues sur le taux de récupération d'eau nous sommes intéressés à faire l'étude cinétique de la sédimentation/consolidation des boues de lavage avec et sans flocculant. Pour cela nous avons utilisés deux éprouvettes de 1L pour les essais de la cinétique de sédimentation des boues. Ensuite, on compare le taux de récupération d'eau entre la sédimentation naturelle et la sédimentation avec utilisation de flocculant (la Consolidation).

#### III-2 l'essai de sédimentation

##### III-2-1 Expérience

Dans les deux éprouvettes nous avons utilisés le même volume de boue humide pour la comparaison de la cinétique de chute des particules. Le flocculant choisi est celui jugé meilleur (flocculant 6). Les résultats des critères d'optimalités de flocculant utilisés dans l'essai de sédimentation est regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 13 : Les critères de flocculant utilisés dans l'essai de sédimentation

<b>Temps d'agitation</b>	120 secondes
<b>Consommation spécifique</b>	<b>450 g/t</b>
<b>Concentration massique</b>	<b>0.73 g/l</b>

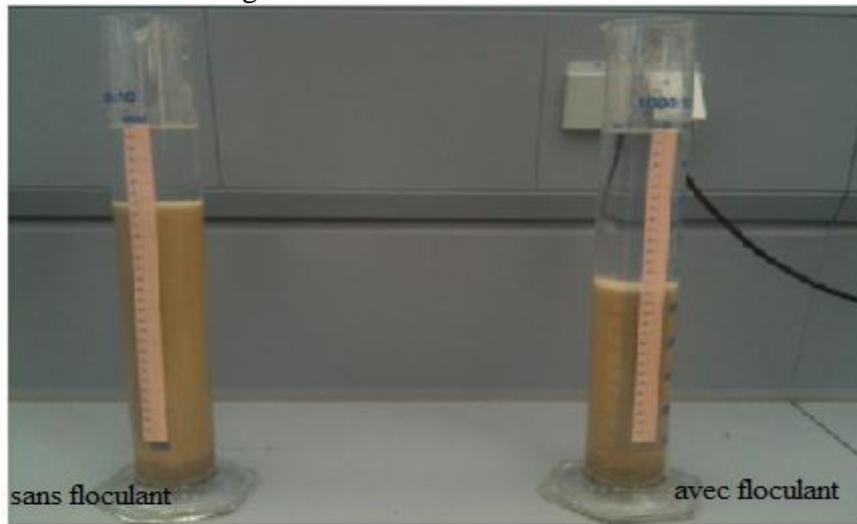
Le volume de la boue humide utilisé dans cet essai de sédimentation est calculé comme suit :

$$\begin{aligned}
 450 \text{ (g)} &\longrightarrow 10^6 \text{ (g)} && 450 \text{ g/t : la quantité de flocculant par tonne de boue sèche.} \\
 m_f &\longrightarrow (1240 \cdot 0.3 \cdot V_{\text{boue}}) \quad (1) && 1240 \text{ g/l : la masse volumique de la boue humide.} \\
 0.73 \text{ (g)} &\longrightarrow 1 \text{ (L)} && 30\% : \text{ le taux de solide.} \\
 m_f &\longrightarrow V_f = (1 - V_{\text{boue}}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

de (1) et (2) on conclue que :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{boue}} = 813 \text{ ml} \\ V_f = 1000 - 813 = 187 \text{ ml} \end{array} \right.$$

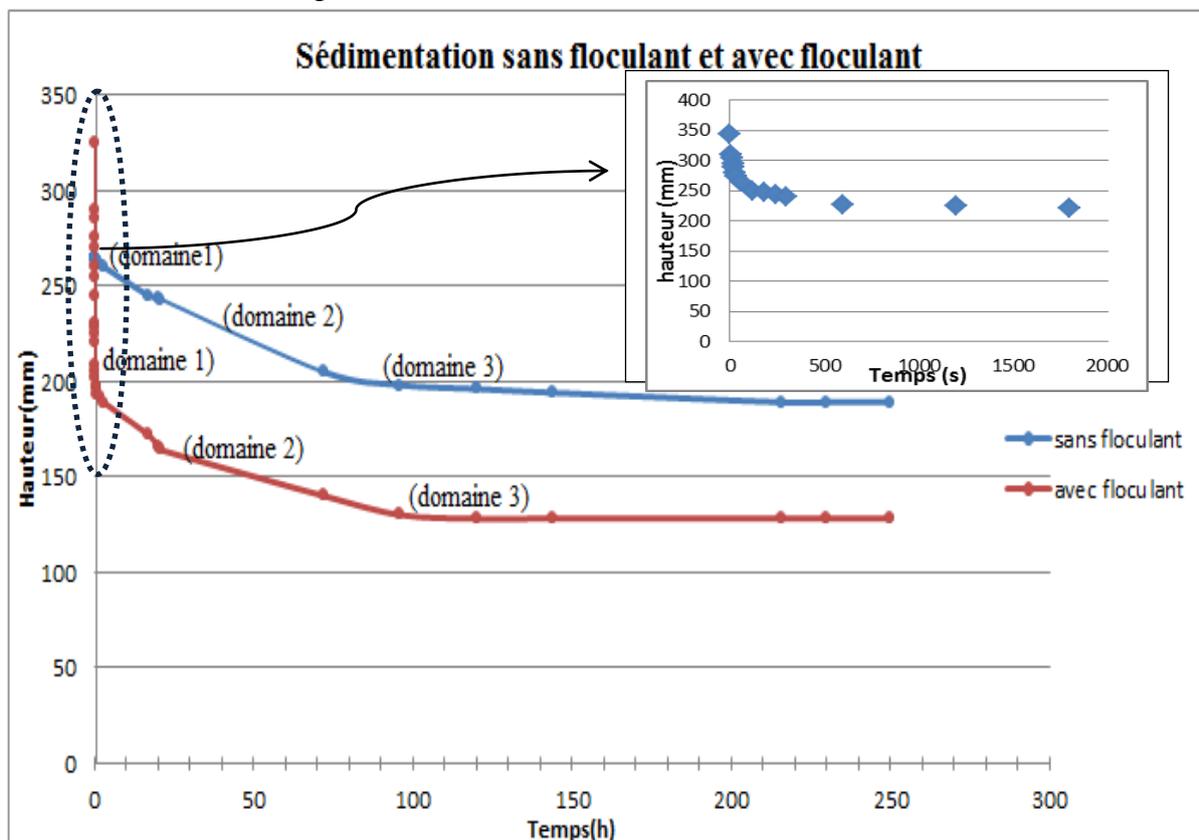
Figure 21 : Essai de sédimentation



### III-2-2 La courbe de sédimentation

L'allure de la courbe de sédimentation que nous avons réalisée est obtenue après un suivi de sédimentation pendant 10 jours. Les courbes présentant la sédimentation des particules avec et sans utilisation des flocculant est présentés dans la figure 22.

Figure 22 : L'allure de la courbe de sédimentation



D'après la figure ci-dessus il apparait que :



✚ La courbe obtenu sans floculant (courbe1) ayant une valeur initial de 265 mm, après 10 jours se trouve avec une valeur de 189 mm. Alors que la courbe obtenue avec floculant (courbe 2) passe d'une valeur de 325mm a 128 mm à la fin de l'essai.

La courbe de sédimentation dans les deux cas peut être divisée en trois domaines principaux qui sont :

- Domaine 1 : Phase de floculation caractérisée par l'agglomération des particules et la coalescence des flocons.
- Domaine 2 : Phase de sédimentation caractérisée par la chute des particules avec une vitesse quasi-constante vers le fond de l'éprouvette et apparition d'une surface entre la boue sédimentée et l'eau surnagent.
- Domaine 3 : Phase de consolidation ; caractérisée par le ralentissement de vitesse de chute du aux interactions entre les flocons.

Dans la courbe (2) en remarque que la consolidation est suivi par l'apparition d'une zone de compression due a la formation des pseudos réseau qui exercent une compression sur les couches inférieurs et le liquide contenu est évacuée à travers les vides crié.

Cette compression est attribuée à l'effet du poids que nous sommes estimés que sans effet sera plus important dans les bassins d'épandage.

### III-3 Résultats

#### 🌍 Le gain en volume d'eau

D'après les résultats de ces essais de sédimentation il apparait que le gain en volume d'eau espéré ( $V_f(\text{sans floculant}) - V_f(\text{avec floculant}) / V_f(\text{sans floculant})$ ) est de **32.27%**. Cela est considéré aussi comme gain en volume au niveau des bassins de stockage.

#### 🌍 La concentration finale de la boue

Selon la formule :  $C_i * V_i = C_f * V_f$  nous avons  $C_i * h_i = C_f * h_f$  puisque  $V = h * s$

Avec C : concentration ; V : volume ; h : la hauteur ; s : la surface

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Résultats de concentration finale d'essai de sédimentation

Essai	$C_i$ (g/l)	$h_i$ (mm)	$h_f$ (mm)	$C_f$ (g/l)
Sans floculant	372	265	189	<b>521.6</b>
Avec floculant	302.57	325	128	<b>768.24</b>



### ● taux de solide finale

Le taux de solide est calculé par la formule suivante :  $T_s = C_f / (1000 + (C_f/1.55))$ .(annexe b)

Donc selon la concentration en solide finale le taux de solide sera différent dans les 2 cas :

$$\text{Taux de solide : } \left\{ \begin{array}{l} T (\text{SANS FLOCCULANT}) = 39\% \\ T (\text{AVEC FLOCCULANT}) = 51.37\% \end{array} \right.$$

### Note :

Au niveau de l'éprouvette dont la boue est sédimentée naturellement ; la durée trop longue qui prend la boue pour sédimentée ou bien la vitesse de la récupération d'eau, favorise l'effet de l'évaporation dans les bassins de stockage, surtout dans les moins soleilleux. Alors que dans l'éprouvette, où la sédimentation est forcée par l'utilisation de flocculant, le volume important d'eau récupéré dans les premier moments de la sédimentation est prélevé rapidement par des cheminés au niveau des digues.



D'après Ces résultats, on peut conclure que la sédimentation en présence du flocculant, permet de récupérer un volume d'eau important et de réduire le volume de la boue à stocker ; ce qui permet de prolonger le durée de vie des bassins d'épandage.

## IV - Extrapolation industrielle du procédé

### IV-1 Dimensionnement des équipements

#### IV-1-1 La station de floculation

La préparation de flocculant au niveau de la station de floculation se base sur les critères d'optimalités de flocculant efficace (flocculant 6) que nous avons décrit dans le chapitre précédent.

Les points qui nous intéresse dans le dimensionnement de la station de floculation sont : la quantité de flocculant qu'on va injectée par heure ; le débit d'eau de dilution nécessaire pour la préparation de ce flocculant par heure et aussi le débit de flocculant préparée qui vas sortira de la station de floculation.



Le débit volumique de flocculant préparé:

$$\begin{array}{l} \text{Caractéristique} \\ \text{de flocculant} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} C.S = 450 \text{ g/t} \\ C.M = 0.8 \text{ g/l} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{caractéristique} \\ \text{de boue} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Débit} = 700 \text{ m}^3/\text{h} \\ C.M = 372 \text{ g/l} \end{array} \right.$$

Le débit massique de flocculant nécessaire pour traiter  $700 \text{ m}^3/\text{h}$  de boue :

$$\left. \begin{array}{l} 450 \text{ (g)} \longrightarrow 10^6 \text{ (g)} \\ Q_m \text{ (g/h)} \longrightarrow 700 * 372 * 10^3 \text{ (g/h)} \end{array} \right\} Q_m \text{ de flocculant} = 117.18 \text{ kg/h}$$



Donc le débit volumique de floculant sera :

$$\begin{array}{l} 0.8 * 10^{-3} \text{ (kg)} \longrightarrow 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)} \\ 117.18 \text{ (kg/h)} \longrightarrow Q_v \text{ (m}^3\text{/h)} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 0.8 * 10^{-3} \text{ (kg)} \\ 117.18 \text{ (kg/h)} \end{array}} \right\} Q_v \text{ de floculant préparé} = 146.5 \text{ m}^3\text{/h}$$



Le débit d'eau de dilution et de floculant :

La concentration initial de floculant est de 5g/l donc ;

$$\begin{array}{l} C_i = 5 \text{ (g/l)} \longrightarrow C_f = 0.8 \text{ (g/l)} \\ Q_{fi} \text{ (m}^3\text{/h)} \longrightarrow Q_{ff} = 146.5 \text{ (m}^3\text{/h)} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} C_i = 5 \text{ (g/l)} \\ Q_{fi} \text{ (m}^3\text{/h)} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{le débit initial de floculant sera :} \\ Q_{fi} = 24 \text{ m}^3\text{/h (sur dimensionnement)} \end{array}$$

Donc le débit d'eau de dilution sera :

$$Q_{e.d} = 146.5 - 24 = 123 \text{ m}^3\text{/h.}$$



La quantité de floculant nécessaires :

$$\begin{array}{l} \text{On a } 5 \text{ (g)} \longrightarrow 1 \text{ (L)} \\ q_f \longrightarrow 24 * 10^3 \text{ (L/h)} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 5 \text{ (g)} \\ q_f \end{array}} \right\} \text{quantité de } f = 120000 \text{ g/h}$$

Donc la quantité de floculant poudre nécessaires pour traiter 700m<sup>3</sup>/h de boue est de **120kg/h.**

#### IV-1-2 Les pompes

Dans le dimensionnement des pompes, c'était intéressant à étudier quatre caractéristiques qui sont : le débit, la hauteur manométrique totale, les pertes de charge et la puissance électrique pour trois type de pompe qui sont :



**P1** : La pompe d'eau douce de préparation de floculant



**P2** : la pompe de floculant préparée à 5g/l



**P3** : la pompe d'eau de dilution.

#### IV-1-2-1 les pertes de charge

La formule générale de calcul des pertes de charge est définie comme le suivant :

$$\Delta P = \Lambda * L/D * V_m^2/2g$$

Avec L : longueur de conduite

D : diamètre de conduite

V<sub>m</sub> : la vitesse moyenne d'écoulement

Λ: le facteur de perte de charge dépende de type d'écoulement, d'où la nécessité de définir le type d'écoulement dans la conduite, par le calcul d'un nombre caractérisant le régime d'écoulement appelé nombre de Reynolds (Re) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Re} = \rho * V * d / \mu \text{ avec} \\ V = Q / s \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \rho : \text{la masse volumique d'eau (kg/m}^3\text{)} \\ Q : \text{le débit volumique (m}^3\text{/s)} \\ s : \text{la surface de conduite } (\pi * r^2) ; r = d/2 \\ d : \text{diamètre de conduite (m)} \end{array}$$





$\mu$  : la viscosité cinématique (kg/m.s)

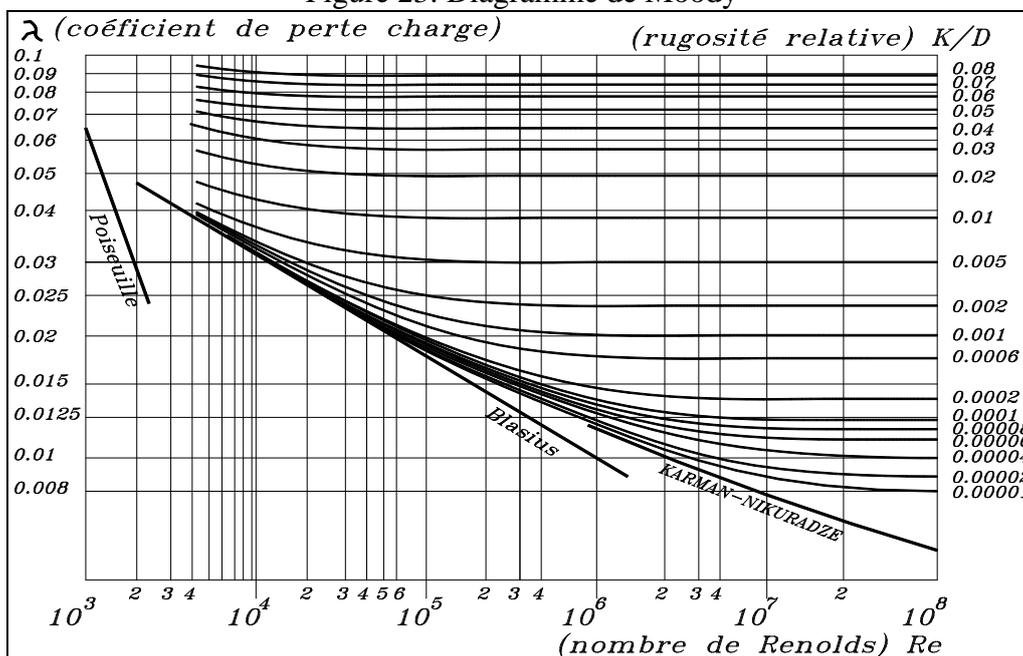
A.N  $V = (24 \cdot 4) / (\pi \cdot (125 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3600) = 0.54 \text{ m/s}$  (dans le cas de pompe P1)

$Re = (1000 \cdot 0.54 \cdot 125 \cdot 10^{-3}) / 0.001003 = 67298$

$67298 > 10^4$  donc le régime d'écoulement est turbulent

$\Lambda = f(Re ; K/D)$  avec D c'est le diamètre de conduite et K c'est la rugosité relative au type de tube ; dans notre cas nous avons utilisé le tube acier soudé neuf qui possède un nombre de rugosité de 0.15mm.

Figure 23: Diagramme de Moody



★ D'après la figure ci-dessus il apparait que le coefficient de perte de charge dans notre cas sera :

$\Lambda = f(Re ; K/D) = (67298 ; 0.0012) = 0.024.$

★ La formule  $\Delta P_1 = \Lambda \cdot L/D \cdot V_m^2/2g$  permet de calculer les pertes de charge due au frottement seulement. Si on compte la hauteur de conduite, on doit définir un autre terme de perte de charge qui due aux parties verticales ( $\Delta P_2$ ).

$\Delta P_2 = \rho \cdot g \cdot h$  avec L et h sont successivement la longueur et la hauteur d'aspiration ou de refoulement de conduite.

Résultats :

$\Delta P_{\text{linéaire}} = \Delta P_1 + \Delta P_2$



Dans notre calcul nous avons estimés que les pertes de charges singulier due au frottement de fluide dans les conduites (vannes ; des coudes...) est de l'ordre de 20% ; donc les pertes de charges totale sera :  $\Delta P_{\text{totale}} = \Delta P_{\text{linéaire}}(1 + 0.2)$

Les données relatives aux trois pompes sont présentées comme suit :

Tableau 15 : Données relatives aux pompes

Pompe	Type	$L_{\text{asp}}$	$L_{\text{ref}}$	$h_{\text{asp}}$	$h_{\text{ref}}$	D	$\mu_{\text{eau}}$
Unité		(m)	(m)	(m)	(m)	(mm)	(mpas/s)
P1	centrifuge	2	3	0,75	0,75	125	1,003
P2	volumétrique	0,5	3	0,85	0,85	125	1,003
P3	centrifuge	4	1000	8	8	125	1,003

Avec : L : longueur d'aspiration et de refoulement ; h : hauteur d'aspiration ou de refoulement  
D : diamètre de conduite ;  $\mu_{\text{eau}}$  : viscosité cinématique d'eau.

Les pertes de charges des trois pompes est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 16 : Résultats des pertes de charge

Pompe	P1	P2	P3
<b>Débit (<math>\text{m}^3/\text{h}</math>)</b>	24	24	123
$\Delta P_{\text{asp}}$ (bar)	0.07370	0.08303	0.80693
$\Delta P_{\text{ref}}$ (bar)	0.07399	0.08374	7.49015
$\Delta P_{\text{linéaire}}$ (bar)	0.148	0.167	8.3
$\Delta P_{\text{totale}}$ (bar)	<b>0.177</b>	<b>0.2</b>	<b>10</b>

#### IV-1-2-2 la hauteur manométrique totale

Le dimensionnement d'une pompe repose sur le calcul d'un facteur, qui caractérise le fonctionnement de la pompe indépendamment du fluide pompé. Ce facteur est nommé la hauteur manométrique totale (HMT), exprimé en hauteur de fluide pour un mètre de colonne de liquide (mCL).

L'équation de Bernoulli généralisée qui exprime la HMT s'écrit sous la forme:

$$\text{HMT} = (P_B - P_A) / \rho g + Z_B - Z_A + (V_B^2 - V_A^2) / 2g + \Delta P_{\text{totale}}$$

#### Données :

- Dans notre cas le point A constitue l'aspiration et le point B constitue le refoulement
- Pompe 1 : les pressions  $P_A$  et  $P_B$  sont des pressions atmosphériques.
- Pompe 2 :  $P_A$  est une pression atmosphérique et  $P_B$  c'est une pression refoulement de la pompe 3



- Pompe 3 :  $P_A$  est une pression atmosphérique et  $P_B$  c'est la pression de refoulement calculé comme suit :

$$P_{ref} = P_S + P_D + J_{ref} = \rho * g * h_{ref} + \rho/2 * V_{ref}^2 + J_{ref} \text{ (pas)}$$

A.N

$$P_{ref} = 1000 * 9.81 * 8 + (1000/2) * (12)^2 + (7.5 * 10^5) = 9 \text{ bar.}$$

Donc d'après ces résultats et d'après les données du tableau 15 les résultats des HMT des trois pompes seront comme suit.

Tableau 17 : Résultats des HMT des pompes

Pompe	P1	P2	P3
HMT (MCL)	3.2	83.7	202.9
HMT (bar)	0.32	8.37	20.29

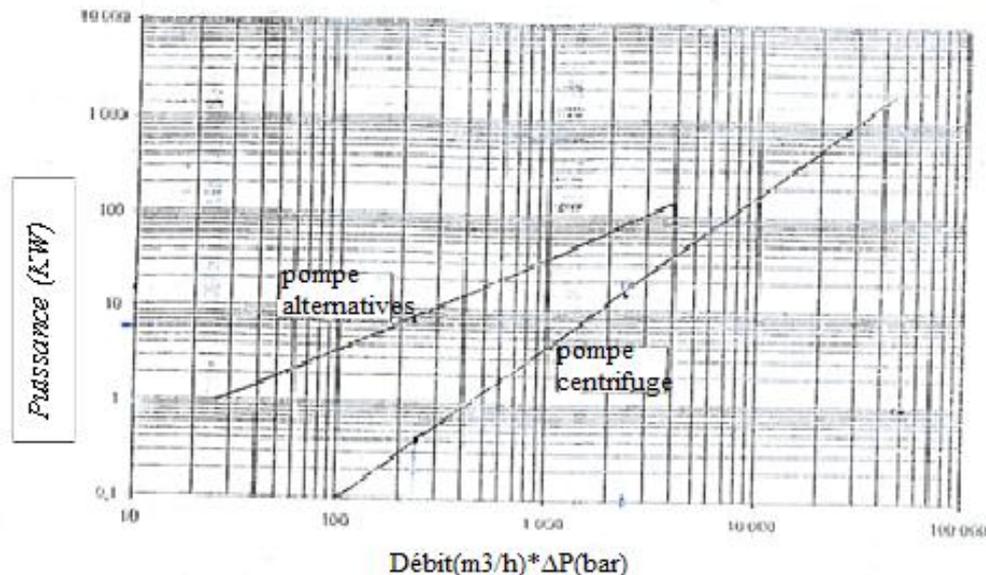
#### IV-1-2-3 la puissance hydraulique des pompes

D'après la figure ci-dessous qui présente la puissance des pompes en fonction de débit multiplié la HMT on a pu obtenir les résultats présentés dans le tableau suivant :

Tableau 18 : Résultats des puissances hydraulique des pompes

Pompe	P1	P2	P3
Puissance nécessaire	0.1 KW	8 KW	16 KW

Figure 24 : Estimation des puissances hydrauliques des pompes [12]



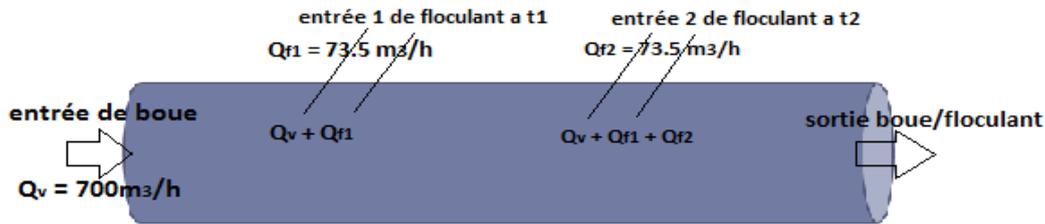
## IV-2 L'injection de flocculant

### IV-2-1 Les points d'injection de flocculant

Le calcul des points d'injections de flocculant dans une conduite de longueur L se fait à partir de la formule suivante :  $Q_v = v / t = L * s / t$

Avec v et s : volume et surface de conduite ; t : temps de mélange boue/flocculant

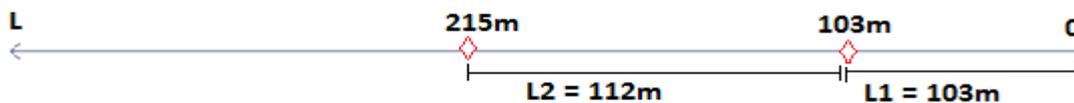
Figure 25: Schématisation de conduite



D'après les données de cette figure et pour un temps de mélange de 120s avec un diamètre de conduite veut 0.4m on a pu obtenir les résultats suivantes :

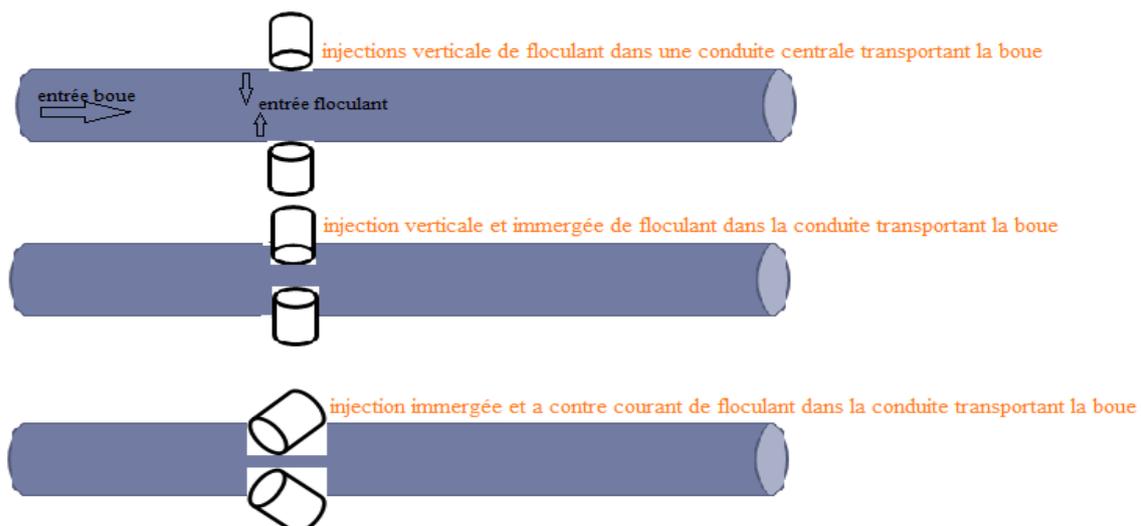
$$L_2 = t_2 * (Q_v + Q_{f1} + Q_{f2}) / s \quad \text{et} \quad L_1 = t_1 * (Q_v + Q_{f1}) / s$$

Tout calculé fait on obtient les résultats suivantes :



#### IV-2-2 la simulation d'injection de flocculant

Dans les chapitres précédents, les critères de flocculant optimum ont été déterminé pour l'optimisation du taux de récupération d'eau dans les digues. Pour assurer un bon mélange boue/flocculant, il est nécessaire de déterminer la méthode d'injections de flocculant dans les conduites. La simulation de logiciel FLUENT permet de choisir la méthode correcte et efficace d'injections de flocculant dans les conduites, parmi les trois possibilités suivantes :



✚ Avant de faire la simulation sur fluent nous avons utilisés le logiciel gambit pour tout

d'abord crée la géométrie de conduite, de faire le maillage régulier pour que la solution soit correcte et puis de définir les conditions au limites c'est à dire les entrés (velocity inlet) qui sont la boue et le floculant et la sortie (outflow) : boue/floculant (plus de détails, annexe 4).

✚ Pour la définition des conditions au limites nous avons opté à calculer la vitesse d'entrée de boue ( $V_b$ ).

$$V_b = Q / s = Q / \pi * r^2 = Q / \pi * (d/2)^2$$

$$V_b = 700 * 4 / \pi * (0.4)^2 * 3600 = 1.55 \text{ m/s}$$

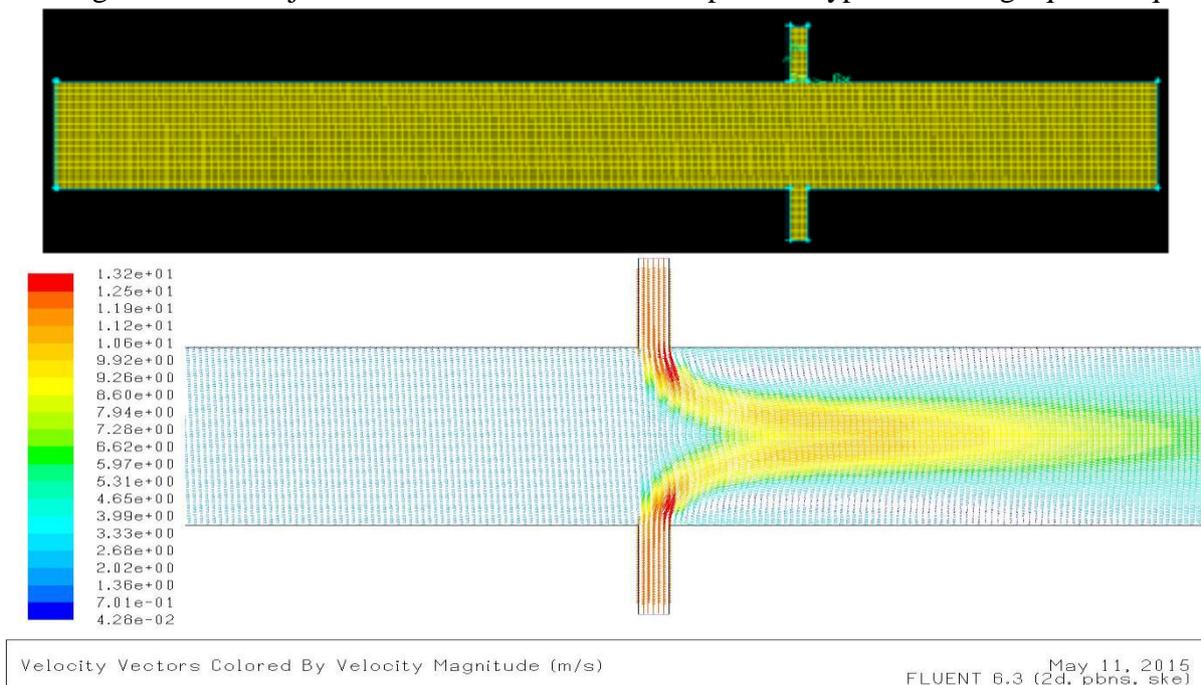
✚ Nous avons pris comme vitesse estimatif d'injections de floculant **12 m/s** est cela pour les 3 configurations possible pour que la comparaison soit juste. La vitesse d'injections de floculant est supérieur à celle de la boue car la turbulence crée dans les conduites lors de l'injections de floculant exige une vitesse d'entrée de floculant grande et nous avons déjà éprouvé dans la partie perte de charge la présence d'un régime turbulent au niveau des conduites par le calcul de nombre de Reynolds.

✚ Après le transfert de maillage de gambit vers fluent on définit le modèle de calcul de la turbulence (k-epsilon) ; les champs de vitesse (velocity-magnitude) et le nombre d'itérations.

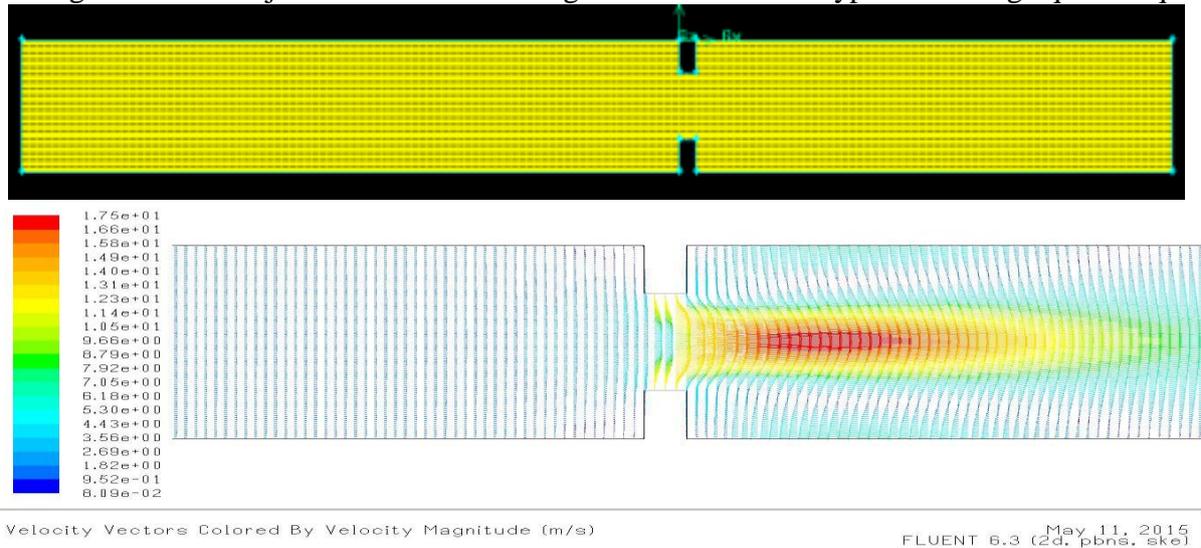
Résultats : les résultats des trois configurations sont présents dans la figure ci-dessous

Figure 26 : résultats de simulation de trois configurations obtenues par l'outil Fluent + Gambit

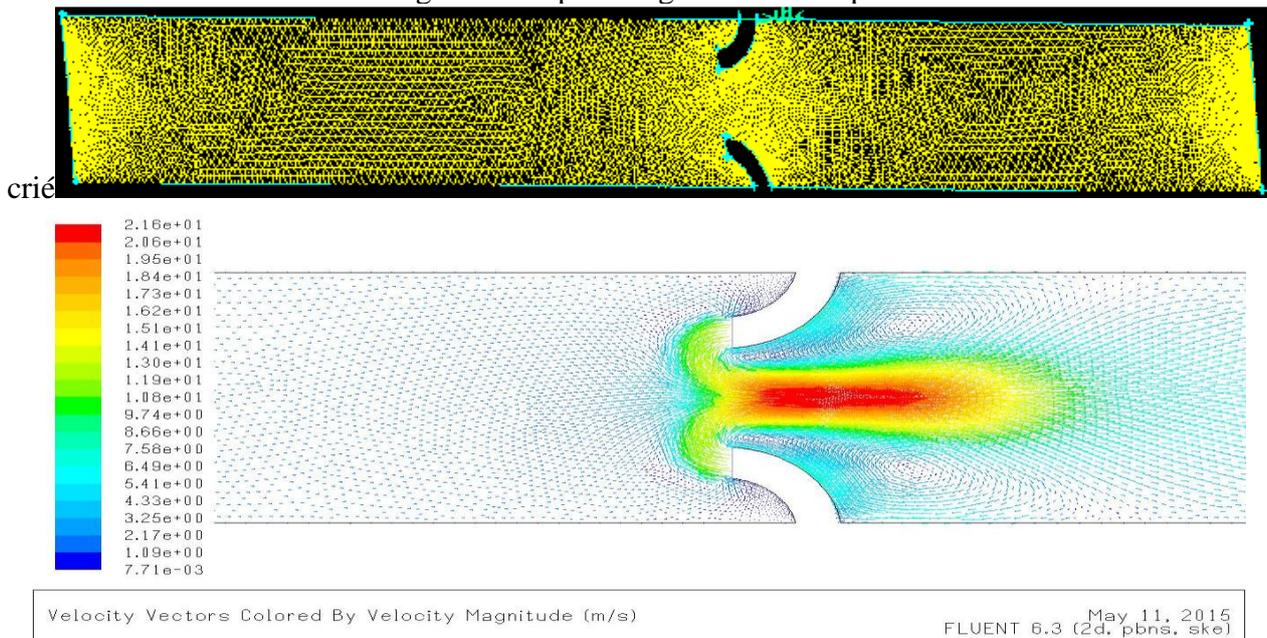
Configuration n1 : injections vertical de floculant adapté à un type de maillage quadratique



Configuration n2 : injections vertical immergé de flocculant a un type de maillage quadratique



Configuration n3 : injections immergé à contre-courant de flocculant a un type de maillage triangulaire adapté à la géométrie complexe



D'après la figure ci-dessus il apparait que la configuration de test immergé à contre-courant est la plus efficace ; car cette structure engendre plus de turbulence au niveau des points d'injections de flocculant et cela se traduit par la visualisation de changement de vecteurs vitesse au niveau de chaque test. Donc la structure d'injections à contre-courant est celle qui donne une meilleure qualité d'agitation, en comparaison avec les autres configurations et donc celle qui assure un bon mélange boue-flocculant.



## V : Evaluation économique du projet

### V-1 Introduction

Après avoir présenté dans les chapitres précédents la problématique et la solution envisagée et afin de mettre notre projet sous une voie réelle nous avons intéressés dans cette dernière partie de notre rapport de faire une étude économique estimée du projet. Pour cela la présentation de quelques notions économiques est intéressent dans cette étude ; puis nous allons faire une estimation de la valeur actuelle nette (VAN) de projet par voix de deux scénarios différents.

### V-2 Estimation de capital du projet

La méthode de Peters-Timmerhaus présente une estimation des coûts indirectes du projet qui comprend les équipements et autres pour 3 types d'écoulements.

Tableau 19 : Les facteurs de méthode Peters-Timmerhaus

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

➤ Dans notre cas, puisque notre procédé est à base solide-fluide, on compte tous les coefficients correspondants dans la colonne sauf celle octroyé à l'achat du terrain, car le projet s'effectuera sur un terrain déjà existant.

La formule décrivant le capital totale est :  $C_{total} = \text{coefficient estimatif} * \text{Capital amortissable}$

Avec :

Le coefficient estimatif = la somme de tous les facteurs décrit dans le tableau ci-dessus

Le capital amortissable = la somme de prix des pompes et de la station de floculation.



➤ Le calcul du capital total s'effectue par deux études différentes (2 scénario) afin de mettre en place une comparaison estimative des résultats et prendre une décision adéquate.

\*Scénario 1 : dans cette étude le capital total est calculé pour une station de floculation actuelle au niveau des laveries de l'OCP. Cette station prépare le floculant à 5 g/l

\*Scénario 2 : dans cette étude le capital total est calculé pour une station de floculation spécifique et de nouvelle technologie pour une concentration de 15 g/l.

➤ Le calcul de capital amortissable se fait en intégrant le prix de la pompe de floculant préparé avec le prix de la station de floculation.

Tableau 20: Estimation de capital total du projet

	Prix des pompes	Prix de station de floculation	Coefficient estimatif	Capital amortissable	Capital total
Scénario 1		6 000 000 DH		6778933 DH	<b>27.59 MDH</b>
Scénario 2	778933 DH	2 400 000 DH	4.07	3178933 DH	<b>12.94 MDH</b>

### V-3 les charges d'exploitation

Les charges d'exploitation sont les dépenses de projet qui compte la matière première et les consommations externes lié au besoin en énergie, au frais de personnel et autres.

Hypothèse de simulation {  
taux d'utilisation : 95%  
taux de disponibilité : 90%.

- Charge lié à la consommation de floculant : la quantité de floculant nécessaire en t/an

$Q_{\text{floculant}} = 120 * 24 * 365 * 0.95 * 0.90 = 898.776 \text{ tan/an}$  Le prix d'un ton de floculant est de 25000 DH donc

**La consommation de floculant =  $898.776 * 25000 = 22.47 \text{ MDH}$**

• Charge lié à la consommation énergétique : la puissance estimé de la station de floculation est de 9.435 KW et celle des pompes 1 et 3 est déjà présentée dans le tableau n° 18 alors que le prix de pompe 2 est incluse dans la station de floculation.

$E = (0.1 + 16 + 9.435) * 24 * 312 = 191206.08 \text{ KWh/an}$  avec prix 1KWh = 0.8374DH

**La consommation énergétique E = 0.16 MDH/an**

○ Charge lié au prix de main d'ouvre : trois agent de maitrise sont suffisante pour le suivi des travaux au sein de la station de floculation donc ;

**La charge de personelle =  $3 * 10000 * 12 = 360000 \text{ DH} = 0.36 \text{ MDH}$**

Donc le coût opératoire sera la somme de toutes les charges d'exploitation:

**Charge d'exploitation =  $22.47 + 0.16 + 0.36 = 22.99 \text{ MDH}$ .**



## V-4 les recettes totales du projet

Les recettes totales du projet sont les gains espérés en volume d'eau récupérée au sein des bassins de stockage obtenu par le lien d'optimisation des plans d'expérience et le gain en volume de stockage des boues obtenu par l'essai de sédimentation. Le tableau suivant résume les résultats du gain total estimé de ce projet.

Tableau 21 : Les recettes totales du projet

Recettes totale					<b>15.99 MDH</b>
<b>Gain en volume d'eau récupérée</b>	$Q_{v \text{ eau}}$	$Q_{v \text{ eau}}$	% de gain	Prix de m <sup>3</sup> d'eau	Gain annuelle
	(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /an)	%	DH	(MDH)
	607.6	4550802.48	18	3.89	<b>3.19</b>
<b>Gain en volume de stockage des boues</b>	Prix d'achat d'une digue		% de gain	Gain pour 10 ans	Gain annuelle
	MDH pour 10 ans		%	MDH	(MDH)
	400		32	128	<b>12.8</b>

## V-5 tableau de bord

### V-5-1 Tableau de bord de scénario 1

Le tableau de bord du scénario 1 est réalisé par le lien des hypothèses suivantes :

- \* La durée du projet est égale à la période d'amortissement, dans notre cas 10 ans
- \* Le taux d'actualisation est constant et égal à 10 %.
- \* 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 ( $FF=0$ )

MDH/Année	An0	An1	An2	An3	An4	An5	An6	An7	An8	An9	An10
Recettes totales		15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99
Investissement	31.73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Charges d'exploitation	0	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99
Fond de relouement	1.02										
Amortissement	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Charges financières	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
flux de liquidité	-32.75	-6.32	-6.32	-6.32	-6.32	-6.32	-6.32	-6.32	-6.32	-6.32	-6.32
Flux nets de liquidité actualisés	-32.75	-5.75	-5.22	-4.75	-4.32	-3.92	-3.57	-3.24	-2.95	-2.68	-2.44
Flux nets de liquidité cumulés actualisés	-32.75	-38.49	-43.72	-48.47	-52.78	-56.71	-60.28	-63.52	-66.47	-69.15	-71.59



**Note :**

- L'investissement du projet n'est que :

$$I = (\text{le capital amortissable} + \text{le fond de roulement}) * 4.07$$

➤ Pour estimer le fond de roulement qui présente les dépenses qu'il faut engager pour assurer le démarrage et le fonctionnement de l'activité de production ; nous avons pris un pourcentage de l'ordre de 15% du capital amortissable.

➤ L'amortissement qui décrit la dépréciation des équipements au cours du temps ; c'est le capital amortissable divisé sur 10 ans.

➤ Le flux de liquidité ou le cash flux c'est la trésorerie générée chaque année par un investissement est calculé par la formule suivante :

$$CF_p = (V_p - D_p) * (1 - a) + A_p - FF_p - I_p$$

Avec :

$V_p$  &  $D_p$  : les recettes et les dépenses de l'année P.

$A_p$  : dotation pour provision aux amortissements de l'année P.

$FF_p$  &  $I_p$  : le frais financier et l'investissement de l'année P

Dans notre cas les frais financiers et l'investissement est supposée nuls tout au long de 10 ans.

- Calcul de la VAN

L'estimation de la valeur actuelle nette (VAN) ou du bénéfice actualisé se fait par le lien de la formule suivante :



$$VAN = - (I + f_d) + (v_r + f_d) / (1 + i)^n + \sum_1^{n-1} CF_p / (1 + i)^p$$

D'après les résultats de tableau de bord ; la VAN du scénario 1 est de **-71.59MDH**

**V-5-2 Tableau de bord de scénario 2**

Le tableau de bord de scénario 2 proposé pour ce projet est comme suit :

MDH/Année	An0	An1	An2	An3	An4	An5	An6	An7	An8	An9	An10
Recettes totales		15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99	15.99
Investissement	14.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Charges d'exploitation	0	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99	22.99
Fond de roulement	0.48										
Amortissement	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32





Charges financières	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
flux de liquidité	-15.35	-6.68	-6.68	-6.68	-6.68	-6.68	-6.68	-6.68	-6.68	-6.68	-6.68
Flux nets de liquidité actualisés	-15.35	-6.07	-5.52	-5.02	-4.56	-4.15	-3.77	-3.43	-3.12	-2.83	-2.58
Flux nets de liquidité cumulés actualisés	-15.35	-21.43	-26.95	-31.97	-36.54	-40.69	-44.46	-47.89	-51	-53.84	-56.41

Les calculs étaient faits on utilisant les mêmes formules exploités dans le scénario 1.

La valeur actuelle nette de ce scénario est de **-56.41MDH**.

### V-6 Conclusion et recommandation

Les deux scénarios emmène vers un résultat déficitaire ; le premier scénario présente une valeur actuelle nette négative estimé à 71.59MDH et dans le même sens le 2 éme scénario présente une perte de 51.41MDH ; donc veut mieux pour régler cette situation d'appliquer les recommandations suivantes :

- Ajouter d'autres données pour la réalisation d'études économiques de ce projet et cela par exploitations d'autres zones de recherche et d'informations
- la charge de floculant constitue la dépense la plus couteuse donc sera très important à long terme de constituer une unité attachées à l'OCP qui charge de la fabrication et de la commercialisation de ce réactif.
- L'application de procédé de floculation pour la récupération d'eau au sein des bassins de stockage sera encore très bénéficiaire s'il aura installation des machines sous forme des racleurs au sein des digues afin de faciliter l'opération de séparation solide liquide ; cette technique permettre de minimiser le temps de récupération d'eau et de réduire les perte d'eau par évaporation.
- Une étude de profile granulométrique et chimique des boues stockés peut nous rendre sur un autre projet pour laquelle en fait non pas seulement la gestion des boues mais aussi leur valorisation.



## Conclusion générale

Le but de ce travail est de mettre en place un procédé de la consolidation des boues de lavage de phosphate par floculation.

Afin d'évaluer les effets de différents paramètres susceptibles d'agir sur ce procédé, nous avons réalisé un plan de criblage, qui nous a livré trois paramètres ont une influence notable sur le procédé de floculation des boues de lavage.

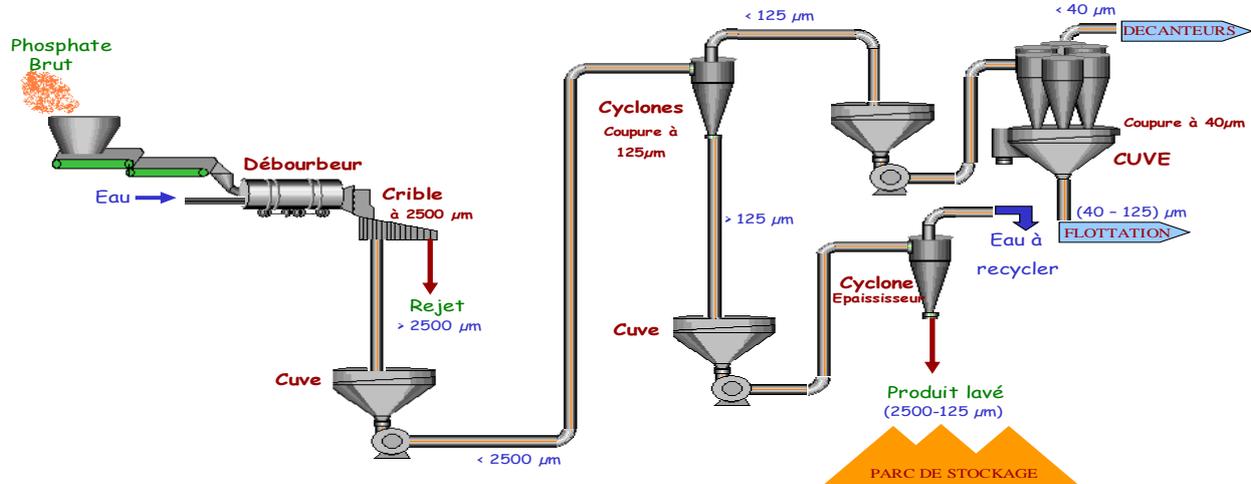
Ensuite nous avons utilisés un plan de surface de réponse, qui nous a livré les différents réglages de ces trois paramètres qui permettent de mieux maîtriser ce procédé de floculation.

L'extrapolation industrielle que nous avons réalisés s'était sous forme de dimensionnement des équipements engagés dans ce projet et aussi une simulation de la méthode d'injections de floculant pour laquelle nous avons travaillé avec un logiciel qui s'appelait Fluent pour éprouver la méthode adéquate d'injections.

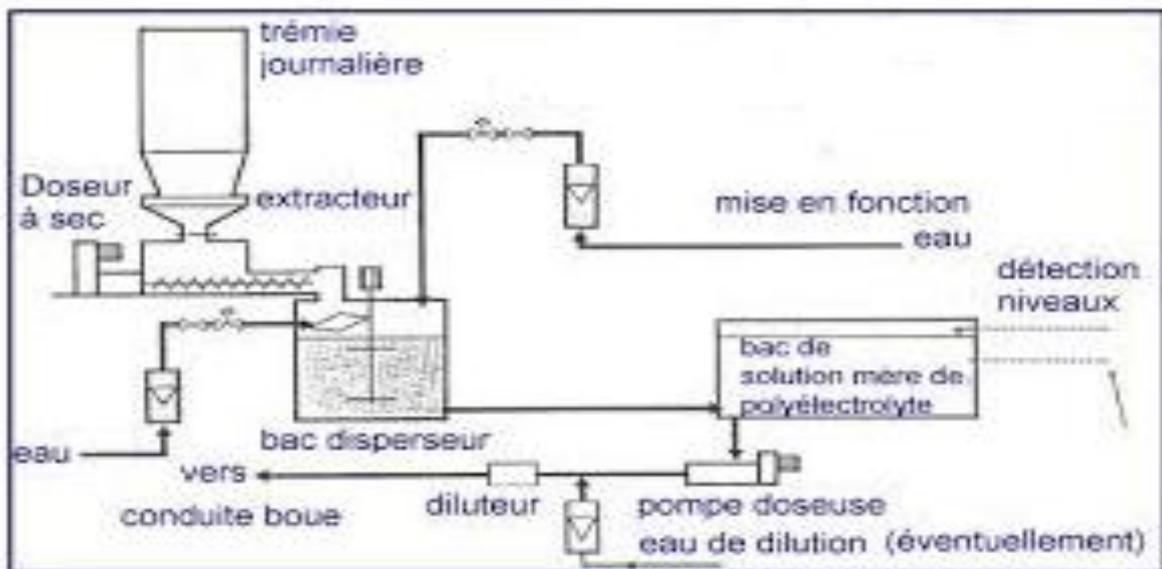
Pour valoriser notre travail nous avons réalisées une estimation d'étude économique par le lien de deux scénario différent, mais qui présentent tous les deux une perte bien remarqués.

## Annexes

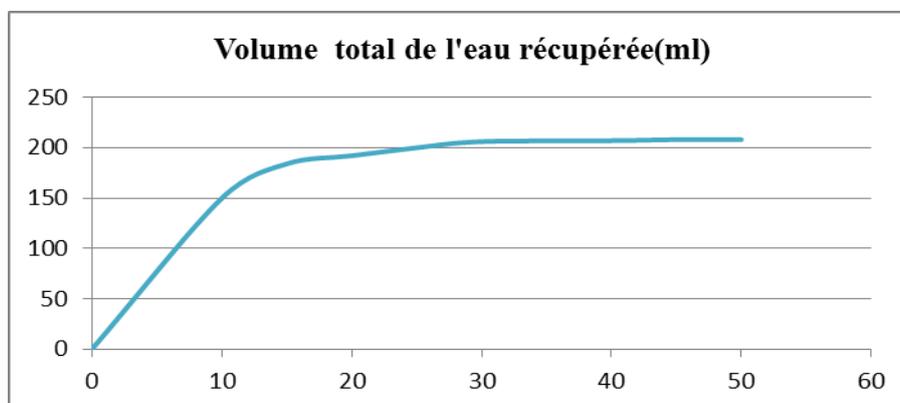
### ♣ Anexe1 : Flowsheet d'une chaîne de lavage de phosphate



### ♣ Annexe 2: les différentes composantes de la station de floculation



### ♣ Annexe 3 : courbe présentant le volume d'eau récupérée au cours du temps





♣ **Annexe 4 : mode d'utilisation sur Gambit et Fluent**

Sur Gambit : la création de géométrie et maillage

\*La conduite centrale créée pour les 3 configurations a un diamètre nominal de 400 mm et de 5 m de longueur et les deux conduites d'injection avec un diamètre de 50 mm (immergées à 10 cm de profondeur dans le cas de configurations 2 et 3).

\*Le maillage adapté aux 2 premières configurations est quadratique alors qu'il est triangulaire pour la 3ème configuration vue la structure de chacune et la possibilité d'adaptation de maillage à la géométrie créée.

Sur Fluent : la simulation

\*Importation et vérification de maillage de Gambit : file-Read-case puis grid-check

\*Choix d'équations : définie-models-solver

\*Choix de modèle qui décrit la turbulence

\*définition des conditions aux limites :

Define-boundary conditions

La zone fluide : Set -Water

La zone entrée boue : Set -Velocity magnitude : 1.54 m/s

La zone entrée floculant 1 : Set -X Velocity magnitude : 12 m/s

La zone entrée floculant 2 : Set -X Velocity magnitude : 12 m/s

\*initialisation de calcul : solve-initialise puis

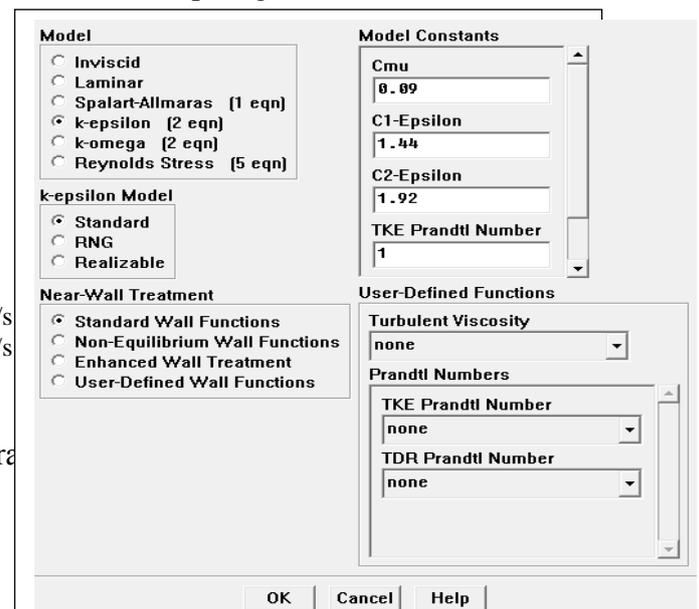
Solve-monitor-résiduel pour le suivi des calculs.

\*lancement de calculs : la définition de nombre d'itérations

Configuration 1 : convergence après 140 itérations

Configuration 2 : convergence après 129 itérations

Configuration 3 : convergence après 133 itérations.



♣ **Annexe a : démonstration de la formule de calcul de taux de solide**

La formule générale de taux de solide est :  $T_s = m_s / m_p$  (1)

Avec  $m_s = m_p - m_e$

$$m_s = m_p - V_e \cdot \rho_e$$

$$m_s = m_p - (V_p - V_s) \rho_e = m_p - V_p \rho_e + V_s \rho_e$$

$$m_s - V_s \rho_e = m_p - V_p \rho_e$$

$$m_s - m_s / \rho_s \cdot \rho_e = m_p - V_p \rho_e$$

$$m_s (1 - \rho_e / \rho_s) = m_p - V_p \rho_e$$

$$\text{donc } m_p - V_p / m_s = (\rho_s - \rho_e) / \rho_s$$
 (2)

$$\text{de (1) et (2) on peut écrire } T_s = (m_p - \rho_e \cdot V_p) / m_p \cdot \rho_s / (\rho_s - \rho_e)$$

$$\text{et puisque } \rho_s / (\rho_s - \rho_e) = 2.8 / (2.8 - 1) = 1.55$$

$$\text{Donc } T_s = m_p - V_p / m_p \cdot 1.55$$



Avec  $m_s$  : masse de solide ;  $m_p$  : la masse de pulpe ;  $m_e$  : la masse d'eau

♣ **Annexe b : démonstration de la formule  $C_v = T_s / (1 - (T_s / 1.55)) * 1000$**

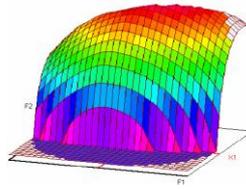
D'une part on a  $T_s = m_s / m_p$  (1)  
 $M_s = 1.55 (m_p - v_p)$  }  **$T_s = 1.55 (m_p - v_p) / m_p$**   
 $V_p = m_p (1 - T_s / 1.55)$  donc  $V_p = m_p / T_s (1 - T_s / 1.55)$  (2)  
D'autre part  $C_v = m_s / v_p$  (3) alors de (2) et (3)  $C_v = m_s / ((m_s / T_s) (1 - T_s / 1.55))$   
Donc  **$C_v = T_s / (1 - (T_s / 1.55)) * 1000$**  et puis  **$T_s = C_v / (1000 + (C_v / 1.55))$** .



## Bibliographie :

---

- [1] : rapport annuel d'OCP 2012 ; édition BONZAI ; direction : Anis Zouitina P : 14 ; 26 ; 44
- [2] : rapport de stage, Ayouchi ASIA/Salamdine Anas;FST de Marrakech laverie Youssoufia 2013 ; P : 8
- [3] : rapport de stage, Tchich Kamal ; ENSAM ; 2002 ; P : 8 ; 9 ; 13
- [4] : article ; l'innovation et la R&D restent le nerf de la guerre ; Imane Trari ; le 15 mai 2013
- [5] : rapport de stage Ait Hacha Taha et Ayassor Manwah ; Amélioration du traitement des boues de lavage de phosphates à la laverie de Sidi Daoui ; école nationale de l'industrie minérale ; 2009 ; P : 31
- [6] : rapport de stage, Ayouchi ASIA/Salamdine Anas; laverie Youssoufia 2013 ; P : 20,22
- [7] : Techniques d'Ingénieurs, CTDI4 ; Pierre Blazy, El Aïd Jdid, Jean Luc Bersillon ; j ; j3450, P 7
- [8] : rapport de stage Ait Hacha Taha et Ayassor Manwah ; Amélioration du traitement des boues de lavage de phosphates à la laverie de Sidi Daoui ; école nationale de l'industrie minérale ; 2009 ; P : 36
- [9] : thèse de Sandrine Karam, application de la méthodologie des plans d'expérience et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt, 2004, P 112.
- [10] : notice d'utilisation de gambit et fluent ; Pr : EL HAMMAMI ; 2013 ; P8-11-19 :34
- [11] : Techniques d'Ingénieur ; cdti1 ; B4320 ; Bernard de Chargers ; P 4
- [12] : Manuel d'évaluation économique des procédés ; Alain CHAUVEL ; Edition Technip, Paris 2001 ; P398



## Master ST CAC Agiq

### Mémoire Du projet de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Nom et prénom: EL AGRI Asmae**

**Année Universitaire : 2014/2015**

**Titre: Consolidation des boues de lavage et flottation des phosphates par floculation**

#### Résumé

L'objectif de ce travail concerne l'étude de la consolidation des boues de lavage du minerai phosphaté par floculation. L'application de la méthodologie des plans d'expérience nous permettent d'évaluer les facteurs influençant sur la réponse qui est le taux de récupération d'eau au sein des bassins de stockage. Aussi ils nous permettent de choisir les critères d'optimalité par plan de surface de réponse de Box Benkhen.

L'étude de cinétique effectuée nous permet de faire une comparaison du rendement dans le cas de l'utilisation ou non du flocculant.

L'extrapolation industrielle effectuée dans notre projet est une ouverture sur la qualité de choix de la méthode d'application du procédé par simulation de l'injection du flocculant par l'application des logiciels type GAMBIT et FLUENT.

L'étude économique réalisée est un ouvrage sur un mode de recherche pour une exploitation meilleur de procédé.

**Mots clés: Phosphate ; boues ; plan d'expérience ; Floculation ; Simulation**