

Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naâma



Institut des Sciences et Technologies

Département des Sciences de la Nature et de la Vie

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Master Académique en Sciences Agronomiques
Spécialité « Agro-pastoralisme »

Thème

Effet de quelques facteurs édaphiques sur la biodisponibilité du phosphore.

Par : Mlle **TERCHOUN** Hafsa

Mlle **ARBAOUI** Fawzia

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

M^r MAROUF	A.	Président	Professeur	Centre Universitaire de Naama
M^r BOURAHLA	L.	Encadreur	MCB	Centre Universitaire de Naama
M^r MAHDAD	Y.	Examineur	M.A.A	Centre Universitaire de Naama

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir accordé la santé, le courage et les moyens pour suivre nos études et la volonté pour la réalisation de ce travail.

*Nous aimerons d'abord exprimer nos gratitudee à notre encadreur **Mr. BOURAHLA L.** pour avoir accepté de bon gré de participer à ce mémoire, ainsi que pour ses efforts fournis, pour ses conseils judicieux prodigués et pour sa patience et sa persévérance dans notre suivi, malgré ses charges intenses.*

*Nos profonds remerciements vont aux messieurs membres du jury: **Pr. MAROUF A.** et **Mr. MAHDAD Y.** qui nous ont fait l'honneur de participer et de juger notre travail.*

Nos sincères remerciements vont également aux enseignants de spécialité Agropastoralisme et tous les enseignants du département des Sciences de la Nature et la Vie, Centre Universitaire Salhi Ahmed Naama.

Nous remercions également toutes les personnes qui ont contribué, de pré ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail,

A Mes parents,

A Mes frères et sœurs,

A Toute ma famille,

A Mes amis et mes collègues de la promotion Agropastorale

2019/2020

A Toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail

ARBAOUI FAWZIA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux : Les personnes que j'aime le plus dans la vie, qui méritent tout le respect du monde qu'ils trouvent ici le témoignage de mon profond amour et dévouement infini :

A mon très cher père.

A Ma mère, le support de ma vie.

A ma très chère grande mère.

Que dieu vous protège et vous réserve une longue vie pleine de bonheur et de santé.

A Mes très chères sœurs pour l'amour qui nos unis, mes très chers frères chacun a son nom Abd Errahmene, Youcef, Mohammed Amine et Soulaymen ; Pour les femmes de mes frères.

Pour mes chère nièces et neveux

A mes très chères amies.

A toute la famille TERCHOUN.

ET

A tous ceux que j'aime dans ma vie.

TERCHOUN HAFSA

ملخص:

تمثل هذه الدراسة ملخصاً بيولوجياً لسلوك الفسفور في التربة. يلعب الفسفور دوراً أساسياً في نمو النبات كما يؤثر في الخصوبة الكيميائية للتربة. فبرغم ثراء التربة بالفسفور، إلا أن تيسرها واستيعابها من قبل النباتات غالباً ما يتأثران بظواهر تسمى الامتزاز والترسيب. إن هذه الآليات تتفاعل نظراً للتفاعل الموجود بين الطبيعة الخاصة لأيونات الفوسفات وطبيعة الجزء الصلب للتربة. و كنتيجة لهذا التفاعل الخاص كثيراً ما يحدث نقص ولو مؤقت للفسفور أثناء نمو النبات. إن طرق استخدام الأراضي الزراعية وطبيعة تكوينها يساعدان على ظهور نقص الفوسفات في أغلب الترب الجزائرية. وعليه يجب أن يؤخذ تحسين كفاءة التسميد الفوسفاتي في التربة الجزائرية في إطار يربط بين الطبيعة الخاصة للموقع البيئي والأنواع النباتية المزروعة.

الكلمات المفتاحية: فوسفور - تيسير - تربة - نقصان - الجزائر

Summary:

This study is a bibliographical summary of the phosphorus's behavior in the soil. Indeed, phosphorus plays a preponderant role for the development of the plant and influences the soil's chemical fertility. Despite the richness of the soil in phosphorus, its bioavailability and its assimilation by plants are strongly influenced by the adsorption and precipitation phenomena. These mechanisms are the result of an interaction between the specific aspect of phosphate ions and the nature of the soil's solid matrix. This interaction always creates an at least ephemeral phosphate deficiency during the vegetative cycle. By their nature and the agricultural land use's mode, phosphate deficiency is almost omnipresent in Algerian soils. Improving the efficiency of phosphate fertilization in Algerian soils must be taken within a framework linking the specific nature of the ecological site and the cultivated plant species.

Keywords: Phosphorus, bioavailability, soil, deficiency, Algeria.

Résumé:

Cette étude est une synthèse bibliographique du comportement du phosphore dans le sol. En effet, le phosphore joue un rôle prépondérant pour le développement du végétal et influence la fertilité chimique du sol. Malgré la richesse du sol en phosphore, sa biodisponibilité et son assimilation par le végétal sont fortement influencées par les phénomènes d'adsorption et de précipitation. Ces mécanismes sont le résultat d'une interaction entre l'aspect spécifique des ions phosphatés et la nature de la matrice solide du sol. Cette interaction crée toujours une carence phosphatée au moins éphémère durant le cycle végétatif. Par leurs natures et le mode d'utilisation des terres agricoles, la carence phosphatée est presque omniprésente dans les sols algériens. L'amélioration de l'efficacité de la fertilisation phosphatée en sols algériens doit être prise dans un cadre global reliant la nature spécifique du site écologique et l'espèce végétale cultivée.

Mots clés: Phosphore, biodisponibilité, sol, carence, Algérie.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 LE PHOSPHORE DANS LE SOL	
Introduction	3
1-Les formes de phosphore:	4
1.1-Le phosphore total:.....	4
1.2-Le phosphore assimilable:.....	4
1.2.1-Les méthodes d'évaluation du phosphore assimilable:	5
1.2.1.1-La méthode de Dyer :.....	5
1.2.1.2-La méthode de Joret-Hebert:	5
1.2.1.3-La méthode d'Olsen:	6
1.2.1.4-La méthode des cinétiques d'échanges isotopiques :.....	6
2-Le fractionnement du phosphore :.....	7
2.1-La forme soluble :	7
2.2-Le phosphore adsorbé sur les constituants du sol:	7
2.3-Le phosphore peu soluble ou précipité:.....	8
2.4-La forme organique :.....	8
3-Le cycle du phosphore dans le sol :	8
4-Le comportement du phosphore dans le sol :.....	10
4.1-L'adsorption-désorption :.....	10
4.2-La précipitation-dissolution :	12
4.3-Les activités biologiques :.....	12
5-Les facteurs affectant la disponibilité du phosphore dans le sol :.....	13
5.1-L'acidité de sol:.....	13
5.2-La matière organique :	13
5.3-Le calcaire :.....	15
5.4-Le fer et l'aluminium :	16
5.5-La texture :	17
5.6-L'humidité :.....	17
5.7-La température du sol :.....	18
5.8-L'effet de la rhizosphère:	18
CHAPITRE 2 LE PHOSPHORE ET LE DEVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE	
Introduction :.....	20
1-L'absorption du phosphore par la plante:.....	20
1.1-La carence et l'excès en phosphore chez les végétaux:.....	20
2-La fertilisation phosphatée:	21

2.1-Les différents types d'engrais phosphatés :	21
3-Les perspectives d'utilisations du phosphate en agriculture algérienne :	22
3.1-La répartition et occupation des terres :	22
3.2-Le contexte agro écologique :	23
3.2.1-Les zones littorales :	23
3.2.2-Les plaines sublittorales :	23
3.2.3-Les plaines intérieures :	23
3.2.4-La steppe :	24
3.2.5-Le système de cultures oasisien :	24
3.3-Les besoins en engrais :	24
3.4-Les causes qui limitent l'utilisation des engrais phosphates dans les sols algériens :	25
CONCLUSION GENERALE	27
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n° 01: Les principaux pays producteurs des phosphates dans le monde	4
Tableau n° 02: Les normes d'interprétation des teneurs en phosphore assimilable P_2O_5	6
Tableau n° 03: Les normes d'interprétation des teneurs en phosphore assimilable P_2O_5	6
Tableau n° 04 : Les principaux groupements fonctionnels impliqués dans l'adsorption des phosphates.....	11
Tableau n° 05 : Les doses pratiquées de phosphore en fonction de la pluviosité.....	25

LISTE DES FIGURES

Figure n° 01: Le cycle général du phosphore.	9
Figure n° 02: La distribution des différentes formes solubles du phosphore en fonction de pH.	13
Figure n° 03 : Le mécanisme d'adsorption des ions phosphatés sur un oxy(hydro)xyde de fer.	16
Figure n° 04 : Le principe de fabrication des fertilisants phosphatés.	22

LISTE DES ABREVIATIONS

- CPCS** : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
- INSID** : Institut National des Sols, d'Irrigation et de Drainage
- INVA** : Institut National de la Vulgarisation Agricole
- ITAFV** : Institut Technologique de l'Arboriculture fruitière et de la Vigne
- ITCMI** : Institut National des Cultures Maraichères et Industrielles
- MADR** : Ministère de l'Agriculture et du développement Rural
- MREE** : Ministère des Ressources en Eaux
- PIB** : Produit intérieur brut
- SAU**: Surface Agricole Utile
- USGS**: United States Geological Survey

INTRODUCTION GENERALE

Découvert depuis 1669 par l'alchimiste allemand Henning Brandt, le phosphore est un élément largement distribué dans la nature et il est présent dans tous les organismes vivants ; il joue un rôle important dans le développement du secteur agricole et industriel. Pour cela, les gisements phosphatés sont considérés comme matériaux stratégiques pour la plupart des pays (**Boulaine 2006**).

A l'état naturel, les sols contiennent de 1 à 3 tonnes de phosphore total dans les 20 premiers cm, une quantité qui dépasse largement les besoins annuels des plantes; cependant, seulement une petite partie de ce stock appelée phosphore biodisponible ou assimilable qui assure la nutrition de la biomasse vivante (**Beaudin et al. 2008 in Benaissa 2018**).

Le phosphore bio disponible ou assimilable par les plantes se présente principalement sous forme d'ions ortho phosphates dissous dans la solution ou faiblement fixés sur la surface des constituants organo-minéraux du sol (matrice solide); pour cela, la connaissance adéquate de cette fraction est essentielle pour le maintien de la fertilité du sol, la croissance des végétaux et la pérennité de la production.

L'apport potentiel du sol en phosphore assimilable et son évolution sont influencés par un certain nombre de facteurs pédologiques: physiques (texture, humidité...), chimiques (pH, calcaire, fer ...), biologiques (rhizosphère) (**Fardeau et al.1991 in Kati 2012**).

La quantification de cette fraction assimilable reste tributaire aux facteurs édaphiques et à l'aptitude du système racinaire de la plante cultivée à extraire cette dernière. Alors, différentes méthodes ont été proposées depuis la fin du 19^e siècle pour simuler et reproduire l'action d'extraction des racines et ceci par l'utilisation des différents réactifs chimiques; méthodes encore utilisées aujourd'hui par différentes écoles (Dyer, Olsen, Joret-Hébert, Cinétiques d'échanges isotopiques...) mais elles nécessitent une standardisation pour couvrir une large gamme d'unités pédologiques (**Baize 1988**).

L'Algérie dispose d'importantes ressources phosphatées localisées principalement à Djebel Onk (Tébessa) et elles sont estimées à 2 milliards de tonnes, ce qui permet de satisfaire les besoins de l'agriculture en engrais et même l'exportation d'une quantité appréciable vers l'étranger.

Malgré ce potentiel et l'élaboration des différents programmes pour le développement du secteur agricole, la fertilisation phosphatée reste limitée, archaïque et elle ne dépasse guère 0,5q/ha ce qui influe négativement sur l'augmentation de la production et la modernisation de l'agriculture algérienne (**MADR 2011**).

Cette situation est due aux diverses contraintes socioéconomiques mais surtout physico-chimiques liées à la nature de la voie pédo-génétique des sols. Par référence au (CPCS), la majorité des sols algériens appartiennent aux deux grandes classes : calcimagnésique et fersiallitique et avec une grande pauvreté en matière organique ; ces facteurs réunis stimulent donc le blocage et la précipitation du phosphate au détriment de sa minéralisation ce qui limitent l'efficacité de cet élément **(Ruellan 1971 in Kati 2012)**.

Cette étude est une synthèse bibliographique résumant la dynamique des phosphates dans les sols avec une importance accordée aux conditions algériennes; elle est répartie sur deux chapitres:

Le premier chapitre concerne le comportement du phosphore dans la pédosphère et les principaux facteurs qui influencent son évolution.

Le deuxième chapitre comporte les potentialités et les limites de la fertilisation phosphatée dans les sols algériens et les moyens pour améliorer son efficacité.

CHAPITRE 1
LE PHOSPHORE DANS LE SOL

Introduction

La découverte du phosphore remonte à 1669 par l'alchimiste allemand **Henning Brandten** en analysant l'urine humaine. En 1769, le chimiste suédois **Carl Wilhem Scheele** découvre la présence de phosphore dans les os. Jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, les engrais phosphatés appliqués ne sont que des os broyés auxquels des guanos ont été ajoutés au début du 19^{ème} siècle.

L'existence et les possibilités d'utilisation des phosphates naturels étaient connues en même temps, mais ils n'ont commencé à être utilisés systématiquement qu'environ 1850 (**Romov et al. 1969** in **Boulaine 2006**).

D'après **Slansky (1980)** in **El haddi (2014)**, les accumulations phosphatées dans l'écorce terrestre se présentent en trois types de gisements :

- Les gisements d'origine ignée (les syénites, les carbonates, les pyroxènes ...).
- Les gisements de type Guanos sont constitués de déjections d'oiseaux qui contiennent environ 4 % en P_2O_5 accumulés durant des milliers ou millions d'années sur des sites dorts ou de reproduction.

Les gisements de type sédimentaire sont les plus importants et dont les teneurs en P_2O_5 dépassent 28 % (**Smirnov 1982** in **Mihoub 2012**).

Selon **Fisher (1973)**, les phosphates naturels comprennent plus de 200 espèces minérales et qui se différencient essentiellement par la nature du cation métallique accompagnateur; mais, les plus importants appartiennent à la famille des apatites (**Straaten 2002** in **Demers 2008**).

Les principaux minerais phosphatés sont : **Fluorapatite, Hydroxy-apatite carbonaté, Millisite, Augelite, Béraunite, Turquoise...**

Les minerais phosphatés sont d'une grande importance pour les économies agricoles dans la grande majorité des pays ; le phosphate est l'un des matériaux naturels le plus commercialisés dans le monde et qui représente une valeur de 3 à 4 milliards de dollars par an (**Daass 2006**).

La qualité de ces minerais dépend de ces teneur en P_2O_5 ou en équivalent de phosphate tricalcique ($Ca_3(PO_4)_2$) (TCP) ; seuls les minerais phosphatés qui atteignent 95 % de TCP sont économiquement rentables et utilisés dans la fabrication des engrais (**Emich 1984 ; Jasinski, 2007**).

Plus de 40 pays produisent le minerai phosphaté en tant que produit marchand et les ressources prouvées sont de 71 milliards de tonnes en 2012, la production annuelle est d'environ 191 millions de tonnes extraites en 2011 ce qui correspond à 20 à 30 millions de tonnes de phosphore purifié par an et avec ce taux d'exploitation, ces réserves pourraient être épuisées avant un siècle (**USGS 2014**).

Les roches phosphatées exploitables se concentrent principalement au Maroc (plus du tiers des réserves mondiales), Chine (un peu plus du quart des réserves mondiales), Afrique du Sud et les États-Unis.

Les principaux pays producteurs des phosphates sont: Chine, USA, Maroc, Russie, Jordanie, Brésil, Egypte, Tunisie, (**Tableau n°01**) ce produit est destiné principalement à la production d'engrais (80% de la production mondiale) mais aussi dans la fabrication des détergents (comme agents anticalcaires), l'alimentation animale et comme stabilisant dans l'alimentation humaine (**Jasinski, 2007**).

Tableau n°01: Les principaux pays producteurs des phosphates dans le monde (milliers de tonne).
(USGS 2014)

Pays	Quantité	Pays	Quantité
Chine	97 000	Jordanie	7 000
Etats-Unis	32 300	Brésil	6 740
Maroc	28 000	Egypte	6 000
Russie	11 200	Tunisie	4 000

1-Les formes de phosphore:

1.1-Le phosphore total:

C'est la quantité totale qui existe dans le sol sous deux formes : minérales et organique, elle est évaluée après une attaque triacide et dosage colorimétrique. La connaissance de cette quantité ne donne qu'une indication très imparfaite sur l'aptitude du sol à fournir du phosphore aux végétaux et à satisfaire leurs exigences (**Pereda 2008**).

Selon **Beaudin et al. (2008)** in **Benaissa (2018)**, en conditions naturelles, les sols contiennent de un à trois tonnes de phosphore par hectare dans l'horizon de surface (les 20 premiers centimètres) dont la fraction minérale forme 50 à 70% alors la portion organique représente 25%.

La roche mère est la principale source de phosphore total, dans les sols dérivés de roches sédimentaires, cette valeur est comprise entre 0,3 et 1‰, alors dans ceux qui proviennent des roches cristallines ou volcaniques, elle est plus importante et varie entre 1 et 4 ‰ (**Schwartz et al. 2005**).

Cette quantité dépasse largement les besoins annuels des plantes, mais cette dernière n'est pas totalement assimilable par les racines des plantes.

1.2-Le phosphore assimilable:

C'est le phosphore que la plante peut facilement absorber et qui participe à l'alimentation de cette dernière. D'après **Gachon (1977)**, les réserves assimilables du sol en phosphore constituent seulement une petite partie du phosphore présente dans le sol moins de 30% du phosphore total.

Quand on parle de phosphore assimilable on dit aussi « **la fraction labile** », qui représente des ions phosphatés sous forme $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} dont l'abondance varie fortement avec le pH du sol.

L'estimation des seuils de richesse du sol en phosphore assimilable est variable selon la méthode et les réactifs d'extraction utilisés.

1.2.1-Les méthodes d'évaluation du phosphore assimilable:

L'estimation de la quantité et de la qualité du phosphore assimilable est une préoccupation pour la pédologie analytique, il existe de nombreuses méthodes de routine pour le déterminer et qui diffèrent d'une école à une autre (**Ansiaux 1977 in Zemoura 2005**).

Cette différence est liée surtout à l'utilisation de réactifs chimiques les plus agressifs vis-à-vis des différentes formes de phosphore du sol qui sont aptes d'être absorbées par les plantes sous une large gamme de variations pédologiques (**Admont et al. 1986**).

Bouyadid (1989) in Hafidi (1994), a souligné que la fertilisation phosphatée des sols devait prendre en compte l'absorption de ces réserves par les racines des plantes durant les différentes phases phonologiques. Dans le but de valider une méthode d'estimation reflétant le pouvoir d'assimilation des racines, il est nécessaire de comparer et d'établir la relation qui existe entre la quantité de phosphore absorbée et emmagasinée dans la biomasse avec celle qui est extraite par les différents réactifs chimiques conventionnels (**Stanford et al. 1957 in Sposito 1989**).

1.2.1.1-La méthode de Dyer :

Cette méthode est utilisée dans les sols acides et neutres ; l'extraction est réalisée au moyen d'une solution d'acide citrique à 2% à pH=2 (critère utilisé pour identifier l'horizon mollique de l'horizon anthropique dans l'école Américaine) (**Christian et al.2005**).

Cette méthode surestime les teneurs en phosphore assimilable pour les sols fortement calcaire, mais elle donne des résultats satisfaisants pour les sols ferrugineux tropicaux lessivés et les sols ferralitiques surtout lorsqu'ils sont relativement bien pourvus en phosphore (**Dapin 1958**).

1.2.1.2-La méthode de Joret-Hebert:

L'extraction est réalisée à l'oxalate d'ammonium à 0,2N en milieu neutre; cette méthode extrait aussi une partie du phosphore qui adsorbée sur les faces du calcaire, cette fraction n'est obligatoirement assimilable par les plantes, cependant cette technique serait intéressante et elle est considérée comme satisfaisante essentiellement pour les sols acides et les terres dont le pH est aux alentours 6,8 (sols faiblement calcaires et neutres).

Tableau n° 02: Les normes d'interprétation des teneurs en phosphore assimilable.

(Méthode de Joret-Hebert) (Soltner 1990)

Teneur de P ₂ O ₅ (en ppm)	Niveau
-100	Très faible
100-140	Faible
140-180	Peu faible
180-220	Satisfaisant
+220	Elevé

1.2.1.3-La méthode d'Olsen:

Cette méthode est très adaptée aux sols neutres et même fortement calcaires, elle permet de déterminer le phosphore alcalino-soluble extrait par l'hydrogénocarbonate de sodium (NaHCO₃) à un pH 8,5 en supposant que le phosphore extrait provient de l'échange avec les ions HCO₃⁻ ajoutés.

D'après Fardeau (2005) in Cecile (2017), cette fraction phosphorique extraite par ce réactif pourrait fournir le meilleur indicateur de la quantité de phosphates susceptibles d'être prélevé par les racines des plantes.

De même Fardeau et al. (1988) in Zemoura (2005), en comparant les différentes méthodes d'extraction, et à l'exception des sols acides, soulignent que la méthode d'Olsen extrait le moins de phosphore peu mobile comparativement aux autres méthodes précédemment décrites et même elle a une quantité de phosphore extraite presque égale à celle du phosphore isotopiquement échangeable.

Tableau n° 03 : Les normes d'interprétation des teneurs en phosphore assimilable.

(Méthode d'Olsen) (Soltner 1990)

Teneur de P ₂ O ₅ (en ppm)	Niveau
-15	Pauvre
15-30	Moyen
+30	Riche

1.2.1.4-La méthode des cinétiques d'échanges isotopiques :

Cette méthode consiste à utiliser les phosphates marqués et suivre leurs évolutions et leur partage entre les différentes phases et ceci par l'emploi d'anions phosphatés marqués ³²P, ³³P comme elle permet aussi de mesurer le nombre et la taille des compartiments présents sans avoir les extraire.

Il a été ainsi démontré que les ions phosphatés apportés au sol se répartissent entre plusieurs compartiments. Une partie est directement utilisable par les végétaux : forme la phase soluble ou adsorbé sur la phase solide et qui peut s'échanger avec la solution du sol en moins d'une minute (c'est

le pool des ions « libres ou labiles ») l'autre ensemble, plus hétérogène, c'est celui des ions phosphatés plus ou moins énergiquement retenus par les constituants solides de sol, et dont la vitesse d'échange avec les ions libres de la solution du sol varie entre une minute et même plusieurs années.

De telles considérations ont naturellement des conséquences pratiques majeures lorsqu'il s'agit de fournir du phosphore à une culture qui ne reste en place que pendant 5 à 9 mois et ne prélève du phosphore que durant 3 à 4 mois (**Baize 2000**).

2-Le fractionnement du phosphore :

2.1-La forme soluble :

La plante absorbe le phosphore sous formes des ions phosphoriques $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} avec des proportions relatives qui dépendent du pH du sol (**Fardeau et al. 1991 in Kati 2012**).

Selon **Neal (2009) in Benaissa (2018)**, la concentration de phosphore dans la solution du sol est généralement faible, même dans les sols les plus fertilisés, elle oscille entre 0,1 et 3,7 kg de P_2O_5 /Ha dans les horizons de surface.

De nombreux auteurs ont confirmé cette faiblesse, d'après **Gachon et al. (1988) in Kati (2012)**, le phosphore dissout dans la solution des sols cultivés est généralement très faible est comprise entre 0,05 à 0,3mg/l, des valeurs proches ont été trouvées par **Eliard (1979) in Benaissa (2018)**, où la concentration de phosphore dissout dans la solution du sol est comprise entre 0,2 à 0,5 mg/l, mais pour **Dore et al. (2006) in Mihoub (2012)**, cette valeur oscille entre 0,5 et 1 mg/l.

À tout instant, la quantité de phosphore dans la solution du sol n'est qu'une petite fraction des besoins annuels d'un écosystème ou des cultures, donc l'aspect qualitatif du statut phosphorique du sol est sa capacité à reconstituer la solution du sol après son absorption par la plante.

2.2-Le phosphore adsorbé sur les constituants du sol:

Le phosphore minéral échangeable se trouve sous différentes formes dans le sol. Les ions phosphoriques par son caractère de ligands, s'adsorbent sur les colloïdes humiques (chélates), sur les calcaires fins, sur les argiles par l'intermédiaire de ponts de calcium, d'aluminium et de fer, enfin sur les hydroxydes de fer et d'alumine en conditions pédogénèse acides.

D'après **Fardeau (1991) in Mihoub (2012)** ce sont les ions phosphoriques fixés sur le complexe adsorbant du sol qui participent, en fonction des conditions pédologiques, à des échanges continues avec la solution du sol, ils constituent l'essentiel du "pool alimentaire" des plantes ou "pool" labile qui peut atteindre 800kg/Ha dans l'horizon de surface.

Cette partie labile a un fort potentiel de s'équilibrer avec les teneurs en phosphore de la solution du sol (**Henintsoa 2011 in Andrianambinina 2013**).

2.3-Le phosphore peu soluble ou précipité:

C'est la fraction du phosphore inorganique qui est soit naturellement peu mobile, soit rendu peu mobile sous l'effet des conditions physicochimiques particulières du sol (pH, milieu calcaire, fer...) et qui peut atteindre jusqu'au 6000kg/Ha dans l'horizon de surface (**Duthil 1976 in Zemoura 2005**).

Les formes les moins actives de phosphore sont principalement les phosphates de fer et d'alumine obtenus par précipitation en milieu très acide (**Pereda 2008**), le phosphore des couches internes d'argile, l'apatite et les phosphates calciques cristallisés (**Mihoub 2012**).

D'après **Masmoudi (1998) in Benaissa (2018)**, les changements de pH, les effets des racines, l'action de la matière organique, l'activité microbienne ne peuvent mobiliser que de très faibles fractions de ces formes de phosphore en lui rendant plus accessible aux plantes.

2.4-La forme organique :

Le phosphore organique est issu après minéralisation de la matière organique d'origine végétale, animale ou des micro-organismes du sol, incorporé dans les composés humiques, il est présent comme des phosphates d'inositol, phospholipides, acides nucléiques et divers autres esters de phosphate (composés d'humus-phosphate contenant 0,02 et 0,5% de phosphore) (**Brookes et al. 1984 in Mihoub 2012**).

Cette fraction phosphorique est souvent immobilisée par adsorption et fixation aux colloïdes organo- minéraux du sol qui sont faiblement absorbables et difficilement accessibles pour les plantes (**Marschner 1995 in Pereda 2008**) et seulement une faible quantité pourra passer à la phase soluble (la solution du sol).

Les teneurs du sol en phosphore organique peuvent varier considérablement dans l'horizon de surface variant de 10 à 100kg/Ha (**Duthil 1976 in Mihoub 2012**), et qui peuvent représenter jusqu'au 65% du phosphore total dans les sols organiques (histisols) (**Harrison 1987 in Zemoura 2005**).

Pour **Neal (2009) in Benaissa (2018)**, cette fraction peut atteindre 90% du phosphore total, quant à la portion du phosphore d'origine microbienne elle oscille entre 2% et 24% du phosphore organique du sol et entre 1 à 2 % du phosphore total du sol (**Demers 2008**).

Le transfert du phosphore organique dans la solution du sol dépend de l'activité enzymatique présente dans la pédosphère particulièrement la phosphatase (**Priya et al. 2009 in Mihoub 2012**), cette fraction fournit annuellement entre 1 à 2% de phosphore assimilable pour les plantes après minéralisation (**Heck et al. 1982 in Kati 2012**).

3-Le cycle du phosphore dans le sol :

Dans les écosystèmes naturels non perturbés et en équilibres, le cycle du phosphore est considéré comme quasi fermé et conservatif, le phosphore est prélevé par les plantes et les

microorganismes à partir de la solution du sol et il est retourné au sol par les apports de litières (**Fig.n° 01**) (**Parent et al.2003**).

Les voies d'entrée:

Retour annuel par restitution de la biomasse (phosphore organique).

Les travaux anthropiques tels que la fertilisation et l'intensification de l'agriculture (**Beaudin et al. 2008** in **Benaissa 2018**).

La minéralisation des roches phosphatées in situ.

Les voies de sortie: Les flux de sortie les plus importants sont :

Les exportations par les récoltes estimées à des quantités de l'ordre de 60 à 150 kg de phosphore par hectare et par an (**Parent et al. 2003**).

Le lessivage, l'érosion et le ruissellement constituent une quantité non négligeable (une centaine de grammes par hectare et par an (**Beaudin et al. 2008** in **Benaissa 2018**).

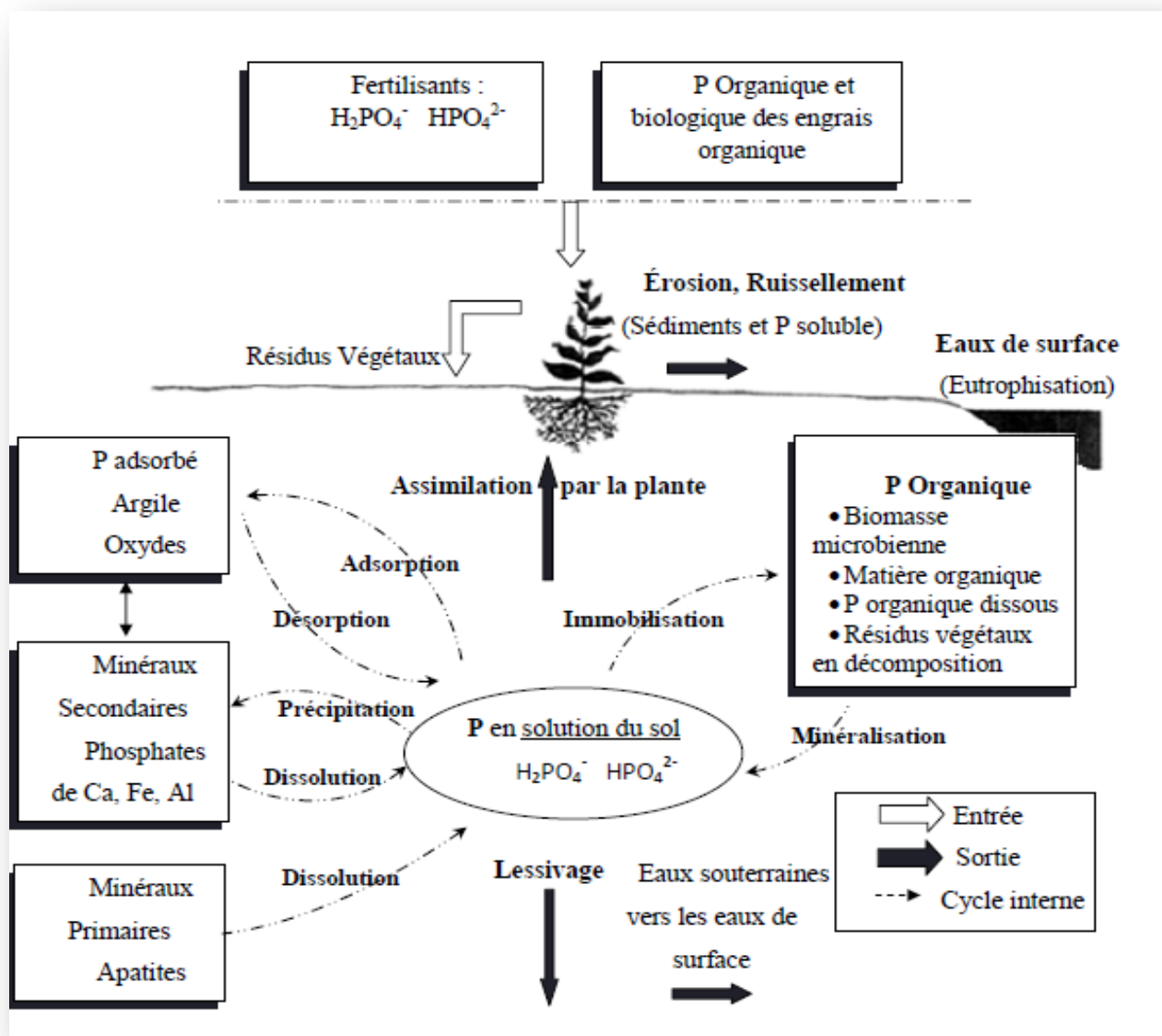


Figure n° 01: Le cycle général du phosphore d'après Demers 2008

4-Le comportement du phosphore dans le sol :

Dans le sol, une moyenne de 0,1 kg/ha de phosphore est présent sous forme ionique dans la solution du sol et la plupart des substances inorganiques phosphatées sont liées à la phase solide par des liaisons plus ou moins énergétiques ou forment un composé de sels minéraux phosphatés.

Dans l'interface de la solution solide, de nombreux processus physico-chimiques (adsorption / désorption, précipitation / dissolution) régulent la concentration des ions phosphatés dans la solution (**Morel 2002 in David 2009**).

Ce sont les transformations physico-chimiques et chimiques qui font passer le phosphore d'un état associé à la phase solide (adsorbé ou précipité) vers la phase liquide ou vice et versa.

Beaudin (2008) in Mihoub (2012), a conclu que les ions phosphatés se trouvent généralement dans les sols associés aux cations, aux oxydes métalliques ou aux hydroxydes, certains se retrouveront rapidement dans la solution du sol, d'autres passeront plus lentement de la phase solide à la solution et d'autres ne sont solubilisés qu'avec l'activité du vivant.

Selon **Fardeau (1993) in Razi (2006)**, lorsque la plante absorbe le phosphore du sol, cette solution s'appauvrit en cet élément, alors le phosphore est libéré de la phase solide à la phase liquide pour compenser cette perte.

Le déplacement passif de ces ions de la solution du sol vers les tissus racinaires des plantes s'effectue par plusieurs mécanismes ; on estime seulement 5% de phosphore absorbable est due au **flux de masse**, 2% est **intercepté** par les racines et 93% de phosphate du sol est transportée par **diffusion**.

Cependant, cette diffusion dont elle dépend la biodisponibilité du phosphore dans sol reste un processus lent ce qui explique en partie la faiblesse des teneurs en phosphore de la solution (**Smith et al. 2003 in Andrianambinina 2013**).

L'enrichissement de la solution du sol en phosphates est lié à l'équilibre qui se crée entre la phase solide et le phase liquide (effet de l'action de masse) ; l'intensité et la vitesse de déplacement de cet équilibre est lié aux quantités, aux natures des constituants minéraux et organiques des sols, à la nature et la quantité des engrais apportés et aux réactions physico-chimiques qui en découlent telles que : adsorption/désorption, fixation/libération et précipitation/dissolution (**Moujahid 2007 in Mihoub 2012**)

4.1-L'adsorption-désorption :

L'adsorption est l'accumulation nette de matériel sur une interface, généralement, il s'agit de l'interface solide-liquide. Ce type de réaction diffère de la précipitation car elle n'implique pas le développement d'une structure moléculaire tridimensionnelle (**Sposito 1989**). La molécule qui s'accumule ainsi selon arrangement bi-dimensionnel est l'adsorbat tandis que la surface solide sur laquelle elle s'adsorbe est l'adsorbant.

D'après **Barrow (1987)** in **David (2009)**, l'adsorption-désorption est un processus important qui régularise la concentration des ions phosphatés en solution. L'adsorption des ions phosphatés s'effectue par l'intermédiaire de cations sur les colloïdes argileux et humiques ou directement sur des ions calcium et des oxyhydroxydes métalliques grâce à des réactions d'échanges de ligands (réactions spécifiques mettant en jeu des liaisons covalentes) ou par des liaisons de plus faible énergie (**Barrow 1983** in **Mathias 1989**).

L'adsorption des ions phosphatés sur les constituants de la phase solide du sol peut être divisée en deux étapes :

A/ : La réaction initiale et rapide d'adsorption du phosphate sur les surfaces de charges variables ; les phosphates présents dans la solution sont chargés négativement et peuvent donc être adsorbés sur des surfaces chargées positivement, comme les oxy-hydroxydes de métal ou les argiles (**Gérard 2016** in **Cecile 2017**).

B/ : La lente diffusion de l'état solide selon un gradient électrochimique, de nature endothermique à l'intérieur des particules adsorbants (**Barrow 2015** in **Cecile 2017**).

La désorption du phosphate intervient par échange de ligands, elle a lieu du fait, soit d'un abaissement de la concentration en ions phosphatés en solution, soit d'une augmentation de la concentration en anions compétiteurs tels que l'oxalate ou le citrate (**Hinsinger 2001**).

Il est important de noter que la quantité des phosphates déplacée peut différer de la quantité des phosphates absorbée par les plantes en même temps (**Barrow et al. 2014** in **Cecile 2017**).

Les sols avec des concentrations plus élevées d'oxydes de fer et d'aluminium et ou de forte teneur en argile ont une capacité d'adsorption plus élevée pour le phosphore par rapport aux sols des teneurs relativement faibles et a texture grossière (**Rishi et al. 2019**).

Les principaux groupements fonctionnels impliqués dans l'adsorption spécifique des sols appartiennent à des molécules organiques (substances humiques) (**Tableau n° 04**).

Tableau n°04 : Les principaux groupements fonctionnels impliqués dans l'adsorption des phosphates d'après Hugues 1999

Groupements réactifs de surface		Réactions des groupements OH	
Nom des groupements	Formule structurale		
Carboxyle	—COOH	Acide base	
Carbonyl	—CO—	$S-OH + H^+ \rightleftharpoons S-OH^{2+}$	
Amine	—NH ₂	$S-OH + OH^- \rightleftharpoons S-O^- + H_2O$	
Imidazole	Noyau Aromatique—OH	Adsorption de cations métalliques M ^{Z+}	
Phénolique	Noyau Aromatique—NH	$S-OH + M^{Z+} \rightleftharpoons S-OM^{(Z-1)+} + H^+$	
Alcool ou Hydroxyle	—OH	$2S-OH + M^{Z+} \rightleftharpoons (S-O)_2M^{(Z-2)+} + 2 H^+$	
Sulphydryl	—SH	$S-OH + M^{Z+} + H_2O \rightleftharpoons S-OM^{(Z-2)+} + 2 H^+$	
		Echange de ligands L-	
		$S-OH + L^- \rightleftharpoons S-L + OH^-$	
		$2S-OH + L^- \rightleftharpoons S_2-L^+ + OH^-$	

4.2-La précipitation-dissolution :

Ce phénomène dépend principalement de la nature des ions en présence et de leurs concentrations dans la solution du sol (force ionique totale et activité des ions). Les modifications de la composition de la phase liquide du sol, par exemple lors d'un apport d'engrais, sont déterminantes pour cet équilibre.

La précipitation du phosphore avec un cation est observée lorsque les concentrations en phosphate et en cations sont suffisamment élevées (lorsque le produit de solubilité du minéral est atteint), elle entraîne une diminution de la concentration de phosphore assimilable en solution avec la formation d'un solide (**Frossard et al. 2004 in Mihoub 2012**). Ces ions peuvent se combiner avec de nombreux cations principalement avec Fe, Al, et Ca pour former des sels phosphatés (**Lindsay et al. 1989 in Kati 2012**).

La dissolution des sels phosphatés requiert une source de protons, ceux-ci peuvent provenir du sol, à partir de substrats acides, mais ils sont aussi émis dans le sol par les racines qui compensent ainsi l'excès de cations (K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , NH_4^+) prélevés de la solution du sol, ce mécanisme est décrit comme la « pompe à protons » des racines (**Gobat et al. 1998 in Zemoura 2005**).

En sol calcaire, la dissolution des composés phosphatés est liée à la pression partielle de CO_2 qui se trouve dans la solution du sol, par contre en sols acides, elle est liée aux teneurs en fer et en aluminium d'origine de la goethite, de l'hématite et de la gypsite.

La dissolution peut aussi être favorisée par l'activité enzymatique des micro-organismes du sol particulièrement la phosphatase.

4.3-Les activités biologiques :

Les activités biologiques ont un rôle primordial dans le cycle et la disponibilité du phosphore en jouant un double rôle d'immobilisation et de solubilisation (**Frossard et al. 1993 in Richardson et al. 2009**).

L'immobilisation des ions phosphatés prélevés par les microorganismes du sol et les végétaux constituent une voie de réduction de la perte de phosphore contre la précipitation et le lessivage d'une part (**Anderson 1980 in David 2009**), et d'autre part ces derniers qui forment le rhizoplan (interaction racine micro-organisme) excrètent des ions H^+ et des acides organiques et certaines enzymes particulièrement la phosphatase qui permettent par acidification, chélation, ou réduction, l'augmentation de la désorption du phosphate adsorbé sur les particules du sol.

Certains auteurs pensent que la production de phosphatases par les plantes ou les micro-organismes constitue une alternative pour la mobilisation du phosphore organique, lorsque les apports en phosphore inorganique limitent la croissance des plantes (**Lydie 1997**).

5-Les facteurs affectant la disponibilité du phosphore dans le sol :

5.1-L'acidité de sol:

Le taux de phosphore soluble semble être en relation avec le pH du sol ; l'acidité du sol a un effet sur la qualité et la quantité des ions phosphatés présents dans la solution du sol, en effet les formes les plus solubles et les plus assimilables du phosphore sont $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ et HPO_4^{-2} qui ne sont présentes qu'aux pH proches de la neutralité (Hopkins 2003 in Mihoub 2012) (Fig.n° 02).

Marschner et al. (2005) in Soma (2010), notent que l'assimilation du phosphore est maximale dans les sols neutres et qui se réduit dans les sols acides et les sols alcalins.

Les réactions réduisant la disponibilité du phosphore se produisent à toutes les valeurs de pH mais sont plus prononcées dans les sols alcalins ayant un pH >8 et dans les sols acides ayant un pH <5,5 (Busman et al. 2002 in Demers 2008).

Pour Lindsay (1979) in Demers (2008), la solubilité des minéraux phosphatés est maximale entre les pH de 6,2 et de 7,0 ce qui donne un maximum de disponibilité du phosphore pour les végétaux, cependant quand le pH est inférieur à 6, la disponibilité de phosphore bénéfique pour les plantes est limitée (Michel 2005 in Mihoub 2012).

Selon Bennai et al. (2007) in Mihoub (2012), dans les sols à pH alcalin, le phosphore labile est indisponible, il faut donc l'apporter sous forme soluble.

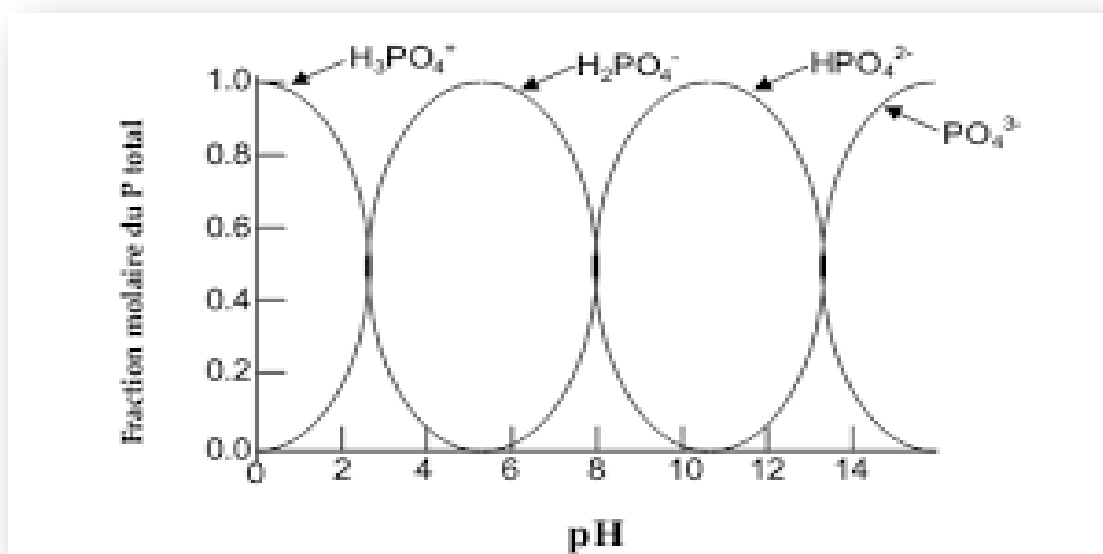


Figure n° 02: La distribution des différentes formes solubles du phosphore en fonction du pH (Soltner 1990)

5.2-La matière organique :

La matière organique et leurs composés ont une influence sur la disponibilité et les formes du phosphore dans le sol.

Selon **Fardeau et al. (1993)** in **Kati (2012)**, dans les sols cultivés, il existe une relation entre les teneurs en matière organique, azote organique et le phosphore organique avec une proportionnalité C/N/P de 100/10/1. L'influence des composés organiques sur le comportement des phosphates est fortement démontrée et la littérature sur cet aspect est abondante mais parfois se contrevient.

Damodar et al. (1999) in **Daoui (2007)**, ont constaté que l'ajout de phosphore et de fumier améliore la richesse en phosphore disponible pour le blé et le soja. **Jacquin et al. (1983)** in **Zemoura (2005)**, en utilisant diverses sources de matière organique (fumier et compost mûr) ont montré que les pailles et les substrats riches en glucose entraînent une légère augmentation de la forme organique du phosphore dans le sol.

Selon **Lapez Hernandez (1979)** in **Mathias (1989)**, les anions organiques (oxalate, citrate, tartrate, malate), en complexant le fer, l'aluminium et le calcium, peuvent libérer les ions phosphatés liés à ces cations ou empêcher la formation de phosphates de fer et d'aluminium (**Earl et al. 1979** in **Mathias 1989**).

Les complexes Fe-P ou Al-P sont dégradés en raison de la compétition des acides organiques produite grâce à l'activité des microorganismes et par la minéralisation de la matière organique (**Demers 2008**).

En combinant l'humus et le phosphore, ce complexe protège les ions phosphoriques d'une fixation plus ou moins irréversible dans le sol et les conserve sous une forme facilement récupérable par les plantes tout en empêchant la transformation du phosphate dicalcique en phosphate octacalcique (**Schaeffer 1976** in **Kati 2012**).

Pour d'autres auteurs, la matière organique peut inhiber l'assimilation des phosphates ; dans une expérience sur différents types de sols marocains, **Sqalli (1973)** a constaté que la teneur en phosphore total dans le sol augmente avec l'augmentation de la teneur en matière organique mais dans des proportions variables selon le type de sol.

Dans une expérience de **Laboski et al. (2004)**, cette différence de résultats selon le type de sol est attribuée à l'histoire de la parcelle d'où le sol a été prélevé, en fait, certains sols qui ont été déjà utilisés ont bénéficié de l'apport de fumier, ce qui aurait caché ses réponses à un apport supplémentaire.

Laboski et al. (2004) in **Daoui (2007)**, ont constaté que le fumier réduit l'absorption du phosphore fourni ; la matière organique forme des complexes stables avec les cations métalliques du sol : Fe, Al et dans une moindre mesure Ca, appelés complexes organométalliques à aspect colloïdal type HA-Metal-PO₄ sont très réactifs à l'égard des groupements phosphatés (**Gerke et al. 1992** in **Kati 2012**).

Lorsque le phosphore d'un sol semble lié à la matière organique, il y a souvent une excellente corrélation entre le pouvoir fixateur de celle-ci et sa concentration en Al ou Fe (**Martin et Reeve 1957** in **Hugues 1999**).

Ainsi, **Bloom (1981)** in **Zemoura (2005)** indique que la rétention des phosphates dans les sols acides riches en matière organique est le fait de complexes organométalliques alumineux.

Geelhoed et al. (1998) in **Benaissa (2018)**, montrent que le phosphate adsorbé est moins facilement déplacé par un apport de citrate, de même, **Negrin et al. (1996)** in **Zemoura (2005)** ont découvert, dans des andosols du Canaries, que la désorption de phosphore était en partie contrôlée par la formation de complexes solubles Al-P-acide fulvique.

5.3-Le calcaire :

L'efficacité des engrais phosphatés apportés à un sol calcaire est limitée suite aux phénomènes de fixation et d'accumulation d'ions phosphatés dans le sol induisant une perte de solubilité qui peut atteindre 30% des apports d'engrais phosphatés (**Morel 1996** in **Kati 2012**).

Pour connaître la dynamique de cet élément dans ces types de sols, il faut connaître les formes chimiques du phosphore et leurs interactions (**Halajnia et al. 2009** in **Mihoub 2012**).

Le calcaire dans le sol agit par son pH qui influe à son tour sur l'assimilation du phosphore, et la connaissance du teneur en calcaire tellurique permet d'évaluer le pouvoir fixateur du support sol vis-à-vis des ions phosphoriques et de prévoir le devenir de ces derniers.

Dans les sols calcaires, riches en Ca^{2+} , la forme dominante du phosphore est celle du P-Ca (phosphate lié au calcium) (**Mckenzie et al. 2003** in **Mihoub 2012**), caractérisée par une faible labilité (**Gachon, 1988**) et qui est de l'ordre de 2,7 % (**Prafitt et al. 1977** in **Zemoura 2005**).

Les surfaces de carbonates de calcium favorisent la nucléation et la croissance de phosphate de calcium au lieu de l'adsorption.

Syers et al. (1989) in **Hugues (1999)**, ont montré ce phénomène par l'étude d'une surface de calcite au microscope électronique à balayage et par diffraction des rayons X. Ils ont mis en évidence la nucléation de monocalcium-phosphate ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) puis en dicalcium-phosphate dihydrate DCPD, $\text{Ca}(\text{HPO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ avant de perdre son eau pour donner le dicalcium-phosphate ($\text{Ca}_2(\text{HPO}_4)_2$) qui se transforme avec le temps en apatite tricalcique faiblement soluble ($(\text{Ca}^{+2})_3(\text{HCO}_3)_3(\text{PO}_4^{-3})$) (produit de solubilité est de $10^{-28.36}$) et qui peut même évoluer lentement en octocalcium phosphate, $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{HPO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ insoluble (**Salingar et al. 1994** in **Hugues 1999**).

Le temps joue un rôle majeur dans la formation de dépôts de Ca-P dans le sol, **Sharply et al. (1984)** ont montré que le phosphore même apporté soluble devient moins disponible pour la plante au fil du temps dans les sols riches en calcium.

De même la variation du cortège cationique qui se trouve dans le sol influe sur la nature et le type de précipitation des phosphates, en effet, **Samadi et al. (1998)** in **Benaissa (2018)** ont montré que

le phosphore des engrais se répartissait entre les oxydes d'aluminium (27 %) et de fer (12 %) et formaient du dicalcium phosphate (25%) de l'octocalcium phosphate (24%) ainsi que de l'hydroxyapatite (12 %).

5.4-Le fer et l'aluminium :

Dans les sols acides les hydroxydes de fer et d'aluminium sont les facteurs impliqués dans les voies de fixation de phosphore (**Parent et al. 2003**).

D'après **Dapin (1970)**, le phosphate d'alumine et de fer à aspect colloïdal est moyennement absorbé à pH acide et son assimilation par les plantes n'est améliorée qu'après chaulage.

Selon **Raharinosy (1979)**, lorsque les phosphates solubles se lient au fer, son degré de labilité se réduit de 8%. L'adsorption sur les oxydes d'aluminium (gibbsite) est expliquée par des phénomènes similaires : la formation de complexe de phosphates et des oxydes de fer et d'alumine se traduirait par une baisse de la disponibilité en phosphore pour les racines des végétaux dans ces sols.

Prafitt et al. (1977) in **Zemoura (2005)**, ont montré par spectroscopie infrarouge que l'adsorption du phosphore sur les surfaces d'oxy(-hydro)xydes de fer et d'aluminium résultait d'une ou de deux liaisons covalentes et cette adsorption est décrite comme un échange de ligands, alors lorsque les concentrations en phosphate dans la solution dépassent 30 ppm l'adsorption est remplacée par des réactions de précipitation.

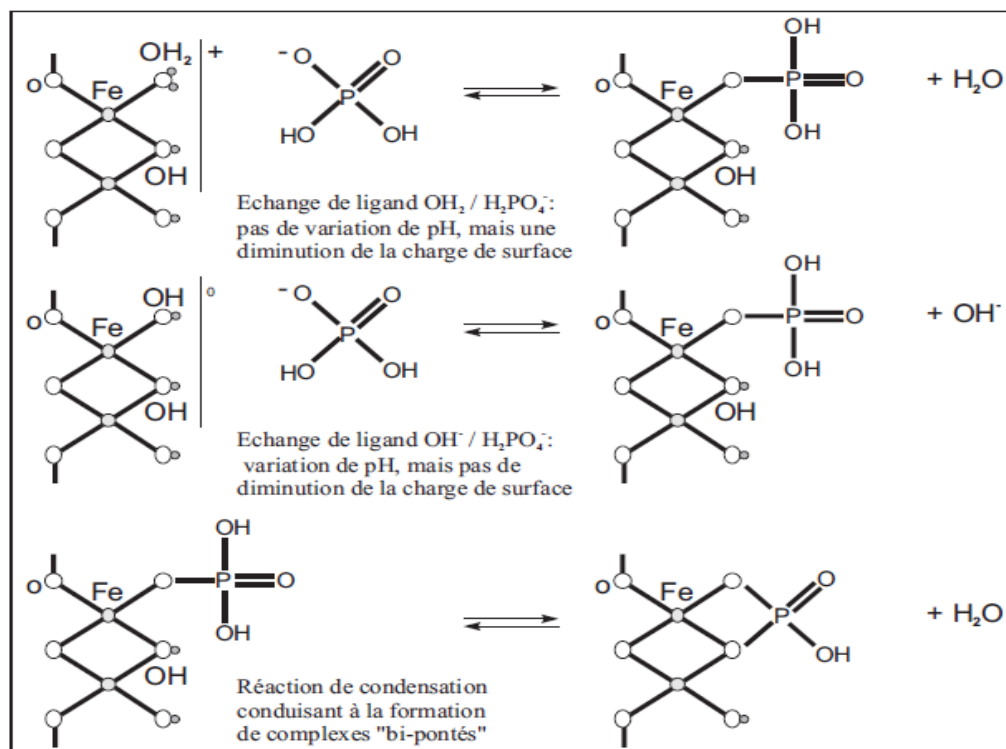


Figure n° 03 : Les mécanisme d'adsorption des ions phosphatés sur un Oxy(hydro)xyde de fer, d'après Maitre et al. (1990) in Hugues (1999).

5.5-La texture :

Les sols à texture légère répondent généralement mieux à l'application d'engrais phosphatés que les sols lourds (**Mullen 2003 in Mihoub 2012**).

Selon **O'Halloran et al. (1987) in Demers (2008)**, la proportion du phosphore sous forme inorganique, organique échangeable, labile, adsorbée sur les interfaces solides du sol ou liée aux composés de Fe et d'Al est inversement proportionnelle à la teneur en sable.

La taille des particules (l'agrégation et le mode de structure) a un effet sur la mise en disponibilité des éléments minéraux particulièrement les phosphates (**Johnson 2000 in Daoui 2007**).

Olsen et al. (1963) in Daoui (2007), estiment que l'augmentation de la teneur en argile diminue le coefficient de diffusion du phosphore à cause de l'augmentation des sites d'adsorption à la surface des particules et du pouvoir tampon.

Cette diminution de la diffusion pourra être expliquée aussi par le phénomène d'adsorption, à cet effet, l'adsorption spécifique sur les argiles peut se faire par échange de ligand, uniquement sur les bords des feuillets d'argile par l'intermédiaire de cations polyvalents (**Morel 1996 in Hugues 1999**).

Kodama et al. (1975) in Zemoura (2005) ont, par ailleurs, montré que des phosphates pouvaient même être incorporés entre des feuillets de montmorillonite sous forme de phosphates d'aluminium hydratés ; ces modes d'adsorption semblent relativement mineurs comparativement à l'adsorption sur les oxy(-hydro)xydes de fer ou d'aluminium (**Mc Laughlin et al. 1981 in Zemoura 2005**).

Schwartz et al. (2005), ont établi que l'adsorption de phosphore était proportionnelle à la surface spécifique. En fait, dans les sols, les argiles sont généralement associées aux oxy(-hydro)xydes, ces derniers forment des revêtements pelliculaires à la surface des minéraux silicatés du sol (**Hendershot et al.1983 in Demers 2008**).

Cette pellicule confère à l'ensemble une charge de surface variable et une forte aptitude à fixer les phosphates (**Perrott et al. in Weil 2017**).

5.6-L'humidité :

Les modifications de la teneur en eau du sol peuvent exercer une grande influence sur les processus physiques du sol, influençant la disponibilité des éléments nutritifs pour les végétaux.

L'acheminement du phosphate dans le sol est fonction de la diffusion, puisque la fourniture de phosphore via le flux massique ne couvre pas la demande en ce dernier. Le coefficient de diffusion est en fonction de la teneur en humidité, ce qui signifie que la diffusion et l'absorption se corroborent avec la teneur en humidité du sol. La diffusion est tout particulièrement réduite au-dessous d'une teneur en humidité de 10-15 % (**Simône 2010**).

La dissolution du phosphore des engrais et de tous les composés amorphes et minéraux de phosphore dans le sol dépend de l'eau du sol ; l'eau affecte les réactions du sol en régissant la

diffusion du phosphore dans la solution du sol et finalement la disponibilité du phosphore pour la croissance relative des racines (augmentation relative de l'interception racinaire) (**Barker et al. 2007**).

Ainsi **Hanway et al. (1980)** in **Barker (2007)**, ont remarqué qu'en période sèche, les systèmes de production non irrigués manifestent les déficiences plus marquées en phosphore.

Mullen (2003) in **Mihoub (2012)**, a considéré que la gestion de l'humidité du sol influence d'une grande part sur la réponse profitable de la plante vis-à-vis les engrais phosphatés ; il ajoute que les racines de céréale peuvent arriver à des profondeurs d'un mètre ou de plus pour accéder à l'humidité et les éléments nutritifs, particulièrement azote : quand l'humidité du sol est basse, le phosphore devient moins accessible.

5.7-La température du sol :

Les changements de température affectent plusieurs types de mécanismes impliqués dans le prélèvement des éléments nutritifs par les plantes (**Gagnon et al. 2002**).

La température du sol affecte les réactions qui régissent la dissolution, l'adsorption et la diffusion du phosphore et affecte également le potentiel de prélèvement du phosphore par les racines (**Barker et al. 2007**).

Elle influence aussi la croissance racinaire (**Ching et al. 1979** in **Gagnon et al. 2002**) et la diffusion du phosphore dans le sol (**Mackay et al. 1984** in **Gagnon et al. 2002**).

5.8-L'effet de la rhizosphère:

Les sols contiennent des acides organiques de bas poids moléculaire qui ont un ou plusieurs groupements fonctionnels majoritairement anioniques et parfois chélatants tels que les citrates, oxalates, acétates acide fulvique, humique.... Ces acides organiques sont libérés par les exsudats racinaires des plantes et les micro-organismes; ils peuvent également être des produits de la dégradation de molécules organiques complexes (**Jones et al. 2003**).

L'adsorption de ces acides organiques sur la matrice solide (argile et oxyhydroxy de fer et d'aluminium) par effet de compétitivité peuvent libérer les phosphates adsorbées sur cette matrice, comme ils peuvent complexer les cations de liaison, colmatent les sites actifs du complexe adsorbant empêchant ainsi une nouvelle adsorption des phosphates et par conséquent libérer et augmenter la biodisponibilité du phosphate dans le sol (**Ström et al. 2002** in **Daoui 2007**).

Ces réactions sont catalysées par la présence de différents enzymes libérés dans le sol par les micro-organismes et les exsudats racinaires, qui participent à la formation et à la dégradation des molécules et contribuer au cycle du phosphore particulièrement la phosphatase.

La phosphatase est un nom général utilisé pour décrire un large groupe d'enzymes extracellulaires qui catalysent l'hydrolyse des liaisons ester phosphate et des liaisons anhydrides. Ces enzymes jouent un rôle fondamental dans le cycle du phosphore, permettant à l'ortho-phosphate d'être

libéré des composés organiques et inorganiques, augmentant ainsi ses teneurs dans le sol (**Rao et al. 2000**).

Dans le sol, un grand nombre d'enzymes type phosphatase ont été identifiées et étudiés par de nombreux auteurs tels que les phytases, les phosphatases acides et alcalines, la phospholipase et la pyrophosphatase (**Pandey et al. 2001 in Zemoura 2005**).

CHAPITRE 2

LE PHOSPHORE ET LE DEVELOPPEMENT DE

L'AGRICULTURE

Introduction :

Le phosphore est un nutriment majeur essentiel à la vie des végétaux, il forme entre 0,2 à 0,5 % du poids sec d'une plante (**Daniel et al. 1988 in Benaissa 2018**).

Le phosphore se trouve dans tous les tissus de la plante avec une concentration qui varie selon la partie et la phase de la croissance du végétal, il est impliqué dans de nombreux processus : physiques, chimiques, biologiques et enzymatiques.

Le phosphore est un composant essentiel : des acides nucléiques (ADN, ARN), qui transportent des informations génétiques, des molécules responsables du transfert d'énergie biochimique (AMP, ADP, ATP), des phospholipides, qui composent les membranes cellulaires, il se concentre dans les organes reproducteurs de la plante en accélérant la croissance des bourgeons et des racines et il agit également comme un stimulant dans le stockage des glucides.

1-L'absorption du phosphore par la plante:

Les plantes absorbent le phosphore sous forme des ions H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} selon le pH, les mono phosphatés sont la principale forme absorbée par les plantes.

Au début de la croissance végétale, l'absorption du phosphore est très rapide mais elle diminue à peu près vers la fin de la période de croissance (**Gachon 1983**).

Les exigences des cultures en phosphore varient non seulement d'une espèce à une autre mais aussi en fonction des conditions pédoclimatiques ; à titre d'exemple, les besoins des grandes cultures varient de 0,5 et 0,75 Kg de P_2O_5 par quintal de matière sèche totale produite à la fin du cycle et les demandes quotidiennes peuvent atteindre des débits de 1 Kg de P_2O_5 par hectare pendant les pics de la phase de croissance de la plante (**Gachon 1983**).

Selon **Hernando (1977)**, la vitesse de l'absorption du phosphore chez les plantes très jeunes est plus élevée que celle libérée par le sol (**Gerke et al. 1992 in Kati 2012**) ; pour cela (**Chaminade 1946 Cité Par Duthil, 1976 in Kati 2012**), propose lors de la fertilisation phosphatée des sols a pH supérieur à 7 d'apporter de la matière organique afin d'aider le système racinaire à absorber facilement le phosphore type humo phosphaté d'origine organique pour compenser le déficit due particulièrement à cette faible diffusion .

1.1-La carence et l'excès en phosphore chez les végétaux:

Les faibles teneurs en phosphore dans le pédosphère entraînent généralement un retard de croissance des plantes cultivées et une faible production en biomasse (**Gervy 1970 in Mihoub 2012**).

Les symptômes de la carence en phosphore peuvent se présenter sous deux états :

A l'état bénin, ils se manifestent par un déclin général de la croissance; la plante est plus mince, les pétioles s'allongent, les nervures sont plus prononcées, les feuilles se dressent.

Par contre à l'état aigu, les feuilles se jaunissent et qui se virent en brun rougeâtre avec le temps (Elaloui 2007 in Benaissa 2018).

D'après Diehil (1974) in Benaissa (2018), en général, l'excès de phosphore n'a pas d'effet négatif sur la culture. Elaloui (2007) in Benaissa (2018) démontre que les symptômes de l'excès de phosphore ne sont que rarement perceptibles, et qui se manifestent par une croissance limitée et un jaunissement général de la feuille.

2-La fertilisation phosphatée:

La production agricole reste tributaire au degré de la fertilité des sols, cette dernière est régie par la présence des éléments nutritifs dans la pédosphère ; donc la fertilisation reste nécessaire non seulement pour augmenter le contenu en éléments nutritifs dans le sol mais aussi pour améliorer la biodisponibilité des éléments minéraux pour le végétal.

Le phosphore constitue l'un des éléments fertilisant le plus limitant de la production agricole et il conditionne les rendements de toutes cultures (Compaoré et al. 2001 ; Lompo 2009 in Soma 2010).

La fertilisation phosphatée consiste à apporter des engrais simples ou multiples, sous forme inorganiques ou organiques pour but d'enrichir le sol afin de maintenir le volume de sa solution à un niveau capable de fournir à la plante la quantité de cet élément dont elle a besoin (Pieri 1991 in Compaoré et al. 2001).

La gestion rationnelle de la fertilisation phosphatée en agriculture vise à éviter une carence en phosphate pour les cultures, réduit les pertes vers l'environnement (en particulier les eaux superficielles) et crée une augmentation proportionnelle avec l'évolution des rendements des cultures.

Cependant, la fertilisation phosphatée a toujours posé des problèmes importants à cause de la forte réactivité des ces ions phosphatés avec les différents colloïdes du sol ; pour cela, il est recommandé d'apporter cet élément comme engrais de fond et proche au chevelu racinaire pour améliorer son efficacité.

2.1-Les différents types d'engrais phosphatés :

La consommation mondiale des fertilisants, par ordre décroissant, est de 60% pour les fertilisants azotés, 25% pour les fertilisants phosphatés et de 15% pour les fertilisants potassiques (MAAP 2010).

Les engrais phosphatés simples sont classés suivant leur origine, aspect, composition, solubilité et surtout les teneurs en P_2O_5 . Les principaux engrais phosphatés simples produits à l'échelle mondiale sont :

1. Phosphates naturels

- Phosphate naturel tendre contient au moins 25% de P_2O_5 .
- Phosphate naturel solubilisé contient au moins 25% de P_2O_5 .

2. Phosphate bi calcique contient au moins 38% de P_2O_5 .
3. Superphosphates
 - Le superphosphate simple issu de la réaction phosphate naturel et l'acide sulfurique contient 18% de P_2O_5 .
 - Le superphosphate concentré (25 à 35% P_2O_5), issu traitement du phosphate naturel avec l'acide sulfurique et l'acide phosphorique contient 25% - 35% de P_2O_5 .
 - Le superphosphate triple (45% P_2O_5), issu du traitement du phosphate naturel et l'acide phosphorique (45% P_2O_5) contient plus de 45% de P_2O_5 .
4. Phospal phosphate alumino-silicique contient 34% de P_2O_5 .
5. Scories Thomas contiennent au moins 12% de P_2O_5 .

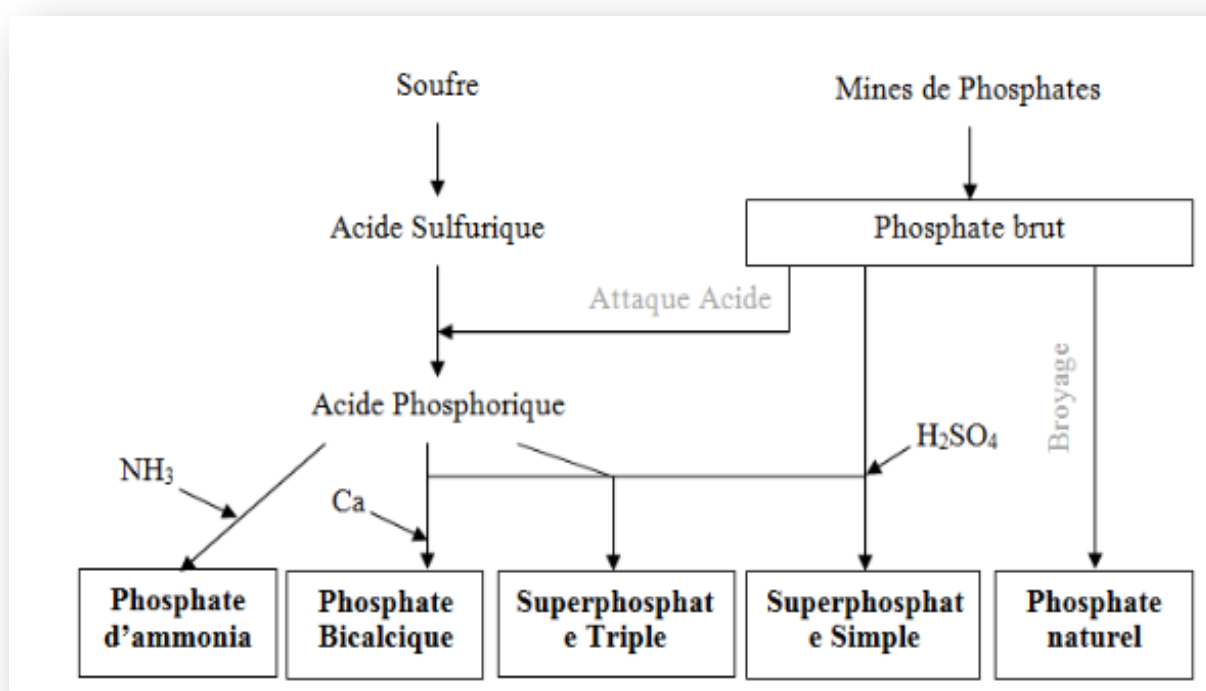


Figure n° 04 : Les principes de fabrication des fertilisants phosphatés (UNIFA, 2010 ; IFA, 2011 in Ali Makhlouf ,2015).

3-Les perspectives d'utilisations du phosphate en agriculture algérienne :

3.1-La répartition et occupation des terres :

L'Algérie s'étale sur une superficie totale de 2 381 741 km² soit plus de 238 millions d'hectares.

La superficie agricole totale couvre environ 47,2 millions d'hectares soit 20% du territoire national reparté comme suit : (MADR 2017)

Surface agricole utile est estimée à 8,2 millions d'hectares dont 15% est irriguée.

Terres forestières couvrant environ une superficie de 4,3 millions d'hectares.

Les parcours et la steppe couvrent environ 34,3 millions d'hectares.

L'occupation de la surface agricole utilisable est comme suit:

Céréales	4 millions d'hectares
Cultures maraichères	0,43 millions Ha
Cultures pérennes	0,85 millions Ha

Actuellement, la surface agricole utile est estimée à 0,2 Ha/individu, elle était 0,8 Ha/individu à l'indépendance (les colons possédaient alors 27 % de la surface agricole utile (SAU) du pays soit près de 3 millions d'hectares).

L'agriculture algérienne a contribué avec 12% PIB, avec un taux de croissance moyen est de 6,4%, mais la croissance de la population rurale est de -0,3% (**MADR 2017**).

3.2-Le contexte agro écologique :

Les grands ensembles écologiques naturellement délimités orientent les activités agricoles et les systèmes de production pratiqués. D'une manière générale on distingue cinq (05) zones agro-écologiques avec des systèmes agricoles caractéristiques (**MREE 2016**):

3.2.1-Les zones littorales :

Ces zones sont caractérisées par une agriculture intensive grâce à des conditions écologiques très favorables (la pluviométrie dépasse 600mm/an et les sols types rouges fersiallitiques). Cet espace agricole est dominé par les cultures maraichères (la plasticulture surtout) avec un apport d'engrais phosphaté dépassant 100 kg/Ha.

3.2.2-Les plaines sublittorales :

Elles constituent des zones agro-écologiques assez particulières, compte tenu du fait que les sols sont généralement lourds et brunifiés et un climat relativement favorable (pluviométrie moyenne annuelle est de 450 - 600 mm), la polyculture avec assolement reste la principale activité agricole (les cultures maraichères, les cultures fourragères, les céréales et même l'arboriculture fruitière). La dose d'engrais phosphaté appliquée reste 100kg/Ha.

3.2.3-Les plaines intérieures :

Certains hauts plateaux et les hautes plaines céréalières ont des microclimats généralement contraignants (hiver froid et pluvieux, été chaud et sec).

La pluviosité est généralement limitée (moyenne de 450 mm/an) et l'eau constitue l'élément clé des systèmes de culture mis en place. L'activité agricole est dominée par la céréaliculture et l'arboriculture fruitière rustique. Cette spéculation est pratiquée sur les vertisols et des sols peu calcaires et la dose d'engrais phosphaté pratiquée oscille aux tours de 50 kg/ha.

3.2.4-La steppe :

Cette espace constitue une zone agro-écologique particulière avec des sols à forte individualisation du calcaire. La vocation de la steppe reste l'élevage (ovin surtout).

Les cultures céréalières (principalement l'orge) n'étaient cultivées que dans les zones d'épandage des crues. Actuellement, avec la mobilisation des eaux souterraines, une relance d'arboriculture et de certaines cultures maraîchères a été observée avec une faible fertilisation et souvent aléatoire.

3.2.5-Le système de cultures oasisien :

Cet agro système est basé sur les cultures en étage. Il est très intensif (palmier, arboriculture fruitière, maraîchage, céréales, fourrages). Les surfaces sont réduites et l'eau et le sel (salinisation des sols) constituent les facteurs limitants de la production.

Pour toute la zone saharienne, depuis les années 1980, deux éléments se sont développés: la culture maraîchère et la céréaliculture sous pivot, ces deux spéculations ont pris une importance particulière grâce à la texture sableuse des sols et à la disponibilité en eau. La dose d'engrais appliquée dépasse largement celle apportée aux autres régions agricoles.

3.3-Les besoins en engrais :

Selon **Benfreha et al. (1988)** in **Brahimi (1991)**, la majeure partie des sols algériens souffre d'un manque de phosphore (parfois une carence induite), ce qui contribue d'avantage à limiter une production agricole déjà insuffisante pour satisfaire les besoins nutritionnels d'une population en pleine croissance démographique.

Malgré le soutien octroyé par l'état et les efforts d'intensification, les pourcentages des terres fertilisées restent faibles, stables et au dessous des espérances. A titre d'exemple, environ seulement un quart des exploitations céréalières utilisent des engrais et/ou du fumier (**INVA-ITCMI 2014**).

L'utilisation des engrais semble donc être stable à 50 unités nutritives par hectare, mais elle est toujours inférieure aux normes d'intensification des cultures et d'amélioration de la productivité.

Les pourcentages de terres fertilisées ne montrent pratiquement que peu de changement pour l'élément phosphore, par contre, la consommation montre une utilisation meilleure au niveau de l'azote (**MADR 2017**).

Au cours de la dernière décade et suite à une intensification des cultures maraîchères (plasticulture et culture hors saisons) et surtout de la pomme de terre et de la tomate industrielle, l'utilisation de la potasse dépasse légèrement celle du phosphore mais elle reste toujours dominée par l'azote (**MADR 2017**).

Cette situation est due probablement de par l'effet instantané et remarquable de l'azote sur la céréaliculture et dont l'impact sur la culture est mesurable (visible sur les plantations annuelles), à l'inverse des autres engrais dont l'effet n'est pas assez apparent. Pour cela, un effort de vulgarisation

est à faire dans ce sens pour mettre en exergue la synergie et la complémentarité des engrais et aussi par l'introduction de nouveaux itinéraires techniques adaptés à chaque type d'agro écosystème pour améliorer l'efficacité des engrais phosphatés surtout .

En Algérie, la dose pratiquée en fertilisation phosphatée est variable en fonction des conditions écologiques (**Tableau n°05**) ces valeurs restent au dessous de celles recommandées par les instituts techniques qui préconisent 2-4q/Ha, 2-6q/Ha et 2q/Ha respectivement pour l'arboriculture, la culture maraichère et la céréaliculture (**ITAFV 2016**).

Tableau n° 05 : Les doses pratiquées de phosphore P₂O₅ (Kg/Ha) en fonction de la pluviosité

Pluviométrie (mm)	-400	400-600	+600
Spéculation			
Jachère	46	92	/
Fourrage	46	92	92
Légume sec	/	92	92
Pomme de terre	/	46	92
Céréale	46	46	92

Actuellement, l'Algérie possède d'importants gisements de phosphate principalement à Djebel Onk (Tébessa) à partir desquels des engrais phosphatés sont synthétisés par ASMIDAL; cette ressource est estimée à 2 milliards de tonnes avec une production est de 1,5million de tonnes par an dont 800.000 de tonne sous forme d'engrais phosphatés (**ASMIDAL 2016**).

Dans le but de couvrir les besoins agricoles et la possibilité d'accès aux marchés internationaux l'Algérie fixe un objectif de production de 12 million de tonnes par an vers l'année 2025 (Accord SONATRACH- Chinois Citic) (**Africa Business Intelligence 2020**).

Malgré cette richesse et ce potentiel productif, l'utilisation des engrais phosphatés en Algérie semble être stable et l'agriculture algérienne ne consomme que 150.000 tonnes par an d'éléments fertilisants phosphatés alors que, l'estimation de la consommation devrait être au moins de 850.000 tonnes par an pour une meilleure productivité (**FAO 2015, ASMIDAL 2016**).

3.4-Les causes qui limitent l'utilisation des engrais phosphates dans les sols algériens :

En Algérie, la superficie agricole utile couvre 8,2 millions d'hectares, dont environ 880 000 hectares de terres non productives, réparties sur de petites exploitations agricoles (50% des exploitations ont moins de 50 hectares (**MADR 2011**), généralement isolées, qui utilisent très rarement des engrais, une couverture pédologique dominée par les sols calcimagnésiques, sesquioxides, et pauvres en matière organique ce qui limitent l'efficacité de l'utilisation des engrais

et réduisent l'absorption du phosphore par les plantes (Blocage de l'assimilation du phosphate peut atteindre jusqu'au 60%). (INSID 2009)

Parmi les causes de cette absence d'efficacité on peut citer :

- L'absence de données scientifiques concernant la fertilité des sols permettant d'établir des formules de fertilisants adaptées pour chaque agro écosystème ou même à l'échelle de l'exploitation.
- Les techniques d'incorporation des fertilisants sont parfois inadaptées au milieu et aux exigences de la culture, conduisant ainsi à une déperdition des éléments phosphatés.
- L'indisponibilité d'engrais facilitant l'établissement d'une fertilisation rationnelle, les apports sont effectués soit par défaut, soit par excès, en raison de l'existence sur le marché d'une gamme assez réduite d'engrais minéraux.
- L'inadaptation de l'appareil de vulgarisation en vue de faire prendre conscience aux agriculteurs des insuffisances que recèle la fertilisation telle que pratiquée actuellement en Algérie et proposer des solutions techniques en fonction de la particularité des situations : événements climatiques, apparition de nouvelles formulations d'engrais, cultivars nouvellement introduits, cultures sous pivots...
- La nature pédologique des sols algériens accélèrent le blocage des ions phosphatés à cela s'ajoute la nature de ces humus (qualité et quantité) qui ne stimulent pas la désorption des ions phosphatés.
- La faible activité microbienne des sols algériens aussi est un handicap pour la minéralisation des complexes phosphatés.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de connaître le comportement des ions phosphatés dans la pédosphère. Le phosphore a une double origine et où la forme minérale est importante mais l'origine organique constitue aussi une contribution appréciable et même renouvelable.

Le phosphore par son importance, qui lui classe aux 5 rangs comme macroélément dans la composition de la biomasse et par son rôle dans l'économie agricole, classe les minerais phosphatés parmi les ressources le plus commercialisées dans le monde.

De point de vue agronomique, le phosphore dans le sol se présente sous deux formes :

-Une forme totale dont l'estimation ne donne qu'une imparfaite indication sur la capacité du sol à fournir le phosphore aux plantes dont elles ont besoin.

-Une autre fraction dite assimilable et dont les teneurs ne dépassent pas 30% du phosphore totale ; fraction dont elle dépend la croissance de la phytomasse terrestre cultivée ou spontanée et dont le comportement est fortement lié aux variations des paramètres pédologiques.

L'estimation de cette fraction est sujette à de nombreuses discussions liées surtout aux conditions pédologiques où la plante se développe et la capacité du système racinaire à extraire les ions phosphatés.

Le compartiment assimilable du phosphore est composé par une fraction soluble (la solution du sol) et une autre fixée sur la matrice solide du sol relativement extractible. Cette portion enrichit la fraction soluble en phosphore par une lente diffusion. Etant donné que la vitesse de l'absorption du phosphore par la plante est plus élevée que celle de la diffusion, il se crée souvent des carences phosphatées éphémères surtout durant la phase de la croissance du végétal.

Pour cela, lors de la fertilisation phosphatée, ces composés sont apportés comme engrais de fond additionnés préférentiellement aux apports organiques facilement minéralisable pour contourner cette lenteur de diffusion et éviter une carence prolongée en phosphore.

Les ions phosphatés par son caractère de ligands montrent une forte réactivité avec toutes les formes de la matrice solide des différents types de sol (calcaire, oxy-hydroxyde de fer et d'aluminium, les argiles et la matière organique) ce qui limite son efficacité et par conséquent, la dose apportée devra être toujours majorée pour satisfaire les besoins des plantes.

La solubilisation du phosphore précipité dépend de son degré et de sa nature d'intégration avec la matrice solide d'une part et d'autre part de l'activité de l'ion remplaçant. Le système racinaire et les composés organiques agissent soit par la production des protons (généralement H^+) pour contre balancer l'équilibre électrochimique entre la phase liquide et la phase solide et libérer les ions phosphatés soit par effet chélate de certains composés organiques qui complexent les cations polyvalents et libèrent le phosphore.

L'agriculture algérienne est heurtée non seulement à une instabilité structurale mais aussi à des facteurs écologiques contraignants ce qui limitent la production des terres agricoles malgré les projets de soutien octroyé par l'état.

En générale, la fertilisation phosphatée reste au dessous des objectifs espérés malgré les potentialités nationales ; cette situation est le résultat de la conjugaison des facteurs édaphiques et techniques. La richesse des sols algériens en fer, en calcaire et leur pauvreté en matière organique (qualitativement et quantitativement) rendent l'efficacité de la fertilisation phosphatée non perceptible et compromettent la productivité des terres agricoles.

Pour cela, la recherche de nouvelles techniques innovantes et peu coûteuses peuvent améliorer l'efficacité et le taux d'utilisation des engrais phosphatés tels que :

- L'utilisation d'engrais associant phosphate et ammonium pour améliorer les synergies inter éléments.
- La pulvérisation foliaire des formes d'engrais les plus solubles afin d'éviter les risques de blocage du phosphore dans le sol.
- L'utilisation des engrais en localisation près des semences.
- L'utilisation des moyens biologiques (cultures associées, bactérisation mycorisation des semences par des souches à fort pouvoir minéralisateur des composés phosphatés, augmentation du chevelu racinaire pour améliorer la surface de contact, amendements organiques).
- Amélioration de la solubilité spécifique des engrais phosphatés.
- L'utilisation directe des phosphates naturels après un simple prétraitement (broyage) peut réduire le coût économique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABS 2020:** Rapport sur les phosphates d'Algérie. Africa Business Intelligence (ABS journal).
- Admont P G., Boniface R., Jahiel M et Morel C., 1986 :** Quelques observations sur les méthodes actuelles de dosage du phosphore assimilable des sols. C.R. Académie d'Agriculture en France. 69,72p.
- Andrianambinina F V., 2013 :** Dynamique et disponibilité de l'azote et du phosphore sous association riz-haricot soumise a différentes doses croissantes de fertilisation minérale azotée et phosphatée .Ingénieur Agronome. Ecole supérieure des sciences agronomiques, Département d'Agriculture, 9-12p. Univ. Tananarive. Madagascar.
- ASMIDAL., 2016 :** La nouvelle stratégie commerciale. ASMIDAL infos, 22 (janvier) (Algérie).
- Baize D., 2000 :** Guide des analyses en pédologie. 2^{ème} Ed revue et augmentée. INRA. 243p.
- Barker A V., Pilbeam D J., 2007:** Handbook of plant nutrition. Books in soils, plants, and the environment. 1st Edition, Kindle Edition.117-662p.
- Beaudin Giroux M., Michaud A et Beudet P., 2008 :** Les sources, formes et la gestion du phosphore en milieu agricole. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire. EVC 019 fiche technique n°2. 16p. Ministère de l'agriculture (France).
- Benaissa K., 2018 :** Effet du mode d'apport de la fumure phosphatée sur une culture de blé en sol calcaire. Thèse de Magister. Univ. Mohamed Khider Biskra (Algérie). Département des sciences agronomiques.6-15p.
- Boulaine J., 2006:** Histoire de la fertilisation phosphatée 1762-1914. Académie d'Agriculture de France.129-137p.
- Brahimi M., 1991 :** Contribution à l'étude de l'utilisation des phosphates naturels dans la fertilisation phosphatée d'un sol saharien, à Biskra. Mémoire Ingénieur Agronomie Univ. Ouargla (Algérie).68p.
- Cecile N., 2017 :** Phytodisiponibilité du phosphore dans les sols agricoles de la Réunion fertilisés sur le long-terme avec des résidus organiques: la dose d'apport est-elle le seul déterminant à prendre en compte. Thèse Doctorat. Univ. de la Réunion (France). Sciences agricoles. École Doctorale Sciences, Technologies et Santé.20, 26p.
- Christian S., Jacques D., Jean-Charles M., 2005 :** Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies. Ed Frances Agricole.212p.
- Compaoré E., Fardeau J C., Morel J I., Sedogo M P., 2001 :** Le phosphore biodisponible des sols: Une des clé de l'agriculture durable en Afrique de l'Ouest. Cahiers Agricultures, n°2. 81p.
- Daass M., 2006 :** Evaluation de la quantité du produit marchand à l'aide de méthodes géostatistiques dans les blocs d'exploitation du gisement de phosphate de Kef Essenoun (Algérie Orientale). Thèse de magister. Univ. Badj Mokhtar Annaba (Algérie).110p.

- Daoui K., 2007 :** Recherche de stratégies d'amélioration de l'efficacité d'utilisation du phosphore chez la fève (*Vicia faba* L.) dans les conditions d'agriculture pluviale au Maroc. Thèse Doctorat. Univ. Catholique de Louvain (Belgique). Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale.30-40p.
- Dapin B., 1958 :** Sur une méthode d'analyse du phosphore dans les sols tropicaux. O.R.S.T.O.M, Services scientifiques centraux BONDY (France). 99-105p.
- Dapin B., 1970 :** Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. Cot. Fib. Trop.12. (3).3p.
- David A. 2009 :** Biodisponibilité du phosphore dans les sols landais pour les peuplements forestiers de pin maritime. Thèse Doctorat. Univ. Bordeaux (France)1. 37,38p.
- Demers I., 2008 :** Formes et disponibilité du phosphore de composts utilisés comme amendements de sols agricoles. Grade de maître es sciences (M. Se.). Univ. Laval Québec (Canada), Département des sols et de génie agroalimentaire.13,17-21p.
- El Haddi H., 2014 :** Les silicifications de la série phosphatée des Ouled Abdoun (Maroc) Sédimentologie, Minéralogie, Géochimie et Contexte Génétique, thèse de Doctorat Univ. Hassan II de Casablanca.(Maroc)16-17p
- Emich G D., 1984:** Phosphate Rock Ind. Miner. Rocks 2, 1017–1047 Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Département des sols et de génie agroalimentaire (Canada). 17-19p.
- FAO 2005 :** Utilisation des engrais par culture en Algérie. Service de la gestion des terres et de la nutrition des plantes. Division de la mise en valeur des terres et des eaux, 1^{re} édition. FAO Rome 2005. 43p.
- Fisher A. G., Jerome, D., 1973:** Geochemistry of minerals containing phosphorus. in Environmental Phosphorus Handbook, John Wiley and Sons. New York, London, Sydney. Toronto.141p.
- Gachon L., 1977 :** Utilité d'un bon niveau de réserves phosphatées du sol. Phosphore et agriculture n° 70. 27- 33p.
- Gachon L., 1983 :** Utilité d'un bon niveau de réserves phosphatées du sol. Phosphore et agriculture n° 70. 27- 33p.
- Gachon L., Tribo E., 1988 :** Etude des relations sol-plante dans l'alimentation phosphatée des cultures. Cahiers de l'agriculture. N°2 pp: 205-215.
- Gagnon E., Beaulieu R., 2002 :** Utilisation du phosphore dans les engrais de démarrage. Min. env. S.A.A.A.C. Quebec (Canada). 26p.
- Gervy R., 1970 :** Les phosphates et l'agriculture. Edition DUNOD. Paris. 297p.
- Hafidi M., Kaemmerer M., Badri W. et J.c. Revel., 1994 :** Comparaison des méthodes d'extraction chimique et biologique pour la détermination du phosphore assimilable. Science du sol 6: 440-448p.

- Hernando V., 1977 :** Problème du phosphore dans les sols calcaires espagnols. Phosphore et agriculture n° 70. 53- 69p.
- Hinsinger P., 2001:** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root induced chemical changes: a review. *Plant Soil* 237, 173–195p.
- Hugues V B., 1999 :** Devenir du phosphore apporté sur les sols et risques de contamination des eaux de surface .Cas des boues de stations d'épuration .Thèse doctorat. Univ. Rennes (France) 1.30-35p.
- INSID., 2009 :** Note de synthèse sur les actions réalisées par l'INSID dans le cadre de la fertilisation. Institut national des sols de l'irrigation et du drainage (Algérie).2-9p.
- Jasinski S M., 2007 :** Phosphate Rock. Mineral Yearbook. US Geological Survey. 120p.
- Jones D L.,2003 :** Orgnic acids in the rhizosphere a critical review. *Plant and Soil* 205: 25-44p.
- Kati Y., 2012 :** Contribution à la maitrise de la fertilisation phosphatée des sols de montagne : cas des sols de Vergers de pommiers d'Ichemoul (aures-Algérie). Thèse de Magister en Sciences Agronomiques. Univ. El Hadj Lakhdar Batna (Algérie). 7-15p.
- Laboski C A M., Lamb J A., 2004:** Impact of manure application on soil phosphorus sorption characteristics and subsequent water quality implications. *Soil Science* 9: 440-448p.
- Lydie C., 1997 :** Les formes du phosphore de sols ferrallitiques sous végétation naturelle de cerrados et sous pâturages (Brésil). Thèse de doctorat. Univ. Paris 6 (France), Sciences de la terre (pédologie).23p.
- MADR 2011 :** La Politique de Renouveau Agricole et Rural. Rapport d'étapes analytiques 2008-11 et perspectives à 2014. Alger.83p.
- MADR 2017 :** Base de données – Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Informations - www.minagri.dz
- Makhlouf A., 2015 :** Analyse entrée-sortie des déchets : analyse de cycle de vie des fertilisants produits en Algérie. Thèse de doctorat. Univ. Madji Mokhtar-Annaba (Algérie), Faculté des sciences de la terre, Département des mines. 19-23p.
- Mathias S., 1989 :** Biodisponibilité du phosphore dans un vertisol soumis à deux systèmes de culture différents (Martinique). Thèse Univ.de Nancy 1 (France) 48p.
- Mihoub A., 2012:** Dynamique du phosphore dans le système sol-plante en conditions pédoclimatiques sahariennes. Thèse de Magister . Univ. Kasdi Merbah Ouargla (Algérie). pp :3-14p
- Parent L E., Pellerin A., Khiari L., 2003 :** Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Univ. Laval Québec (Canada), Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Département des sols et de génie agroalimentaire.8p
- Pereda C., 2008 :** Contribution à l'étude des transporteurs de phosphate de la famille PHT1 chez le Peuplier (*Populus trichocarpa* Torr. & Gray) et le champignon ectomycorhizien *Laccaria bicolor*

- (Maire) P. D. Orton. Thèse Doctorat. Univ. Henri Poincaré, Nancy (France) I. U.F.R. Sciences et Techniques Biologiques, Ecole Doctorale Ressources Procédés Produits Environnement.10-12p
- Raharinosy R V ., 1979 :** Etude de la dynamique du phosphore dans quelques sols ferrallitiques des hauts plateaux de Madagascar application a des essais de fertilisation. Thèse Doctorat en pédologie et aménagement des sols. Univ. Pierre et Marie curie. Paris-6- (France) 116p.
- Rao M., Barrios E., Amézquita E., Friesen D K., Thomas R., Oberson A. And Singh B R., 2004:** Soil Phosphorus Dynamics, Acquisition and Cycling in Crop-Pasture-Fallow Systems in Low Fertility Tropical Soils: a Review from Latin America. ACIAR proceedings. N°114.
- Razi S., 2006 :** Etude expérimentale de l'influence du gypse sur la dynamique de phosphore dans le sol et sa cinétique d'absorption par le ray-grass. Thèse de Magister. Univ. El Hadj Lakhdar de Batna (Algérie), Faculté des sciences, Département d'agronomie.4-25p.
- Richardson A.E., Hocking P.J., Simpson R.J., George T.S., 2009:** Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus. CSIRO Publishing. Crop and Pasture Science, 60: 124-143p.
- Rishi P., 2019:** Understanding phosphorus forms and their cycling in the soil. Alabama A & M University and Auburn University (USA), ANR-2535.3p.
- Schwartz M. J., et Decroux J., 2005 :** Guide de la fertilisation raisonnée, grandes cultures et prairies. Ed. France agricole, Paris.125p.
- Sharply A N., 1985:** Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 905-911p.
- Simône R.,2010 :** Influence des arbres agroforestiers sur le sol et la strate herbacée du Sud du Sahel. Mémoire de maîtrise. Univ. Agronomique de Wageningen, Département d'Agronomie Pays-Bas.135p
- Soltner D., 1990 :** Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol. Collection Sciences et Techniques Agricoles. 18^e Edition. Le Clos Lorelle. 467p
- Smirnov V., 1982:** Géologie des minéraux utiles. Traduit en français en 1988. Edition Mir Moscou. 623 p.
- Soma D M., 2010:** Effet des apports répétés de diverses sources d'amendements organiques dans un sol ferrugineux tropical lessivé (Saria, Burkina Faso) sur la biodisponibilité du phosphore et la production du sorgho. Diplôme d'études approfondies. Univ. Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso l-6p, 23p.
- Sposito G., 1989:** The chemistry of soils. Oxford University Press, New York. 267p.
- Sqalli A., 1973 :** Détermination du phosphore isotopiquement échangeable de 4 types de sols marocains. Al Awamia, 49: 29-49p.
- Ström L., Owen A G., Godbold, D L., Jones, D L., 2002:** Organic acid mediated P mobilization in rhizosphere and uptake by maize roots. Soil Biology and Biochemistry 34: 703-710p

USGS, 2014: Phosphate rock- advance release. Mineral Yearbook. October 2014: 56.1-56.3. US Geological Survey.

Weil R. R., Brady N. C.,2017: Phosphorous and potassium. The nature and properties of soils, 15th ed.pearson, columbus,OH,USA.645-670p.

Zemoura A., 2005 : Etude comparative de quelques méthodes de dosage du phosphore assimilable des sols calcaires en région semi-aride (w.de Batna). Thèse de magister Univ. El Hadj Lakhdar Batna (Algérie). pp12-30.