



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
العلمي والبحث العالي التعليم وزارة
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA
Département Génie des Procédés et Energétique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ETAT

Spécialité : Génie chimique.

Présenté par

Ines BEKHOUCHE
Yousra CHERIET

Procédés : Enrichissement et production de l'acide phosphorique du phosphate Algérien (Gisement de Bled el Hadba).

Encadré par

Dr. Imen TOUHAMI
ENSTI Annaba

Membres du jury :

Dr. Riyadh BELAMADI	Président	ENSTI-Annaba
Dr. Nassima MALLEM	Examineur	ENSTI-Annaba

Année 2025

Remerciements

Nous tenons, tout d'abord, à exprimer notre profonde reconnaissance Allah Tout-Puissant, source de force, de patience et d'endurance, qui nous a permis de mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Madame Imen TOUHAMI, pour la qualité de son encadrement académique. Sa rigueur, sa disponibilité constante et la justesse de ses orientations ont grandement contribué à l'élaboration de ce mémoire. Son accompagnement méthodique et bienveillant a représenté un véritable appui tout au long de notre démarche.

Nos plus vifs remerciements vont également à Monsieur Bassam AMARA, notre encadrant en entreprise, pour son accueil, son accompagnement technique et la richesse de ses conseils. Grâce à son expertise et à sa pédagogie, nous avons pu évoluer dans un cadre professionnel stimulant, propice à l'apprentissage et à l'approfondissement de nos compétences.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à la direction du complexe industriel SAMIFOS, pour nous avoir accordé l'opportunité d'effectuer notre stage au sein de leurs structures. L'environnement de travail mis à notre disposition, ainsi que la confiance témoignée, ont fortement contribué à la réussite de ce projet.

Nous remercions tout particulièrement l'ensemble de l'équipe du laboratoire CMDO pour leur encadrement technique, leur disponibilité et leur professionnalisme exemplaire. Leur soutien quotidien et leur implication active ont été essentiels au bon déroulement de notre mission.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Monsieur Larbi BEKHOUCHE, dont l'intervention a été déterminante dans l'obtention de ce stage. Son engagement et sa bienveillance méritent toute notre considération.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignant et administratif de l'École Supérieure de Technologie et d'Ingénierie d'Annaba, pour la qualité de l'enseignement reçu tout au long de notre formation, ainsi que pour leur accompagnement tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons notre gratitude la plus sincère à nos familles respectives, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants, ainsi qu'à nos camarades et collègues, pour leur esprit de collaboration et les échanges enrichissants partagés durant cette aventure académique et humaine.

Dédicace

À mon père,

Pour sa force tranquille, son exemple de droiture, et ses sacrifices constants. Son silence, souvent chargé de sagesse, m'a appris la valeur du travail et de l'engagement.

À ma mère,

Pour son amour inépuisable, sa tendresse, ses prières discrètes, et sa présence réconfortante à chaque étape. Elle est mon pilier, ma première source de courage et d'inspiration

À mon frère Mohammed Yacine,

Pour sa maturité, ses paroles justes et sa confiance silencieuse, qui m'ont toujours portée vers le meilleur.

À mon frère Adem,

Pour sa joie de vivre, sa spontanéité et l'énergie positive qu'il a su m'apporter au quotidien.

À mon oncle Saber DERBALA,

Pour sa bienveillance, ses mots porteurs de force et son soutien précieux.

À la mémoire de mes deux grands-pères,

Partis trop tôt, mais toujours vivants dans mon cœur. Que ce modeste travail leur rende hommage.

À mes deux grands-mères,

Pour leur amour pur, leur sagesse et leurs mots pleins de douceur, toujours présents dans mes pensées

À toutes mes tantes et à tous mes oncles, à mes cousins et cousines,

Pour leur affection sincère, leurs encouragements constants et leur fierté qui m'a portée.

À mes amis de cœur,

Ceux qui m'ont accompagnée en dehors du cadre universitaire, pour leur présence fidèle, leur bienveillance sincère et leur capacité à rendre chaque étape plus lumineuse.

À la petite fille que j'étais,

Courageuse malgré les peurs et les épreuves.

Grâce à ta foi en Allah et à ta force intérieure, je suis devenue celle que je suis aujourd'hui.

À ma binôme Yousra, et à tous ceux qui liront ce travail,

En espérant qu'il soit source d'inspiration et d'utilité.

Ines ...

Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu qui nous a facilité et permis d'accomplir ce travail.

Cela dit, c'est avec fierté et gratitude que je dédie ce travail :

Premièrement, à moi-même, forte et patiente, qui ne s'est jamais laissée abattre.

Deuxièmement, à mon amie et ma mère, qui m'a toujours soutenue en toutes circonstances.

Troisièmement, à mon père qui s'est tant sacrifié pour que j'en arrive là, ainsi qu'à ma sœur et à mes frères, mon pilier dans cette vie.

À toute ma famille noble et bienveillante.

À ma binôme Ines.

À tous ceux qui ont cru en moi et m'ont aimé sincèrement.

Yousra ...

ملخص

تتناول هذه الدراسة قضية تامين موارد الفوسفات الجزائرية وتهدف إلى التخفيف من اعتماد البلاد على استيراد حمض الفوسفوريك. واستجابةً لهذا التحدي الاستراتيجي، تم إطلاق مشروع الفوسفات المدمج (PPI) مدينة بئر العاتر ولاية تبسة ، مستهدفاً بشكل خاص مكن بلاد الحدة (BEH) يتمثل الهدف الأساسي لبحثنا في تطوير عملية إثراء رتبة لخم بلاد الحدة، بهدف إنتاج مركز فوسفات يستوفي المتطلبات الصناعية: محتوى لا يقل عن 30% من خماسي أكسيد الفوسفور (P_2O_5) وحد أقصى 1% من أكسيد المغنيسيوم (MgO).

تضمنت المنهجية المتبعة تحاليل حبيبية وكيميائية مفصلة لطبقات المكن المختلفة والخام الكلي، إضافة إلى تجارب المصنع التجريبي لمحاكاة ظروف الإنتاج. وقد أظهرت نتائج تجارب الإثراء الرطب تحسناً ملحوظاً في جودة الخام. لقد حصلنا على مراكز ذات محتويات مستقرة وعالية من P_2O_5 وانخفاض ملحوظ في الشوائب مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) (أقل من 7%) وأكسيد المغنيسيوم (MgO) (أقل من 1%). تُعد هذه الخصائص مثالية لتصنيع حمض الفوسفوريك. علاوة على ذلك، تبين أن العوائد الوزنية ومعدلات استخلاص P_2O_5 مرضية للغاية.

بالتوازي، استكشفت الدراسة إنتاج حمض الفوسفوريك من هذا المركز المثري، مؤكدةً زيادة في محتوى P_2O_5 ونقاء حمض الفوسفوريك (H_3PO_4) بعد التبخير ، على الرغم من ملاحظة تغير طفيف في أكسيد المغنيسيوم. أخيراً، تم إجراء تحليل لإدارة النفايات السائلة، مميّزاً بين المياه الأقل تلوّثاً من مرحلة الإثراء (التي يمكن استعادتها بسهولة) والمياه شديدة التلوّث الناتجة عن إنتاج حمض الفوسفوريك (التي لا يزال معالجتها معقداً ومكلفاً).

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des ressources phosphatées algériennes et vise à pallier la dépendance du pays aux importations d'acide phosphorique. En réponse à cet enjeu stratégique, le Projet Phosphate Intégré (PPI) a été initié, ciblant spécifiquement le gisement de Bled El Hadba (BEH). L'objectif principal de notre recherche est de développer un procédé d'enrichissement par voie humide pour le minerai de BEH, afin d'obtenir un concentré de phosphate répondant aux exigences de l'industrie : une teneur minimale de 30 % en P_2O_5 et un maximum de 1 % en MgO.

La méthodologie adoptée a impliqué des analyses granulométriques et chimiques détaillées des différentes couches du gisement et du minerai global, complétées par des essais en usine pilote pour simuler les conditions de production. Les résultats des essais d'enrichissement par voie humide ont démontré une amélioration significative de la qualité du minerai. Nous avons obtenu des concentrés avec des teneurs stables et élevées en P_2O_5 (supérieures à 30 %), une réduction notable des impuretés telles que le CO_2 (inférieures à 7 %) et le MgO (inférieures à 1 %). Ces caractéristiques sont jugées optimales pour la fabrication d'acide phosphorique. De surcroît, les rendements pondéraux et les taux de récupération du P_2O_5 se sont avérés très satisfaisants.

Parallèlement, l'étude a exploré la production d'acide phosphorique à partir de ce concentré enrichi, confirmant l'augmentation de la teneur en P_2O_5 et de la pureté de H_3PO_4 après évaporation, malgré une légère variation du MgO. Enfin, une analyse de la gestion des effluents a été menée, distinguant les eaux relativement peu polluées de l'étape d'enrichissement (aisément valorisables) des eaux hautement contaminées issues de la production d'acide phosphorique (dont le traitement reste complexe et onéreux).

Abstract

This study addresses the valorisation of Algerian phosphate resources and aims to mitigate the country's reliance on phosphoric acid imports. In response to this strategic challenge, the Integrated Phosphate Project (PPI) was initiated, specifically targeting the Bled El Hadba (BEH) deposit. The primary objective of our research is to develop a wet beneficiation process for BEH ore, in order to produce a phosphate concentrate that meets industrial requirements: a minimum P_2O_5 content of 30% and a maximum MgO content of 1%.

The methodology employed involved detailed granulometric and chemical analyses of the various deposit layers and the overall ore, complemented by pilot plant trials to simulate production conditions. The results from the wet beneficiation tests demonstrated a significant improvement in ore quality. We obtained concentrates with stable and high P_2O_5 contents (above 30%), a notable reduction in impurities such as CO_2 (below 7%) and MgO (below 1%). These characteristics are deemed optimal for phosphoric acid manufacturing. Furthermore, both weight yields and P_2O_5 recovery rates proved to be very satisfactory.

Concurrently, the study explored the production of phosphoric acid from this enriched concentrate, confirming an increase in P_2O_5 content and H_3PO_4 purity after drying, despite a slight variation in MgO. Finally, an analysis of effluent management was conducted, distinguishing less polluted waters from the beneficiation stage (easily recoverable) from highly contaminated waters generated during phosphoric acid production (whose treatment remains complex and costly).

Liste des abréviations

Abréviation	Nom complet
BEH	Bled El Hadba
SGA	Studiengesellschaft für Eisenerzaufbereitung (Laboratoire)
CMDO	Complexe minier de Djebel El Onk
Cs	Couche somitale
Cp	Couche principale
Cb	Couche basale
AP	Acide phosphorique
Evap	Évaporation
PPI	Projet Phosphate Intégré
P₂O₅	Pentoxyde de phosphore
MgO	Oxyde de magnésium
CO₂	Dioxyde de carbone
H₃PO₄	Acide phosphorique (formule chimique)
PM	Produit Marchand
SAA	Spectromètre d'absorption atomique
MIBC	Méthyl-isobutyl-carbinol (agent moussant)
Rp	Rendement poids
HCl	Acide chlorhydrique
H₂SO₄	Acide sulfurique
HClO₄	Acide perchlorique
La₂O₃	Oxyde de lanthane
CuSO₄	Sulfate de cuivre
CaCO₃	Carbonate de calcium
A	Acide sulfurique
H	Eau
F	Phosphate
PG	Phosphogypse
APV	Acide Phosphorique Vaporisée
APP	Acide Phosphorique Pur

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau 1	Matériels et instruments utilisés au niveau de la chaîne de production de l'AP	12
Tableau 2	Produits utilisés dans notre étude	15
Tableau 3	Résultats des essais granulo-chimiques sur les 3 couches	23
Tableau 4	Analyses granulo-chimiques à sec du phosphate globale BEH	24
Tableau 5	Résultats de l'essai par voie humide du phosphate BEH	24
Tableau 6	Résultats de l'essai 01 de l'enrichissement par voie humide	25
Tableau 7	Résultats de l'essai 02 de l'enrichissement par voie humide	26
Tableau 8	Résultats de l'essai 03 de l'enrichissement par voie humide	26
Tableau 9	Comparaison des résultats de l'enrichissement par voie humide	27
Tableau 10	Tableau comparatif entre les résultats des études en Algérie et d'autres pays	28
Tableau 11	Synthèse comparative des gisements phosphatés selon leur qualité brute, potentiel d'enrichissement et rendement	28
Tableau 12	Les différentes valeurs en P_2O_5 , MgO et H_3PO_4 des 3 essais	29
Tableau 13	Tableau comparatif entre notre étude et les études des autres pays	30

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure 1	Carte de situation géographique et géologique des gisements (SONAREM 1979)	03
Figure 2	SOMIPHOS spa	05
Figure 3	Calcimètre de Bernard (CO ₂)	12
Figure 4	Spectromètre d'absorption atomique (SAA)	12
Figure 5	Auto Analyzer Technicon (colorimétrie)	12
Figure 6	Broyeur	13
Figure 7	Diviseur à riffle	13
Figure 8	Concasseur manuel	13
Figure 09	Tamis vibrant	14
Figure 10	Opération de l'attrition	14
Figure 11	Les couches de gisement BEH	16
Figure 12	Enrichissement par voie humide	18
Figure 13	Courbes des essais granulométrique	22
Figure 14	Chaine de fabrication de l'acide phosphorique par simulation Hysys	30

Sommaire

Remerciements

Dédicace

ملخص

Résumé

Abstract

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 13

Chapitre 01: Description de l'entreprise du stage, motivation,
problématique 4

I.1 Présentation de l'entreprise SOMIPHOS 5

I.2 .Motivation 6

I.3.Problématique 6

Chapitre 02 : Etat De l'art et recherche Bibliographique7

II.1- Historique de fabrication du phosphate 8

II.2- Méthodes traditionnelles de production d'acide
phosphorique 8

II.2.1. Méthode de chauffage avec des acides 8

II.2.2. Procédé thermique (réduction carbothermique) 8

II.2.3. L'extraction par des acides organiques 9

II.2.4. Processus microbiens 9

II.3- Évolution vers des pratiques modernes 9

II.4- Avantages environnementaux des procédés modernes 9

II.5- Défis environnementaux persistants 9

II.6- Perspectives d'avenir	10
Chapitre 03 : Solutions proposées et expérimentations menées	11
III.1- Matériels et méthodologie	12
III.1.1. Matériels	12
III.1.2. Produit	15
III.1.3. Méthodologie	15
III.1.4. Approches d'enrichissement du phosphate du gisement de Bled El Hedba	19
III.1.5. Clarification sur le traitement humide	19
III.1.6.: La convention analytique du P_2O_5	19
III.1.7: Réduction et la valorisation du magnésium dans la production d'AP	20
Chapitre 04 : Résultats et discussions	21
IV.1. Résultats et discussions	22
IV.1.1. Partie 1 : Enrichissement et valorisation du phosphate BEH	22
IV.1.2. Partie 2 : procédés de fabrication de l'acide phosphorique	29
Conclusion générale.....	23
Références	23
Annexes.....	23

Introduction générale

Introduction générale

L'acide phosphorique, principal dérivé de la chimie du phosphore, est un produit essentiel utilisé dans de nombreux secteurs industriels [1] : engrais, détergents, alimentation animale, insecticides, huiles lubrifiantes et plastifiants. En Algérie, la demande élevée pour ce produit contraste avec l'absence de fabrication locale, entraînant une dépendance aux importations aux conséquences économiques significatives. Cette situation affecte la balance commerciale, expose le pays aux fluctuations des prix mondiaux et crée des risques d'approvisionnement.

Face à ce constat, l'État Algérien a lancé le Projet Phosphate Intégré (PPI) [2], piloté initialement par la SONATRACH et MANAL Group, et désormais porté par plusieurs entités, dont la SOMIPHOS (au cœur de cette étude), et ASMIDAL.

Ce projet stratégique vise à développer l'exploitation du gisement de phosphate de Bled El Hadba (BEH) à Tébessa, sa conversion chimique à Wadi al-Kabrit ; et s'appuie sur des installations portuaires à Annaba. ,il représente une étape clé vers l'autonomie dans le secteur chimique et s'inscrit dans les Objectifs de Développement

Cependant, le projet rencontre un défi majeur : l'enrichissement du phosphate de BEH, caractérisé par une teneur en P_2O_5 (23%) et une teneur en MgO (4,4%). L'objectif central de cette étude est donc de développer un procédé d'enrichissement permettant de valoriser ce minerai pour produire un concentré répondant aux spécifications industrielles :

- Minimum 30% de P_2O_5
- Maximum 1% de MgO

Parmi les méthodes d'enrichissement existantes (voie sèche et voie humide), SOMIPHOS[2] a choisi de privilégier le traitement par voie humide. Une unité dédiée sera construite à BEH.

Le développement de ce procédé repose sur un programme d'essais de laboratoire complété par des audits des procédés humides existants sur le site de Djebel Onk Sud (CMDO) et Laboratoire SGA Allemagne.

Afin de répondre à cet objectif, ce travail est structuré comme suit :

1. **Une étude bibliographique approfondie** présentera l'état des connaissances sur les gisements phosphatés algériens (notamment BEH), les techniques d'enrichissement par voie humide, et les défis spécifiques liés à la réduction du MgO.
2. **La méthodologie employée** sera détaillée, décrivant les essais de laboratoire réalisés, les protocoles expérimentaux suivis et l'analyse des données issues des audits d'usine.

Introduction

3. **La discussion des résultats** présentera et interprétera les données obtenues expérimentalement, évaluant l'efficacité du procédé développé pour atteindre les teneurs cibles en P_2O_5 et MgO .
4. **Enfin, une conclusion synthétisera** les principaux résultats, évaluera la faisabilité technique du procédé proposé pour la valorisation du phosphate de BEH, et proposera des perspectives pour la suite du projet PPI.

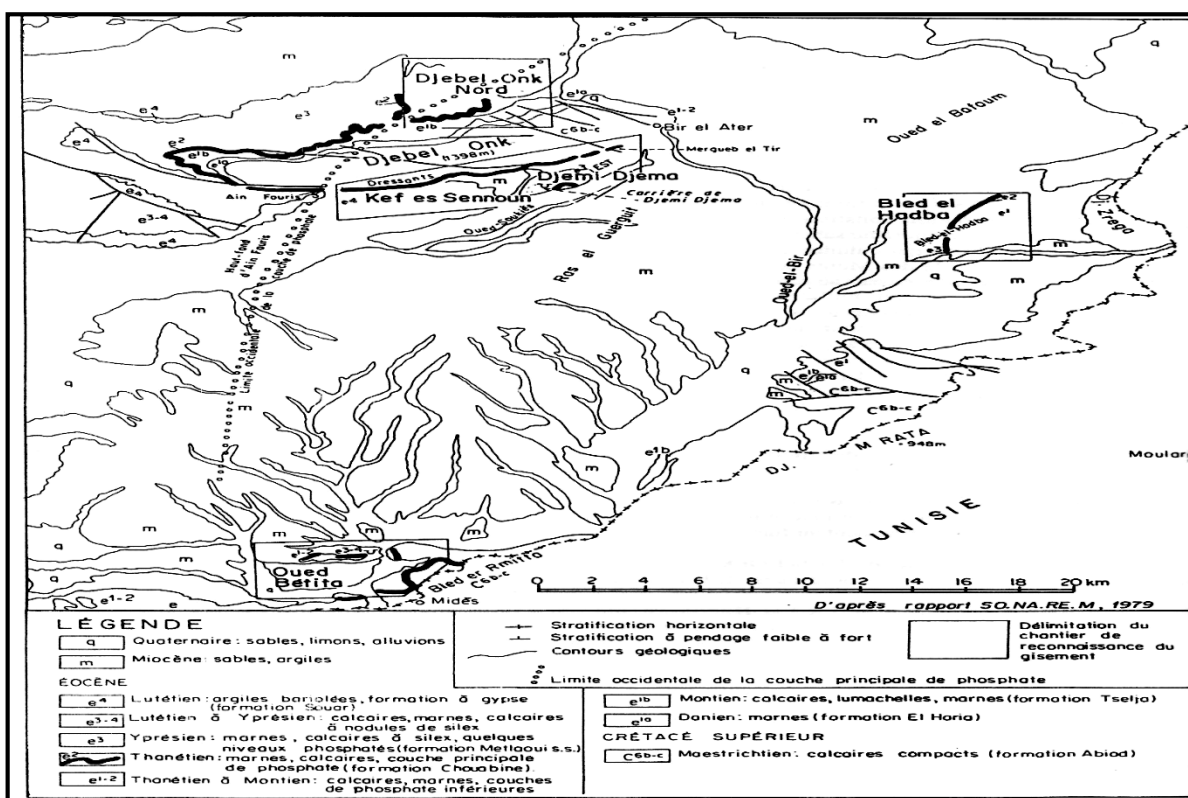


Figure (01) : Carte de situation géographique et géologique des gisements
(SONAREM 1979)

Chapitre 01 :

*Description de l'entreprise
du stage, motivation,
problématique*

I.1 Présentation de l'entreprise SOMIPHOS

SOMIPHOS [2] (Société des Mines de Phosphates), filiale du groupe MANAL, est une entreprise minière de premier plan en Algérie ; créée en janvier 2005 suite à la réorganisation de FERPHOS spa, elle est une société par actions à capital public, détenue entièrement par MANAL groupe ; située à Tébessa, à l'est de l'Algérie, SOMIPHOS est la plus grande société minière du pays en termes de capitalisation boursière , elle se spécialise dans l'exploitation des mines de phosphate et mène divers projets de développement dans le secteur minier.

La vision de SOMIPHOS repose sur des valeurs universelles et s'articule autour de la création de richesses, la rentabilité, la consolidation des performances et l'offre de solutions optimales aux clients et partenaires , elle met un point d'honneur à favoriser une communication fiable entre tous les acteurs impliqués.

Pour concrétiser cette ambition ; l'entreprise adopte une approche fondée sur la gestion par objectifs , ceux-ci sont déclinés à chaque niveau hiérarchique sous forme de «contrats internes», établissant des centres de responsabilités autonomes, dotés d'une marge de manœuvre suffisante pour atteindre les objectifs fixés.

Dans une démarche de développement durable, SOMIPHOS [2] mise sur l'intensification de ses activités en amont et en aval par ASMIDAL et SONATRACH .

Cette stratégie découle des spécificités de son secteur marqué par l'incertitude liée à la recherche, l'imprévisibilité des gisements et le coût élevé des ressources non renouvelables.



Figure (02) :SOMIPHOS spa

I.2 .Motivation

Le projet d'exploitation et d'enrichissement du gisement de phosphate de Bled El Hadba s'inscrit dans une démarche stratégique et économiquement impérative, visant à valoriser une ressource naturelle d'importance capitale pour l'Algérie et l'industrie mondiale des engrais.

Nos études démontrent une ressource d'excellente qualité, avec des fractions riches en P_2O_5 et très faibles en impuretés comme le CO_2 et le MgO , idéales pour l'acide phosphorique. L'efficacité et la reproductibilité du processus d'enrichissement ont été confirmées, garantissant un concentré de haute pureté et des taux de récupération solides. Cette valorisation du minerai fin, combinée à son impact sur l'autosuffisance nationale et le développement économique, en fait un investissement stratégique majeur pour l'Algérie.

I.3.Problématique

Comment concevoir et mettre en œuvre un processus d'enrichissement du minerai de phosphate de Bled El Hadba qui maximise la récupération du P_2O_5 dans un concentré de qualité marchande supérieure (faible en CO_2 et MgO), tout en gérant efficacement la complexité granulométrique et la nature des impuretés, afin d'assurer la viabilité technique et économique du projet sur le long terme ?

Chapitre 02 :
Etat De l'art et recherche
Bibliographique

II.1- Historique de fabrication du phosphate

En 1669, Le phosphore a été découvert par Hennig Brand, un alchimiste allemand, en chauffant de l'urine pour tenter de créer de l'or. Il obtint une substance brillante : le phosphore blanc [2]. Au début du XVIIIe siècle, plus précisément en 1770, les scientifiques ont commencé à étudier des matériaux naturels y compris les os, qui contiennent du phosphate de calcium, le chimiste néerlandais Hermann Boerhaave a utilisé des méthodes expérimentales pour chauffer les os avec des acides ce qui a entraîné la décomposition du phosphate de calcium et la production d'acide phosphorique ; après avoir isolé l'acide Boerhaave a documenté ses résultats et ses observations, contribuant ainsi à la diffusion des connaissances sur ce nouveau composé chimique.

Au XVIIIe siècle, le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele a été l'un des premiers à étudier l'acide phosphorique de manière plus systématique ; en le produisant par l'action de l'acide sulfurique sur le phosphate de calcium.

Ce n'est qu'au XIXe siècle que l'acide phosphorique a commencé à être produit à grande échelle ; notamment pour son utilisation dans les engrais agricoles ce qui a révolutionné l'agriculture moderne en augmentant les rendements des cultures.

Parallèlement, il a trouvé des applications dans l'industrie alimentaire ; comme acidifiant dans les boissons gazeuses. Aujourd'hui, avec la prise de conscience croissante des préoccupations environnementales, son utilisation dans divers produits a été réglementée. Il est également utilisé dans de nombreux secteurs industriels, allant de la fabrication de produits chimiques à la production de matériaux électroniques, témoignant de son importance et de sa polyvalence [1].

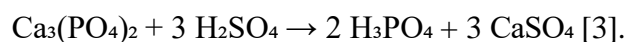
Dans ce contexte, l'acide phosphorique est produit par quatre méthodes traditionnelles

II.2- Méthodes traditionnelles de production d'acide phosphorique

II.2.1. Méthode de chauffage avec des acides

Cette méthode consiste à chauffer du phosphate de calcium (issu d'os calcinés ou de roches phosphatées) avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4). Cette réaction chimique libère de l'acide phosphorique (H_3PO_4) et forme comme sous-produit du sulfate de calcium (gypse ou phosphogypse). C'est la base du procédé humide classique utilisé dans l'industrie.

- L'équation chimique de base est :



II.2.2. Procédé thermique (réduction carbothermique)

Basé sur la réduction du phosphate de calcium par le carbone, permet d'obtenir un acide très pur avec peu de sous-produits, mais il est énergivore et coûteux, ce qui limite son utilisation à grande échelle [4].

II.2.3. L'extraction par des acides organiques

Constitue une alternative plus écologique, utilisant des matières naturelles et générant des co-produits valorisables, mais cette méthode souffre d'une faible efficacité et d'une pollution potentielle liée aux solvants utilisés [5].

II.2.4. Processus microbiens

Ils s'appuient sur des micro-organismes capables de solubiliser le phosphate, ce qui en fait une option durable et biologique ; néanmoins, leur lenteur et leur dépendance à des conditions environnementales contrôlées limitent leur rentabilité industrielle [6].

II.3- Évolution vers des pratiques modernes

Les procédés modernes de fabrication de l'acide phosphorique ont évolué pour améliorer l'efficacité et réduire l'impact environnemental. Des technologies avancées, telles que le contrôle en ligne de la concentration des acides et la régulation de la cristallisation du gypse, ont été intégrées pour optimiser le rendement et la qualité du produit final[7].

Par ailleurs, des entreprises comme OCP et PhosAgro ont investi dans des installations utilisant des technologies plus propres [7], visant à réduire les émissions de carbone et à améliorer l'efficacité énergétique. Par exemple, OCP a lancé une nouvelle installation au Maroc en 2023, augmentant sa capacité de production de 15 % tout en réduisant les émissions de carbone de 8 % grâce à l'utilisation de technologies plus propres [8].

II.4- Avantages environnementaux des procédés modernes

- **Réduction des émissions de CO₂** : Les nouvelles installations intègrent des technologies de capture et de stockage du carbone, permettant de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre.
- **Utilisation de matières premières recyclées** : Certaines entreprises explorent l'utilisation de phosphates issus de déchets agricoles ou de l'industrie alimentaire, contribuant à une économie circulaire et à la réduction de la dépendance aux ressources naturelles [9].
- **Valorisation des sous-produits** : Des efforts sont déployés pour valoriser le phosphogypse, sous-produit de la fabrication, en l'utilisant dans la production de matériaux de construction, réduisant ainsi les déchets industriels [10].

II.5- Défis environnementaux persistants

- **Gestion du phosphogypse** : Ce sous-produit peut contenir des métaux lourds et des éléments radioactifs, nécessitant une gestion rigoureuse pour éviter la contamination des sols et des ressources en eau [10].
- **Consommation énergétique** : Bien que réduite, la consommation d'énergie reste élevée, notamment dans les procédés thermiques, limitant leur viabilité économique et environnementale [11].
- **Émissions résiduelles** : Même avec des technologies avancées, des émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants peuvent subsister, nécessitant une surveillance continue et des améliorations technologiques [9].

II.6- Perspectives d'avenir

- **Intégration de sources d'énergie renouvelable :** Des entreprises comme EuroChem adoptent des solutions d'énergie solaire pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et diminuer la consommation énergétique [8].
- **Développement de procédés biotechnologiques :** La recherche explore des méthodes basées sur des biotechnologies pour produire de l'acide phosphorique, offrant des alternatives plus écologiques et potentiellement plus efficaces [9].



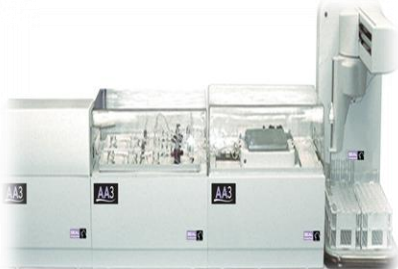
Chapitre 03 :
Solutions proposées et
expérimentations menées


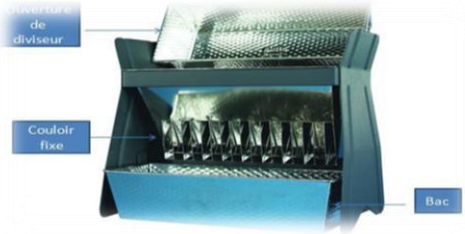

III.1- Matériels et méthodologie



III.1.1. Matériels

Dans le cadre de notre projet, le choix du matériel joue un rôle clé dans la réalisation des expériences ; ils sont regroupés dans le tableau 01.

Tableau (01) : matériels et instruments utilisés au niveau de la chaîne de production de l'AP

Matériels	Description	Figures
<p align="center">Calcimètre de Bernard (CO₂)</p>	<p>Cet appareil permet de mesurer avec précision le volume de dioxyde de carbone (CO₂) dégagé lors de la réaction entre l'acide Chlorhydrique (HCl) et le carbonate de calcium (CaCO₃) présent dans les échantillons.</p>	 <p align="center">Figure (03)</p>
<p align="center">Spectromètre d'absorption atomique (SAA)</p>	<p>La SSA repose sur l'analyse de la longueur d'onde absorbée correspond à l'énergie requise pour faire passer les électrons de l'état fondamental à un niveau d'énergie supérieur. Elle permet une analyse précise de la composition élémentaire des échantillons (Mg)</p>	 <p align="center">Figure (04)</p>
<p align="center">Autoanalyzer Technicon (colorimétrie)</p>	<p>La colorimétrie consiste à injecter un petit volume d'une solution échantillon dans un fluide en mouvement, qui le transporte vers un détecteur chargé d'enregistrer les variations d'un paramètre physico-chimique.</p>	 <p align="center">Figure (05)</p>

<p>Broyeur</p>	<p>Un broyeur est un appareil conçu pour réduire des matières solides en particules plus petites, voire en poudre. Il est couramment utilisé pour le traitement des matériaux afin de faciliter leur analyse ou leur transformation.</p>	 <p>Figure (06)</p>
<p>Diviseur à riffle</p>	<p>Un diviseur est un dispositif permettant de répartir un échantillon en plusieurs portions de manière homogène et précise, garantissant ainsi une représentativité optimale des analyses à effectuer.</p>	 <p>Figure (07)</p>
<p>Concasseur manuel</p>	<p>Le concasseur manuel est un appareil mécanique simple utilisé pour réduire la taille de matériaux durs grâce à la force physique humaine. Contrairement aux concasseurs industriels motorisés ; il fonctionne sans électricité ni source d'énergie externe.</p>	 <p>Figure (08)</p>

<p>Tamis vibrant</p>	<p>Le tamis vibrant est un dispositif de tamisage qui fonctionne grâce à un moteur vibrant fixé à l'extérieur du tamis ; la vibration facilite la séparation des poudres et granulés en fonction de leur taille.</p>	 <p>Figure (09)</p>
<p>Attrition</p>	<p>L'attrition correspond à un phénomène de dégradation granulométrique résultant de différents mécanismes tels que la fragmentation et l'abrasion. Ce processus, influencé par le mouvement vigoureux du lit de particules, entraîne la formation de particules de tailles variées ainsi que de fines poussières.</p>	 <p>Figure (10)</p>

III.1.2. Produit

On a organisé les produits utilisés à la l'enrichissement et la fabrication de l'acide phosphorique dans le tableau suivant ;

Tableau (02) : Produits utilisés dans notre étude

Produit	Description
Acide Sulfurique (H ₂ SO ₄)	L'acide sulfurique est un acide minéral fort et un composé chimique très important dans l'industrie.
Acide Perchlorique (HClO ₄)	L'acide perchlorique est également un acide minéral très puissant, reconnu pour ses propriétés oxydantes.
Oxyde de Lanthane (La ₂ O ₃)	L'oxyde de lanthane est un composé inorganique du lanthane et de l'oxygène. Il se présente sous forme de poudre blanche inodore C'est l'un des oxydes de terres rares les plus stables et les plus couramment produits.
Sulfate de cuivre (CuSO ₄)	Le sulfate de cuivre est un composé inorganique résultant de la réaction du cuivre avec l'acide sulfurique. Il est très soluble dans l'eau, donnant des solutions bleues.
Eau (H ₂ O)	L'eau est une molécule simple et omniprésente, essentielle à la vie sur Terre. C'est un liquide transparent, inodore et insipide à température ambiante et pression atmosphérique standard.
Acide Chlorhydrique (HCl)	L'acide chlorhydrique est une solution aqueuse de chlorure d'hydrogène (gaz HCl). C'est un acide minéral fort et extrêmement corrosif.

III.1.3. Méthodologie

III.1.3.1-Partie 1 : Enrichissement de phosphate

III.1.3.1.1. Etude de trois couches de gisement

Au niveau de gisement (BEH) ; il y a 4 couches ; on se basant dans notre étude sur ces 3 : sommitale, principale (riche en P₂O₅), basale. Pour les essais d'enrichissement du minerai de BEH, des échantillons de 5 kg de chacune des trois couches désignées du gisement ont été prélevés, les essais de laboratoire ont été effectués sur chacune des couches, la principale différence entre les échantillons des différentes couches réside dans la teneur en P₂O₅ et en MgO de chaque échantillon, la minéralogie des échantillons est très similaire et les différences

de teneur en P_2O_5 et en MgO sont dues à des rapports différents entre le phosphate d'apatite et les principales impuretés (dolomite, calcite et silice) présentes dans le minerai tout-venant. Parmi les études en laboratoire que nous avons menées : partie mécanique, études granulométriques et chimique.



Figure (11) : les couches de gisement BEH

III.1.3.1.1.1. Partie mécanique

On prend 5 kg de chaque couche ; mises en homogénéisation et division dans un diviseur ; afin d'obtenir des quantités destinées à l'analyse granulométrique et chimique ainsi que les essais.

III.1.3.1.1.2. Analyses granulométriques

Cette méthode consiste à classer les différentes particules composant l'échantillon à l'aide d'une série de tamis superposés, dont les mailles présentent des dimensions décroissantes du haut vers le bas, l'échantillon de minerai est déposé sur le tamis supérieur, puis soumis à des vibrations horizontales et des secousses verticales générées par une tamiseuse ce qui permet la séparation progressive des particules selon leur taille ; dans le cas du phosphate, des tamis aux dimensions spécifiques ; adaptées à la granulométrie de ce minerai, sont généralement utilisés :

(15 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μm , 315 μm , 200 μm , 100 μm , 80 μm , < 80 μm).
Après on a pesé le refus de chaque tamis ; pour calculer le rendement poids (Rp)%.

- Avant de procéder à l'analyse chimique, nous prélevons des échantillons de chaque couche et les broyons dans un broyeur.

III.1.3.1.1.3. Analyses chimiques

- Dans les analyses chimiques nous détectons le pourcentage de P_2O_5 , MgO et CO_2 de chaque couche.
- Après broyage on prend 1g de l'échantillon de chaque couche pour l'attaque chimique par l'acide perchlorique $HClO_4$ (dissolution totale), chaque élément il a une méthode différente de le détecter par des réactifs spécifiques
- CO_2 : attaque par sulfate de cuivre $CuSO_4$ (calcimètre de Bernard).

III.1.3.1.2. Étude le Global (tout-venant du BEH)

Le Globale est le produit de phosphate brute pour alimenter l'usine d'enrichissement il s'agit d'un mélange composé de trois couches ; après l'étude individuelle de chacune d'elles, nous avons déterminé le pourcentage de chaque couche à incorporer dans le mélange la teneur d'alimentation.

III.1.3.1.2.1. Voie sèche (ciblage à sec par tranche)

Après avoir mélangé 4 kg de la couche intermédiaire avec des quantités égales des couches sommitale et basale 3 kg (40% principale, 30% sommitale et 30% basale).

Nous suivons les mêmes étapes d'étude de trois couche (partie mécanique, études granulométriques et chimique) , en plus de détecter l'humidité en prélevant un échantillon du mélange et en le plaçant dans L'humidimètre.

III.1.3.1.2.2. Voie humide (Criblage humide par tranche)

La préparation de l'échantillon commence par un mélange en proportions égales (50/50) entre la fraction solide et l'eau ; le mélange est ensuite agité manuellement pendant 10 minutes pour assurer une homogénéité optimale ; une fois cette étape achevée le mélange est laissé au repos afin de permettre la décantation après décantation, il est tamisé successivement à l'aide d'une série de tamis , les refus retenus sur chaque tamis sont ensuite séchés séparément.

En suivant le même principe des analyses.

III.1.3.1.3. Essais en usine pilote du procédé par voie humide

- Des essais pilotes ont été menés afin de produire un concentré de phosphate répondant aux spécifications, avec une teneur en P_2O_5 supérieure à 30 % et une teneur en MgO inférieure à 1 %.
- Le schéma de traitement comprend les étapes principales suivantes :

1. Le procédé est alimenté par un mélange équimolaire composé à parts égales de fraction solide et d'eau (50/50).

2. Agité pendant 10 minutes dans un cuve d'agitation

3. Criblage du matériau issu du tambour de lavage

4. Première stade deschlammage : Hydro cyclonage pour épaissement et deschlammage .

5. Le flux issu du cyclone est soumis à une étape d'attrition pendant 15 minutes visant à nettoyer les surfaces des grains de phosphate et à libérer le phosphate piégé dans les phases de gangue.

6. Criblage de la décharge d'attrition.

7. Deuxième stade deschlammage : hydro cyclonage

8. Filtration pour obtenir PM (semi fini avec une humidité 10 à 15%)

9. Séchage ($H_2O = 1\%$)

- Au cours de la phase de criblage, des tamis de dimensions variés sont testés afin de déterminer le procédé le plus efficace pour obtenir un produit de haute qualité. Dans le cadre de notre étude, nous avons réalisé trois essais distincts :

Essai 1

- 1 -ère criblage : on utilise criblage à 3,15 mm
- 2 -ème criblage : on utilise criblage à 0,5 mm

Essai 2

- 1 -ère criblage : on utilise criblage à 2 mm
- 2 -ème criblage : on utilise criblage à 0,4 mm

Essai 3

- 1 -ère criblage : on utilise criblage à 1 mm
- 2 -ème criblage : on utilise criblage à 0,315 mm

(Après séchage en suivant le même principe des analyses).



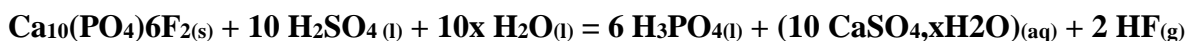
Figure (12) : Enrichissement par voie humide

III.1.3.2- Partie 2 : Fabrication de l'acide

A la fin de l'étape d'enrichissement en phosphate, on obtient un produit commercialisable contenant une teneur en P_2O_5 supérieur à 30% et une teneur en MgO inférieur ou égal à 1% . Après ces résultats nous pouvons commencer à fabriquer de l'acide phosphorique.

Le plan de procédés comprend les étapes suivantes :

1. Le produit obtenu est mélangé avec de l'eau et l'acide sulfurique dans un réacteur.
2. Dans le réacteur, la température est comprise entre 50-70°C et la réaction se déroule pendant certaine durée.
3. Filtration : séparer le gypse qui se forme après la réaction et le liquide (H_3PO_4).
4. Concentration : Evaporation de l'eau (acide phosphorique à 110°C).
 - Dans notre étude nous avons effectué des essais préliminaires pour identifier et confirmer la quantité de chaque ingrédient que nous mettrions dans le mélange.
 - La production de l'AP suit la réaction suivante :



- Afin de connaître le délai dont nous avons besoin pour que le processus nous donne une bonne qualité, Nous avons étudié trois expériences de la même quantité, mais chaque expérience avait une durée différente :

- **Essai 1** : la réaction prend une heure 1h.
- **Essai 2** : prend une heure et demie 1h30 min.
- **Essai 3** : prend deux heures 2 h

III.1.4. Approches d'enrichissement du phosphate du gisement de Bled El Hadba

Lors de l'enrichissement du phosphate extrait du gisement de Bled El Hadba diverses approches peuvent être appliquées en fonction des caractéristiques géologiques des différentes couches et des finalités du procédé, la recherche bibliographique et les expérimentations industrielles permettent de distinguer trois variantes principales [12]

III.1.4.1. La variante 1 : Cette stratégie consiste à combiner la couche principale, basale, sommitale : (P,S,B) avant traitement par voie humide avec des pourcentages bien déterminés .

III.1.4.2. La variante 2 : Traitement séparé de chaque couche [(P), (S), (B)].

III.1.4.3 .. La variante 3 : Mélange de deux couches seulement : [(P,S), (P,B), (S,B)] .

Dans notre étude nous avons adopté la variante 1, Ce choix vise à produire une matière première uniforme, offrant un équilibre optimal entre une teneur élevée en P_2O_5 et une diminution des impuretés comme le MgO , les variantes 2 et 3 n'ont pas été réalisées dans le cadre de cette étude en raison de contraintes temporelles , donc elles conservent une valeur technique qui mérite d'être explorée [13].

III.1.5. Clarification sur le traitement humide

Le terme « traitement humide » peut prêter à confusion, mais il fait référence à l'utilisation d'un milieu aqueux (par opposition au traitement à sec), pas seulement de l'eau pure [14 ,15].

-Les réactifs utilisés dans le traitement humide [14] :

1. Solution acide faible (acide acétique, sulfurique ou HCl) pour dissoudre sélectivement les carbonates de Magnésium [15].
2. Collecteurs (acide oléique) pour la flottation de l'apatite.
3. Déprimants (silicate de sodium) pour empêcher la flottation des impuretés.
4. Régulateurs de pH (soude caustique).
5. Agents moussants (MIBC) pour stabiliser la mousse de flottation.
6. Dispersants pour éviter l'agglomération des argiles [16].

III.1.6. La convention analytique du P_2O_5

III.1.6.1. Forme naturelle du phosphore

- Le phosphore dans les minerais est principalement présent sous forme de fluorapatite ($Ca_5(PO_4)_3F$), dérivée du phosphate tricalcique ($Ca_3(PO_4)_2$) [17].
- Par convention analytique, on exprime la teneur en phosphore sous forme de pentoxyde

de phosphore (P_2O_5) pour standardiser les analyses, bien que cette molécule n'existe pas à l'état naturel [15].

III.1.6.2. Procédure analytique

L'analyse mesure d'abord le phosphore total, ensuite converti en P_2O_5 selon les normes industrielles [18].

III.1.7. Réduction et la valorisation du magnésium dans la production d'AP

- La présence du magnésium (Mg) dans les minerais phosphatés perturbe la production d'acide phosphorique en réduisant la teneur en P_2O_5 , Pour limiter ces effets, plusieurs techniques sont utilisées : le prétraitement du minerai (comme la flottation) l'ajustement des paramètres de l'attaque acide (température, concentration d'acide, additifs..).
- Le magnésium récupéré peut être valorisé sous forme de composés utiles ($Mg(OH)_2$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$) dans les engrais, les produits pharmaceutiques, cosmétiques ou encore pour le traitement des eaux usées, à condition d'assurer une pureté suffisante [19-20].

Chapitre 04 :
Résultats et discussions

IV.1. Résultats et discussions

IV.1.1. Partie 1 : Enrichissement et valorisation du phosphate BEH

IV.1.1.1. Etude de la couche globale (tout-venant)

IV.1.1.1.1. Analyse granulométrique

Afin d'évaluer l'efficacité du processus d'enrichissement appliqué au phosphate brut de BEH, trois essais distincts ont été réalisés. Le tableau (1) présente la répartition granulométrique des fractions obtenues après traitement. Les résultats sont exprimés en pourcentages pour chaque maille de tamisage (en mm), pour chaque cas, les teneurs en P_2O_5 , CO_2 et MgO ont été également mesurées, fournissant une indication claire de l'évolution chimique des fractions en fonction de leur taille, les données permettent d'identifier les fractions les plus riches en P_2O_5 ; tout en surveillant la teneur en éléments indésirables comme le CO_2 et le MgO .

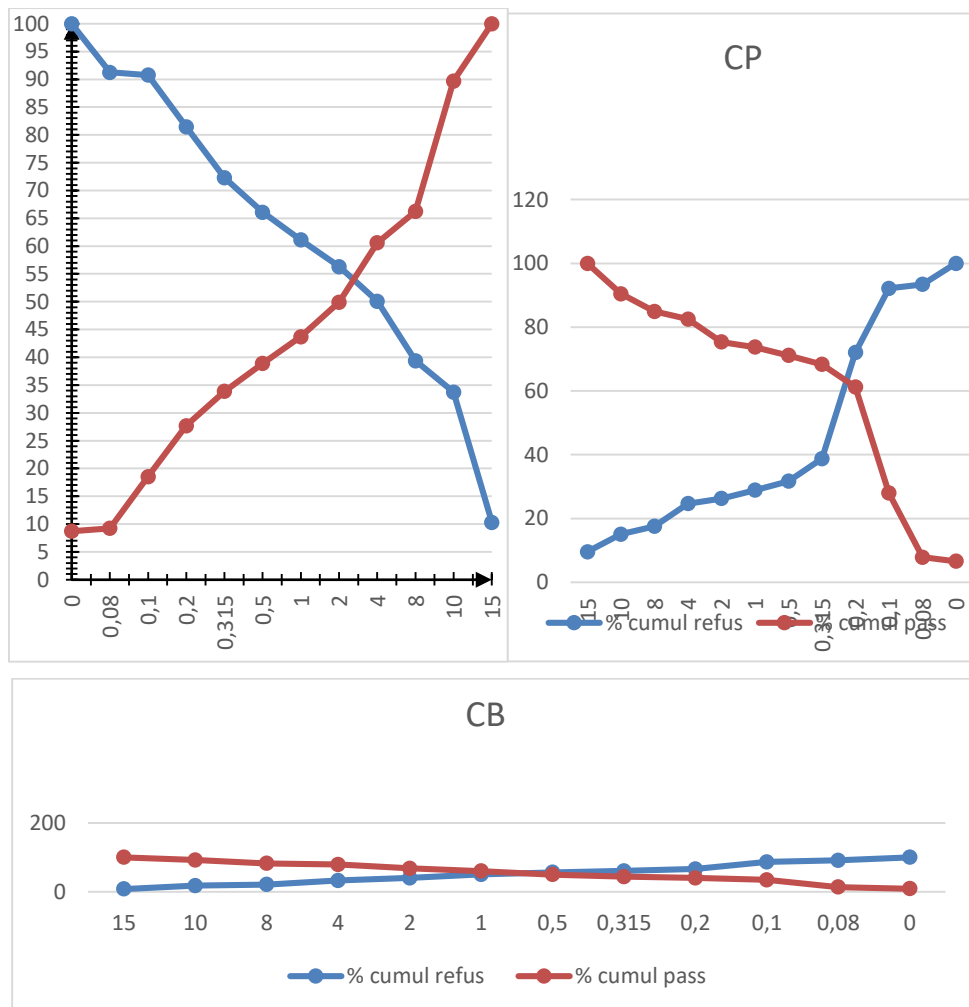


Figure (13) : Explication sur la taille des grains selon les courbes granulométriques

Analyse par Couche

- **Couche Sommitale (grosse) :** C'est la couche la moins favorable, avec le P_2O_5 le plus faible et les teneurs les plus élevées en impuretés ; sa valorisation nécessiterait des traitements d'enrichissement très intensifs et coûteux.
- **Couche Principale (moyenne) :** Elle se distingue comme la couche la plus prometteuse , elle possède la teneur en P_2O_5 la plus se rapprochant des 30% cibles et les teneurs les plus faibles en impuretés , les efforts d'enrichissement pour cette couche seraient les moins importants et les plus rentables.
- **Couche Basale (très fine) :** De qualité intermédiaire, elle présente un P_2O_5 modéré et des niveaux élevés d'impuretés , sa valorisation exigerait des traitements d'enrichissement significatifs pour réduire ses impuretés.

On a obtenu les valeurs de l'étude granulométrique par couche dans le tableau suivant :

Tableau (03) : résultats des essais granulo-chimiques sur les 3 couches

Maille (mm)	C _s	C _p	C _b
% P_2O_5	16,27	27,8	22,36
% CO_2	21,93	9	13,5
% MgO	4,05	1,72	3,25

Analyse du tableau

La C_p se distingue comme la meilleure donnant la plus haute teneur en P_2O_5 et les plus faibles niveaux de CO_2 et MgO ; la rendant idéale pour la production d'acide phosphorique , la C_b est de qualité intermédiaire, avec une bonne teneur en P_2O_5 mais des niveaux plus élevés de CO_2 et MgO qui pourraient compliquer son traitement , d'autre part la C_s est la moins favorable présentant le plus faible P_2O_5 et les plus fortes concentrations de CO_2 et MgO ; rendant son exploitation directe difficile et coûteuse sans enrichissement préalable.

IV.1.1.1.2. Essais à sec

Le tableau (4) illustre la distribution granulo-chimiques globale obtenue après les essais d'enrichissement à sec du phosphate BEH , ce tableau met en évidence les effets du traitement sur la concentration des éléments recherchés, et constitue un indicateur essentiel pour évaluer la qualité finale du produit enrichi.

Tableau (04) : Analyses granulo-chimiques à sec du phosphate globale BEH

maille (mm)	Poids (g)	PH-BEH (avant)	% cumul refus	% cumul pass	% CO ₂	% P ₂ O ₅	% MgO
15	44,5	3,59	3.59	99.98	24,1	14,63	4,55
10	161,3	13	16.59	96.39	18,4	18,68	5,85
8	43,1	3,47	20.06	83.39	18,34	18,73	5,90
4	113,6	9,15	29.21	79.92	18,34	19,62	5,88
2	61,8	4,98	34.19	70.77	15,33	18,2	7,05
1	71,1	5,73	39.92	65.79	16,33	19,91	6,45
0,5	60,5	4,87	44.79	60.06	16,67	21,9	5,55
0,315	78,7	6,34	51.13	55.19	8,7	25,62	3,66
0,2	234,5	18,9	70.03	48.85	7,37	29,61	1,40
0,1	248,7	20,04	90.07	29.95	7,64	29,19	1,75
0,08	28,9	2,33	92.40	9.91	9,3	26,58	3,00
-0,08	94	7,58	99.98	7.58	20,59	12,38	6,15
TOTAL	1240,7	99,98			13,34	23,15	4,04

Analyse des résultats

- Les fractions de 0,315 mm et 0,1 mm se démarquent par leur équilibre optimal entre richesse en P₂O₅ (25,62 % et 29,19 %) et faibles taux d'impuretés, en particulier en MgO (<4 %) ; ces caractéristiques en font des candidats privilégiés pour le traitement.
- La fraction de 0,2 mm la plus riche en P₂O₅ (29,61 %) présente une bonne valeur en MgO (1,40%) rendant son utilisation inadaptée dans un procédé humide classique.
- Les particules inférieures à 0,08 mm affichent une composition très défavorable, avec une faible concentration en P₂O₅ (12,38 %) et des impuretés très élevées, notamment un taux de CO₂ dépassant 20 %, ce qui les rend inexploitable dans le cadre du procédé visé .

IV.1.1.1.3.Essaies par voie humide

Le tableau (5) concerne l'essai par voie humide, cette méthode a permis une séparation plus affinée avec des teneurs en P₂O₅ plus élevées dans les fractions les plus fines ; tout en diminuant les teneurs en CO₂ et MgO de manière plus marquée.

Ces résultats confirment l'efficacité du traitement granulométrique par voie humide , pour l'enrichissement du phosphate et l'optimisation de sa qualité chimique en vue d'une valorisation industrielle.

Tableau (05) : Résultats de l'essai par voie humide du phosphate BEH

Granulométrie par tranche humide (Ech Global de BEH (40% P+30% S+30% B)						
Poids Gr	PH-BEH G AL	% cumul refus	% cumul passant	% CO ₂	% P ₂ O ₅	% MgO
27,9	2,95	2.95	100,00	20,85	17,45	5,05
68,4	7,24	10.19	97.05	21,18	17,28	5,88
21,4	2,27	12.46	89.81	23,17	16,41	7 ;38
36,5	3,87	16.33	87.54	23,83	15,07	8,05

26,4	2,80	19.13	83.67	20,52	17,69	4,55
30,6	3,24	22.37	80.87	18,54	19,8	4,55
34,1	3,61	25.98	77.63	14,56	22,64	4,12
104,3	11,05	37.03	74.02	8,28	28,69	2,00
227,4	24,08	61.11	62.97	6,62	30,46	0,82
222,4	23,55	84.66	38.89	6,95	29,99	1,05
21,8	2,31	86.97	15.34	9,93	27,27	2,68
123	13,03	100,00	13.03	23,17	8,24	9,22
944,2	100,00			12,69	23,95	3,41

Analyse des résultats

Les fractions intermédiaires et fines du phosphate se distinguent par une haute teneur en P_2O_5 et un faible taux de CO_2 et les plus faibles valeurs de MgO , les rendant idéales pour le traitement mais les fractions plus grossières ; avec un P_2O_5 plus bas et un CO_2 très élevé sont moins favorables et nécessiteraient un traitement coûteux. Bien que les fines restantes conservent un bon P_2O_5 et un CO_2 modéré donc la majorité des fractions utiles présentent un MgO inférieur à 3 % ce qui confirme l'efficacité de la voie humide .

IV.1.1.1.4. Discussion des résultats de l'enrichissement BEH(PM)

IV.1.1.1.4.1. Etude granulométrique

On a mis en lumière la finesse relative du minerai de phosphate de BEH et l'importance de concentrer les efforts d'enrichissement sur la fraction principale (0.100-0.315 mm) tout en gérant efficacement la présence notable de très fine.

IV.1.1.1.4.2. Etude chimique

IV.1.1.1.4.2.1. Essai 01

Tableau (06) : résultats de l'essai 01 de l'enrichissement par voie humide

d (mm)	Rp (%)	CO_2 (%)	P_2O_5 %	MgO	Qualité
3.150	16.50	25.02	14.08	3.18	Grosse fraction, mauvaise qualité
0.500	9	18.01	20.40	2.70	Qualité médiocre
PM	57	7.04	29.91	0.99	Excellente qualité
+0.315	9.77	8.34	28.40	1.29	Bonne qualité
-0.315	90.23	6.62	30.40	0.89	Qualité optimale / Concentré
Boue1	16.25	25.02	6.99	3.32	Boue très impurifiée
Boue2	1.315	19.09	15.66	3.13	Boue impurifiée

- Analyse de l'essai 01 : Cet essai montre une excellente efficacité de l'enrichissement ; la fraction de taille < 0.315 mm (le concentré) et celle de 0.315 mm ont des teneurs en P_2O_5 très élevées et des impuretés (CO_2 et MgO) très faibles, ce qui est idéal pour l'attaque acide. Les fractions plus grossières et les boues sont fortement contaminées et

doivent être éliminées.

IV.1.1.1.4.2.2. Essai 02

Tableau (07) : Résultats de l'essai 02 de l'enrichissement par voie humide

d (mm)	Rp (%)	CO₂ (%)	P₂O₅ %	MgO	Observations
2.00	16.10	22.31	15.01	3.15	Grosse fraction, mauvaise qualité
0.400	9.28	13.86	23.00	2.34	Qualité moyenne
P.M	57.55	6.59	30.10	0.961	Excellente qualité / Produit Majeur
Boue1	13.20	24.30	10.75	3.23	Boue très impurifiée
Boue2	2.68	16.34	18.64	3.10	Boue impurifiée

- Analyse de l'essai 02 : Cet essai confirme la capacité à obtenir un concentré de très haute qualité (fraction "P.M.") avec un P₂O₅ supérieur à 30% et des impuretés très basses. Les boues et les fractions plus grossières sont de mauvaise qualité et doivent être rejetées ce qui confirme que le (Rp) élevé de "P.M." est très positif.

IV.1.1.1.4.2.3. Essai 03

Tableau (08) : Résultats de l'essai 03 de l'enrichissement par voie humide

d (mm)	Rp (%)	CO₂ (%)	P₂O₅ %	MgO	Observations
1.00	18.10	22.90	13.84	3.17	Grosse fraction, mauvaise qualité
0.315	10.42	11.15	26.38	1.96	Bonne qualité (relative)
P.M	52.80	6.64	30.38	0.86	Excellente qualité / Produit Majeur
Boue1	14.55	20.28	8.87	3.28	Boue très impurifiée
Boue2	13.50	16.90	21.19	2.98	Boue impurifiée

- Analyse de l'essai 03 : Cet essai réitère les résultats positifs des précédents. La fraction "P.M." est le concentré de choix, avec d'excellentes caractéristiques chimiques. Les autres fractions et boues confirment leur nature d'impuretés ou de sous-produits à rejeter.

IV.1.1.1.4.3. Comparaison entre les 3 essais

Ce tableau compare les indicateurs clés de la qualité du concentré de phosphate et de la

performance du traitement pour les essais 1, 2 et 3

Tableau (09) : Comparaison des résultats de l'enrichissement par voie humide

Essaie	E1	E2	E3
P ₂ O ₅	29.91	30.10	30.38
CO ₂	7.04	6.59	6.64
MgO	0.99	0.96	0.86
Rp	57%	57.55	52.80
Taux de récupération	73.64	74.83	69.29

Analyse des résultats

- **P₂O₅ (%) :** Les teneurs sont élevées et stables, toutes supérieures à 30% pour les essais E2 et E3, confirmant la capacité du minerai de BEH à produire un concentré de très haute qualité.
- **CO₂ (%) :** Les teneurs en CO₂ sont très faibles et très stables, toutes inférieures à 7% ; donc un faible CO₂ réduit la consommation d'acide sulfurique et les problèmes de moussage lors de l'attaque acide.
- **MgO (%) :** Les teneurs sont très faibles et très stables (toutes inférieures à 1%), un critère de qualité crucial car le MgO est une impureté très problématique pour l'industrie de l'acide phosphorique par voie humide.
- **Rp (%) :** Les rendements poids sont élevés, indiquant qu'une part significative de l'alimentation est transformée en concentré de haute qualité, E1 et E2 montrent des rendements environ 57%), tandis que E3 a un rendement légèrement inférieur (52.80%).
- **Taux de récupération (%) :** E1 et E2 démontrent une excellente récupération (autour de 74% en P₂O₅) avec une légère diminution du rendement poids pour E3.

➤ Choix de l'essai optimale

L'essai 02 offre le meilleur équilibre global ; il réussit à la fois à produire un concentré de haute qualité (P₂O₅ optimal, impuretés réduites) et à maximiser l'efficacité de la récupération du phosphate.

Bien que l'essai 03 présente la teneur en MgO la plus faible : 0,86% ; un critère très important, l'essai 02 excelle sur l'ensemble des autres critères majeurs offrant le meilleur équilibre global : c'est pourquoi l'Essai 02 est le choix optimal pour la valorisation du gisement BEH.

IV.1.1.1.5. Comparaison des gisements phosphatés

La comparaison entre notre étude et d'autres études est regroupée dans le tableau (10) suivant :

Tableau (10) : Tableau comparatif entre les résultats des études en Algérie et d'autres pays

Gisement	P ₂ O ₅ Initial	P ₂ O ₅ Après Traitement	Rendement (%)	Références
Tébessa	18-25%	28-32%	75-85%	[22]
Tébessa	22.50-23.20 %	30 -32%	75- 80%	Notre étude
Gafsa	27-32%	30-34%	90-95%	[23]
Bone Valley	12-18%	25-30%	60-70%	[24]
Sechura	28-33%	32-36%	85-90%	[25]
Jordanie	26-31%	29-33%	80-88%	[26]

Analyse du tableau

Le tableau suivant représente les caractéristiques de différents gisements de phosphate selon trois critères clés :

Teneur initiale, teneur après traitement et le rendement de procédé.

Tébessa : Les statistiques indiquent une amélioration de la teneur en P₂O₅ après traitement, mais le rendement reste moyen par rapport à d'autres gisements.

Bien que le gisement de Tébéssa présente de bons résultats, il est nécessaire d'améliorer les techniques d'enrichissement utilisées pour atteindre des résultats proches de ceux obtenus dans des gisements tels que Gafsa [23] ou Sechura [25].

Comparaison des gisements phosphatés :

Dans le cadre de l'évaluation technico-économique des ressources phosphatées ; il est crucial comparer les caractéristiques des principaux gisements à l'échelle mondiale, le tableau (11) présente une synthèse comparative de cinq gisements majeurs .

Tableau (11) : Synthèse comparative des gisements phosphatés avec d'autres pays selon leur qualité brute, potentiel d'enrichissement et rendement

Gisement	Tébessa	Gafsa	Bone Valley	Sechura	Jordanie
Qualité brute	++	+++	-	++++	++
Enrichissement	++	++++	+	++++	++
Rendement (%)	+++	++++	++	+++	+++

Légende : ++++ = très élevé et très efficace, +++ = élevé, ++ = Bonne, + = moyenne, - = faible.

IV.1.2. Partie 2 : procédés de fabrication de l'acide phosphorique

IV.1.2.1. Discuter notre étude

Nous avons effectué une série d'analyses chimiques sur un échantillon d'AP avant et après évaporation à différents ratios et le pourcentage de P_2O_5 , MgO et la pureté de H_3PO_4 ont été mesurés à chaque fois ; les résultats dans le tableau (12).

Tableau (12) : Les différentes valeurs en P_2O_5 , MgO et H_3PO_4 des 3 essais

	Essai 1			Essai 2			Essai 3		
	Avant Evap	Après Evap à 50%	Après Evap à 80 %	Avant Evap	Après Evap à 50%	Après Evap à 80 %	Avant Evap	Après Evap à 50%	Après Evap à 80 %
P_2O_5	17,80	33,78	43,36	24,88	45,72	66,14	22,34	41,62	42,86
MgO	0,40	0,68	0,83	0,55	0,93	0,98	0,48	0,91	0,93
H_3PO_4	24,56	46,62	59,84	34,33	63,09	91,27	30,83	57,44	59,15

IV.1.2.1.1. Teneur en P_2O_5

C'est un indicateur de base pour évaluer la qualité de produit final : La deuxième essai a donné le meilleur résultat après évaporation à 50 % atteignant 45,72 %, avec une augmentation de 66,14 % après évaporation à 80 % par rapport au taux initial de 24,88 %, contre 43,36 % pour l'essai 1 et seulement 42,86 % pour l'essai 3.

IV.1.2.1.2. Teneur en MgO

C'est l'une des impuretés indésirables et son excès affecte négativement la qualité du produit : Le pourcentage de MgO a augmenté dans la deuxième essai de 0,55 % avant évaporation à 0,98% après évaporation ; donc il s'agit d'un pourcentage relativement élevé par rapport au premier essai, qui n'a augmenté que de 0,4 % à 0,83 %, et à la troisième, de 0,48 % à 0,93%.

IV.1.2.1.3. La Pureté de H_3PO_4

La pureté de l'acide reflète la qualité du produit utilisable : Concernant H_3PO_4 , le deuxième essai a obtenu les meilleurs résultats, avec une pureté augmentant de 34,33 % à 91,27 %, par rapport à 59,15 % dans la troisième essai et 59,84 % dans le premier essai.

IV.1.2.2. Choix de l'essai optimal

La deuxième expérience a réalisé un bon équilibre entre le P_2O_5 et le H_3PO_4 . Bien que le taux de MgO été atteint 0,98 %, il reste dans les limites acceptables compte tenu des résultats des autres indicateurs ; cette expérience constitue donc le choix le plus approprié pour poursuivre le processus de fabrication de l'AP.

IV.1.2.3. Comparaison entre notre étude et l'étude d'autres pays

Pour confirmer le bon chemin de notre étude on a réalisé une comparaison du bon essai qu'on a déjà choisi et les valeurs des autres pays [27] ; classées dans le tableau (13) :

Tableau (13) : Tableau comparatif entre notre étude et les études des autres pays

	Essaie 2 Avant évaporation	Essaie 2 Après évaporation à 50%	Essaie 2 Après évaporation à 80 %	Industrie (France, USA)
P₂O₅	24,88	45,72	66,14	28 – 32
MgO	0,55	0,93	0,98	< 1
H₃PO₄	34,33	63,09	91,27	45 – 60

Analyse et comparaison

- Dans notre étude, la teneur en P₂O₅ a augmenté après l'évaporation ; dépassant ainsi la plage industrielle typique (28 à 32 %) qui dû à la qualité du phosphate utilisé dans notre expérience et l'efficacité de l'évaporation

Le H₃PO₄ a également augmenté jusqu'à environ 91 % ce qui est supérieur à la plage industrielle (45–60%) ça indique également une efficacité de séchage élevé ; mais une augmentation importante peut entraîner des problèmes, notamment la précipitation du gypse.

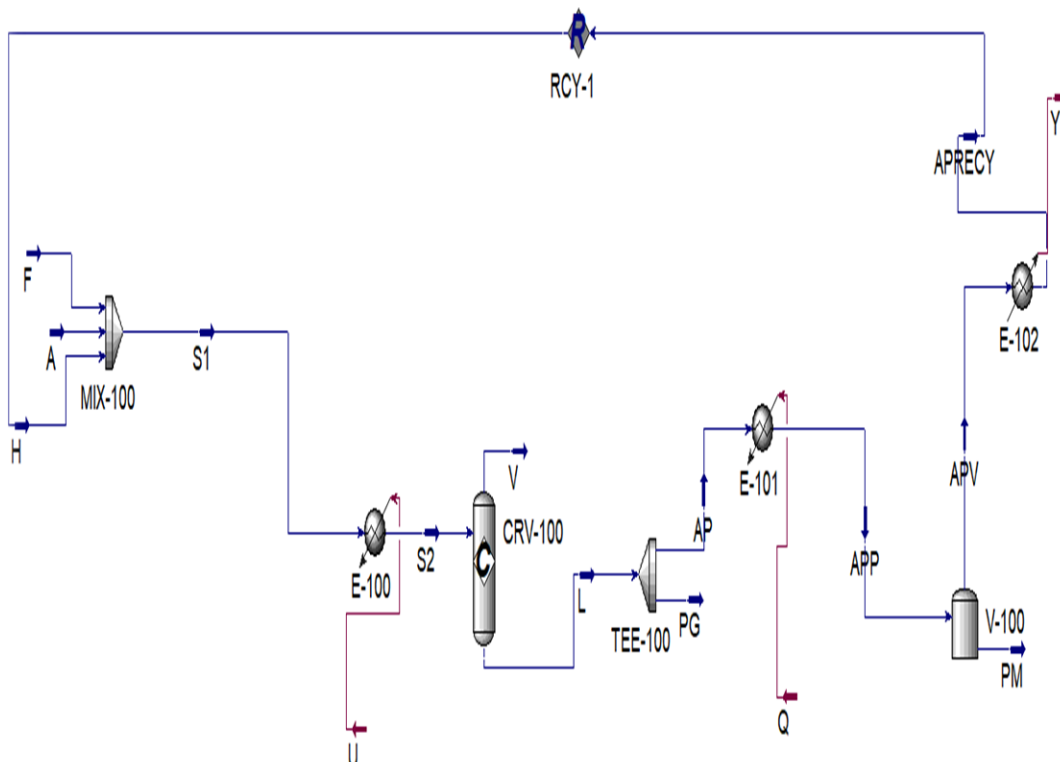


Figure (14) : Chaîne de fabrication de l'acide phosphorique par simulation Hysys

Conclusion générale

Conclusion Générale

Dans le cadre de cette étude nous avons abordé un enjeu stratégique majeur pour l'Algérie ; la valorisation de ses ressources phosphatières nationales afin de réduire la dépendance aux importations d'acide phosphorique, le gisement de Bled El Hadba (BEH) ; bien que riche en phosphate présente des contraintes liées à la teneur initiale relativement faible en P_2O_5 et à une présence non négligeable d'impuretés, notamment le MgO , l'objectif principal a donc été de développer un procédé d'enrichissement efficace permettant de produire un concentré répondant aux exigences industrielles ($\geq 30 P_2O_5\%$ et $\leq 1 MgO\%$)

Les essais réalisés par voie humide ont permis d'obtenir des résultats très satisfaisants, le deuxième essai s'est distingué par son excellent équilibre entre rendement pondéral, pureté chimique et taux de récupération, faisant de lui l'option optimale pour la valorisation du minerai de BEH. En parallèle, l'expérimentation de la production d'acide phosphorique à partir du concentré enrichi a démontré la faisabilité et la performance du processus, avec des teneurs élevées en P_2O_5 et en H_3PO_4 après évaporation, bien supérieures aux standards industriels observés à l'échelle internationale.

Toutefois, l'étude a également mis en lumière certains défis, notamment la gestion des boues et des effluents liquides issus de la production acide. Alors que les eaux issues de l'enrichissement sont relativement faciles à traiter, celles générées par la fabrication d'acide phosphorique demeurent complexes à gérer, ce qui nécessite des recherches supplémentaires en matière de traitement et de valorisation des résidus.

En conclusion, les résultats obtenus dans ce travail sont prometteurs pour une mise en œuvre à l'échelle industrielle. Le gisement de Bled El Hadba peut ainsi constituer un levier important pour l'autosuffisance algérienne en acide phosphorique. Des études futures pourront approfondir l'optimisation du procédé, étudier d'autres variantes d'enrichissement, ainsi qu'explorer des solutions de traitement durable des rejets.



Références

- (1). U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2020). Everything Added to Food in the United States (EAFUS)
- (2). E Farber – 2022 – books.google.com.
- (3). Keswani, C., & Gupta, S. (2023). Challenges and Strategies for the Sustainable Environmental Management of Phosphogypsum Waste. *Sustainability*, 17(8), 3473.
- (4). Bertau, M., Offermanns, H., Plass, L., Schmidt, F., & Wernicke, H. (2024). The Future of Phosphoric Acid Production – Why We Have to Leave Trodden Paths. *ChemSusChem*, 17(4), e202301599.
- (5). Tran, L., Ladebuk, J., & Parrenin, A. (2023). Review of Phosphoric Acid Production Technologies. *AIChE Annual Meeting Proceedings*.
- (6). Zhu, Y., Xing, Y., Li, Y., Jia, J., Ying, Y., & Shi, W. (2024). The Role of Phosphate-Solubilizing Microbial Interactions in Phosphorus Activation and Utilization in Plant–Soil Systems: A Review. *Plants*, 13(19), 2686.
- (7). Vaisala. (2023). Optimisation de la production d'acide phosphorique par voie humide avec capteurs de processus avancés.
- (8). Global Growth Insights. (2024). Rapport sur les tendances et la croissance du marché des acides phosphoriques [2025–2033].
- (9). PMarketResearch. (2024). Rapport d'étude de marché mondial sur la production d'acide phosphorique par four et par voie humide (2024–2030).
- (10). L'Élémentarium. (2020). Acide phosphorique – Données industrielles et environnementales
- (11). YesWeLab. (2023). Méthodes analytiques en laboratoire pour l'acide phosphorique (H₃PO₄) – Pureté et contrôle qualité.
- (12)-Benbrahim, F., C Bouazza, A. (2019). *Journal of Mineral Processing*, 160, 123–130.
- (13)- Sis, H., C Chander, S. (2003). Reagents used in the flotation of phosphate ores : A critical review. *Minerals Engineering*, 16(7), 577–585.
- 14- Bénard, P. (2001). *Les phosphates naturels*. Éditions Tec C Doc.
- 15- International Fertilizer Industry Association. (2018). *Fertilizer manual*.
- 16- House, W. A. (1999). *Chemistry of phosphate minerals*. *Environmental Geochemistry and Health*, 21(2), 107–118.
- 17- Habashi, F. (1997). *Handbook of Extractive Metallurgy*, Vol. II. Wiley-VCH.
- 18- ASTM International. (2020). *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Phosphate Rock (ASTM D2017-20)*.
- 19- Habashi, F. (1997). *Handbook of extractive metallurgy : Volume II – Nonferrous metals*. Wiley-VCH.
- 20- Hakkou, R., Benzaazoua, M., C Bussière, B. (2020). Phosphogypsum management and environmental impacts in the phosphoric acid industry.
- 22- Mezghiche, M., C Benabdesselam, M. (2007). Étude de l'enrichissement du minerai de phosphate de Djebel Onk (Tébessa, Algérie). *Revue de l'Université Ferhat Abbas Sétif*.
- 23- Ennaciri, A., Khalfaoui, M., C Ziyat, M. (2014). Valorisation des minerais phosphatés du bassin de Gafsa (Tunisie). *Journal of Materials and Environmental Science*, 5(3), 963–970.
- 24- Zhang, P., C Honaker, R. (2018). Flotation studies on Florida phosphate rock. *Minerals Engineering*, 119, 41–49.
- 25- Herrera, C., Contreras, C., C Rodríguez, R. (2015). Flotation of low-grade phosphate ore from Sechura, Peru. *Physicochemical Problems of Mineral*

Référence

Processing, 51(1), 123–132.

26- Al-Thyabat, S., C Zhang, P. (2015). A review of phosphate beneficiation techniques. *International Journal of Mineral Processing*, 145, 19–29

27- rcane Industries. (2022). Acide phosphorique : fabrication C utilisation.

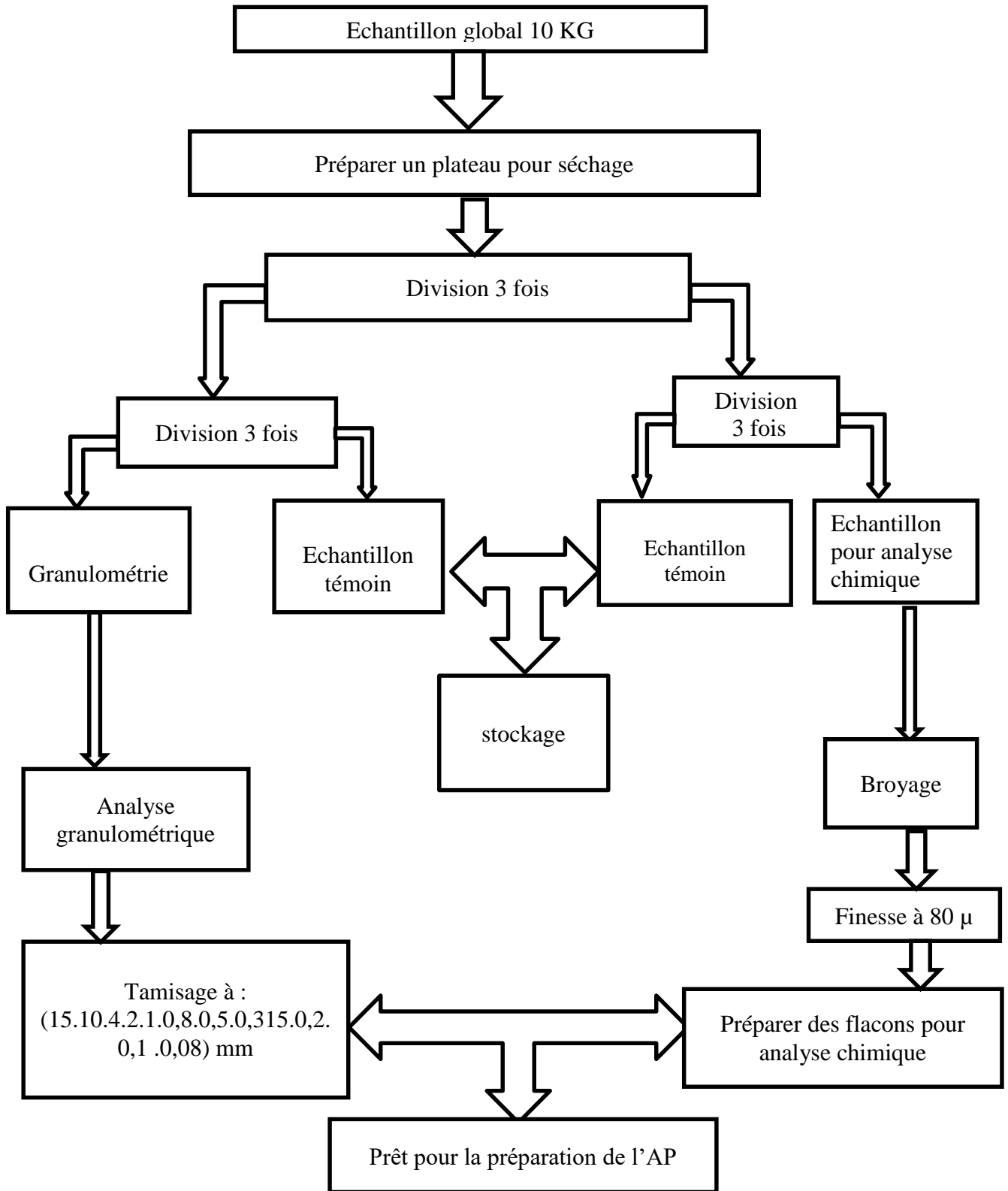
Annexes

Annexes

Annexe 1 : L'étude granulométrique des 3 couches

Maille (mm)	C _s	C _p	C _b
15	10,3	9,53	7,77
10	23,45	5,53	9,97
8	5,64	2,43	3,06
4	10,7	7,14	11,53
2	6,21	1,63	7,56
1	4,81	2,59	10,19
0,5	5	2,81	6,13
0,315	6,19	7,1	4,02
0,2	9,16	33,28	5,63
0,1	9,31	20,11	20,79
0,08	0,47	1,27	4,65
-0,08	8,73	6,57	8,69
TOTAL	99,97	99,99	99,99

Annexe 2 : schéma détaillé sur la préparation du phosphate BEH pour analyse



Annexe 3 : schéma de l'analyse

