

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université BLIDA 1

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Biotechnologies et Agroécologie

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Option : Eau et Environnement

Thème

**Evaluation de l'état de fertilité des sols salés en phosphore
assimilable (cas de Biskra)**

Présenté par : Rahmani Assmaa

Devant le jury

Mr AMIROUCHE. M	MCB	U. Blida 1	Examineur
Mme. DEGUI. N	MAA	U. Blida 1	Promotrice
Mme. ZEMOURI. S	MAA	U. Blida 1	Présidente

2021-2022

Remerciements

Je remercie tout particulièrement Dieu pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements à ma promotrice Mme DEGUI.N pour sa patience, ses conseils et son soutien durant ce travail.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements au Mme. ZEMOURI pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury.

Je porte toute ma gratitude à Mr. AMIROUCHE pour avoir bien voulu faire partie du Jury, aussi d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je tiens également à remercier tous les enseignants du département des sciences agronomiques de l'université de Blida.

Je remercie particulièrement ma famille qui m'a toujours accompagné et soutenu dans mes choix et ma mère a été là à chaque fois que j'en ai eu besoin.

Enfin, je tiens à exprimer mes profonds et sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement et à la réussite de ce travail.

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes parents

À mes frères,

À mes sœurs,

À toute ma famille,

À mes amis,

À tous.

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'état fertilité des sols de la région de Biskra en phosphore assimilable et déterminer les paramètres du sol qui affectent le comportement du phosphore en conditions sèches. La méthode Olsen recommandée pour les sols calcaires a été utilisée pour le dosage du phosphore.

Les résultats montrent que les sols salés de Biskra sont déficients en phosphore assimilable. La corrélation significative entre le phosphore et le calcaire total justifie son adsorption sur la surface des carbonates.

Le phosphore varie de façon irrégulière dans les sols salés ; il se précipite avec les ions résultants de la dissociation des sels solubles.

Mots clés : sol salé, calcaire, phosphore assimilable.

Summary

Evaluation of the state of the fertility of saline soils in assimilable phosphorus (Case of Biskra)

The objective of this study is to evaluate the fertility status of soils in the Biskra region in terms of assimilable phosphorus and to determine the soil parameters that affect the behavior of phosphorus under dry conditions. The Olsen method recommended for calcareous soils was used for phosphorus determination.

The results show that the saline soils of Biskra are deficient in available phosphorus. The significant correlation between phosphorus and total limestone justifies its adsorption on the surface of carbonates.

Phosphorus varies irregularly in saline soils; it precipitates with the ions resulting from the dissociation of soluble salts.

Keywords: salty soil, limestone, assimilable phosphorus.

ملخص

تقييم حالة خصوبة التربة المالحة بالفوسفور القابل للامتصاص (منطقة بسكرة)

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم حالة خصوبة التربة في منطقة بسكرة من حيث الفوسفور القابل للامتصاص وتحديد معاملات التربة التي تؤثر على سلوك الفوسفور في ظل الظروف الجافة. تم استخدام طريقة أولسن الموصى بها للتربة الجيرية لتقدير الفوسفور. بينت النتائج أن تربة بسكرة المالحة تفتقر إلى الفوسفور المتاح. يبرر الارتباط بين الفوسفور والحجر الجيري الكلي امتصاصه على سطح الكربونات. يتوزع الفوسفور بشكل غير منتظم في التربة المالحة، فهو يترسب مع الأيونات الناتجة عن تفكك الأملاح الذائبة

الكلمات المفتاحية: التربة المالحة، الحجر الجيري، الفوسفور القابل للامتصاص

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Synthèse Bibliographique

1. L'importance du phosphore dans les plantes 3

2. L'origine du phosphore dans le sol 3

2.1. Origine minéral 4

2.2. Origine organique 4

3. Formes de phosphore 4

3.1. Le phosphore total 4

3.2. Le phosphore assimilable 5

4. Les surfaces réactives vis-à-vis du phosphore 5

4.1. Le carbonate de calcium 5

4.2. Les surfaces d'oxy-hydroxydes de fer ou d'aluminium 6

4.3. Les surfaces des argiles 6

4.4. La matière organique 7

5. Le cycle du phosphore 7

6. Effets des caractéristiques du sol sur la disponibilité du phosphore 9

6.1. Pouvoir fixateur 9

6.2. Facteur physique 9

6.2.1. Température du sol 9

6.2.2. Humidité du sol 9

6.2.3. Texture 10

6.2.4. Aération et le compactage du sol 10

6.3. Facture chimiques 10

6.3.1. pH	10
6.3.2. Matière organique	11
6.3.3. Calcaire	12
6.3.4. Éléments nutritifs et sels solubles	12
6.4. Facture biologique	12
6.4.1. Effet des résidus de récolte	12
6.4.2. Action des racines	12
Le comportement de phosphore dans le sol	13
Le comportement du phosphore dans les sols gypseux	13
Comportement du phosphore dans les sols calcaires	14
Matériel et méthodes	
1. Présentation de la région d'étude	15
1.1. Situation géographique	15
1.2. Climat	16
1.2.1. La température	16
1.2.2. Pluviométrie	16
1.2.3. Les vents humidité	17
2. Prélèvement des échantillons de sol	18
3. Méthodes d'analyse	18
Résultats et discussion	
1. Caractérisation des sols	20
2. Les teneurs en phosphore assimilable	20
3. Distribution du phosphore assimilable	21
3.1. Au niveau des profils	21
3.2. Au niveau de la toposéquence	21
4. Effet des caractéristiques des sols sur la disponibilité du phosphore	22
4.1. L'analyse de la composante principale	22

4.2. L'étude des corrélations	24
Conclusion	25
Références Bibliographiques	26

Liste des figures

Figure 01 : Le cycle du phosphore dans le sol (Pierzynski et al, 2002)	8
Figure 02 : Distribution des différentes formes solubles du phosphore en fonction du pH (Drouet, 2010)	11
Figure 03 : Mécanisme de compétition de la matière organique (cercles gris) avec le phosphate sur les sites de fixation de Al, Fe et Ca (Parent, 2002)	11
Figure 04 : Localisation de la wilaya de Biskra	15
Figure 05 : Diagramme Ombrothermique de Biskra	17
Figure 06 : Distribution du phosphore assimilable dans les 8 profils de sol	21
Figure 07 : Distribution du phosphore assimilable au niveau de la toposéquence	22
Figure 08 : Biplot des deux composantes principales des différentes propriétés des sols et le phosphore assimilable	23

Liste des tableaux

Tableau 01 : Températures moyennes mensuelles (°C) de la région de Biskra (l'année 2021)	16
Tableau 02 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) de la région de Biskra (l'année 2021)	16
Tableau 03 : Vitesse mensuelle moyenne des vents (m/s*10) dans la région de Biskra (2021)	17
Tableau 04 : Pourcentage de l'humidité mensuelle moyenne de la région de Biskra	27
Tableau 05 : Les différentes méthodes utilisées pour les analyses de caractérisation des sols	18
Tableau 06 : Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol	20
Tableau 07 : Matrice de corrélations	24

Introduction générale

Introduction générale

La satisfaction des besoins croissants de la population en nourriture reste une des préoccupations de l'agriculture. Ceci impose de résoudre les problèmes des ressources naturelles qui sont liées directement à la production agricole, parmi lesquelles, le sol qui représente le support et la source d'alimentation des plantes est menacé par de nombreux phénomènes de dégradation de ses qualités physico-chimiques et de sa fertilité.

Le sol par sa constitution particulière représente un réservoir de nutriments et d'eau, il fonctionne aussi comme un filtre des polluants et des substances nocives (Girard et al, 2011)

Un sol est d'autant plus fertile qu'il possède des nutriments en quantités suffisantes et sous des formes minérales assimilables par les plantes. Lorsqu'elles poussent, ces dernières prélèvent les nutriments dont elles ont besoin à partir du sol et par conséquent l'appauvrissent.

Après l'azote, le phosphore est le deuxième élément nutritif le plus limitatif. Il peut réduire la croissance et le développement des plantes et limiter potentiellement le rendement des cultures. Cependant, l'excès de phosphore dans le sol peut passer dans l'eau douce par le ruissellement de surface et provoquer une prolifération des algues en réduisant la qualité de l'eau (Prasad et chakraborty, 2019)

Dans le sol, la biodisponibilité du phosphore est influencée par un certain nombre de propriétés à savoir : la matière organique, la texture, le pH, la teneur en calcaire et la fixation du phosphore par les minéraux argileux et les hydroxydes de fer et d'aluminium (Parnet, 2003).

Les sols des régions arides sont caractérisés par une faible fertilité naturelle (faible quantité de matière organique et de nutriments) et une faible capacité de rétention en eau. Ce sont des sols légers, souvent de texture sableuse, et marqués par une très forte infiltration, d'où un grand lessivage des minéraux et des engrais, ce qui en fait des zones défavorables à la croissance et au développement des plantes.

Les sols des régions arides sont caractérisés également par la présence de carbonates, de gypse et de sels solubles en quantités élevées, ce qui représente une contrainte majeure pour la réussite de la production végétale.

Le but de l'étude est l'évaluation de l'état de fertilité des sols de la région de Biskra en phosphore assimilable et la détermination des paramètres qui influencent le comportement du phosphore en conditions arides.

Tout d'abord, nous présentons une compilation bibliographique dans laquelle nous abordons le phosphore dans le sol, son origine, ses formes, et la dynamique de cet élément dans le sol.

Dans un second temps, nous présentons la région d'étude en mettant en évidence les conditions climatiques et édaphiques.

Enfin, nous nous sommes concentrés sur les résultats et leur interprétation.

Introduction générale

Synthèse bibliographique

Le phosphore (P) est l'un des principaux éléments responsables de la croissance des plantes, c'est pourquoi il est important de contrôler la richesse du sol en cet élément pour assurer la rentabilité des cultures.

Les sols contiennent de 100 à 3000 mg/kg de phosphore, principalement du phosphate, qui peut être incorporé dans une large gamme de constituants organiques et minéraux. La proportion du P total associé aux composés organiques varie selon les sols et leur type d'utilisation de 30 à 65% du P total (Harrison, 1987). La disponibilité du P pour la racine dépend des mécanismes qui contrôlent sa concentration en solution, qui sont physicochimiques, biochimiques et biologiques.

L'importance du phosphore pour les plantes

Le phosphore est l'un des trois éléments nutritifs les plus importants ; il existe dans les plantes en quantité assez minime (0,5 à 1% du poids de la MS) (Diehl, 1975) ; il rentre dans la composition des enzymes nécessaires aux réactions énergétiques des processus de respiration et de photosynthèse des plantes. Le phosphore rentre dans la composition de certaines graisses et de composés avec des liaisons énergétiques abondantes, telles que : ADP et ATP (Hopkins, 2003).

Le phosphore joue un rôle capital dans le transfert d'énergie, le règlement métabolique, et l'activation de protéine (Priya et Sahi, 2009). Il rentre dans tous les processus de croissance et sa répartition dans les tissus est très inégale et augmente généralement avec la teneur en azote (Gervy, 1970). Lambert (1979), affirme que le phosphore est considéré également comme un constituant essentiel des chromosomes, il intervient partout où il y a multiplication cellulaire d'où son importance dans les phénomènes de croissance et de reproduction.

Au-delà de son rôle dans des processus de transfert, le phosphore est un composant structural des phospholipides, acides nucléiques, nucléotides, coenzymes, et phosphoprotéines (Barker et Pilbeam, 2007).

Origine du phosphore dans le sol

Concentré dans la partie superficielle du sol, le phosphore provient de l'altération des roches (forme minérale) ou de la dégradation des végétaux par la faune et la flore du sol (forme organique).

2.1. Origine minérale

Le phosphore minéral est généralement plus abondant que le phosphore organique (Gachon, 1969). Il s'agit du phosphore inclus dans les minéraux tels que les apatites, dans tous les

composés oxy-hydroxyde de fer et d'aluminium, ainsi que dans les phosphates tricalciques associés aux calcaires actifs (très insolubles en milieu calcaire) (Scheiner, 2005).

Le phosphore minéral se trouve essentiellement sous la forme de composés orthophosphates. Il est souvent lié au fer, au calcium et à l'aluminium (Masmoudi, 1998).

Les ions phosphates ont une charge électronégative et sont retenus dans le sol par des cations métalliques, principalement Ca^{2+} . L'acide phosphorique est un anion et ne peut être retenu par le complexe adsorbant que par l'intermédiaire d'un cation tel que le fer, l'aluminium, le potassium, mais plus généralement le calcium (Lamber 1979). Ce sont les ions phosphoriques adsorbés sur le complexe adsorbant du sol qui participent à des échanges constants (sol-solution) et constituent l'essentiel du "pool alimentaire" des plantes.

Les phénomènes d'adsorption et de désorption présentent des cinétiques rapides par rapport aux réactions de précipitation ou de dissolution ; pour cette raison, ils contrôlent les concentrations de phosphore dans la solution du sol et, par conséquent, sa mobilité et sa biodisponibilité (Razi, 2005).

2.2. Origine organique

Le phosphore organique est présent sous forme de phosphates d'inositol, de phospholipides, d'acides nucléiques et de divers autres esters de phosphate qui proviennent de la dégradation de la matière organique et sont souvent immobilisés par rétention sur les colloïdes du sol (Marschner, 1995).

Dans les sols cultivés depuis longtemps, sa proportion varie entre 25 et 30 % du phosphore total, tandis que dans les zones à couverture végétale naturelle permanente (forêts et prairies), elle varie entre 75 et 80 % (Fardeau et Conesa, 1994 ; Scheiner, 2005).

Le phosphore organique ne peut pas être assimilé par les plantes, mais il peut être utilisé par les cultures grâce à l'action des micro-organismes responsables de la minéralisation de l'humus. Le phosphore organique peut contribuer de manière significative à la nutrition des plantes (jusqu'à 30% dans certains cas).

Formes de phosphore

3.2. Le phosphore total

Cette partie du phosphore représente toutes les formes de phosphore présentes dans un échantillon de sol, qu'elles soient minérales ou organiques (Baize, 2000). Elle comprend donc une fraction minérale et une fraction organique à des pourcentages de 5 à 95% du phosphore total. Une petite quantité est présente dans la solution du sol (0,002 à 2 mg/l) (Tarafdar et

Claassen, 2004). Pierzynski et al (2000) suggèrent que la fraction inorganique représente 50 à 70 % du phosphore total alors que le phosphore organique n'en représente que 25 %.

La quantité de phosphore présente dans le sol est donc une conséquence directe de la richesse de la roche mère. Mais la connaissance de cette quantité ne donne qu'une indication très imparfaite de l'aptitude du sol à fournir du phosphore aux plantes et à satisfaire leurs besoins (Pereda, 2008).

3.2. Phosphore assimilable

Le phosphore assimilable est défini pour caractériser la fraction du phosphore qui peut être absorbée par les racines, d'où la nécessité de corréler la production agricole à une quantité de phosphore dite " assimilable " ou " labile " extraite par des procédures analytiques. Le terme phosphore "labile" désigne la fraction du phosphore facilement absorbée par la plante et la fraction à extraire et à mesurer avec le phosphore soluble par des réactifs chimiques (Pierzynski et al, 2000).

Le phosphore dissous dans la solution du sol est sous forme ionisée (acide phosphorique H_2PO_4 , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}), dont les proportions relatives dépendent du pH du milieu concerné. Ces formes sont à l'origine de la nutrition phosphatée des cultures (Morel, 1996). Selon Pereda (2008), le phosphore présent dans la solution du sol constitue moins de 1 % du phosphore total, alors qu'il représente la principale source d'alimentation en phosphore pour les plantes. En effet, il n'y a que quelques Milligrammes de phosphore présents dans la solution du sol sous forme d'orthophosphates qui peuvent être directement assimilés par les plantes (Frossard et al, 2004 ; Beaudin, 2008). Gervy (1970), considère qu'un sol est riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 0,3‰, modérément riche lorsque cette dernière est comprise entre 0,15 ‰ et 0,3 ‰, et pauvre lorsqu'elle est inférieure à 0,15‰.

En pratique, la notion de phosphore assimilable est insuffisante ; il faut donc prendre en compte et exploiter un certain nombre de paramètres, à savoir : les interactions entre les composants organiques et minéraux du phosphore, les teneurs en solution, l'activité des racines et des micro-organismes, d'où la notion de " biodisponibilité du P ". Selon Frossard et al (2004), cette biodisponibilité est définie comme la quantité totale de phosphore dans le sol qui est susceptible de se retrouver dans la solution du sol sous forme d'ions orthophosphates pendant une période équivalente au temps de croissance de la culture.

Les surfaces réactives vis-à-vis du phosphore

Le carbonate de calcium

Les surfaces de carbonate de calcium favorisent la formation de phosphate de calcium. Carreira et al (1997) ont étudié la fixation du phosphore dans les sols calcaires (dolomitiques)

méditerranéens. Le phosphore lié au calcium y était essentiellement composé d'apatite. Cependant, une partie du phosphore labile est apparue adsorbée sur les carbonates.

Castro et al (1998) ont mené une étude similaire sur des vertisols et des inceptisols d'Andalousie. Le phosphore semble être contrôlé par une phase minérale calcique, moins soluble que l'octacalcium-phosphate. Cette insolubilisation du phosphore semble être favorisée par des concentrations en phosphore plus élevées lors de l'apport d'engrais. Enfin, dans les sols calcaires de l'Australie occidentale, Samadi et al (1998) ont montré que le phosphore des engrais se répartissait entre les oxydes d'aluminium (29% du P) et de fer (13%) et formait du phosphate dicalcique (28%), du phosphate octa-calcique (26%) et de l'hydroxyapatite (13%).

Les surfaces d'oxy-hydroxydes de fer ou d'aluminium

En utilisant la spectroscopie infrarouge, Prafitt et al (1975) ont montré que l'adsorption du phosphore sur les surfaces des oxy-hydroxydes de fer résulte d'une ou deux liaisons covalentes. L'adsorption du phosphore sur la goethite est plus importante que sur l'hématite. Ce résultat reflète une meilleure accessibilité des groupes OH mono-coordonnés sur les faces de la goethite (Torrent et al, 1990).

L'adsorption des oxydes d'aluminium (gibbsite) s'explique par la formation de complexes (mono- ou bi-pontés). Cette dernière a été observée indirectement par Kyle et al (1995) et par Prafitt et al (1977). Lorsque la concentration en phosphate dans la solution dépasse 30 mg/kg, l'adsorption est remplacée par des réactions de précipitation, du phosphate d'aluminium est alors formé.

Les surfaces des argiles

L'adsorption spécifique sur les argiles peut se produire par échange de ligands uniquement sur les bords des feuilles d'argile (Madrid et al, 1991). Les complexes de la sphère interne se formeraient également sur les surfaces argileuses chargées en permanence par l'intermédiaire de cations polyvalents (Morel, 1996). Kodama et al (1975) ont montré que les phosphates pouvaient être incorporés entre les feuillets de montmorillonite sous forme de phosphates d'aluminium hydratés.

Sur des argiles de type 1/1 comme la kaolinite, Schwertman et al (1992) ont trouvé que l'adsorption du phosphore était proportionnelle à la surface spécifique. En effet, dans les sols, les argiles sont généralement associées à des oxy-hydroxydes. Ces derniers forment des revêtements pelliculaires à la surface des minéraux silicatés du sol (Hendershot et al, 1983). Ce film confère à l'ensemble une charge de surface variable et une forte propension à fixer les phosphates (Perrott et al, 1974).

La matière organique

La matière organique forme des complexes stables avec les cations métalliques du sol : Fe, Al, et dans une moindre mesure, Ca, ces complexes sont appelés organométalliques (Levesque et al, 1969 ; Haynes, 1984 ; Bloom, 1981 ; Gerke et al, 1992). Ces complexes forment des colloïdes réactifs vis-à-vis des groupes phosphates dont le mode de fixation est la formation de complexes HA-métal-PO₄. Ainsi, lorsque le phosphore du sol semble être lié à la matière organique, il existe souvent une excellente corrélation entre le pouvoir de liaison de cette dernière et sa concentration en Al ou Fe (Martin et al, 1957). En effet, Bloom (1981) indique que la rétention du phosphate dans les sols acides riches en matière organique est due à des complexes organométalliques alumineux. De même, Negrin et al (1996) ont trouvé dans les andosols des îles Canaries que la désorption du phosphore était en partie contrôlée par la formation de complexes solubles Al-P-acide folique. Cependant, lorsque la matière organique est dissoute, elle entre en compétition avec l'adsorption du phosphate sur les oxy-hydroxydes de fer ou d'aluminium et, éventuellement, sur l'argile (Hue, 1991). Lan et al (1995) démontrent que la libération du phosphore par la matière organique est parfois accompagnée de la solubilisation de l'aluminium. La création de complexes avec les anions organiques favorise, en effet, la dissolution des oxy-hydroxydes. Ce phénomène se produit naturellement dans les sols (complexolyse) (Duchaufour, 1995).

Le cycle du phosphore

L'adsorption, la minéralisation, la précipitation, l'altération et le réarrangement microbien sont quelques exemples des processus chimiques, physiques et biologiques que subissent les ions phosphate dans le sol. Le cycle englobe donc le processus d'absorption du phosphore par la plante, la transformation des formes organiques et les réactions chimiques de fixation et d'immobilisation dans le sol (Morel, 2002 ; Demers, 2008) (Fig. 1).

Selon Drouet (2010), les microorganismes jouent également un rôle important dans les processus de minéralisation et d'immobilisation, et l'on peut discerner un cycle actif du phosphore dans le sol. Ce cycle est assez similaire à celui de l'azote.

Dans le sol, le phosphore se trouve généralement en combinaison avec des cations, des oxydes ou des hydroxydes métalliques. Certains d'entre eux se mettent en solution rapidement, d'autres plus lentement et d'autres encore ne se dissolvent qu'en présence de microorganismes dans le sol (Beaudin, 2008), processus par lequel les ions phosphate passent d'un état à l'autre sous l'effet de facteurs physiques, chimiques et biologiques.

Synthèse bibliographique

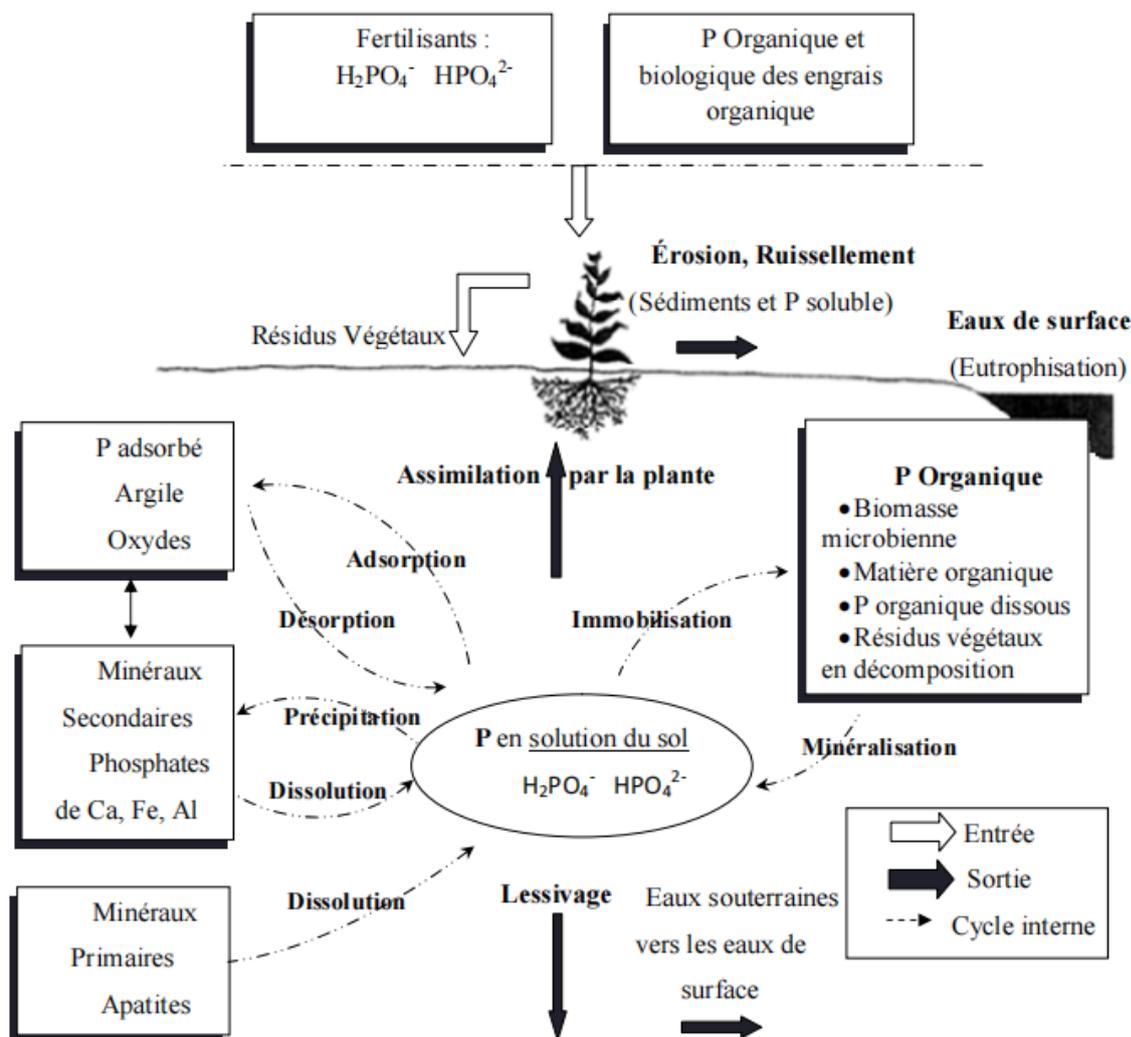


Figure 01 : Cycle du phosphore dans le sol (Demers, 2008).

La phase solide et la phase liquide, qui est évidemment représentée par la solution du sol, sont constamment en état d'équilibre minéral par rapport aux ions phosphate. La concentration en phosphore de la solution du sol peut changer en raison de l'application d'engrais ou de l'exportation de plantes, ce qui affecte l'équilibre physico-chimique.

Dans la plupart des conditions de sol, le phosphore est le moins mobile et le moins accessible aux plantes (Schachtman et al, 1998 ; Hinsinger, 2001 ; Ramaekers et al, 2010). Ceci est dû au fait que le phosphate (ion principal) est moins diffusable en raison de ses interactions électrostatiques avec les particules du sol et de sa rétention à la surface des argiles. En raison de sa faible mobilité, l'ion est absorbé par la racine "plus rapidement", où il reste immobile (Pereda, 2008). En revanche, en raison de leur faible réactivité avec les colloïdes du sol, les fractions organiques du phosphore du sol sont plus mobiles et se déplacent plus rapidement en profondeur que les fractions minérales (Hannapel et al, 1964 ; Rolston et al, 1975).

Effets des caractéristiques du sol sur la disponibilité du phosphore

L'impact des caractéristiques chimiques, physiques et biologiques du sol sur le comportement du P a été démontré dans plusieurs recherches (Giroux et Tran, 1994). Les paramètres du sol qui affectent la disponibilité du P comprennent le pH, les concentrations en Fe, Al et Ca, la texture et la teneur en matière organique (Mkhabela et Warman, 2005).

6.1. Pouvoir fixateur

Lorsque la teneur en phosphore du sol dépasse la valeur limite d'équilibre, un processus appelé "rétrogradation" se produit. Ce terme désigne la capacité du sol à fixer le phosphore sur la phase solide plutôt que sur la phase liquide. Le passage des ions phosphates de la phase liquide à la phase solide leur permet d'être adsorbés et intégrés dans les structures minérales. Pellerin et al (2006) ont démontré que la texture du sol, sa genèse et son pH sont les principaux paramètres qui contrôlent les niveaux de phosphore en solution.

En plus de la composition chimique du sol, d'autres paramètres comme l'activité de l'argile, le CaCO₃, les oxydes de fer et d'aluminium, les doses supplémentaires de phosphore et la durée d'application peuvent influencer la disponibilité du phosphore (Affif et al, 1993 ; Halajnia et al, 2009).

6.2. Facteurs physiques

6.2.1. Température du sol

Les processus qui contrôlent la dissolution, l'adsorption et la diffusion du phosphore sont influencés par la température du sol, qui a également un impact sur la possibilité d'absorption du phosphore par les racines (Barker et Pilbeam, 2007).

6.2.2. Humidité du sol

La disponibilité du phosphore pour la croissance des racines est influencée par la diffusion du phosphore dans la solution du sol. La quantité d'eau dans le sol détermine la vitesse à laquelle toutes les molécules de phosphore amorphe et inorganique, ainsi que le phosphore provenant des engrais phosphatés, se transforment en composés hydrosolubles (Barker et Pilbeam, 2007).

Dans la plupart des conditions, le phosphore est appliqué près de la surface du sol. Ainsi, pendant des périodes sèches dans les systèmes de production non irrigués, les déficiences en phosphore peuvent surgir (Hanway et Olsen, 1980 in Barker et Pilbeam, 2007). Mullen (2003) a considéré que la gestion de l'humidité du sol influence la réponse des plantes aux engrais phosphatés ; il a noté également que les racines des céréales peuvent arriver jusqu'à plus d'un mètre de profondeur pour accéder à l'humidité et les éléments nutritifs, particulièrement l'azote. Quand l'humidité du sol est faible, le phosphore devient moins accessible (Mihoub, 2012).

6.2.3. Texture

La disponibilité du phosphore dans le sol est influencée par la texture. Le phosphore est plus soluble dans les sols sableux que dans les sols argileux en raison de la capacité des argiles à retenir cet élément. Le type d'argile a également un impact important sur la rétention du phosphore ; en effet, les argiles de type 2/1 retiennent beaucoup plus de phosphore que la kaolinite (Badraoui et al, 1995).

Les niveaux de phosphore sont généralement moyens à faibles dans les sols à texture légère. Lorsque des engrais phosphatés sont appliqués, ces sols répondent souvent mieux que les sols lourds (Mullen, 2003).

6.2.4. Aération et le compactage du sol

L'oxygène est un élément crucial pour le prélèvement du phosphore par les racines des plantes. Dans les sols compactés, la circulation de l'eau est limitée, ce qui entraîne une mauvaise diffusion du phosphore vers les racines, et dans ce cas, la plante ne peut plus absorber le phosphore convenablement. La disponibilité de l'oxygène nécessaire à la croissance des racines est considérablement influencée par l'aération et la compaction du sol, de sorte que la compaction et l'engorgement du sol limitent l'absorption du phosphore en le rendant moins disponible pour les plantes (Mullen, 2003).

6.3. Facteurs chimiques

6.3.1. pH

La disponibilité du phosphore est largement influencée par le pH du sol. La disponibilité de plusieurs éléments essentiels pour les plantes tel que le phosphore est faible lorsque le pH est inférieur à 6 (Michel, 2005). Le monophosphate, anion monovalent (H_2PO_4^-), est la forme de phosphore la plus répandue à des valeurs de pH autour de 6,8, car c'est la forme la plus facile à absorber par les racines des plantes. Lorsque le pH se situe entre 6,8 et 7,2, la forme la plus répandue est l'ion phosphorique (HPO_4^{2-}), qui est difficile à absorber pour les plantes (Hopkins, 2003). Il est donc nécessaire d'apporter le phosphore sous une forme soluble dans la solution des sols à pH alcalin (supérieur à 7), qui est le cas de la majorité des sols algériens (Bennal et Benabbas, 2007).

La figure ci-dessous illustre l'effet du pH sur la fixation du P (Lindsay, 1979 ; Demers, 2008).

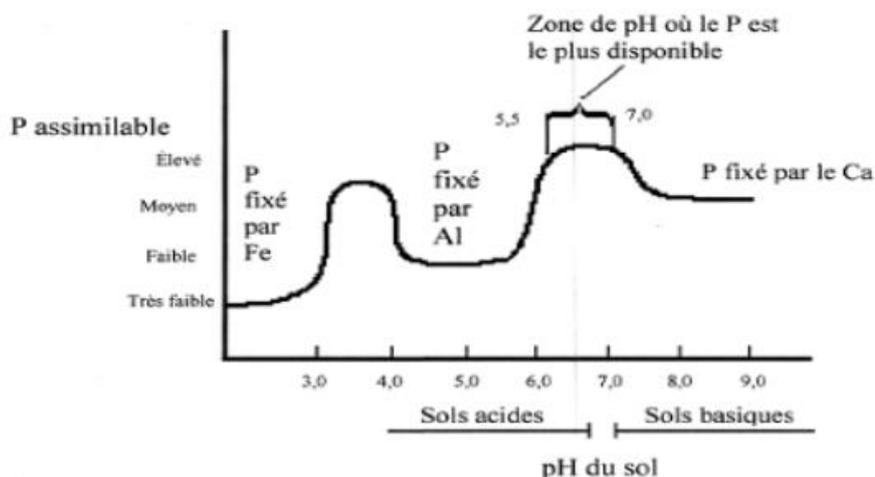


Figure 02 : Distribution des différentes formes solubles du phosphore en fonction du pH (Drouet, 2010)

6.3.2. Matière organique

La minéralisation de la matière organique libère des ions phosphate qui sont facilement absorbés par les plantes (Dutil, 1973). Les acides organiques produits lors de la dégradation de la matière organique dissolvent le phosphore lié aux oxydes de fer et d'aluminium (Michel et al, 2003).

Selon Demers (2008), les acides organiques produits par des microorganismes spécifiques lors de la dégradation de la matière organique peuvent provoquer la dissolution des complexes Fe-P ou Al-P en entrant en compétition avec le phosphore dans le sol. Ces acides organiques peuvent produire des complexes stables avec le fer et l'aluminium pour maintenir le phosphore en solution (Fig. 03).

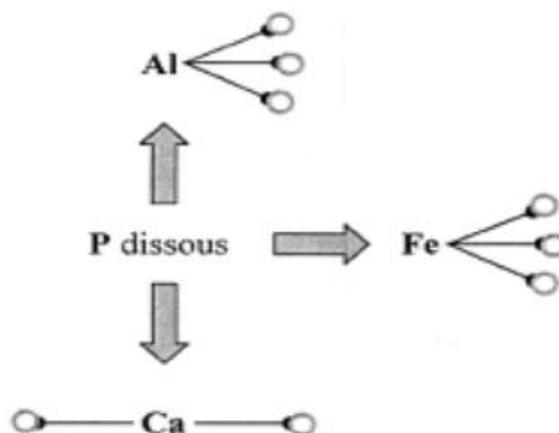


Figure 03 : Mécanisme de compétition de la matière organique avec le phosphate sur les sites de fixation de Al, Fe et Ca (Parent, 2002).

6.3.3. Calcaire

L'un des principaux problèmes liés à l'utilisation d'engrais phosphatés dans les sols calcaires est la fixation et l'accumulation d'ions phosphate (Halajnia et al, 2009).

La teneur en calcaire a un impact sur le pH du sol, qui à son tour affecte la quantité de phosphore absorbée. La forme la plus courante du phosphore dans les sols calcaires à forte teneur en Ca^{2+} est le P-Ca (phosphate lié au calcium), qui présente une faible labilité (Gachon, 1988 ; Mckenzie et al, 2003).

6.3.4. Éléments nutritifs et sels solubles

Les ions phosphore peuvent être influencés négativement ou positivement par les éléments nutritifs. Selon Gachon (1969), l'interaction entre le phosphore et les sels dans un milieu salin est susceptible d'augmenter le rendement à des concentrations modérées de sels solubles (Mihoub, 2012).

D'après Hafsi (1990), le rendement, la solubilité et l'absorption du phosphore sont améliorés par les interactions synergiques entre les engrais azotés et phosphatés. Selon le type de sol étudié, des corrélations significatives sont trouvés entre le phosphore total et quelques éléments traces métalliques comme Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, et Ti (Baize, 2000).

6.4. Facteurs biologiques

6.4.1. Effet des résidus de récolte

La biomasse microbienne immobilise à court terme le phosphore disponible une fois que de grandes quantités de résidus de récolte sont incorporées dans le sol (Mullen, 2003).

6.4.2. Action des racines

Il a été démontré que les plantes libèrent des acides organiques dans la rhizosphère pour mobiliser le phosphore fixé en cas de déficit en phosphate, notamment dans les sols riches en calcaire où le phosphore est étroitement lié aux ions Ca^{+2} (Lopez-Bucio et al, 2000).

Dans la majorité des sols, la quantité de phosphore dans les 10 premiers centimètres du sol est un bon indicateur de la capacité du sol à fournir du phosphore à la culture. Comme les racines sont plus susceptibles de se rassembler dans cette zone, elles ont facilement accès aux ions phosphore pour le développement des plantes (Mullen, 2003).

7. Le comportement de phosphore dans le sol

De nombreuses études ont montré que le P est faiblement mobile dans le sol. Une quantité non négligeable de phosphore peut échapper aux plantes en se retrouvant dans les eaux de surface par suite de l'érosion et du ruissellement des eaux des précipitations (Waskom, 2000 ; Zhao et al, 2001 ; Joe, 2005). La quantité de phosphore qui s'échappe dépend du taux d'érosion et de la quantité de P dans le sol. Les engrais phosphatés, qu'ils soient organiques ou minéraux, se solubilisent à la surface du sol et sont emportés par l'eau supplémentaire (drainage), surtout dans les sols à texture grossière. Cela entraîne des niveaux élevés de phosphate dans les eaux de surface et souterraines.

7.1. Le comportement du phosphore dans les sols gypseux

Les sols gypseux sont caractérisés par des quantités élevées d'ions Ca^{2+} dans la solution du sol (Jarzadeh et Zinck, 2000 ; FAO, 1990). Etant donné que la solubilité du phosphore dans le sol dépend de l'activité des ions Ca^{2+} , Fe^{2+} , et Al^{3+} , les composées contenant ces ions tels que la calcite, le gypse affectent la solubilité du phosphore dans le sol.

La solubilité du complexe P-Ca augmente en fonction du CO_2 (Harrison, 1987 ; FAO, 1990). Le gypse et la calcite coexistent dans la plupart des sols gypseux, ce qui entraîne une activité ionique Ca^{2+} nettement plus élevée que dans les sols uniquement calcaires. Par rapport aux sols calcaires, les sols gypseux ont une disponibilité et une solubilité réduites du phosphore. Le développement du complexe cristallin P-Ca peut être la cause de la diminution du phosphore labile dans les sols gypseux. La plus grande activité des ions Ca^{2+} dans ces sols contribue à la plus grande rétention du phosphore.

Les résultats de l'étude menée par Mohammed et Jones (1992) sur le statut du phosphore dans les sols gypseux de l'Iraq et du sud de l'Espagne ont montré que la concentration de phosphore total et les différentes fractions du phosphore inorganique diminuent avec la profondeur dans tous les profils étudiés. Les sols étudiés comportent souvent du P-Ca comme principale forme de phosphore. De même, Panahi (1997) a trouvé que l'adsorption du phosphore était faible (inférieure à 40 mg/l) dans les sols gypseux à des valeurs de pH comprises entre 4,5 et 5,5 et qu'elle augmentait proportionnellement à mesure que le pH augmentait (6,5 à 9,5).

Le gypse n'a aucun impact sur le pH mais augmente la rétention de P, ce qui entraîne une carence en phosphore assimilable (Panahi et Rowell, 2006).

7.2. Comportement du phosphore dans les sols calcaires

Les ions phosphate se combinent rapidement avec les ions calcium dans les sols calcaires riches en calcium et autres ions basiques pour créer des complexes phosphate calcium moins solubles dans l'eau (Al-Ring, 1999). Selon Strong et Racz (1970), lorsque des engrais phosphatés sont appliqués à des sols calcaires, du phosphate de calcium, du phosphate de magnésium et du

Synthèse bibliographique

phosphate de calcium et de magnésium sont générés. Ces substances sont instables et peuvent se transformer en d'autres substances plus complexes (cristallines) et moins solubles dans l'eau (Abdali, 2005). Avant la formation de la forme cristalline, les ions phosphate sont d'abord adsorbés sur les surfaces de minéraux comme la calcite. Par la suite, les composants adsorbés se chevauchent pour former des amas, puis des noyaux (apatite). Le type de sol, l'engrais utilisé et la quantité utilisée ont une incidence sur la durée de ce processus.

Il est essentiel de trouver des moyens plus efficaces de maintenir un niveau optimal de phosphore dans la solution du sol (rhizosphère) qui favorise la croissance et la production, car le phosphore apporté au sol se décompose rapidement en composés moins solubles, ce qui le rend moins disponible pour les plantes (Amer et al, 1980).

Matériel et méthodes

Présentation de la région d'étude

1.1 Situation géographique

La région de Biskra est une zone de transition de point de vue morphologique et bioclimatique entre deux domaines ; atlasique au Nord et saharien au Sud. Par sa position géographique privilégiée, la wilaya de Biskra se caractérise par une vocation de type sylvo agro-pastorale. L'agriculture se distingue par une importante superficie en palmiers dattiers (phoeniculture). D'après l'inventaire effectué par (l'ANRH, 2000), la superficie irriguée dans la wilaya peut dépasser les 65.000 ha et consomme plus de 600 millions m³ d'eau par an (Haddad et Dib, 2018)

Les eaux proviennent principalement de nappes souterraines à partir de plus de 11.000 forages et puits paysans en exploitation (Haddad et Dib, 2018)

La wilaya de Biskra est d'une superficie de 21671 km² (monographie de Biskra) et se situe au Nord-Est du Sahara septentrional, entre les latitudes 34° 39' et 35° 24'N et les longitudes 4° 99' et 6° 79'E (A.N.A.T, 2003) et à une altitude moyenne de 124 m (Fig04).

La ville de Biskra est distante de 480 km d'Alger. Elle est limitée au Nord par la wilaya de Batna, au Nord-Ouest par la wilaya de M'sila, au Nord-Est par la wilaya de Khenchla, au Sud par la wilaya d'El oued et au Sud-Ouest par la wilaya de Djelfa (Rouahna, 2007).

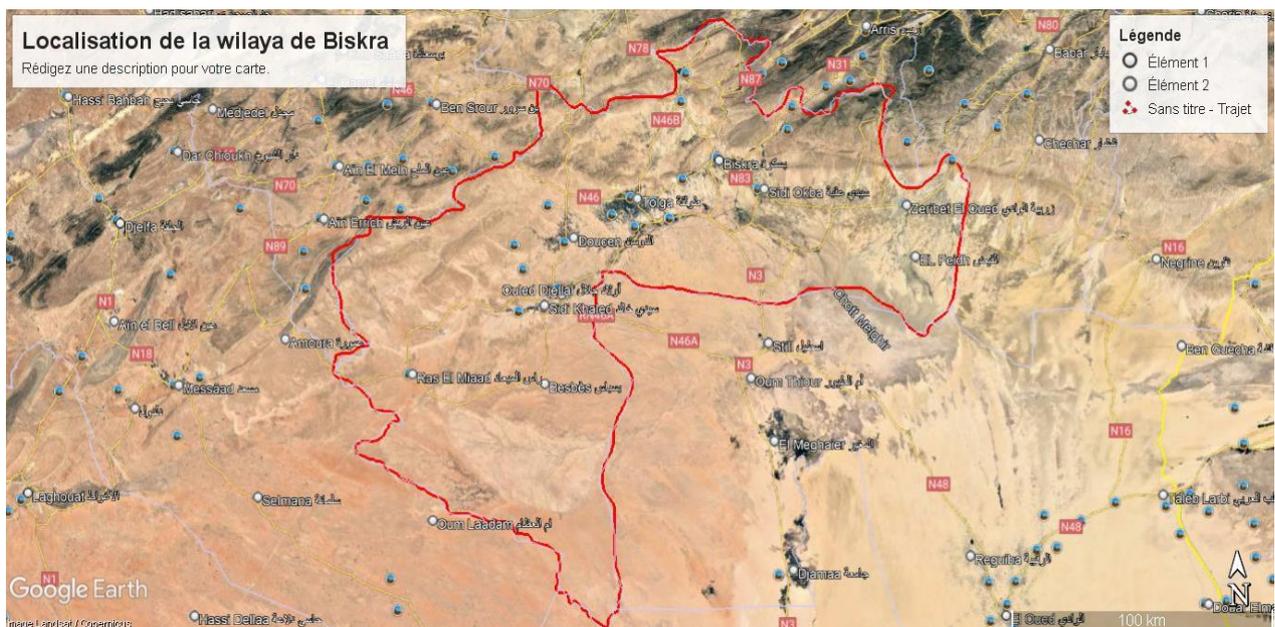


Figure 04 : Localisation de la wilaya de Biskra

1.2. Climat

a) La température (°C)

Les valeurs moyennes mensuelles des températures enregistrées par la station météorologique de Biskra pour la période 2021 sont regroupées dans le tableau 2.

Tableau 01 : Températures moyennes mensuelles (°C) de la région de Biskra (l'année 2021)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mais	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Température (°C)	12	13	17	21	26	30	34	33	29	23	17	13

Pendant la période l'année 2021, le mois le plus froid est janvier avec une température moyenne de 12°C. Tandis que, le mois le plus chaud est juillet avec une température moyenne de 34°C.

b) Pluviométrie

Au cours de l'année 2021, les mois de mars et Avril sont les plus pluvieux avec une moyenne de 20 mm, pour les mois : juin et juillet, les pluies étaient très rares.

Tableau 02 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) de la région de Biskra (l'année 2021)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mais	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Pluviométrie (mm)	2.7	2.5	3	3.2	3	2	0.8	1.9	3.7	3.2	2.8	2.3

Le diagramme Ombrothermique de Gaussen établi sur la base des données climatiques de l'année 2021, montre que la saison sèche s'étend sur toute l'année, la température moyenne annuelle du jour est de l'ordre 12 à 34°C.

Matériel et méthodes

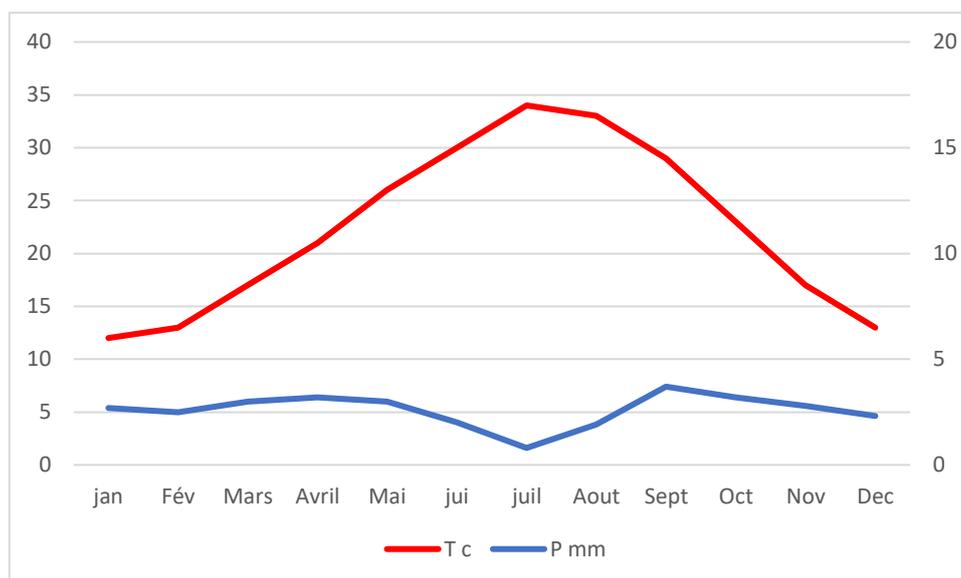


Figure 05 : Diagramme Ombrothermique de Biskra pour l'année 2021

c) Les vents (km/h)

L'absence du couvert végétal naturel abondant est responsable à l'exposition de la région de Biskra à des vents forts.

Tableau 03 : Vitesse mensuelle moyenne des vents (km/h) dans la région de Biskra (2021)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Vent (km/h)	12	13	13	14	14	13	12	11	11	11	11	11

d) Humidité

L'humidité relative est extrêmement liée à la température. Durant l'année 2021, la région de Biskra a enregistré un maximum d'humidité de 50% dans le mois de janvier.

Tableau 04 : Pourcentage de l'humidité mensuelle moyenne de la région de Biskra

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Humidité (%)	50	40	36	42	34	25	15	20	32	37	41	45

2. Prélèvement des échantillons de sol

23 échantillons de sol ont été collectés sur 8 profils dans la région de Biskra d'El hadjeb vers Ourelal dont l'objectif est d'évaluer et de déterminer la distribution du phosphore le long de la toposéquence et au niveau des profils. Les prélèvements ont été effectués au niveau des différents horizons de chaque profil pour pouvoir comprendre la distribution du phosphore assimilable au niveau du profil.

Les échantillons de sol ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2 mm afin de pouvoir faire les analyses nécessaires pour répondre à l'objectif de l'étude.

3. Méthodes d'analyse

Les analyses de caractérisation qui ont été effectuées ainsi que les méthodes utilisées sont résumées dans le tableau 05.

Tableau 05 : les différentes méthodes utilisées pour les analyses de caractérisation des sols.

Type d'analyse	Méthode utilisée
pH	Mesure à l'aide du pH mètre dans l'extrait de solution (1 :2,5)
CE	Mesure à l'aide du conductivimètre dans l'extrait de solution (1 : 5)
Calcaire total	Calcimètre de Bernard
MO	Méthode colorimétrique

Le phosphore assimilable a été dosé par colorimétrie suivant la méthode Olsen. L'extraction a été réalisée dans une solution de bicarbonate de sodium 0,5 N ajusté à pH= 8,5 dans un rapport, prise d'essai/volume de solution d'extraction ($m/v = 1/20$). Le dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe formé par l'acide phosphorique et l'acide molybdique. Le complexe phospho-molybdique, sous l'effet de la chaleur et en présence d'acide ascorbique développe une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration de la solution en orthophosphates.

Il s'agit d'attaquer 5 g du sol par 100 ml de NaHCO_3 , et 2 g de charbon actif, le mélange a été agité pendant 30 mn et filtré.

5 ml d'extrait de sol été ajouté à 30 ml de réactif sulfo-Molybdique, 15 ml d' H_2O , 2 ml d'acide ascorbique, et été homogénéisé (80°C dans le bain à 5 mn)

Matériel et méthodes

Le dosage du phosphore a été réalisé par colorimétrie, après réduction du complexe phospho-molybdique qui s'accompagne d'une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la quantité du phospho-molybdate réduit et par conséquent à la teneur en phosphate présent dans le sol.

Résultats et discussions

Caractérisation des sols

Le tableau 06 regroupe les valeurs moyennes de quelques caractéristiques physico-chimiques des échantillons prélevés. D'après ce tableau, les sols de la toposéquence choisie sont alcalins (pH moyen = 7,85) et calcaires (CaCO₃ moyen ≈ 9,5 %).

Les teneurs de la conductivité électrique de l'extrait dilué 1/5 sont fortes avec une moyenne de 6,28 ds/m. La fraction granulométrique sable est la plus dominante indiquant que les sols sont de texture sableuse. La prospection sur terrain effectué au mois d'Avril nous a permis de remarquer la présence d'une certaine humidité dans le sol en raison de la présence d'une nappe souterraine peu profonde.

Les sols sont pauvres en matière organique (MO moyenne est de l'ordre de 0,25%) à cause de la minéralisation rapide en milieu aride ainsi que la pauvreté naturelle des sols de la région en matière organique. La végétation dominante est halophyte (présence de *Salsola Vermiculata* et d'*Atriplex Halimus*)

Tableau 06 : Caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol

Caractéristique	Moyenne
MO (%)	0,2475
CaCO ₃ (%)	9,4650
CE (ds/m)	6,2841
pH	7,8541
A (%)	7,3043
L (%)	18,1739
S (%)	55,1074

Les teneurs en phosphore assimilable

Les valeurs du phosphore assimilable varient de 0,15 et 7,60 mg/kg avec une valeur moyenne de 3,2 mg/kg. Ces valeurs sont très faibles par rapport aux besoins des plantes cités par Olsen (1945) qui constate que les plantes ont besoin en moyenne 45,50 mg/kg de phosphore soluble dans la solution du sol.

La carence en phosphore assimilable dans ces sols peut être expliquée par sa faible disponibilité dans les sols calcaires en raison de son adsorption sur la surface de CaCO₃ ; de même, la carence

en phosphore assimilable représente une contrainte nutritionnelle très connue dans les sols salins à cause de précipitation des ions phosphates avec les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ .

La réaction acido-basique des sols de la région d'étude représente également une contrainte pour la présence de phosphore. En effet, la présence en phosphore biodisponible est maximale dans la gamme de pH 6-7,5, au-delà de 7,5 les anions phosphates réagissent avec Ca et Mg pour former des composés phosphatés de solubilité limitée (Mortvedt et al, 1999).

Distribution du phosphore assimilable

3.1. Au niveau des profils

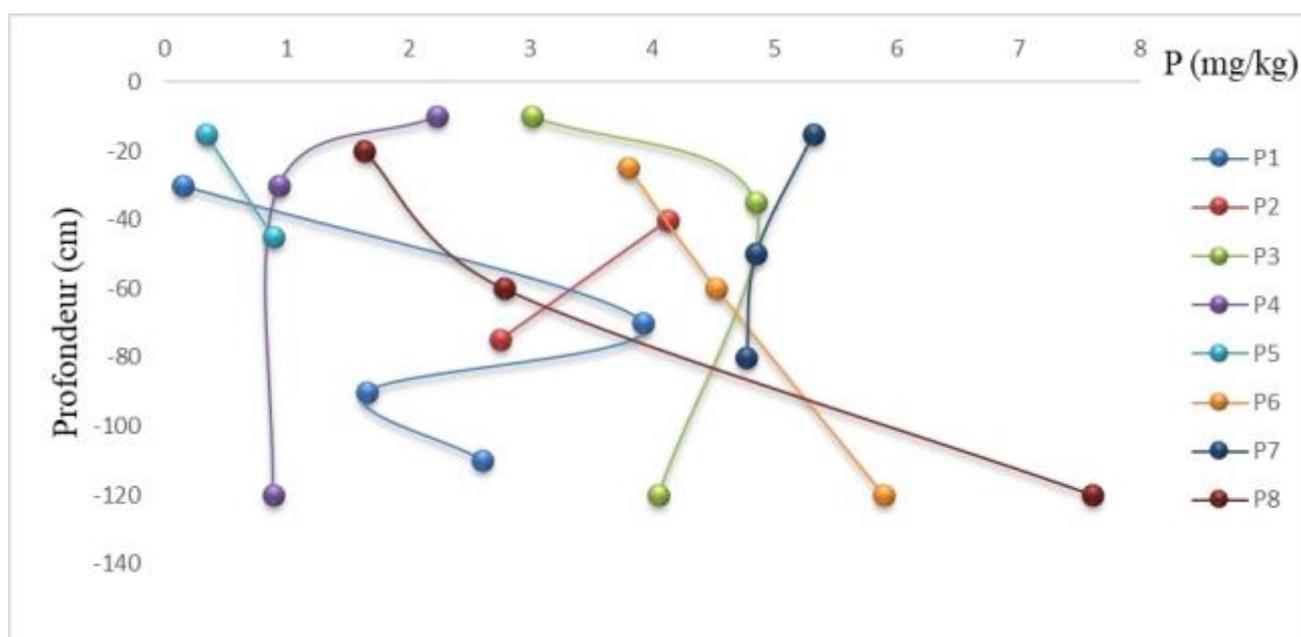


Figure 06 : distribution du phosphore assimilable dans les 8 profils de sol

La figure 06 montre que le phosphore assimilable se distribue d'une façon irrégulière de la surface vers la profondeur. Ceci est dû d'une part à l'origine du phosphore qui diffère d'un type de sol à un autre tout dépend de la nature du matériau parental et d'autre part aux interférences avec les ions issus des sels solubles et qui peuvent former des complexes insolubles avec les anions phosphates.

3.2. Au niveau de la toposéquence

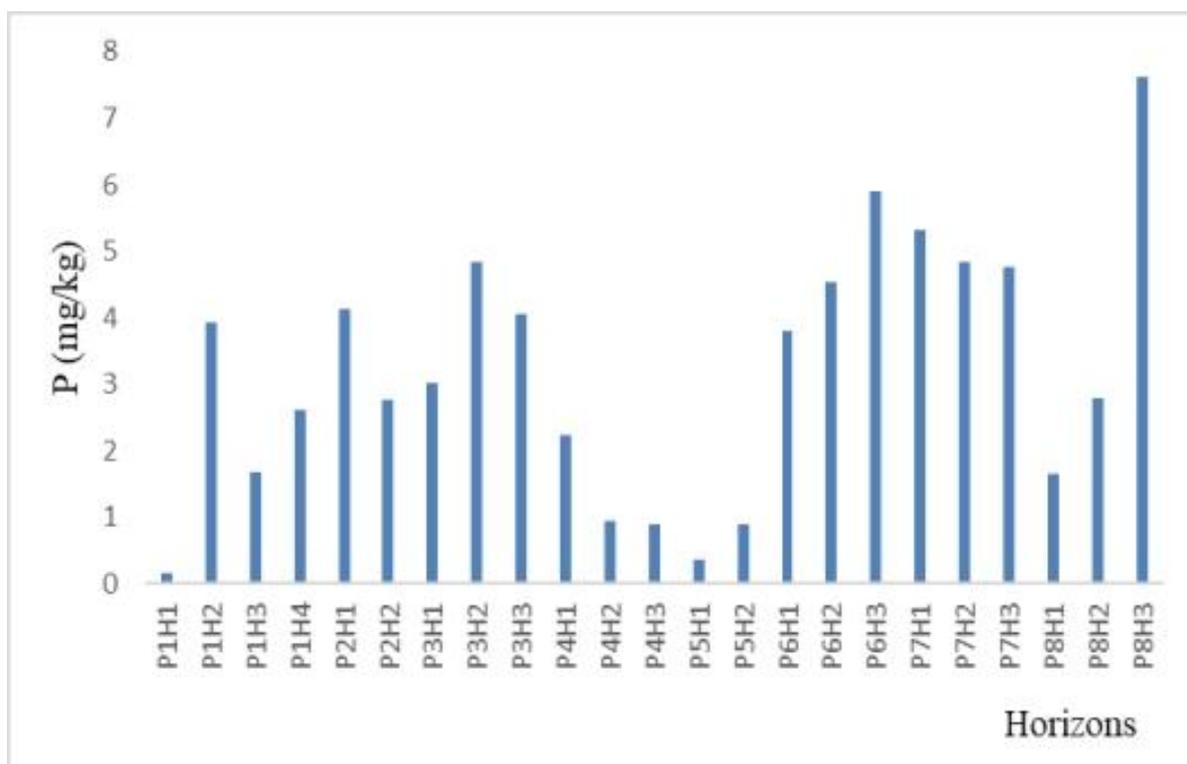


Figure 07 : distribution du phosphore assimilable au niveau de la toposéquence

La distribution des teneurs en phosphore représentée par la figure 07 montre que les valeurs de phosphore assimilable sont fortement liées aux caractéristiques du sol. En effet, les valeurs les plus élevées sont trouvées dans les sols non cultivés et/ou nouvelles plantations au niveau des croûtes gypso-calcaires, les faibles valeurs ont été trouvées dans les milieux très salins (présence des efflorescences salines).

Effet des caractéristiques des sols sur la disponibilité du phosphore

4.1. L'analyse de la composante principale

L'analyse de la composante principale est utilisée pour étudier l'effet des propriétés des sols sur la disponibilité et la dynamique du phosphore assimilable dans la région d'étude

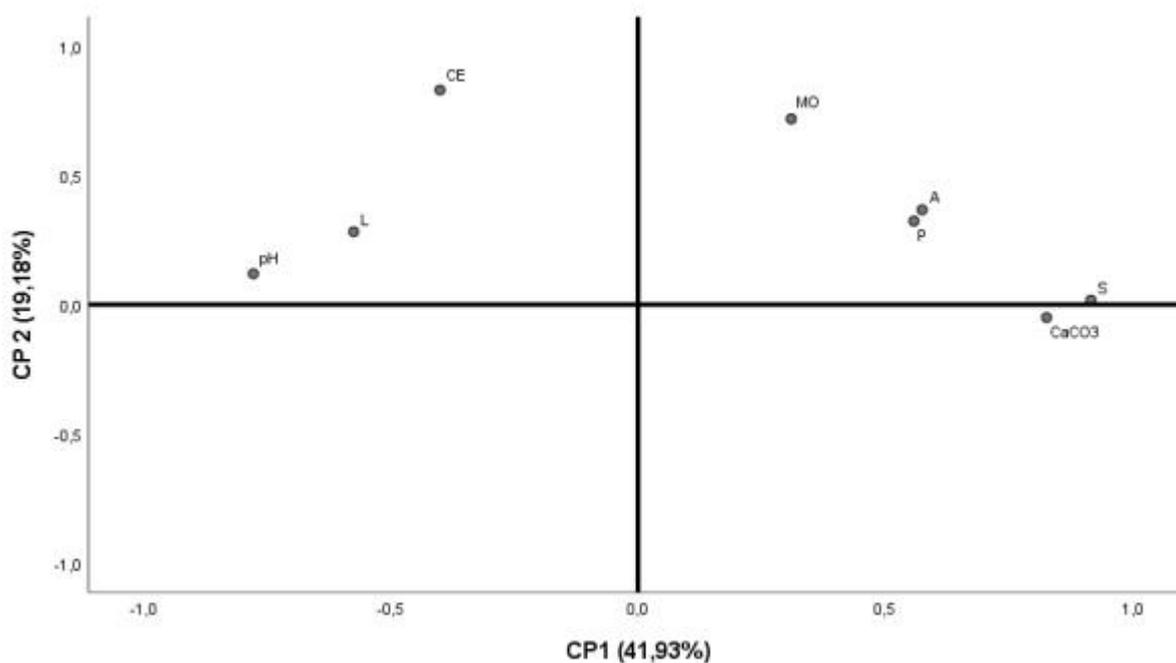


Figure 08 : Biplot des deux composantes principales des différentes propriétés des sols et le phosphore assimilable

La figure 08 montre que le phosphore assimilable est très largement influencé par la fraction granulométrique argile, il est faiblement proche de la fraction granulométrique sable, du calcaire total et de la matière organique. Les paramètres de sol : conductivité électrique, pH et limon influencent faiblement et inversement les teneurs en phosphore assimilable dans les sols étudiés.

Les résultats de l'ACP concordent bien avec les conclusions tirées par Chhabra et al (1982) sur l'effet négatif du pH élevé sur la disponibilité du phosphore dans le sol et également l'effet négatif de la salinité sur la présence du phosphore en solution (Mahmood et al, 2013)

Les explications données par Chhabra et al (1982) ; Mahmood et al (1994) ; Qadir, et al (2003) et Ghafoor et al (2004) sur la rétention de phosphore par les particules fines (Argile) sont confirmés par nos résultats.

Les faibles teneurs en matière organique ne permettent pas de montrer son effet sur la disponibilité du phosphore.

4.2. L'étude des corrélations

Tableau 07 : matrice de corrélations

	MO	P	CaCO ₃	CE	pH	A	L	S
MO	1,000							
P	0,227	1,000						
CaCO ₃	0,073	0,569	1,000					
CE	0,330	0,073	-0,284	1,000				
pH	-0,231	-0,298	-0,757	0,374	1,000			
A	0,315	0,139	0,299	0,012	-0,260	1,000		
L	-0,185	-0,161	-0,206	0,443	0,288	-0,182	1,000	
S	0,227	0,435	0,668	-0,342	-0,550	0,686	-0,578	1,000

La matrice de corrélation représentée par le tableau 07 indique une corrélation significative et positive entre le phosphore assimilable et le calcaire total avec un coefficient de corrélation $r = 0,67$. Ce résultat montre l'attraction de l'anion phosphate par la surface de la calcite, ceci était largement expliqué et cité dans de nombreux travaux de recherche (Ige et al, 2008 ; Xiao et al, 2012 ; Daly et al, 2015)

Le coefficient de corrélation $r = 0,43$ entre le phosphore assimilable et la fraction granulométrique sable montre qu'une partie du phosphore peut être combiné à la fraction solide sable car c'est la fraction la plus dominante dans les sols.

Les travaux de Mahmood et al (2013) ont montré que la faible rétention du phosphore par la fraction grossière du sol lui expose à la perte par lixiviation après irrigation.

Conclusion

Conclusion

L'objectif de l'étude est d'évaluer l'état de la fertilité des sols de la région de Biskra en phosphore assimilable et de déterminer les paramètres du sol qui affectent le comportement du phosphore en conditions sèches. La méthode Olsen recommandée pour les sols calcaires a été utilisée pour extraire la forme assimilable du phosphore.

Les résultats ont montré que les sols de la toposéquence étudiée sont sableux, alcalins, riches en sels solubles et pauvres en matière organique. L'aspect de surface est caractérisé par la présence d'une végétation spontanée halophyte.

Les sols de Biskra sont déficients en phosphore assimilable en raison de l'insolubilisation du phosphore et son adsorption sur la surface de CaCO_3 . La carence en phosphore labile représente une contrainte nutritionnelle majeure dans les sols salins à cause de la précipitation des ions phosphates avec les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ .

La distribution du phosphore assimilable dans le sol, de la surface vers la profondeur, est irrégulière et varie selon les types de sol.

En conditions sèches caractérisées par la présence des croutes gypso-calcaires, le phosphore assimilable présente une corrélation positive et significative avec le calcaire total. La dominance de la fraction granulométrique sable expose le phosphore assimilable à la lixiviation.

Les résultats obtenus restent préliminaires et, avec d'autres recherches similaires, peuvent contribuer à une meilleure compréhension du comportement et de la dynamique du phosphore en conditions arides. La fertilisation phosphatée est l'une des solutions à entreprendre pour pallier à la carence en phosphore, sauf qu'il est nécessaire de comprendre comment gérer l'apport d'engrais dans de telles conditions de sol. Tout ceci, dans la perspective de promouvoir le développement de cultures stratégiques et d'assurer une agriculture durable dans les conditions environnementales sahariennes difficiles.

Références bibliographiques

1. Abdali, 2005. Les réactions de certains engrais de phosphate dans le sol calcaire et leur effet de la croissance de la plante de blé (*Triticum aestivum* L). Master Thèse. College of Agriculture. Bagdad University. En savoir plus sur ce texte source Vous devez indiquer le texte source pour obtenir des informations supplémentaires Envoyer des commentaires Panneaux latéraux
2. Amer, F.M., S. Shama, K.M. Awad and M.A. Khalil, 1980. Immobilization of dominium phosphate and Mono calcium phosphate in calcareous soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44-1174-1178.
3. Baize D, 2000. Guide des analyses en pédologie, 2e éd., INRA, Paris. 280p.
4. Barker A.V, PILBEAM D. J, 2007. Handbook of plant nutrition. Books in soils, plants, and the environment; v. 117. 662p.
5. Beaudin I, 2008, Revue de littérature. La mobilité du phosphore Version finale. Ed CRAAQ, 137p.
6. Benhamdi FZ, 2019. Etude de l'élimination des phosphates des eaux par adsorption sur une smectite intercalée. Mémoire de master, université de mostaganem, 43p
7. Bloom, P. R. 1981. Phosphorus adsorption by aluminum peat complex. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 267{272.
8. Carreira, J. A. et Lajtha, K. 1997. Factors affecting phosphate sorption along a Mediterranean dolomitic soil and vegetation chronosequence. *)) European Journal of Soil Science*, 48: 139{149.
9. Castro, B. et Torrent, J, 1998. Phosphate sorption by calcareous vertisol and inceptisols as evaluated from extended P-sorption curves. *)) European Journal of Soil Science*, 49: 661{667.
10. Chhabra, R., I.P, Abrol and M. Singh, 1982. "Leaching Losses of Phosphorus in Sodic Soils", pp: 418–422 International Symposium on Salt-affected Soils. Feb. 18-21, 1980. Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, India
11. Daly K, Styles D, Lalor S, Wall D, 2015. Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties. *Eur J Soil Sci* 66:792–801
12. Demers I, 2008. Formes et disponibilité du phosphore de composts utilisés comme amendements de sols agricoles, pour l'obtention du grade de maître des sciences (M. Se.), Laval (Québec), 92p.
13. Diehl R, 1975. Agriculture générale. Ed. J.B. Baillière, Paris, 396 p.
14. Duchaufour, P, 1995. Pédologie, sol, végétation, environnement . Masson, Paris {France, quatri_x0012_eme edition. 308 pages.
15. Dutil P, 1973. Élément d'écologie .Ed. J.B. TII. Paris. p155-452.

16. Drouet TH, 2010. Pédologie, BING-F-302. Ed. Lagev, 140p.during incubation on the desorption of phosphorus from soil. *Soil Sci.*350-355.
17. Elkechai O, 2020. Biodisponibilité du phosphore dans la mycorhyzosphère de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) (variété Fouara) sous climat semi-aride. , mémoire master, université de tizi ouzou, 37p.
18. FAO, 1990. gypsiferous soils in the world soils. ser.FAO.Land and water depth.bul.62., Rome
19. Fardeau J.C. et Conesa , A. P, 1994. Le phosphore. InBonneau et Souchier, Pédologie.Vol 2. Constituants et propriétés du sol. Ed. Masson. pp : 557 – 568.
20. Gachon L., TRIBOI F, 1988. Etude des méthodes d'appréciation de l'offre phosphatés du sol – le phosphore et le potassium dans les relations sol-plante. INRA.:181-191.
21. Gachon L, 1969. La fertilisation phosphatée. Panorama des recherches récentes effectuées en France. *Phosphore Agri.*, 53. 17 -26.GAGNON E., BEAULIEU R., 2002. Utilisation du phosphore dans les engrais de démarrage. *Min. env. S.A.A.A.C.Quebec.*26p.
22. Gerke, J. et Hermann, R.,1992. ((Adsorption of orthophosphate to humic-fe complexes and amorphous Fe-oxide.)) *Z. Panzenern• ahr. Bodenk.*, 155 : 233{236.
23. Gervy R., 1970. Les phosphates et l'agriculture. Ed. Dunod. Paris 298p.
24. Ghafoor, A., M. Qadir and G. Murtaza, 2004. *Salt-affected Soils: Principles of Management.* Allied Book Centre, Urdu Bazar, Lahore, Pakistan
25. Haddad et Dib 2018 . Comportement de la tomate sous serre en région aride
26. Hafsi M., 1990. Influence de la fertilisation phospho-azotée sur la variété de blé dur (*Triticumdurum*) «Mohamed Benbachir » cultivée dans les conditions des hautes plaines sétifiennes. *E.N.S.A.* 124p.
27. Halajnia A., HAGHNIA G.H., FOTOVAT A., KHORASANI R., 2009. Phosphorus fractions in calcareous soils amended with P fertilizer and cattle manure. *Geoderma* 150 209–213.
28. Hannapel R.J., FULLER W.H., BASMA S., Bullock J., 1964. Phosphorus movement in a calcareous soil: 1. Predominance of organic forms of phosphorus in phosphorus movement. *Soil Sci.* 97:350-357.
29. Hanway J.J., OLSON R., 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. In: Khasawneh, Sample, Kamprath, Eds.*The Role of Phosphorus in Agriculture.*
30. Harrison A.F, 1987. *Soil organic phosphorus: a review of world literature.* CAB International, Wallingford. 257p.
31. Haynes, R. J, 1984. ((Lime and phosphate in the soil-plant system.)) *Advances in Agronomy*, 37 : 249{315.
32. Hopkinns W. G, 2003. *Physiologie végétale.* Ed. de Boeck, Belgique, 514p.
33. Hue, N. H, 1991. ((Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies.)) *Soil Science*, 152(6): 463{471.
34. Ige DV, Akinremi OO, Flaten DN, 2008. Evaluation of phosphorus retention equations for Manitoba soils. *Can J Soil Sci* 88:327–335.

35. Jafarzadeh A.A. et Zinck J.K, 2000. Worldwide distribution and sustainable management of soils with gypsum. Univ. Tabriz. Fac. agr. siol. sci. dpt. Iran 6p.
36. Joel De Jong, 2005. P Index in Iowa. Iowa State University Extension. File : Environmental : 4-1.
37. Kodama, H. et Webber, M. D, 1975. ((Clay-inorganic studies. II. Hydroxy aluminum phosphate-montmorillonite complexe.)) Can. J. Soil Sci., 55: 225{233.
38. Lambert J.C., 1979. La fertilisation phosphatée. revue cultivars. N° 115, pp : 96-97.
39. Lan, M., Comerford, N. B. et Fox, T. R, 1995. ((Organic anions effects on phosphorus release from spodic horizons.)) J. Am. Chem. Soc., 40: 1361{1403.
40. Levesque, M. et Schnitzer, M, 1969. ((Characterization of model and soil organic matter metal-phosphate complexes.)) Canadian Journal of Soil Science, 49: 365{375.
41. Lindsay, W. L, 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, NY. 449 pages.
42. Lopez-Bucio J., NIETO-JACOBO M.F., RAMIREZ-RODRIGUEZ V., HERRARAESTRELLA L, 2000. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. Plant Science 160: 1-13.
43. Madrid, R., Diaz-Barrientos, E. et Contreras, M. C, 1991. ((Relationships between zinc and phosphate adsorption on montmorillonite and iron oxyhydroxide.)) Aust. J. Soil Res., 29: 239{247.
44. Mahmood, I.A., A. Ali, M. Aslam, A. Shahzad, T. Sultan, and F. Hussain, 2013. Phosphorus availability in different salt-affected soils as influenced by crop residue incorporation. Int. J. Agric. Biol., 15: 472–478
45. Mahmood, I.A., M. Aslam, R.H. Qureshi, and S. Nawaz, 1994. Phosphorus nutrition of rice in a salt-affected soil fertilized with various nitrogen sources. Pak. J. Agric. Sci., 31: 168–173
Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. London. Academic Press. 889
46. Marschner H, 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London.
47. Martin, A. E. et Reeve, R., 1957. ((Chemical studies of podzolic horizons. II. The use of acetylacetone as extractant of translocated organic matter.)) Journal of Soil Science, 8(1): 279{286.
48. McKenzie R. A., PRENT L. E., MACLEOD J. A, 2003. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformation in Gleysolic soils. Can.j.soil.sci.soc.N°81: 395- 403.
49. Mesmoudi A, 1999. Etude expérimentale sur l'efficacité du phosphate naturel de Djebel Onk, Actes du séminaire de Ouargla, CRSTRA Biskra. MICHEL C. A., THIENS S. J., 2003. Phosphorus bioavailability following incorporation of grain manure crops. Soil.sci.soc.Am.j.V67: 1186-1194.
50. Michel T, 2005. Quelques notions de la fertilisation. Ed. Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec, 50p.
51. Michel-Claude Girard, Christian Walter, Jean-Claude Rémy, Jacques Berthelin, Jean-Louis Morel, Sols et environnement, Dunod, 2011 (lire en ligne [archive]), p. 13

52. Mihoub A, 2012. Dynamique du phosphore dans le système sol-plante en conditions pédoclimatiques sahariennes. Thèse magister, univ d'Ouargla. 119p
53. Mohammed et Jones K.G, 1992. Phosphorus in gypsiferous soils, the influence of soil properties on phosphorus fractionation. *Geoderma*. V53 issue 1-2: 97-104.
54. Morel C, 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. Thèse d'habilitation INRA Bordeaux 80p.
55. Morel, C., Tiessen, H. et Stewart, J, 1996. ((Sensitivity to equilibration periods of phosphate sorption and isotopic exchange methods assessing Q/I relationship in soils.)) *Soil Science*, 161(7): 459{467.
56. Mortvedt, J.J.; Murphy, L.S. and Follet, R.H, 1999. *Fertilizer Technology and Application*. Meister Publishing, Willoughby, Ohio
57. Mullen L. C, 2003. Phosphorus Nutrition for Winter Crops. A fact P1.4.5, second edition. District Agronomist, Dubbo NSW Agriculture. 16p.
58. Panahi Kordlaghari Med, 1997. The effect of gypsum on the sorption reaction of phosphate in some calcareous soils. These. PH.D.Uni pf reading. DPT. soil. sci.
59. Panahi Kordlaghari Med et Rowell D.L, 2006. The role of gypsum in the reactions of phosphate with soils. *Geoderma*, Volume 132, Issues 1-2. :105-115.
60. Pereda Campos M.V, 2008. Contribution à l'étude des transporteurs de phosphate de la famille PHT1 chez le Peuplier (*Populustrichocarpa* Torr. & Gray) et le champignon ectomycorhizien *Laccariabicolor* (Maire) P. D. Orton. Thèse de doctorat. Biologie Végétale et Forestière. Nancy (France), 141p.
61. Parent L E., 2003 - le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Colloque sur le phosphore - Une gestion éclairée. Ordre des agronomes du Québec. 27p
62. Parent L E, 2002. Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Colloque sur le phosphore - Ordre des agronomes du Québec, Drummondville.
63. Perrott, K. W., Langdon, A. G. et Wilson, A. T, 1974. ((Sorption of phosphate by aluminum- and iron(III)-hydroxy species on mica surface.)) *Geoderma*, 12: 223{231.
64. Priya P., SAHI S.V, 2009. Influence of phosphorus nutrition on growth and metabolism of Duo grass (*Duo festulolium*). *Plant Physiology and Biochemistry* 47 31–36.
65. Qadir, M., D. Steffens and E. Schubert, 2003. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation. *Land Degr. Dev.*, 14: 301–307
66. Rolston D.E., RAUSCHKOLB R.S., HOFFMAN D. L, 1975. Infiltration of organic phosphate compounds in soil. *Soil Sci. Soc Amer. Proc.* 39: 1089-1094.
67. Samadi, A. et Gilkes, R. J, 1998. ((Forms of phosphorus in virgin and fertilized calcareous soils of western Australia.)) *Australian Journal of Soil Research*, 36: 585{601. .
68. Schachtman D.P., REID R.J., AYLING S.M., 1998. Update on phosphorus uptake. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Phys.* 116, 447–453.

69. Schwertmann, U. et Herbillon, A. J, 1992. Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils page 47{59. A special publication n 29
70. Strong, J. and G. G. Racz, 1970. Reaction products of applied orthophosphate in some Manitoba soils as affected by soil calcium and magnesium content and time incubation. *Soil Sci.* 110:258-262.
71. Waskom, 2000. Phosphorus in runoff impairs surface water quality. *Agronomy news J.* V. 20 . Issue 3.
72. Xiao R, Bai JH, Gao HF, Huang LB, Deng W, 2012. Spatial distribution of phosphorus in marsh soils of a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient. *CATENA* 98:96–103
73. Zhao , X. X. Zhong ; H. Bao ; H. Li ; C. Li ; D. Tuo ; Q. Lin and P.C. Brookes,. 2007 .Relating soil P concentrations at which P movement occurs to soil properties in Chinese agricultural soils. *Geoderma* 142 : 237-244.
- 74.