

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 – SKIKDA
Faculté des sciences
Dpartement des sciences



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955 – سكيكدة-
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné : FEKRACH FADILA Président de Jury

Certifie que l'étudiant(e) : HELIMI ZINEB

Spécialité : Amélioration des plantes.

Intitulé : La transformation chimique du phosphore pour la production des engrais

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.



Président de Jury

Fekrach

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 – SKIKDA
Faculté des sciences
Dpartement des sciences



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955 – سكيكدة-
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné : FEKRACH FADILA Président de Jury

Certifie que l'étudiant(e) : BOUCHERA LAMIME

Spécialité : Amélioration des plantes

Intitulé : La transformation chimique du phosphore pour la production des engrais

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.



Président de Jury

Fekrach

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 – SKIKDA
Faculté des sciences
Département des sciences



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة 20 أوت 1955 – سكيكدة-
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné : FEKRACH FADILA Président de Jury

Certifie que l'étudiant(e) : ZAIMEN OUMNIA

Spécialité : Amélioration des plantés

Intitulé : La transformation chimique du phosphore pour la production des engrais

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.



Président de Jury

Fekrach Fadila

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 – SKIKDA
Faculté des sciences
Dpartement des sciences



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة 20 أوت 1955 – سكيكدة-
كلية العلوم
قسم علوم الفلاحة

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné : FEKRACH FADILA Président de Jury

Certifie que l'étudiant(e) : CHEBOUR DOUAA

Spécialité : Amélioration des plantes

Intitulé : La transformation chimique du phosphore pour la production des engrais

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.



Président de Jury

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

UNIVERSITÉ 20 AOUT 1955- SKIKDA

MEMOIRE DE MASTER

FACULTÉ DES SCIENCES
FILIÈRE SCIENCES AGRONOMIQUES
DÉPARTEMENT D'AGRONOMIE



كلية العلوم
شعبة العلوم الفلاحية
قسم الفلاحة

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomiques

SPÉCIALITÉ : AMÉLIORATION DES PLANTES

THÈME

**LA TRANSFORMATION CHIMIQUE DU PHOSPHATE
POUR PRODUIRE DES ENGRAIS**

Présenté par : Mlle. LAMINE Bouchera, Mlle. ZAIMAN Oumnia

Mlle. HELIMI Zineb, Mlle. CHEBBOUR Doua

Devant le jury :

Mme. FEKRACHE Fadila

Pr

Président

Mme. OUDJANE Faiza

MCA

Encadreur

Mme. LARIT Sabah

MCA

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE :2024 /2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Dieu Tout-Puissant, source de toute sagesse et persévérance, qui nous a permis de mener à bien ce travail.

On remercie sincèrement notre encadrante universitaire OUDJANE Faiza pour son accompagnement rigoureux, ses conseils judicieux et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce projet. Son expertise et sa bienveillance ont été d'un grand soutien.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à l'ensemble des membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail de fin d'études. Leurs observations, remarques constructives et encouragements ont grandement enrichi cette expérience.

On tient également à remercier Monsieur AMARA Bassam le responsable de laboratoire, ainsi que toute l'équipe de SOMIPHOS, pour leur accueil chaleureux, leur assistance technique et les moyens matériels mis à ma disposition.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble du corps enseignant de département d'agronomie, pour la qualité de la formation reçue tout au long de notre parcours.

Enfin, on n'oublie pas nos famille, nos amis et toutes les personnes qui nous'ont soutenu moralement et encouragé avec patience et affection durant cette étape importante de nos vie.

À tous, merci.

اهداء:

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

" يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ "

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات وبفضاء تتحقق الغايات و الصلاة والسلام علا افضل خلق الله ولحسن حظي وباسم أول خريجة بعائلتها بكل فخر اهدي تخرجي وفرحتي التي انتظرتها طويلا إلى من كانوا مصدر الدعم والعطاء دائما إلى من فرن الله طاعتها بطاعته وأوحى فيها برا واحسانا إلى الذي تحمل الصعاب وسخر حياته من اجل سعادتي إلى الذي سعى طوال حياته لأكون الأفضل إلى يدي اليميني أبي الغالي " واهيم "

إلى من كانت الدعم الأول التحقيق طموحاتي إلى التي انارت كلماتها طريقي الى من كانت دعواتها تحيطني الى امي الغالية " حورية " إلى مصدر قوتي إلى خيرة ايامي وصفوتها إلى ضلعي الثابت وامال ايامي اخوتي نشوى يسرى ,عبد السلام.

الى صديقاتي العزيزات أمنية وزينب و دعاء من تقاسمت معهم لحظات الانجاز و التعب والفرح لكم من القلب تحية ومن الذاكرة ذكرى لا تنسى اتمنى لكم من الحظ الاجمل في الحياة .

إلى من كان منم يعلو فوق كل حب لكل من كان عوننا وسندا في هذه الطريق إلى نوري المضاء الذي لينطني إلى جميع أفراد عائلتي دون استثناء كل باسمه

إلى أساتذتي الأفاضل، منلة هذا العلم، ومصدر إلهامه، شكراً لما بذلتم من جهد، وما زرعتم من علم، وما منحتم من توجيه

وإلى كل من حضر وشركني هذه اللحظة، مهما كانت صلتكم أو كلماتكم، وجودكم يزيد هذا العمل قيمة،

Dédicace

À Papa Salah et Mama Dalila Djebari,

Les mots me manqueront toujours pour exprimer ce que je ressens pour vous... Merci pour votre amour immense, celui qui ne demande rien en retour, qui soutient même dans le silence. Merci pour vos sacrifices, visibles et invisibles, pour chaque prière, chaque geste, chaque regard plein de fierté ou d'inquiétude. Vous êtes ma force, mon refuge, mes repères. Si aujourd'hui j'arrive à franchir cette étape, c'est grâce à vous. Ce mémoire est autant le vôtre que le mien. Je vous aime plus que tout.

*À ma sœur Khaoula, son mari Issam, et leurs deux rayons de soleil, Mayar et Zamar,
Merci pour ta tendresse, ta présence douce et rassurante.*

*À ma sœur Amina, son mari Khalel, et leurs adorables enfants Ranim, Racim et Safouen,
Merci pour les moments partagés, pour ton écoute, ton affection constante et ton regard bienveillant qui me donne toujours confiance.*

*À mon frère Hamza et sa fiancée Tmen,
Merci pour ta présence, ton énergie, ton soutien, même silencieux. Je te souhaite tout le bonheur du monde dans cette belle aventure à deux.*

*À ma personne préféré,
Merci d'être là, tout simplement. Pour ton soutien dans les moments durs, tes mots doux, ta patience, ton amour sincère, et ta présence à mes côtés a rendu ce chemin plus doux. Ce mémoire te revient aussi, car sans toi, il n'aurait pas eu la même saveur.*

*À mes grands-parents paternels, Fatma et Amar (que Dieu ait son âme), Et à mes grands-parents maternels,
Zina (que Dieu accueille dans Sa miséricorde) et Foucef,
Merci pour l'amour simple, la sagesse transmise sans mots, les souvenirs d'enfance qui me portent encore aujourd'hui.*

*À mes partenaires de RFE,
Merci pour les efforts partagés, la solidarité, les défis relevés ensemble. Travailler à vos côtés a été une belle expérience.
Ce projet est le fruit de notre engagement commun.*

*Et à mes amis proches,
Merci pour votre soutien, vos mots sincères, vos sourires au bon moment. Merci d'avoir été là, tout simplement.
Ce mémoire, c'est une étape de plus, mais surtout une preuve d'amour et de gratitude envers vous tous. Vous faites partie de mon cœur, de ma réussite, de ma vie.*

بسم الله الرحمن الرحيم.

(وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ)

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا، ماكنت لأفعل هذا لولا فضل الله فالحمد لله على البدء وعلى الختام....

" إلى نفسي...

إلى تلك الروح التي لم تستسلم رغم كل العثرات، قاومت، وثابرت، وآمنت بأن الحلم لا يُولد مستحيلاً... ها أنا اليوم أقف أمام ثمرة جهدي، فخورة بنفسي وبما أنجزته .

إلى أمي الحبيبة...

إليك يا أغلى ما في الوجود، يا من حملتني في قلبها قبل أن تحملني بين يديها، يا من كنت لي وطناً، وأمناً، وملاًذاً، وسنداً في كل مراحل حياتي .إليك يا نبع العطاء الذي لا يجف، يا دعاءً مستمرًا يرافقني في كل خطوة... يا من سهرت على راحتي، وتحملت عني أعباء الحياة... هذا النجاح لك أولاً وأخيراً، فبدنوك لم أكن لأصل إلى هنا .

إلى أبي...

سندي وفخري، الذي علمني ان الكرامة موقف، الذي لم يبخل يوماً بدعمه وتشجيعه، شكرا لأنك كنت القوة الصامته التي تدفني دون أن تتنطق .

وإلى أخي معاد...

البعيد جسداً، القريب جداً من القلب، مهما فرقتنا المسافات فأنت حاضر في كل لحظة، في كل دعاء، وفي كل نجاح.

إلى أخواتي مريم وأمجاد ...

إلى من كن لي وطناً صغيراً إلى رفيقات الدرب والضحكة شريكات الروح، أنتن البهجة التي تلون حياتي.

إلى عائلتي جميعاً ... إلى كل من كان لي عوناً وسنداً، إلى كل من منحني لحظة حب، دعاء صادق، أو كلمة تشجيع ... هذا النجاح منكم وإليكم.

وإلى صديقاتي الغاليات...

يا من كن البلمس في لحظات الانكسار، والنور حين خفتت أضواء الأمل... شكراً لأنكن كنتن جزءاً جميلاً وأصيلاً في رحلة هذا الإنجاز.

"ما سلكنا البدايات الا بتيسيره وما بلغنا النهايات الا بتوقيفه وما حققنا الغايات الا بفضلته فالحمد لله" .

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'efforts, à ceux qui ont toujours cru en moi, à ceux qui ont été là dans les moments de doute comme dans ceux de joie. À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux, et leur soutien sans faille. À ma famille, pour leur présence réconfortante et leurs encouragements constants. À mes amis fidèles, pour leur patience, leurs mots justes, et les souvenirs partagés. À mes enseignants, pour leur savoir transmis et leur inspiration. Ce modeste aboutissement est aussi le vôtre. Merci, du fond du cœur.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau01 : Propriétés physico-chimiques du phosphore.....	5
Tableau 02 : Différents minéraux de phosphate	5
Tableau 03 : Pays avec les plus grandes réserves de phosphate	13
Tableau 4 : Classification des sources ponctuelles et diffuses de phosphore selon les activités humaines et naturelles	28
Tableau05 : Résultats de l'analyse granulométrique pour le PN.....	42
Tableau06 : Résultats de l'analyse granulométrique pour le PB	42
Tableau 07: Résultats du dosage de P_2O_5 pour le phosphate Noir.....	43
Tableau 08: Résultats du dosage de P_2O_5 pour le phosphate beige.....	43
Tableau 09 : solubilisations de P_2O_5 avec l'acide citrique.....	44
Tableau 10: solubilisations de P_2O_5 avec de l'eau distillée.....	44

LISTE DES FIGURES

Fig1 : Carte représentant les gisements et potentiellement économiques de phosphates du monde.....	10
Fig 2 : Carte des principaux gisements de phosphate en Algérie	10
Fig3 : Les logos des entreprises FERPHOS et SOMIPHOS, actives dans l'exploitation du phosphate en Algérie.....	16
Fig 4 : Organisation de SOMIPHOS	17
Fig 5 : Schéma procédé complexe de djebel	18
Fig 6 : représentant un schéma La division administrative et technique.....	19
Fig 7 : Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk	20
Fig 8 : Situation géologique des gisements de phosphate de la région du Djebel Onk.....	21
Fig 9 : Le cycle du phosphore après intervention de l'Homme	27
Fig 10 : Position géologique des gisements de phosphate de la région du Djebel Onk (s, à l'excédent du bilan et au stockage dans le sol	29
Fig11 :Des diviseurs manuelle pour les poids lourds et les petits échantillons.....	31
Fig12 . Un tamiseur chronologique	32
Fig13 . Un broyeur.....	33
Fig14 : Calcimètre de Bernard	33
Fig15 . Hotte pour l'attaque chimique.....	34
Fig16 . L'attaque chimique de PN et PB	34
Fig17 . Des fioles jaugées de 500 mL remplies de la solution diluée de PN ou PB avec l'acide Perchloric	35
Fig18 . Auto-analyseur technique du dosage de P ₂ O.....	35
Fig19 . L'opération de l'agitation de PN et PB avec l'acide citrique et l'eau	36

Fig20. L'opération de l'agitation magnétique.....	36
Fig21. L'opération de mélanger le AH avec l'extrait neutralisé.....	37
Fig22 : aménagement des lignes pour la plantation. (Photos personnel, 2025)	39
Fig23 : plantation des semences. (Photos personnel, 2025).....	40
Fig24 : préparation de solution engrais-eau pour l'irrigation. (Photos personnel, 2025).....	40
Fig25 : Fabrication de l'acide phosphorique par le procédé Prayon	45

SOMMAIRE

Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : PARTIE THORIQUE	
I - Généralité sur le phosphate	3
1-Définition.....	3
2-Nomenclature.....	3
3 -classificati con des roches phosphatées	3
4- propriétés des phosphate.....	4
5- Defférents minerais du phosphate	5
6- Les a patites	6
6- 1- Teneur en phosphate	7
6-2 - Solubilité de l'apatite	7
7. Gisements de phosphates	9
7-1. Au monde.....	9
7 2. En Algérie	10
8. production de phosphate naturel	11
8-1- Au niveau mondial	11
8-2-Em Algérie.....	11
9. Réserves mondiales de phosphate.....	12
9.1. Classement des ays avec les plus grand réserves de phosphate.....	12
10. Les Utilisation du phosphate.....	13
10-1-Al'echelle mondiale	13
10-2- En Algérie.....	15
II - Généralités Sur les phosphates de Djebel ONK et localisation	15
1. Caractéristique des phosphates de Djbel-onk	15
2. Présentation de l'entreprise	16
2-1- Historique.....	16

2-2- Complexe mine de Djebel. Onk	17
3- localisation du gisement	19
4- présentation géographique et géomorphologiques	20
III- Reserve géologique et réserve exploitable	22
IV- le phosphore et le système sol. Plante	22
1- Rôle physiologique du phosphore	22
2- Exigences nutritionnelles en phosphore	23
3- Excès et carence en phosphore	23
4- les différents états du phosphore dans le sol.	23
5- Dynamique du phosphore dans le sol	24
6 -le phosphore soluble	24
7 - le phosphore insoluble des roches mères.....	24
V -Définition des engrais phosphates	25
1-Types d'engrais phosphates	25
2-le cycle du phosphate a l'échelle du globe.....	25
3- Les sources anthropiques de phosphore	27
4- le phosphore d'origine agricole.....	29
CHAPITRE 2 : Partie Pratique	
I- Méthodologie	31
1-Méthode de préparation des échantillons	31
a- Phosphate special (Noir)	32
2- Analyse granulométrique	32
3-Analyse chimique	32
3-1-Broyage	32
3-2- Dosage du (CO ₂)	33
3-3- Attaque chimique.....	33
3-4- Dosage du (P ₂ O ₅) et transformation chimique	34

3-5-Méthode de l'acide citrique (phosphore assimilable)	35
3-6-Méthode de l'eau	35
4-Transformation chimique du phosphate	36
4-1-Traitement à l'acide sulfurique	36
4-2-Neutralisation	36
b-Phosphate calciné (Beige)	37
5- Analyse granulométrique	37
6- Analyse chimique	37
6-1- Broyage	37
6-2- Dosage du (CO ₂)	37
6-3- Attaque chimique	38
6-4- Dosage du (P ₂ O ₅ .) et transformation chimique	38
6-5- Méthode de l'acide citrique (phosphore assimilable)	38
6-6- Méthode de l'eau	38
7- Transformation chimique du phosphate	38
7-1-Traitement à l'acide sulfurique	38
7-2 Neutralisation	38
8- Application sur le terrain agricole	39
8-1- Préparation et application des engrais	39
8-2- Disposition des parcelles	39
8-3-Préparation du sol et semis	39
8-4- Irrigation.....	40
8-5- Calcul de la dose d'engrais à appliquer	40
II-Résultats	42
1-Analyse granulométrique	42
2-Dosage du (CO ₂)	43
3-Dosage du phosphore (P ₂ O ₅).	43

4-Extraction du phosphore assimilable	43
4-1- Méthode de l'acide citrique	43
4-2- Méthode de l'eau distillée	44
5-Transformation chimique et production de granulés d'engrais	44
6-Résultats et observations de l'application sur terrain agricole	45
III-Discussion	46
1-Engrais à base de phosphate noir (PN) sur sol argileux	46
2-Engrais à base de phosphate beige (PB) sur sol argilo-sableux.....	47
Conclusion	50
Bibliographie	51
Annex.....	53
Resumé	55

INTRODUCTION :

Le phosphore est un élément nutritif essentiel des plantes. En agriculture, un apport en phosphore sous forme d'engrais est indispensable pour obtenir de bons rendements. Comme les réserves de phosphore naturel dégradable sont limitées, un apport ciblé et respectueux de l'environnement est nécessaire pour l'agriculture. D'un autre côté, l'apport d'engrais phosphatés en quantités supérieures aux besoins des plantes peut provoquer une pollution des eaux. Le phosphore (P) est extrait principalement de roches riches en phosphore (phosphate naturel). D'après différentes estimations, les réserves mondiales de phosphate naturel commercialisable seraient actuellement de 12 milliards de tonnes (environ 1,6 milliards de tonnes de P). Avec une consommation annuelle de 132 millions de tonnes, ces réserves suffisent à peine pour une centaine d'années. Ces réserves augmentées des gisements actuellement non-exploitable, en gros 34 à 47 milliards de tonnes de phosphate naturel, pourraient suffire pour 250 à 370 ans de plus. De ce fait, le phosphore est une denrée rare qui devrait être utilisée avec respect et parcimonie. La consommation mondiale de phosphate naturel se fait à 90 % par l'agriculture. Le phosphore y est utilisé en grandes quantités sous forme d'engrais phosphatés inorganiques et d'aliments phosphatés (Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. et Sinaj S., 2004).

L'Algérie l'une des pays qui plus riche des plusieurs substances utiles citant : le plomb, le zinc, le cuivre et le cadmium que (qui s'appellent les éléments trace), on trouve l'usine de Djebel El Onk qui est située au sud-est de l'Algérie, à 100 km de la wilaya de Tébessa. Les ressources prouvées sont estimées à plus de deux milliards et quelques millions de tonnes de phosphates. Ils sont exploités Par la Société Minière des phosphates (SO.MI. PHOS)- filiale de Ferphos.

Dans un contexte de défis climatiques, de croissance démographique et de souveraineté alimentaire, le développement d'une filière nationale de transformation du phosphate en engrais efficaces et durables constitue un enjeu majeur pour l'Algérie.

Malgré l'importance capitale du phosphore pour la production agricole, sa disponibilité sous forme assimilable par les plantes reste un défi majeur, en particulier dans les sols à faible fertilité naturelle comme ceux que l'on retrouve dans de nombreuses régions agricoles en Algérie.

Le pays, bien qu'il dispose de vastes réserves de phosphate naturel, peine à transformer cette ressource de manière optimale. La transformation chimique du phosphate en engrais utilisables (comme le superphosphate ou le phosphate d'ammonium) reste encore largement dépendante de procédés coûteux, peu durables ou peu adaptés aux besoins locaux.

Dans un contexte où l'Algérie cherche à renforcer sa sécurité alimentaire tout en valorisant ses ressources naturelles, une question cruciale se pose : quels sont les meilleurs procédés de transformation chimique

du phosphate qui permettraient d'assurer une production d'engrais à la fois efficace, économiquement viable et respectueuse de l'environnement ?

Cette problématique soulève également des enjeux liés à l'indépendance agricole, au développement industriel local et à la transition vers une agriculture plus durable.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les différentes méthodes de transformation chimique du phosphate en vue de produire un engrais efficace, adapté aux besoins des plantes, tout en respectant les principes de durabilité. Il s'agit notamment de :

- Déterminer les conditions optimales de transformation chimique permettant d'obtenir un produit final riche en phosphore assimilable par les plantes.
- Améliorer la solubilité du phosphate pour optimiser son efficacité nutritionnelle pour les cultures.
- Caractériser le produit final issu de la transformation chimique (type d'engrais obtenu, tel que le superphosphate ou le phosphate d'ammonium).
- Tester l'application de ces engrais sur des cultures végétales afin d'évaluer leur performance en termes de rendement et d'impact sur la fertilité des sols.

La transformation du phosphate naturel par voie acide, notamment à l'aide d'acide sulfurique, permet de produire des engrais phosphatés plus solubles et mieux adaptés aux besoins des sols algériens différemment aux autres méthodes de valorisation. Cette approche augmenterait significativement la biodisponibilité du phosphore, améliorant ainsi l'efficacité des engrais pour l'agriculture.

Partie Théorique

I. Généralités sur les phosphates

1-Définition

Le phosphate est un minerai caractérisé par le radical $(\text{PO}_4)^{3-}$. Parmi les nombreuses espèces, notons l'apatite (à Ca et F), la turquoise bleue (Cu, Al), la vivianite bleue (F), la monazite (Ce, Th) et des produits d'altération des gîtes uranifères (autunite ou uranite ; chalcocite). Elle est une roche sédimentaire marine (sauf la phosphorite) contenant des minéraux phosphatés sous forme amorphe ou cryptocristalline (collophane), ou sous forme finement cristalline (variétés proches de l'apatite), en quantité suffisante pour être exploitée (industrie des engrais p. ex.). Ces phosphates dérivent de l'apatite des roches magmatique, mise en solution dans la mer et fixée par des végétaux et des animaux selon le document algérien, les mines en Algérie, 2005 (os avec 60% de phosphates dents avec 90%, excréments, etc.).

2- Nomenclature des phosphatées

Selon la classification minéralogique internationale de 1974, les roches phosphatées se divisent en deux groupes. Slansky (1980) définit les termes « phosphorite » et « phosphatite » comme suit

- a) **Phosphorite** : Roche sédimentaire composée principalement de minéraux phosphatés de calcium, d'aluminium ou de fer, indépendamment de leur nature minéralogique, souvent de couleur blanchâtre, grisâtre, pâle, ou parfois jaune à rougeâtre. Elles sont classées selon le type de minéral, la texture, la structure, la nature de l'exogangue et leur teneur en P_2O_5 , qui doit être supérieure à 17 % pour être exploitable. Les phosphatites, sont classées selon la présence d'éléments figurés et la taille des grains. souvent formée dans des cavités karstiques,
- b) **Roches de la famille de l'apatite (phosphatites)** : Roche sédimentaire majoritairement constituée de minéraux appartenant à la série de l'apatite.

Selon Notholt (1989), la classification industrielle, plus pragmatique, repose principalement sur la teneur en P_2O_5 .

3- Classification des roches phosphatées

L'étude des roches phosphatées nécessite la distinction de trois types de gangue (partie stérile) :

- a) **Épigangue** : Partie stérile entourant le grain.
- b) **Endogangue** : Partie stérile à l'intérieur du grain.

- c) **Exogangue** : Partie stérile à l'extérieur du grain.

4-Propriétés des phosphates

Le phosphore existe sous plusieurs formes allotropiques, différant par leur couleur et leurs propriétés : blanc-jaune, rouge et violet-noir.

- **Phosphore blanc** : Transparent lorsqu'il est très pur, il apparaît généralement blanc ambré, légèrement malléable, avec une faible odeur d'ail. Il est constitué de molécules tétraédriques P_4 est toxique et s'oxyde lentement à l'air à température ambiante, nécessitant un stockage sous eau. Sous l'effet de la lumière, il se transforme en phosphore rouge.
- **Phosphore rouge** : Formé de longues chaînes moléculaires (par exemple, P_{2000}), il n'est ni toxique ni facilement inflammable. Il se transforme en phosphore blanc gazeux à une température d'environ 280 °C.
- **Phosphore noir** : Allotrope rare, semblable au graphite par sa structure en couches hexagonales, il est conducteur électrique.

Le phosphore est essentiel à la vie, mais sa consommation mondiale croissante pourrait épuiser les ressources disponibles d'ici un siècle. En conséquence, l'ONU et plusieurs scientifiques le classent parmi les matières premières minérales critiques, soulignant la nécessité d'une gestion durable et d'un meilleur recyclage.

La découverte du phosphore est attribuée à Hennig Brandt en 1669 en Allemagne, à partir de l'urine. Il obtint une substance blanche luminescente dans l'obscurité, qui brûlait en produisant une lumière éclatante David R, 2009.

Tableau01 : Propriétés physico-chimiques du phosphore

Propriétés Atomiques	
Masse atomique	30,973761998 ug
Rayon atomique	100 pm
Rayon de valence	107 + 3pm
Rayon DE Van Der Waals	180 pm
Configuration électronique	[Ne] 3s ² 3p ³
Oxydes	Acide faible
Structure Cristalline	Monoclinique
Propriétés Physiques	
Etat ordinaire	Solide
Point de fusion	44,15 °C
Point D'ébullition	280,5 °C
Energie de Fusion	0,657 kJ/mol
Energie de vaporisation	12,4 kJ/mol (1 atm, 280,5 °C)
Volume Molaire	17,02×10 ⁻⁶ m ³ ·mol ⁻¹
DIVERS	
Electronégativité	2,19
Chaleur massique	769 J/kg.K
Conductivité électrique	1 nS/m
Conductivité thermique	0,235 W/m.K
Solubilité	Sol. Dans l'ammoniac

5-Différents minerais du phosphate:

Tableau 02 : Différents minéraux de phosphate (Benoumessad A., 2019).

N°	Désignation	poids Spécifique	Dureté	Couleur	Formule chimique
1	Xénolite	4.4-5.1	4-5	Brun, jaunâtre	YPO ₄
2	Monazite	4.6- 5.4	5-5 .5	Brun,rouge,vert	(Ce, La, Th) PO ₄
3	Ambylgonite	2.9- 3.1	5 .5-6.6	Blanc à lait	(Li, Na) Al .(PO ₄) ₂ (Fe,OH)
4	Apatite	3 -3.2	5	Vert,bleu,transparer	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F, Cl, OH)
5	Pyromorphite	6.5- 7.1	3 .5-4	Variable	Pb ₅ (PO ₄) ₃ Cl
6	Turquoise	2.6- 2.8	5-6	Bleu ciel,vert	Cu ,Al ₆ (PO ₄) ₄ (OM) ₈ 5H ₂ O
7	Chalcosiderite	3.25	4.5	Vert ,transparent	CuFe ₆ (PO ₄) ₄ (OH) ₈ H ₂ O

8	Libethentite	3.9	4	Vert olive	PO ₄ OH
9	Lazulite	3.1	5-6	Bleu azur	(Mg,Fe)Al ₂ (PO ₄) ₂ (OH) ₃ 5H ₂ O
10	Wavelline	2.3	3 .5-4	Incolores,blanc	Al ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₃ 5H ₂ O
11	Childrenite	3.2	5	Brune,jaune	(Fe,Mn)Al(PO ₄)(OH) ₂ H ₂ O
12	Pseudomalachite	4 -4.3	4.5-5	Vert	Cu ₅ (PO ₄) ₂ (OH) ₄ H ₂ O
13	Vaniscite Strengite	2.6- 2.9	3 .5-4 .5	Vert pale	Al(PO ₄) ₂ H ₂ O,Fe(PO ₄) ₂ H ₂ 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	(Fe,Mg,Mn) ₃ (PO ₄) ₂₄ H ₂ O
16	Vivanite	2.6- 2.7	1.5-2	Transparent	Fe ₃ (PO ₄) ₈ H ₂ O

Les différentes richesses naturelles en phosphate de l'Algérie, son principalement sous forme de Fe₃(PO₄)₈H₂O, sont concentrées dans l'est du pays, avec des réserves estimées à environ deux milliards de tonnes. Ces gisements se répartissent en deux grandes familles selon leur contexte géologique :

1. **Gisements du sud des Hauts-Plateaux**, près de la frontière tunisienne, à proximité de Tébessa, comprenant :

a- Djebel El Kouif , b- Djebel Onk, c- Djebel Dyr

2. **Gisements du nord des Hauts-Plateaux**, s'étendant de Bordj Bou Arréridj à l'ouest jusqu'à Souk Ahras à l'est, en passant par Sétif, incluant : a- Tocqueville, b- Bordj Ghdyr, c- M'Zaïta, d- Djebel Dekhna. Ces gisements sont classés en fonction de leur statut d'exploitation actuel :

- **Gisements exploités** : Djebel Onk (secteurs nord et sud)- M'Zaïta - Bordj Ghdyr - Tocqueville

- **Gisements non exploités** : Djebel Dekhna, exploité dès 1912, mais abandonné en raison d'une faible teneur en phosphate. Djebel Dyr, Similaire à Djebel Dekhna, abandonné pour la même raison. Puis Djebel El Kouif exploité à partir de 1947, mais abandonné en raison de basses teneurs en P₂O₅.

Ces gisements non exploités constituent des réserves potentielles pour répondre à une éventuelle baisse de production des gisements actuels ou à une augmentation de la demande mondiale de phosphate algérien. (Benoumessad A., 2019).

6- Les apatites :

Le terme « apatite » désigne une famille de minéraux de formule générale Me₁₀(XO₄)₆Y₂, où :

- Me : est un cation divalent (Ca²⁺, Pb²⁺, Ba²⁺, etc.).
- XO₄ : est un oxyanion (PO₄³⁻, VO₄³⁻, SiO₄⁴⁻, etc.) .
- Y : est un anion monovalent (F⁻, Cl⁻, OH⁻, etc.).

L'apatite de référence est la « fluorapatite » ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$), où le fluor peut être remplacé par un ion chlorure (chloroapatite) ou hydroxyle (hydroxyapatite). L'apatite est le phosphate le plus abondant sur Terre et constitue le principal composant des dents et des os.

Les apatites se forment facilement dans divers environnements géologiques et restent stables sur de longues périodes. Les apatites phosphocalciques, en particulier, sont les plus courantes, car les phosphates de calcium évoluent naturellement vers la forme apatite, qui est la plus stable. Selon leur environnement géologique :

- **Roches ignées et métamorphiques** : (formées à haute température et pression, $\sim 600^\circ\text{C}$, 120 MPa), les apatites sont bien cristallisées, principalement des fluorapatites avec une faible proportion d'hydroxyapatites.

- **Milieus sédimentaires** : Les apatites sont microcristallines et présentent des substitutions significatives par des carbonates. Elles proviennent de phosphates authigènes ou biogéniques (issus de la dégradation de matière organique comme les os ou arêtes).

Les phosphates naturels sédimentaires sont principalement composés d'apatites carbonatées (francolites) associées à divers minéraux accessoires et impuretés. Ces derniers montrent une grande variabilité chimique due à des substitutions isomorphes dans leur réseau cristallin, ce qui entraîne une diversité de propriétés. (McClellan G.H., & Van Kauwenbergh, S.J., 1990).

6.1. Teneur en phosphate

La teneur en phosphate des gisements, ou « grade », est exprimée conventionnellement en « pentoxyde de phosphore (P_2O_5) ». Dans les gisements de moindre qualité, cette teneur peut être aussi faible que 4 %. Dans l'industrie, la teneur est souvent convertie en « phosphate tricalcique (BPL) », où $\text{P}_2\text{O}_5 \times 2,1853 = \text{BPL}$, un terme hérité de l'époque où les os étaient la principale source de phosphate pour les engrais. Les industriels exigent généralement une teneur minimale de 28 % de P_2O_5 , et les phosphates commercialisés dépassent souvent 30 % de P_2O_5 (soit 65 % de BPL). Pour atteindre ces seuils, les minerais subissent des procédés d'enrichissement comme le lavage, le tamisage, la décarbonatation, la séparation magnétique et la flottation, (Hammond, L.L., & Day, D.P., 1992).

6-2 Solubilité de l'apatite

La solubilité des phosphates naturels pour une application directe (PNAD) est mesurée à l'aide de trois solutions principales :

- Citrate d'ammonium neutre (CAN),
- Acide citrique à 2 % (AC),
- Acide formique à 2 % (AF).

Ces méthodes, dérivées de l'analyse des engrais phosphatés solubles, nécessitent un respect strict des procédures pour éviter des variations dans les résultats. La solubilité des francolites dans le CAN dépend de leur substitution carbonatée :

- Francolites fortement substituées ($\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5 \approx 1,67$) : solubilité d'environ 7 % de P_2O_5 .
- Francolites faiblement substituées ($\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5 \approx 1,33$) : solubilité de 1 à 2 % de P_2O_5 .

Les apatites ignées ont une solubilité similaire à celle des francolites sédimentaires peu substituées (1 à 2 % de P_2O_5). Les phosphates naturels contenant des apatites carbonatées à faible teneur en fluor et avec substitution OH peuvent présenter une solubilité comparable à celle des francolites fortement substituées, (McConnell, D., 1973; Kirwan, R., 1974).

Les trois solutions généralement employées pour mesurer la solubilité (réactivité) d'un phosphate naturel pour une application directe (PNAD) sont le citrate d'ammonium neutre (CAN), l'acide citrique à 2 pour cent (AC), et l'acide formique à 2 pour cent (AF). Les méthodes employées pour mesurer la solubilité du phosphate naturel proviennent des procédures employées pour analyser les engrais phosphatés conventionnels solubles dans l'eau et le citrate. A moins d'observer strictement les étapes de la procédure standard, les données de solubilité obtenues par différents expérimentateurs employant les mêmes méthodes sur les mêmes phosphates naturels peuvent montrer des divergences considérables.

La solubilité dans le CAN des francolites ayant une quantité connue maximum de substitution de CO_3 ($\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5=1,67$) est d'environ 7 pour cent du P_2O_5 . Cette valeur diminue avec la diminution de la substitution carbonatée jusqu'à environ 1-2 pour cent P_2O_5 pour les francolites sédimentaires ayant une substitution carbonatée très faible ($\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5 = 1,33$).

Les Phosphates naturels (PN) contenant de l'apatite carbonatée avec une faible teneur en fluor et une substitution OH peuvent avoir des solubilités dans divers milieux d'extraction aussi élevées que les francolites les plus fortement substituées.

Selon McConnell, D., (1973) et Kirwan, R., (1974), les solubilités dans le CAN des apatites magmatiques sont généralement d'environ 1 à 2 pour cent du P_2O_5 ou à peu près comme les francolites sédimentaires avec une faible substitution carbonatée.

7- Gisements de phosphates

7-1- Au le monde :

Le terme « phosphate naturel », (PN) désigne des assemblages minéraux riches en minéraux phosphatés, qu'ils soient sous forme de minerais bruts ou concentrés. Les gisements sédimentaires représentent 80 à 90 % de la production mondiale des dix dernières années. Ils se caractérisent par :

- Une grande variabilité chimique et physique.
- Des couches épaisses et souvent horizontales.
- Une localisation dans des formations géologiques de divers âges.

Les principaux gisements sédimentaires se trouvent au Maroc, dans d'autres pays africains, aux États-Unis, au Proche-Orient et en Chine. Ils contiennent principalement de la francolite (fluorapatite carbonatée), particulièrement réactive lorsqu'elle présente une forte substitution carbonatée, ce qui la rend idéale pour une application directe comme engrais.

Les gisements ignés, représentant 10 à 20 % de la production mondiale, sont exploités en Russie, au Canada, en Afrique du Sud, au Brésil, en Finlande, au Zimbabwe, et dans d'autres pays comme l'Ouganda ou le Malawi. Ces gisements contiennent des fluorapatites peu réactives, moins adaptées à une application directe. Les minerais de phosphate de fer et d'aluminium issus du lessivage des apatites ignées ou sédimentaires sont généralement inadaptés à une application agricole directe. (Gremillion & McClellan, 1975; McClellan & Gremillion, 1980; Van Kauwenbergh & Hellums, 1995).

Le potentiel économique d'un gisement dépend principalement de sa teneur en P_2O_5 sous forme d'apatite. Les éléments comme les carbonates libres, le fer, l'aluminium, le magnésium ou le chlorure, bien que critiques pour la production d'engrais, sont moins déterminants pour une application directe.



Fig1 : Carte représentant les gisements et potentiellement économiques de phosphates du monde .

7-2 - en Algérie :

L'Algérie dispose d'environ **2 milliards de tonnes de réserves de phosphate**, principalement localisées dans l'est du pays, autour de **Tébessa** (gisements de **Djebel Onk**, **Djebel El Kouif**, **Djebel Dyr**) et dans la région des **Hauts-Plateaux** (gisements de **Tocqueville**, **Bordj Ghdyr**, **M'Zaïta**, **Djebel Dekhna**). Le gisement de **Djebel Onk**, exploité depuis plus de **40 ans**, représente près de la moitié de ces réserves et offre une durée de vie estimée à **environ 200 ans** au rythme actuel de production.



Fig 2 : Carte des principaux gisements de phosphate en Algérie. (source WIKIPEDIA)

8. Production de phosphate naturel

8.1 Au niveau mondial

Le tableau 1 illustre la production mondiale de phosphate naturel (PN) pour l'année 1999, dernière année pour laquelle des données fiables sont disponibles. Les quatre principaux pays producteurs sont les États-Unis, Chine, Maroc et Sahara occidental, et Fédération de Russie représentent environ (72 %) de la production totale mondiale. Les douze premiers producteurs contribuent à plus de (93 %) de cette production, tandis que les (6 à 7 %) restants sont répartis entre une vingtaine d'autres pays.

À l'échelle globale, l'utilisation et la production de phosphate naturel pour application directe (PNAD) demeurent marginales, et les données fiables sont difficiles à recueillir et à analyser. Dans de nombreux pays, les PNAD ne sont pas classés comme engrais, ce qui entraîne leur exclusion des statistiques officielles de consommation. Les informations disponibles proviennent souvent de sources informelles, avec une fiabilité variable. Pour estimer les PNAD, il est parfois nécessaire de déduire la quantité de PN utilisée pour d'autres usages (comme la fabrication d'engrais phosphatés) des volumes totaux importés ou consommés dans un pays. Ainsi, les données sur les PNAD présentées dans ce chapitre sont à caractère indicatif plutôt que définitif.

8-2-En Algérie

L'Algérie dispose de ressources phosphatées importantes, permettant de répondre aux besoins nationaux tout en exportant une part significative de sa production. L'entreprise nationale du fer et du phosphate (FERPHOS) est responsable de l'exploitation minière et fournit à l'entreprise de transformation et de production ASMIDAL les quantités nécessaires de phosphate naturel, avec un excédent destiné à l'exportation. FERPHOS a lancé un appel à manifestation d'intérêt pour la création d'un pôle industriel dédié à la fabrication de produits phosphatés. La distribution de ces produits s'organise autour de quatre réseaux, tous liés à ASMIDAL :

- ASMIDAL (réseau 1) : 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).

Selon la Commission Européenne (2007), FERPHOS exploite quatre principaux gisements de phosphate, avec des productions annuelles variables :

- Djebel Onk : environ 1 500 000 tonnes par an.
- M'Zaïta : environ 100 000 tonnes par an.

- Bordj Ghdyr : environ 20 000 tonnes par an.
- Tocqueville : entre 5 000 et 10 000 tonnes par an.

9- Réserves mondiales de phosphate

Les roches phosphatées, présentes dans des dépôts sédimentaires ignés à travers le monde, sont essentielles pour produire des engrais qui compensent la perte de phosphore dans les sols agricoles. L'extraction se fait principalement par des méthodes à ciel ouvert, bien que des gisements en Chine et en Russie soient exploités par des mines souterraines. Selon le US Geological Survey, les réserves mondiales de phosphate s'élevaient en 2017 à environ 68 milliards de tonnes métriques. Le Centre international de développement des engrais estimait en 1968 que ces réserves pourraient durer plusieurs siècles sans nouvelle découverte.

9-1- Classement des pays avec les plus grandes réserves de phosphate

1. Maroc : Il détient environ 70 % des réserves mondiales, soit 50 milliards de tonnes, et est le premier exportateur mondial. La majeure partie de sa production provient de la mine de Bou Craa, située au Sahara occidental. Cependant, les coûts élevés d'extraction et les tensions géopolitiques freinent son développement.

2. Chine : Avec 5 % des réserves mondiales (3,1 milliards de tonnes), la Chine est le plus grand producteur, avec 138 millions de tonnes métriques par an. À ce rythme, ses réserves pourraient s'épuiser d'ici 35 ans.

3. Syrie et Algérie : Ces deux pays possèdent respectivement 3 % des réserves mondiales, soit environ 1,8 milliard de tonnes pour la Syrie et 2,2 milliards de tonnes pour l'Algérie. En Syrie, les troubles civils depuis 2010 ont fortement réduit la production.

4. Russie, Afrique du Sud, États-Unis, Égypte et Jordanie : Chacun représente 2 % des réserves mondiales. En Russie, OJSC Apatit est le principal fournisseur. L'Afrique du Sud est le deuxième producteur africain. Les États-Unis, avec 1,5 % des réserves, sont le troisième producteur mondial, exploitant des mines en Floride, Idaho, Caroline du Nord et Utah.

5. Autres pays : Le Pérou, l'Arabie Saoudite, le Sénégal, l'Australie et l'Irak représentent chacun une part moindre des réserves mondiales (moins de 1 %).

À la consommation actuelle, les réserves mondiales de phosphate pourraient **s'épuiser d'ici 260 ans** si aucune nouvelle réserve n'est découverte. La demande croissante de phosphore, essentiel pour

l'agriculture, nécessite des mesures comme une utilisation plus efficace des engrais, le recyclage du phosphore et l'exploration de nouveaux gisements pour préserver les ressources existantes.

Tableau 03 : Pays avec les plus grandes réserves de phosphate (Bernice Walsh, 2024)

Rang	Pays	Réserves de phosphate (% du total mondial)
1	Maroc	70
2	Chine	5
3	Syrie	3
4	Algérie	3
5	Russie	2
6	Afrique du Sud	2
7	États-Unis	2
8	Égypte	2
9	Jordanie	2
10	Pérou	1
11	Arabie Saoudite	1
12	Sénégal	1
13	Autres pays	1
14	Australie	1
15	Irak	1
16	Vietnam	<1
17	Tunisie	<1
18	Brésil	<1
19	Inde	<1
20	Israël	<1
21	Kazakhstan	<1
22	Mexique	<1

10-Les utilisations du phosphate

10-1-À l'échelle mondiale

La chimie des phosphates repose essentiellement sur l'acide phosphorique, un intermédiaire indispensable à la fabrication de nombreux produits. L'utilisation des phosphates, que ce soit comme engrais ou dans les applications techniques, ne cesse d'augmenter. Les gisements exploités à travers le monde représentent aujourd'hui des tonnages considérables. Les principales utilisations du phosphate se répartissent en trois catégories :

a. Industrie alimentaire :

Les phosphates sont utilisés dans l'industrie alimentaire depuis plus de cent ans, notamment dans la fabrication du pain et des gâteaux. La réaction entre les sels de phosphate acide et le bicarbonate de sodium libère du dioxyde de carbone, ce qui permet d'obtenir une texture aérée dans les produits de boulangerie.

Dans le lait évaporé, un déséquilibre du pH ou du rapport calcium/phosphore peut provoquer une gélification. L'ajout de phosphate disodique (0,1 %) avant la concentration permet d'éviter ce phénomène. De même, l'utilisation d'hexamétophosphate de sodium prolonge la durée de conservation des laits concentrés riches en solides.

Dans les boissons gazeuses, l'acide phosphorique est couramment utilisé comme acidulant, en particulier dans les colas et certaines boissons fruitées. Les produits en poudre sont souvent acidulés à l'aide de sels de phosphate acide. Enfin, dans les boissons isotoniques destinées aux sportifs, des mélanges de phosphates de sodium et de potassium sont employés pour maintenir le pH et la concentration ionique à des niveaux optimaux.

b. Engrais phosphatés

b.1. Engrais phosphatés simples

Ils représentent environ **35 à 40 %** de la production mondiale de phosphates. On distingue notamment :

- **Phosphates moulus** : obtenus par broyage fin du minerai ; leur teneur en P_2O_5 est de 26 à 33 %.
- **Phosphates calcinés** : obtenus par calcination du minerai à 600–1000 °C ; leur usage est en déclin en raison de leur coût énergétique élevé.
- **Superphosphate simple (SSP)** : obtenu par attaque du phosphate naturel à l'acide sulfurique ; il contient environ 18 % de P_2O_5 .
- **Triple superphosphate (TSP)** : issu de la réaction entre le phosphate et l'acide phosphorique ; il contient environ 46 % de P_2O_5 .

b.2. Engrais phosphatés composés

Ce sont des engrais résultant de réactions entre l'acide phosphorique et l'ammoniac. Ils incluent :

- **Phosphate monoammonique (MAP)** : neutralisation de l'acide phosphorique par de l'ammoniac.
- **Phosphate diammonique (DAP)** : neutralisation d'une mole d'acide phosphorique par deux moles de NH_3 .

- **Sulfate-phosphate d'ammonium** : réaction de l'acide phosphorique avec de l'ammoniac et de l'acide sulfurique.
- **Phosphate-nitrate d'ammonium** : obtenu avec de l'acide nitrique.
- **Phosphate d'ammonium-urée** : obtenu par réaction avec de l'urée.
- **Nitrophosphate** : obtenu par attaque directe du phosphate naturel à l'acide nitrique.

c. Alimentation animale

L'alimentation animale représente environ **5 à 6 %** de la production mondiale de phosphate. Dans ce domaine, c'est principalement le **phosphate bicalcique** qui est utilisé. Il est obtenu par traitement du phosphate naturel avec de l'acide chlorhydrique.

10-2-En Algérie

Les phosphates algériens, bien que moins riches que ceux du Maroc ou des États-Unis, ont une qualité comparable à ceux de Tunisie. Leur teneur en **phosphate tricalcique** varie entre **63 % et 70 %**.

Leur principal usage est agricole, notamment sous forme de superphosphates. L'industrie des superphosphates en Algérie est florissante grâce à la présence de gisements importants. Trois usines emploient plus de 200 ouvriers pour transformer le phosphate, provenant des mines de **M'Zaita**, **Tocqueville** et **Djebel El Kouif**, par traitement à l'acide sulfurique (Benoumessad, 2019).

La **production annuelle** de superphosphate dépasse **70 000 tonnes**, dont environ **40 000 tonnes** sont consommées localement par l'agriculture algérienne. Le reste, soit **30 000 tonnes**, est exporté. Toutefois, pour couvrir la consommation totale locale estimée à **60 000 tonnes**, l'Algérie importe également environ **20 000 tonnes** de France.

La production d'engrais phosphatés est principalement assurée par la société **ASMIDAL** (wilaya d'Annaba), alimentée par le **gisement de Djebel El Onk**.

II. Généralités sur les phosphates de Djebel Onk et localisation

1-Caractéristiques des phosphates de Djebel Onk

Le minerai de phosphate de **Djebel Onk** se présente sous forme granulaire et sableuse, constitué principalement de pseudoolithes et de pellets, souvent associés à des supports organiques tels que les diatomées et les radiolaires.

- **Granulométrie** : Le minerai appartient majoritairement à la classe des **arénites** (grains < 2 mm), et plus rarement à celle des **rudites** (grains > 2 mm).

- **Teneur moyenne** : Le minerai brut affiche une teneur en P_2O_5 généralement comprise entre **25 et 28 %**.
- **Composition chimique** :
 - Il est **très carbonaté**, avec un **rapport CaO/ P_2O_5** compris entre **1,75 et 1,90**.
 - Il est **peu siliceux** et contient **peu de fer**, ce qui améliore sa valeur industrielle.

2- Présentation de l'entreprise

2-1- Historique

L'exploitation des phosphates en Algérie a commencé en **1873**, avec la découverte du gisement de **Boghari**, suivie de celle du **gisement de Djebel Onk** dans les **années 1960**.

La société **SOMIPHOS**, filiale de **FERPHOS**, a été créée en **2005** sous forme de **société par actions**. Elle est spécialisée dans :

- L'**extraction** des phosphates.
- Leur **enrichissement**.
- Leur **transformation**.
- Leur **commercialisation** à l'échelle nationale et internationale.

Le **complexe minier de Djebel Onk** constitue l'unité principale de SOMIPHOS. Il est **certifié ISO 9001** (management de la qualité) et **ISO 14001** (management environnemental), ce qui témoigne de son engagement envers les standards internationaux de production durable.



Fig3 : Les logos des entreprises FERPHOS et SOMIPHOS, actives dans l'exploitation du phosphate en Algérie.

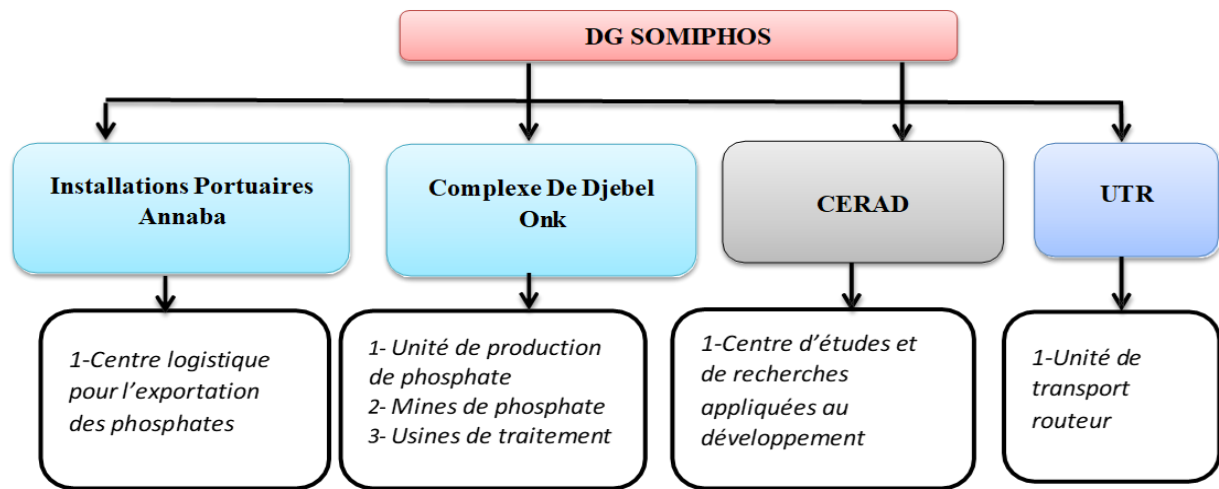


Fig 4 : Organisation de SOMIPHOS. (Boumediane, 2016)

SOMIPHOS, extrait le phosphate brut du sol grâce à des carrières à ciel ouvert dans le bassin phosphatier de Djebel Onk. Le minerai est par la suite criblé, lavé et séché.

Le minerai traité, est alors expédié aux Installations Portuaires de Annaba, soit par voie ferrée ou par transport routier. La totalité de la production est exportée, comme matière première, à destination de plusieurs pays à travers le monde.

2-2-Complexe mine de DJEBEL-ONK :

Le complexe du **Djebel-Onk** est la principale Stratégique Business des 2 Unité de **FERPHOS** et **SOMIPHOS** pour la Production de phosphates Composé de deux mines à ciel ouvert et d'une usine de traitement de phosphate, Le complexe est en phase finale de certification aux normes de L'International Standardisation Organisation, ISO 9001 Version 2000 (Système de Management de la Qualité) et ISO 14001(Système de Management Environnemental).

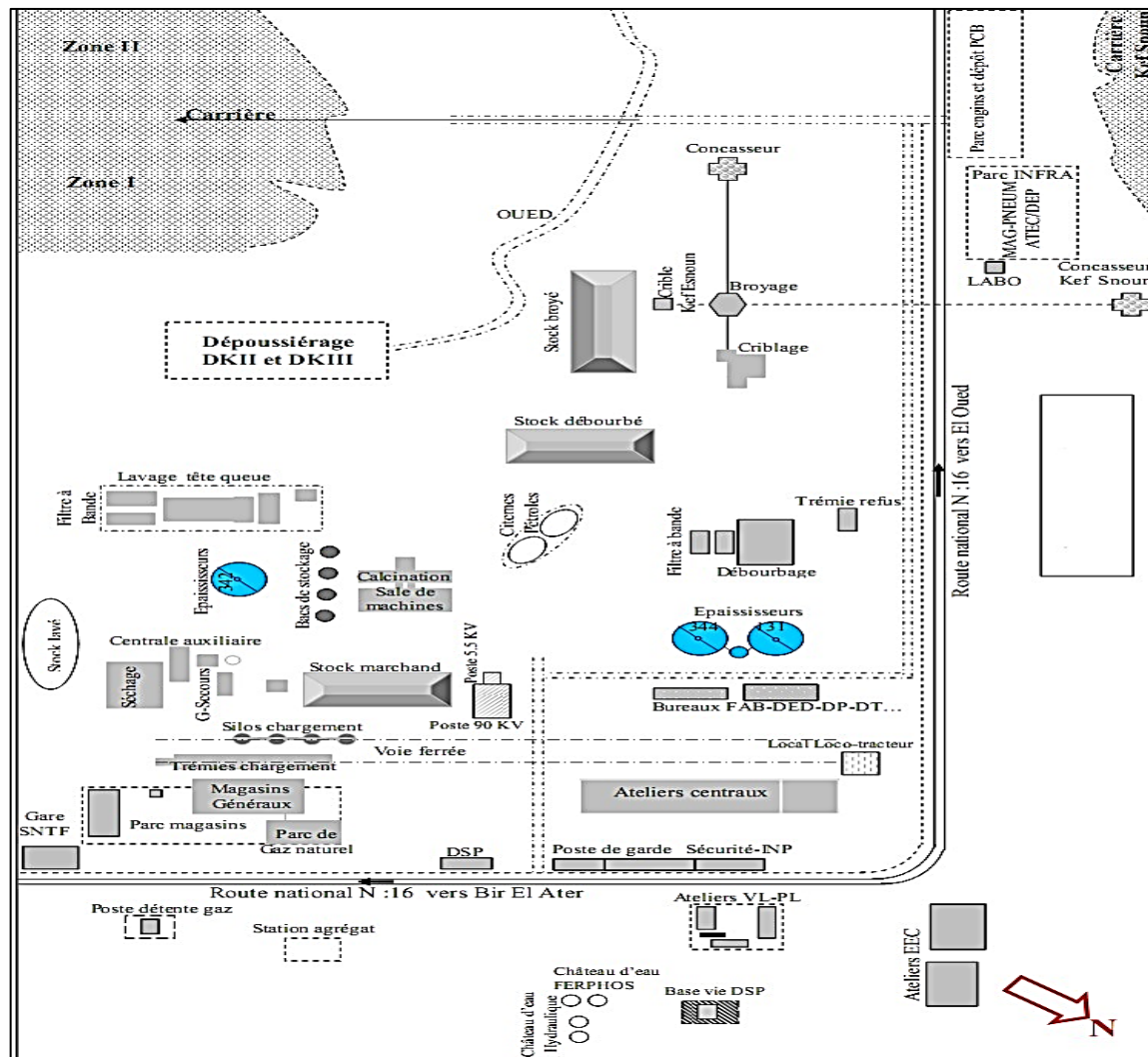


Fig 5: Schéma procédé complexe de djebel Onk (Boumediene, 2016).

L'EN SOMIPHOS issue de la dernière restructuration de L'EN FERPHOS, à caractère économique, est chargée du développement de production nationale et internationale du fer et du phosphate par l'intermédiaire de DJEBEL-ONK Structure de la mine :

Cette entreprise gère et organise les différents départements, eux-mêmes structurés par différents services pour la bonne gestion et l'exploitation rationnelle de la mine.

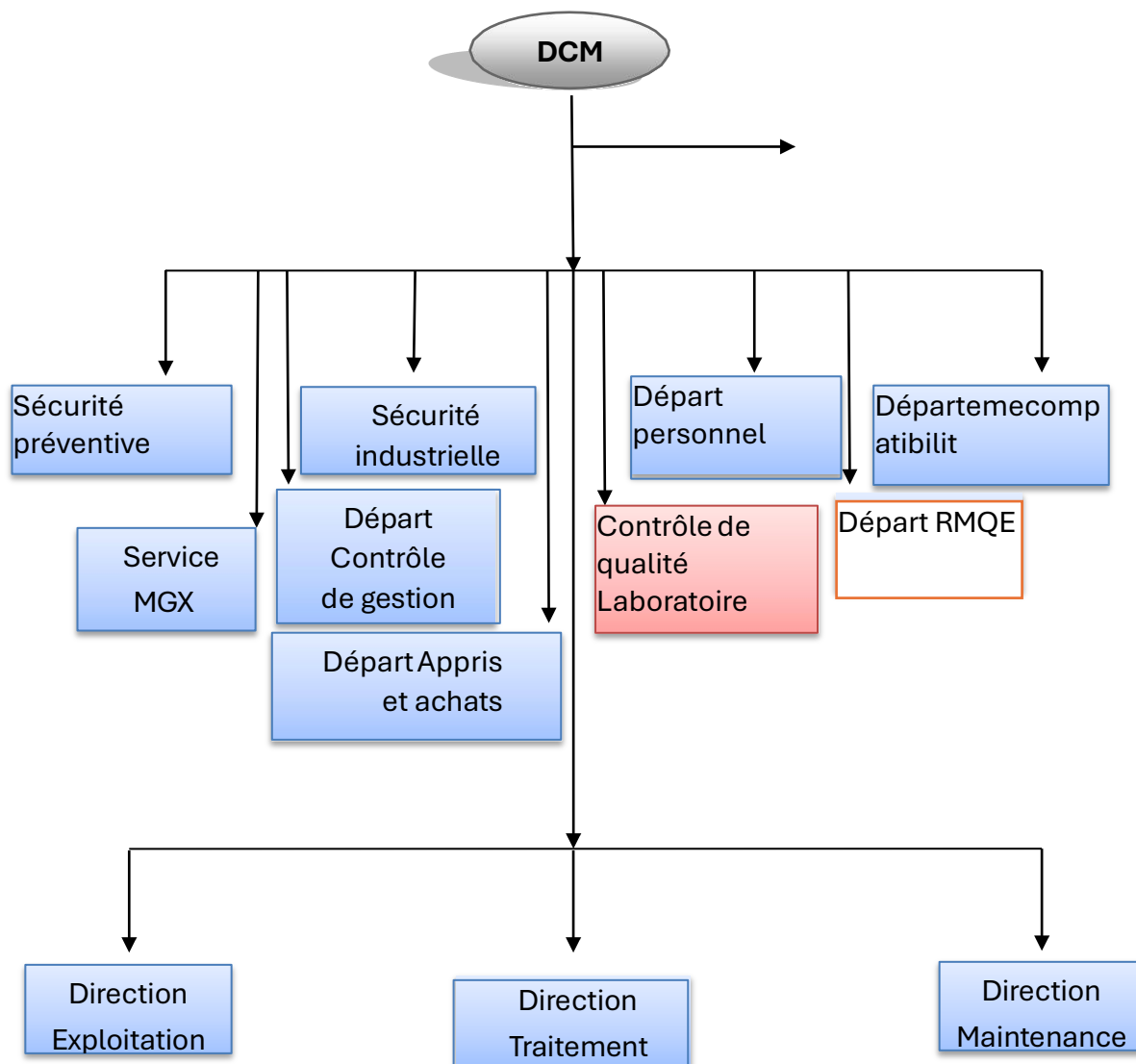


Fig 6: représentant un schéma La division administrative et technique (Boumediene, 2016).

3-Localisation du gisement

La région de Djebel Onk est située au sud-est de l'Algérie, à 100 km de la wilaya de Tébessa et à 20km de la frontière Algero-Tunisienne, sur la route qui relie Tébessa à El Oued. Et par la voie de chemin de fer servant au transport des phosphates vers le port minéralier d'Annaba éloignée de 340km.

Cette région constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux constantinois et le domaine saharien. Le massif de Djebel Onk forme un ensemble de calcaire de l'extrémité orientale des monts de Nememcha qui plonge vers l'Est et le massif des Aurès. Les altitudes les plus basses au pied de Djebel Onk sont d'environ **635 m**.

La région de Djebel Onk est subdivisée en 5 secteurs miniers

- Gisement de **Djemi Djema** .
- Gisement de **Kef Es-Senoun**.
- Gisement de **Djebel Onk Nord**.
- Gisement d'**Oued Bêtina**.
- Gisement de **Bled El Hadba** .

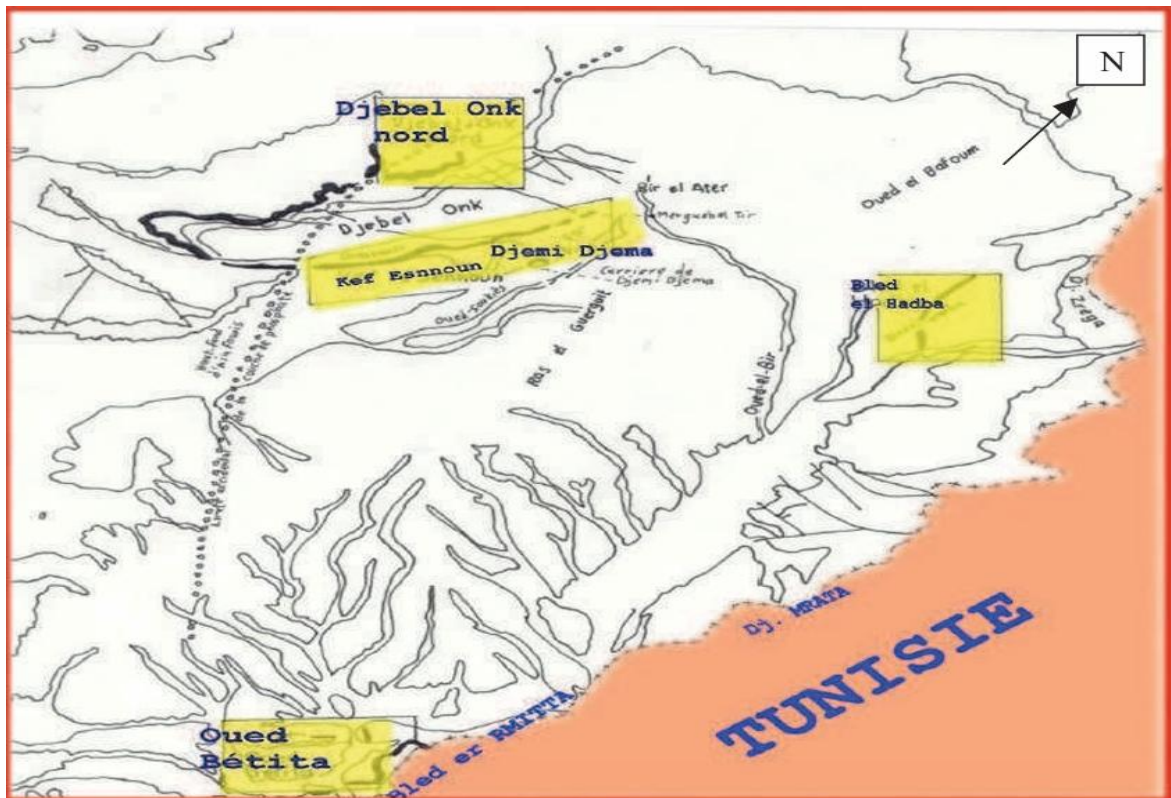


Fig 7: Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk (D'après Prian et Cortial, 1993).

4-Présentation géographique et géomorphologique

Le **Djebel Onk** est un massif montagneux calcaire culminant à **1338 mètres**. Son flanc nord présente une pente douce, tandis que le **flanc sud** s'enfonce brutalement sous les dépôts du Miocène et du Quaternaire. Au sud du massif, on trouve plusieurs gisements importants, notamment :

- **Djemi Djema**,
- **Kef Es Sennoun** (à environ 2 km à l'ouest du précédent),
- **Bled El Hadba** (plus au sud),
- **Bettita** (encore plus au sud).

Ces gisements sont traversés du nord au sud par un réseau complexe d'oueds remplis d'alluvions quaternaires, comme **Oued El Abiod** et **Oued El Bir**. La région de **Tarfaya** représente les affleurements de la couche productive, visibles sur le flanc sud du Djebel Onk.

La densité de population reste faible, mais l'installation du complexe minier de Bir El Ater a permis une amélioration notable des conditions économiques locales, favorisant le développement de la ville.

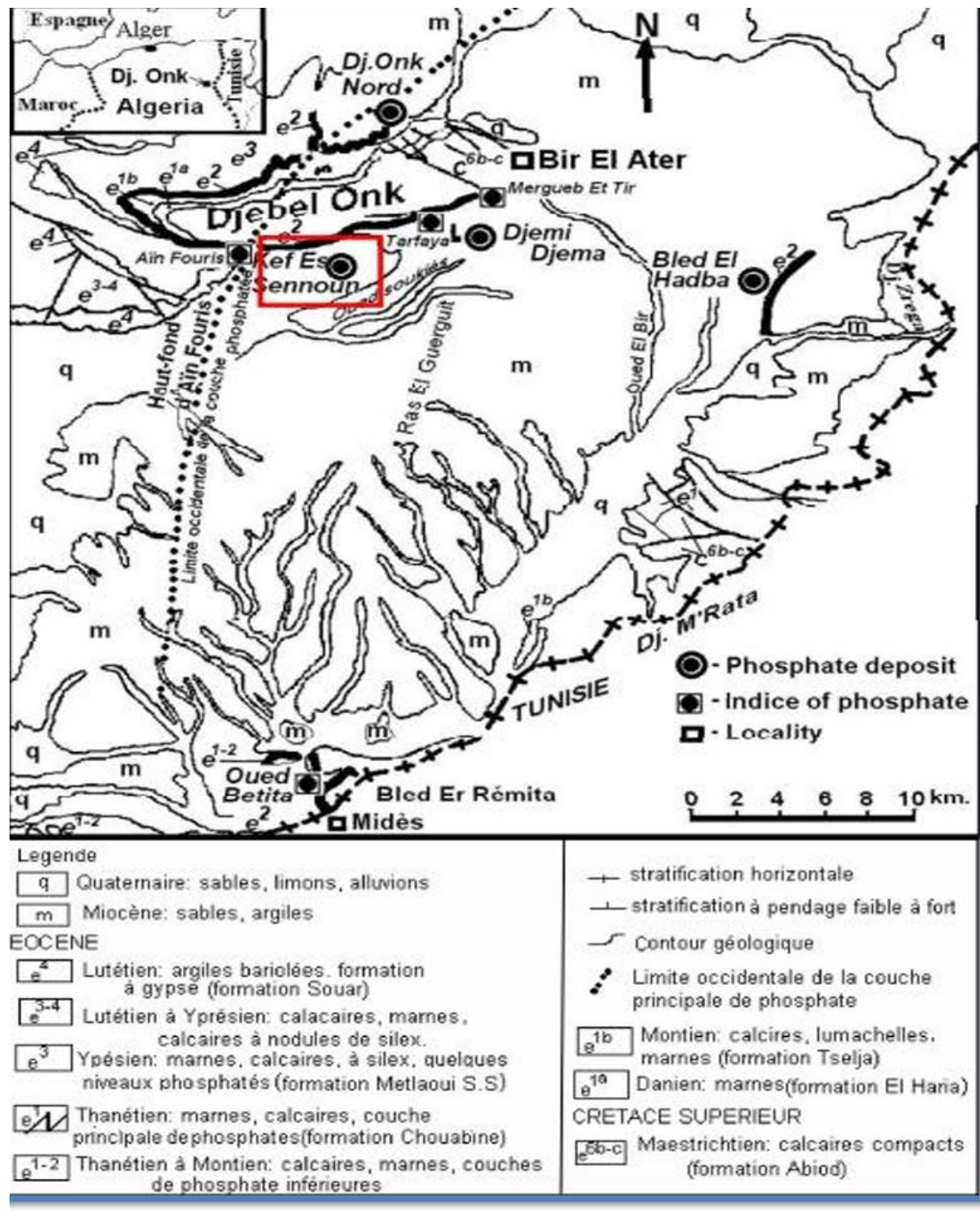


Fig 8: Situation géologique des gisements de phosphate de la région du Djebel Onk (Boumediene, 2016)

III. Réserve géologique et réserve exploitable

Le gisement de phosphate est subdivisé en quatre blocs de calcul de réserves, représentant un total estimé à **317 millions de tonnes**. La répartition se présente comme suit :

- **Réserves prouvées** : 168 millions de tonnes de minerai, situées sous des ratios de découverte (ratio stérile/minerai) variant de **1,32 à 4,5**.
- **Réserves probables** : 50 millions de tonnes sous des ratios de **4,3 à 6,5**.
- **Réserves possibles** : 99 millions de tonnes, sous des ratios supérieurs à **5**.

Les **réserves exploitables** du gisement de **Kef Es Sennoun** sont estimées à **112 millions de tonnes**.

IV. Le phosphore et le système sol–plante

Le **phosphore** est un **élément majeur des engrais** (avec l'azote et le potassium – NPK). Il s'agit de l'un des plus anciens éléments utilisés en agriculture. Dans les plantes, il existe sous forme minérale (Duthil, 1973), mais il est plus souvent présent sous forme organique.

La concentration en phosphore varie en fonction de :

- L'espèce végétale, l'âge de la plante, l'organe analysé, la richesse du sol en P_2O_5 et de la présence d'autres éléments pouvant engendrer des **antagonismes** (Gervy, 1970).

1. Rôle physiologique du phosphore

Le phosphore est un élément essentiel au fonctionnement des plantes :

- Il est un constituant des chromosomes, donc indispensable à la division cellulaire,
- Il intervient dans la croissance, la reproduction, la photosynthèse, et dans les transferts d'énergie (Lambert, 1979),
- Il est impliqué dans la formation de l'ATP, molécule énergétique indispensable à de nombreuses réactions biochimiques (Moughli, 2000). Le phosphore participe également à :

La **maturation des grains** : il accélère la maturité et renforce la paille des céréales,

La **formation des graines** : de grandes quantités de phosphore y sont stockées,

La **stimulation de la croissance racinaire** : les apports localisés de phosphore favorisent la prolifération des racines.

Il a été démontré que le phosphore améliore l'efficacité des apports azotés, notamment pour la synthèse des protéines et de la chlorophylle.

2. Exigences nutritionnelles en phosphore

L'absorption du phosphore est généralement achevée vers la fin de la phase de croissance maximale. D'après Fardeau (1993), la production d'un gramme de matière sèche par une plante nécessite environ 3 mg de phosphore.

3- Excès et carence en phosphore

- **Excès** : généralement **sans effet néfaste** pour la plante (Duthil, 1974).
- **Carence** : provoque des symptômes **sévères** (Gervy, 1970 ; Prat et al., 1971 ; Charles, 1976 ; Brahim, 1991 ; Baeyens, 1967) :
 - o Retard de croissance et de floraison,
 - o Faible développement racinaire et mauvaise nutrition minérale,
 - o Coloration foncée du feuillage avec des teintes pourprées et une défoliation précoce,
 - o Baisse significative de rendement, pouvant atteindre jusqu'à 50 %.

4. Les différents états du phosphore dans le sol

a-Le phosphore total

Le phosphore total représente l'ensemble des formes de phosphore (minérales et organiques) présentes dans un échantillon de sol (Baize, 2000). La teneur en phosphore total varie généralement entre « 0,02 % et 0,08 % » selon les types de sols (Gervy, 1970). Les sols issus de roches ignées sont plus riches en phosphore total que ceux dérivés de roches sédimentaires (Duthil, 1976).

b-Le phosphore assimilable

Également appelé « réserve assimilable » ou « fraction labile », le phosphore assimilable est la fraction susceptible d'être absorbée par les racines des plantes (Baize, 2000). Cette notion remplace celle de la réserve globale, car elle reflète la quantité de phosphore directement accessible pour l'alimentation des végétaux et le maintien de la concentration en phosphore dans la solution du sol (Gervy, 1970). Selon Gervy (1970), un sol est classé comme suit :

- **Riche** : teneur en phosphore assimilable > 0,3 ‰.
- **Moyennement riche** : teneur entre 0,15 ‰ et 0,3 ‰.
- **Pauvre** : teneur < 0,15 ‰.

5-Dynamique du phosphore dans le sol

La compréhension de la dynamique du phosphore est essentielle pour évaluer la fertilité d'un sol et déterminer les apports nécessaires en fertilisants (Bosc, 1976). Un schéma de la dynamique du phosphore dans le sol (Gros, 1979) illustre les différentes formes et transformations de cet élément. Selon Gros (1977), un équilibre constant existe entre les diverses formes de phosphore dans le sol :

- La matière organique libère du phosphore dans la solution du sol après minéralisation.
- L'équilibre le plus rapide et significatif se produit entre le « phosphore dissous » (dans la solution du sol) et le « phosphore échangeable », ces deux formes constituant la principale réserve alimentaire pour les plantes (Duthil, 1976).
- Le phosphore peut être absorbé par les plantes, précipité sous forme insoluble, dissous, minéralisé (de l'organique vers l'inorganique) ou réorganisé (Razi, 2006).

6-Le phosphore soluble

Le phosphore soluble, présent dans la solution du sol, constitue une source alimentaire limitée pour les plantes en raison de sa faible concentration, presque constante, due aux échanges continus avec le phosphore adsorbé (Diehl, 1975).

7-Le phosphore insoluble des roches mères

Les formes insolubles de phosphore, bien qu'inassimilables à court terme, jouent un rôle dans la nutrition des plantes grâce à des processus comme :

- Les variations de pH du sol.
- L'action de la matière organique.
- L'activité microbienne.
- L'absorption directe de phosphates minéraux par certaines espèces végétales (Gervy, 1970).

Dans les sols calcaires, les ions orthophosphates en solution évoluent en présence de calcite vers des formes insolubles, suivant une séquence de réactions aboutissant à la formation de (Duthil, 1976) :

- Phosphate monocalcique ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$).
- Phosphate bicalcique (CaHPO_4).
- Phosphate tricalcique ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$).

XX- Définition des engrais phosphatés

Un engrais phosphaté est un fertilisant riche en phosphore (P), utilisé principalement pour stimuler la floraison des plantes, favorisant ainsi la fructification et le développement des graines. Ces engrais sont essentiels pour tous types de cultures, qu'il s'agisse de grandes exploitations agricoles ou de jardins d'agrément. Les superphosphates (simples, concentrés ou triples) sont des engrais phosphatés obtenus par traitement chimique (acide phosphorique ou sulfurique) de phosphates naturels. Ils sont largement employés en agriculture conventionnelle et par les particuliers pour améliorer la production de fleurs, de fruits et de légumes (Dumat, 2017).

1-Types d'engrais phosphatés

Il existe deux grandes catégories d'engrais phosphatés, adaptées à l'agriculture conventionnelle et biologique (Dumat, 2017) :

A. Engrais phosphaté minéral

Issu de roches sédimentaires, cet engrais est produit chimiquement par des industries extractives exploitant des gisements naturels, notamment au Proche-Orient et en Afrique du Nord, qui couvrent environ « 80 % des besoins européens ». Assimilable directement par les plantes, il répond rapidement aux besoins nutritifs des cultures et est principalement utilisé en agriculture conventionnelle à grande échelle.

B. Engrais phosphaté organique

Fabriqué à partir de matières organiques comme des os séchés réduits en poudre ou des déjections de volaille, cet engrais est une alternative aux fertilisants chimiques. Disponible sous forme solide, liquide, en poudre ou en granulés, il est privilégié en agriculture biologique.

2-Le cycle du phosphate a l'échelle du globe

Le cycle naturel du phosphate est caractérisé, parmi les cycles biogéochimiques majeurs, par les points suivants :

- Le phosphore reste et s'accumule dans l'écosystème terrestre
- Il ne possède pas de phase gazeuse du moins en quantités significative
- Comme ce cycle s'effectue principalement au sein de l'écosystème terrestre, ou entre les continents et les océans, il est qualifié de sédimentaire
- Le passage du phosphore d'un compartiment à un autre n'est pas en première approche contrôlé par des réactions microbiennes comme dans le cas de l'azote par exemple

- il met en jeu des quantités modérées au regard des stocks

Ces particularités ont une très grande importance et expliquent que les échanges de phosphore entre les écosystèmes terrestres et océaniques sont des processus naturels extrêmement lents. C'est pourquoi la gestion de cet élément et ses conséquences environnementales doivent être distinguées de l'azote

A l'état naturel, le phosphore se trouve sur terre dans 5 sources primaires :

- Les roches, le sol, la biosphère, les eaux continentales dont les sédiments, les eaux océaniques dont les sédiments.

Le phosphore du sol, en l'absence d'apport anthropique, provient de l'altération des roches et notamment de la dissolution de l'apatite (fig 1).

Ce cycle naturel est modifié sous l'action de l'Homme figure2 En effet, depuis le milieu du XIX^{émé} siècle, des gisements de phosphore sont exploités pour satisfaire les besoins industriels et agricoles. Les grands gisements se trouvent notamment aux ETATS UNIS en Russie, en tunisien au Maroc et en Afrique du Sud. L'agriculture consomme de 95a 97% de la production mondiale de phosphates. Leur exploitation a pour effet de :

- mettre en jeu des quantités beaucoup plus grande de phosphore dans la biosphère et dans les sols, et donc vers les eaux
- créer des déséquilibres entre les différentes régions du monde par des échanges commerciaux internationaux : certaines zones sont en situation d'excédents alors que d'autres sont déficitaires

De plus, la mise en culture des sols accélère les transferts de phosphore par érosion et ruissellement vers les milieux aquatiques.

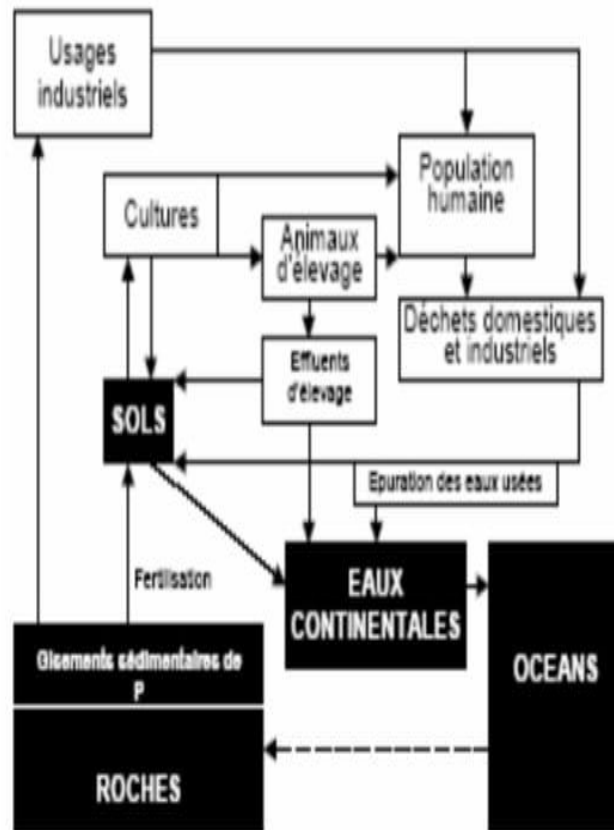


Fig 9 : Le cycle du phosphore après intervention de l’Homme (Lemerrier B, 2003)

Ainsi, le cycle du phosphore anthropisé peut se résumer à un transfert de masse régi par des processus hydrologiques, depuis les gisements sédimentaires à un transfert de masse régi par puis les sédiments marins in fine. De ce point de vue, et à l’inverse de l’azote, le phosphore peut être considéré comme une source non renouvelable à l’échelle de temps humains.

3-Les sources anthropiques de phosphore

Les sources anthropiques de phosphore sont partagées entre le secteur urbain, industriel et agricole .Ces sources peuvent être diffuses ou ponctuelles

Tableau 4 : Classification des sources ponctuelles et diffuses de phosphore selon les activités humaines et naturelles".

Type d'activité et origine	Phosphore provenant de	
	Sources ponctuelles	Sources diffuses
	Il a une bien localisée dans l'espace, Il est transmis indépendamment des périodes de ruissellement, au rythme des activités humaines.	Il passe par, dans ou sur le sol et il transféré lors des périodes pluvieuses
Villes et villages (domestique)	Assainissement collectif Assainissement individuel Dépôts d'ordures	Ruissellement urbain Marécages drainés ou remblayés
Industrie	Rejet direct	Ruissellement urbain
Agriculture	Stockage dans les bâtiments (fourrier, lisier, ensilage) Nettoyage des locaux Rejets directs des élevages	Stockage « au champ » Sols cultivés et prairies Routes et chemins
Zones « naturelles »		Bruit de fond géologique

D'après Pellerin et al. (2003), en 2000, environ 71000 tonnes de phosphore ont été rejetées dans le réseau hydrographiques de France, dont :

- 50% d'origine agricole
- 30% d'origine urbaine
- 20% d'origine industrielle

Cependant, l'équipement de stations de plus nombreuses en procédés de déphosphatations, l'amélioration des rendements des méthodes de déphosphatations et l'utilisation de détergents de moins en moins en phosphatés contribuent à diminuer dans les eaux la part du phosphore urbain et industriel au profit du phosphore d'origine agricole

Dans des bassins versants comme ceux de Bretagne, le phosphore des sols constituent la part principale du phosphore allant vers le réseau hydrographie (Figure3), à la différence d'autres régions où la part du phosphore métabolique humain et issue des détergents est dominante.

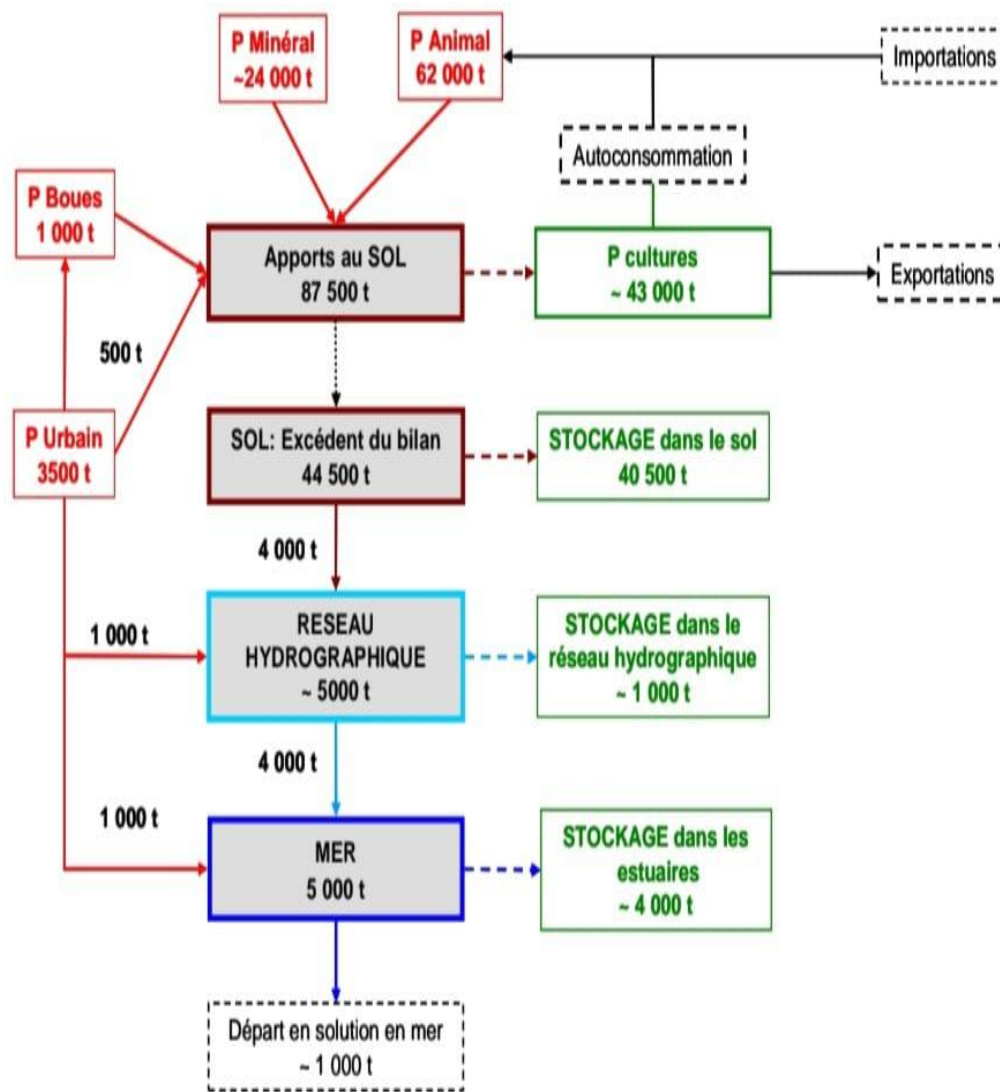


Fig 10: Position géologique des gisements de phosphate de la région du Djebel Onk (s, à l'excédent du bilan et au stockage dans le sol).

4-Le phosphore d'origine agricole

Les rejets de phosphore d'origine agricole sont moins bien caractérisés que ceux d'origine urbaine ou industrielle pour plusieurs raisons :

- Émergence récente du problème : La forte augmentation de la production agricole au cours des 40 dernières années a rendu ce problème relativement nouveau.

- Caractère diffus des rejets : L'activité agricole, répartie sur de vastes territoires, génère des rejets dispersés, moins visibles directement. Ces rejets sont partiellement atténués par des mécanismes naturels d'épuration (Cann et al., 1999).
- Difficulté de mesure : Contrairement aux rejets industriels et urbains, qui sont collectés et centralisés, les rejets agricoles ne peuvent être quantifiés par des mesures ponctuelles. Leur évaluation est complexe en raison de leur dispersion.
- Variabilité des transferts : Les flux, concentrations, vitesses et formes du phosphore agricole varient selon des facteurs environnementaux comme la pluie, la température ou l'humidité, contrairement aux rejets industriels et urbains, qui sont relativement constants.
- Manque de données : En raison de ces difficultés, les rejets agricoles de phosphore restent insuffisamment étudiés, bien qu'ils représentent une part croissante des apports en phosphore dans l'environnement.
- Spécificité régionale : Si les rejets domestiques sont souvent cités comme la principale source de phosphore à l'échelle nationale, en Bretagne, l'importance de l'activité agricole, particulièrement orientée vers les productions animales, entraîne des rejets agricoles prédominants (Cann et al., 1999).

Partie pratique :

II- Méthodologie :

Les analyses et les expériences ont été menées dans deux laboratoires distincts : d'une part, au laboratoire de la SOMOPHOS, ce qui nous a permis de bénéficier d'un matériel industriel adapté et de ressources analytiques avancées ; d'autre part, au laboratoire de l'université, où nous avons pu approfondir les aspects théoriques et les validations scientifiques. Cette complémentarité a été essentielle pour garantir la fiabilité et la qualité de nos résultats.

1-Méthode de préparation des échantillons :

On a pris une quantité de (1553.1 g) de phosphate spécial (Noir) et (592.4 g) de phosphate calciné (Beige). Après avoir mélangé et divisé la masse de PN (phosphate noir) et PB (phosphate beige) avec un diviseur (fig 11), on a prélevé 4 échantillons pour chaque type de phosphate. Ces échantillons sont ensuite divisés et homogénéisés pour garantir des résultats reproductibles (fig 11).

Objectif :

Assurer une distribution homogène des grains de PN et PB.

Chaque échantillon est divisé en deux parties :

- Une pour l'analyse granulométrique.
- L'autre pour l'analyse chimique :

Attaque par acide faible pour doser le (P_2O_5) (méthode colorimétrique) et dosage du (CO_2) par calcimètre de Bernard (méthode volumétrique).



Fig11. Des diviseurs manuels pour les poids lourds et les petits échantillons (Photos personnel, 2025).

a-Phosphate spécial (Noir) :**2- Analyse granulométrique :**

- Utilisation de tamis de différentes tailles (1,00 mm ; 800 μm ; 500 μm ; 315 μm ; 160 μm ; 100 μm ; 50 μm ; 40 μm) empilés sur un tamiseur (fig 12).
- Après 15 minutes de tamisage, les échantillons sont versés par le haut des tamis pour séparer les grains de PN.
- Chaque tamis est pesé séparément pour déterminer la répartition granulométrique.



Fig12. Un tamiseur chronologique.

3-Analyse chimique :**3-1-Broyage:**

L'échantillon est broyé dans un broyeur (fig 13) pendant 15 minutes pour obtenir une poudre fine de PN.



Fig13. Un broyeur.

3-2- Dosage du (CO₂) :

Méthode volumétrique avec calcimètre de Bernard (fig 14). Réaction entre le PN et (HCl).

- Pesée de 1 g de PN de base dans un flacon en plastique avec 10 mL d'eau distillée.
- Ajout de (HCl) (tube en plastique), fermeture hermétique, agitation pendant 1 minute.
- Mesure du volume de (CO₂) libéré.



Fig14 : Calcimètre de Bernard

3-3- Attaque chimique :

- 4 échantillons de PN de base (1 g chacun) sont placés dans des béchers.
- Ajout de 15 ml d'acide perchlorique (fig 16) dilué dans l'eau distillée.

- Chauffage sur plaque chauffante sous hotte de chimie (fig 16) jusqu'à changement de couleur (marron foncé → jaune clair transparent).

- Refroidissement et filtration.



Fig15. Hotte pour l'attaque chimique.



Fig16. L'attaque chimique de PN et PB.

3-4- Dosage du (P_2O_5) et transformation chimique :

- Après filtration, les solutions sont transférées dans des fioles jaugées de 500 ml et diluées (fig18).

- Analyse par méthode colorimétrique avec auto-analyseur technique (fig 19).



Fig17. Des fioles jaugées de 500 mL remplies de la solution diluée de PN ou PB avec l'acide Perchloric.



Fig18. Auto-analyseur technique du dosage de P_2O_5 .

3-5-Méthode de l'acide citrique (phosphore assimilable) :

- Dissolution de 2 % d'acide citrique dans 100 mL d'eau distillée.
- Ajout à 1 g de PN broyé dans un ballon à fond rond.
- Agitation pendant 30 minutes, filtration, dilution dans 100 mL d'eau, puis analyse colorimétrique. (fig20)

3-6- Méthode de l'eau :

- 1 g de PN de base dans 100 mL d'eau distillée.
- Agitation pendant 1 heure, filtration, puis mesure de la concentration en phosphore. (fig20)



Fig19. L'opération de l'agitation de PN et PB avec l'acide citrique et l'eau.

4-Transformation chimique du phosphate :

4-1-Traitement à l'acide sulfurique :

- Préparation d'une solution à 5 % (5 mL d'acide sulfurique dans 100 mL d'eau distillée). (fig 21)
- Mélange de 5 g de PN avec 25 g d'acide sulfurique dilué dans des béchers.
- Agitation magnétique pendant 5 heures. (fig22)



Fig20. L'opération de l'agitation magnétique.

4-2-Neutralisation :

- Ajout de (KOH) 1 N jusqu'à neutralisation (indicateur : phénolphtaléine, virage au rose).
- Contrôle du pH avec papier pH et confirmé avec le PH mètre.
- Ajout d'acide humique (AH) :
- 10 g d'AH mélangés à l'extrait neutralisé 11 mL (ajustement de la quantité de l'extrait neutralisé pour optimiser l'efficacité). (fig 23)
- Séchage pour obtenir des granulés d'engrais (perles cristallisées).



Fig21. L'opération de mélanger le AH avec l'extrait neutralisé

b-Phosphate calciné (Beige) :

5- Analyse granulométrique :

- Utilisation de tamis de différentes tailles (1,00 mm ; 800 μm ; 500 μm ; 315 μm ; 160 μm ; 100 μm ; 50 μm ; 40 μm) empilés sur un tamiseur.
- Après 15 minutes de tamisage, les échantillons sont versés par le haut des tamis pour séparer les grains de PB.
- Chaque tamis est pesé séparément pour déterminer la répartition granulométrique.

6- Analyse chimique :

6-1- Broyage :

L'échantillon est broyé dans un broyeur pendant 15 minutes pour obtenir une poudre fine de PB.

6-2- Dosage du (CO₂) :

Méthode volumétrique avec calcimètre de Bernard. Réaction entre le PB et (HCl).

- Pesée de 1 g de PB de base dans un flacon en plastique avec 10 mL d'eau distillée.
- Ajout de (HCl) (tube en plastique), fermeture hermétique, agitation pendant 1 minute.
- Mesure du volume de (CO₂) libéré.

6-3- Attaque chimique :

- 4 échantillons de PB de base (1 g chacun) sont placés dans des béchers.
- Ajout de 15 mL d'acide perchlorique dilué dans l'eau distillée.
- Chauffage sur plaque chauffante sous hotte de chimie jusqu'à changement de couleur (marron foncé → jaune clair transparent).
- Refroidissement et filtration.

6-4- Dosage du (P₂O₅) et transformation chimique :

- Après filtration, les solutions sont transférées dans des fioles jaugées de 500 mL et diluées.
- Analyse par méthode colorimétrique avec auto-analyseur technique.

6-5- Méthode de l'acide citrique (phosphore assimilable) :

- Dissolution de 2 % d'acide citrique dans 100 mL d'eau distillée.
- Ajout à 1 g de PB broyé dans un ballon à fond rond.
- Agitation pendant 30 minutes, filtration, dilution dans 100 mL d'eau, puis analyse colorimétrique.

6-6- Méthode de l'eau :

- 1 g de PB de base dans 100 mL d'eau distillée.
- Agitation pendant 1 heure, filtration, puis mesure de la concentration en phosphore.

7- Transformation chimique du phosphate :**7-1-Traitement à l'acide sulfurique :**

- Préparation d'une solution à 5 % (5 mL d'acide sulfurique dans 100 mL d'eau distillée).
- Mélange de 5 g de PB avec 25 g d'acide sulfurique dilué dans des béchers.
- Agitation magnétique pendant 5 heures.

7-2 Neutralisation :

- Ajout de (KOH) 1 N jusqu'à neutralisation (indicateur : phénolphtaléine, virage au rose).
- Contrôle du pH avec papier pH et confirmé avec le PH mètre.
- Ajout d'acide humique (AH) :
- 10 g d'AH mélangés à l'extrait neutralisé 11 mL (ajustement de la quantité de l'extrait neutralisé pour optimiser l'efficacité).
- Séchage pour obtenir des granulés d'engrais (perles cristallisées).

8- Application sur le terrain agricole**8-1- Préparation et application des engrais**

Deux types d'engrais ont été utilisés :

- Un engrais à base de phosphate noir, appliqué sur un sol argileux.
- Un engrais à base de phosphate beige, appliqué sur un sol argilo-sableux.

Quatre doses d'engrais ont été testées pour chaque type de sol : 80 kg/ha, 100 kg/ha, 120 kg/ha et 140 kg/ha.

8-2- Disposition des parcelles

Deux parcelles de 7 m x 7 m (soit 49 m² chacune) ont été sélectionnées, l'une avec un sol argileux et l'autre avec un sol argilo-sableux. Chaque parcelle a été divisée en carrés de 1,5 m x 1,5 m, chacun recevant une des quatre doses d'engrais. La même méthodologie expérimentale a été appliquée aux deux parcelles.

8-3-Préparation du sol et semis

Un labour superficiel a été réalisé sur chaque parcelle, suivi d'un désherbage manuel. Précédemment, un labour profond avait été effectué par le propriétaire du terrain.

Chaque carré a été organisé en lignes de plantation, avec cinq plants semés par ligne (par exemple, 5 plants de concombre, 5 de courgette, etc.).



Fig22 : aménagement des lignes pour la plantation. (Photos personnel, 2025)

Les semences ont été plantées en alternance (concombre, courgette, laitue, coriandre, haricot mange-tout), en respectant une distance régulière entre les graines et les lignes.

Les mêmes plantes ont été cultivées sur les deux types de sol. Un échantillon témoin a été prévu pour chaque type de sol, dans lequel les plantes ont été irriguées uniquement avec de l'eau, sans ajout d'engrais, afin de comparer les effets du traitement.



Fig23 : plantation des semences. (Photos personnel, 2025)

8-4- Irrigation

L'irrigation a été adaptée aux besoins hydriques spécifiques de chaque espèce :

- Concombres : arrosage quotidien.
- Autres espèces : arrosage tous les deux à trois jours.



Fig24 : préparation de solution engrais-eau pour l'irrigation. (Photos personnel, 2025)

8-5- Calcul de la dose d'engrais à appliquer

La dose d'engrais à appliquer par carré a été déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Dose d'engrais (kg)} = (\text{Dose en kg/ha} \times \text{Surface en m}^2) / 10\,000$$

- Surface de chaque carré : $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} = 2,25 \text{ m}^2$.

- Doses testées : 80 kg/ha, 100 kg/ha, 120 kg/ha, 140 kg/ha.
- L'engrais est 100 % soluble.
- Solubilité des phosphates noir (PN) et beige (PB) : 1 g d'engrais → 36 % de matière soluble → 1 L d'eau.

Calcul des doses par carré :

1. Pour 80 kg/ha :

$$\text{Dose} = (80 \times 2,25) / 10\,000 = 0,018 \text{ kg} = 18 \text{ g.}$$

2. Pour 100 kg/ha :

$$\text{Dose} = (100 \times 2,25) / 10\,000 = 0,0225 \text{ kg} = 22,5 \text{ g.}$$

3. Pour 120 kg/ha :

$$\text{Dose} = (120 \times 2,25) / 10\,000 = 0,027 \text{ kg} = 27 \text{ g.}$$

4. Pour 140 kg/ha :

$$\text{Dose} = (140 \times 2,25) / 10\,000 = 0,0315 \text{ kg} = 31,5 \text{ g.}$$

Dilution en eau :

Pour chaque dose, la quantité soluble (36 %) est diluée dans 1 L d'eau par gramme d'engrais :

- Pour 18 g (80 kg/ha) : $18 \times 0,36 = 6,48$ g de matière soluble « diluée dans 18 L d'eau ».
- Pour 22,5 g (100 kg/ha) : $22,5 \times 0,36 = 8,1$ g de matière soluble « diluée dans 22,5 L d'eau ».
- Pour 27 g (120 kg/ha) : $27 \times 0,36 = 9,72$ g de matière soluble « diluée dans 27 L d'eau ».
- Pour 31,5 g (140 kg/ha) : $31,5 \times 0,36 = 11,34$ g de matière soluble « diluée dans 31,5 L d'eau ».

L'engrais utilisé est 100% soluble

NB : le PN et le PB sont soluble selon la relation : 1 g → 36 % → 1 L (dilution en eau).

II-Résultats :

Après avoir suivi rigoureusement la méthodologie décrite, nous avons obtenu plusieurs résultats concrets pour les deux types de phosphate étudiés : le phosphate spécial (noir (PN)) et le phosphate calciné (beige (PB)). Ces résultats concernent la répartition granulométrique, les dosages chimiques, ainsi que les transformations chimiques mises en œuvre pour évaluer la réactivité et la disponibilité du phosphore.

1- Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique du phosphate noir montre une prédominance de particules comprises entre 315 μm et 100 μm . Les fractions les plus grossières ($> 800 \mu\text{m}$) représentent moins de 1 % de la masse totale, tandis que les plus fines ($< 40 \mu\text{m}$)

Tableau05 : Résultats de l'analyse granulométrique pour le PN.

Mailles (Mm)	1 ^{er} échantillant		2 ^{ème} échantillant		3 ^{ème} échantillant		4 ^{ème} échantillant	
	Poids(g)	%	Poids(g)	%	Poids(g)	%	Poids(g)	%
1.00	1.6	0.52	3.0	0.57	1.6	0.59	2.7	0.60
0.800	1.3	0.43	2.3	0.44	1.2	0.44	1.9	0.41
0.500	10.9	3.6	19.0	3.61	9.7	3.59	17.3	3.82
0.315	65.1	21.33	112.2	21.37	58.6	21.67	99.2	21.93
0.160	156.4	51.25	268.8	51.20	137.6	50.89	216.4	47.83
0.100	57.5	18.84	101.6	19.35	52.0	19.23	94.8	20.95
0.050	11.7	3.83	17.1	3.26	9.0	3.33	19	4.20
<0.040	0.7	0.23	1.1	0.21	0.7	0.26	1.1	0.24
Total	305.2	100	525.1	100	270.4	100	452.4	99.98

La répartition granulométrique du phosphate beige est comparable à celle d'autres phosphates, avec une légère prépondérance des particules fines ($< 160 \mu\text{m}$). Cette caractéristique peut être liée à la friabilité accrue du phosphate calciné, ainsi qu'à sa désagrégation lors du broyage.

Tableau06 : Résultats de l'analyse granulométrique pour le PB.

Mailles (Mm)	1 ^{er} échantillant		2 ^{ème} échantillant		3 ^{ème} échantillant		4 ^{ème} échantillant	
	Poids(g)	%	Poids(g)	%	Poids(g)	%	Poids(g)	%
1.00	13.2	7.3	9.1	7.1	9	7	17.8	11.6
0.800	9.9	5.5	7.1	5.50	6.7	5.21	11.6	7.5
0.500	29.9	16.5	21.9	17	21.6	16.8	29	18.8
0.315	27.9	15.4	21.2	16.43	20.3	15.8	24.1	15.7
0.160	41.6	23	29.5	22.9	29.8	23.2	31.5	20.5
0.100	38.3	21.2	17.6	13.64	20.7	16.1	21.7	14.1
0.050	18	10	21.2	16.43	19.2	14.92	16.9	11
<0.040	2	1.1	1.4	1.0	1.4	1.1	1.3	0.8
Total	180.8	100	129	100	128.7	100	153.9	99.9

2- Dosage du (CO₂) :

Le dosage volumétrique réalisé à l'aide du calcimètre de Bernard a permis de mesurer les volumes de CO₂ libérés lors de la réaction entre les échantillons broyés et l'acide chlorhydrique (HCl) :

- **Phosphate noir** : 12 ml de CO₂
- **Phosphate beige** : 11 ml de CO₂

Ces résultats indiquent une teneur plus élevée en carbonates dans le phosphate Noir et une décarbonatation partielle survenue lors de la calcination du phosphate beige.

3- Dosage du phosphore (P₂O₅)

Les analyses colorimétriques ont permis de déterminer les teneurs en P₂O₅ :

Le phosphate Noir présente une teneur en phosphore légèrement inférieure à celle du phosphate beige. Cette différence reflète les transformations chimiques et les modifications de structure cristalline qui surviennent au cours de la calcination, modifiant ainsi la disponibilité du phosphore.

Tableau 07: Résultats du dosage de P₂O₅ pour le phosphate Noir.

1 ^{er} passage	2 ^{ème} passage	La moyenne
23.62	23.40	23.51
23.61	23.48	23.55
25.56	25.40	25.48
24.80	24.61	24.71

Tableau 08: Résultats du dosage de P₂O₅ pour le phosphate beige.

1 ^{er} passage	2 ^{ème} passage	La moyenne
33.00	32.81	32.91
33.08	32.85	32.97
33.04	32.80	32.92
33.20	32.95	33.08

4- Extraction du phosphore assimilable :

4-1- Méthode de l'acide citrique (2 %) : L'analyse des résultats indique que le PN présente une solubilité moyenne en P₂O₅ de **9,16 %**, nettement supérieure à celle du PB, qui n'atteint que **3,82 %**. Le PN montre une meilleure libération du phosphore dans un milieu faiblement acide, en raison de sa structure non altérée.

Tableau 09 : solubilisations de P₂O₅ avec l'acide citrique.

Type de phosphate	1 ^{er} passage	2 ^{ème} passage	La moyenne
PN	9.07	9.25	9.16
PB	3.82	3.82	3.82

4-2- Méthode de l'eau distillée : Les valeurs mesurées confirment la faible solubilité du phosphore dans l'eau pour les deux échantillons. Le PB affiche une moyenne de **0,46 %**, contre **0,19 %** pour le PN. Bien que les deux types présentent une faible solubilité dans l'eau, le PB est légèrement plus performant à ce niveau.

Tableau 10: solubilisations de P₂O₅ avec de l'eau distillée.

Type de phosphate	1 ^{er} passage	2 ^{ème} passage	La moyenne
PN	0.20	0.17	0.19
PB	0.55	0.36	0.46

5-Transformation chimique et production de granulés d'engrais

Le traitement des phosphates à l'acide sulfurique a permis d'obtenir de l'acide phosphorique selon la réaction suivante :



Deux phases sont obtenues :

- **Liquide :** solution d'acide phosphorique (H₃PO₄)
- **Solide :** sulfate de calcium (CaSO₄·2H₂O)

Le procédé utilisé est celui du **dihydrate**, le plus répandu à l'échelle industrielle (ex. procédés Rhône-Poulenc, Prayon). L'acide obtenu est ensuite concentré par évaporation.

Après neutralisation et ajout d'acide humique (AH), des granulés d'engrais cristallisés se forment, présentant une bonne cohésion, signe d'une réaction complète et homogène.

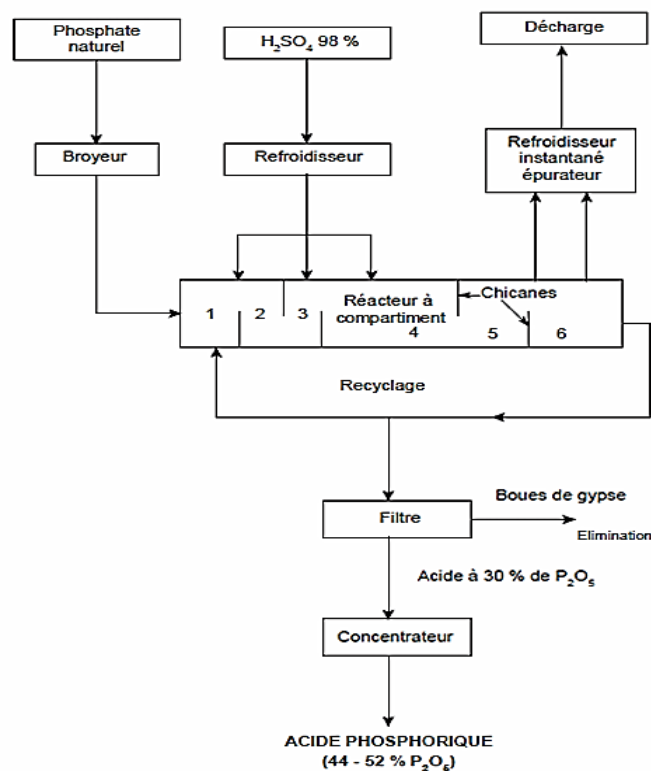


Fig25 : Fabrication de l'acide phosphorique par le procédé Prayon (Prayon Technologies, 2020).

Après neutralisation et l'ajout d'AH, des granulés d'engrais cristallisés ont été formés. On a observé une bonne cohésion des granulés, signe d'une réaction complète et d'une incorporation homogène de l'acide humique.

6-Résultats et observations de l'application sur terrain agricole :

Des essais comparatifs ont été menés pour évaluer l'effet des deux types d'engrais sur la croissance des cultures, en fonction de la dose appliquée.

a. Phosphate noir sur (sol argileux)

- **80 kg/ha** : croissance normale, équivalente au témoin
- **100 kg/ha** : croissance légèrement réduite
- **120 kg/ha** : meilleure croissance observée
- **140 kg/ha** : baisse marquée de la croissance

b. Phosphate beige sur (sol argilo-sableux)

- **80 kg/ha** : croissance normale
- **100 kg/ha** : légère diminution
- **120 kg/ha** : croissance significative mais inférieure au PN
- **140 kg/ha** : diminution notable de la croissance

De manière générale, les résultats obtenus avec l'engrais à base de phosphate noir ont donné de meilleurs résultats que ceux obtenus avec le phosphate beige, indiquant une efficacité remarquable du PN sur la croissance des cultures dans les conditions expérimentales.

III-Discussion :

Cette étude examine les performances agronomiques de deux engrais phosphatés, à base de phosphate noir (PN) et de phosphate beige (PB), appliqués respectivement sur un sol argileux et un sol argilo-sableux, avec des doses de 80, 100, 120 et 140 kg/ha. Les résultats mettent en lumière l'interaction complexe entre les propriétés chimiques des phosphates, la texture des sols et les réponses des cultures, confirmant l'importance d'une fertilisation optimisée pour maximiser les rendements tout en minimisant les impacts négatifs.

1. Engrais à base de phosphate noir (PN) sur sol argileux

- Pour 80 kg/ha : La croissance des cultures (par exemple, concombre, courgette) était comparable à celle des témoins, suggérant que cette dose couvre les besoins de base en phosphore sans provoquer de stress nutritionnel. La solubilité du PN à l'acide citrique (9,16 %) indique une disponibilité modérée du phosphore, suffisante pour les plantes dans un sol argileux riche en colloïdes, qui retiennent efficacement les nutriments (Havlin et al., 2014).

- Pour 100 kg/ha : Une légère baisse de croissance a été observée, probablement due à une saturation locale en phosphore, entraînant une compétition ionique avec des éléments comme le zinc ou le fer. Ce phénomène, appelé « antagonisme nutritionnel », est bien documenté dans les sols argileux où une surabondance de phosphore inhibe l'absorption d'autres cations (Marschner, 1995).

- Pour 120 kg/ha : Cette dose a induit une croissance optimale, avec une amélioration significative des paramètres physiologiques (photosynthèse, division cellulaire, développement racinaire). La disponibilité accrue du phosphore, combinée à la forte capacité d'échange cationique (CEC) du sol argileux (20–50 cmol/kg selon Brady & Weil, 2017), a favorisé une assimilation efficace, stimulant les processus métaboliques clés comme la synthèse de l'ATP (Taiz & Zeiger, 2010).

- Pour 140 kg/ha : Une diminution marquée de la croissance a été observée, indiquant une sur-fertilisation. Cet excès peut être attribué à une toxicité ionique ou à un déséquilibre osmotique, où un excès de phosphore inhibe l'absorption d'éléments essentiels (Havlin et al., 2014). De plus, une accumulation excessive de phosphore dans le sol peut entraîner des pertes par lessivage ou fixation, réduisant l'efficacité agronomique et augmentant le risque environnemental (Sharpley et al., 2001).

Le PN, caractérisé par une teneur en P_2O_5 de 24,31 % et une solubilité relativement élevée en milieu acide (9,16 % à l'acide citrique), est particulièrement adapté aux sols argileux. Sa structure cristalline moins stable facilite la libération des ions phosphates, surtout dans des conditions acides simulant l'environnement racinaire (Chien et al., 2011). La forte rétention des nutriments par le sol argileux limite les pertes par lessivage, permettant une disponibilité prolongée du phosphore pour les plantes. Cependant, la sur-fertilisation à 140 kg/ha illustre les limites de cette approche, soulignant la nécessité d'une calibration précise des doses pour éviter des effets délétères.

2. Engrais à base de phosphate beige (PB) sur sol argilo-sableux

- Pour 80 kg/ha : La croissance était légèrement inférieure à celle des témoins, probablement en raison de la faible solubilité du PB (3,82 % à l'acide citrique) et de la capacité de rétention limitée du sol argilo-sableux (CEC de 10–15 cmol/kg, Brady & Weil, 2017). Le lessivage du phosphore, favorisé par la texture plus légère, a pu réduire sa disponibilité pour les plantes (Sharpley, 1985).

- Pour 100 kg/ha : Une amélioration modeste de la croissance a été notée, mais sans atteindre les niveaux observés avec le PN. Cette réponse limitée reflète la structure cristalline plus stable du PB, qui libère moins de phosphore assimilable (Hinsinger, 2001).

- Pour 120 kg/ha : Cette dose a donné les meilleurs résultats pour le PB, avec une croissance satisfaisante, bien qu'inférieure à celle obtenue avec le PN à la même dose. La disponibilité accrue du phosphore à cette dose a partiellement compensé les pertes par lessivage, mais la faible réactivité chimique du PB reste un facteur limitant.

- Pour 140 kg/ha : Comme pour le PN, une sur-fertilisation a entraîné une baisse de croissance, liée à des déséquilibres nutritionnels et à une possible toxicité ionique. Le sol argilo-sableux, moins apte à fixer le phosphore, amplifie ces effets négatifs (Fixen & Grove, 1990).

Malgré une teneur en P_2O_5 plus élevée (32,97 %), le PB présente une solubilité moindre (3,82 % à l'acide citrique), due à sa transformation thermique lors de la calcination, qui stabilise les phases minérales (Chien et al., 2011). Cette faible réactivité limite sa disponibilité immédiate pour les plantes, particulièrement dans un sol argilo-sableux, où la faible CEC et la porosité élevée favorisent le lessivage (Havlin et al., 2014). Comparé au PN, le PB est moins efficace dans des conditions de fertilisation directe, mais sa friabilité et sa réactivité chimique accrue pourraient être avantageuses dans des procédés industriels de production d'engrais (Bolan et al., 1990).

Pour la granulométrie, le PN montre une distribution centrée (160–315 μm), idéale pour une application uniforme, tandis que le PB, plus friable, contient davantage de particules fines (<160 μm). Cette finesse

peut améliorer la réactivité chimique, mais augmente le risque de volatilisation ou de lessivage dans les sols sableux (Syers et al., 2008).

Les teneurs en P_2O_5 et solubilité, bien que le PB ait une teneur en P_2O_5 supérieure (32,97 % par rapport à 24,31 %), sa solubilité moindre (3,82 % par rapport à 9,16 % à l'acide citrique) le rend moins efficace pour une assimilation rapide par les plantes. Ces résultats sont cohérents avec les études de Chien et al. (2011), qui montrent que les phosphates calcinés, bien que riches en phosphore total, forment des phases minérales moins disponibles.

Les faibles valeurs de Solubilité à l'eau distillée de valeur (0,46 % pour PB, 0,19 % pour PN) confirment que le phosphore hydrosoluble est marginal, comme attendu pour les phosphates naturels (Hinsinger, 2001).

L'effet du sol argileux (PN) reflète sa forte CEC et sa capacité à fixer le phosphore réduisent les pertes par lessivage, optimisant l'efficacité du PN. Ces propriétés sont bien décrites par Brady & Weil (2017), qui soulignent l'avantage des sols argileux pour les engrais phosphatés.

Compte au Sol argilo-sableux (PB), sa texture plus légère entraîne un lessivage accru, limitant la disponibilité du phosphore. Sharpley (1985) note que les sols sableux nécessitent des applications fractionnées ou des engrais plus solubles pour compenser ces pertes.

Les doses optimales (120 kg/ha pour PN et PB) sont cohérentes avec les recommandations pour les cultures maraîchères dans des sols à fertilité modérée (Havlin et al., 2014). Cependant, la sur-fertilisation à 140 kg/ha illustre un problème courant dans les systèmes agricoles intensifs, où l'excès de phosphore entraîne des impacts environnementaux, comme l'eutrophisation (Sharpley et al., 2001). Par rapport aux engrais commerciaux (par exemple, superphosphate simple, 18–20 % P_2O_5), le PN offre une solubilité comparable à l'acide citrique, mais le PB est moins compétitif en raison de sa faible réactivité (Bolan et al., 1990).

Cette étude confirme que le PN, appliqué sur un sol argileux, est plus efficace que le PB sur un sol argilo-sableux, grâce à sa solubilité supérieure et à la capacité de rétention du sol. La dose de 120 kg/ha représente un optimum pour les deux engrais, mais le PN surpasse le PB en termes de croissance des cultures. Ces résultats soulignent l'importance d'adapter la fertilisation aux propriétés du sol et du phosphate utilisé.

- Pour les sols argileux, le PN est un choix viable, avec des doses de 100–120 kg/ha pour maximiser les rendements.

- Pour les sols argilo-sableux, des applications fractionnées du PB ou un traitement préalable (par exemple, attaque acide) pourraient améliorer son efficacité.
- Des études complémentaires sur les interactions à long terme entre ces engrais et les sols, ainsi que sur leur impact environnemental, sont nécessaires pour optimiser leur utilisation durable.

Conclusion Générale

La présente étude a permis de mettre en lumière l'importance stratégique du phosphate naturel, ressource abondante en Algérie, dans la production d'engrais phosphatés destinés à améliorer la fertilité des sols et les rendements agricoles. À travers une démarche expérimentale rigoureuse, nous avons évalué différents procédés de transformation chimique du phosphate, en particulier les traitements à l'acide sulfurique et les étapes de neutralisation, afin d'augmenter la solubilité du phosphore et sa disponibilité pour les plantes.

Les résultats obtenus ont montré que la transformation du phosphate brut en engrais plus assimilables améliore significativement la concentration en P_2O_5 assimilable, notamment par l'utilisation de l'acide citrique comme agent d'extraction. L'application de ces engrais sur le terrain a confirmé leur efficacité sur la croissance végétale, en particulier dans les sols à faible teneur en phosphore.

Notre travail met également en évidence la nécessité d'adopter des procédés de transformation durables, moins coûteux et adaptés aux réalités agro-climatiques locales. Cela contribuerait non seulement à la valorisation des ressources nationales, mais aussi à la réduction de la dépendance aux engrais importés, en renforçant la souveraineté alimentaire du pays.

En somme, la transformation chimique raisonnée du phosphate constitue une piste prometteuse pour une agriculture plus productive, plus économique et plus respectueuse de l'environnement. Nous espérons que les résultats de ce travail serviront de base à des recherches futures et à la mise en œuvre de solutions industrielles à plus grande échelle.

Références bibliographiques :

- **A.J.G. Notholt., R.P. Sheldon., D.F. Davidson, 1989.** Eds. Phosphate deposits of the world, Vol.2: phosphate rock resources, University Press Cambridge, Cambridge, UK.
- **Alger, 2005** ; Algérie : documents algériens, Série économique : mines ; Les mines en Algérie, mise sur site le 7-03-2005
- **ASMIDAL, 2024** ; Groupe industriel au service du développement agricole
- **Baeyens, L. (1967).** Les phosphates naturels : aspects minéralogiques et utilisations agricoles. Gembloux : Centre de Recherches Agronomiques.
- **Baize, D. (2000).** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols : Références et interprétation. *INRA éditions.*
- **Baize, D. (2000).** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols : Références et interprétation. INRA Éditions.
- **Benoumessad. Abdesslam 2019,** Choix et argumentation d'une méthode de traitement des rejets de phosphate de Djebel Onk- Bir el Ater – Tebessa ; ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET DE LA METALLURGIE AMAR LASKRI- ANNABA
- **Bolan, N.S., Hedley, M.J., & White, R.E. (1990).** Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume-based pastures. *Plant and Soil*, 134, 53–63.
- **Bosc, J. (1976).** Le traitement des minerais phosphatés par voie humide. Techniques et Documentation - Lavoisier.
- **Brady, N.C., & Weil, R.R. (2017).** The Nature and Properties of Soils (15th ed.). Pearson.
- **Brahimi, M. (1991).** Valorisation des phosphates naturels dans l'agriculture algérienne. Mémoire d'ingénieur agronome, Institut National Agronomique, El Harrach.
- **Camille Dumat, 2017.** Fertilisation raisonnée et Biogéochimie, École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse.
- **Cann et al., 1999.** Étude des rejets de phosphore en Bretagne.
- **Charles, R. (1976).** Comportement agronomique des phosphates naturels dans les sols. *Bulletin Technique de l'INRA*, 35, 33–47.
- **Chien, S.H., Prochnow, L.I., & Cantarella, H. (2011).** Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, 112, 267–322.
- **Commission Européenne (2007),-** Commission Européenne, « Fabrication des céramiques », Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, 2007 (D'après Prian et Cortial, 1993).
- **David R, 2009 David, R. (2009).** *Chimie industrielle des engrais phosphatés.* Éditions Tec & Doc, Lavoisier.
- **Diehl, P. (1975).** *L'industrie des engrais phosphatés.* Éditions Technip.
- **Dumat 2017 ;** Camille DUMAT, Fertilisation raisonnée et Biogéochimie, Ecole Nationale Supérieure .
- **Duthil, R. (1974).** Techniques de fabrication des engrais phosphatés. Éditions SECF.
- **Duthil, R. (1976).** Les procédés industriels d'obtention de l'acide phosphorique. *Revue de l'Industrie Minérale*, 58(3), 123–135.

- **Fardeau, J.C.** (1993). Le phosphore dans le sol : dynamique et disponibilité pour les plantes. Paris : INRA Éditions.
- **Fixen, P.E., & Grove, J.H.** (1990). Testing soils for phosphorus. In *Soil Testing and Plant Analysis* (3rd ed., pp. 141–180). Soil Science Society of America.
- **Frossard, E., Julien, P., Neyroud, J.-A., & Sinaj, S.** (2004). *Le phosphore dans les sols agricoles : disponibilité et gestion durable*. Versailles : Éditions Quae / INRA.
- **Gervy, C.** (1970). *Étude des phosphates naturels et de leur transformation industrielle*. Paris : Publications des Mines.
- **Gremillion, W.S., & McClellan, G.H.** (1975). Evaluation of phosphate rock reactivity for direct application. *Proceedings of the International Fertilizer Society*, 155, 1–17.
- **Gros, R.** (1977). Les engrais phosphatés : technologie et usage. Éditions SECF.
- **Gros, R.** (1979). Phosphates naturels et engrais phosphatés. *Revue de l’Agronomie*, 25(4), 211–225.
- **Hammond, L.L., & Day, D.P., 1992**, Phosphate rock standardization and product quality, *Malaysian Society of Soil Science*; **McConnell, D., 1973**, Apatite, its Crystal Chemistry, Mineralogy, Utilization, and Geologic and Biologic
- **Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., & Nelson, W.L. (2014)**. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (8th ed.). Pearson.
- **Hinsinger, P. (2001)**. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237, 173–195.
- **Informations Chimie, (1989)** ; n°302, janvier-février (1989)
- **Kirwan, R. (1794)**; *Elements of Mineralogy*, second edition: *Elements of Mineralogy*, second edition: 1: 129.
- **Lambert, J. (1979)**. Étude des procédés de production d’acide phosphorique et de leurs performances industrielles. *Revue des Techniques Chimiques*, 41(2), 98–110.
- **Les mines en Algérie : 2005** ;Alger, Algérie : documents algériens, Série économique : mines ; Les mines en Algérie, mise sur site le 7-03-2005
- **Marschner, H. (1995)**. *Mineral Nutrition of Higher Plants* (2nd ed.). Academic Press.
- **McClellan, G.H., & Gremillion, W.S.** (1980). Mineralogy and agronomic performance of phosphate rocks. In Khasawneh, F.E. et al. (Eds.), *The Role of Phosphorus in Agriculture* (pp. 85–110). Madison : ASA-CSSA-SSSA.
- **McClellan, G.H., & Van Kauwenbergh, S.J., 1990**, *Mineralogy of sedimentary apatites*, Geological Society, Special Publication, 5, p. 23-31).
- **McConnell, D. (1973)**; *Apatite, its Crystal Chemistry, Mineralogy, Utilization, and Geologic and Biologic*
- **Moughli, M. (2000)**. Utilisation des engrais phosphatés au Maroc : état des lieux et perspectives. Rabat : Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).Molécules n°8, juillet 1983, Magazine de l’Union des Industries Chimiques (1983).
- **Notholt, A.J.G.** (1989). Phosphate rock resources: Occurrence and availability. In H. Van Kauwenbergh (Ed.), *IFDC Bulletin*, 1. Muscle Shoals, AL: International Fertilizer Development Center.
- **Pellerin, S., Bamière, L., & Le Bas, C. (2003)**. *Agriculture intensive et environnement : outils d’évaluation et de gestion*. Versailles : Éditions QUAE-INRA.

- **Prat, D., Morel, A., & Lambert, J. (1971).** Réactivité des phosphates naturels dans les sols acides. *Revue Française d’Agronomie*, 23(2), 142–152.
- **Prayon Technologies. (2020).** *Phosphoric Acid Production Processes*. Prayon Group. <https://www.prayon.com>.
- **Razi, H. (2006).** Étude comparative de la solubilité des phosphates naturels dans différents systèmes agro-écologiques. Thèse de doctorat, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- **Sharpley, A.N. (1985).** Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 905–911.
- **Sharpley, A.N., Daniel, T.C., Sims, J.T., & Pote, D.H. (2001).** Determining environmentally sound phosphorus application rates. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56, 297–304.
- **Slansky, M. (1980).** Organisation et fonctionnement de la Semiphose : aspects économiques et industriels de la filière phosphatée. *Paris : Éditions Technip*.
- **Syers, J.K., Johnston, A.E., & Curtin, D. (2008).** Efficiency of Soil and Fertilizer Phosphorus Use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18*. Food and Agriculture Organization.
- **Taiz, L., & Zeiger, E. (2010).** *Plant Physiology (5th ed.)*. Sinauer Associates.
- **Van Kauwenbergh, S.J., & Hellums, D.T. (1995).** Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences. Muscle Shoals, AL : IFDC Technical Bulletin, International Fertilizer Development Center.

Annexe

TABLEAU 01 : Production mondiale de phosphate naturel, 1999 Mew, 2000

Paye	Production (1 000 tonnes)	Total mondial %
Chine	30 754	21,1
Etats-Unis	40 867	28,1
Fédération de Russie	11 219	7,7
Maroc et Sahara occidental	21 986	15,1
Sous-total des 4 principaux	104 826	72,0
Afrique du Sud	2 941	2,0
Brésil	4 301	2,9
Israël	4 128	2,8
Jordanie	6 014	4,1
République Arabe Syrienne	2 084	1,4
Sénégal	1 879	1,3
Togo	1 715	1,2
Tunisie	8 006	5,5
Sous-total des 12 principaux	135 894	93,4
Algérie	1 093	0,8
Australie	145	0,1
Canada	350	0,3
Christmas Island	683	0,5
Colombie	4	< 0,1
Egypte	1 018	0,7
Finlande	734	0,5
Inde	1 623	1,1
Irak	415	0,3
Kazakhstan	900	0,6
Mexique	955	0,7
Nauru	604	0,4
Ouzbékistan	139	< 0,1
Pérou	15	< 0,1
République populaire démocratique de Corée	70	< 0,1
Sri Lanka	30	< 0,1
Venezuela	366	0,3
Vietnam	710	0,5
Zimbabwe	124	< 0,1
Total mondial	145 472	100,0

تتناول هذه المذكرة دراسة التحول الكيميائي للفوسفات الطبيعي بهدف إنتاج أسمدة فوسفاتية قابلة للامتصاص من طرف النباتات.

يُعد الفوسفور عنصراً غذائياً أساسياً في نمو النباتات وتطورها، غير أن شكله الطبيعي (الفوسفات الخام) يتميز بضعف ذوبانه وصعوبة امتصاصه من طرف الجذور النباتية. لذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تحويل الفوسفات إلى أشكال أكثر ذوباناً من خلال تفاعلات كيميائية تعتمد أساساً على إضافة أحماض معدنية كحمض الكبريتيك أو حمض الفوسفوريك، لإنتاج مركبات مثل السوبر فوسفات أو فوسفات الأمونيوم، التي تتميز بقدرة أعلى على التفاعل مع التربة وامتصاصها من طرف النباتات. وقد تم خلال البحث تنفيذ تجربة مخبرية لتحويل الفوسفات الطبيعي إلى سماد قابل للامتصاص، مع دراسة خصائص المنتج الكيميائية والفيزيائية، وتقييم فعاليته الزراعية من خلال تطبيقه على نباتات معينة. أظهرت النتائج تحسناً واضحاً في نسبة الفوسفور المتاح وفعالية امتصاصه من طرف النبات مقارنة بالفوسفات الخام. تعكس هذه الدراسة أهمية تثمين الموارد الفوسفاتية الطبيعية المتوفرة محلياً، والانتقال نحو إنتاج أسمدة فوسفاتية فعالة ومستدامة تساهم في رفع الإنتاج الزراعي وتحقيق الأمن الغذائي.

الكلمات المفتاحية: الفوسفات، الفوسفور القابل للامتصاص، الزراعة المستدامة، جبل عنق _ الجزائر، الاباتيت، التحول الكيميائي، حمض الفوسفوريك.

Abstract:

This thesis focuses on the chemical transformation of natural phosphate with the aim of producing phosphate fertilizers that can be absorbed by plants. Phosphorus is an essential nutrient for plant growth and development. However, in its natural form (raw phosphate), it has low solubility and is difficult for plant roots to absorb. Therefore, this study aims to convert phosphate into more soluble forms through chemical reactions that primarily involve the addition of mineral acids such as sulfuric acid or phosphoric acid, in order to produce compounds like superphosphate or ammonium phosphate, which have a higher capacity to interact with the soil and be absorbed by plants. An experimental laboratory process was conducted to convert natural phosphate into an absorbable fertilizer, along with a study of the chemical and physical properties of the final product, and an evaluation of its agricultural effectiveness through application to selected plants. The results showed a significant improvement in the availability of phosphorus and its uptake by plants compared to raw phosphate. This study highlights the importance of valorizing locally available phosphate resources and transitioning toward the production of efficient and sustainable phosphate fertilizers that contribute to increasing agricultural yield and ensuring food security.

Key Words: Phosphate, Available phosphorus, Sustainable agriculture, Djebel Onk – Algeria, Apatit
Chemical transformation, Phosphoric acid.

Résumé

Ce mémoire traite de la transformation chimique du phosphate naturel dans le but de produire un engrais phosphaté assimilable par les plantes. Le phosphore est un élément nutritif essentiel à la croissance et au développement des végétaux. Toutefois, sous sa forme naturelle, le phosphate présente une faible solubilité et une disponibilité limitée pour l'absorption racinaire. L'objectif de cette étude est de transformer le phosphate brut en formes plus solubles par des réactions chimiques impliquant principalement des acides minéraux tels que l'acide sulfurique ou l'acide phosphorique. Ces transformations permettent d'obtenir des produits tels que le superphosphate ou le phosphate d'ammonium, qui sont plus facilement assimilables par les plantes. Une expérimentation en laboratoire a été menée pour convertir le phosphate naturel en engrais soluble, suivie d'une caractérisation physico-chimique du produit obtenu, ainsi qu'une évaluation de son efficacité agricole sur certaines cultures.

Les résultats ont montré une amélioration significative de la disponibilité du phosphore et de son absorption par les plantes, comparativement au phosphate brut. Cette recherche met en valeur l'importance de la valorisation des ressources phosphatières locales et encourage la production d'engrais phosphatés efficaces et durables, au service du développement agricole et de la sécurité alimentaire.

Mots clés : Phosphate, Phosphore assimilable, Agriculture durable, Djebel Onk – Algérie, Apatite
Transformation chimique, Acide phosphorique.