

Ministry of Higher Education and
Scientific Research

Echahid Hamma Lakhdar University
EL-Oued



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي

كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculty of nature and life sciences at university echahid Hamma Lakhdar

قسم العلوم الفلاحية département of sciences Agronomie

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Thème

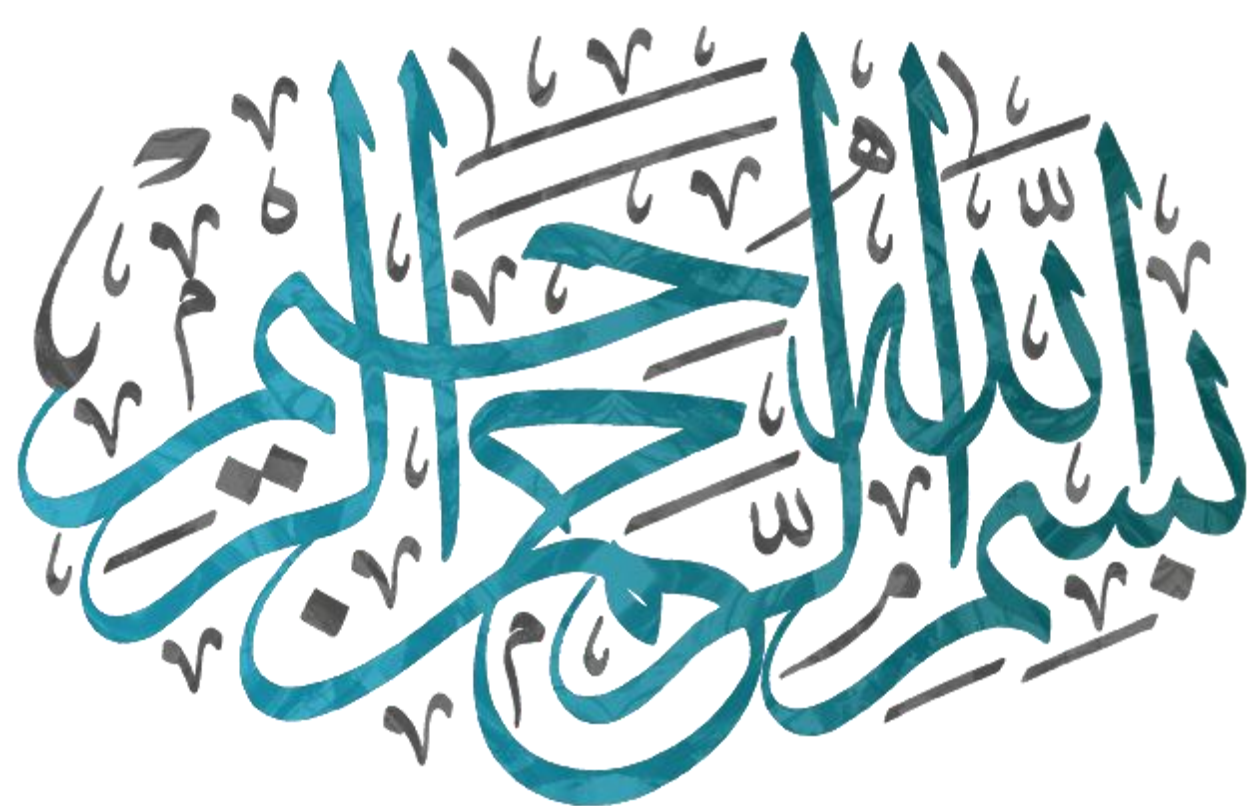
Contribution à la valorisation des fines de dépoussiérage du phosphate
(DO 20%) de Djebel Onk, Wilaya de Bir El Ater (Algérie)

Présenté par : Azzouz Farouk & Acila Akram

Devant le jury composé de :

Président	Djoudi Abdelhak	MAA	Université d'El Oued
Examineur	Hakimi Youcef	MCB	Université d'El Oued
Encadreur	Mayouf Rabah	MCA	Université d'El Oued

Année universitaire 2025/2026



الإهداء

من سار على درب وصل وها أنا اليوم أقف على أعتاب نهاية رحلتي الجامعية بعد سنواتٍ من التعب والاجتهاد. لم تكن الطريق سهلة، ولم تكن الأيام كلها كما تمنيت، لكنها كانت رحلة صنعت مني الكثير. وصلت إلى هذه اللحظة بفضل الله أولاً، ثم بالصبر والسعي وعدم الاستسلام، فالحمد لله الذي وفق وأعان، الحمد لله عند البداية، والحمد لله عند الوصول والختام.

بدايةً، إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب، من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل، إلى من سعى إلى راحتي ونجاحي، إلى من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة، إلى من غرس في روحي مكارم الأخلاق، داعمي الأول في مسيري وسندي وملاذي وقوتي بعد الله، إلى فخري واعتزازي (والدي) إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها واحتضنتني قلباً قبل يديها، وسهلت لي الشدائد بدعائها، إلى القلب الحنون والشمعة التي كانت لي في الليالي المظلمات سر قوتي ونجاحي ومصباح دربي، إلى من شاركتني أفراحي وأساي، إلى أروع امرأة في الوجود (أمي)

إلى إخوتي وأخواتي، الذين كانوا لي عوناً وسنداً، يشاركونني لحظات التعب والأمل، ويحتووني دعماً وتشجيعاً في مختلف مراحل حياتي.

إلى أصدقائي الأوفياء، الذين كانوا خير معين بالكلمة الطيبة والنصيحة الصادقة والدعم المستمر.

إلى من تقاسمنا معهم مقاعد الدراسة فكانوا خير جليس، زملائي ..

وإلى صديقي الغالي ورفيقي في هاته الرحلة العلمية .. أكرم

إليكم جميعاً أهدي ثمرة هذا الجهد، راجياً من الله تعالى أن يجعله نافعاً ومباركاً.

فاروق

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله رب العالمين و الصلاة وسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين نبينا محمد عليه أفضل الصلاة و أزكى التسليم الحمد لله الذي ظننت به خيراً فأكرمني بأفضل مما ظننت به والله ما وفقت لخير إلا بفضل الله وما يسرت لنفع إلا بفضل الله فالحمد لله دائماً وأبداً

اهدي هذا العمل اولاً لنفسى ليس فخراً بإنجاز يروى بل عرفنا بصبر طويل على المصاعب التي واجهتني طوال مسيرتي الدراسية

الى أبي الغالي صاحب الحنان الصامت... رعاه الله وبارك في عمره أتمنى أن أكون بهذا الانجاز قد عوضتك ولو بقليل من عرق جبينك ووجهك المتعب الذي طالما أرّقه الهم والحزن وكدر الأيام حتى ترى ثمارك تزهر أما امي الحبيبة بدعواتك نقش اسمي على الوشاح وأصبح حقيقة انتِ النور الذي يضيء لي الطريق بفضلك تيسرت السنوات العجاف ولين الحديد أمام إرادتك إنحنائي لك يا من ذبلت شبابها لتزهرنا.

إلى من تقاسموا معي لحظات التعب والسهر، إلى من وجودهم كان نعمة لا تقدر

إلى ضلعي الثابت ... اخوتي أحبكم بكل ماتعنيه الكلمة من معنى كنتم خير سند

إلى صديقي الغالي ورفيقي في هاته الرحلة العلمية .. فاروق

أهدي هذا العمل، لا كخاتمة، بل كبداية لما هو أجمل وأفضل بإذن الله. وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين.

أكرم

شكر وعرفان

لا يسعنا في هذا المقام إلا أن نتقدم بجزيل الشكر والعرفان لكل من ساهم في إنجاز هذا العمل وإتمامه على أكمل وجه.

نتقدم بالشكر الوافر و الامتنان غير المنقطع للأستاذ رابح معيوف الذي تشرفنا بإنجاز هذا العمل تحت إشرافه فكان النبراس الذي أضاء لنا الطريق بفضل توجيهاته وإرشاداته القيمة.

كما نتقدم بالشكر الخالص إلى أعضاء لجنة المناقشة رئيسا ومناقشا، وكذا أساتذة قسم العلوم الفلاحية على ما قدموه لنا من دعم علمي.

وأخيراً، أتوجه بالشكر والتقدير إلى كل من ساهم بطريقة مباشرة أو غير مباشرة في إنجاز هذا العمل.

لجميعكم، منا كل الشكر والتقدير ..

Liste des Figures		
N°	Les Titres	P
1	Une roche du phosphate	4
2	Carte de répartition mondiale des gisements de phosphate	9
3	Schéma du processus de dissolution et d'assimilation des Fines de dépoussiérage de phosphate	23
4	Quartage des échantillons	29
5	Absorption Atomique (Dosage Des Métaux Lourds Et Autres)	31
6	Broyage Des Echantillons (Préparation De La Finesse Du Produit Inférieur A 80 Microns)	31
7	Tamis D'analyse Granulométrique (Détermination De Volume Des Grains)	31
8	Calcimètre De Bernard Pour Détermination Du Volume De CO2	31
9	Technico Analyseur (Dosage Du P2O5 Par Colorimétrie)	32
10	Méthode Classique (Volumétrie) Du Dosage Du Calcium	32
11	Plaque Chauffante Pour Attaque Chimique (Dissolution)	32
12	Balance Analytique Et Appareil De Détermination De L'humidité Par Gravimétrie	32
13	Dilution Et Filtration Des Solutions	32
14	Bascule Pour Pesage Des Produits Max 150 Kg	32
15	Diffraction aux rayons X de l'échantillon	38
16	Diffraction aux rayons X de l'échantillon	38

Liste des Tableaux		
N°	Les Titres	P
1	Les différents minéraux de phosphate	7
2	La production et réserves mondiales par pays de phosphate naturel	12
3	La consommation mondiale de phosphate en agriculture	14
4	Composition chimique moyenne du phosphate D.O 20% de Djebel Onk	18
5	Propriétés physiques du phosphate D.O 20%	19
6	Éléments secondaires et oligo-éléments du phosphate D.O 20%	20
7	Action corrective du phosphate D.O 20% selon le type de sol	21
8	Doses recommandées de phosphate D.O 20% selon les cultures	22
9	Conditions d'efficacité et limites d'utilisation des fines de dépoussiérage de phosphate	24
10	: Étapes de production du phosphate D.O 20% au complexe de Djebel Onk	25
11	méthodes utilisées pour les analyses chimiques des échantillons	33
12	matériel utilisé au laboratoire	34
13	Analyse granulométrique des fines de dépoussiérage du phosphate de Djebel Onk	36
14	Analyse minéralogique par Diffraction à Rayons X (DRX)	37
15	Analyse granulo-chimique des fines de dépoussiérage	42

LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre I- Généralité sur le phosphate	
I-1-Définition	4
I-2-Origine des apports phosphatés	5
I-2-a- les anciennes théories	5
I-2-b- théorie moderne de Kazakov (1950)	5
I-3- Les types de phosphate	6
I-3-1- Phosphates organiques (organophosphates)	6
I-3-2-Phosphates inorganiques	6
I-3-3- Autres types de phosphates	6
I - 4 Caractéristiques minéralogiques	7
I-5- Les gisements du phosphate	8
1-5-1- À l'échelle mondiale	8
I-5-2- En Algérie	10
I-6- Les réserves et la production du phosphate	10
I-6-1. En Algérie	10
I.6-2- Au monde	12
I-7- Domaines d'utilisation des Phosphates	14
Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%) de Djebel Onk	
1- Définition et dénomination du Phosphate D.O 20%	17
2- Propriétés physico-chimiques du D.O 20%	18

2-1- Composition chimique	18
2-2- Caractéristiques physiques	19
2-3 Richesse en éléments majeurs secondaires et oligo-éléments	20
3- Propriétés pour la correction des sols	20
3-1- Action sur les sols lourds, salés et décalcifiés	20
3-2- Mécanismes d'amélioration de la structure des sols	21
4- Utilisation du D.O 20% comme engrais de fond	22
4-1- Principe de la libération progressive du phosphore	22
4-2- Doses et modalités d'application	22
4-3- Schéma du processus de dissolution et d'assimilation	23
5- Avantages agronomiques et limites d'utilisation	23
5-1- Avantages du phosphate D.O 20%	23
5-2- Conditions d'efficacité et limites	24
6- Processus de production et contrôle qualité	25
6-1- Étapes de production	25
6-2- Contrôle de qualité et spécifications techniques	25
LA PARTIE EXPERIMENTALE	
MATERIEL ET METHODES	
1. Situation Géographique et Administrative	28
2. Topographie et Géologie	28
3. Hydrographie et Climat	28
4. Zonage Minier	28

5. Caractérisation des fines de dépoussiérage	28
1-L'échantillonnage	28
2. Méthodes des analyses (appareils utilisés)	30
3. Analyse granulométrique des fines de dépoussiérage de phosphate	30
4. Analyse minéralogique par Diffraction à Rayons X (DRX)	30
5. Analyses chimiques	30
6. Méthodes des analyses chimiques (appareils utilisés)	33
RESULTATS ET DISCUSSION	
1. Caractérisation granulométrique et implications pour la réactivité agronomique	36
2. Composition minéralogique et solubilité du phosphore	37
3. Distribution du phosphore selon la granulométrie et stratégie de valorisation	38
4. Analyses granulochimique	40
4-1 Rapport $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$ et disponibilité du phosphore	40
5. Éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments	41
6. Éléments traces et sécurité environnementale	41
7. Perspectives d'application à El Oued	43
8. Bénéfices environnementaux et économie circulaire	44
Conclusion	
Références bibliographiques	

Résumé :

Le traitement du phosphate de Djebel Onk génère des fines de dépoussiérage. Ces fines considérées comme un sous-produit de l'industrie phosphatière, présentent un potentiel de valorisation agricole pour les régions sahariennes. Cette étude vise à caractériser les fines de dépoussiérage sur le plan physico-chimique et à évaluer leur efficacité comme amendement phosphaté pour les sols pauvres. Les analyses effectuées incluent l'analyse granulométrique par tamisage, l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) et l'analyse chimique pour la détermination des éléments majeurs et traces. Les résultats montrent que les fines sont constituées à 95,79% de particules ultrafines ($< 80 \mu\text{m}$), composées principalement d'hydroxylapatite, avec une teneur en P_2O_5 de 24,51% en moyenne. La présence de calcium (40,98% CaO) et de magnésium (4,45% MgO) accorde à ces fines le potentiel d'être un amendement polyvalent. Les analyses des éléments traces révèlent des teneurs en cadmium, arsenic et plomb acceptables.

L'efficacité directe de ces fines sur les sols des régions sahariennes est limitée par le caractère alcalin de ces sols (pH 7,7-8,2) qui inhibe la dissolution naturelle de l'apatite. Le compostage avec des matières organiques locales, l'association avec des engrais acidifiants, l'inoculation avec des bactéries solubilisant les phosphates, et les applications fractionnées sont des stratégies proposées pour battre cette contrainte et valoriser ce coproduit minier. Cette valorisation s'inscrit dans une démarche diminuant les déchets miniers tout en contribuant à la durabilité des systèmes agricoles sahariens.

Mots-clés:

phosphate, fines de dépoussiérage, caractérisation physicochimique, valorisation agronomique, El Oued

Abstract :

The processing of Djebel Onk phosphate generates dust removal fines considered as a valuable by-product of the phosphate industry, with potential for agricultural valorization in Saharan regions. This study aims to characterize these fines physicochemically and evaluate their effectiveness as phosphate amendments for poor soils. Analyses included particle size distribution by sieving, mineralogical analysis using X-ray diffraction (XRD), and chemical analysis for major and trace elements.

Results showed that 95.79% of the fines consist of ultrafine particles ($< 80 \mu\text{m}$), mainly composed of hydroxyapatite, with an average P_2O_5 content of 24.51%. The presence of calcium (40.98% CaO) and magnesium (4.45% MgO) suggests their potential as multifunctional soil amendments. Trace element analyses revealed acceptable levels of cadmium, arsenic, and lead.

The direct efficiency of these fines in Saharan soils remains limited due to the alkaline nature of these soils (pH 7.7–8.2), which inhibits apatite dissolution. Composting with local organic matter, combining with acidifying fertilizers, inoculation with phosphate-solubilizing bacteria, and split applications are proposed strategies to overcome this limitation and enhance the valorization of this mining by-product. This approach contributes to reducing mining waste and improving the sustainability of Saharan agricultural systems.

Keywords: phosphate, dust removal fines, physicochemical characterization, agricultural valorization, El Oued.

الملخص

تنتج عن معالجة فوسفات جبل العنق جسيمات دقيقة ناتجة عن عمليات إزالة الغبار، والتي تُعد منتجًا ثانويًا قيمًا، إلا أنها تمتلك إمكانيات واعدة للثمنين الزراعي في المناطق الصحراوية. تهدف هذه الدراسة إلى التوصيف الفيزيائي والكيميائي لهذه الجسيمات الدقيقة وتقييم فعاليتها كمحسن فوسفاتي للتربة الفقيرة. شملت التحاليل المنجزة دراسة التوزيع الحبيبي بواسطة الغربلة، والتحليل المعدني باستخدام حيود الأشعة السينية (DRX)، إضافة إلى التحليل الكيميائي لتحديد العناصر الرئيسية والعناصر النزرة. أظهرت النتائج أن 95.79% من هذه الجسيمات تتكون من دقائق فائقة النعومة (<80 ميكرومتر)، وتتكون أساسًا من الهيدروكسي أباتيت، بمتوسط محتوى من P_2O_5 يقدر بـ 24.51%. كما أن وجود الكالسيوم (40.98% CaO) والمغنيسيوم (4.45% MgO) يمنح هذه الجسيمات إمكانيات تجعلها محسنًا متعدد الوظائف. كما كشفت تحاليل العناصر النزرة عن تراكيز مقبولة من الكاديوم والزرنيخ والرصاص. تظل الفعالية المباشرة لهذه الجسيمات الدقيقة في تربة المناطق الصحراوية محدودة بسبب الطبيعة القلوية لهذه التربة (درجة حموضة تتراوح بين 7.7 و 8.2)، والتي تعيق الذوبان الطبيعي للأباتيت. ولتجاوز هذا القيد، تم اقتراح عدة استراتيجيات تشمل التسميد العضوي باستعمال المواد العضوية المحلية، والدمج مع الأسمدة الحمضية، والتلقيح بالبكتيريا المذيبة للفوسفات، بالإضافة إلى اعتماد الإضافات المجزأة. يندرج ثمين هذا المنتج الثانوي التعديني ضمن مقاربة تهدف إلى تقليل النفقات التعدينية والمساهمة في استدامة الأنظمة الزراعية الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: الفوسفات، الدقائق الناتجة عن إزالة الغبار، التوصيف الفيزيائي والكيميائي، الثمين الزراعي، الوادي.

Introduction

En Algérie, le gisement de Djebel Onk, exploite des phosphates sédimentaires dont le traitement par voie sèche génère d'importantes quantités de fines de dépoussiérage. ces fractions fines considérées comme des rejets sont stockées dans des bassins de décantation, posant des problèmes d'occupation foncière et de risques environnementaux liés à la dispersion éolienne (Boumaza et al., 2023 ; FAO, 2004). Parallèlement, Les zones arides et sahariennes, à l'instar de la région d'El Oued, sont confrontées à un appauvrissement continu de la fertilité de leurs sols. Ces sols, majoritairement sableux, pauvres en matière organique ($< 1\%$) et à pH alcalin (7,5–8,5), souffrent d'une forte rétrogradation du phosphore, limitant ainsi la disponibilité de cet élément essentiel pour les cultures (Bellabidi, 2022 ; Daddi Bouhoun et al., 2011).

Dans ce contexte, la valorisation agricole des sous-produits miniers apparaît comme une alternative pertinente pour accorder gestion des déchets et amélioration de la productivité des sols. L'efficacité des phosphates naturels appliqués directement dépend étroitement de leurs caractéristiques physico-chimiques, notamment la taille des particules, la nature minéralogique de l'apatite et la composition élémentaire (Chien & Menon, 1995 ; Rajan et al., 1996). Une finesse élevée augmente la surface de contact avec la solution du sol, favorisant la dissolution du phosphore, tandis que la présence de carbonates ou de substitutions fluorées module la cinétique de relargage (Hammond et al., 1986 ; Sassi et al., 2006).

Ce travail de recherche vise à caractériser les fines de dépoussiérage du phosphate de Djebel Onk (DO 20%), en évaluant leur potentiel comme amendement phosphaté pour les sols d'El Oued. La méthodologie repose sur un échantillonnage représentatif, une analyse granulométrique par tamisage, une identification minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) et une caractérisation granulochimique détaillée (P_2O_5 , CaO, MgO, éléments traces). Les résultats obtenus permettront de discuter des conditions d'application optimales, des bénéfices agronomiques attendus et des garanties environnementales nécessaires, en s'appuyant sur les exigences réglementaires actuelles et les pratiques agricoles adaptées aux zones arides.

**LA PARTIE
BIBLIOGRAPHIQUE**

CHAPITRE I :
GENERALITE SUR
LE PHOSPHATE

I- Généralité sur le phosphate

I-1-Définition

Les roches phosphatées sont des sédiments marins issus de la fossilisation de matière organique, telle que l'accumulation de débris squelettiques de poissons au fond des océans. Elles sont principalement constituées d'apatite, un minéral dont le nom tire son origine du grec *apatán*, signifiant « tromper » (Slansky, 1980). Les phosphates naturels sont des minéraux formés par l'association d'ions métalliques avec l'ion phosphate (PO_4^{3-}) (Tahri, 2019). Ils comprennent plus de 200 espèces minéralogiques. Le terme général de phosphate naturel recouvre un ensemble de minéraux complexes, d'origine diverse. Selon la composition brute des minerais et des espèces minérales existantes, on distingue trois familles des roches phosphatées : les phosphates de calcium comme les minéraux apatitiques et les phosphates alumino-calcitiques ou alumineux, bien moins répandus, comme la crandallite ou des phosphates de fer et d'aluminium que l'on regroupe sous le nom de barrendite. D'autres minéraux secondaires de certains gisements de phosphate sont également signalés dans les dépôts sédimentaires tels que les phosphates des terres rares et d'uranium. Toutefois, les minéraux phosphatés les plus abondamment répandus appartiennent à la famille de l'apatite. En chimie minérale, un phosphate est un sel résultant de l'attaque d'une base par de l'acide phosphorique H_3PO_4 . En minéralogie, le phosphate est d'aspect granuleux et forme des concrétions contenant des débris organiques. On trouve des phosphates d'ammoniaque, de magnésie, de chaux, de soude (BRGM 2024).



Figure 1 : une roche du phosphate (Virtuel, n.d.)

I-2-Origin des apports phosphatés

Différentes théories ont tenté d'expliquer l'origine des apports phosphatés, en effet on peut citer ces origines comme suit : (Föllmi, 1996).

- ✓ Apports continentaux : par les sols, les minéraux organiques et ioniques. Les karsts seraient dus à des accumulations osseuses (USGS, 2023).
- ✓ Apports insulaires : en milieu insulaire, la forte activité de guano par les oiseaux et la considérable quantité de poissons seraient à l'origine des gisements concentrés mais étalés. L'altération des gisements aurait lieu lors des transgressions marines et l'apatite pourrait se former (Slansky, 1980).
- ✓ Apports marins : les océans sont des réserves très importantes des phosphates (Föllmi, 1996).

I-2-a- Les anciennes théories

Vue de l'abondance des débris des organismes (dents de poissons, des reptiles, fragments d'os...), présents dans les gisements, certains auteurs ont admis l'idée que les phosphates proviennent de l'altération chimique ou biochimique des restes de ces animaux tués en grand nombre à cause d'une catastrophe (augmentation ou diminution brusque de la salinité de l'eau de mer « théorie Biolithique »).

D'autres auteurs pensent que les phosphates proviennent de l'apatite qui se trouve en quantité notable dans les roches ignées (éruptives).

I-2-b- Théorie moderne de Kazakov (1950)

Il a proposé un schéma de la genèse des phosphates, assez simple pour permettre l'interprétation des divers types de gisements. La source première du phosphore dans la nature est l'apatite, se trouvant en quantité notable dans plusieurs familles des roches éruptives. Le phosphore minéral est mis en solution dans les eaux météoriques et entraînés par les rivières jusqu'à la mer. Il entre dans le cycle biologique des êtres vivants et principalement dans celui du plancton et du necton. Il est restitué au milieu marin après la mort de ces êtres vivants. La destruction de ces organismes. L'intervention des bactéries minéralise les constituants de la matière organique : elles libèrent le phosphore et produit le gaz carbonique (formation d'une réserve en phosphore). Ascension des eaux froides profondes riches

CHAPITRE I : GENERALITÉ SUR LE PHOSPHATE

en phosphore et en CO₂ (up welling). Précipitation des phosphates qui se fait dans un milieu pauvre en oxygène (Kazakov, 1950).

I-3- Les types de phosphate

I-3-1- Phosphates organiques (organophosphates)

Les phosphates organiques sont des esters de l'acide phosphorique, également connu sous le nom d'acide orthophosphorique (H₃PO₄). Un ester est ce que vous obtenez quand une substance organique (habituellement un hydrocarbure ou un alkyle) remplace un atome d'hydrogène dans un acide. Cet échange (l'hydrogène remplacé par un hydrocarbure organique ou un alkyle) fait passer la substance d'inorganique à organique (Corbridge, 2013).

I-3-2-Phosphates inorganiques

Passons maintenant aux phosphates les plus courants que nous traitons dans le secteur du traitement de l'eau: les phosphates inorganiques. "Dans les systèmes biologiques, le phosphore se trouve sous forme d'ion phosphate libre en solution et est appelé phosphate inorganique, pour le distinguer des phosphates liés à divers esters phosphatés. Le phosphate inorganique est généralement désigné Pi et au pH physiologique (neutre) se compose principalement d'un mélange d'ions HPO₄²⁻ et H₂PO₄⁻.

Nous pouvons diviser les phosphates inorganiques en deux catégories: les orthophosphates et les phosphates condensés (Vance et al., 2003).

I-3-3- Autres types de phosphates

Les anions phosphoriques condensés ou non sont également présents dans de nombreux autres composés qui ne peuvent pas trouver leur place dans le classement précédent (Corbridge, 2013). Ils peuvent être classés en deux catégories :

- **Les adduits (adducts)** : composés formés par l'association d'un phosphate avec une autre molécule sans modification covalente majeure.
- **Les hétéropolyphosphates** : structures complexes associant des ions phosphate à d'autres anions métalliques, formant des architectures moléculaires variées aux propriétés physicochimiques spécifiques.

I - 4 Caractéristiques minéralogiques

Une analyse du P_2O_5 total d'un minerai potentiel n'est pas un critère suffisamment fiable pour estimer la teneur en apatite et évaluer un gisement de phosphate (Notholt et al., 1989). En effet, la présence de minéraux accessoires non phosphatés peut fausser considérablement l'interprétation des résultats analytiques.

Les minéraux accessoires non phosphatés les plus communs liés aux phosphates naturels (PN) sédimentaires sont le quartz, les argiles et les carbonates (dolomie et calcite). Les PN à ciment carbonaté sont particulièrement remarquables en raison de leur abondance et de leur large distribution géographique (Slansky, 1980). Le quartz peut se rencontrer sous deux formes distinctes : en tant que grains détritiques ou en tant que variétés microcristallines. Il peut être particulièrement difficile de détecter un ciment siliceux dans des échantillons en utilisant la microscopie optique, en raison de sa nature anisotrope et de son apparence similaire à la francolite microcristalline (McArthur, 1985).

Les minéraux argileux et silicatés trouvés dans les PN sédimentaires comprennent des feldspaths et des micas (biotite et muscovite), l'illite, la kaolinite, les smectites ainsi que des zéolites. Ces phases minérales secondaires témoignent des conditions diagénétiques et des interactions fluide-roche ayant affecté les gisements au cours de leur histoire géologique (Notholt et al., 1989).

Les minéraux fréquemment associés à l'apatite magmatique comprennent quant à eux la néphéline, les feldspaths alcalins, les micas, les pyroxènes et les amphiboles, reflétant un contexte de cristallisation dans des magmas sous-saturés en silice (Slansky, 1980). Par ailleurs, la calcite, la dolomie et la magnétite sont des minéraux souvent liés aux gisements d'apatite carbonatée, caractéristiques des complexes alcalins et des carbonatites (McArthur, 1985).

Tableau01 : Les différents minéraux de phosphate (Straaten, 2002)

N°	Désignation	Poids Spécifi	Dureté	Couleur	Formule Chimique
1	Apatite	3-3,2	5	Vert, bleu, transparent	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$
2	Xénolite	4,4-5,1	4-5	Brun, jaunâtre	YPO_4
3	Monazite	4,6-5,4	5-5,5	Brun, rouge, vert	$(Ce,La,Th)PO_4$
4	Ambylgonite	2,9-3,1	5,5-6,5	Blanc à lait	$(Li,Na)Al.(PO_4)_2(Fe,OH)$
5	Pyromorphite	6,5-7,1	3,5-4	Variable	$Pb_5(PO_4)_3Cl$

CHAPITRE I : GENERALITÉ SUR LE PHOSPHATE

6	Turquoise	2,6-2,8	5-6	Bleu ciel, vert	$\text{Cu, Al}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH}) 85\text{H}_2\text{O}$
7	Chalcosiderite	3,25	4,5	Vert, transparent	$\text{CuFe}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH}) 8\text{H}_2\text{O}$
8	Libethentite	3,9	4	Vert olive	PO_4OH
9	Lazulite	3,1	5-6	Bleu azure	$(\text{Mg,Fe})\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_{35}\text{H}_2$
10	Wavelline	2,3	3,5-4	Incolore, blanc	$\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH}) 35\text{H}_2\text{O}$
11	Childrenite	3,2	5	Brun, jaune	$(\text{Fe,Mn})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$
12	Pseudomalachite	4-4,3	4,5-5	Vert	$\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH}) 4\text{H}_2\text{O}$
13	VanisciteStrengite	2,6-2,9	3,5-4,5	Vert pale	$\text{Al}(\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{O,Fe}(\text{PO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$
14	Lithiophilite	3,3-3,5	4-5	Gris, bleuâtre	Li (Fe, Mn) PO_4
15	Ludlomite	3,1-3,2	3,5	Vert	$(\text{Fe,Mg,Mn})_3(\text{PO}_4)_4\text{H}_2\text{O}$
16	Vivanite	2,6-2,7	1,5-2	Transparent	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_8\text{H}_2\text{O}$

I-5- Les gisements du phosphate :

1-5-1- À l'échelle mondiale:

Les pays qui contiennent les gisements de phosphate qui représentent la majeure partie de la production mondiale sont au Maroc et dans d'autres pays africains, aux Etats-Unis, au Proche Orient et en Chine. La plupart des gisements sédimentaires contiennent de la fluoroapatite carbonatée (Notholt et al, 1989), ayant une importante substitution carbonate sur phosphate sont les plus fortement réactives et sont les plus appropriées pour l'application directe comme engrais ou amendement.

Les gisements ignés ont fourni environ 10 à 20 pour cent de la production mondiale des dix dernières années. Ils sont exploités dans la Fédération de Russie, au Canada, en Afrique du Sud, au Brésil, en Finlande et au Zimbabwe mais se trouvent également en Ouganda, au Malawi, au Sri Lanka et en plusieurs autres endroits. Ces gisements contiennent généralement des variétés de fluoroapatite qui sont relativement peu réactives et donc moins appropriées pour l'application directe. Les produits

CHAPITRE I : GENERALITÉ SUR LE PHOSPHATE

de lessivage des apatites ignées et sédimentaires (minerais de phosphate de fer et d'aluminium) ne sont généralement pas utiles pour l'application directe en agriculture dans leur état naturel (Zapata & Roy, 2004).

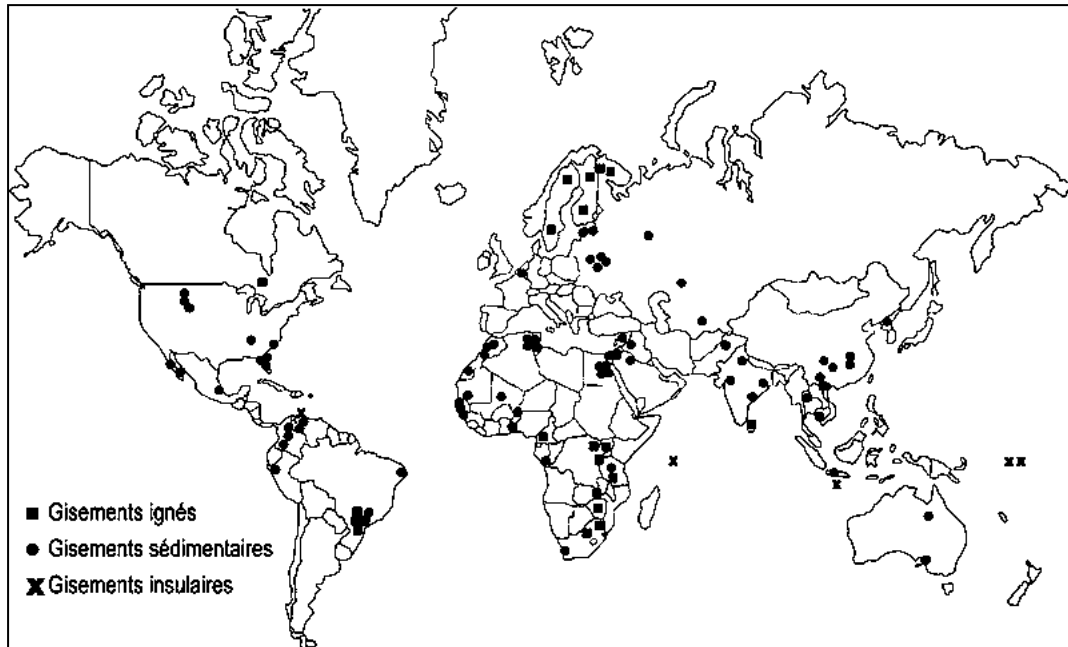


Figure 02. : Carte de répartition mondiale des gisements de phosphate (Zapata & Roy, 2004)

I-5-2- En Algérie

Près de deux milliards de tonnes de ressources/réserves les plus importantes richesses naturelles du pays de phosphate principalement localisés dans l'Est du pays (Tebba, 2021). Elle doit être divisées selon la situation géologique à deux grandes familles sont

✓ Un premier groupe est situé au Sud des Hauts-Plateaux, près de la frontière tunisienne, à proximité de Tébessa : ce sont les gisements du Djebel El Kouif, du Djebel Onk et du Djebel Dyr.

✓ Un second groupe se trouve au Nord des Hauts-Plateaux, de Bordj-Bou Arreridj à l'Ouest vers Souk-Ahras à l'Est, en passant par Sétif : Tocqueville, Bordj Ghdyr, M'Zaïta, Djebel Dekhna.

On les divise suivant le cas actuel d'exploitation (Exploité, Non Exploité) à deux parties sont :

Gisements en cas d'exploitation qui sont :

- Djebel Onk
- M'Zaïta.
- Bordj Ghdyr.
- Tocqueville

Gisements non exploités qui sont :

- Djebel Dekhna : qui fut le premier exploité en 1912, fut vite abandonné, car la teneur du phosphate était trop faible.
- Djebel Dyr : le même cas de Djebel Dekhna.
- Djebel El Kouif : il est exploité la première fois en 1947, et abandonné à cause des basses teneurs de P_2O_5 (Benoumessed, 2019).
-

I-6- Les réserves et la production du phosphate :

I-6-1. En Algérie :

I-6-1-a- Les réserves :

C'est l'une des plus importantes richesses naturelles du pays, avec près de deux (2) milliards de tonnes de ressources/réserves principalement localisées dans l'Est du pays (Tebba, 2021). Le grand

CHAPITRE I : GENERALITÉ SUR LE PHOSPHATE

gisement de Djebel Onk, au Sud de Tébessa, exploité depuis 40 ans, renferme environ la moitié de ces réserves/ressources.

Ces réserves ne constituent qu'une partie de celles que recèlerait le bassin phosphatier. Au rythme actuel de la production, la durée de vie de ces réserves/ressources approcherait deux siècles. L'importante zone à phosphate de Djebel Onk devra très rapidement constituer un centre de développement économique d'exploitation et de transformation massive de phosphate.

Les principaux gisements de phosphate sont (Direction. Géol .Algérie, 1984) :

- Djebel: plus de deux Milliards des tonnes, 18 - 30 % en P_2O_5 et 2-3% en MgO
- M'Zaita : 29 Mln tonnes, 23 % - 31% en P_2O_5
- Ras El Oued : 0.7 Million des tonnes, 26 % - 27% en P_2O_5
- El Kouif : 27 Million des tonnes, 25 % - 30 % en P_2O_5
- Djebel Dyr : 8 Million des tonnes.

I-6-1-b- La production

L'Algérie recèle des ressources phosphatées importantes, ce qui permet de satisfaire les besoins nationales de cette matière et l'exportation d'une quantité appréciable.

La structure d'exploitation minière, l'Entreprise nationale du fer et du phosphate, FERPHOS, est en mesure de fournir à ASMIDAL, l'entreprise de transformation et de production, des quantités de phosphate naturel couvrant ses besoins, avec un surplus pour l'exportation. FERPHOS a lancé un appel à la manifestation d'intérêt pour la réalisation d'un pôle industriel pour la fabrication des productions phosphatés. Le réseau de disponibilité de cette dernière s'articule autour de quatre réseaux, tous liés à ASMIDAL

- ASMIDAL (réseau1) : Fabrication; importation/exportation; stockage ; distribution.
- CASSAP (réseau 2) : Importation ; stockage ; distribution.
- CCLS (réseau 3) : Stockage ; distribution.
- Revendeurs (réseau 4) : (privés, représentants de firmes étrangères ...etc.)

FERPHOS s'articule dans leur exploitation à quatre gisements principaux qui produisent le phosphate par des quantités différent de l'une à l'autre ; la production se divise comme suite Ghoul, 2022):

- Djebel Onk : environ de 1.500.000 t/an.
- M'Zaïta : 100.000 t/an.
- Bordj Ghdyr : 20.000 t/an.
- Tocqueville : 5.000 à 10.000 t/an

I.6-2- Au monde

Les pays les plus producteurs de phosphate à l'échelle mondiale sont la Chine, les États-Unis et le Maroc, qui concentrent à eux trois plus de 70 % de la production mondiale (USGS, 2023). Cette domination tripolaire reflète à la fois l'ampleur des réserves géologiques disponibles et le niveau de développement industriel des filières d'extraction et de transformation dans ces trois pays.

Les réserves mondiales se concentrent principalement dans les plateaux continentaux et les monts sous-marins de l'océan Atlantique et de l'océan Pacifique, témoignant de l'origine essentiellement marine des dépôts phosphatés sédimentaires (Föllmi, 1996). Les ressources mondiales de roche phosphatée sont estimées à plus de 300 milliards de tonnes, un chiffre qui souligne l'ampleur considérable du patrimoine phosphatier planétaire, bien que l'accessibilité économique de ces ressources demeure très variable selon les contextes géologiques et géographiques (USGS, 2023). Les plus grands gisements de phosphate dans le monde sont localisés en Chine, qui dispose des réserves les plus étendues et les mieux documentées à ce jour (Gao et al, 2023).

Dans ce contexte mondial, l'Algérie occupe la troisième place en termes de réserves, positionnement qui lui confère un rôle stratégique non négligeable sur l'échiquier international des matières premières phosphatées (Bezzi et al., 2008). Ce potentiel considérable reste cependant encore largement sous-exploité au regard des capacités de production effectives du pays, ouvrant ainsi des perspectives importantes de développement industriel et d'exportation à moyen et long terme.

Tableau 02 : La production et réserves mondiales par pays de phosphate naturel (United States Geological Survey 2023)

Pays	Production (106Kg), 2020	Production (106Kg), 2021	Réserves(10 ⁶ Kg)
United States	23,500	22,000	1, 000,000
Algérie	1,200	1,200	2, 200,000
Australie	2,000	2,200	1, 100,000

CHAPITRE I : GENERALITÉ SUR LE PHOSPHATE

Brésil	6,000	5,500	1, 600,000
Chine	88,000	85,000	3, 200,000
Egypte	4,800	5,000	2, 800,000
Finlande	995	1,000	1, 000,000
Inde	1,400	1,400	46,000
Palestine	3,090	3,000	53,000
Jordanie	8,940	9,200	1, 000,000
Kazakhstan	1,300	1,500	260,000
Mexique	577	530	30,000
Maroc	37,400	38,000	50,000,000
Pérou	3,300	3,800	210,000
Russie	14,000	14,000	600,000
Arabie Saoudite	8,000	8,500	1, 400,000
Sénégal	1,600	2,200	50,000
Afrique du Sud	1,800	2,000	1, 600,000
Togo	942	1,200	30,000
Tunisie	3,190	3,200	100,000
Türkiye	600	600	50,000
Ouzbékistan	900	900	100,000
Vietnam	4,500	4,700	30,000
Autres pays	870	1,000	2, 600,000
Total	219,000	220,000	71, 000,000

I-6-2-a- Consommation mondiale du phosphate

La consommation mondiale de phosphate est étroitement liée à la croissance démographique et à l'intensification agricole, le phosphore étant un nutriment essentiel et irremplaçable pour la fertilisation des sols (Cordell et al., 2009). Environ 80 à 85 % de la production mondiale est destinée à la fabrication d'engrais phosphatés, le reste étant utilisé par les industries chimiques et alimentaires (USGS, 2023). La Chine est le premier consommateur mondial, suivie par l'Inde et les États-Unis, avec une consommation annuelle globale estimée à 220 à 240 millions de tonnes de minerai brut (Jasinski, 2022). Ces minerais sont principalement transformés en acide phosphorique puis en engrais. Une

CHAPITRE I : GENERALITÉ SUR LE PHOSPHATE

préoccupation majeure réside dans le caractère non renouvelable du phosphore : contrairement à l'azote, il ne peut être synthétisé et doit être extrait de gisements géologiques aux réserves limitées. Certaines projections estiment que ces réserves pourraient s'épuiser dans 50 à 100 ans, faisant du phosphore une ressource stratégique pour la sécurité alimentaire mondiale (Cordell et al., 2009). Des solutions sont aujourd'hui explorées, notamment le recyclage du phosphore issu des eaux usées et l'amélioration de l'efficacité des engrais en agriculture (Zapata & Roy, 2004).

Tableau 03 : La consommation mondiale de phosphate en agriculture (United States Geological Survey, 2023)

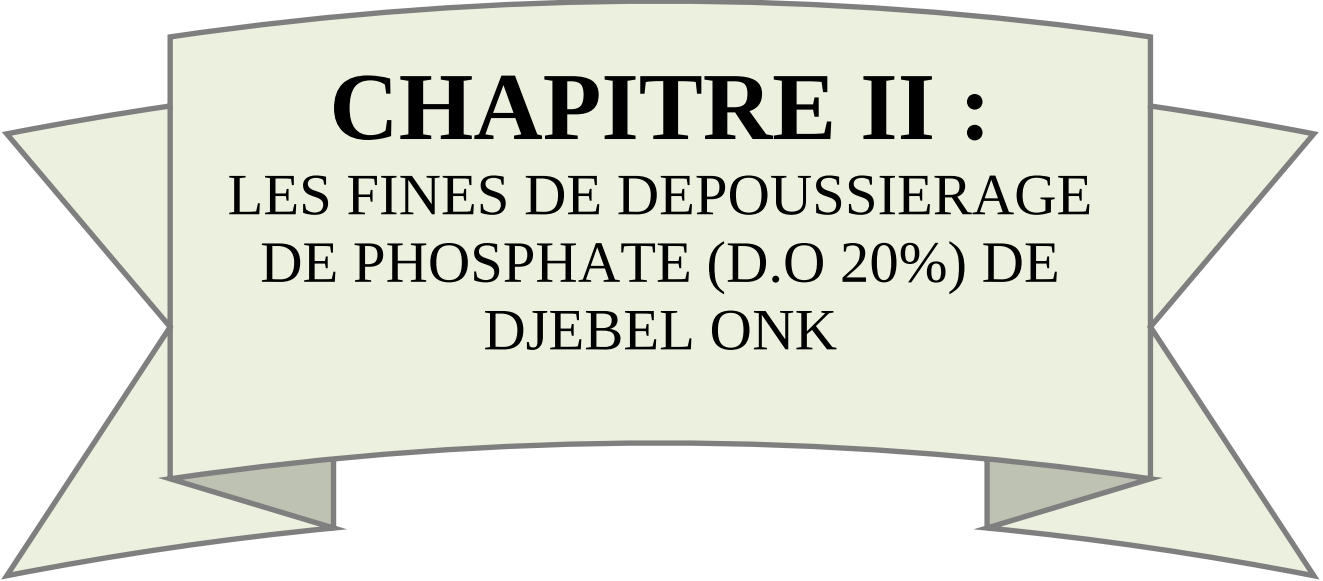
Pays	Valeur de consommation (10⁶ kg)
Chine	9 977
Inde	7 470
Brésil	6 046
États-Unis	4 420
Indonésie	1 358
Pakistan	1 173
Canada	1 137
Australie	898
Russie	870
Argentine	846
Reste du monde	44355

I-7- Domaines d'utilisation des Phosphates

Les minéraux phosphatés sont la seule ressource disponible en phosphore. Cet élément, largement distribué dans la nature, est essentiel pour la nutrition, la santé humaine, animale, et à la vie végétale. Etant le constituant majeur dans les squelettes et les os de tous les vertébrés et les parties dures d'invertébrés, il est également présent dans notre corps, dans nos dents, nos os, et

CHAPITRE I : GENERALITÉ SUR LE PHOSPHATE

nos gènes en constituant l'ossature de la molécule ADN. En plus, il est un nutriment important qui contrôle la productivité organique. Le phosphate est utilisé dans plusieurs domaines tels que la métallurgie (alliage), l'industrie chimique (pesticides, détergents), pétrolière (lubrifiant), alimentaire et pharmaceutique, ainsi que comme additifs pour la transformation des aliments et les boissons gazeuses, les peintures, et le traitement de l'eau. (Jasinski, 2017). Cependant, l'intérêt le plus important des phosphates c'est dans le domaine agricole où il est utilisé sous forme d'engrais pour la fertilisation des sols (Fig.I.7). La fabrication des engrais passe d'abord par la production de l'acide phosphorique qui consomme plus de 80% de la production mondiale des concentrés phosphatés.



CHAPITRE II :

**LES FINES DE DEPOUSSIERAGE
DE PHOSPHATE (D.O 20%) DE
DJEBEL ONK**

Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%) de Djebel Onk

Le phosphate naturel de Djebel Onk (fines de dépoussiérage) commercialisé sous le nom D.O 20%, représente l'un des sous-produits importants de l'industrie minière algérienne. Ce fertilisant phosphaté naturel se distingue par ses propriétés physico-chimiques particulières. C'est un amendement utilisé pour la correction des sols difficiles à mettre en valeur. Les fines de dépoussiérage est un produit naturel à la lente libération du phosphore assure une nutrition phosphatée étalée sur l'ensemble du cycle végétatif des cultures (Zapata & Roy, 2004). Sa production au niveau du complexe de Djebel Onk (wilaya de Bir El Ater) s'inscrit dans une démarche de valorisation directe de la ressource minière nationale, sans nécessiter de traitement chimique coûteux (Bezzi et al., 2008).

1- Définition et dénomination du Phosphate D.O 20%

D'après l'entreprise FERFOS, (2004), le phosphate D.O 20% a de propriétés physico-chimiques qui lui permettent d'être utilisé dans la correction des sols présentant des difficultés pour leur mise en valeur. Le D.O 20% est aussi un engrais qui répond aux exigences de l'agriculture par :

- Sa tendreté qui lui confère un degré de solubilité à plus de 76% dans l'acidité formique.
- Sa finesse de mouture qui permet d'augmenter le contact racinaire avec sol.
- Sa richesse en éléments majeurs secondaires et oligo-éléments.

Grâce à sa richesse en calcium, le DO20% est conseillé plus particulièrement pour la mise en valeur des sols lourds, salés, marécageux et décalcifiés ; son action se traduit par:

- Un bon ressuyage des sols
- Une diminution de la salinité
- Une stabilisation de la structure des sols par coagulation notamment des argiles dispersées donnant une perméabilité et une porosité meilleures.

Le phosphate D.O20% est utilisé comme engrais de fond car il reste disponible durant tout le cycle végétatif de la plante et ne se libère qu'au fur et à mesure que la plante ressent le besoin. Les apports d'engrais phosphatés ont pour but de créer ou d'entretenir un pouvoir alimentaire convenable dans l'horizon de terre travaillée où les racines prélèvent l'essentiel de leur alimentation minérale (Bouhania, et Zehri, 2005).

2- Propriétés physico-chimiques du D.O 20%

2-1- Composition chimique

La composition chimique du phosphate D.O 20% de Djebel Onk reflète la nature minéralogique complexe du minerai sédimentaire. D'après FERPHOS, (2004), les principaux composés chimiques sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 04 : Composition chimique moyenne du phosphate D.O 20% de Djebel Onk (FERPHOS, 2004)

Composé chimique	Symbole	Teneur moyenne (%)	Rôle agronomique
Pentaoxyde de phosphore	P ₂ O ₅	≥ 20,0	Nutriment principal
Oxyde de calcium	CaO	45 – 50	Amendement calcique
Oxyde de magnésium	MgO	2,0 – 3,0	Oligo-élément
Dioxyde de silicium	SiO ₂	3,0 – 8,0	Charge minérale
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	0,5 – 1,5	Minéral argileux
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0,3 – 1,0	Minéral accessoire
Dioxyde de carbone	CO ₂	3,0 – 6,0	Carbonates associés
Fluor	F	2,0 – 3,5	Constituant de la francolite

La teneur en CaO, particulièrement élevée (45 à 50 %), donne au D.O 20% un rôle d'amendement calcique en plus de sa fonction de fertilisant phosphaté, ce qui le distingue des engrais phosphatés solubles de synthèse (Zapata & Roy, 2004). La présence de MgO à des teneurs de 2 à 3 % apporte un complément en magnésium, nutriment secondaire essentiel à la synthèse de la chlorophylle (Mengel & Kirkby, 2001).

Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%)

2-2- Caractéristiques physiques

Les propriétés physiques du phosphate D.O 20% jouent un rôle essentiel dans son efficacité agronomique. D'après FERPHOS (2004) et Zapata & Roy (2004), les principales caractéristiques physiques sont les suivantes :

Tableau 05 : Propriétés physiques du phosphate D.O 20% (FERPHOS, 2004)

Paramètre physique	Valeur	Signification
Solubilité dans l'acide formique (2 %)	> 76 %	Haute réactivité chimique
Finesse de mouture (< 100 µm)	> 80 %	Contact racinaire optimisé
Densité apparente	1,2 – 1,5 g/cm ³	Facilité d'épandage
Humidité résiduelle	< 3 %	Conservation et fluidité
Couleur	Beige – grisâtre	Identification visuelle

2-2-1- La tendreté et la solubilité

La tendreté du phosphate D.O 20% lui confère un degré de solubilité supérieur à 76 % dans l'acide formique à 2 %, ce qui en fait l'un des phosphates naturels les plus réactifs parmi les gisements sédimentaires nord-africains (FERPHOS, 2004). Cette haute réactivité est directement liée au fort taux de substitution carbonate-phosphate au sein de la structure cristalline de la francolite, qui fragilise le réseau cristallin et augmente la surface de contact avec les acides organiques du sol (McArthur, 1985). Selon la classification internationale de réactivité des phosphates naturels proposée par la FAO, un phosphate présentant une solubilité supérieure à 55 % dans l'acide formique est considéré comme directement utilisable en agriculture sans traitement chimique préalable (Zapata & Roy, 2004).

2-2-2- La finesse de mouture

La finesse de mouture constitue le second facteur déterminant de l'efficacité agronomique du D.O 20%. En réduisant la granulométrie des particules à moins de 100 micromètres, le processus de broyage augmente considérablement la surface spécifique du produit, favorisant ainsi la dissolution des phosphates au contact des acides organiques sécrétés par les racines et les micro-organismes du sol (Mengel & Kirkby, 2001). Des études agronomiques ont démontré qu'une réduction de la

Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%)

granulométrie de 250 à 100 µm peut multiplier par deux à trois fois la vitesse de dissolution d'un phosphate naturel dans les conditions pédologiques réelles (Zapata & Roy, 2004).

2-3 Richesse en éléments majeurs secondaires et oligo-éléments

En plus de le phosphore et le calcium, le phosphate D.O 20% de Djebel Onk contient une gamme d'éléments nutritifs secondaires et d'oligo-éléments bénéfiques pour la nutrition des plantes (Cielensky & Benchernine, 1987). Ces éléments, présents à des concentrations variables selon les minéraux hôtes, contribuent à la valeur agronomique globale du produit.

Tableau 06 : Éléments secondaires et oligo-éléments du phosphate D.O 20% (Cielensky & Benchernine, 1987 ; Bezzi et al., 2008).

Élément	Forme chimique	Phase hôte	Rôle nutritif
Magnésium (Mg)	MgO : 2–3 %	Carbonates / Apatite	Chlorophylle, enzymes
Soufre (S)	SO ₃ : traces	Sulfates secondaires	Protéines, vitamines
Strontium (Sr)	Traces (ppm)	Apatite	Analogue calcique
Uranium (U)	Traces (ppm)	Apatite	Traceur géochimique
Terres rares (REE)	Traces (ppm)	Débris osseux / Apatite	Stimulation racinaire
Zinc (Zn)	Traces (ppm)	Minéraux argileux	Enzymes, métabolisme
Vanadium (V)	Traces (ppm)	Minéraux argileux	Fixation azote

3- Propriétés pour la correction des sols

3-1- Action sur les sols lourds, salés et décalcifiés

Grâce à sa haute teneur en calcium (CaO : 45 à 50 %), le phosphate D.O 20% est particulièrement conseillé pour la mise en valeur de sols présentant des difficultés structurales ou chimiques spécifiques (FERPHOS, 2004). Son action corrective se manifeste selon plusieurs mécanismes complémentaires.

Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%)

Tableau07. : Action corrective du phosphate D.O 20% selon le type de sol (FERPHOS, 2004 ; Mengel & Kirkby, 2001)

Type de sol	Problématique	Action du D.O 20%	Résultat attendu
Sols lourds (argileux)	Compaction, imperméabilité	Coagulation des argiles dispersées	Meilleure aération et drainage
Sols salés	Toxicité sodique, dégradation structure	Substitution Na^+ par Ca^{2+}	Diminution de la salinité
Sols marécageux	Excès d'eau, anaérobiose	Amélioration du ressuyage	Drainage naturel amélioré
Sols décalcifiés	Acidité, carences Ca- P	Apport calcique et phosphaté	Remontée du pH, nutrition

3-2- Mécanismes d'amélioration de la structure des sols

L'action structurante du D.O 20% sur les sols argileux repose sur le phénomène de floculation-coagulation des argiles, qui sont dispersées par les ions calcium (Ca^{2+}) libérés progressivement lors de la dissolution du phosphate (Mengel & Kirkby, 2001). Ce processus se traduit par les effets suivants :

- Un bon ressuyage des sols : les agrégats formés par coagulation des argiles créent des macropores facilitant l'évacuation de l'excès d'eau.
- Une diminution de la salinité : les ions Ca^{2+} déplacent les ions Na^+ fixés sur le complexe argilo-humique, réduisant la conductivité électrique du sol.
- Une amélioration de la perméabilité et de la porosité : la structure grumeleuse ainsi obtenue favorise les échanges gazeux et l'infiltration de l'eau.
- Une stabilisation durable de la structure : contrairement aux amendements chimiques solubles, la libération lente du calcium assure un effet amendant prolongé sur plusieurs cycles culturaux. (FERPHOS, 2004 ; Mengel & Kirkby, 2001)

4- Utilisation du D.O 20% comme engrais de fond

4-1- Principe de la libération progressive du phosphore

Le phosphate D.O 20% est utilisé comme engrais de fond car il reste disponible durant tout le cycle végétatif de la plante et ne se libère qu'au fur et à mesure que la plante a besoin (FERPHOS, 2004). Ce mécanisme de libération contrôlée repose sur la dissolution progressive de l'apatite au contact des acides organiques rhizosphériques (acides citrique, malique, oxalique) sécrétés par les racines et les micro-organismes du sol (Mengel et Kirkby, 2001). Contrairement aux engrais phosphatés solubles (superphosphate, DAP) qui libèrent le phosphore immédiatement mais avec un risque de fixation rapide par les sesquioxides de fer et d'aluminium, le D.O 20% maintient une disponibilité phosphatée stable sur l'ensemble de la saison de culture (Zapata & Roy, 2004).

4-2- Doses et modalités d'application

Les apports d'engrais phosphatés ont pour but de créer ou d'entretenir un pouvoir alimentaire convenable dans l'horizon de terre travaillée où les racines prélèvent l'essentiel de leur alimentation minérale (FERPHOS, 2004). Les doses recommandées varient en fonction du type de culture, du niveau de richesse du sol en phosphore assimilable et des objectifs de rendement (Mengel & Kirkby, 2001).

Tableau08 : Doses recommandées de phosphate D.O 20% selon les cultures (FERPHOS, 2004)

Type de culture	Dose recommandée (kg/ha)	Mode d'application	Période optimale
Céréales (blé, orge)	200 – 400	Enfouissement labour	Automne (avant semis)
Légumineuses (fève, pois)	300 – 500	Incorporation profonde	Avant plantation
Arboriculture fruitière	500 – 800	Épandage localisé	Printemps – Automne
Cultures maraîchères	400 – 600	Incorporation sol	Avant repiquage

Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%)

Prairies et pâturages	300 – 500	Épandage surface	Automne – Printemps
Sols très carencés	800 – 1200	Fumure de redressement	Avant travail du sol

4-3- Schéma du processus de dissolution et d'assimilation

La figure suivante illustre le processus de dissolution et d'assimilation des fines de dépoussiérage de phosphate dans le système sol-plante (Mengel & Kirkby, 2001) :

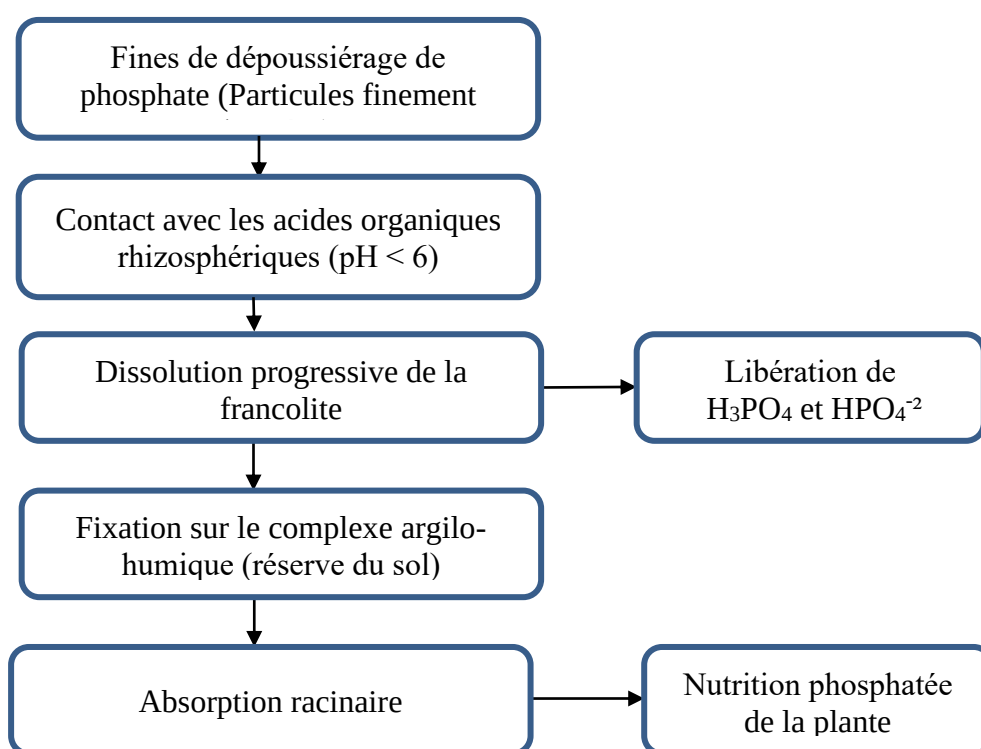


Figure 03 : Schéma du processus de dissolution et d'assimilation des Fines de dépoussiérage de phosphate (Adapté de Mengel & Kirkby, 2001 ; Zapata & Roy, 2004)

5- Avantages agronomiques et limites d'utilisation

5-1- Avantages du phosphate D.O 20%

Comparé aux engrais phosphatés chimiques solubles, Les fines de dépoussiérage de phosphate présente plusieurs avantages spécifiques (Zapata & Roy, 2004 ; FERPHOS, 2004).

Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%)

- Libération lente et progressive du phosphore, évitant le risque de rétrogradation rapide par les sesquioxydes de Fe et Al.
- Effet amendant calcique complémentaire grâce à la forte teneur en CaO (45-50 %).
- Apport d'éléments secondaires (Mg, S) et d'oligo-éléments (Zn, V, Sr) favorable à l'équilibre nutritif des cultures.
- Coût de production faible par rapport aux engrais phosphatés chimiques, sans procédé d'acidulation coûteux.
- Absence de risque de salinisation des sols, contrairement aux engrais solubles à base de chlorures ou sulfates.
- Compatibilité avec l'agriculture biologique, le phosphate naturel étant accepté par les cahiers des charges biologiques.

5-2- Conditions d'efficacité et limites

L'efficacité du phosphate D.O 20% est étroitement conditionnée par les propriétés pédologiques du sol récepteur. Son utilisation est particulièrement recommandée dans quelques conditions

Tableau09 . : Conditions d'efficacité et limites d'utilisation des fines de dépoussiérage de phosphate (Mengel & Kirkby, 2001 ; Zapata & Roy, 2004)

Condition	Favorable	Défavorable / Limitante
pH du sol	pH < 6,5 (sols acides à neutres)	pH > 7,0 (sols calcaires) : dissolution réduite
Texture du sol	Sols argileux à limono-argileux	Sols très sableux : lessivage du P
Teneur en M.O.	Sol riche en M.O. (> 2 %)	Sol très pauvre en M.O. : activité microbienne faible
Humidité	Sol humide (contact eau-minéral)	Sol très sec : dissolution bloquée
Activité biologique	Sol biologiquement actif	Sol stérilisé ou très compact

Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%)

Cultures	Légumineuses, plantes mycorhizées	Cultures à cycle très court
----------	-----------------------------------	-----------------------------

6- Processus de production et contrôle qualité

6-1- Étapes de production

La production du phosphate D.O 20% au complexe de Djebel Onk suit un processus industriel bien défini, articulé autour des étapes suivantes (FERPHOS, 2004; DMT, 2016)

Tableau10 : Étapes de production du phosphate D.O 20% au complexe de Djebel Onk (FERPHOS, 2004 ; DMT, 2016)

Étape	Opération	Équipement	Objectif
1	Abattage et extraction	Foreuse, explosifs	Fragmentation de la roche en carrière
2	Chargement et transport	Pelle mécanique, camions	Acheminement vers l'usine
3	Concassage primaire	Concasseur à mâchoires	Réduction à < 150 mm
4	Concassage secondaire	Concasseur à cône giratoire	Réduction à < 40 mm
5	Criblage	Crible vibrant	Séparation granulométrique
6	Broyage	Broyeur à boulets / barres	Finesse de mouture < 100 µm
7	Séchage	Sécheur rotatif	Humidité résiduelle < 3 %
8	Ensachage / Stockage	Ensacheuse automatique	Conditionnement final

6-2- Contrôle de qualité et spécifications techniques

Le contrôle de qualité du phosphate D.O 20% est réalisé à chaque étape du processus de production, conformément aux normes algériennes et aux spécifications techniques imposées par les

Chapitre II : Les fines de dépoussiérage de phosphate (D.O 20%)

marchés d'exportation (FERPHOS, 2004). Les paramètres de contrôle prioritaires sont la teneur en P_2O_5 , la teneur en MgO (impureté pénalisante pour la transformation chimique), la granulométrie et la teneur en humidité (Kawatra & Carlson, 2014). Toute production ne répondant pas au seuil minimum de 20 % de P_2O_5 est reclassée dans un grade inférieur ou recyclée dans le circuit de traitement (DMT, 2016).

**MATÉRIEL ET
MÉTHODES**

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel et méthodes

Situation géographique de la zone d'étude

1. Situation Géographique et Administrative :

Djebel onk située au nord-est du Sahara algérien et à 20 km de la frontière algéro-tunisienne, la région appartient à la wilaya de Wilaya de Tébessa.

2. Topographie et Géologie :

Frontière naturelle entre les Hauts Plateaux constantinois et le Sahara, le massif calcaire du Djebel Onk s'étend sur 20 km. Il prolonge les monts des Nememcha vers l'est. Le relief est asymétrique : le flanc nord est en pente douce, tandis que le flanc sud plonge rapidement sous les dépôts miocènes et quaternaires. Le point culminant atteint 1 338 m (1 198 m au Djebel Tarfaya, zone d'affleurement de la couche productive), avec des piémonts descendant à 635 m.

3. Hydrographie et Climat :

La zone est traversée par un réseau d'oueds colmatés par des alluvions quaternaires (Oued El Abiod, Oued El Bir). Le bioclimat est subaride et continental, caractérisé par une faible pluviométrie (300 mm/an), un hiver rigoureux et des étés extrêmes ($> 45^{\circ}\text{C}$).

4. Zonage Minier :

L'exploitation s'articule autour de cinq gisements : Djemi Djema, Kef Essenoun, Djebel Onk Nord, Oued Betita et Bled El Hadba. (Bezzi et al., 2008; Boudries, 2008 ; Salhi et al, 2023)

Caractérisation des fines de dépoussiérage

Les fines de dépoussiérage c'est un rejet solide sous forme de fine provenant généralement de traitement à sec (physico-mécanique) au niveau de l'atelier de dépoussiérage.

Afin de caractérisation les fines de dépoussiérage, nous avons effectué les opérations d'échantillonnage, caractérisation granulométrique, caractérisation granulo-chimique, et caractérisation minéralogique.

-1-L'échantillonnage

Les prélèvements des échantillons des fines issues du traitement du phosphate par dépoussiérage permettent d'évaluer les caractéristiques de la fraction fine séparée durant le procédé et de déterminer si elle représente une perte ou une matière valorisable. Ces échantillons servent à réaliser des analyses granulométriques, chimiques et minéralogiques afin de déterminer la teneur en P_2O_5 , le taux d'impuretés et la nature des minéraux présents dans cette fraction fine. Ces analyses permettent également d'évaluer l'efficacité du dépoussiérage, de détecter d'éventuelles pertes de phosphate dans les fines et d'étudier leur possibilité de valorisation dans le domaine agricole ou industriel. Elles

MATÉRIEL ET MÉTHODES

contribuent aussi au contrôle de la qualité du produit final, à l'amélioration du rendement des unités de traitement et à la réduction des impacts environnementaux liées aux poussières.

Des échantillons ont été prélevés des fines issues du traitement de phosphate du Djebel Onk par la voie sèche (dépoussiérage). Certains échantillons ont été envoyés au laboratoire du Complexe Minier de Djebel Onk pour les analyses granulométriques et chimiques, tandis que d'autre ont été envoyés au laboratoire de l'Office National de la Recherche Géologiques et Minières (ORGM) pour les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X.

La préparation des échantillons pour les analyses granulométriques et chimiques a été réalisée selon les étapes suivantes :

- ✓ Quartage ;

L'échantillon est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposée. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial.

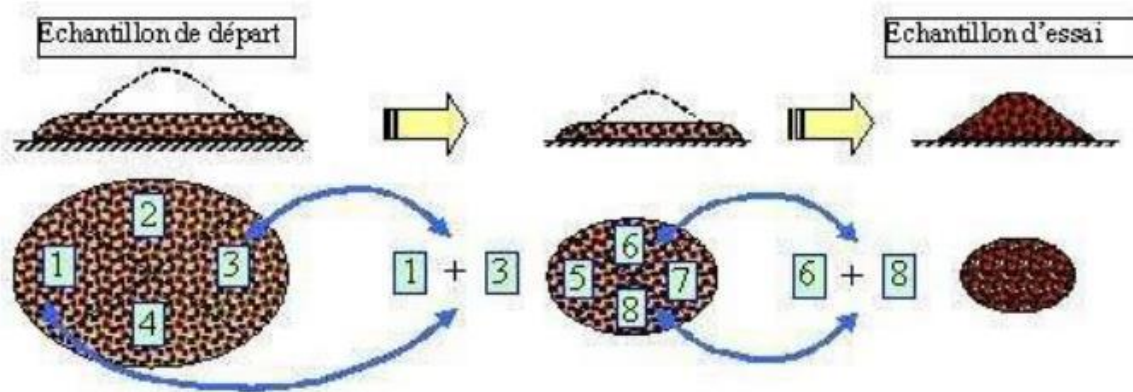


Figure04 .: quartage des échantillons (Hamoudi, 2010)

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Méthodes des analyses (appareils utilisés)

Analyse granulométrique des fines de dépolssiérage de phosphate

L'analyse granulométrique par tamisage permet de déterminer des différentes familles de grains appelées fractions granulométriques constituant les échantillons.

Le tamisage consiste à classer les grains par taille décroissante à travers une colonne de tamis superposés à mailles carrées. La séparation s'effectue par mouvements vibratoires horizontaux et secousses verticales générés par une tamiseuse.

Les données obtenues permettent de :

- Établir la courbe granulométrique de chaque type de fines de dépolssiérage
- Calculer les pourcentages pondéraux cumulés
- Déterminer les paramètres caractéristiques chaque fraction
- Comparer la distribution granulométrique en fonction de la composition chimique

L'analyse granulométrique des échantillons est effectuée sur les tamis nous a permis de déterminer les classes granulométriques suivantes : +0.200 mm, [-0.200+0.160], [--0.160+0.125], [-0.125+0.100], [-0.100+0.08], -0.08 mm. L'échantillon global et les tranches granulométriques destinés à l'analyse chimique.

Analyse minéralogique par Diffraction à Rayons X (DRX)

La diffractométrie de rayons X (DRX), ou XRD en anglais (X-Ray Diffraction), est une méthode d'analyse physico-chimique permettant d'identifier et de caractériser la structure cristalline des matériaux.

L'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre. Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme. On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplanie dans une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. On fait tourner l'échantillon en même temps, ou éventuellement on fait tourner le tube produisant les rayons X (Bunaciu et al., 2015).

Analyses chimiques

Les analyses chimiques des échantillons des classes granulométriques, des fines de dépolssiérage du phosphate ont été réalisées au laboratoire de FERPHOS.

- ✓ Analyse chimique d'échantillons global pour déterminer les éléments P_2O_5 , CaO, CO_2 , MgO, F, SiO_2 , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , Cd, Zn, As, Pb, et Cl;
- ✓ Analyse chimique de chaque classe granulométriques pour déterminer les éléments P_2O_5 , CaO, CO_2 , MgO, F, SiO_2 , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , Cd, Zn, As, Pb, et Cl.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La détermination des teneurs en éléments majeurs dans chaque classe granulométriques mentionnée précédemment est effectuée à l'aide d'un ensemble d'analyses chimiques. Afin de déterminer les teneurs en éléments majeurs différents types d'appareils ont été utilisés (tableau11)



Figure 06 - Broyage des échantillons (préparation de la finesse du produit inférieur à 80 microns)



Figure 05- Absorption atomique (dosage des métaux lourds et autres)



Figure 08 - Calcimètre de Bernard pour détermination du volume de CO₂



Figure 07 - Tamis d'analyse granulométrique (détermination de volume des grains)

MATÉRIEL ET MÉTHODES



Figure 10 - Méthode classique (volumétrique) du dosage du calcium



Figure 09 - Technico analyseur (dosage du P_2O_5 par colorimétrie)



Figure 12 - Balance analytique et appareil de détermination de l'humidité par gravimétrie



Figure 11 - Plaque chauffante pour attaque chimique (Dissolution)



Figure 14 - Bascule pour pesage des produits max 150 kg



Figure 13 - Dilution et filtration des solutions

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Méthodes des analyses chimiques (appareils utilisés)

Tableaux 11 : méthodes utilisées pour les analyses chimiques des échantillons





Société des Mines de Phosphates
SOMIPHOS Spa. Filiale du Groupe MANAL

Complexe Minier de Djebel Onk
Service Laboratoire

Méthodes des analyses chimiques du phosphate .

Elements	Method AFNOR
H ₂ O	Gravimetric
P ₂ O ₅	spectrophotométrie auto NF U42-201
CO ₂	Volumetric -Clcimetre de BERNARD
Ca	Complexometrie EDTA NF U44-146
MgO	Absorption atomique NF U44-145
Fe ₂ O ₃	spectrophotometer Absorption atomique
Al ₂ O ₃	spectrophotometer Absorption atomique
SiO ₂	Gravimetric
SO ₃	Spectrophotometer UV 1800
Na ₂ O	Photomètre à flamme
K ₂ O	Photomètre à flamme
F	Ionometrie
Heat Waste (Deduced)	Gravimetric
Cl (ppm)	Ionometrie
C-Org	Volumetric
P ₂ O ₅ soluble in 2% Citric acid	colorimetric(Auto analyseur Technicon)
P ₂ O ₅ soluble in 2% Formic acid	colorimetric(Auto analyseur Technicon)
Cadmium (Cd)	spectrophotometer Absorption atomique
Zinc (Zn)	spectrophotometer Absorption atomique
Plomb (Pb)	spectrophotometer Absorption atomique
Cuivre (Cu)	spectrophotometer Absorption atomique
Arsenic (As)	spectrophotometer Absorption atomique
Chrome (Cr)	spectrophotometer Absorption atomique
Molybdène (Mo)	spectrophotometer Absorption atomique
Argent (Ag)	spectrophotometer Absorption atomique
Cobalt (Co)	spectrophotometer Absorption atomique
Nickel (Ni)	spectrophotometer Absorption atomique
Manganèse (Mn)	spectrophotometer Absorption atomique
Mercure (Hg)	spectrophotometer Absorption atomique
Selenium(Se)	spectrophotometer Absorption atomique
Vanadium (Va)	spectrophotometer Absorption atomique
Strontium (Sr)	spectrophotometer Absorption atomique
Titane (Ti)	spectrophotometer Absorption atomique
Antimoine (Sb)	spectrophotometer Absorption atomique
Uranium (U)	spectrophotometer Absorption atomique

Elements	Nature de l'instrument	Marque
P ₂ O ₅	Auto Analyser 3-1(type technicon)	SEAL Analytical
MgO	Absorption Atomique AA400	Perkin Elmer

Chef de département étude et développement





Société des Mines de Phosphate SOMIPHOS, Spa Capital social de 1 600 000 000 DA Complexe Minier de Djebel Onk

Tableaux 12 : matériel utilisé au laboratoire

SOMIPHOS E.P.E. S.P.A. SOMIPHOS Société des Mines de Phosphates SOMIPHOS Spa, Filiale du Groupe SONAREM م. ا. ع. م. ا. ع. م. ا. ع.	
Complexe Minier de Djebel Onk Service Laboratoire	
CHEMICAL ANALYSIS (ON DRIED AT 105 + / - 8°C)	
Elements	Method
Phosphoric anhydride (P ₂ O ₅)	AFNOR - CERPHOS colorimetric NF U42-201
Moisture (H ₂ O)	Gravimetric
Carbon dioxide (CO ₂)	Volumetric
Calcium oxide (CaO)	Volumetric NF U44-146
Magnesium oxide (MgO)	spectrophotometer NF U44-145
Iron (III) oxide (Fe ₂ O ₃)	spectrophotometer
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	spectrophotometer
Silicon dioxide (SiO ₂)	Gravimetric
Sulphur trioxide (SO ₃)	Spectrophotometer
Sodium oxide (Na ₂ O)	Spectrophotometer
Potassium oxide (K ₂ O)	Spectrophotometer
Fluor (F)	Ionometric
Chlorine (Cl) in ppm	Ionometric
Cadmium (Cd) in ppm	spectrophotometer
Organic carbon	Gravimetric
Loss of Ignition (LOI)	Gravimetric
P ₂ O ₅ soluble in 2% Citric acid	Cerphos colorimetric
P ₂ O ₅ soluble in 2% Formic acid	Cerphos colorimetric

Chef de département étude et de développement

SOMIPHOS SPA
DED
Société des Mines de phosphates D. O. J. Onk
TRIPOLI ABID



RÉSULTATS ET DISCUSSION

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats Et Discussion

Les résultats de cette étude fournissent une caractérisation physico-chimique approfondie des fines de dépoussiérage du phosphate de Djebel Onk, permettant d'évaluer leur potentiel de valorisation comme amendement phosphaté pour les sols agricoles de la région d'El Oued. L'interprétation croisée des analyses granulométriques, minéralogiques et granulo-chimiques révèle des caractéristiques spécifiques qui conditionnent leur efficacité agronomique et leur acceptabilité environnementale.

1. Caractérisation granulométrique et implications pour la réactivité agronomique

L'analyse granulométrique (Tableau 13) montre que les fines de dépoussiérage sont majoritairement constituées de particules très fines, avec 95,79% de la masse totale inférieure à 0,08 mm (80 μ m). Cette finesse exceptionnelle présente un intérêt agronomique majeur pour plusieurs raisons.

Tableau 13 : Analyse granulométrique des fines de dépoussiérage du phosphate de Djebel Onk

Echantillon Fines dépoussiérage	Poids, g	Fraction, %
Global	1047.22	100
[+0.200]	1.43	0.14
[-0.200+0.160]	1.82	0.17
[-0.160+0.125]	5.66	0.54
[-0.125+0.100]	10.26	0.98
[-0.100+0.08]	24.94	2.38
[-0.08]	1003.11	95.79

Selon Chien et Menon, (1995), la surface des particules est inversement proportionnelle à leur taille. (plus les particules sont fines, plus leur surface de contact avec la solution du sol est importante), favorisant ainsi la dissolution du phosphore et sa mise à disposition pour les plantes. Hammond et al. (1986), ont remarqué que la taille des particules de phosphate naturel réduite de 1 mm à 0,15 mm peut multiplier par quatre l'efficacité agronomique sur sols acides. Nos résultats (fines, < 80 μ m ; 95,79%), se situent dans l'intervalle granulométrique optimale pour une dissolution rapide. Cette finesse des particules est comparable aux résultats de Boulal et al., (2011) en Tunisie et Bationo et al., (1990) au

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Niger. Mokwunye et Chien (1980) ont montré que les phosphates naturels doivent contenir au moins 50% de particules inférieures à 150 µm pour être efficaces en agriculture, les fines de Djebel Onk avec (4,21% de particules supérieures à 80 µm) sont aussi efficaces.

2. Composition minéralogique et solubilité du phosphore

Les diffractogrammes des échantillons (Tableau..) révèlent que l'échantillon N 01 présente une association d'ankérite $[\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2]$ et des traces de clinoptilolite (une zéolite silicotée) et l'Échantillon N 02 affiche la même matrice (hydroxylapatite + ankérite + traces de clinoptilolite) mais avec l'apparition de traces de calcite (CaCO_3).

Le constituant minéralogique majeur des deux échantillons est l'hydroxylapatite ($\text{Ca}_5\text{PO}_4)_3\text{OH}$). D'après Slansky, (1980), dans les phosphates sédimentaires maghrébins, l'apatite se présente généralement sous forme de carbonate-fluorapatite ou francolite.

Ces résultats s'ordonnent avec les travaux de Benlatreche (2014) qui classent les minerais de la région en fonction de leur gangue. L'identification d'ankérite et de calcite confirme les faciès carbonatés interstratifiés décrits dans la couche principale de Djebel Onk. Les phosphates de Djebel Onk présentent généralement des taux de substitution modérés, conférant une réactivité intermédiaire entre les phosphates sédimentaires tendres (très solubles) et les phosphates ignés (peu solubles) (Sassi et al., 2006).

Tableau 14 : Analyse minéralogique par Diffraction à Rayons X (DRX)

N° Echantillon	Lieu de prélèvement	Nature de la roche	Composition minéralogique
01	fine dépoussiérage	Phosphate	composé principalement d'hydroxylapatite, ankérite en association avec clinoptilolite en trace
02	fine dépoussiérage	Phosphate	composé principalement d'hydroxylapatite, ankérite en association avec des traces de clinoptilolite et calcite.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

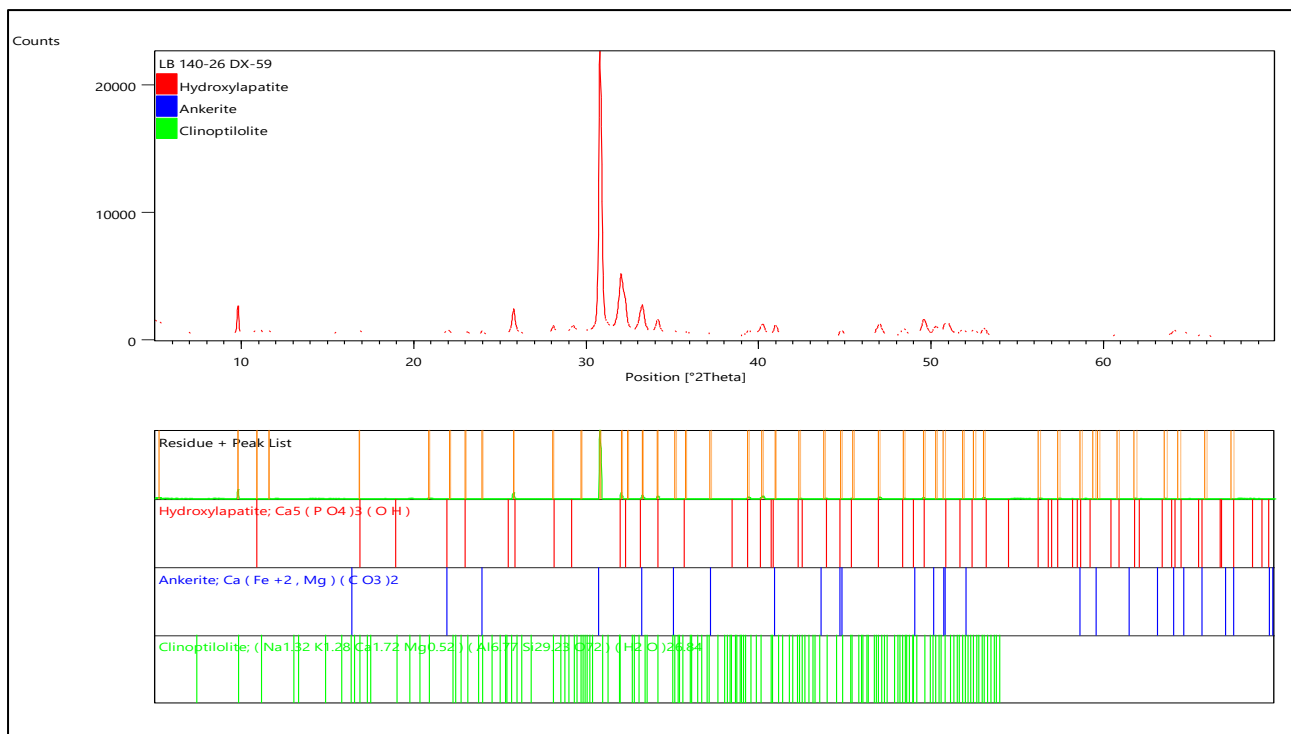


Figure .15 :Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon N°01

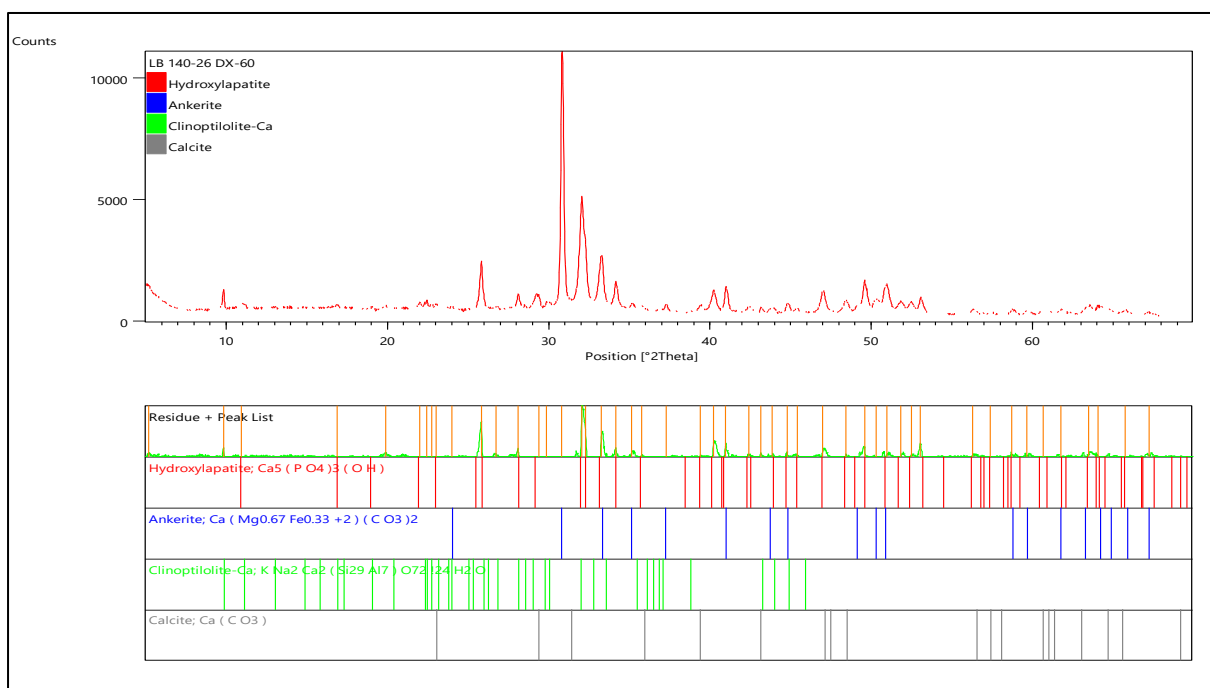


Figure .16 : Diffractogramme aux rayons X de l'échantillon N° 02

3. Distribution du phosphore selon la granulométrie et stratégie de valorisation

L'analyse granulo-chimique (Tableau 15) révèle une hétérogénéité significative de la teneur en P_2O_5 selon les fractions granulométriques. Les fractions les plus grossières $[+0,200 \text{ mm}]$ et $[0,200+0,160 \text{ mm}]$ affichent les teneurs les plus élevées : 29,50% et 28,91% de P_2O_5 respectivement.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

À l'inverse, on observe une diminution progressive jusqu'à 21,83% dans la fraction $[-0,100+0,08 \text{ mm}]$, suivie d'une légère remontée à 24,40% dans la fraction $[-0,08 \text{ mm}]$ qui représente la masse dominante (95,79%).

Les fractions fines $[-0,08 \text{ mm}]$ soient légèrement moins riches en P_2O_5 (24,40% contre 29,50% pour $[+0,200 \text{ mm}]$), elles présentent probablement la meilleure efficacité agronomique potentielle. En effet, l'efficacité d'un phosphate naturel dépend davantage de sa cinétique de dissolution que de sa teneur absolue en phosphore (Chien et Hammond, 1978). Les particules ultrafines ($< 50 \text{ }\mu\text{m}$) se dissolvent beaucoup plus rapidement grâce à leur surface spécifique élevée, compensant largement leur teneur légèrement inférieure. Du point de vue économique, le fait que 95,79% de la masse soit concentrée dans la fraction la plus fine simplifie considérablement la stratégie de valorisation. Un tamisage préalable à $[0,20 \text{ mm}]$ permettrait d'éliminer seulement 4,21% de la masse tout en récupérant un produit homogène très réactif. Alternativement, les fractions grossières riches (4,21% de la masse à 29,50% P_2O_5 en moyenne) pourraient être recyclées dans le circuit de broyage industriel, tandis que la fraction dominante $(-0,08 \text{ mm})$ serait directement valorisée en agriculture.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4. Analyses granulochimique

4-1 Rapport CaO/P₂O₅ et disponibilité du phosphore

Le rapport molaire CaO/P₂O₅ (Tableau15) est un indicateur important de la nature minéralogique et de la solubilité des phosphates. Pour l'apatite fluorée pure [Ca₁₀(PO₄)₆F₂], le rapport théorique est de 1,67. Dans notre échantillon global, le rapport CaO/P₂O₅ est de 1,67 (40,98%/24,51%), ce qui suggère que le phosphore est majoritairement sous forme d'apatite, avec peu de phosphates secondaires plus solubles.

Cependant, ce rapport augmente dans les fractions les plus fines : 1,66 pour -0,08 mm et jusqu'à 1,67 pour +0,200 mm, ce qui traduit un léger enrichissement relatif en calcium par rapport au phosphore dans les particules fines. Cet enrichissement est cohérent avec la présence de carbonates de calcium (calcite) qui se concentrent préférentiellement dans les fractions intermédiaires, comme l'atteste l'augmentation du CO₂ de 6,66% (fraction +0,200 mm) à 15,33% (fraction -0,100+0,08 mm).

Pour les sols de la région d'El Oued, majoritairement calcaires avec des pH compris entre 7,5 et 8,5 (Halitim, 1988; Daddi Bouhoun et al., 2011), la dissolution du phosphore des fines de Djebel Onk sera limitée. Les phosphates naturels sont généralement efficaces sur sols acides (pH < 6,0) où la dissolution est favorisée par les protons H⁺ (Rajan et al., 1996). Sur sols neutres à alcalins, leur efficacité décroît drastiquement, ne représentant souvent que 30 à 50% de celle d'un superphosphate soluble (Chien et al., 1987).

Plusieurs stratégies peuvent être envisagées pour améliorer l'efficacité des fines de Djebel Onk sur les sols des zones sahariennes :

1. **Localisation de l'engrais** : L'application en bandes localisées près des racines, plutôt qu'en épandage généralisé, crée des microsites d'acidification rhizosphérique favorisant la dissolution (Chien et al., 2011).
2. **Co-compostage avec matières organiques** : La décomposition de matières organiques acidifie localement le sol et augmente la dissolution du phosphore naturel (Maroko et al., 1999). Cette stratégie présente un intérêt particulier aux des zones sahariennes où les sols sableux pauvres en matière organique (< 1%) bénéficieraient doublement de cette pratique.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3. **Inoculation microbienne** : L'utilisation de bactéries solubilisant les phosphates (*Pseudomonas*, *Bacillus*) peut augmenter significativement la disponibilité du phosphore naturel (Gyaneshwar et al., 2002; Khan et al., 2009).
4. **Application fractionnée** : Les apports répétés de petites doses maintiennent un renouvellement continu du phosphore dissous, compensant la faible solubilité instantanée (Rajan et al., 1996).

5. Éléments nutritifs secondaires et oligo-éléments

Les fines de dépoussiérage apportent après du phosphore, des éléments nutritifs secondaires bénéfiques pour les cultures. La teneur en calcium (40,98% CaO, soit environ 29% Ca) est particulièrement élevée (Tableau15), positionnant ce produit comme un excellent amendement calcique. Sur les sols sableux, pauvres en calcium échangeable, cet apport pourrait améliorer la structure du sol et la nutrition calcique des cultures, particulièrement les cultures maraîchères exigeantes comme la tomate et le melon (Haouas et al., 2001).

Le magnésium (4,45% MgO, soit environ 2,7% Mg) (Tableau15) constitue également un apport intéressant. Les sols sahariens sont souvent déséquilibrés en faveur du calcium, avec des rapports Ca/Mg dépassant 10:1, alors qu'un rapport optimal se situe entre 4:1 et 7:1 (Metson, 1974). L'apport simultané de calcium et de magnésium par les fines de Djebel Onk pourrait contribuer à rééquilibrer ce ratio, améliorant ainsi la nutrition magnésienne des cultures (Boumaza et al., 2023a)

La présence de fluor (2,15%) (Tableau15) mérite une attention particulière. Le fluor fait partie intégrante de la structure de la fluorapatite et n'est généralement pas considéré comme problématique aux doses d'application agricole des phosphates naturels. Cependant, des accumulations à long terme dans les sols pourraient poser des questions environnementales, bien que les données disponibles suggèrent que la majorité du fluor reste immobilisée dans les fractions résiduelles du sol (Bouzar et al., 2023)

6. Éléments traces et sécurité environnementale

La présence d'éléments traces métalliques (ETM) dans les phosphates naturels est une préoccupation majeure pour leur valorisation agricole, en raison des risques de contamination des sols et de transfert vers les cultures (Nziguheba et Smolders, 2008). L'évaluation environnementale est

RÉSULTATS ET DISCUSSION

cruciale avant toute application agricole standard. Les résultats indiquent des teneurs en métaux lourds et métalloïdes globalement rassurantes :

- Le Cadmium (Cd) affiche une teneur globale de 26 ppm (Tableau15). Le cadmium est l'élément le plus critique dans les phosphates d'Afrique du Nord. On constate qu'il s'accumule préférentiellement dans les fractions fines, passant de 21 ppm (+0,200 mm) à 38 ppm (fraction -0,100+0,08 mm). Bien que ces valeurs restent conformes aux seuils de tolérance agronomiques internationaux pour les engrais bruts (souvent fixés à des limites strictes de 60 à 90 ppm selon les pays) (Régulation (EU) 2019/1009). Une surveillance à long terme est requise pour éviter l'accumulation de Cd dans la chaîne trophique via les sols sableux, qui ont une faible capacité de rétention (Boumaza et al., 2023b)
- Le Zinc (Zn) montre une forte augmentation dans les fractions fines, atteignant 500 ppm. Le zinc étant un oligo-élément essentiel, cette présence peut s'avérer bénéfique pour corriger les carences fréquentes en micro-nutriments des sols arides algériens
- L'Arsenic (As) reste indétectable (< 5 ppm) dans toutes les fractions, éliminant ainsi tout risque de toxicité par ce métalloïde (Boumaza et al., 2023b).
- Le Plomb (Pb) et le Chlore (Cl) restent à des niveaux bas et stables, sans danger majeur pour les cultures locales (Boumaza et al., 2023b).

Tableau 15 : Analyse granulo-chimique des fines de dépoussiérage

Classe granulométrique Oxydes et Elément chimique	Fine dépoussiérage Global	+0.200	-0.200+0.160	-0.160+0.125	-0.125+0.100	-0.100+0.08	-0.08
P ₂ O ₅ %	24.51	29.50	28.91	26.48	23.63	21.83	24.40
CO ₂ %	12.33	6.66	7.33	10.66	13.33	15.33	12.00
CaO %	40.98	49.05	48.15	43.95	39.39	36.45	40.48
MgO %	4.45	1.51	1.81	3.95	5.55	6.12	4.48
F %	2.15	3.50	3.25	2.95	2.01	1.85	2.11
SiO ₂ %	5.00	3.20	3.80	4.02	6.66	8.25	5.10
Na ₂ O %	1.30	1.12	1.21	1.28	1.41	1.50	1.35
K ₂ O %	0.09	0.09	0.09	0.08	0.10	0.11	0.10
Fe ₂ O ₃ %	0.55	0.42	0.45	0.51	0.70	0.78	0.51
Cd (ppm)	26	21	23	25	31	38	26
Zn (ppm)	300	102	150	222	380	500	305
As (ppm)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pb (ppm)	15	17	18	14	10	8	14
CL (ppm)	450	455	395	400	555	600	455

7. Perspectives d'application à El Oued

Les sols de la région d'El Oued se caractérisent par une texture sableuse à sablo-limoneuse (Bellabidi, 2022). Ces sols sont réputés pour être, dans leur ensemble, pauvres en matière organique (< 1%) et en éléments minéraux indispensables aux végétaux (Bouhafs et al., 2022).

En raison de la nature géologique des matériaux parentaux, ces sols sont également calcaires, avec une teneur en calcaire (CaCO_3) allant de 2 à 20. Ce calcaire actif contribue à un pH alcalin. Des analyses rapportent des valeurs de pH allant de 7,70 à 7,77 dans la zone d'El Oued, tandis qu'elles peuvent atteindre 8,15 à 8,25 dans la zone de Kouinine, indiquant un caractère très alcalin (Bellabidi, 2022).

L'agriculture dans cette zone aride repose sur l'irrigation à partir d'eaux souterraines souvent minéralisées. Cette pratique peut entraîner une salinisation progressive des sols. L'irrigation par pivot avec des eaux salées a montré une augmentation significative de la salinité des sols, qui passe de 0,38 dS/m (sites non irrigués, salinité faible) à 1,54 dS/m après 5 ans de culture (sols à salinité élevée). Cette salinité est dominée par les ions sulfate et calcium, ce qui correspond au faciès sulfaté-calcique typique des eaux et des sols de la région (Zohra, 2014).

Ces sols sont généralement pauvres en phosphore assimilable (< 10 ppm). En effet, dans les environnements arides et alcalins riches en calcaire, le phosphore soluble précipite rapidement pour former des phosphates de calcium insolubles, un phénomène connu sous le nom de rétrogradation du phosphore. Cette faible disponibilité du phosphore est un facteur limitant majeur pour la production agricole dans la région d'El Oued, comme cela a été étudié dans le cadre de la dynamique du phosphore dans les sols calcaires sahariens cultivés en blé (Bellabidi, 2022).

L'utilisation de ces fines de dépoussiérage du phosphate à l'état brut comme fertilisant direct à El Oued présente des limites thermodynamiques dues au pH alcalin des sols de la région. Pour libérer efficacement le P_2O_5 , plusieurs voies de valorisation agronomique spécifiques à la région peuvent être proposées :

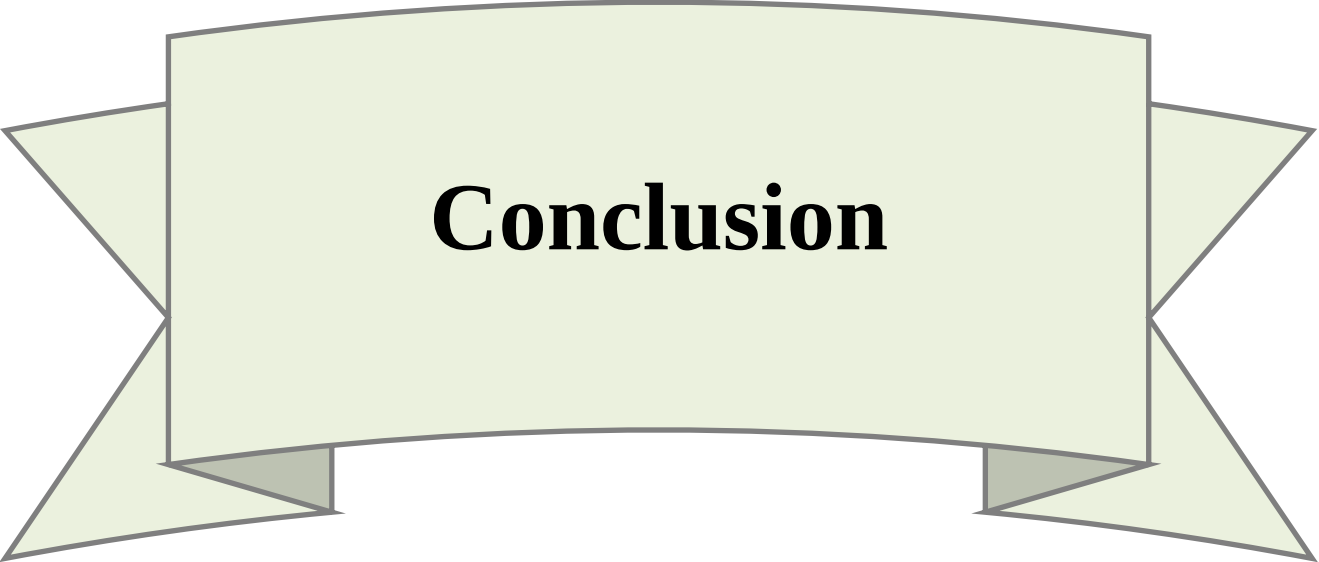
RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. **Le compostage (Co-compostage) :** Mélanger ces fines de poussières de phosphate avec de la matière organique locale (fumier de volaille). Les acides organiques formés lors de la décomposition de la biomasse vont abaisser localement le pH et chélater le calcium, libérant ainsi le phosphore assimilable (Chien et al., 2011).
2. **L'association avec des engrais acidifiants :** Une application conjointe avec du soufre élémentaire ou du sulfate d'ammonium permettrait de créer un micro-environnement acide autour des racines, stimulant la dissolution de la francolite fine (Jourdain, 2023).

8. Bénéfices environnementaux et économie circulaire

Au-delà de l'aspect strictement agronomique, la valorisation des fines s'inscrit dans une logique d'économie circulaire avec plusieurs bénéfices :

1. Réduction des déchets miniers : Les fines de dépoussiérage, actuellement stockées dans des bassins de décantation, posent des problèmes de gestion (occupation d'espace, risque de dispersion éolienne, contamination potentielle des nappes). Leur valorisation agricole réduirait ces volumes.
2. Valorisation d'une ressource locale : Utilisation d'un sous-produit national plutôt qu'importation d'engrais phosphatés, contribuant à la sécurité alimentaire et à la balance commerciale.
3. Réduction de l'empreinte carbone : Les phosphates naturels ont une empreinte carbone 5 à 10 fois inférieure à celle des engrais solubles (production de superphosphate nécessitant acidification à l'acide sulfurique).
4. Amélioration de la qualité des sols : L'apport combiné de phosphore, calcium et magnésium améliore les propriétés physico-chimiques des sols sableux dégradés d'El Oued, contribuant à leur durabilité à long terme.



Conclusion

Conclusion :

L'étude des fines de dépoussiérage du phosphate de Djebel Onk (DO 20%) démontre leur potentiel réel comme amendement phosphaté à valeur ajoutée pour les sols agricoles de la région d'El Oued. Leur caractérisation révèle une granulométrie exceptionnellement fine, avec près de 96 % des particules inférieures à 80 μm , une composition dominée par l'hydroxylapatite et des apports significatifs en calcium et magnésium. Ces propriétés physico-chimiques favorisent une dissolution accrue du phosphore, compensant ainsi une teneur en P_2O_5 légèrement inférieure à celle des fractions grossières. Sur le plan environnemental, les concentrations en éléments traces métalliques (Cd, Zn, As, Pb) respectent les seuils réglementaires internationaux, ce qui conforte la faisabilité d'une utilisation agricole contrôlée.

Toutefois, l'alcalinité marquée et la faible capacité de rétention des sols sahariens limitent l'efficacité directe de ces fines. Pour optimiser leur valorisation, il est recommandé d'associer leur épandage à des pratiques agronomiques ciblées : co-compostage avec des matières organiques locales, inoculation par des microorganismes solubilisateurs de phosphore, application localisée ou fractionnée, et combinaison avec des amendements acidifiants. Ces stratégies permettront de créer des milieux favorables à la dissolution de l'apatite et à la disponibilité du phosphore pour les cultures.

Sur le plan socio-économique et environnemental, cette valorisation s'inscrit pleinement dans les principes de l'économie circulaire. Elle contribue à réduire les volumes de déchets miniers, à diminuer l'empreinte carbone liée à la production d'engrais solubles, et à renforcer l'autonomie fertilisante des exploitations agricoles sahariennes. Des essais agronomiques in situ et un suivi à moyen terme seront nécessaires pour valider l'impact réel de ces fines sur le rendement des cultures, la dynamique du phosphore dans les sols alcalins et le comportement à long terme des éléments traces. Cette recherche ouvre ainsi des perspectives concrètes pour une agriculture saharienne plus résiliente, tout en offrant un modèle de gestion intégrée des co-produits miniers.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A.V.Kazakov 1950: The Phosphorite Facies and the Genesise of Phosphate Deposits, 1950.

(Direction. Géol .Algérie, (NIIe série) Bull.50.1984.pp.81-89

Bationo, A., Christianson, C. B., & Klaij, M. C. (1990). The effect of crop residue and fertilizer use on pearl millet yields in Niger. *Fertilizer Research*, 34(3), 251-258.

Bellabidi, A. (2022). Caractérisation physico-chimique de sable des dunes dans les régions Ouargla, Touggourt et El Oued (Mémoire master en Agronomie, Université Kasdi Merbah Ouargla), 5.4 p

Benlatreche, S. (2014). *Caractérisation pétro-minéralogique et géochimique des couches de phosphate du gisement de Kef Essennoun (Djebel Onk, Algérie)* (Thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.

Benoumessed, A. (2019). Choix et argumentation d'une méthode de traitement des rejets de phosphate de Djebel Onk-Bir el Ater-Tebessa (Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Univ.. Annaba). 128

Bezzi, N., Aïfa, T., Hamoudi, S., & Merabet, D. (2008). Microfacies and depositional environment of the Paleocene phosphate of the Djebel Onk deposit (northeastern Algeria) and geochemical behavior of the main impurities. *Journal of African Earth Sciences*, 50(1), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2007.09.001>

Boudries, A. (2008). Etude géologique et géostatistique de l'uranium (U) dans le gisement de phosphate de kef es-sennoun (algerie orientale) (Doctoral dissertation, Annaba).

Bouhafs I, Dahdi I, Ghendir A, Nouari F. (2022). Etude comparative de la qualité des sols d'agriculture de sud-est algérien (Oued Souf, El Megaier et Touggourt). Mémoire master en Agronomie. Univ- El Oued. 59 p.

Bouhania, R., et Zehri, S. (2005). Etude comparative de deux types d'engrais phosphatés sur céréales à pailles (orge) dans la région d'Oued Righ (Station El-Arfiane). Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Agronomie Saharienne. Univ. Ouargla. Algérie. 60 p.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boulal, H., Benjannet, R., Naman, F., & Chergui, A. (2011). Efficiency of phosphate rock for wheat grown on calcareous soils in Algeria. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 186(5), 1139-1149.
- Boumaza, B., Chekushina, T. V., Kechiched, R., Benabdeslam, N., Brahmi, L., Kucher, D. E., & Rebouh, N. Y. (2023). *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals in Phosphate Rocks, Products, and Their Wastes in the Algerian Phosphate Mining Area (Tébessa, NE Algeria)*. *Minerals*, 13(7), 853. <https://doi.org/10.3390/min13070853>
- Boumaza, B., Kechiched, R., Chekushina, T. V., Benabdeslam, N., Senouci, K., Ait Merzeg, F., ... & Harizi, K. (2024). Geochemical distribution and environmental assessment of potentially toxic elements in farmland soils, sediments, and tailings from phosphate industrial area (NE Algeria). *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133110. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.133110.
- Bouzar, B., Benzerzour, M., & Abriak, N. E. (2023). Fluorine soil stabilization using hydroxyapatite synthesized from minerals wastes. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(11), 105261.
- Brgm (Bureau de Recherche Géologique et Minière en France) 2024:les phosphates naturels et leurs gisements, France, consulté en 2024.
- Bunaciu, A. A., UdriŞtioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*, 45(4), 289-299.
- Cheriet, F., Hasni, S., & Amichi, H. (2016). La filière pomme de terre en Algérie: entre autosuffisance et dépendance des importations. *Les Cahiers du CREAD*, 32(115), 103-128.
- Chien, S. H., & Hammond, L. L. (1978). A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application. *Soil Science Society of America Journal*, 42(6), 935-939.
- Chien, S. H., & Hammond, L. L. (1978). A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application. *Soil Science Society of America Journal*, 42(6), 935-939.
- Chien, S. H., & Menon, R. G. (1995). Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fertilizer Research*, 41(2), 227-234.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chien, S. H., Prochnow, L. I., Tu, S., & Snyder, C. S. (2011). Agronomic use of phosphate rock for direct application. *Better Crops*, 95(3), 23-25.
- Chien, S. H., Sale, P. W. G., & Hammond, L. L. (1987). Comparison of the effectiveness of phosphorus fertilizer products. In *Phosphorus in Agriculture* (pp. 265-293). *The Role of Phosphorus in Agriculture*, American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Cielensky, A., & Benchernine, K. (1987). Étude géochimique du minerai phosphaté de Djebel Onk. Rapport interne FERPHOS, Entreprise nationale du fer et du phosphate.
- Corbridge, D.E.C (2013): Phosphorus, Chemistry, Biochemistry and Technology. CRC Press.
- Côte, M. (2002). Des oasis aux zones de mise en valeur: L'étonnant renouveau de l'agriculture saharienne. *Méditerranée*, 99(3-4), 5-14.
- Daddi Bouhoun, M., Benhamza, M., & Larid, M. (2011). Caractérisation physico-chimique des sols de la région d'El Oued (Sud-Est algérien). *Annales de l'Université de Bechar*, 1(1), 1-8.
- Direction Géologique de l'Algérie. (1984). Carte géologique et ressources minières de l'Algérie. Ministère de l'Énergie et des Industries Pétrochimiques.
- DMT GmbH & Co. KG. (2016). Évaluation des ressources géologiques et des réserves exploitables en phosphate de Djebel Onk. Rapport technique. Deutsche Montan Technologie, Essen.
- FAO, 2004: Food and Agriculture Organization (FAO), 2004
- FAO. (2004). *Use of phosphate rocks for sustainable agriculture*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 13. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Ferphos. (2004). Phosphate D.O 20% Djebel Onk : Fiche technique et propriétés physico-chimiques. Entreprise nationale du Fer et du Phosphate, Tébessa.
- Garnit, H., Bouhlel, S., & Jarvis, I. (2012). Geochemistry and depositional environments of Paleocene–Eocene phosphorites: Metlaoui Group, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 71, 51-64.
- Garnit, H., Bouhlel, S., & Jarvis, I. (2017). The origin of minéralisations in Tunisian-Algerian phosphorites. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 548-551.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ghoul, O. (2022). Valorisation des rejets miniers pour la fabrication des terres cuites : Cas des rejets phosphatés de la mine de Djebel Onk–Tébessa). Mémoire Master en Génie minier. Univ. Tébessa. p89.
- Gyaneshwar, P., Naresh Kumar, G., Parekh, L. J., & Poole, P. S. (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*, 245(1), 83-93.
- Halitim, A. (1988). *Sols des régions arides d'Algérie*. Office des Publications Universitaires, Alger, 384 p.
- Hammond, L. L., Chien, S. H., & Mokwunye, A. U. (1986). Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Advances in Agronomy*, 40, 89-140.
- Hamoudi s (2010). étude de la distribution des éléments traces dans les minerais de phosphate de djebel-onk (tébessa) et leurs comportements selon les différents procédés de traitement. mémoire de magister en chimie. université abderrahmane mira- bejaia. 113 p
- Haouas, A., El Modafar, C., Douira, A., Ibnsouda-Koraichi, S., Filali-Maltouf, A., Moukhli, A., & Amir, S. (2021). Phosphate sludge: Opportunities for use as a fertilizer in deficient soils. *Detritus*, 16, 82-93. doi: 10.31025/2611-4135/2021.15112.
- Jourdain, A. (2023). Etude des propriétés physico-chimiques des Hydroxydes Doubles Lamellaires pour le relargage contrôlé de phosphate comme fertilisant. Thèse Doctorat. Université Clermont Auvergne. France. 254 p.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kawatra, S. K., and Carlson, J. J. “Beneficiation of Phosphate Ore”, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Englewood, CO, Feb. 2014.
- Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2009). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 535-552.
- Khasawneh, F. E., & Doll, E. C. (1978). The use of phosphate rock for direct application to soils. *Advances in Agronomy*, 30, 159-206.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Lambert, R., Grant, C., & Sauvé, S. (2007). Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers. *Science of the Total Environment*, 378(3), 293-305.
- Loganathan, P., Gray, C. W., Hedley, M. J., & Roberts, A. H. C. (2006). Total and soluble fluorine concentrations in relation to properties of soils in New Zealand. *European Journal of Soil Science*, 57(3), 411-421.
- Loganathan, P., Hedley, M. J., & Grace, N. D. (2008). Pasture soils contaminated with fertilizer-derived cadmium and fluorine: livestock effects. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 192, 29-66.
- Maftoun, M., Moshiri, F., Karimian, N., & Ronaghi, A. (2005). Effects of two organic wastes in combination with phosphorus on the growth and chemical composition of lettuce. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(15-16), 2101-2114.
- Maroko, J. B., Buresh, R. J., & Smithson, P. C. (1999). Soil phosphorus fractions in unfertilized fallow-maize systems on two tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 63(2), 320-326.
- McArthur, J. M. (1985). Francolite geochemistry — Compositional controls during formation, diagenesis, metamorphism and weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(1), 23-35. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90188-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90188-7)
- McClellan, G. H., & Gremillion, L. R. (1980). Evaluation of phosphatic raw materials. In F. E. Khasawneh, E. C. Sample, & E. J. Kamprath (Eds.), *The Role of Phosphorus in Agriculture* (pp. 43-80). American Society of Agronomy, Madison, WI.
- McLaughlin, M. J., Tiller, K. G., Naidu, R., & Stevens, D. P. (1999). Review: The behaviour and environmental impact of contaminants in fertilizers. *Soil Research*, 34(1), 1-54.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). Principles of plant nutrition (5th ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Metson, A. J. (1974). Magnesium in New Zealand soils: I. Some factors governing the availability of soil magnesium: A review. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 2(3), 277-319.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Mokwunye, A. U., & Chien, S. H. (1980). Reactions of phosphate rocks in soils of the tropics. In F. E. Khasawneh, E. C. Sample, & E. J. Kamprath (Eds.), *The Role of Phosphorus in Agriculture* (pp. 479-506). American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Nziguheba, G., & Smolders, E. (2008). Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries. *Science of the Total Environment*, 390(1), 53-57.
- Rajan, S. S. S., Watkinson, J. H., & Sinclair, A. G. (1996). Phosphate rocks for direct application to soils. *Advances in Agronomy*, 57, 77-159.
- Rawashdeh, R., & Masad, M. (2014). Removal of cadmium from aqueous solutions using natural Jordanian phosphate. *Desalination and Water Treatment*, 52(10-12), 2134-2143.
- Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant des règles relatives à la mise à disposition sur le marché de produits fertilisants UE. *Journal officiel de l'Union européenne*, L 170, 1-114.
- Salhi, R., Nettour, D., Chettibi, M., Gherbi, C., Benselhou, A., & Bellucci, S. (2023). Characterization of phosphate wastes of Djebel Onk mining complex for a sustainable environmental management. *Technology audit and production reserves*, 3(3/71), 11-19.
- Sassi, A. B., Bejaoui, J., & Zouari, N. (2006). Caractérisation géochimique et minéralogique des phosphates de Djebel Onk (Nord-Est algérien). *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, 17(2), 143-155.
- Sassi, A. B., Bejaoui, J., & Zouari, N. (2006). Caractérisation géochimique et minéralogique des phosphates de Djebel Onk (Nord-Est algérien). *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, 17(2), 143-155.
- Slansky, M. (1980). Géologie des phosphates sédimentaires. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).
- Straaten P.V, 2002: Rocks for Corps, Agro minerals of Sub- Sahara-Africa Nairobi ,Kenya.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Tahri, T. (2019). Caractérisation et valorisation du minerai de phosphate de bled el-hadba pour la fabrication de l'acide phosphorique. Thèse doctorat en Mines. Univ- Tébessa. 166 p

Tebba, S. (2021). La Répartition Des Eléments En Trace Dans Les Phosphates De Djebel Onk. Mémoire Master. Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie.Univ.Annaba.50p

Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture

Usgs (united States Geological) 2023: Phosphate Rock-Statistics and information ,U.S Geological Survey,2023.

Zapata, F., & Roy, R. N. (2004). Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/y5053e/y5053e00.htm>

Zohra, N. F. (2014). Contribution à l'étude de la biodiversité fongique des sols salins et hypersalins (chotts) de la région d'Oued Souf et de leur activité protéolytique. Mémoire master. Univ-Biskra. P 56.7.