

Licence Sciences et Techniques (LST)

# GENIE CHIMIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### Le comportement rhéologique de l'acide phosphorique et des boues générées

#### Présenté par :

◆ SAIDI Aya

#### Encadré par :

◆ Mr. MAZOUZ Hamid (OCP)

◆ Pr. GRECHHASSAN (FST)

Soutenu Le 8 Juin 2018 devant le jury composé de :

- Pr. GRECH Hassan
- Pr. SAFFAJ Taoufiq
- Pr. CHEKROUNE Said

Stage effectué à OCP

Année Universitaire 2017 / 2018

# Dédicace

*Que ce travail témoigne de mes respects et ma considération, en dédiant ce présent rapport à :*

- ✓ *Mes chers parents qui m'ont soutenu toutes ces années.*
- ✓ *Mes chères sœurs et mon cher frère pour leur encouragement.*
- ✓ *Mes encadrant grâce à leurs efforts, et leurs remarques.*
- ✓ *Tous mes amis et mes collègues pour les moments agréables et inoubliables que nous avons passés ensemble.*

# Remerciements

Je tiens à remercier en particulier mes encadrant, Mr. **HASSANGRECHÉ**, professeurs à la Faculté de Science et Technique de Fès et Mr. **MAZOUZ**, ingénieur à OCP, d'avoir dirigé ce travail avec beaucoup d'intérêt, de patience et de compréhension.

Je saisi l'occasion de remercier les membres de jury Pr. **SAFFAJ TAOUFIQE** et Pr. **CHEKROUN SAID**, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger mon travail,

Mes remerciements les plus sincères vont également au Chef de laboratoire Mme **ASMAA LAROUI**, pour sa disponibilité, son soutien et toute l'aide considérable qu'elle m'a fournie tout au long du déroulement de ce stage.

Un merci sincère et franc à H. **RIM**, qui m'a énormément aidé, et qui a mis à ma disposition son savoir et le savoir-faire en matière de recherche scientifique.

Un très grand remerciement à mes chers parents Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Ce stage de fin d'études n'aurait pu voir le jour sans l'assistance efficace des deux équipes qui constituent l'administration de l'FSTF et l'OCP Qu'elles en soient vivement remerciées.

JE remercie finalement tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce rapport de stage de fin d'études.

كلية العلوم و التقنيات فاس  
+04ΣΠ01+ | +E0001Σ1 Λ +01ΣΧΣ+Σ1  
Faculté des Sciences et Techniques de Fès

*Merci*



جامعة سيدي محمد بن عبد الله  
+00Λ0ΠΣ+ 0ΣΛΣ E8ΛE0Λ Θ1 ΗΘΛ8ΠΠ0Φ  
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

## Table de matière

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITREI : PRESENTATIONGENERALE .....</b>	<b>2</b>
I. INTRODUCTION.....	2
II. PRESENTATION DU GROUPEOCP.....	2
1. Aperçu général du groupe.....	2
2. Secteur d'activité.....	4
II. PRESENTATION DUPOLECHIMIQUEJORF LASFAR.....	4
1. La présentation.....	4
2. Ateliers Maroc Phosphore.....	6
III. PRESENTATION DE LA DIRECTIONRECHERCHE & DEVELOPPEMENT.....	7
IV. CONCLUSION.....	8
<b>ICHAPITRE2: PARTIEBIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>9</b>
II. INTRODUCTION:.....	9
Généralité sur le phosphate.....	9
III. L'ACIDE PHOSPHORIQUE.....	9
1. Généralité sur l'acide phosphorique: H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> .....	9
2. Processus de fabrication de l'acide phosphorique .....	10
3. Procédé de fabrication de l'ACP à l'OCP:.....	12
1.1. Epaisseur.....	12
1.2. Section Attaque-Filtration.....	13
1.3. Unité de concentration.....	16
IV. .LES BOUES GENEREES.....	17
V. LA RHEOLOGIE.....	18
1. Introductions .....	18
2. La rhéologie et la viscosité.....	18
1.1. Définition de la rhéologie.....	18
1.2. Définition de la viscosité.....	19
3. Les comportements rhéologiques:.....	20
3.1. Les fluides newtoniens.....	20
3.2. Les fluides non-newtoniens.....	21
4. Les paramètres influençant la viscosité :.....	25
3.1. La température:.....	25
3.2. Taux de solide.....	25
5. Appareils de mesure.....	25
5.1. Le rhéomètre .....	25
5.2. Le viscosimètre.....	26
VI. CONCLUSION.....	26
<b>CHAPITRE3: PARTIE EXPERIMENTALE.....</b>	<b>27</b>
I. INTRODUCTION.....	27
II. MESURE DE LA VISCOSITE DE L'ACP ET DES BOUES.....	27
1. Procédure expérimentale (mode opératoire).....	27
1.1. Matières premières.....	27
1.2. Préparation de l'échantillon.....	27
1.3. Mesure de la viscosité :.....	29
2. Résultats et discussions.....	29

1.1. Effet de la température :.....	29
2.2. Effet du taux de solide.....	31
L'ETUDE DE LA RHEOLOGIEDEL'ACP ET DES BOUES .....	31
1. Les mesure rhéologiques.....	31
2. Résultats et discussions.....	32
IV. CONCLUSION.....	35
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>36</b>

## Liste des figures

<b>FIGURE1 :LA CARTE DES PRINCIPAUX SITES D'IMPLANTATION DU GROUPE OCP .....</b>	<b>3</b>
<b>FIGURE2: SLURRY PIPELINE KHOURIBGA-JORFLASFAR.....</b>	<b>3</b>
<b>FIGURE3: PLAN DU POLE CHIMIQUE JORFLASFAR.....</b>	<b>5</b>
<b>FIGURE4: BLOC DE PRODUCTION DE MAROC CHIMIE .....</b>	<b>6</b>
<b>FIGURE5: FORMULE DE PHOSPHOATE PO4.....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURE6: FORMULE CHIMIQUE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE.....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURE7: SCHEMA DU PROCEDE HUMIDE DE FABRICATIONDEL'ACP.....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURE 8: SCHÉMA DE L'INSTALATION D'UN EPAISSISSEUR.....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURE 9 :SCHEMA SIMPLIFIANT LEPRINCIPE DE LA FLOCCULATION.....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURE10: CUVE D'ATTAQUE-FILTRATION .....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURE11: REACTEUR D'ATTAQUE ET CUVE DE DIGESTION.....</b>	<b>13</b>
<b>FIGURE12: VUE EN PLAN APPROXIMATIVE D'UN FILTRE A CELLULES BASCULANTES.....</b>	<b>14</b>
<b>FIGURE13: ATELIER PHOSPHORIQUE ECHELON DE CONCENTRATION ACIDE 54% P2O5 .....</b>	<b>15</b>
<b>FIGURE14:A: LE TAUX DE CISAILLEMENT EN FONCTION DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT.....</b>	<b>19</b>
<b>B: LA VISCOSITE EN FONCTIONT DU TAUX DE CISAILLEMENT .....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURE15: RHEOGRAMME D'UN FLUIDE PSEUDOPLASTIQUE.....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURE16: RHEOGRAMME D'UN FLUIDE DILATANT .....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURE17: RHEOGRAMME D'UN FLUIDE PLASTIQUE.....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURE18: LA VISCOSITE D'UN FLUIDE THIXOTROPE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURE19: LA VISCOSITE EN FONCTION DU TEMPS POUR LA RHEOPEXIE.....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURE20: COURBE D'UNE COMBINAISONENTRE LAVARIATION DE <math>\tau</math> DE THIXOTROPIE ET CELLE DE LA RHEOPEXIE .....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURE21: RHEOMETRE .....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURE22: ILLUSTRATION DE L'ECHANTILLON CHAUFFE SUR LA PLAQUE CHAUFFANTE.....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURE23: CENTRIFUGEUSE .....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURE24: VISCOSIMETRE ROTATIF.....</b>	<b>28</b>
<b>FIGURE25 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA VISCOSITE D'ACP 29% EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....</b>	<b>28</b>

**FIGURE26: REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA VISCOSITE D'ACP 54% EN FONCTION DE LA TEMPERATURE..... 29**

**FIGURE27: REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA VISCOSITE DES BOUES 29% EN FONCTION DE LA TEMPERATURE..... 29**

**FIGURE28: REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA VISCOSITE DES BOUES 54% EN FONCTION DE LA TEMPERATURE..... 29**

**FIGURE29: REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA VISCOSITE DES BOUES 54% EN FONCTION DU TAUX DE SOLIDE..... 30**

**FIGURE30 : COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DESBOUES54% ET29%A40°C..... 31**

**FIGURE31 : COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES ACIDES PHOSPHORIQUE 54% ET 29%..... 32**

**FIGURE32 : REGRESSIONDE LA MESURE RHEOLOGIQUE DES BOUES 29% A 40°C AU MODELE DE BINGHAM ..... 32**

**FIGURE33 : REGRESSIONDE LA MESURERHEOLOGIQUE DES BOUES 54% A 40°C AU MODELE DE BINGHAM.....33**

**FIGURE34 : REGRESSIONDE LA MESURERHEOLOGIQUE DE L'ACP 29% A 80°C AU MODELE DE BINGHAM.....33**

**FIGURE35 : REGRESSIONDE LA MESURERHEOLOGIQUE DE L'ACP 54% A 40°C AU MODELE DE BINGHAM.....34**

*Liste des tableaux*

**TABLEAU 1 : PROPRIETE CHIMIQUE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE.....9**

**TABLEAU 2 : PROPRIETE PHYSIQUE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE.....9**

*Liste des abréviations*

- OCP : Office Chérifien des Phosphates
- ACP : Acide Phosphorique
- MAP : Phosphate mono-ammoniaque
- DAP : Phosphate Di-ammoniaque
- TSP : Super phosphate triple
- R&D : Recherche et développement



كلية العلوم والتقنيات فاس  
+οϚΣΠοι+ | +ΓοΘοοισι ∧ +ΘισΧΣ+Σι  
Faculté des Sciences et Techniques de Fès



جامعة سيدي محمد بن عبد الله  
+οΘΛοΠΣ+ ΘΣΛΣ ΓΒΛΓΓοΛ Θι ΗΘΛΒΗΗοΘ  
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

SI : Système international

## Introduction

L'industrie des phosphates est une clé de la sécurité alimentaire mondiale, puisqu'il joue un rôle important dans la productivité agricole et par suite dans l'alimentation de l'homme.

Le groupe OCP étant parmi les plus grands producteurs des phosphates et de ses dérivés dans le monde, constitue un acteur clé sur le marché international.

Parmi les objectifs du complexe industriel Jorf-Lasfar, la production et la commercialisation de l'acide phosphorique avec ses différentes concentrations (29% et 54 % en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ainsi que la production de différents engrais chimiques.

La fabrication de l'acide phosphorique est réalisée par l'attaque à l'acide sulfurique de la roche phosphatée, la suspension résultante est ensuite filtrée pour séparer le gypse de l'acide phosphorique 29%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> produit, ce dernier est concentré par évaporation pour avoir un acide phosphorique de concentration 54% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

La performance de ces opérations est largement affectée par le comportement rhéologique des fluides et suspension misent en jeu. Dans le présent travail nous avons évalué le comportement rhéologique de l'acide phosphorique et des boues générées et c'est par la mesure de la viscosité que l'étude a été réalisée.

**L'objectif de mon stage a été d'effectuer des études du comportement d'écoulement de cette suspension pour optimiser au mieux le processus de fabrication.**

Pour effectuer ces études rhéologiques, il faut tout d'abord acquérir une connaissance basique sur la rhéologie et la viscosité ; pouvoir effectuer des mesures de la viscosité en fonction de certains paramètres, ainsi que des mesures rhéologiques à l'aide d'instruments et d'appareils spécifiques afin d'identifier le type de comportement d'écoulement de l'acide phosphorique.

## Chapitre I : Présentation générale

---

### I. Introduction

Ce stage a été effectué à l'Office Chérifien des Phosphates de Jorf-Lasfar, qui est considéré comme leader mondial sur le marché des phosphates et de ses dérivés.

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu général du groupe OCP, ainsi qu'une petite présentation du complexe Jorf-Lasfar et la direction R & D.

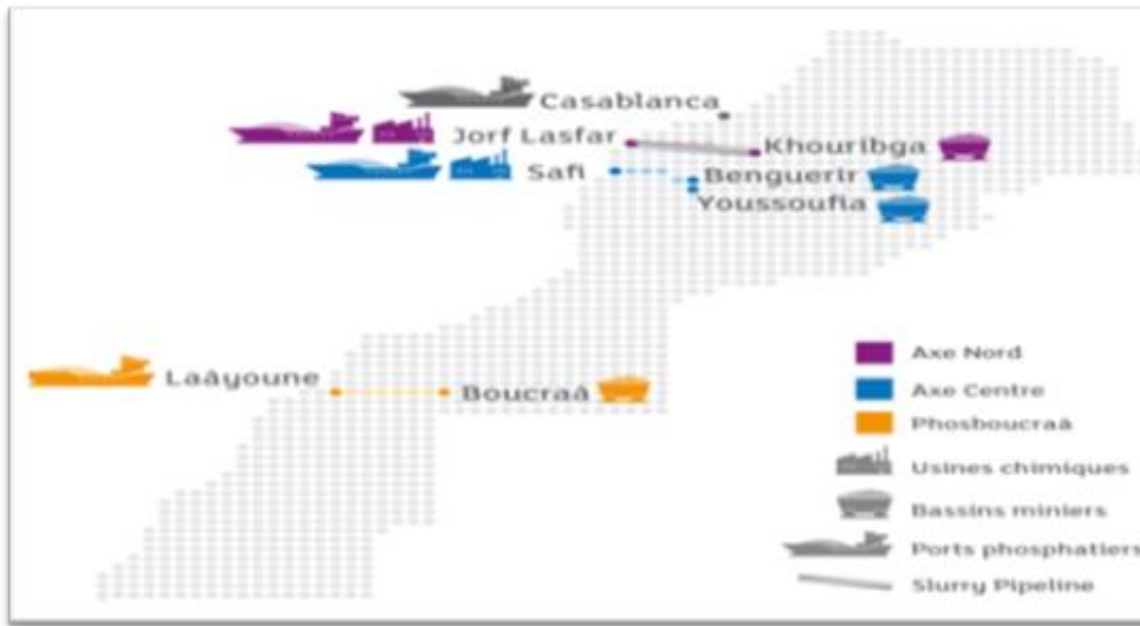
### II. Présentation du groupe OCP

#### I. Aperçu général du groupe

Le groupe O.C.P (Office Chérifien des Phosphates) est une firme Etatique créée depuis août 1920, dans le cadre de l'exploitation de la richesse nationale en phosphates, il est parmi les plus grands producteurs des phosphates dans le monde. Ainsi, il est le premier exportateur mondial des phosphates et de ces dérivés. Il extrait, valorise et commercialise du phosphate et des produits phosphatés (notamment de l'acide phosphorique et des engrais). L'OCP intervient dans tous les aspects de la création de valeur dans l'industrie des phosphates, de l'extraction du minerai jusqu'à la production des engrais, en passant par la fabrication de l'acide phosphorique [1].

En effet, avec les phosphates, le Maroc occupe une place de choix : trois quarts des réserves mondiales (98% dans le centre du pays et 2% dans le sud), troisième producteur et premier exportateur mondial de phosphate concentré, d'acide phosphorique et de  $P_2O_5$  sous toutes ses formes [1].

L'OCP Présente dans cinq zones géographiques du pays : 3 sites d'exploitation minières : Khouribga /Youssoufia, Boucraâ/ Laayoun et 2 sites de transformation chimique : Safi et Jorf-Lasfar. L'OCP constitue un vecteur de développement régional et national important [1].



*Figure1 : La carte des principaux sites d'implantation du groupe OCP*

Les minerais de phosphate sont extraits du sous-sol marocain qui possède les trois-quarts des réserves mondiales (Khouribga constitue la plus importante zone de production de phosphate du groupe OCP); La matière phosphatée est exploitée à Khouribga puis elle subit un traitement pour la préparer au transport par **Slurry-pipeline** : C'est une stratégie basé sur l'acheminement hydraulique de la pulpe de phosphate (transport par voie humide), visant à augmenter les capacités de production, optimiser les couts et développer la flexibilité tout en répondant au défi écologiques [4].



*Figure 2: Slurry pipeline Khouribga-Jorf lasfar*

## 2. Secteur d'activité

Le groupe OCP maîtrise toute la chaîne de création de valeur de l'industrie phosphatée : extraction et traitement du minerai, transformation de cette matière première en un produit liquide intermédiaire, l'acide phosphorique, et fabrication des produits finis par concentration et granulation de cet acide ou par purification : engrais, acide phosphorique purifié.

Les principales activités de l'OCP sont :

➤ **La prospection** : Elle consiste à faire le forage pour délimiter le gisement, s'informer sur l'épaisseur des couches et leur teneur.

➤ **La production** :

**-L'extraction** : Elle s'effectue de deux manières qui dépendent du site,

- La voie souterraine : est facilitée par le fait que les couches phosphatées affleurent à la Surface du sol particulièrement dans les ravins.

- L'exploitation à découverte ou stripping : consiste à découvrir chaque niveau phosphaté à partir de la surface.

**-Le Traitement** : Le phosphate extrait subit un enrichissement de façon à éliminer la gangue et réduire la teneur de certaines impuretés.

➤ **La valorisation** : C'est la transformation des phosphates en produit semi-fini (acide phosphorique) ou fini (les engrais), dans les entités chimiques du groupe à Jorf Lasfar et Safi.

➤ **La commercialisation** : Le phosphate est vendu selon la demande des clients aux cinq continents de la planète soit brut soit après traitement, les exportations représentent 15 à 30% du commerce international du phosphate et de ses dérivés [2].

## III. Présentation du pôle chimique Jorf-Lasfar

### 1. La présentation

Le pôle chimie de Jorf-Lasfer est une unité industrielle intégrée, dotée d'importantes infrastructures et d'un port capable d'accueillir des bateaux d'une capacité d'environ 100.000 tonnes, ce qui constitue une valeur ajoutée pour les investisseurs.

Il est situé sur le littoral atlantique, à 20 km au sud-ouest d'El Jadida, le complexe industriel de JORF LASFAR s'étend sur 1700 hectares. Cette nouvelle unité a permis au Groupe OCP de doubler sa capacité de valorisation des phosphates. Le site a été choisi pour ses multiples avantages :

- proximité des zones minières,
- existence d'un port profond,
- disponibilité de grandes réserves d'eau
- présence des terrains pour les extensions futures.

Cela permet de produire chaque année 2 millions de tonnes de  $P_2O_5$  sous forme d'acide phosphorique, nécessitant la transformation de 7,7 millions de tonnes de phosphate extraits des gisements de Khouribga, 2 millions de tonnes de soufre et 0,5 million de tonnes d'ammoniac. Les besoins en énergie du complexe sont satisfaits par une centrale de 111 MW utilisant la chaleur de récupération [1].

Une partie de la production est transformée localement en engrais, ainsi qu'en acide phosphorique purifié. L'autre partie est exportée sous forme d'acide phosphorique marchand via les installations portuaires locales.

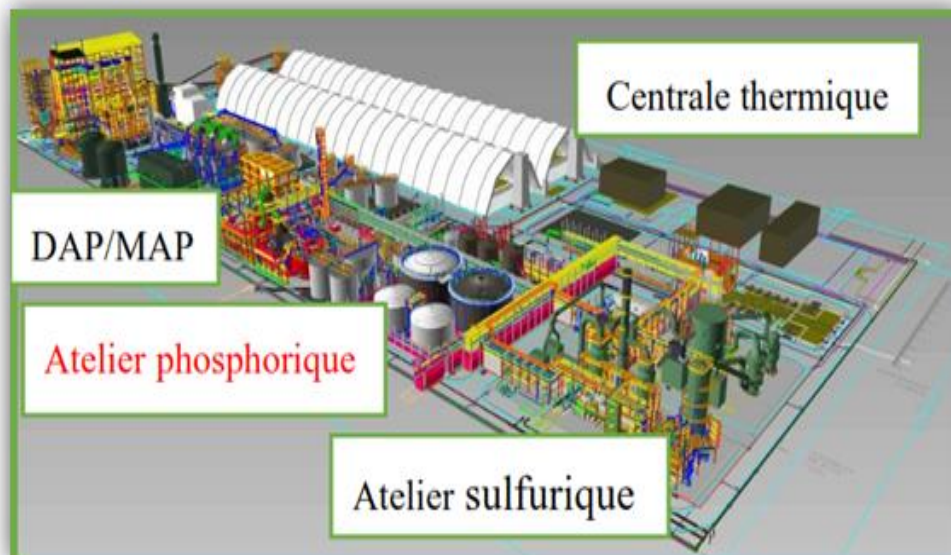
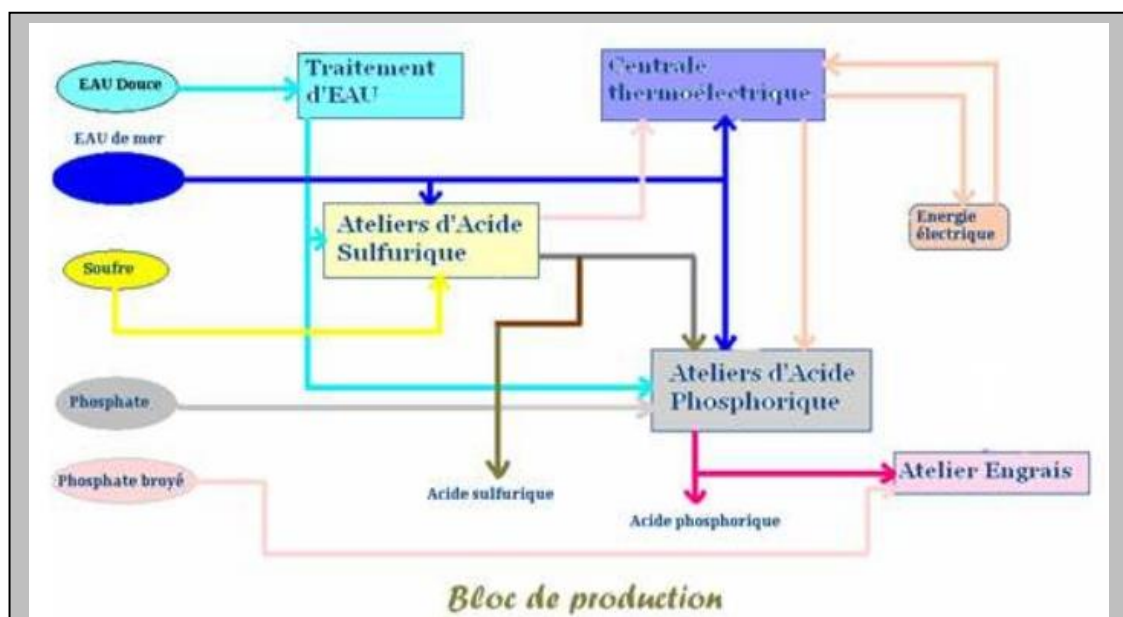


Figure 3 : Plan du pôle chimique Jorf Lasfar

## 2. Ateliers Maroc Phosphore

Les ateliers de MAROC PHOSPHORE Jorf-Lasfar sont :

- *L'atelier sulfurique* : Il est constitué de six unités de production, leur but est la fabrication d'acide sulfurique à partir du soufre. Il assure en outre, la production de la vapeur d'eau haute et moyenne pression à partir de ses chaudières de récupération, qui sera utilisé par la centrale thermoélectrique pour la production d'électricité.
- *L'atelier phosphorique* : permet de produire 5 400 tonnes de  $P_2O_5$  par jour d'acide 54%. Il est constitué de :8 unités de production d'acide phosphorique 29%et 16 unité de concentration. L'acide phosphorique se fait à base de l'acide sulfurique et du phosphate broyé.
- *L'atelier engrais* : Il comporte quatre unités de production de DAP (phosphate di-ammoniaque) et TSP (super phosphate triple).
- *L'atelier des utilités* : Cet atelier rassemble tous les produits intermédiaires nécessaires à la production à l'exception de l'acide sulfurique [3].



*Figure 4 : Bloc de production de Maroc chimie*

## IV. Présentation de la direction Recherche & Développement

La Direction R & D au sein de laquelle a été effectué ce stage compte plusieurs unités de recherche, ainsi que des entités supports et logistiques. Elle réalise des travaux de recherche sur des thématiques liées à toute la chaîne de valeur du phosphate ainsi que sur des thèmes transverses (eau, environnement, corrosion, ...). Les unités de R & D de cette direction sont :

### ▪ Unité R&D “Minéralurgie et Traitement des Phosphates”

Son activité principale consiste à :

- Réaliser des essais concernant l'étude et la mise au point des différentes étapes du traitement de minerai (lavage, séchage, broyage, flottation et calcination).
- Améliorer les performances des unités de traitement.

### ▪ Unité R&D Acides et Procédés de séparation

Elle a pour activité des études et recherches dans le domaine de la valorisation chimique des phosphates et de la fabrication des acides phosphorique et sulfurique. Elle traite également des procédés et technologie de séparation (Filtration, membranes...).

### ▪ Unité R&D “Fertilisation”

Elle s'occupe du développement de procédés de fabrication de différentes qualités d'engrais et de l'amélioration de leurs caractéristiques physico-chimiques.

### ▪ Unité R&D “Eau, Environnement, Energie”





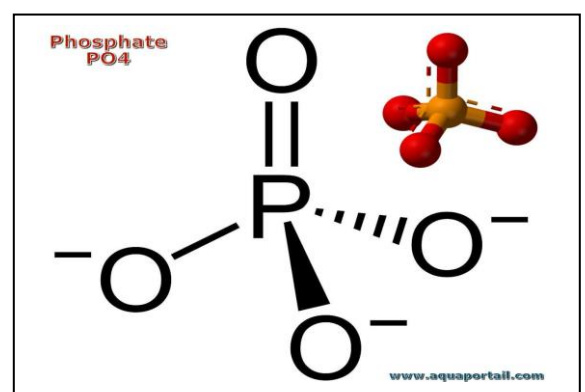
## Chapitre 2 : Partie Bibliographique

### I. Introduction

Mon sujet d'étude comprend 3 mots clés dont nous allons traiter dans ce chapitre : L'acide phosphorique, les boues générées et la rhéologie.

### II. Généralité sur le phosphate

Le phosphate comme étant la matière première principale dans les fabrications industrielles du groupe OCP ; il améliore la productivité des sols. Concrètement, il contribue à développer les racines, à faciliter l'alimentation de la plante et à la rendre plus résistante face aux maladies.



*Figure5 : Formule chimique du phosphate*

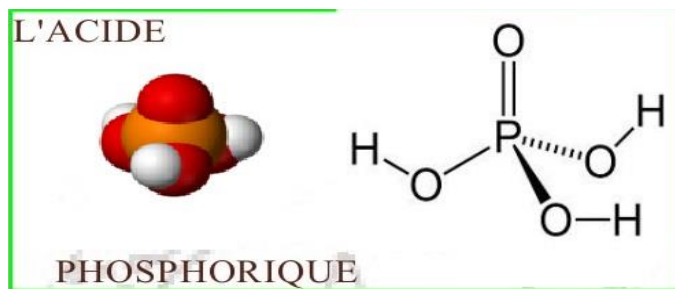
Les phosphates naturels proviennent principalement des gisements sédimentaires de différentes origines. Il se présente dans les roches sous forme de phosphate de chaux, notamment l'apatite (l'espèce minéralogique la plus répandue) et phosphorite. La matière

phosphatée de base, formée de composés issus de l'apatite par un ensemble de substitutions isomorphiques partielles (ex : substitution de  $\text{PO}_4^{3-}$  par  $\text{CO}_3^{2-}$ ) [7].

### III. L'acide phosphorique

#### 1. Généralité sur l'acide phosphorique : $\text{H}_3\text{PO}_4$

**Ac. Orthophosphorique** : est un composé chimique de formule  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; peut être issu par l'attaque sulfurique des roches naturelles constituées principalement de fluorophosphates de calcium, de fer et d'aluminium. A ce titre, on peut dire que  $\text{H}_3\text{PO}_4$  est le principal dérivé de



*Figure6 : Formule chimique de l'acide phosphorique*

La chimie du phosphore. Il présente une grande importance au niveau industriel ; utilisé dans la fabrication des engrais phosphatés, les traitements de surfaces métalliques, les synthèses organiques, la fabrication des détergents, les industries alimentaires, les insecticides, les huiles lubrifiantes ...

Il est disponible dans le commerce sous forme de solutions aqueuses à diverses concentrations dont les plus courantes sont 29 et 54 % en  $\text{P}_2\text{O}_5$ . En pratique, en milieu de travail, on le trouve sous forme de solutions aqueuses [7].

Propriétés chimiques	
Formule brute	$\text{H}_3\text{PO}_4$
Masse molaire	$97,9952 \pm 0,0014 \text{ g/mol}$
PKa	(25 °C) $\text{pK}_{a1} = 2,148 / 7,198 / 12,319$

Propriétés physiques	
T° fusion	42,35 °C
T° ébullition	Se décompose au-dessous du point d'ébullition à 213 °C
Solubilité	sol. dans éther alcool très sol. dans l'eau chaude ;
Masse volumique	$1,834 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ à 18 °C
Pression de vapeur saturante	à 20 °C : 4 Pa
Viscosité dynamique	3,86 Pa·s (solution à 40 %, 20 °C)

*Tableau2 : Propriétés physiques de l'ACP*

Tableau1 : Propriétés chimiques de l'ACP

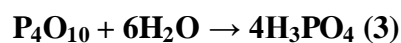
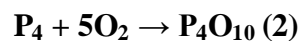
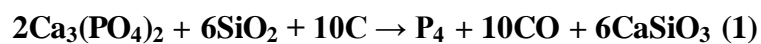
## 2. Processus de fabrication de l'acide phosphorique

Deux procédés sont utilisés avec différentes matières premières :

➤ **Procédés par voie thermique** : Consiste à une réduction du phosphate à haute température conduisant à la sublimation du phosphore qui est ensuite oxydé par l'oxygène et récupéré sous forme de  $P_2O_5$ . Ainsi, l'acide phosphorique est préparé par hydratation du  $P_2O_5$  obtenu.

Il fournit l'acide avec un grand degré de pureté, mais sa consommation élevée en énergie limite son utilisation.

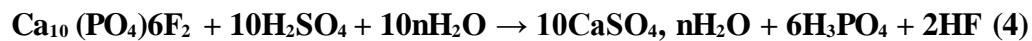
- Réactions :



➤ **Procédé par voie humide** : C'est le procédé le plus ancien dans l'industrie phosphorique, ainsi il est le plus utilisé dans le monde entier, vu son faible coût de revient par rapport à celui issu de la voie thermique. L'acide phosphorique produit par voie humide est obtenu à partir des phosphates naturels par attaque d'acide (nitrique, chlorhydrique ou sulfurique).

L'attaque par l'acide sulfurique est la plus utilisée et présente plusieurs avantages, notamment son faible coût de revient relativement aux autres procédés, et la facilité de séparation de l'acide produit (le sulfate de calcium obtenu est pratiquement insoluble dans l'acide phosphorique).

- La réaction globale de cette attaque est la suivante :



Avec  $n$  = degré d'hydratation du sulfate de calcium.

Les procédés sont classés en fonction de la forme de cristallisation du gypse ; qui se diffère selon les conditions opératoires et les valeurs de divers paramètres (température, concentration de l'acide, ... ) :

- $n=0$  : Gypse anhydre => (50-55%  $\text{P}_2\text{O}_5$  à 120-130°C)
- $n= \frac{1}{2}$  : Hémihydrate => (42-45%  $\text{P}_2\text{O}_5$  à 20-100°C)
- $n= 2$  : Dihydrate => (28-32%  $\text{P}_2\text{O}_5$  à 68-78°C) => AC. Phosphorique en moyenne 29%  $\text{P}_2\text{O}_5$  : le plus couramment utilisé.

La réaction (4) est généralement menée à 80°, conduit d'autre à l'acide phosphorique  $\text{H}_3\text{PO}_4$  à la formation de sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$  (Principale composante du phosphogypse) et d'acide fluorhydrique HF [4].

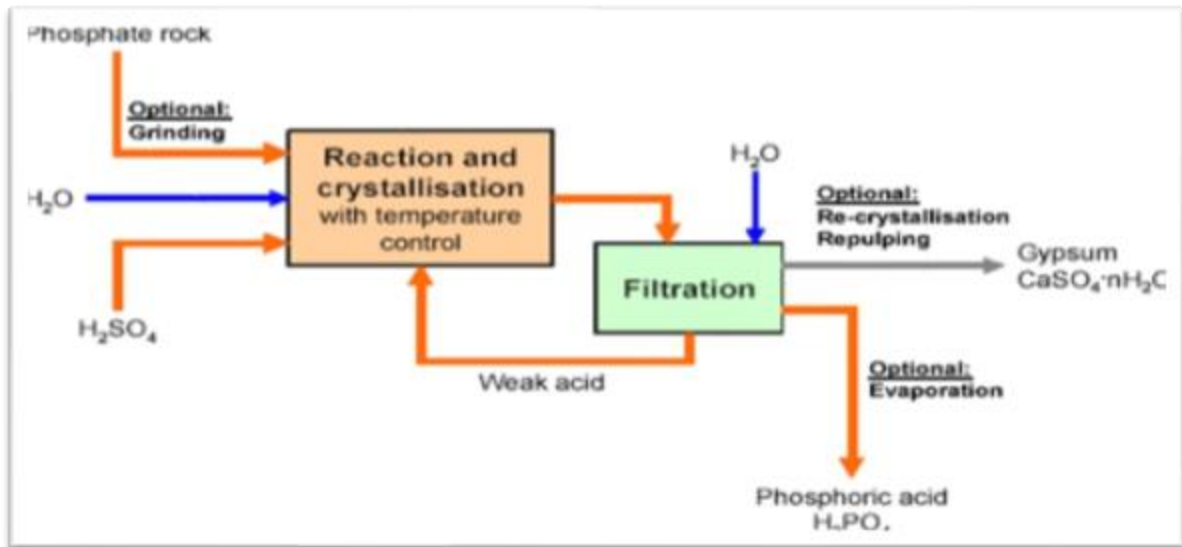


Figure 7 : Schéma du procédé humide de fabrication de l'ACP

### 3. Procédé de fabrication de l'ACP à l'OCP :

#### ➤ Présentation de la ligne E

##### **3.1 Epaisseur**

Consiste à une décantation des particules pour séparer les phases solides et liquides, grâce à la gravité, en utilisant la floculation [8].

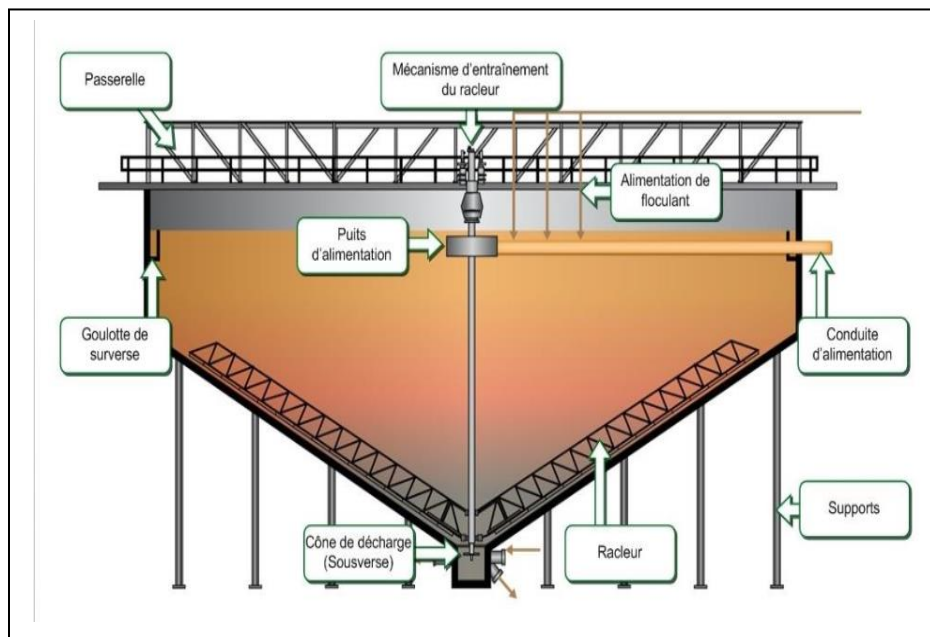
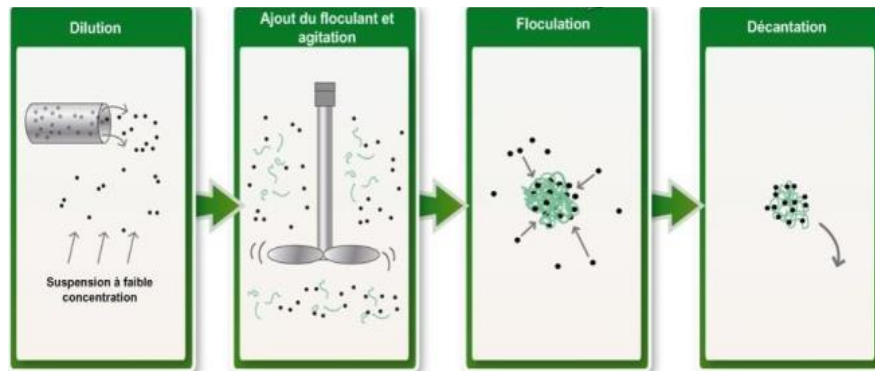


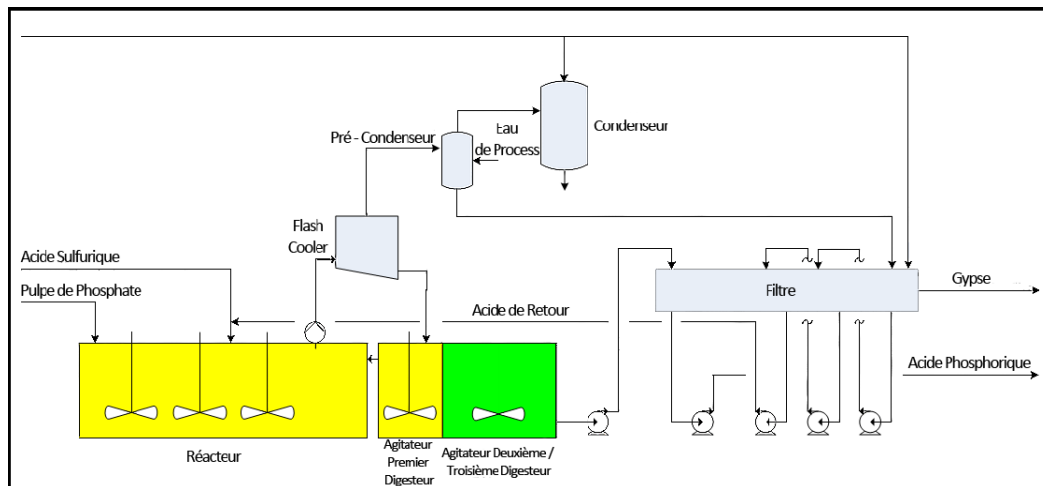
Figure 8 : Schéma de l'installation d'un épaisseur

➤ **Principe de la floculation :** C'est un processus physico-chimique, conduit à l'agglomération des particules en suspension dans un liquide en utilisant des additifs floculant pour former un floc ; pour qu'il puisse se décanner rapidement.



*Figure 9 : Schéma simplifiant le principe de la floculation*

### 3.2 Section Attaque-Filtration



*Figure 10 : Cuve d'attaque-Filtration*

#### ➤ Section attaque

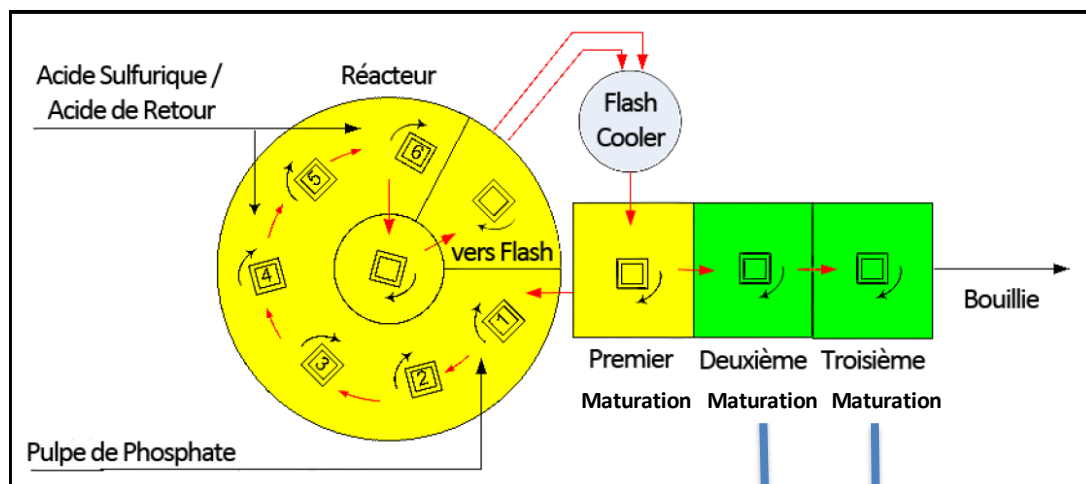
Le procédé est basé sur l'attaque du phosphate par voie humide dans un milieu réactionnel agité pour produire l'acide phosphorique 29% et du gypse dihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

La cuve d'attaque est cloisonnée en 8 compartiments : La pulpe de phosphate contenant 66% de solides alimente le 1<sup>er</sup> compartiment. Le 1<sup>er</sup> et 2<sup>eme</sup> compartiment sont munis d'agitateurs spécifiques afin d'éviter la formation d'une couche de phosphate, la passivation et les pertes en phosphate. On ajoute à ce qui précède les boues recyclées de l'unité de stockage d'acide puis elle passe au 3<sup>eme</sup> compartiment où l'on fait entrer de l'acide sulfurique qui, avant son introduction dans le 3<sup>eme</sup> compartiment, afin de faciliter la dispersion dans le réacteur.

L'attaque est effectuée dans le 3<sup>eme</sup> et le 4<sup>eme</sup> compartiment. Le mélange passe ensuite au 5<sup>eme</sup> compartiment où il est attaqué de nouveau par une quantité d'acide sulfurique diluée par l'acide recyclé (18%) venant de la filtration, le mélange est envoyé au 6<sup>eme</sup> compartiment où l'on agite encore afin d'améliorer la digestion du minerai. La bouillie passe après au 7<sup>eme</sup> compartiment (compartiment central) où elle est agitée avant de passer au huitième compartiment qui alimente le système de refroidissement (flash cooler). Après son refroidissement, la bouillie recyclée du Flash cooler est introduite dans le 1<sup>er</sup> compartiment de la cuve de maturation [9].

## ➤ Section de maturation

Le but de la maturation est d'augmenter le temps de séjour et d'améliorer la cristallisation du gypse pour faciliter l'opération de filtration. Elle est cloisonnée de 3 compartiments :





*Figure11 : Réacteur d'Attaque et Cuve de Maturation*

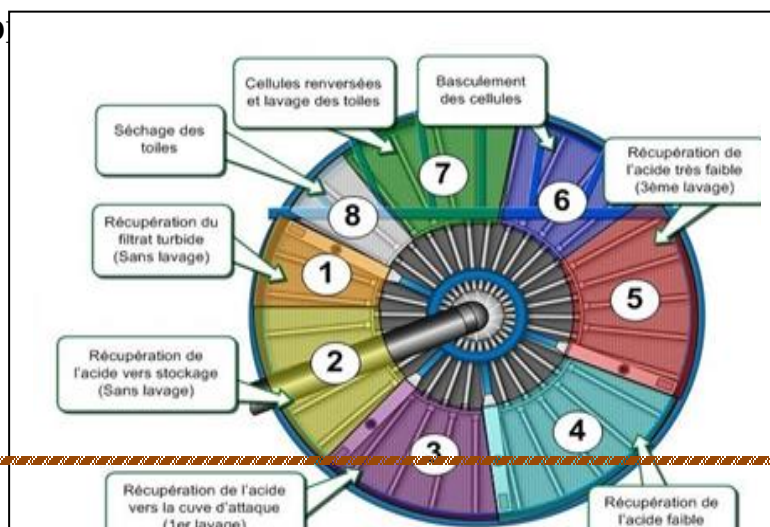
➤ **Section filtration**

→  
 → Ajuster la concentration du calcium dans l'alimentation

La filtration est une opération de séparation entre deux phases liquide et solide qui permet d'éliminer le solide contenu dans la bouillie grâce à un filtre soumis à vide. Le but de cette filtration sous vide est de récupérer l'acide phosphorique 29% en le séparant du gypse. Cette section comporte deux filtres (A et B), chacun est constitué de deux principaux dispositifs : une table tournante et une boîte à vide qui sert à créer le vide nécessaire pour faciliter la filtration et les lavages. Le filtre est divisé en six secteurs :

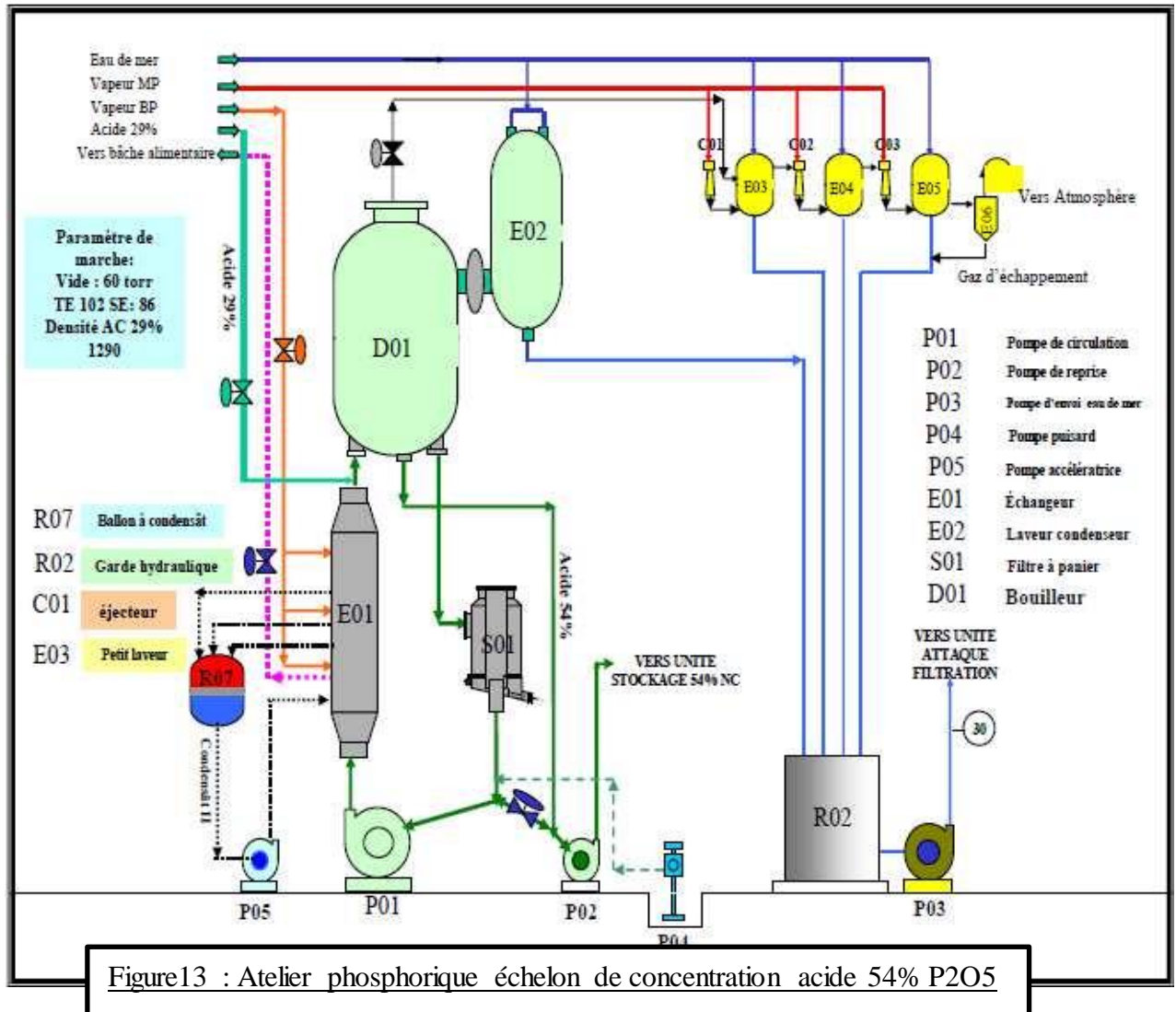
- **Pré-secteur** : La bouillie est tombée sur la toile filtrante, le gâteau n'est pas encore formé, elle comporte un taux important de solide.
- **Secteur acide fort** : A ce niveau le filtrat a une teneur de 28% en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, il est appelé acide fort et aspiré vers le stockage d'acide 28%.
- **Secteur acide moyen** : le gâteau est formé, il se fait un lavage par acide faible pour avoir un acide moyen à 18\_20% en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.
- **Secteur acide faible** : Le gâteau subit un autre lavage par l'eau. Le filtrat obtenu contient quelques % en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et il est réutilisé au premier lavage.
- **Extraction du gypse** : Le gâteau de gypse est lavé à contre-courant en 2 étapes. Le lavage final est réalisé à l'eau chaude produite au pré-condenseur. Le gypse est finalement déchargé.
- **Lavage de toile** : se fait par l'eau filtrée (gypseuse). La toile est séchée après au ventilateur de séchage. Le liquide obtenu est renvoyé au bac d'eau chaude.
- **Séchage de toile** : consiste à sécher l'eau pour ne pas influencer les caractéristiques de l'acide faible.

L'acide phosphorique 29% est acheminé vers l'unité de concentration après désursaturation et décantation [10]



*Figure12 : Vue en plan approximative d'un filtre à cellules basculantes*

### 3.3 Unité de concentration



La fabrication d'acide phosphorique selon la plupart des procédés par voie humide, permet de produire un acide phosphorique à une teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 27% à 30%. Cette faible teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> rend la commercialisation d'acide phosphorique difficile suite aux :

- ✚ Transport inutile d'eau (produit dilué) ;
- ✚ Inadaptation à la réalisation de certaines formules d'engrais nécessitant acide de départ plus concentré.

D'où, la nécessité de concentrer l'acide phosphorique généralement à une concentration de 54%  $P_2O_5$ , par l'évaporation d'une quantité d'eau contenue dans l'acide.

L'ébullition se fait dans un bouilleur sous vide à 80mmHg et à une température de 80°C.

#### ➤ Description de procédé :

L'unité de concentration est divisée en 4 lignes identique, chaque ligne est composée deux échelons.

L'acide venant de l'unité de stockage est versé dans un bac (bouilleur) D01, puis par l'intermédiaire d'une pompe P01 l'acide sera envoyé vers l'échangeur E01 en traversant un filtre S01, qui a pour but d'éliminer les particules solides qui provoquent l'endommagement du circuit de l'échangeur.

L'acide arrive dans l'échangeur, circule dans des conduites qui seront en contact avec une vapeur de haute température venant du transformateur de vapeur 20J.

L'échauffement des conduites entraîne l'évaporation de l'eau conduit dans l'acide, donc l'acide récupéré dans le brouilleur sera de concentration 54% qui va être envoyé vers l'unité 14J par une pompe P02.

La vapeur mélangée avec le gaz va traverser un bac appelé (grand laveur) E02 puis vers petits laveurs équipés des « éjecteurs » pour qu'il soit lavé par R04 pour qu'il soit envoyé par une pompe P03 vers l'unité 03J afin d'être utilisé pour l'évacuation du gypse vers la mer. Ainsi l'eau récupérée de l'échangeur va traverser un condensateur R07, puis il sera envoyé vers le transformateur de vapeur par une pompe P05.

## IV. Les boues générées

Les boues générées sont des particules très fines qui se forment au cours du processus de fabrication de l'acide phosphorique ; puisque l'opération de filtration d'acide phosphorique permet le passage de ces particules traversant le gâteau filtrant, L'acide y est séparé de ces déchets par une combinaison de différentes unités de traitement ; en passant par 2 principales étapes :

- La désursaturation : qui consiste à diminuer la température de 80°C à 50°C par contact de l'air pour augmenter le temps de séjour et refroidir l'acide afin de favoriser la formation des différents cristaux, puis il est dirigé vers le décanteur.

- La décantation : l'acide est acheminé vers le décanteur où il subit une séparation solide-liquide par ajout de floculation approprié qui permettant : l'agrégation des particules pour augmenter la vitesse de sédimentation et augmenter la concentration en solide du sédiment pour obtenir de l'acide prétraité et un acide chargé en boues est récupéré pour être recyclé.

## IV. La rhéologie

### 1. Introductions

Le mot « rhéologie » a été proposé par Eugene Cook Bingham, en 1928, pour désigner « La science qui étudie la déformation et l'écoulement de la matière, comprenant l'élasticité, la viscosité et la plasticité. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons principalement à la viscosité, qui désigne la résistance d'un fluide à l'écoulement et au mouvement lorsqu'il est à une contrainte appliquée.

L'objectif de ce chapitre, est de bien définir la rhéologie et la viscosité, les différents types du comportement rhéologique, l'utilisation d'un rhéomètre ou un viscosimètre comme instrument de rhéologie, et les paramètres influençant la viscosité, pour appliquer ces études sur nos échantillons qui seront : l'ACP 29%, ACP 54%, les boues 29% et les boues 54%.

### 2. La rhéologie et la viscosité

#### 2.1 Définition de la rhéologie

La rhéologie est une discipline qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps, on dit que c'est la science des relations entre contraintes et vitesses de déformation d'un élément de volume. Dont l'objectif est de déterminer la réponse d'un fluide à ces contraintes mécaniques ; afin d'analyser les comportements mécaniques des substances et établir leurs lois de comportement.

Les données rhéologiques nous aident à comprendre les fluides sur lesquels nous travaillons de sorte que nous puissions savoir comment ils se comportent, ou comment les forcer à se comporter de la façon désirée [5].

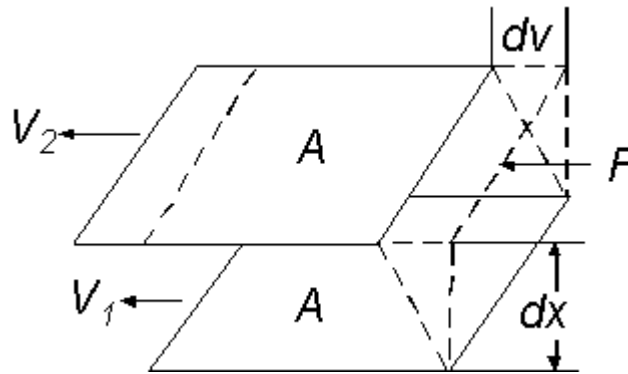
Elle impacte toutes les étapes de l'utilisation des matériaux dans diverses industries – du développement et de la stabilité de la formulation jusqu'à la production et la performance du produit.

Les mesures rhéologiques comprennent :

- Suivi de la viscosité pour étudier le comportement non newtonien en fonction du cisaillement afin de simuler la fabrication ou les conditions d'usage.
- La classification des matériaux pour déterminer l'étendue de leurs comportements mécaniques.
- Impact de certains paramètres sur la viscosité pour le traitement et la performance de l'utilisation finale.
- Référencement des produits pour leurs capacités à être pompés ou étalés.

## 2.2 Définition de la viscosité

La viscosité est définie comme étant la friction interne d'un fluide, causée par les interactions moléculaires, qui le rendent résistant à l'écoulement. Cette friction apparaît lorsqu'une tranche de fluide doit se déplacer par rapport à une autre tranche. Plus importante est la friction, plus importante est la force nécessaire pour provoquer ce mouvement, qui est appelé cisaillement. Le cisaillement apparaît dès qu'un fluide est physiquement déplacé, comme en versant, pulvérisant, mélangeant, etc. Les fluides fortement visqueux nécessitent donc plus de force pour se déplacer que les substances moins visqueuses.



Isaac Newton a défini la viscosité en se basant sur le modèle représenté sur la figure ci-dessus (qu'il faut voir en 3D). Deux plans parallèles de fluides de surfaces égales (A) sont séparés par une distance dx et se déplacent dans la même direction, à des vitesses différentes  $V_1$  et  $V_2$ . Newton a supposé que la force nécessaire pour maintenir cette différence de vitesse était proportionnelle à la différence de vitesse à travers le liquide, ou gradient de vitesse. Pour exprimer cela, Newton a écrit :

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx}$$

Avec  $\eta$  étant une constante pour un matériau donné, et appelé coefficient de viscosité dynamique.

- Le gradient de vitesse,  $dv/dx$ , est une mesure de la variation de la vitesse à laquelle les couches intermédiaires se déplacent l'une par rapport à l'autre. Il décrit le cisaillement que subit le liquide et est donc appelé taux de cisaillement et sera symbolisé par  $\gamma$  (« shear rate »), dans la suite de la discussion ( $\gamma = dv/dx$ ). Son unité de mesure est la  $s^{-1}$ .

- Le terme  $F/A$  indique la force par unité de surface, qui est requise pour produire le cisaillement et est appelée contrainte de cisaillement et sera symbolisée par  $\tau$  (« shear stress »). Son unité de mesure est le Pa.

En utilisant ces termes simplifiés, le coefficient de viscosité dynamique peut être défini mathématiquement par la formule :

$$\text{Coefficient de viscosité dynamique} = \eta = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\text{contraint e de cisaillement}}{\text{taux de cisaillement}}$$

L'unité de la viscosité, dans le système international est donc le Pa.s ou Poiseuille Pl. On peut également définir la viscosité cinématique, qui est le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique :  $\nu = \eta/\rho$ , qui n'a pas d'unité spécifique dans le système international ( $m^2.s^{-1}$ ), mais que l'on exprimait dans l'ancien système en Stokes (St), où  $1 m^2s^{-1} = 10^4 \text{ St}$  [5].

### 3. Les comportements rhéologiques :

Les lois de dépendance entre  $\gamma$  et  $\tau$  permettent de définir différents comportements rhéologiques des fluides :

#### 3.1 Les fluides newtoniens

Le coefficient de viscosité est constant quel que soit le gradient de vitesse. Exemple eau : quand on tourne une cuillère dans un bol, la résistance à l'avancement ne change pas si on change la vitesse de rotation.

Le comportement d'un fluide newtonien est représenté graphiquement dans la figure ci-dessous.

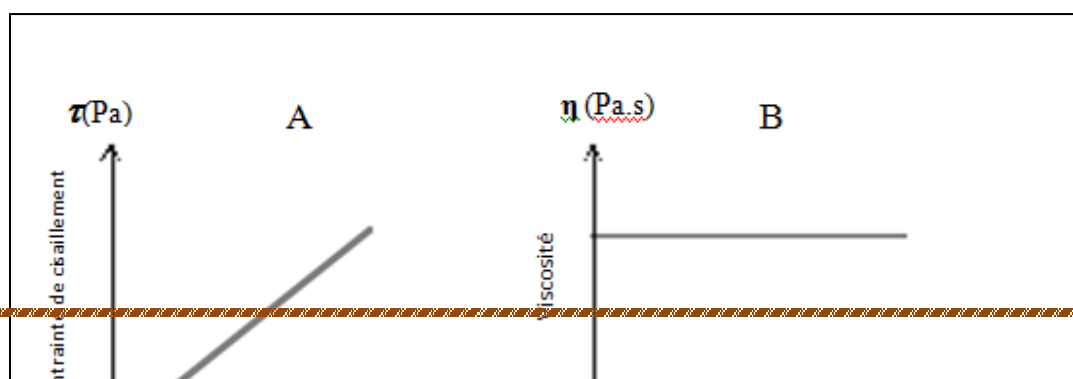


Figure 14 : A : Le taux de cisaillement en fonction de la contrainte de cisaillement

B : La viscosité en fonction du taux de cisaillement

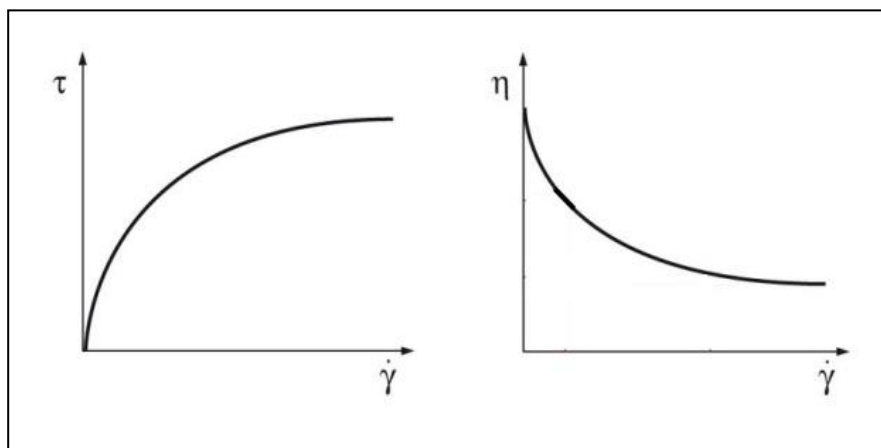
### 3.2 Les fluides non-newtoniens

Un fluide non-newtonien est défini, au sens large, comme étant un fluide pour lequel le rapport  $\tau/\dot{\gamma}$  n'est pas une constante. En d'autres mots, lorsque le taux de cisaillement varie, la contrainte de cisaillement ne varie pas dans les mêmes proportions (ni même nécessairement dans la même direction). La viscosité de tels fluides va donc varier à mesure que le taux de cisaillement change. Un flux non-newtonien peut être imaginé en pensant à tout fluide comme étant un mélange de molécules avec différentes formes et tailles. Lorsqu'elles passent l'une près de l'autre, comme cela arrive durant un écoulement, leur taille, forme et cohésion va déterminer quelle force est nécessaire pour les faire bouger. A chaque taux de cisaillement spécifique, l'alignement peut être différent et une force plus ou moins importante peut être requise pour maintenir le mouvement.

Il y a différents types de comportement d'écoulement non-newtonien, caractérisés par la façon dont la viscosité du fluide varie en réponse à un changement de taux de cisaillement. Les types les plus communs de fluides non-newtoniens sont décrits ci-dessous.

- **Pseudoplastiques**

Ce type de fluide présente une viscosité décroissante lorsque le taux de cisaillement augmente, comme représenté dans la figure ci-dessous.



$\gamma$

$\gamma$

Figure15 : Rhéogramme d'un fluide pseudoplastique

Sans doute le plus commun des fluides non-newtoniens, les pseudoplastiques comprennent la peinture, les émulsions et les dispersions de nombreux types. Ce genre de comportement d'écoulement est parfois appelé "fluidification par cisaillement".

- **Dilatant**

Une viscosité croissante avec une augmentation du taux de cisaillement est caractéristique d'un fluide dilatant et ce comportement est illustré dans la figure ci-dessous.

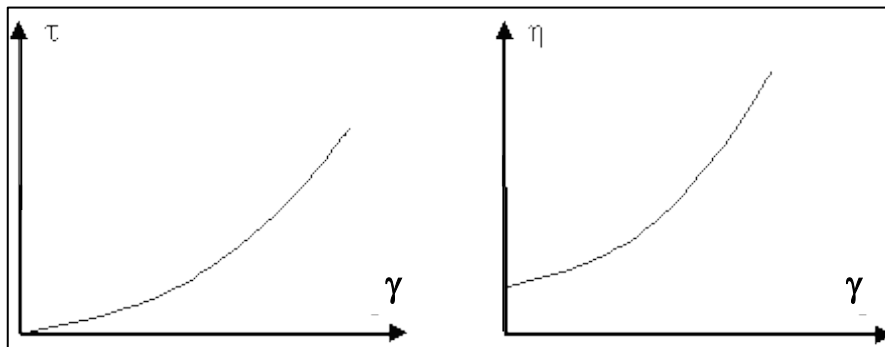


Figure16 : rhéogramme d'un fluide dilatant

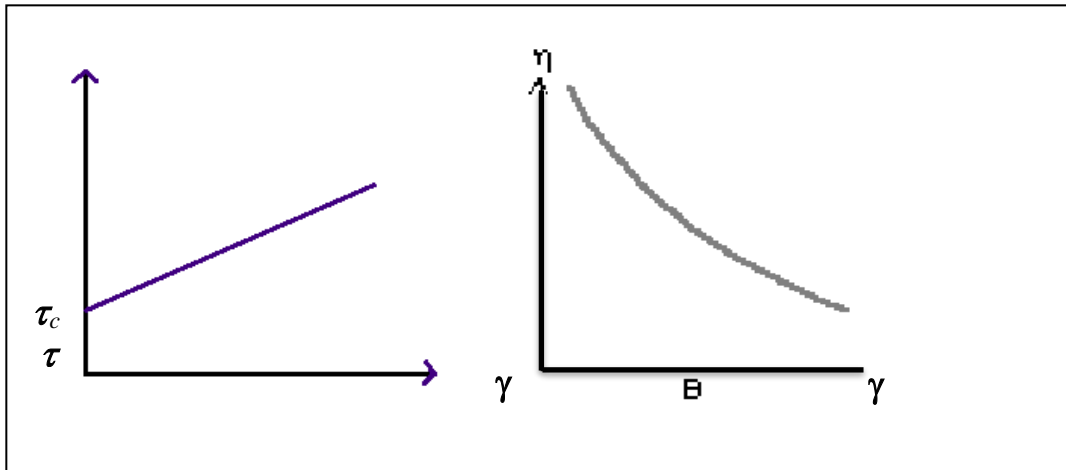
Bien que plus rare que la pseudoplasticité, la dilatance (épaississement) est fréquemment observée dans les fluides contenant un haut taux de solides défloculés, comme les boues d'argile, les composés sucrés, la fécule de maïs dans l'eau et l'eau sablonneuse. La dilatance est également connue sous le terme d'épaississement par cisaillement.

- **Plastique**

Ce type de fluide se comporte comme un solide sous des conditions statiques. Une certaine quantité de force doit être appliquée au fluide avant qu'il n'y ait écoulement. Cette force



est appelée "seuil d'écoulement" ; ça veut dire que ces fluides s'écoulent à partir d'une certaine valeur de contrainte  $\tau_c$ . Le ketchup en est un bon exemple ; son seuil d'écoulement l'empêche de sortir de la bouteille jusqu'à ce qu'elle soit secouée ou frappée, permettant au ketchup de jaillir librement. Une fois le seuil d'écoulement dépassé et l'écoulement engagé, les fluides plastiques peuvent présenter des caractéristiques newtoniennes, pseudoplastiques ou dilatantes. La figure ci-dessous représente l'un de ces cas.



*Figure17 : rhéogramme d'un fluide plastique*

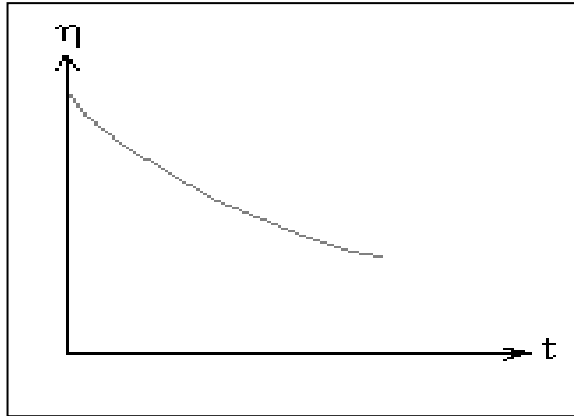
Jusqu'à présent, nous n'avons discuté que sur l'effet du taux de cisaillement sur les fluides non-newtoniens. Que se passe-t-il lorsque le temps est considéré ? Cette question nous conduit à examiner deux types d'écoulement non-newtoniens supplémentaires : les thixotropes et les rhéopectiques [6].

- ***Thixotropie et rhéopexie***

Certains fluides présentent une modification de la viscosité avec le temps, sous des conditions de taux de cisaillement constant. Il y a deux catégories à considérer :

- La thixotropie

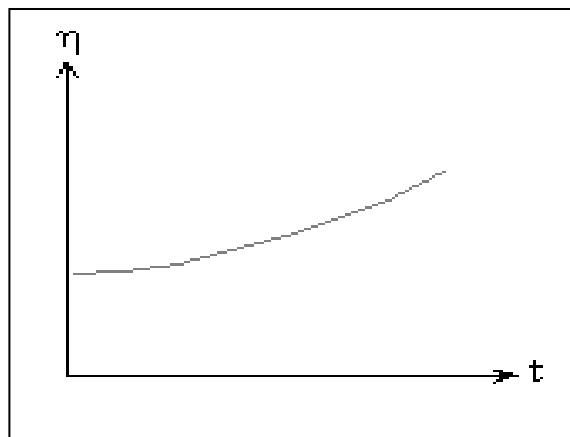
Comme montré dans la figure ci-dessous, un fluide thixotrope subit une décroissance de viscosité avec le temps, lorsqu'il est soumis à un cisaillement constant.



*Figure18 : La viscosité d'un fluide thixotrope en fonction du temps*

➤ La rhéopexie

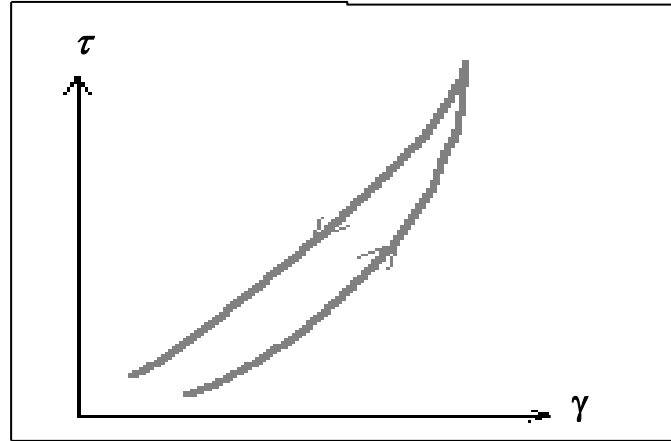
C'est essentiellement le comportement opposé du comportement thixotrope, en ce sens que la viscosité du fluide augmente avec le temps lorsqu'il est soumis à un taux de cisaillement constant. La figure ci-dessous représente graphiquement ce type de comportement.



*Figure19 : La viscosité en fonction du temps pour la rhéopexie*

Un tracé de la contrainte de cisaillement versus le taux de cisaillement est réalisé en augmentant le taux de cisaillement jusqu'à une certaine valeur, puis en le réduisant immédiatement, jusqu'au point de départ. Notons que les courbes "ascendante" et "descendante"

ne coïncident pas. Ce cycle d'hystérésis est provoqué par la diminution de la viscosité du fluide avec l'augmentation du temps de cisaillement.



*Figure 20 : courbe d'une combinaison entre la variation de  $\tau$  de thixotropie et celle de la rhéopexie*

## 4. Les paramètres influençant la viscosité

La viscosité d'un fluide peut varier selon divers paramètres dont les plus importants sont : la température, le taux de solide, la densité et les additifs. Dans le cas de nos échantillons on risque de varier la densité car ça va changer le titre de l'ACP ou de ses boues.

### 4.1 La température

Un des facteurs les plus évidents qui puisse avoir un effet sur le comportement rhéologique d'un matériau est sa température. Puisqu'une augmentation de la température correspond à une augmentation de volume du liquide. Les molécules s'éloignant les unes des autres, les interactions intermoléculaires s'affaiblissent avec l'augmentation de la température. On peut donc s'attendre à une diminution de la viscosité considérablement avec la température.

$$\eta = Ae^{\frac{B}{T}}$$

On montre le modèle mathématique suivant :

Avec a et b étant des constantes dépendant de la nature du liquide et T la température absolue.

### 4.2 Taux de solide

La fluidité de la suspension est liée à la mobilité des particules, cette mobilité est tributaire des interactions entre les particules, et puisque ces interactions augmentent avec le taux de solides donc la viscosité ainsi augmente avec le taux de solide dans une suspension.

## 5. Appareils de mesure

### 5.1 Le rhéomètre

Un **rhéomètre** est un appareil de laboratoire capable de faire des mesures relatives à la rhéologie d'un fluide. Il applique un cisaillement à l'échantillon. Il permet d'étudier fondamentalement les propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension, d'une pâte, etc., en réponse à une force appliquée.

Un rhéomètre est plus sophistiqué et plus cher qu'un viscosimètre. Il permet de connaître les grandeurs fondamentales taux de cisaillement, contrainte de cisaillement  $\tau(t)$  et viscosité.



Les rhéomètres rotatifs sont de loin les plus utilisés. étudié remplit l'espace entre deux pièces coaxiales (le rotor et *Figure 21 : Rhéomètre* entre le couple de rotation, et la vitesse de rotation du rotor, donne la viscosité, à une constante géométrique près.

### 5.2 Le viscosimètre

- Viscosimètre rotationnel de laboratoire

Il mesure le couple nécessaire pour faire tourner une tige en immersion dans un liquide. La tige est entraînée en rotation par un moteur en passant par un ressort calibré.

La résistance à l'écoulement va augmenter en fonction de la grosseur de la tige et/ou la vitesse de rotation.

## V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé une étude bibliographique sur la production de l'acide phosphorique et ses boues générées, ce qui nous a aidé à mieux comprendre le processus de fabrication de l'un des principaux produits de l'OCP (l'acide phosphorique), ainsi que des notions de base sur la rhéologie qu'on va utiliser pour effectuer nos études expérimentales.

## Chapitre3 : Partie expérimentale

---

### I. Introduction :

Dans le cadre d'étudier le comportement rhéologique de l'acide phosphorique et des boues générées, des essais de la viscosité et de rhéologie ont été entamé. Dans ce contexte, ma mission dans ce stage de fin d'étude est de :

- Etudier la viscosité de l'ACP et des boues et d'observer la variation de la viscosité en fonction de la température et du taux de solide.
- Déterminer le comportement rhéologique de l'acide phosphorique et des boues.

### II. Mesure de la viscosité de l'ACP et des boues

- L'objectif de cette partie est d'étudier l'effet de la température ainsi que le taux de solide comme étant les principaux paramètres influençant la viscosité



Même expérience que le 1<sup>er</sup> essaie, mais avant de mesurer la viscosité on calcule le taux de solide de l'échantillon puis à chaque fois on diminue le taux de solide et on mesure la viscosité.

- Calcule du taux de solide :
  - On prend une quantité X de l'échantillon dans 4 flocons
  - On les met dans la centrifugeuse pendant 7min avec 3500tr/s => décantation du solide
  - Récupération de l'acide dans un bécher
  - 3 lavages du solide par l'alcool, à chaque fois on fait la centrifugation pour séparer toute l'acide du solide
  - Séchage du solide dans l'étuve
  - On mesure la quantité Y du solide récupéré et on calcule le taux du solide dans l'échantillon par la relation suivante :

$$T_s = \frac{\text{massedusolide} - \text{massedufacon}}{\text{massedel'échantillon}} \times 100$$



On mesure la viscosité à l'aide d'un viscosimètre rotatif ;  
Cet instrument agit par la rotation d'un cylindre ou disque (tige) qui est plongé dans le matériel à analyser et mesure la résistance de cette substance à une vitesse sélectionnée. La résistance qui en résulte est la mesure du flux de viscosité, dépendant de la vitesse et des caractéristiques de la tige; l'appareil calcule le résultat et la lecture directe de la viscosité est reflétée en cP ou mPa.s (SI).

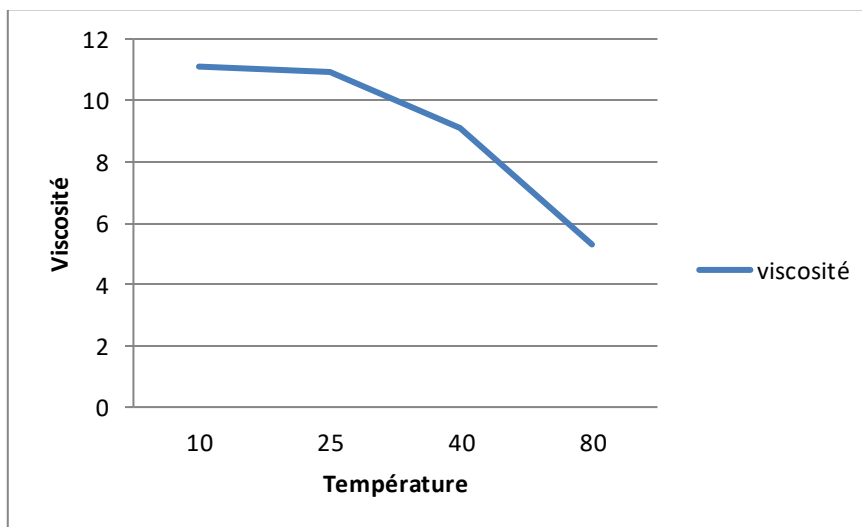


*Figure24 : Viscosimètre rotatif*

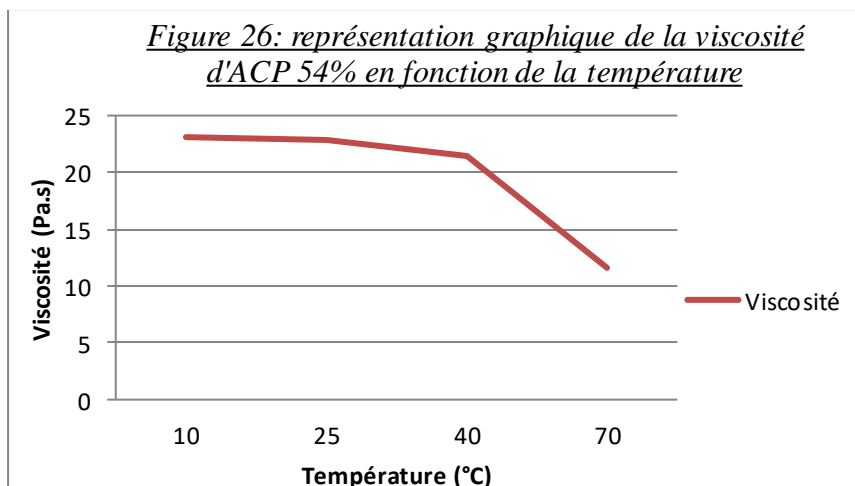
## 2. Résultats et discussions

### 2.1 Effet de la température :

- Les expériences qu'on a fait ont donné les résultats suivants :

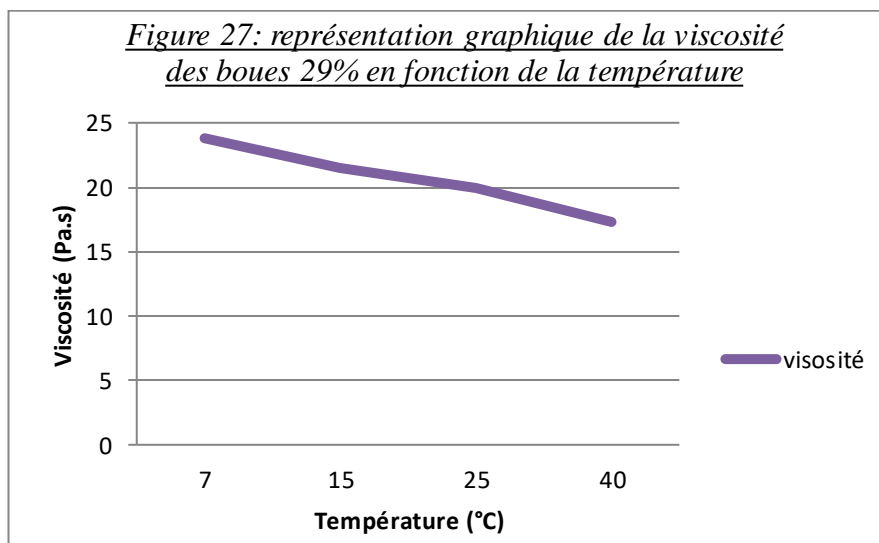


*Figure 25: représentation graphique de la viscosité d'ACP 29% en fonction de la température*

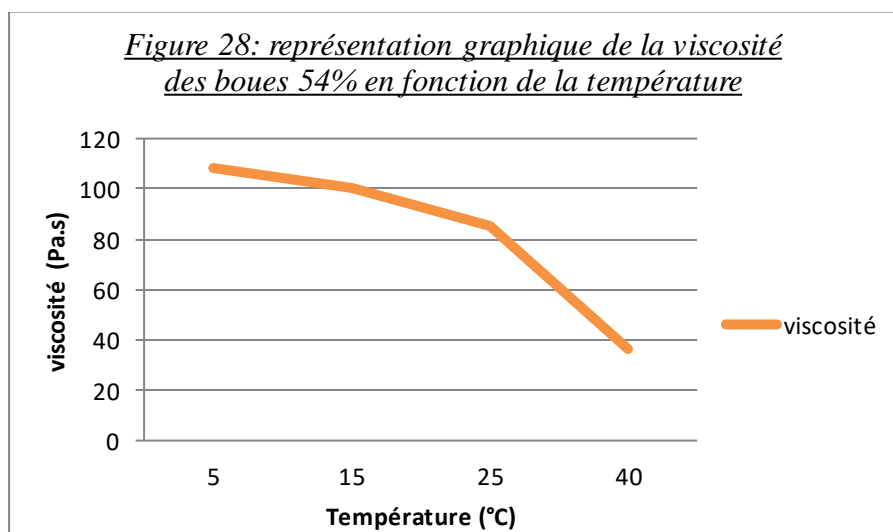




*Figure 27: représentation graphique de la viscosité des boues 29% en fonction de la température*



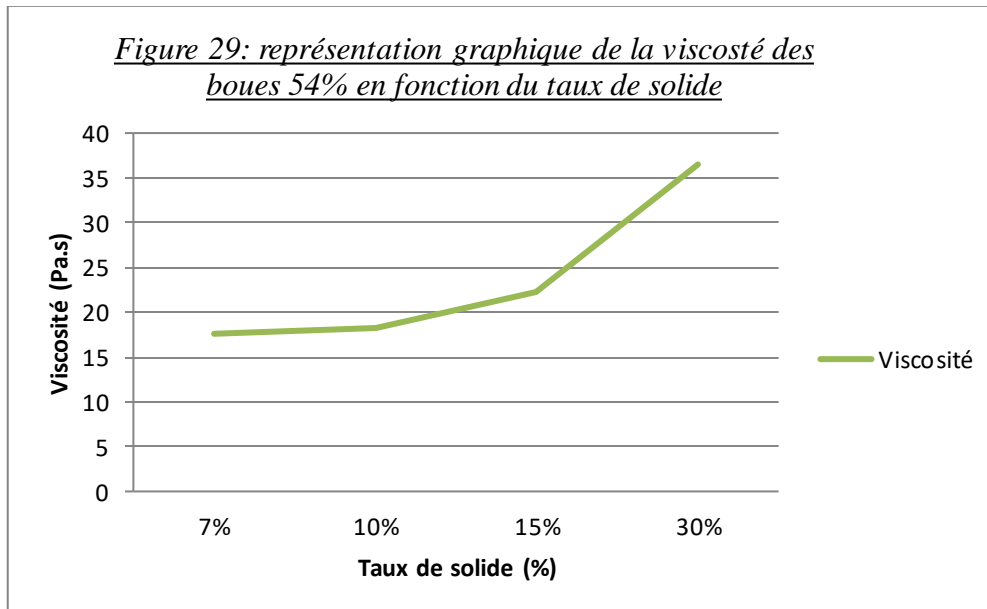
*Figure 28: représentation graphique de la viscosité des boues 54% en fonction de la température*



• **Interprétation :** La viscosité des boues et des acides diminue dans la gamme de température étudiée. La tendance à la diminution de la viscosité à des températures élevées se produit en raison de l'augmentation de l'énergie cinétique des particules favorisant la rupture de la liaison intermoléculaire entre les couches adjacentes, ce qui entraîne une diminution de la viscosité de nos échantillons.

## 2.2 Effet du taux de solide

On a fait les mesures sur les boues 54% seulement car les acides ont un taux de solide très faible ce qui influence sur leur viscosité :



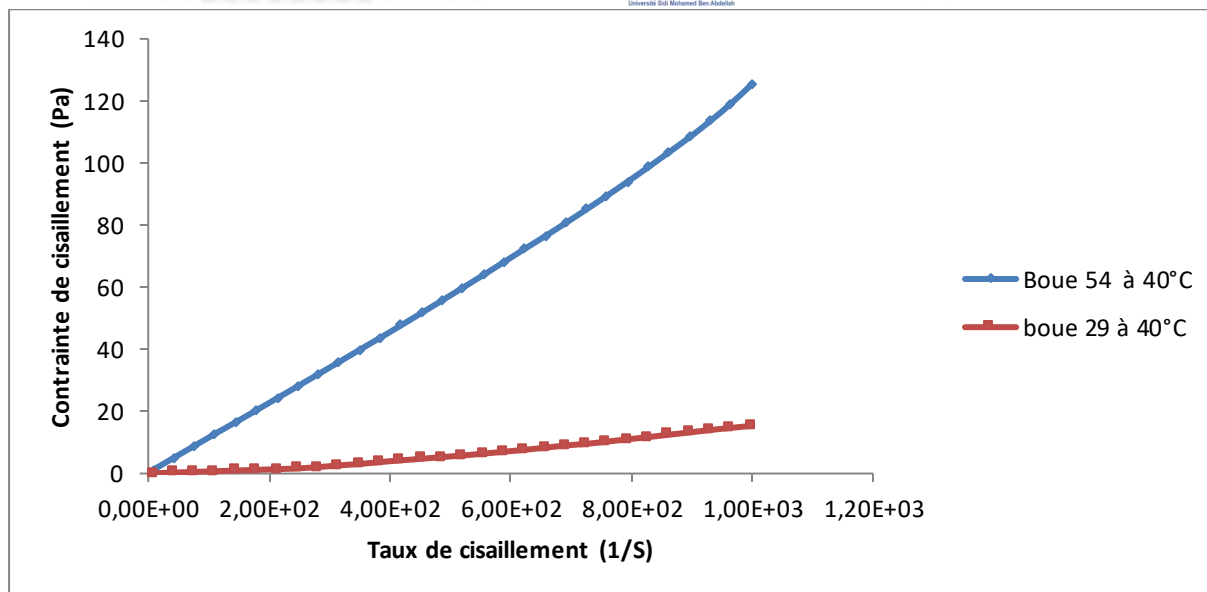
• **Interprétation** : on constate que la viscosité augmente avec le taux de solide puisque les interactions moléculaires augmentent.

### III. L'étude de la rhéologie de l'ACP et des boues

#### 1. Les mesures rhéologiques

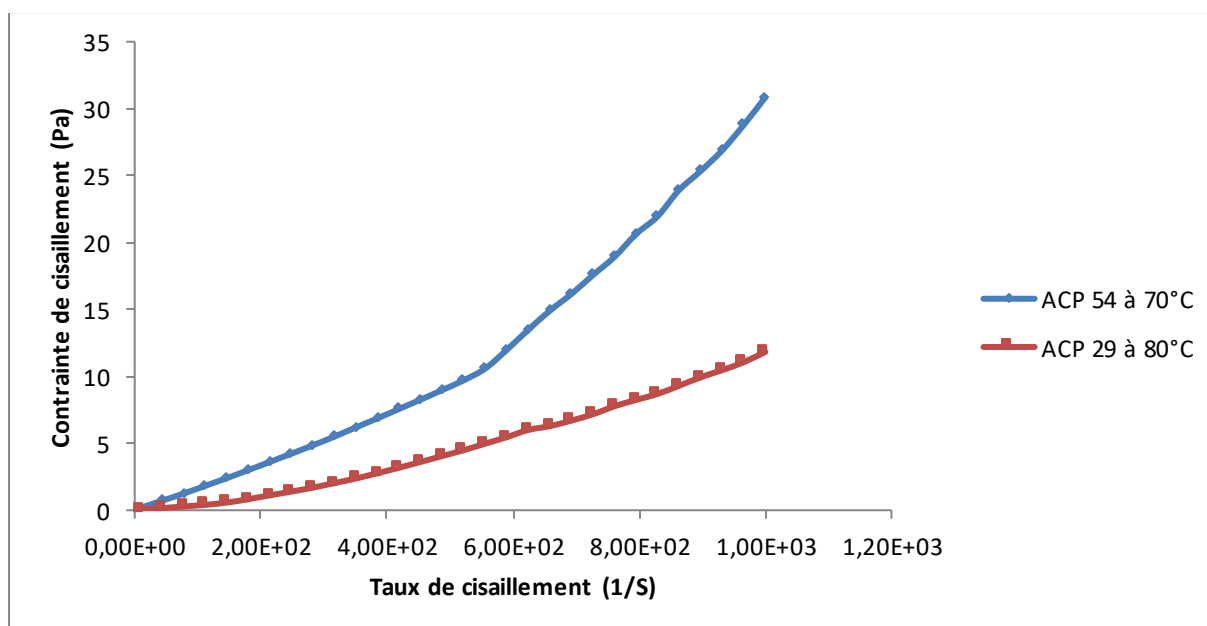
Le rhéomètre rotatif a été utilisé pour l'étude. Un système de capteur approprié est choisi pour une concentration donnée afin de fournir des résultats précis. Le rotor est vissé sur la broche et l'échantillon est versé dans la tasse. Le rotor est tourné très faible vitesse et arrêté par intervalles afin de mesurer directement la température de la suspension à l'aide d'un thermomètre numérique. Une fois que la température désirée de l'échantillon de boues/acides est atteinte, le sélecteur de vitesse ensuite réglé sur la valeur souhaitée. Dans tous les cas la rotation varie d'une vitesse de cisaillement faible à élever. Les mesures sont faites à des conditions optimales des boues et des acides.

#### 2. Résultats et discussions



*Figure 30 : Comportement rhéologique des boues 54% et 29% à 40°C*

- Nous remarquons à partir de la figure 30 que le comportement rhéologique des boues 54% est newtonien (linéaire sans seuil d'écoulement).
- Pour les boues 29% leur comportement rhéologique est peu dilatant.
- Nous pouvons extraire de la figure 1 que les boues 54% sont plus visqueux que les boues 29%.



*Figure 31 : Comportement rhéologique des Acides phosphorique 54% et 29%*

- Le comportement rhéologique des deux acides 54% et 29% est dilatant.
- Il est bien remarquable sur la figure 31 que l'acide phosphorique 54% à 70°C est plus visqueux que l'ACP 29% à 80°C.

On applique le modèle MATLAB pour calculer la viscosité de chaque échantillon.

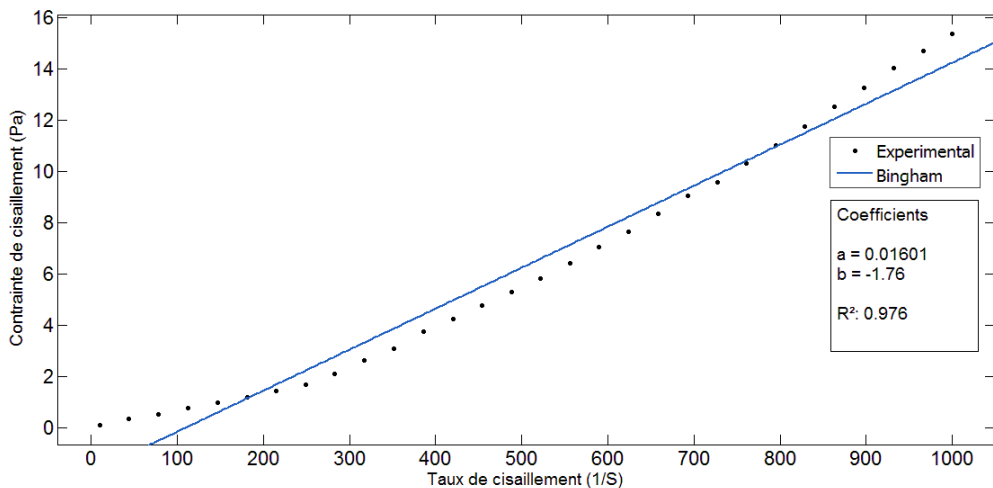


Figure 32 : Régression de la mesure rhéologique des Boues 29% à 40°C au modèle de Bingham ( $\sigma = ay+b$ )

- La viscosité dynamique des boues 29% à 40°C est de 0,01601 Pa.s selon le modèle Bingham.

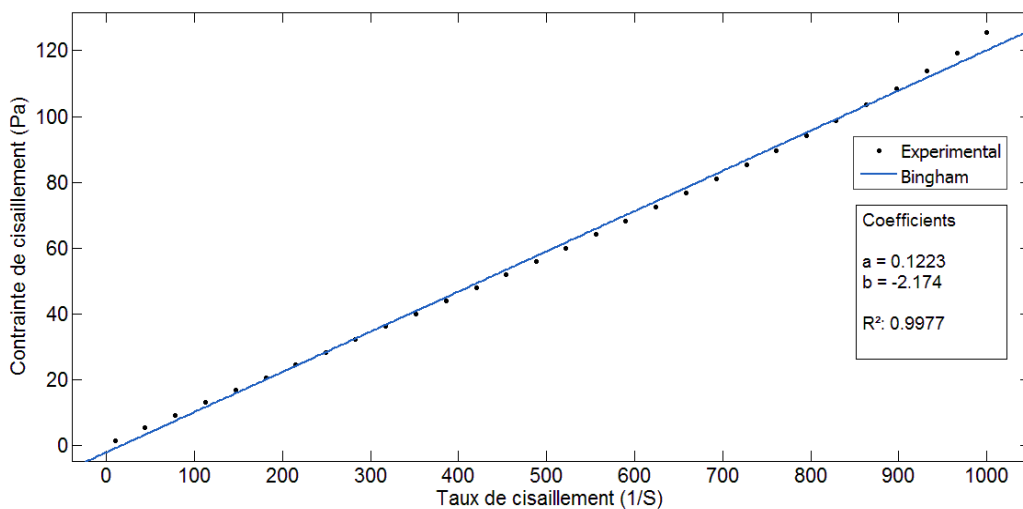


Figure 33 : Régression de la mesure rhéologique des Boues 54% à 40°C au modèle de Bingham ( $\sigma = ay+b$ )

- La viscosité dynamique des boues 54% à 40°C est de 0,1223 Pa.s selon le modèle Bingham.

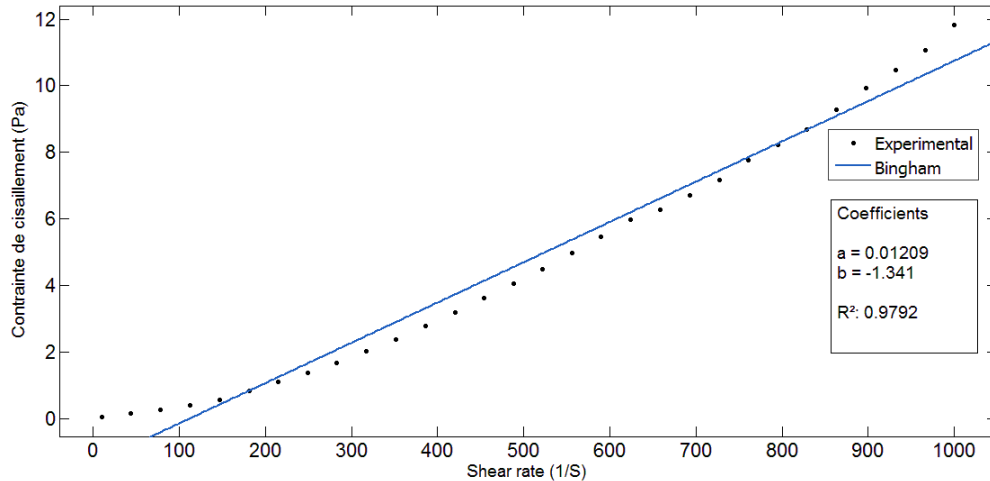


Figure 34 : Régression de la mesure rhéologique de l'ACP 29% à 80°C au modèle de Bingham ( $\sigma = a\gamma + b$ )

- La viscosité dynamique de l'ACP 29% à 80°C est de 0,01209 Pa.s selon le modèle Bingham.

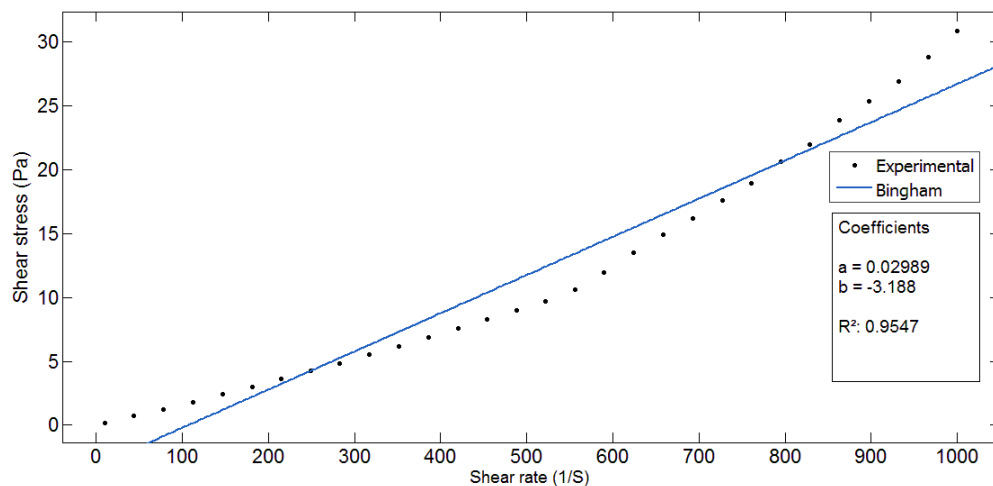


Figure 35 : Régression de la mesure rhéologique de l'ACP 54% à 70°C au modèle de Bingham ( $\sigma = a\gamma + b$ )

- La viscosité dynamique de l'ACP 54% à 70°C est de 0,02989 Pa.s selon le modèle Bingham.

#### IV. Conclusion

Dans ce contexte nous avons réalisé plusieurs essais sur la viscosité et la rhéologie de l'acide phosphorique (29 et 54%) et les boues, et à partir des résultats obtenus, on conclut que :

- La viscosité diminue en fonction de la température et augmente en fonction du taux de solide
- Les deux acides 54% et 29% ont un comportement rhéologique dilatant.
- Les boues 29% ont un comportement rhéologique peu dilatant.
- Les boues 54% sont considérées comme un fluide newtonien.

### Conclusion générale

Mon stage effectué au sein de l'O.C.P. JORF LASFAR m'était une formation pratique, il m'a permis de me familiariser avec le monde professionnel, de prendre conscience des différentes difficultés pouvant entraver ma carrière professionnelle, d'acquérir des connaissances sur le monde de travail et d'avoir une idée sur la vie professionnelle des employés, avec une participation réelle à des travaux de l'entreprise.

Au terme de nos investigations, il est temps de faire le point sur les résultats de travail par rapport aux objectifs fixés, puis d'apporter éventuellement des améliorations et perspectives.

Nous avons abordé dans ce travail, d'une part l'étude bibliographique sur la production de l'acide phosphorique, les boues et des notions de base de la rhéologie et d'autre part l'étude

expérimentale dans laquelle nous avons effectué des mesures de la viscosité et des mesures rhéologiques.

Nous avons abouti aux résultats suivants :

- Le comportement rhéologique des deux acides 54% et 29% est dilatant.
- Le comportement rhéologique des boues 54% est newtonien (linéaire sans seuil d'écoulement).
- Pour les boues 29% leur comportement rhéologique est peu dilatant.

Ces résultats sont des données de base pour un projet assez important d'OCP qui a pour but d'étudier et d'identifier le comportement rhéologique de l'acide phosphorique et des boues, et qui constitue un travail de base pour une recherche plus approfondie.

## Références

[1] [www.ocpgroup.ma](http://www.ocpgroup.ma)

[2] Rapport de stage intitulé de « Le principe de fonctionnement des capteurs de régulation (OCP de Safi) « Aabida Abderrahim » \_2015\_

[3] Rapport de stage (PFE) intitulé de L'évaluation de l'augmentation de cadence de production d'acide phosphorique, au niveau de la nouvelle installation (JFC1) de JORF LASFER \_Anass Benslimane\_FST FES \_ 2017\_



- [4] Donné d'étude bibliographique fournie par la direction de laboratoire à l'OCP \_2018\_
- [5] Rapport annuel\_ Gillet Steve, D.SC. <http://perso.latribu.com/shagar/steve/pdf/sa3.pdf>  
 \_2018\_
- [6] Ressources internationales de chimie  
<http://eduscol.education.fr/rnchimie/phys/rheo/cours/rheo.htm> \_2018\_
- [7] Rapport de stage \_SITR Sara\_ « institut des mines de Marrakech département Chimie industrielle » au Pole chimie de Safi \_2014\_
- [8] MP III/IV Line E - Phosphoric Acid - Rock Receiving Tank Thickening - 02E-PI-001
- [9] MP III/IV Line E - Phosphoric Acid - Rock Slurry Thickening 02E-PF-001 rev 05  
 MP III/IV Line E - Phosphoric Acid - Reaction Area 03E-PF-001 rev 03
- [10] MP III/IV Line E - Phosphoric Acid - Filter A - 03E-PI-007 rev4