



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA
FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET DES SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en sciences agronomiques
Spécialité: Agriculture et environnement en régions arides.

THÈME

*Effet du mode d'apport de la fumure phosphatée
sur une culture de blé en sol calcaire*

Présentée par. Mme Ben aissa khaddouj

Président : M. BEN ZIOUCHE S

M.C.A Université Mohamed Khider - Biskra.

Promoteur: M. MASMOUDI A

M.C.A Université Mohamed Khider - Biskra.

Examineur : M. BEN KHALED A

Prof. Université Mohamed Khider - Biskra.

Examineur : M. BEN AZIZA A

M.C.A Université Mohamed Khider - Biskra.

Année universitaire: 2017 - 2018

Remerciements



Je remercie en premier lieu mon Dieu qui m'a donné le courage et la volonté afin de poursuivre des études en post-graduation.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements et mon grand respect plus particulièrement à mon encadreur monsieur MASMOUDI ALI. D'avoir honoré et accepté d'assisté dans ce travail et de sa disponibilité, son savoir, ses corrections, ses conseils judicieux et l'aide qui m'apporté pendant la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier Monsieur BENZIOUCHE S, Maitre de Conférences "A" à l'Université de Biskra qui a bien voulu présider le jury de soutenance. Mes vifs remerciements s'adressent aussi à Messieurs BENAZIZA A, Maitres de Conférences "A" à l'Université de Biskra et BENKHALED A, Professeur à l'Université de Biskra, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce document en acceptant de faire partie du jury pour l'examiner et évaluer son contenu.

Je voudrais remercier de façon particulière M. GUIMEUR K, chef de département des sciences d'Agronomie Université Mohamed Khider – Biskra.

Mes sincères remerciements à nos enseignants du département des sciences agronomiques pour les efforts consacrés et la formation qui nous ont donné, et tout le personnel du département des Sciences Agronomiques de l'université de Biskra.

En fin, merci à tous ceux qui ont rendu possible ce travail, et même s'ils ne se retrouvent pas dans cette petite liste, ils sont dans mes pensées.

Merci encore une fois



Résumé

L'application des engrais phosphatés dans les sols calcaires provoque généralement certains problèmes pour la fertilisation phosphatée, car le phosphore est négativement influencé par les carbonates de calcium. En effet une partie importante de phosphore ajouté au sol sous formes d'engrais minéral sera bloqué ou rétrogradé ce qui diminue l'efficacité de la fertilisation phosphatée dans ce type de sol. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui vise à étudier l'impact de différents modes d'apport d'engrais phosphaté (TSP) sur une culture de blé (var.MBB) en sol calcaire. Nos résultats obtenus montrent que l'apport de phosphore a un effet positif sur la croissance et le rendement de la culture, la nutrition phosphatée et la richesse du sol en phosphore assimilable. Aussi, la localisation d'engrais phosphaté nous permet de minimiser le risque de blocage et de rétrogradation des ions phosphatés par le carbonate de calcium. En plus, la pulvérisation foliaire constitue une solution efficace pour ce problème, ainsi que l'application de ces deux modes en commun.

Mots clé : phosphore, calcaire, fertilisation, blocage, rétrogradation.

Abstract

Application of phosphate fertilizers in calcareous soils usually causes problems because phosphorus is strongly bound to calcium carbonates. Indeed, a large part of phosphorus added to the soil in the form of mineral fertilizer will be blocked or downgraded which decreases the efficiency of phosphate fertilization in this type of soil. It is in this context that our work aims to study the impact of different modes of supply of phosphate fertilizer (TSP) on a wheat crop (var.MBB). Our results show that the application of phosphorus has a positive effect on the growth and the yield of the culture, the phosphate nutrition of the crop and the richness of the soil in assimilable phosphorus. So the localization of phosphate fertilizer allows us to minimize the risk of blocking and retrogradation of the phosphate ions by the calcium carbonate. In addition, spraying is an effective solution to this problem, as well as the application of these two modes in common.

Keywords: Phosphorus, calcareous, fertilization, blockage, retrogradation.

المخلص

التسميد الفوسفاتي في التربة الكلسية يشكل على العموم مشكل لأن الفسفور شديد الارتباط مع الكلس. ومنه جزء كبير من الفسفور المضاف إلى التربة على شكل سماد معدني يكبح أو يتقهقر هذا ما يسبب نقص في فعالية التسميد الفوسفاتي في هذا النوع من التربة. في هذا المجال الدراسة التي أجريناها تهدف إلى دراسة نمط وضع السماد الفوسفاتي (TSP) على نبات القمح (صنف محمد بن بشير). النتائج المحصل عليها تثبت إضافة الفسفور لها أثر إيجابي على نمو و مردود النبات، التغذية الفوسفاتية للنبات و ثراء التربة بالفسفور المتاح. أيضا تركز السماد الفوسفاتي يسمح بالتقليل من كبح و تقهقر الفسفور بسبب الكلس. كذلك الرش يشكل حل فعال لهذا المشكل و أيضا تطبيق النمطين معا.

الكلمات الرئيسية: الفسفور، الكلس، التسميد، كبح، تقهقر.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
Introduction générale	2
Première partie : Synthèse bibliographique	5
Chapitre I : Généralité sur le phosphore dans le sol	6
I. Généralité sur le phosphore dans le sol	6
1) Etats de phosphore dans le sol	6
1.1) Le phosphore total	6
1.1.1) Le phosphore minéral	6
1.1.2) Phosphore organique	7
1.2) Le phosphore assimilable	7
1.3) Le comportement de phosphore dans le sol	8
1.3.1) Forme soluble dans la solution du sol	8
1.3.2) Phosphore adsorbé ou facilement échangeable	8
1.3.3) Forme moins facilement échangeable	9
1.3.4) Forme insolubles	10
1.3.5) Forme organique	10
1.2) Les relations entre les différentes formes de phosphore	10
II. L'alimentation phosphatée des cultures	12
1) Importance et rôles de phosphore dans la vie de végétal	12
2) Le potentiel alimentaire du sol en phosphore	13
3) Rythmes d'absorption et exigences nutritionnelles en phosphore des plantes	14
4) Symptômes de carence et d'excès en phosphore chez les végétaux	15
Conclusion	16
Chapitre II : Généralités sur les accumulations calcaires dans le sol et leur effet sur le phosphore	17
I.1. Présentation générale des sols calcaires	17
I.1.1. Définition des sols calcaires	17
I.2. Les différentes formes des accumulations calcaires	17

I.3. Propriétés des sols calcaires	19
I.4. Les sols calcaires en zone méditerranéens et en Algérie	20
I.5. Effet du calcaire sur le phosphore et la fertilisation phosphaté	21
II. Cycle de phosphore en sol calcaire	24
Conclusion	26
Deuxième partie : Matériels et méthodes d'étude	27
1) Objectif de travail	27
2) Description générale de la région d'étude	28
2.1) Situation géographique et limite	28
2.2. Climat de la région d'étude	29
1. Température	30
2. Précipitation	30
3. Humidité	30
4. Vent	30
2.3. Synthèse climatique : diagramme ombrothermique de Gaussen	30
Méthodologie expérimentale	31
I. Matériel d'étude	31
I.1. Matériel végétal	31
I.2. Engrais phosphaté utilisé	31
I.3. Choix et Caractéristiques de site expérimental	32
II. Méthode d'étude	33
II.1. Méthodologie de travail	33
II.2. Dimensions du dispositif expérimental	33
III. 3. Traitements réalisés	34
II.4. Techniques culturales	34
1. Précédent cultural	34
2. Le travail de sol	34
3. La fertilisation minérale	34
4. Le semis	34
5. L'irrigation	35
6. Le désherbage	35
7. Récolte	35
III.1. Paramètres étudiés	35
1. Composantes du rendement	35

2. Rendements	35
3. Hauteur des plantes à la maturité	35
4. Dosage de phosphore assimilable	36
VI. Traitements statistiques	36
Troisième partie : Résultats et discussion	37
I- Action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur la croissance des plantes au stade récolte	38
II-Action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur le rendement et ces composantes	41
1. Nombre de grains par épi	41
2. Nombre d'épi par mètre carré	43
3. Poids de mille grains	45
4. Rendement théorique	47
5. Rendement machine	49
6. Rendement paille	51
Conclusion	53
III- Action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur la nutrition des plantes en P₂O₅	54
1. Prélèvement du phosphore par les plantes au stade tallage	54
2. Prélèvement du phosphore par les plantes au stade montaison	56
3. Prélèvement du phosphore par les plantes à la maturité	59
➤ Teneur des grains en P₂O₅	59
Conclusion	60
IV- Action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur la richesse du sol en phosphore assimilable	61
1. Richesse du sol en phosphore assimilable au stade tallage	61
2. Richesse du sol en phosphore assimilable au stade récolte	63
Conclusion	66
Etude des corrélations	67
Conclusion générale	68
Références bibliographique	72
Annexes	80

Liste des figures

Figure 1 :Les relations entre les différentes formes de phosphore dans le sol	11
Figure n° 2.Cycle de phosphore en sol calcaire	25
Figure n° 3. Situation géographique de la wilaya de Biskra	28
Figure n°4.Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN de Biskra (2006-2015)	30
Figure n° 5. Dispositif expérimental	33
Figure n° 6 : Hauteur des plantes au stade récolte	38
Figure n° 7: Nombre de grains par épi	41
Figure n° 8: Nombre d'épi par mètre carrée	43
Figure n° 9: Poids mille grains (g)	45
Figure n° 10: Rendement théorique (qx/ha)	47
Figure n° 11: rendement machine (qx/ha)	49
Figure n° 12: Rendement paille (qx/ha)	51
Figure n° 13: Evolution de la teneur du végétal en P₂O₅ au stade tallage	54
Figure n° 14: Evolution de la teneur du végétal enP₂O₅au stade montaison	56
Figure n° 15: Evolution de la teneur des grains enP₂O₅	59
Figure n°16: Evolution du phosphore assimilable au stade tallage	61
Figure n° 17: Evolution du phosphore assimilable au stade récolte	63

Liste des tableaux

Tableau n° 1. Données climatiques de la région de Biskra (2006-2015)	29
Tableau n° 2. Caractéristiques Physico-chimiques du sol exploité	32
Tableau n° 3. Tableau d'analyse de la variance relative à la hauteur des plantes	40
Tableau n° 4. Tableau d'analyse de la variance relative au nombre de grains par épi	43
Tableau n° 5. Tableau d'analyse de la variance relative au nombre d'épi par mètre carrée	45
Tableau n° 6. Tableau d'analyse de la variance relative au poids mille grains	47
Tableau n° 7. Tableau d'analyse de la variance relative au rendement théorique	48
Tableau n° 8. Tableau d'analyse de la variance relative au rendement machine	51
Tableau n° 9. Tableau d'analyse de la variance relative au rendement paille	53
Tableau n° 10. Tableau d'analyse de la variance relative à la teneur du végétal en P₂O₅ au stade tallage	56
Tableau n° 11. Tableau d'analyse de la variance relative à la teneur du végétal en P₂O₅ au stade montaison	58
Tableau n° 12. Tableau d'analyse de la variance relative à la teneur des grains en P₂O₅ au stade maturation	60
Tableau n° 13. Tableau d'analyse de la variance relative à l'évolution du phosphore assimilable au stade tallage	63
Tableau n° 14. Tableau d'analyse de la variance relative à l'évolution du phosphore assimilable à la maturité	66
Tableau n° 15. Matrice de corrélation (Pearson)	67

Introduction générale

La situation algérienne actuelle en termes de production agricole se classe dans la catégorie la plus faible, elle nécessite une meilleure prise en charge d'amélioration notamment les cultures stratégiques de large consommation dont la plus importante la culture des céréales en particulier la culture de blé. Selon **DJERMOUN (2009)**, en Algérie les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire où la consommation des produits céréaliers se situe à un niveau d'environ 205 kg /hab/an (**CHEHAT, 2007 in DJERMOUN 2009**).

Face à ce manque en ces produits alimentaires et pour satisfaire les besoins de la population croissante, l'Algérie oriente vers l'importation, elle est actuellement le 4^{ème} importateur mondial de blé et la production nationale ne couvre que 30 % des besoins nationaux (**BOUKHALFA-DERAOUI et al, 2011**). Les produits céréaliers occupent le premier rang (39,22 %), devant les produits laitiers (20,6 %), le sucre et sucreries (10 %) et les huiles et corps gras (10 %) (**DJERMOUN, 2009**). Pour faire face à ces besoins sans cesse croissants, l'Algérie importe actuellement environ 18 millions de quintaux de produits du blé dur pour répondre à la demande qui représentent 60 % des besoins nationaux. Environ 40 % de la demande de produits de blé dur est importée sous forme de semoule (**BENBELKACEM et al, 1995**). Les rendements moyens en blé à l'échelle nationale sont assez faibles soit 10-12 qtx/ha bien que les surfaces occupées soient très élevés proches d'un million d'ha ce qui représente l'équivalent de 40-45 % de la surface agricole utile (**AMIR, 2014**). Cette situation grave malgré la vaste superficie agricole et la possibilité de produire et de satisfaire nos besoins nationaux dus aux nombreux problèmes dont le principal l'aridité de climat. Selon les statistiques **FAO (2015)**, l'agriculture reste stable dans la croissance économique nationale depuis les années 1980, mais est très variable d'année en année car très dépendante des conditions climatiques et en particulier des précipitations.

L'Afrique contient 37 % de zones arides. En Algérie, ces dernières représentent près de 95 % du territoire national, dont 80 % dans le domaine hyper aride. Ces chiffres traduisent à eux seuls l'intérêt de ces régions sur le plan socioéconomique (**HALITIM, 1988**). Cependant, jusqu'à présent ces terres arides n'ont pas bénéficié et n'ont pas exploité de façon correcte.

Les sols sahariens sont généralement pauvres en éléments nutritifs, la fertilisation raisonnée reste à l'heure actuelle le moyen le plus efficace pour l'obtention d'une productivité optimale (**HALILAT, 2004**). Si le sol est pauvre en l'un seulement des éléments indispensables aux plantes, la croissance de celles-ci est limitée et leurs rendements réduits. Si nous voulons obtenir de bons rendements, nous devons fournir aux cultures les éléments dont

le sol n'est pas suffisamment pourvu (**FAO, 2003**). L'utilisation rationnelle des engrais doit être basée sur la connaissance de la richesse initiale du sol en éléments fertilisants et leur disponibilité en périodes de forte utilisation par les cultures et de l'objectif du rendement souhaité (**BOUKHALFA-DERAOUÏ et al, 2011**).

Les engrais sont des produits inorganiques ou organiques contenant des éléments nutritifs qui sont apportés aux sols pour fournir les quantités nécessaires d'un ou de plusieurs éléments essentiels pour les plantes, parmi lesquels les engrais phosphatés qui assurent une bonne production aussi bien quantitative que qualitative. Le phosphore avec l'azote et le potassium, l'un des trois nutriments indispensables à la croissance des végétaux, ils sont considérés comme des éléments majeurs ou macroéléments, le phosphore est nécessaire de présenter en quantité importante dans le sol car il joue un rôle déterminant dans le transfert d'énergie. Aussi est-il indispensable à la photosynthèse et autres processus chimico-physiologiques de la plante. Il est essentiel à la différenciation cellulaires et le développement des jeunes tissus à partir desquels se fait la croissance de la plante. Il entre dans la composition des acides nucléiques et donc dans la composition de l'ADN où est inscrit le code génétique, ainsi que dans celle de l'ARN qui permet la transcription de l'information génétique en protéines. Il est impliqué dans les transferts d'énergie à l'intérieur des cellules par l'intermédiaire de molécules telles que l'ATP. Il joue un rôle important dans le métabolisme énergétique, la synthèse et le métabolisme des glucides, participe à la composition du noyau cellulaire et se concentre dans les organes reproducteurs du végétal (**SCHEINER, 2005**).

Newman (1995) montre que la vitesse de libération de phosphore par l'altération des roches varie entre 0,05 et 1 kg P/ha/ an et dans certains cas elle pourrait atteindre 5 kg/ha/ an. Les travaux de Carl Sprengel publiés en 1826, Justus Von Liebig publiés en 1840 les principes de base de la nutrition minérale des cultures démontrant que les apports de phosphore étaient indispensables pour augmenter le rendement des cultures (**ROBIN et BLONDEL-MEGRELIS, 2001 ; BOULAINÉ, 1992 in FROSSARD et al, 2004**). Les travaux de Lawes et de Murray pendant la première moitié du XIX^{ème} siècle en Angleterre et en Ecosse permettaient de démarrer la production industrielle des engrais phosphatés minéraux à partir de la dissolution d'os puis de phosphates naturels en milieu acide. Ce sont ces apports d'engrais phosphaté qui supprimant la carence en phosphore des cultures, ont permis une augmentation des rendements (**BOULAINÉ, 1992 in FROSSARD et al, 2004**).

La fertilisation phosphatée a toujours posé des problèmes importants. En effet le phosphore est soumis à diverses contraintes physico-chimiques, et il convient de définir leur importance dans le milieu calcaire et les méthodes nécessaires pour parvenir à une utilisation

rationnelle des engrais phosphatés (**DUTIL, 1976**). La méthode, l'époque et la dose d'application des engrais phosphatés influent sur l'importance de la réponse à la culture obtenue et ainsi sur l'efficacité de l'engrais en vue de la production d'un revenu économique rentable pour la production agricole (**BARBAR, 1977**).

Comme dans tous les pays du pourtour de la Méditerranée, les sols contiennent souvent du calcaire, dans un ou plusieurs de leurs horizons (**RUELLAN, 1971**), notamment en Algérie, où on les rencontre aussi bien dans les régions semi-arides et arides (**HALITIM, 1988**). L'application des engrais phosphatés dans les sols calcaires provoque généralement certains problèmes ; cet élément est fortement lié aux carbonates de calcium il trouve des difficultés d'assimilabilité dans ce type de sol. En effet une partie importante de phosphore ajouté au sol sous formes d'engrais minéral sera bloqué ou rétrogradé suite à une réaction avec le calcaire ce qui diminue l'efficacité de la fertilisation phosphatée dans ce type de sol.

Un des objectifs des agronomes en matière de fertilisation phosphatée est de fournir aux agriculteurs des conseils fiables et précis afin de placer les cultures dans une situation où leur nutrition phosphatée n'est pas le premier des facteurs limitant la production (**MOREL et al, 1992**). C'est pourquoi nous proposons d'étudier l'effet de différents types d'apport d'engrais phosphatés (TSP) sur le comportement et le rendement d'une culture de blé en sol calcaire dont l'objectif est de trouver une solution efficace pour éviter le problème de blocage de cet élément dans ce type de sol.

Afin d'obtenir cet objectif nous avons réalisé un travail divisé en trois (03) parties :

Première partie : Consacrée à une synthèse bibliographique faisant ressortir d'une part les différentes formes du phosphore dans le sol et leur importance dans l'alimentation minérale du végétal et d'autre part l'influence des sols calcaires sur la dynamique et la mobilité de ce dernier.

Deuxième partie : Cette partie présente la région d'étude, le matériel utilisé et la méthode suivie dans ce travail.

Troisième partie : Elle sera consacrée à la présentation des résultats obtenus et à leur discussion.

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Généralité sur le phosphore dans le sol et l'alimentation phosphatée des cultures

Le phosphore est l'un des éléments majeurs responsables à la croissance des plantes leur insuffisance peut provoquer un déséquilibre de développement des végétaux et un chute ou un blocage de rendement donc le contrôle de richesse du sol en cet élément est important pour assurer une rentabilité des cultures.

I. Généralité sur le phosphore dans le sol :

1) États de phosphore dans le sol

Le phosphore est l'élément le plus anciennement connu. Il se présente dans le sol soit à l'état minéral ou organique, ces deux derniers constituent ensemble le phosphore total dont seulement une partie de lequel est assimilable par les plantes.

1.1) Le phosphore total :

Il correspond à la quantité totale que renferme le sol et qui existe sous la forme minérale ou organique. La quantité de phosphore présente dans un sol est donc la conséquence directe de la richesse de la roche mère (PEREDACAMPOS, 2008). Les sols dérivant des roches ignées sont plus riches en phosphore totale que les roches issues des roches sédimentaires (DUTHIL, 1973). A l'état naturel, les sols contiennent de un à trois tonnes de phosphore par hectare dans les premiers 20 centimètres (BEAUDIN et al, 2008). Dans les sols dérivés de roches sédimentaires, ces teneurs, sont, en moyenne, comprise entre 0,3 et 1 ‰, dans les roches dérivées des roches cristallines ou volcaniques, elles sont beaucoup plus importantes et varient entre 1 et 4 ‰ (SCHVARTZ et al, 2005). Mais 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 (PEREDACAMPOS, 2008).

1.1.1) Le phosphore minéral :

Le phosphore minérale se trouve essentiellement sous forme de composés orthophosphates. Il se trouve souvent lié avec le fer, le calcium et l'aluminium (MASMOUDI, 1998).

Le phosphore minéral généralement plus abondant que le phosphore organique (**GACHON, 1969**). C'est le phosphore inclut dans des minéraux comme les apatites, dans tous les composés d'oxyde-hydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi que dans les phosphates tricalciques associés à un calcaire actif (très insolubles dans les milieux calcaires) (**SCHEINER, 2005**).

Le phosphore inorganique contient 170 formes minérales dans le sol (**HOLFORD, 1997**), il ajoute que dans la majorité des sols altérés les apatites sont les minéraux dominants sous la forme chimique générale $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$ où le X exprime des anions comme le F^- , Cl^- , OH^- ou CO_3^{2-} .

1.1.2) Phosphore organique

Le phosphate organique est présent comme phosphates d'inositol, phospholipides, acides nucléiques et divers autres esters de phosphate qui sont issus de la dégradation de la matière organique et ils sont souvent immobilisés par sorption et fixation aux colloïdes du sol (**MARSCHNER, 1995 in PEREDA CAMPOS, 2008**).

Dans les sols cultivés de longue date, sa proportion varie entre 25 et 30 % du phosphore total, tandis que dans les zones dotées d'une couverture végétale permanente naturelle (forêts et prairies), elle oscille entre 75 et 80% (**FARDEAU et CONESA, 1994 in SCHEINER, 2005**). Le phosphore organique n'est pas à priori assimilable par les plantes, il est capable d'être utilisable par les cultures grâce à l'action des micro-organismes responsable de la minéralisation de l'humus. **ELIARD (1979)**, estime que le phosphore organique peut contribuer pour une part importante à l'alimentation de la plante (jusqu'à 30 % dans certains cas).

1.2) Le phosphore assimilable :

Appelé aussi « réserve assimilable » ou « fraction labile », c'est le phosphore susceptible d'être absorbé par les racines (**BAIZE, 2000**). D'après **GACHON (1977)**, les réserves assimilables du sol susceptible d'approvisionner les racines des végétaux en phosphore et de participer ainsi à l'alimentation des cultures, constituent seulement une petite partie du phosphore présent dans le sol généralement 10 à 30 % du phosphore total. Les formes absorbées par la racine sont les ions phosphates dissous c'est-à-dire H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} dont la proportion relative varie avec le pH du sol généralement. La solution des sols agricoles, qui est la principale source de phosphore pour les racines des plantes, contient 0,01 à 3,00 mg/l du phosphore (**FROSSARD et al, 2000**). Le rôle de la solution

est donc majeur puisque sans solution il n'y aura pas de prélèvement (**MOREL et al, 2011**).

GERVY(1970), estime qu'un sol est considéré comme riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 0,3‰, moyennement riche quand cette dernière est comprise entre 0,15 ‰ et 0,3 ‰, et pauvre quand elle est inférieure à 0,15‰.

1.3) Le comportement de phosphore dans le sol :

Les différentes formes de phosphore dans le sol sont classées selon différents critères: la nature des composés phosphorés, le fractionnement chimique ou l'échange ionique. La nature des composés phosphorés permet de séparer le phosphore organique du phosphore inorganique (**PEREDA CAMPOS, 2008**).

1.3.1) Forme soluble dans la solution du sol :

Le phosphore de la solution du sol constitue moins de 1% du phosphore total, mais est la source principale de phosphore pour les végétaux (**PEREDA CAMPOS, 2008**). Selon **MOREL (1996)**, C'est le phosphore dissout dans la solution du sol, forme ionisée de l'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. D'après **ELIARD (1979)**, sa concentration est très faible : 0,2 à 0,5 mg/l, cela présente moins de 1 kg/ha dans la terre exploitée par les racines.

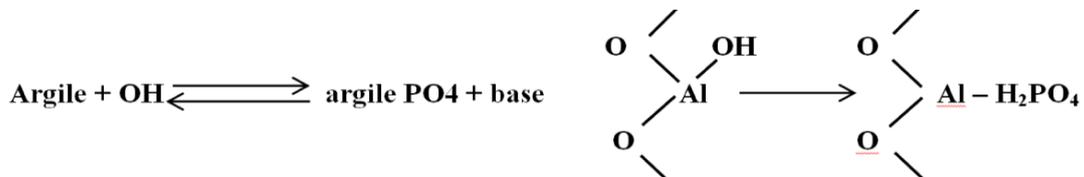
La solution du sol dissout une faible quantité de phosphore à cause de la faible solubilité des composés phosphatés par le pH. Cependant il faut noter que la concentration de cette solution reste sensiblement constante de fait des échanges continus avec le phosphore adsorbé. En cas de prélèvement par les racines, ce sont les réserves du sol aisément échangeable qui libèrent des ions phosphoriques de façon à élever la teneur de la solution du sol jusqu'à son niveau initial (**MASMOUDI, 1998**).

1.3.2) Phosphore adsorbé ou facilement échangeable :

Ce sont les ions phosphoriques adsorbés sur le complexe adsorbant du sol ; ils participent aux échanges constants (sol-solution) et constituent l'essentiel du «pool alimentaire » des plantes (**FARDEAU, 1991 in MIHOUB, 2012**). C'est l'ensemble des ions phosphoriques adsorbés sur les argiles, soit directement sur leurs surfaces ou par l'intermédiaire d'un cation (**MASMOUDI, 1998**).

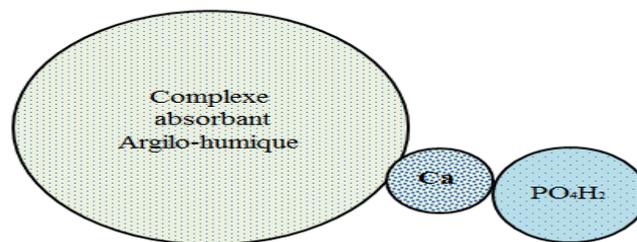
1.3.2.1) Adsorption directe :

Cette adsorption se fait sur les bords ou cassures du réseau des argiles qui mettent à nu des atomes Al^{+++} et de Fe^{+++} susceptible de prendre un hydroxyle et d'accueillir l'anion phosphorique (MASMOUDI, 1998).



1.3.2.2) adsorption indirecte :

L'acide phosphorique est un anion, et ne peut être retenu par le complexe que par l'intermédiaire d'un cation: fer, aluminium mais plus généralement le calcium (LAMBERT, 1979). Des cations bivalents principalement Ca^{++} peuvent servir de ponts entre l'argile et les ions phosphoriques (MASMOUDI, 1998).



C'est la forme de réserve qui alimente la solution du sol lorsque la plante se nourrit dans celle-ci. Un sol moyennement pourvu en contient environ 20 ‰ (ELIARD, 1979).

1.3.3) Forme moins facilement échangeable :

Les hydroxydes métalliques du sol sous forme colloïdale fixe directement les anions phosphoriques grâce à leur charge positive. Dans les sols acides, ces hydroxydes métalliques présentent un pouvoir adsorbant élevé vis à vis des ions phosphoriques. Les complexes alumino-ferri-phosphoriques formés sont difficiles à dissocier. La libération de P_2O_5 est lente, elle devient plus facile à un pH neutre et totale à un pH alcalin (GROS, 1979).

1.3.4) Forme insolubles :

L'acide phosphorique H_2PO_4 est un triacide qui donc donne 3 types de sel selon qu'une, deux ou trois fonctions acides sont neutralisées par les cations. Par exemple, le calcium :

- Phosphate mono-calcique $Ca(H_2PO_4)_2$ est soluble.
- Phosphate bi- calcique $Ca_2(H_2PO_4)_2$ est peu soluble.
- Phosphate tricalcique $Ca_3(H_2PO_4)_2$ est insoluble.

Il existe dans le sol des phosphates tricalciques (apatite par exemple) insoluble, de même qu'en sols acides des phosphates de fer et d'aluminium : le phosphore ainsi combiné est inutilisable par la plante (**ELIARD, 1979**).

Néanmoins, des modifications de pH, l'effet de rhizosphère, l'action de la matière organique, l'activité microbienne et l'utilisation directe des phosphates minéraux par plusieurs espèces végétales font que ces formes de phosphore exercent un rôle non négligeable dans la nutrition des plantes (**MASMOUDI, 1998**).

1.3.5) Forme organique :

Le phosphore organique représente de 20 à 80 % du phosphore du sol (**PEREDA CAMPOS, 2008**). La matière organique du sol contient du phosphore emprisonné dans des molécules organique, ce phosphore est soumis au processus de minéralisation. La minéralisation des composés organiques permet de libérer une quantité de phosphore accessible à la végétation. Mais cette quantité est faible ; elle est de l'ordre de 1 à 2 % par an (**HECK et HANOTIAUX, 1982 in MASMOUDI, 1998**). Le phosphore organique est l'objet d'une lente minéralisation qui le rend progressivement disponible pour les végétaux (**PEREDA CAMPOS, 2008**).

1.4) Les relations entre les différentes formes de phosphore :

Selon **BOCKMAN et al (1990)**, la dynamique du phosphore peut défini comme étant le passage des ions phosphatés d'un état à un autre sous l'effet de différents mécanismes physico-chimiques et biologiques. Les relations entre les différentes formes de phosphore dans le sol se résument dans la figure suivante :

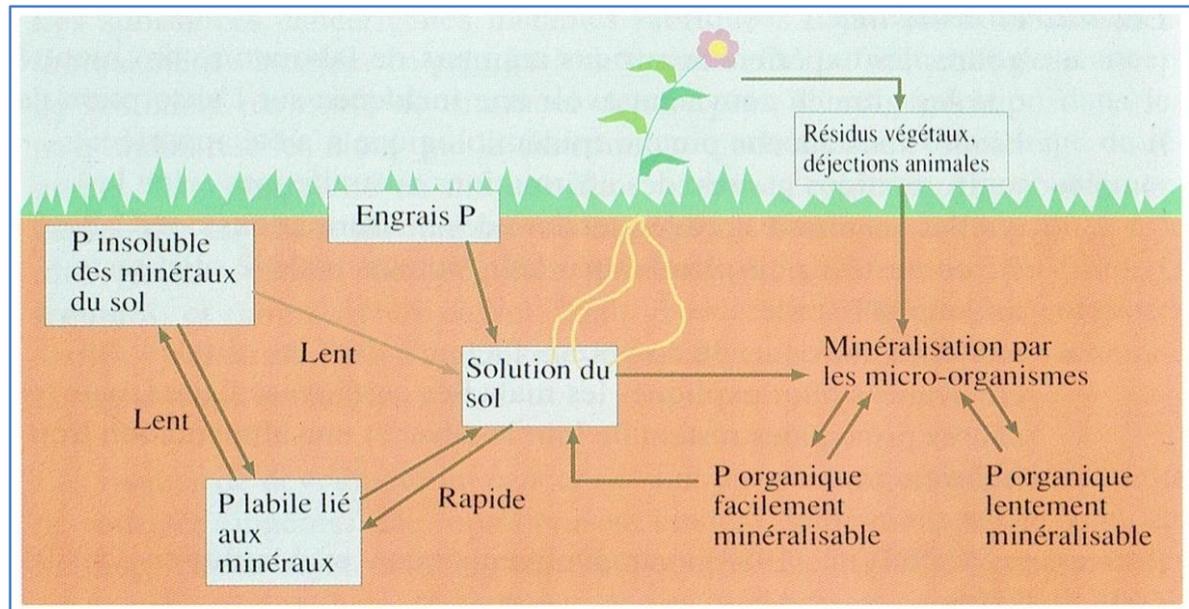


Figure n°1 : Les relations entre les différentes formes de phosphore dans le sol illustrées par (BOCKMAN *et al*, 1990).

Le passage d'une forme à une autre est réversible mais la vitesse de phénomène varie considérablement. La concentration en phosphate de la solution du sol est faible (de l'ordre de 0,03 à 0,2 mg/l). Lorsque les plantes sont en pleine croissance, la solution du sol s'appauvrit rapidement, mais elle est réapprovisionnée dans un délai de quelques heures à quelques jours par les réserves de phosphore labiles (BOCKMAN *et al*, 1990).

Le phosphore non labile présent dans les minéraux et la matière organique du sol se libère très lentement. Sa mise à disposition demande des semaines, voire des mois. Ces vitesses de libération dépendent de nombreux facteurs ; l'acidité du sol en particulier joue un rôle important (BOCKMAN *et al*, 1990).

L'approvisionnement de la solution du sol à partir des formes de phosphates non-labile est trop lent pour permettre une alimentation correcte des plantes (BOCKMAN *et al*, 1990).

II. L'alimentation phosphatée des cultures :

1) Importance et rôles de phosphore dans la vie de végétal :

Le phosphore est un macronutriment important pour le végétal, présent environ 0,2% du poids sec d'une plante (DANIEL *et al*, 1988). Le phosphore se trouve dans tous les tissus de la plante avec une concentration variable selon la partie de végétal. Cette variation de concentration est due aux rôles physiologiques de ce dernier dans les processus fondamentaux de la vie des végétaux. La concentration en phosphore est la plus forte dans les organes les plus jeunes, notamment dans les méristèmes et le vieillissement d'un organe se traduit toujours par une baisse de la concentration en phosphore sous le double effet d'un processus de dilution par les métabolites biosynthétisés et des processus de transfert de métabolites phosphorés vers les organes de réserves, notamment vers les organes reproducteurs (GACHON, 1983). Les concentrations de phosphore dans les tissus végétaux varient entre 0,1 et 0,5 % (VALE, 2010).

Le phosphore joue plusieurs rôles dans la vie des plantes, en particulier lors des stades de multiplication cellulaire. Les principaux rôles sont :

- Constituant de l'ATP : l'ATP fournit toute l'énergie nécessaire pour toutes les réactions de synthèse; formation de protéines, hydrates de carbone, d'acides nucléiques et autres réactions exigeant de l'énergie (VALE, 2010).
- Le phosphore a un rôle de régulation ; il favorise la fécondation, la mise à fruit et la maturité des fruits (GROS, 1979).
- Composant structurel des acides nucléiques (supports du patrimoine génétique) : le phosphore est nécessaire pour la réplication et la transcription de l'ADN (VALE, 2010).
- Il contribue à la rigidité des tissus et favorise donc la résistance à la verse (VALE, 2010).
- Il a été montré que le phosphore améliore la réponse de plusieurs cultures à la fertilisation azotée, surtout les céréales. Pour que les plantes utilisent le supplément d'azote (par exemple pour la synthèse des protéines ou de la chlorophylle), elles ont besoin de plus de phosphore pour fournir l'ATP nécessaire (MOUGHLI, 2000).

- Il permet une augmentation de la résistance au froid et aux maladies (**VALE, 2010**).
- Il a également été montré que le phosphore améliore la réponse de plusieurs cultures à la fertilisation azotée, surtout les céréales (**GROS, 1979 ; VALE, 2010**).
- Il agit dans plusieurs activités biochimiques : respiration, métabolisme glucidique, synthèse des protéines, il est indispensable à la photosynthèse et aux processus chimico-physiologiques de la plante (**LAMBERT, 1979**).
- Le poids du grain et la composante du rendement la plus influencée par un apport de phosphore (**MASMOUDI, 1998**).

2) Le potentiel alimentaire du sol en phosphore :

Selon **GACHON (1983)**, le potentiel alimentaire du sol est défini comme l'aptitude du sol à fournir aux surfaces absorbantes des racines un flux d'ions phosphatés d'intensité variables. Ce flux dépend de la masse auto-échangeable et aussi de l'énergie avec laquelle les ions phosphoriques sont fixés sur les adsorbants du sol et qui commande la vitesse de la désorption. La nutrition phosphatée est assurée par l'ensemble des ions phosphates de la solution du sol (**FARDEAU, 1981 in HAFIDI et al, 1994**). La disponibilité du phosphore pour la plante (biodisponibilité) diffère largement suivant le type de sol (**MOREL, 1988 in HAFIDI et al, 1994**). La nutrition phosphatée des plantes dans un sol peut dépendre de la vitesse de renouvellement des ions phosphate de la solution du sol par des ions de la phase solide (**FARDEAU et al, 1991**).

L'augmentation de la réserve assimilable du sol favorise doublement l'alimentation phosphatée des cultures en augmentant la masse du phosphore disponible et facilitant l'utilisation de ces réserves par les plantes, suite à l'abondance du pool d'ions auto-échangeable, se traduit par un coefficient de partage entre phase liquide et solide réalisé à l'équilibre (**GACHON, 1977**). Mais l'offre potentielle n'est réellement utilisée par les plantes que dans la limite où les ions phosphoriques parviennent au contact des surfaces racinaires.

Deux aspects principaux assurent le transfert des ions vers les racines :

- Transfert par l'eau : les déplacements de cette phase liquide vers les racines sous l'effet du flux transpiratoire et la gravité ne couvre que 2,5 % seulement des besoins de la plante en phosphore (**BLANCHET, 1965**).
- La diffusion : c'est l'ensemble des mouvements propre des ions qui se produisent sous l'influence d'un champ électrique. En raison de leur faible mobilité propre, de leur faible concentration dans la solution de sol et de leur adsorption intense, leur diffusion ne s'effectue que sur des distances très réduites de l'ordre de millimètre (**BERBER, 1966 in GACHON, 1977**).

Il en résulte que le degré d'utilisation réelle de l'offre potentielle du sol par la culture est étroitement lié à la densité racinaire (**GACHON, 1983**).

3) Rythmes d'absorption et exigences nutritionnelles en phosphore des plantes :

Le phosphore est utilisé par la plante sous forme entièrement oxydée et hydratée comme orthophosphates. Le phosphore est majoritairement absorbé sous forme d'ions phosphoriques, $\text{H}_2\text{PO}_4^{4-}$ ou HPO_4^{2-} , selon le pH. La forme PO_4^{3-} n'est présente qu'en infime quantité aux pH habituels des sols, y compris les sols carbonatés (**VALE, 2010**).

Selon **GERVY (1970)**, Un blé d'hiver, du semis jusqu'à la fin du tallage, ne puise que tout au plus 1 g de P/m² dont 1/10 était déjà contenu dans le grain semé.

La quantité de phosphore absorbé varie en fonction de la culture. Ainsi un blé à 90 q/ha prélève environ 75 kg P₂O₅ / ha, tandis qu'une betterave à 85 t/ha prélève au total 60 kg P₂O₅ / ha (plante entière). Pour une même culture, l'intensité de prélèvement varie au cours du cycle de végétation : le colza absorbe jusqu'à 2 kg P₂O₅ / ha / jour au mois d'avril, le blé a une absorption plus régulière d'environ 0,8 kg P₂O₅ / ha / jour de mars à juillet (**VALE, 2010**).

Les plantes ont des exigences relativement faibles soit tout au plus 50 à 60 ppm de P₂O₅ (**DUTIL, 1976**). Selon **GACHON (1983)**, les exigences des espèces de grandes cultures sont également comprises entre 0,5 et 0,75 Kg de P₂O₅ par quintal de matière sèche totale produite en fin de cycle et les demandes quotidiennes peuvent atteindre et dépasser des flux de 1 Kg de P₂O₅ par hectare au cours des phases de croissances maximum. Il est à noter que l'absorption du phosphore chez les plantes très jeunes est plus

élevée que la libération par le sol (**HERNANDO, 1977**). La vitesse d'absorption dépend surtout du pouvoir absorbant de la racine et de la concentration en phosphore à sa surface (**OLSON et al, 1977**).

4) Symptômes de carence et d'excès en phosphore chez les végétaux :

- Une présence insuffisante de phosphore dans le milieu où le végétal puise son alimentation minérale se traduit le plus souvent par des retards de croissance, un moindre développement, des accidents végétatifs et, bien entendu, une production amoindrie (**GERVY, 1970**).
- Selon **VALE (2010)**, la croissance est ralentie, les plantes sont chétives avec un aspect rigide, les feuilles âgées sont d'abord vert foncé, puis rouge violet, la tige peut également prendre une couleur rougeâtre et à un stade ultérieur les feuilles âgées meurent.
- Une sous-alimentation en phosphore peut induire une mauvaise valorisation de l'azote et du potassium (**LAMBERT, 1979**).
- Selon **ELALOUI (2007)**, la carence en phosphore peut se présenter sous un état bénin ou un état aigu. L'état bénin se manifeste par une réduction générale de la croissance ; la plante est plus élancée et les feuilles, le pétiole s'allonge, les nervures sont plus prononcées et les feuilles sont minces et se dressent. A l'état aigu, les feuilles jaunissent et se nécrosent avec un brunissement roux.

D'après **DIEHIL (1974)**, les excès de phosphore ont en générale aucun effet négatif pour la récolte. **ELALOUI (2007)**, montre qu'on peut observer rarement des symptômes d'excès en phosphore dans la nature, cet excès se manifeste par une croissance limitée et un jaunissement chlorotique général. En présence de très hautes teneurs foliaires en phosphore (de l'ordre 1 à 3 % dans la matière sèche), on observe pour le blé un flétrissement progressant de la pointe vers la base des feuilles.

Conclusion

Le phosphore est un élément chimique peu mobile, il se trouve dans le sol à l'état combiné, il peut être lié à la fraction minérale soit à la fraction organique. Ces deux formes ensemble constituent le phosphore totale dans lequel il prend plusieurs formes. La fraction assimilable qui constitue le principal réservoir d'alimentation pour les cultures représente une faible concentration on comparant à la quantité de phosphore total existe dans les sols.

Chapitre II : Généralités sur les accumulations calcaires **dans le sol et leur effet sur le phosphore**

II.1. Présentation générale des sols calcaires :

II.1.1. Définition des sols calcaires :

Les sols calcaires sont ceux qui contiennent, sur tout ou partie de leur épaisseur, du carbonate de calcium (plus éventuellement d'autres carbonates) dans la terre fine (particules < 2 mm) ou, pour le moins, dans la fraction grossière (RUELLAN, 1984).

Le carbonate de calcium, cristallisé sous forme de calcite symétrique, est le constituant essentiel de calcaire (DEO SHORTA, 1979 in DJILI et al, 1999). Le calcaire est une roche sédimentaire principalement organogène qui peut être d'origine détritique ou chimique (VATAN, 1971 ; LOZET et MATHIEU, 1990 in DJILI et al, 1999). Dans les sols, il peut provenir de l'altération de la roche mère (RUELLAN, 1976 in DJILI et al, 1999) ou de la précipitation de carbonate de calcium secondaire (RUELLAN, 1976 ; DUCHAUFEUR et SOUCHIER, 1977 in DJILI et al, 1999).

Les accumulations de calcaire sont le résultat, plus ou moins accentué, d'un même processus pédologique, processus très lent d'accumulation en profondeur (à partir de 40 à 60cm en moyenne) autour d'un système racinaire (RUELLAN, 1967).

Les carbonates principalement le CaCO_3 , apparaissent dans les sols désertiques par des formes variées comme les filaments, les efflorescences, les revêtements, les nodules, ou comme des imprégnations diffuses...etc. Fréquemment, les carbonates s'accumulent à une profondeur spécifique du profil, formant un horizon calcique (SINGER, 1995 in YUCEF, 2016).

II.2. Les différentes formes des accumulations calcaires :

D'après plusieurs auteurs le processus de formation des accumulations calcaires dans les sols due à la genèse pédologique et la genèse sédimentaire. L'étude des accumulations calcaires a montré que la diversité de leur morphologie peut être expliquée par de nombreux facteurs : âge de la surface en croûtée, nature du matériau et situation topographique. On peut distinguer :

A. Les accumulations diffuses : qui sont constituées de particules de dimensions égales ou inférieures à 1mm. Ces particules sont distribuées au hasard dans la masse de l'horizon. Leur présence, dans l'horizon, lorsqu'elle est importante, se traduit macroscopiquement, par rapport aux autres horizons, par un aspect plus clair. La teneur en CaCO_3 de l'horizon est inférieure à 40 % (RUELLAN, 1971).

B. Concentration discontinue : Il s'agit là d'une première forme d'individualisation du calcaire qui est très fréquente dans les sols et les dépôts du Quaternaire (RUELLAN, 1967). Le calcaire devient visible, il est concentré, individualisé, en un certain nombre de points séparés les uns des autres par une zone moins calcaire à distribution diffuse (ces zones peuvent même être très peu calcaire) (RUELLAN, 1977).

- **Les amas friables :** ou les "nodules farineux", sont des concentrations de calcaire, non consolidées, dispersées dans la masse d'un horizon (RUELLAN, 1967). Ce sont les taches calcaires de (WILBERT, 1962 in RUELLAN, 1967). Ils présentent des formes et des dimensions variées. Ils sont généralement de couleur blanche à crème. Ces amas présentent fréquemment un aspect farineux et leurs limites sont peut nettes. La teneur en CaCO_3 de l'horizon varie entre 50 et 60% (RUELLAN, 1971).
- **Pseudo-mycélium :** sont des accumulations filiforme et anastomosée, en position de revêtement soit à la surface des agrégats soit sur les parois des vides (BAIZE et JABIOL, 1995).
- **Les nodules ou granules :** les granules et les nodules calcaires peuvent être définis comme des amas de calcaire plus ou moins durcis, dispersés dans la masse d'un horizon, la couleur intérieure de ces amas variant du blanc au saumon (RUELLAN, 1967). Leur volume est le plus souvent sphérique et ne dépasse que rarement quelques centimètres cubes. La teneur en CaCO_3 de l'horizon varie entre 50 et 60% (RUELLAN, 1971).

C. Concentration continue : A partir du moment où dans un horizon, la concentration du calcaire, qu'elle soit diffuse, en amas ou en nodules, doivent telle qu'elle fait disparaître, en très grande partie ou totalement, la couleur « brune ou rubéfiée » habituelle des sols et des dépôts, on donne à cet horizon le nom d'encroûtement calcaire. La teneur en carbonates est alors le plus souvent supérieure à 60 % et la consolidation de l'horizon peut être très accentuée (RUELLAN, 1971). Les principaux types d'encroûtements que l'on peut distinguer sont les suivants :

- **Les encroûtements non feuilletés :** on peut distinguer deux types principaux ; Les encroûtements massifs, ils ont un aspect crayeux ou tufeux. Ils sont de couleur assez

homogène à tendance claire (rose, crème ou blanc avec souvent des petites taches noires). Ils présentent une structure massive. Leurs duretés est variable, mais en générale plutôt faible. Les encroûtements nodulaires, de couleur également claire mais moins homogène : ils sont essentiellement constitués par des nodules plus ou moins nombreux, pris dans une gangue très calcaire. La structure est à la fois nodulaire et polyédrique et elle peut être finement feuilletée. La dureté est en général assez forte, surtout quand l'encroûtement est très sec. La teneur en CaCO_3 est supérieure à 60 % (RUELLAN, 1971).

- **Les encroûtements feuilletés** : parmi lesquels on doit distinguer les deux types principaux ; Les croûtes, constituées par la superposition de feuillets d'encroûtement durci mais non pétrifié, dans lesquels les teneurs en calcaire peuvent varier de 60 à plus de 90%. L'épaisseur des feuillets est variable : de quelques millimètres jusqu'à plusieurs centimètres. Les croûtes calcaires sont généralement blanches à blanc crème ; les taches noires sont fréquentes et les dalles compactes constituées par un ou plusieurs feuillets de calcaire, extrêmement durs, de couleur grise ou plus souvent saumon, chaque feuillet pouvant atteindre 10 à 20 cm d'épaisseur. La teneur en calcaire de ces dalles est fréquemment supérieure à 80 % (RUELLAN, 1971).

- **Les encroûtements lamellaires ou pellicules rubanées** : ce sont des formations très dures et très calcaires (plus de 70%), dont l'épaisseur varie de quelques millimètres à quelques centimètres. Ces formations sont très nettement stratifiées, constituées par la superposition d'une ou plusieurs séries de lamelles très fines ; ces séries sont parallèles entre elles ou, au contraire, se recoupent. La couleur générale de ces pellicules est blanche ou saumon, mais elles présentent toujours plusieurs filets et lamelles plus ou moins sombres, quelquefois bien noirs (RUELLAN, 1971).

II.3. Propriétés des sols calcaires :

D'après RUELLAN, (1973) dans le cadre de la classification française (C.P.C.S., 1967) ils sont pour la plupart grouper parmi les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques, les sols isohumiques.

D'après LEGROS, (2007), les sols calcaires ont un pH relativement élevée. Il peut être proche de la neutralité dans les sols saturés en calcium (7,5 à 8,5). Leurs structure est fragmentaire en particulier les sols riche en argile et se caractérise par une bonne stabilité structurale.

D'après **RUELLAN, (1973)** les sols calcaires sont en général caractérisés par la présence de trois horizons principaux:

- Dans la partie moyenne du sol, un horizon d'accumulation du calcaire: c'est un horizon Bca, qui peut être plus ou moins développé.
- Au-dessus, un horizon A moins calcaire: il peut être non calcaire.
- Au-dessus, un horizon C, également moins calcaire que l'horizon Bca.

II.4. Les sols calcaires en zone méditerranéens:

Les sols calcaires existent, à travers le monde, dans toutes les grandes régions climatiques, sur des roches très diverses, calcaires et non calcaires, dans toutes sortes de positions topographiques (**RUELLAN, 1984**). Dans les sols méditerranéens, le calcaire est très souvent un élément fondamental de description et de classification (**RUELLAN, 1967**). Les régions arides et sahariennes, sont caractérisées par des sols gypseux calcaires et salins (**GUIMER et BARKAT, 2014**). Les sols calcaires sont très fréquents dans les régions méditerranéennes et désertiques, notamment en Algérie, où on les rencontre aussi bien dans les régions semi-arides et arides (**HALITIM, 1988**).

Selon **RUELLAN (1973)**, dans les régions méditerranéennes et désertiques, les sols qui contiennent du calcaire dans un ou plusieurs de leurs horizons sont très fréquents. Il y a ceci deux raisons principales:

- Les roches: elles sont, dans ces régions, fréquemment carbonatées, calcaires et dolomitiques, ou simplement riches en calcium (les basaltes par exemple).
- Les climats: ils sont souvent très arides et partout les régimes pluviométriques sont peu favorables à un entraînement profond des solutions et, en conséquence, à un lessivage du calcaire hors des sols.

Selon **DJILI (2000)**, les sols calcaires sont distribués en fonction de la pluviométrie en Algérie :

- Dans zones humides et subhumides ($p > 600$ mm), les sols sont moins calcaires que ceux des autres zones climatiques, le calcaire est reparti d'une façon homogène dans les horizons de surface.
- Dans zones semi- arides ($350 < p < 450$ mm), le profil devient de plus en plus calcaire en profondeur.

- Dans zones arides ($p > 300$ mm) : l'accumulation calcaire semble être homogène dans tout le profil, mais avec un pourcentage de calcaire légèrement plus élevé dans les horizons de subsurface.

II.5. Comportement du phosphore en sols calcaires

La nutrition phosphatée est assurée par l'ensemble des ions phosphates de la solution du sol (**FARDEAU, 1981 in HAFIDI et al, 1994**). Le terme phosphore disponible est souvent utilisé pour exprimer le contenu de sol en phosphore en solution que l'on peut extraire ou extraire par les racines végétales et utilisées par la plante pour leur développement au cours de son cycle de vie (**ABDO, 2006**). La disponibilité du phosphore est sujette à plusieurs processus physicochimiques comme la précipitation, l'adsorption et la réorganisation microbienne (**PARENT, 2003**).

Dans le sol, la biodisponibilité du phosphore est influencée par différents facteurs, à savoir l'humidité du sol, taux de matière organique, taux d'argile, pH de la solution du sol et le taux du calcaire ; ce dernier influe sur le pH du sol qui influe à son tour sur l'assimilation du phosphore (**BOUKHALFA-DERAOUÏ et al, 2015**).

Les facteurs les plus impliqués dans les voies de fixation de phosphore sont les hydroxydes de fer et d'aluminium dans les sols acides, le carbonate de calcium dans les sols alcalins et l'activité biologique dans les sols organiques. Les principaux constituants du sol responsables de la fixation du phosphore sont les minéraux argileux, le fer et l'aluminium, les cations échangeables et le carbonate de calcium (**PARENT, 2003**). Le phosphore apporté au sol sous forme d'engrais évolue vers des formes de moins en moins bio-disponibles (**PARENT, 2003**).

La disponibilité du phosphore pour la plante (biodisponibilité) diffère largement suivant le type de sol (**MOREL, 1988 in HAFIDI et al, 1994**). Dans la conduite rationnelle de la fertilisation phosphatée, il est nécessaire de tenir compte de la compétition impitoyable entre le sol et les surfaces racinaires vis-à-vis des ions phosphoriques du pool alimentaire, compétition où la plante est généralement en position difficile (**GACHON 1968 in MICHEL et BOUZOUBAA, 1980**). La carence en phosphore est un problème répandu dans les sols calcaires, et peut devenir un obstacle majeur à la croissance de la culture et la réalisation des rendements acceptables (**BOUKHALFA-DERAOUÏ et al, 2015**).

L'application des engrais phosphatés dans les sols calcaires provoque généralement certains problèmes à savoir la fixation et l'accumulation des ions phosphates dans le sol. Pour connaître la dynamique de cet élément dans ces sols, il doit y avoir des connaissances sur les formes chimiques du phosphore et leurs interactions dans les sols calcaires (**HALAJNIA et al, 2009**). Le calcaire dans le sol influe sur son pH qui influe à son tour sur l'assimilation du phosphore. Le calcium issu des sols calcaires et gypseux très abondant dans les sols, forme avec le phosphore, des phosphates de moins en moins solubles, donc également plus difficiles à mobiliser (**SOLTNER, 2005**). Dans les sols calcaires, riches en Ca^{++} , la forme dominante du phosphore est celle du PCa (phosphate lié au calcium) (**MCKENZIE et al, 2003 in MIHOUBE, 2012**).

Les surfaces de minéraux comme la calcite, favorisent la croissance de phosphate de calcium. **SAMADI et GILKES, (1998)** montrent que le phosphore des engrais se fixe sur les oxydes d'aluminium (29% de P) et de fer (13%) et du dicalcium phosphate (28%), d'octocalcium phosphate (26%) ainsi que de l'hydroxyapatite (13%) en sols calcaires de l'ouest Australien.

L'affinité de CaCO_3 pour adsorber le phosphore a été caractérisée par beaucoup de chercheurs. Pour des concentrations faibles en phosphore, l'adsorption de phosphore par CaCO_3 se fait sur une seule couche ayant une solubilité semblable à l'hydroxyapatite (**GRIFFIN et JURINAK, 1973 in ARAKRAK et al., 2006**). Par contre, il peut y avoir formation de phosphate dicalcique (**COLE et al., 1953 in ARAKRAK et al., 2006**) ou bien de phosphate octocalcique (**GRIFFIN et JURINAK, 1973 in ARAKRAK et al., 2006**) avec l'augmentation de la concentration en phosphore de la solution qui peut se transformer d'une façon lente en apatite (**FANES et al., 1965 in ARAKRAK et al., 2006**).

Le phosphate monocalcique lors de sa combinaison avec le calcaire donne un mélange de phosphates dicalciques, octocalciques, tricalciques et d'hydroxylapatite en proportions variables suivant le temps de contact. Le phosphate dicalcique n'est pas stable et évolue avec le temps vers des formes plus riches en calcium et de solubilité moindre:

III. Cycle de phosphore en sol calcaire

Selon **DUTIL (1976)**, le cycle de phosphore dans les sols calcaire :

Les engrais apportés au sol sont dissous et libèrent des ions phosphoriques qui vont prendre diverses voies d'organisation dans le milieu (figure). Les sols calcaires comportent 3 constituants principaux intervenant dans cette organisation:

- La matière organique, plus ou moins importante selon les sols, peut varier de 1 à 3 % dans l'horizon de surface cultivé.
- L'analyse, à des teneurs variables, selon la différenciation des types de sols concernés.
- et enfin (et surtout) le calcaire qui selon sa texture, sa dureté, et selon l'activité biochimique, l'intensité et la fréquence des précipitations, va contribuer à la libération des ions calcium.
- Les ions libérés dans le milieu se répartissent alors de la manière suivante:
- Une partie reste à l'état dissout dans la solution du sol.
- Une partie se fixe sur les divers sites d'absorption offerts par le milieu: surfaces externe de minéraux argileux (parfois internes), sites d'échange avec la matière organique.
- Et enfin une partie s'engage dans les réactions chimiques avec le calcium.

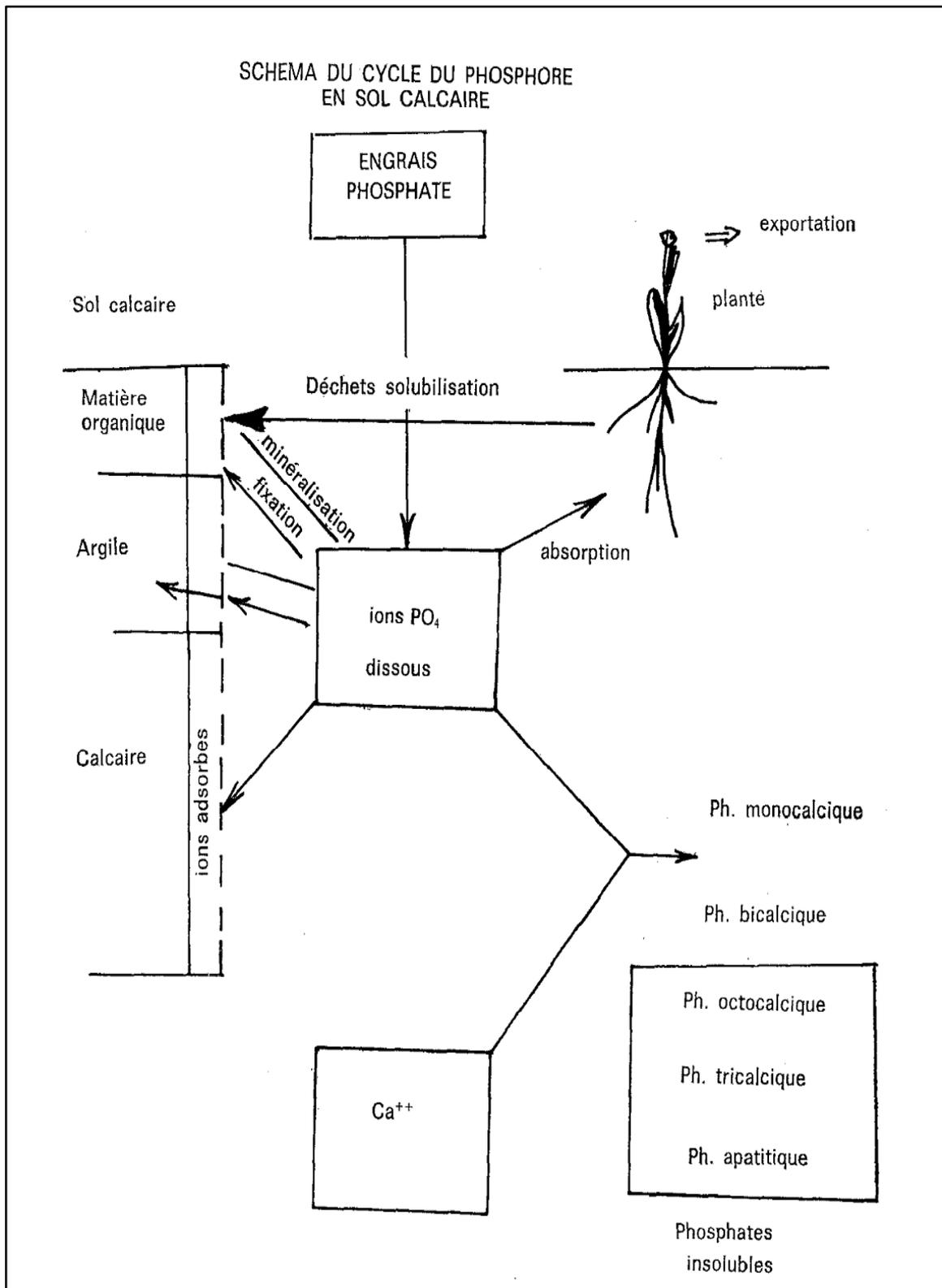


Figure n° 2. Cycle de phosphore en sol calcaire (DUTIL 1976).

Conclusion

Certaines expériences menées sur le vieillissement du phosphore dans des sol calcaire (**RADET, 1962 ; DUTIL et DUMON, 1967 ; BALANCHET et al, 1971 ; GACHON, 1973**), ont montré que les phosphates solubles introduits dans ces sols se trouvent en majeure partie plus ou moins rapidement engagés dans des composés phosphocalciques de moins en moins solubles (**MASMOUDI, 1988**).

En fin certains facteurs peuvent influencer la précipitation du phosphore en milieu calcaire :

- Réactivité du calcaire : la réactivité chimique du carbonate dépend de sa finisse de cristallisation, les particules fines possèdent un pouvoir d, adsorption plus élevé que les grossières (**DIBBE, 1973 in MASMOUDI, 1988**). les carbonates de magnésium peuvent aussi conduire à une précipitation de phosphates de magnésium (**MASMOUDI, 1988**).
- Présence d'ions Mg^{+} : selon leur concentration en solution, ils retardent ou inhibent la transformation de DCPD en OCP et peuvent même l'orienter vers d'autre sens (**ARVIEU, 1980**).
- Substances humiques : la présence de faibles quantités d'acides humiques en solution empêche la transformation de DCPD en OCP et d'une façon générale inhibe la précipitation des apatites. Si l'excès de Ca conduit à l'insolubilisations de phosphore, l'humus agit comme un antidote (**SCHAEFER, 1976 in MASMOUDI, 1988**).
- La température et l'humidité : une température élevée favorise la précipitation du phosphore et une humidité importante permet une mobilité plus grande des ions phosphatés (**MASMOUDI, 1988**).

Matériels et méthodes d'étude

1) Objectif de travail :

Le problème d'assimilabilité du phosphore dans les sols agricoles a donné lieu à un grand nombre d'études en raison de leur importance comme un facteur limitant et pour la complexité des relations et des interactions entre ces ions et les divers constituants du sol.

Parmi les problèmes majeurs est l'adsorption des ions phosphatés sur le calcaire par conséquent une partie importante de ces derniers sera bloqué ou rétrogradé et en dehors de la disponibilité des végétaux. En effet, cette fixation va diminuer l'efficacité de la fertilisation phosphatée appliquée dans les sols calcaires.

Notre étude est réalisée sur un sol calcaire et relativement pauvre en phosphore assimilable avec différents modes d'apport d'engrais phosphaté sur une culture de blé en plein champ, dont l'objectif est d'apprécier l'importance de mode d'apport d'un engrais phosphaté (TSP) le plus efficace afin de minimiser ou éviter l'effet néfaste d'adsorption calcaire en profitant en maximum de la fertilisation phosphaté appliquée sur ce type de sol.

2) Présentation de la région d'étude :

2.1) Situation géographique de la région de Biskra :

La wilaya de Biskra (Figure n° 2) est située au Nord-est Algérien à environ 470 Km au Sud-est d'Alger, elle s'étend sur une superficie de 21671,2 Km² et compte actuellement 12 Dairas et 33 communes. Elle est limitée au :

- Nord par la wilaya de Batna
- le Nord-est par la wilaya de Khenchela
- le Nord-Ouest par la wilaya de M'sila,
- au Sud par la wilaya d'Eloued
- au Sud-ouest par la wilaya de Djelfa

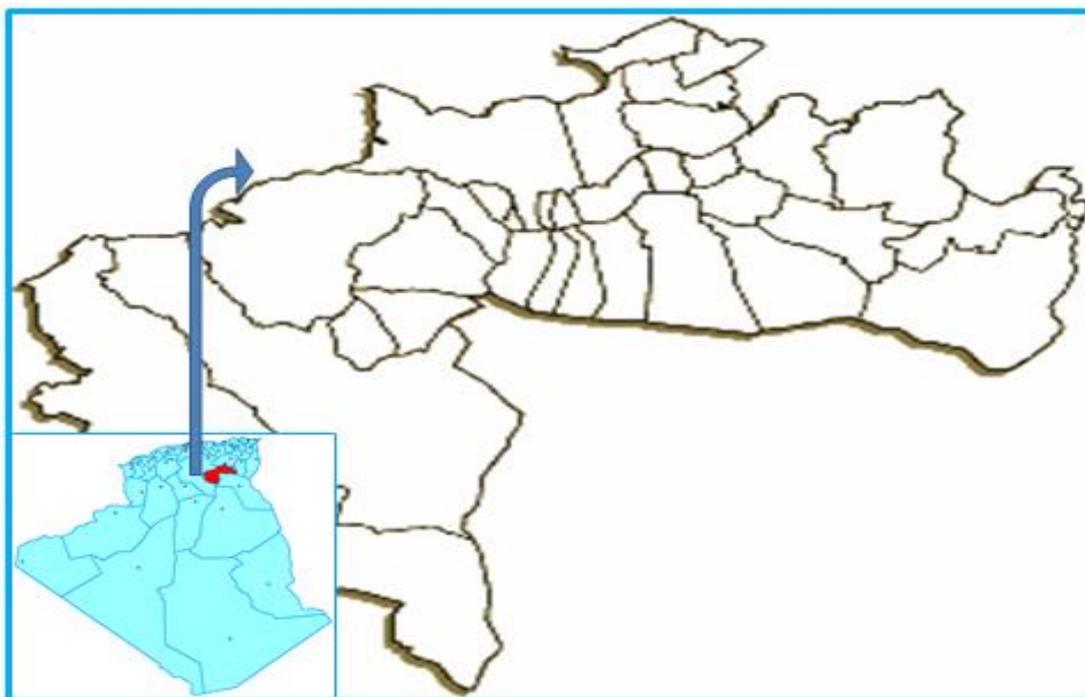


Figure n° 3. Situation géographique de la wilaya de Biskra

2.2) Climat de la région d'étude

Tableau n° 1. Données climatiques de la région de Biskra (2006-2015)

Mois	T min (°C)	T max (°C)	T moy (°C)	P (mm)	V (km/h)	H (%)
Janvier	6,86	17,78	12,32	15,376	11,3	55,6
Février	7,75	18,71	13,23	8,543	20,7	55,4
Mars	11,23	22,95	17,09	15,925	20,5	44,2
Avril	15,38	27,28	21,33	13,97	11,7	36,6
Mai	19,85	32,6	26,225	11,613	16,2	30,3
Juin	24,53	37,74	31,135	9,957	15,1	28
Juillet	28,06	41,37	34,715	0,59	12,1	26,1
Août	27,07	40,57	33,82	1,863	12,9	32,6
Septembre	23,37	35	29,185	18,949	12,5	45
Octobre	18,27	29,55	23,91	23,12	14	52,2
Novembre	12,11	22,67	17,39	10,626	10,7	54,1
Décembre	7,84	18,18	13,01	7,6	4,3	61,7
Moyenne	16,86	28,70	22,78	11,511	13,5	43,48

Source sérié : (O.N.M) Office National de la Météorologie.

1. Températures :

Les températures moyennes mensuelles (Tableau n° 1) durant la période 2006-2015 de la région de Biskra se caractérisent par une forte élévation, dont les températures moyennes maximales les plus élevés s'étalent dans les mois : Juin, Juillet et Août, alors que, le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une température moyenne minimal de 6.86 °C.

2. Précipitation :

Les valeurs de précipitations présentées dans le (Tableau n° 1), nous informe sur les précipitations de notre région d'étude dans la période qui s'étend de 2006 à 2015. Ces valeurs montrent une très faible précipitation dans la région de Biskra durant toute l'année.

Nous remarquons à travers les données annoncées, que la moyenne des cumules mensuelle des précipitations relevées pendant les 10 ans est de 11,511 mm/an. Nous constatons aussi, que la période pluvieuse se situe entre le mois de septembre et octobre avec un maximum de 23,12 mm au mois d'octobre.

3. L'humidité :

A Biskra on note un taux d'humidité de l'air élevé. La moyenne d'humidité la plus élevée est enregistrée au mois de décembre avec un taux de 61,7% et la plus faible au mois de juillet avec une valeur 26,1%.

4. Vent :

Dans la région de Biskra, les vents sont relativement fréquents durant toute l'année avec une moyenne de 13,5 Km/h.

2.3) Synthèse climatique : Diagramme Ombrothermique de Gaussen :

Les températures et les précipitations représentent les facteurs les plus importants pour caractériser le climat d'une région donnée. Les périodes humides et sèches sont mises en évidence grâce au diagramme Ombrothermique de Gaussen :

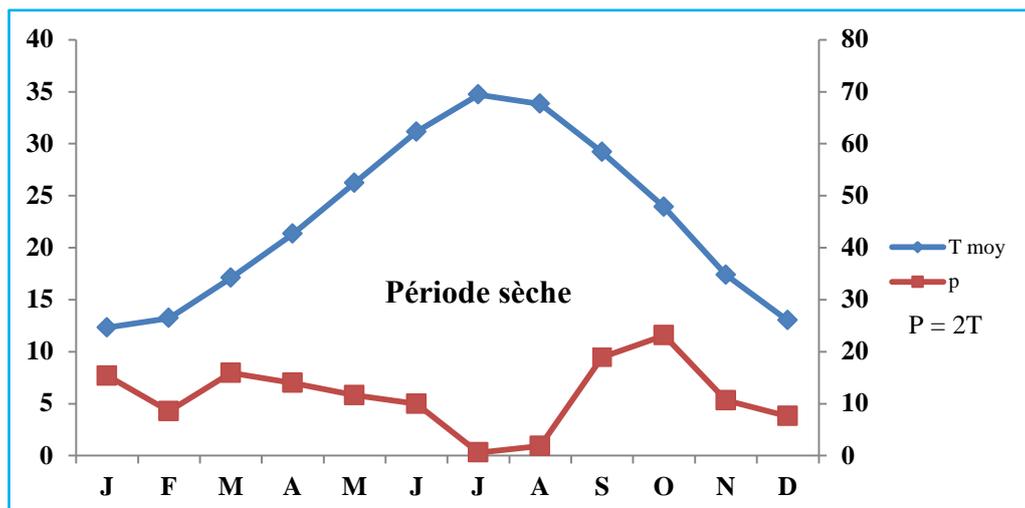


Figure n°4. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN de Biskra (2006-2015)

Le digramme Ombrothermique de GAUSSEN est une représentation graphique où sont portés, en abscisse les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), selon la formule $P = 2T$. D'après ce diagramme, on déduit que la région de Biskra est caractérisée par une saison sèche qui s'étale sur toute l'année avec une augmentation remarquable pendant l'été.

Méthodologie expérimentale

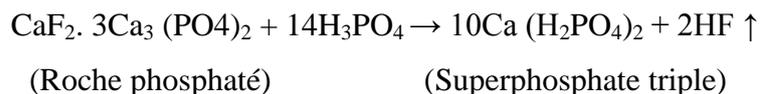
I. Matériel d'étude

I.1. Matériel végétal :

Notre étude a porté sur une variété de blé dur dit Mohamed ben bachir (MBB), c'est une variété locale issu d'une sélection généalogique faite à l'intérieur d'une population locale du blé dur à Ain Roua du nord de Sétif en 1938. C'est une variété à maturité tardif, elle est résistante au froid, tolérante à la sécheresse mais sensible à la verse et aux certains maladies. Les semences testées ont une faculté germinative de 99% une pureté spécifique de 100 % et un poids de mille grains de 50,54 g.

I.2. Engrais phosphaté utilisé :

Nous avons utilisé dans notre étude un seul type d'engrais phosphaté ; le super phosphate triple (TSP) à 46 % P_2O_5 . Le triple superphosphate est caractérisé par une bonne solubilité et il est utilisable dans tous les sols. Cet engrais phosphaté résulte de l'attaque de la roche mère par l'acide phosphorique.



I.3.Choix et Caractéristiques de site expérimental :

Pour réaliser cette étude, notre choix est porté sur le terrain expérimental de département des sciences agronomique de notre université (Mohamed kheider) vu l'approvisionnement en matériels de travail, sa proximité et leur sol qui présente les caractéristiques visés.

Les analyses du sol ont été réalisées au niveau des laboratoires de sciences du sol du département des sciences agronomique de notre université. Le prélèvement du sol a été effectué à l'aide d'une tarière sur une couche de (0-30 cm). Ces caractéristiques physico-chimiques sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau n° 2. Caractéristiques Physico-chimiques du sol exploité

Paramètres	Résultats
Matière organique (%)	1,67
Calcaire actif (%)	24,5
Calcaire total (%)	42,83
Phosphore assimilable (ppm)	142,5
Conductivité électrique (dS/m)	2,91
pH	7,66
Granulométrie	
- Sable grossier	- 6,79 %
- Sable fin	- 4,68 %
- Limon grossier	- 8,18 %
- limon fin	- 44,20 %
- Argile	- 36,15 %

II. Méthode d'étude :

II.1. Méthodologie de travail :

Pour réaliser l'objectif de l'étude, on a adopté une culture de blé en plein champ, l'essai comporte un seul facteur, le mode d'apport d'engrais phosphaté avec une dose de 180 U/ha et 90 U/ha pour l'application pulvérisée. Le dispositif adopté est blocs aléatoires complets, comprend sept traitement et un témoin avec trois répétitions ; chaque bloc comporte 08 parcelles élémentaires. Les traitements sont répartis au hasard dans chacun des blocs. Donc l'essai comporte 24 parcelles élémentaires (fig.5)

T₁	T₂	T₃	T₄	T₅	T₆	T₇	T₈
T₃	T₄	T₆	T₇	T₈	T₅	T₁	T₂
T₆	T₇	T₅	T₈	T₁	T₂	T₃	T₄

T₁ : témoin.	T₅ : bande.
T₂ : fumure de fond.	T₆ : fumure de fond + localisé.
T₃ : localisé.	T₇ : fumure de fond + pulvérisé.
T₄ : pulvérisé.	T₈ : localisé + pulvérisé.

Figure n° 5. Dispositif expérimental

II.1.1. Dimensions du dispositif expérimental :

- Parcelle élémentaire : 1,5 m x 1,5 m = 2,25 m².
- Superficie de l'essai : 12 m x 4,5 m = 54 m².
- Ecartement entre blocs : 0,5 m.

II. 3. Traitements réalisés:

Nous avons réalisé 07 traitements avec un témoin

1. **Apport au fond** : l'épandage d'engrais effectué avant le semis.
2. **Apport localisé** : effectué à la levée, l'épandage de l'engrais effectué en ligne près des plantes.
3. **Application pulvérisé** : l'engrais solubilisé dans l'eau distillé a été pulvérisé directement sur les plantes. La dose totale a été fractionnée en trois apports (levé, fin tallage et épiaison).
4. **Épandage en bande** : l'épandage de l'engrais effectuée en ligne avec les grains au semis.
5. **Apports mixtes** : la dose totale a été en commun entre deux apports comme suit:
 - 5.1. Apport au fond + apport localisé.
 - 5.2. Apport au fond + pulvérisation.
 - 5.3. Apport localisé + pulvérisation.

II.4. Techniques culturales :

1. **Précédent cultural** : Le précédent cultural est l'orge.
2. **Le travail de sol** : Un labour profond de 30 cm a été pratiqué avec une charrue à disque au mois d'octobre.
3. **La fertilisation minérale** :
 - **Fertilisation azoté** : L'engrais utilisé est l'urée 46 % avec une dose de 120U/ha fractionnées en trois apports égaux au stade levée, tallage et montaison.
 - **Fertilisation potassique** : Le sulfate de potassium, K_2SO_4 (K_2O 50 %) est l'engrais potassique qu'on a utilisé avec une dose de 80U/ha apporté comme fumure de fond.
 - **Fertilisation phosphaté** : L'engrais utilisé est le superphosphate triple (TSP) avec une dose de 180U/ha et 90U/ha pour les traitements pulvérisés.
4. **Le semis** : Le semis a été effectué manuellement en ligne avec une dose de 2qx/ha selon les données suivantes :
 - Écartement entre les lignes : 15 cm.
 - Profondeur de semis : 1 cm.

5. **L'irrigation** : La méthode d'irrigation est la submersion avec l'eau de forage. L'irrigation est effectuée périodiquement de sorte qu'on maintient toujours une humidité convenable dans le sol.

6. **Le désherbage** : un désherbage manuelle est effectué périodiquement afin d'éliminer les mauvaise herbes.

7. **Récolte** : La récolté a été effectuée manuellement.

II. Paramètres étudiés

Dans ce travail nous avons étudiés quelques paramètres pour chaque traitement, on a enregistré des observations au champ et des analyses au laboratoire.

II.2.1. Composantes du rendement

- **Nombre d'épis au mètre carré** : le comptage du nombre d'épis/m² est réalisé à la maturité.
- **Nombre des grains par épi** : ce paramètre est réalisé sur trois épis de chaque traitement.
- **Poids de 1000 grains** : le poids de 1000 grains est le composant du rendement le plus important, réalisé à partir de poids de 250 grains multiplié foi quatre.

II.2.2. Rendements

- **Rendement en grains** : c'est le poids des grains produit. Il est déterminé pour chaque planche de 1m² en g/m², puis exprimé en qx/ha.
- **Rendement théorique**: la détermination du rendement en grains est obtenue par la relation suivante :

$$\text{Rendement (q/ha)} = \text{nombre d'épis/m}^2 \times \text{nombre des grains/épi} \times \text{PMG} \times 10^{-4}$$

- **Rendement en paille** : il est estimé à partir de la pesée de toutes les tiges récolté de chaque parcelle (1 m²), les valeurs obtenues sont exprimées en quintaux par hectare.

II.2.3. Hauteur des plantes à la maturité :

Ce paramètre est réalisé sur trois plantes de chaque traitement.

II.2.4. Dosage de phosphore assimilable:

Dans le but d'apprécier l'efficacité de la fertilisation phosphatée selon chaque traitement nous avons effectué des prélèvements de sol, de végétal et des grains selon la méthode suivante:

- Le premier prélèvement de sol et du végétal est effectué après un mois de la première application foliaire de l'engrais phosphaté.
- Le deuxième prélèvement de végétal a été effectué après un mois de la deuxième application foliaire de l'engrais phosphaté.
- Le deuxième prélèvement pour le sol est effectué au stade maturité.
- les grains de blé à la maturité.

Les échantillons du sol ont été prélevés et séchés à l'air libre, tamisés (2 mm). Les feuilles et les grains sont séchés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, broyés puis passés au four à moufle à 550°C pendant 3 heures puis on a réalisé l'analyse chimique recommandé.

Pour le dosage de phosphore assimilable du sol on a suivi la méthode JORET-HEBERT parce qu'elle est plus utilisée en sol calcaire particulièrement. Elle donne aussi les résultats les plus proches du test biologique en sol calcaire ou voisin de la neutralité (BENAMARA ET CONESA, 1971 in MASMOUDI, 1988).

VI. Traitements statistiques :

Les données collectées de l'expérimentation ont été soumises à une analyse de la variance par le logiciel EXELSTAT 2009. La comparaison des moyennes est effectuée par le test de NEWMAN au seuil de probabilité 5 % permettant de mettre en évidence les différences entre les traitements si elles sont significatives ou non.

Résultats et discussion

I- Action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur la croissance des plantes au stade récolte:

Au stade récolte nous avons fait des mesure de la hauteur des plantes afin de trouver le rôle de phosphore apporté sous différents modes d'apports d'un engrais phosphaté (TSP) sur la croissance des plantes de blé dur. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau (3), la figure (n° 6) et discutés au-dessous.

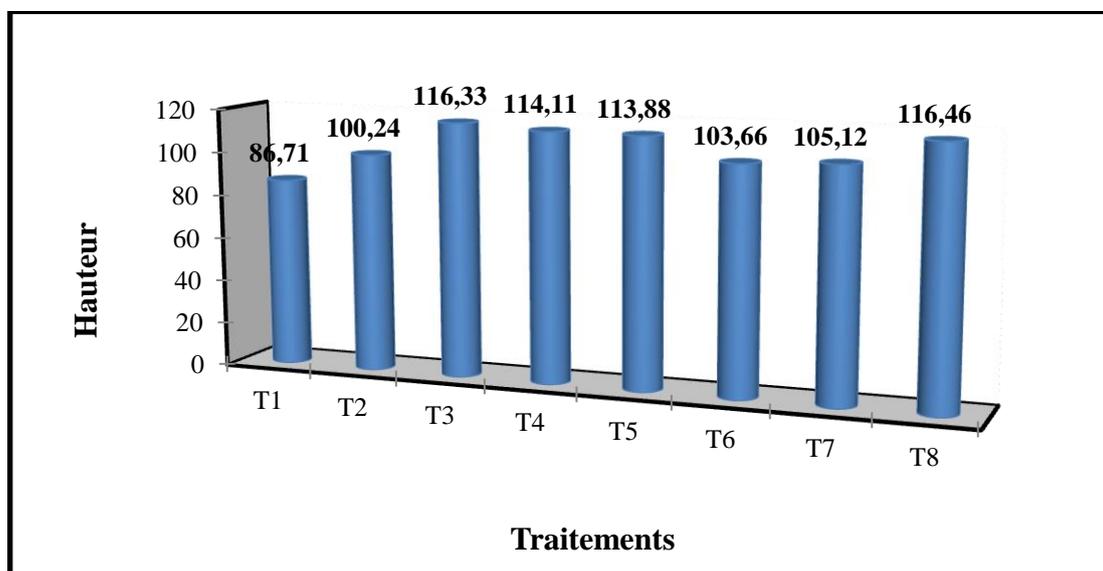


Figure n° 6 : Hauteur des plantes au stade récolte

Les résultats montre que les valeurs de la hauteur des plantes passent de 86,71 cm à 116,46 cm, en effet l'apport du phosphore à une action positive sur la croissance des plantes, ceci est illustré par l'effet des traitements sur la hauteur des tiges des plantes ayant reçu du phosphore par rapport au témoin (T₁) qui présente la plus faible hauteur avec une moyenne de 86,71 cm. Les résultats de **BOUKHALFA-DERAOU** (2004) et **ARSHAD et al., (2016)**, montrent que le phosphore appliqué a augmenté de façon significative la hauteur de la plante.

Concernant l'effet de mode d'apport on a observé d'après le tableau (3) que les meilleures hauteurs sont obtenu par les traitements suivants : le traitement localisé (T₃), l'application foliaire (T₄), l'application en bande (T₅) et le traitement mixte entre la

localisation et la pulvérisation (T₈) qui se regroupent dans un seul groupe homogène (A) avec une supériorité du traitement mixte entre la localisation et la pulvérisation (T₈) et le traitement localisé (T₃) avec des moyennes de 116,46 cm et 116,33 cm respectivement (tableau 3, figure n° 6). Cependant, la plus faible hauteur est enregistrée chez le traitement (T₂) apport au fond avec une moyenne de 100,24 cm ce qui peut être expliqué par la faible concentration et la faible mobilisation des ions phosphatés dans la solution du sol qui contribuent à la nutrition de végétal suivant soit le long temps de contact d'engrais avec le sol (**FARDEAU, 2005**), soit la surface de contact est importante entre l'engrais et le sol ce qui diminue la mobilisation des ions phosphatés dans la solution du sol donc l'utilisation de cet élément par le végétal diminue aussi (**BARBAER, 1977**). **FARDEAU (2005)** a montré que le coefficient réel d'utilisation d'un engrais phosphaté de type superphosphate diminue significativement lorsque le temps de contact avec le sol augmente. En revanche, l'apport localisé (T₃) et l'apport mixte (T₈) favorisent la croissance du végétal grâce aux ions phosphatés mobilisés et absorbés par les plantes par rapport aux autres modes d'apports. De ce fait **BRUN et COHAN (2013)**, **COHAN et BRUN (2016)**, indiquent que le phosphore est un élément qui déplace peu dans le sol donc la localisation se caractérise par la mise à disposition de l'engrais directement auprès des racines des jeunes plantules.

D'autre côté on peut signaler l'importance de la pulvérisation foliaire de l'engrais phosphaté sur le végétal qui contribue à l'alimentation phosphaté directement à partir des feuilles. Les faibles résultats de l'apport au fond peut s'expliquer aussi par les processus d'insolubilisations du phosphore dans les sols à cause de la fixation de ce dernier et leur évolution vers des formes insolubles et le végétal ne peut pas profiter de la fertilisation appliquée comme il devrait, cette résultat est en accord avec les résultats de **HINSINGER (2011)**, qui montre que les ions phosphatés se précipitent facilement avec des cations métalliques, formant une gamme de minéraux phosphatés. Le type de minéral formé dépendra en premier lieu du pH du sol car il régit l'occurrence et l'abondance de ces cations métalliques susceptibles de précipiter avec des ions phosphatés dans la solution du sol, à savoir calcium, fer et l'aluminium.

L'examen d'analyse de la variance illustré dans le tableau (3) montre un effet significatif de l'apport de phosphore sur la hauteur des plantes de blé. Les résultats apprécient en particulier le rôle de la pulvérisation et la localisation autant que des solutions pour éviter et/ou minimiser le risque de perte des ions phosphatés par la

précipitation et la fixation sur le carbonate de calcium qui présent en quantité importante dans les sols calcaires comme il est le cas de sol exploité dans cette essai, donc ils nous permet de profiter en maximum la fertilisation phosphaté appliqué.

Tableau n° 3. Tableau d'analyse de la variance de la hauteur des plantes

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
T ₈	116,456	A		
T ₃	116,333	A		
T ₄	114,111	A		
T ₅	113,878	A		
T ₇	105,122		B	
T ₆	103,656		B	
T ₂	100,244		B	
T ₁	86,711			C

II- Action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur le rendement et ses composantes:

Le phosphore est un élément chimique parmi les nutriments essentiels des plantes qui peuvent causer une chute ou un blocage de rendement en cas de carence, il est appliqué au sol et/ou au feuillage des plantes cultivées pour obtenir des rendements économiques maximaux. L'évaluation de rendement et ses composantes dans cette étude nous permettent d'indiquer la réponse significative ou non de la culture de blé à la fertilisation phosphatée en fonction de mode d'apport d'un engrais phosphaté (TSP) ainsi que l'efficacité de ce de dernier dans les sols calcaires et leur effet dans l'amélioration de quelques caractéristiques agronomiques de la culture de blé.

1. Nombre de grains par épi

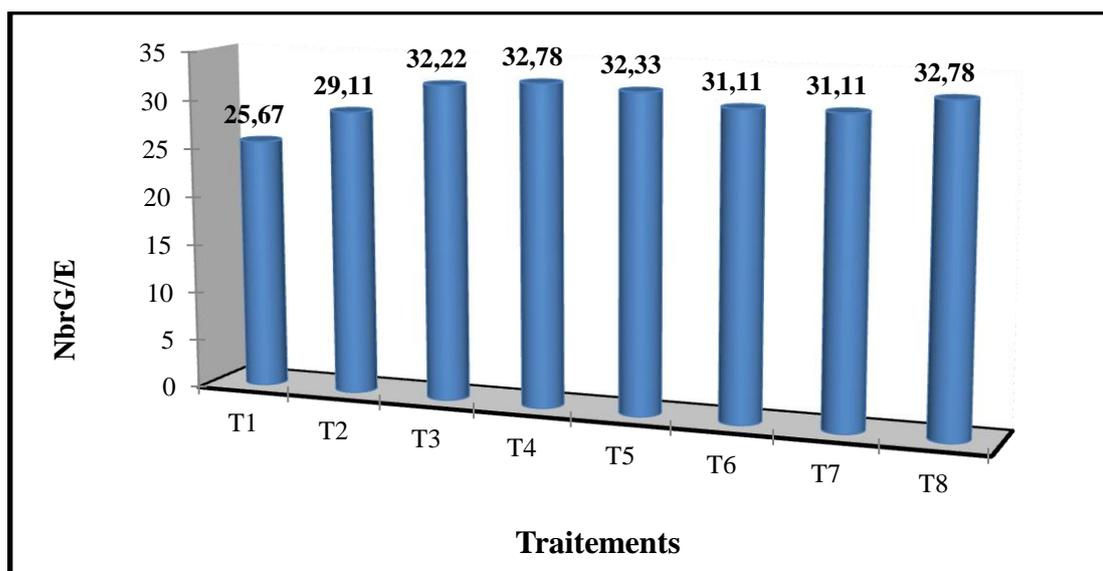


Figure n° 7: Nombre de grains par épi

Ce paramètre est une composante importante du rendement, on observe une variation des valeurs des moyennes qui varient entre 25,67 et 32,78 grains/épi (figure n° 7). L'observation de tableau (4) de l'analyse statistique montre un effet significatif de l'apport du phosphore sur l'amélioration de ce paramètre manifestant entre les traitements ayant reçu un apport de phosphore et le témoin (T₁) qui présente le plus faible nombre de grains par épi avec une moyenne de 25,67 grain/épi. Cette différence apprécier le rôle du phosphore dans l'amélioration de rendement des cultures par augmentation du nombre de grain par épi. BOUKHALFA-DERAOUÏ et al (2011) et MIHOUBE (2012), montrent

que l'apport de phosphore accroît le tallage, le nombre de grains par épis et le poids moyen des grains.

Ainsi on trouve aussi à partir du tableau (4) une différence significative entre les différents modes d'apport, où les moyennes les plus élevées sont enregistrées au niveau des traitements : localisé (T₃), l'application foliaire (T₄), l'application en bande (T₅) et le traitement mixte entre la localisation et la pulvérisation (T₈) avec une supériorité du traitement mixte (T₈) et l'application foliaire (T₄) avec une moyenne de 32,78 grain/épi pour les deux traitements ; cependant la moyenne la plus faible est enregistrée au niveau de l'application au fond (T₂) avec une moyenne de 29,11 grain/épi. Ceci peut s'expliquer par l'effet positif de mode d'apport sur la disponibilité et l'assimilabilité des ions phosphatés, dans ce cas la supériorité des moyennes de traitement foliaire (T₄) et le traitement mixte entre la localisation et la pulvérisation (T₈) valorise le rôle de ces modes dans la nutrition des plantes de blé en phosphore. La méthode d'application au sol est plus courante et plus efficace pour les nutriments, ce qui nécessite des quantités plus élevées, toutefois, dans certaines circonstances la fertilisation foliaire est plus économique et plus efficace (**FAGERIA et al., 2009**).

Les résultats d'**ARVIEU (1980)**, montrent que les carbonates de calcium, qui sont largement dominés par la calcite, peuvent immobiliser des quantités substantielles d'ions phosphatés par les deux processus d'adsorption et la précipitation de divers types de phosphates de calcium. En raison de ces fortes interactions des ions phosphatés avec la phase solide du sol, les concentrations de phosphate dans la solution du sol des sols calcaires sont souvent très faibles. Il a prouvé que l'application localisée et la pulvérisation de l'engrais phosphaté sur le feuillage sont les plus efficaces dans l'alimentation du végétal en phosphore soit par la diminution du surface de contact de l'engrais avec le sol et par conséquent la possibilité de fixation de cet élément par le calcaire est diminuée. D'autre côté l'absorption directe des ions phosphatés par le végétal dans le cas de l'application foliaire permet d'éviter les problèmes de fixation sur la calcite des sols calcaires.

Tableau n° 4. Tableau d'analyse de la variance du nombre de grains par épi

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
T ₄	32,778	A		
T ₈	32,778	A		
T ₅	32,333	A		
T ₃	32,222	A		
T ₆	31,111	A	B	
T ₇	31,111	A	B	
T ₂	29,111		B	
T ₁	25,667			C

2. Nombre d'épi par mètre carré

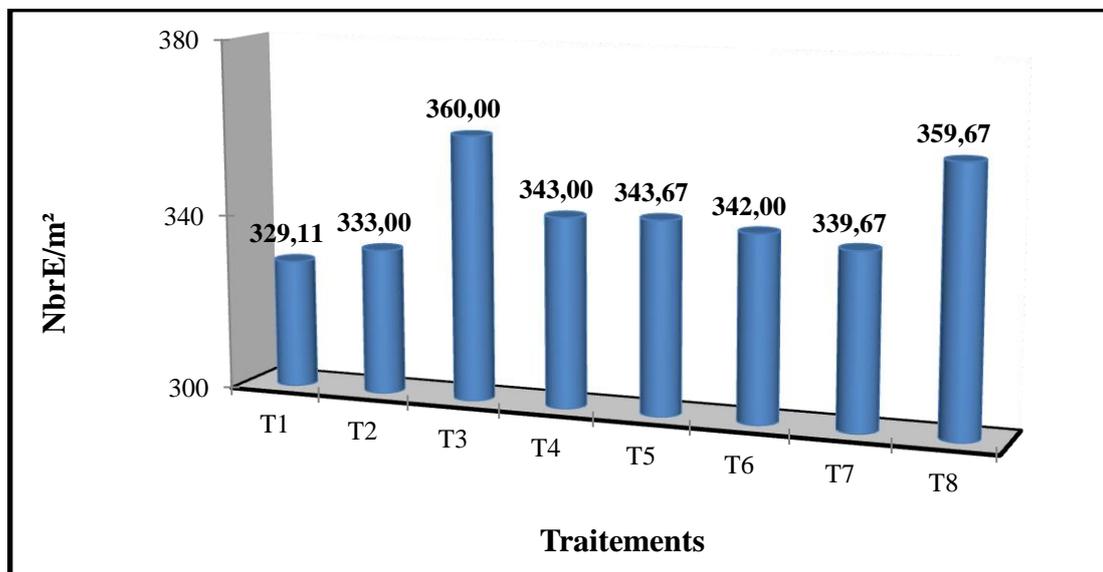


Figure n° 8: Nombre d'épi par mètre carré

D'après le tableau (5) et la figure (8) on remarque une variation nette de nombre d'épi par mètre carré, caractérisée d'abord par la différence entre les traitements ayant reçu un apport d'engrais phosphaté et le témoin (T₁). Ce dernier présente la plus faible moyenne de 329,11 épi/ m² ; ces résultats mis en évidence le rôle de phosphore disponible pour les plantes soit incorporé dans le sol ou pulvérisé sur le feuillage des plantes de blé dans l'amélioration de nombre d'épi par mètre carré et par conséquent l'amélioration de rendement. **BOUKHALFA-DERAOUÏ et al (2015)**, ont montré que l'addition de phosphore, sous forme de superphosphate triple, influence toutes les composantes du rendement.

Les résultats de l'analyse de la variance (tableau 5) montrent un effet significatif du mode d'apport d'engrais. La comparaison des moyennes indique que le traitement localisé (T_3) et le traitement mixte (T_8) (apport localisé avec un apport pulvérisé) présentent le nombre le plus élevé d'épi avec des moyennes de 360 épi/m² et 359,67 épi/m² respectivement et se regroupe dans le même groupe homogène (A). En revanche, l'apport au fond (T_2) présente la faible valeur avec une moyenne de 333 épis/m². Il semble que l'apport localisé (T_3) et le traitement mixte (T_8) (apport localisé avec un apport pulvérisé) sont réagis favorablement dans l'amélioration de tallage épi donc ils favorisent la productivité de cette culture grâce aux ions phosphatés présents à la disponibilité des plantes, par contre la carence en phosphore dans l'apport au fond cause une chute de nombre d'épi par mètre carré ce qui participe dans la chute de rendement. Les résultats de **COHAN et BRUN (2016)** montrent que la localisation des engrais phosphatés maximise l'efficacité des apports d'engrais pour maintenir un haut niveau de rendement. D'autre côté **MOSALI et al., (2006)**, ont suggéré que de faibles taux de phosphore appliqués sur les feuilles pouvaient corriger la carence en cet élément à la mi-saison dans le blé d'hiver, ce qui pourrait entraîner une plus grande efficacité de l'utilisation du phosphore.

Ainsi lorsque l'on apporte des engrais phosphatés solubles dans l'eau, une faible partie de phosphore demeure comme ions solubles de la solution de sol, l'autre partie des ions est rapidement adsorbé sur les surfaces des particules de sol et précipite sous forme de phosphate de calcium, de fer et d'aluminium (**BARBER 1977**). **MASMOUDI (1998)**, montre qu'une grande quantité des ions phosphatés se transforme vers des formes plus calciques, il ajoute que ce processus concerne aussi les ions phosphatés préexistants dans le sol comme cela est illustré dans le traitement témoin.

Tableau n° 5. Tableau d'analyse de la variance du nombre d'épi par mètre carré

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
T ₃	360,000	A		
T ₈	359,667	A		
T ₅	343,667		B	
T ₄	343,000		B	
T ₆	342,000		B	
T ₇	339,667		B	
T ₂	333,000			C
T ₁	329,111			C

3. Poids de mille grains

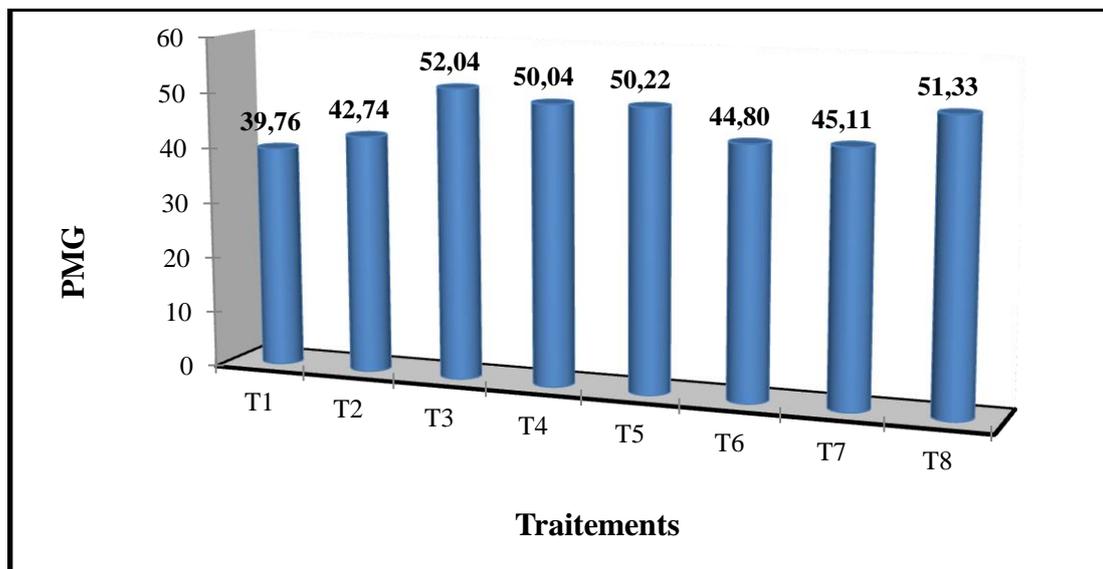


Figure n° 9: Poids mille grains (g)

Le poids de mille grains du blé est un composant important et contribuant dans le rendement. Les résultats de poids de mille grains sont très influencés par l'apport du phosphore comme a été illustré dans le tableau d'analyse statistique (tableau 6) et la figure 9. On observe ici une réponse favorable au phosphore sur ce paramètre (figure n° 9) ceci est manifesté par la réaction positive des traitements qui ont reçu du phosphore par rapport au témoin (T₁) qui présente le plus faible poids avec une moyenne de 39,76 g soit une diminution de 3g comparativement avec l'apport au fond (T₂) qui présente la faible moyenne de poids mille grains parmi les traitements ayant reçu un apport de phosphore ce

qui prouvé son rôle important dans l'amélioration de rendement et la qualité de produit. Selon **AISSA et MHIRI (2002)** l'apport de phosphore sur des céréales d'hiver constitue un facteur important dans l'amélioration du rendement principalement la fertilité des épis et du poids du grain de blé dur. Des résultats similaires sont trouvés par plusieurs chercheurs confirmant l'effet positif du phosphore sur PMG (**MASMOUDI 1998, BEN NACEUR, 1991 ; BOUKHALFA-DERAOUI N, 2004 ; BOUKHALFA-DERAOUI et al, 2011 et MIHOUBE, 2012**).

Concernant les différents modes d'apport, les résultats illustrés dans le tableau (6) montrent des différences significatives entre les traitements. L'application localisé (T_3) présente le poids le plus important avec une moyenne de 52,04g soit une augmentation de 9g par rapport à l'apport au fond (T_2) qui présente le faible poids avec une moyenne de 42,74g ce qui montre clairement le rôle de la localisation de l'engrais dans l'efficacité de la fertilisation phosphatée dans les sols calcaires en évitant les pertes des ions phosphatés par le processus de fixation. **HERNANDO (1977)**, montre que dans les sols calcaires le phosphore se trouve retenu surtout par les ions Ca^{++} formant une série de phosphates de calcium de différentes solubilités. **DUTIL (1976)**, ajoute que ces derniers évoluent en vieillissement vers des formes plus calcique de type apatitique.

Les traitements foliaires présentent aussi des poids de mille grains importants malgré l'application de la moitié de la dose ceci manifeste dans les traitements de pulvérisation (T_4, T_7 et T_8) ce qui apprécie le rôle de la pulvérisation dans l'alimentation des plantes en phosphore à partir de l'absorption foliaire et l'amélioration de rendement et la qualité de produit en conséquence. Les résultats de **HOSSAIN et RYU (2009)**, montrent que l'application foliaire d'engrais phosphaté n'a pas amélioré seulement le rendement mais également amélioré la qualité du produit.

Tableau n° 6. Tableau d'analyse de la variance du poids de mille grains

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
T ₃	52,044	A				
T ₈	51,333	A	B			
T ₅	50,222		B			
T ₄	50,044		B			
T ₇	45,111			C		
T ₆	44,800			C		
T ₂	42,744				D	
T ₁	39,756					E

4. Rendement théorique

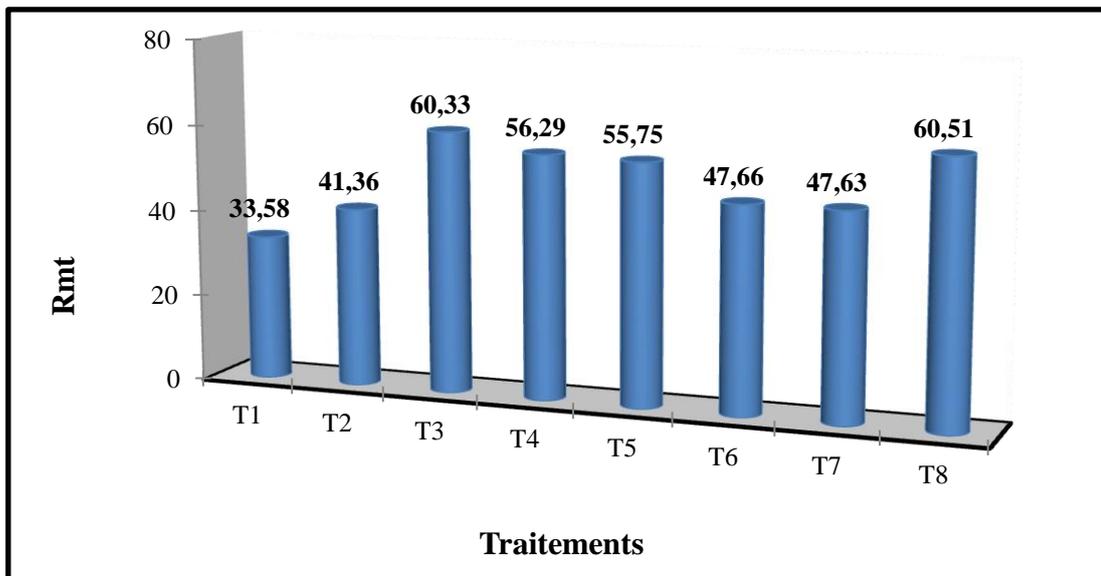


Figure n° 10: Rendement théorique (qx/ha)

Les rendements en grains estimé à la fin de l'essai est influencé positivement (tableau n°7, figure n°10) par l'apport du phosphore sous forme de TSP ce qui traduit la différence significatif entre les traitements ayant reçu un apport d'engrais phosphaté et le témoin (T₁) qui présente la valeur la plus faible avec une moyenne de 33,58 qx/ha. Ce résultat mis en évidence l'effet négatif de la pauvreté relative en phosphore dans la perte de la productivité de cette culture. Selon MICHEL et BOUZOUBAA (1980), MOREL et al (1992), MASMOUDI (1998), MIHOUBE et al (2012) et MIHOUBE et BOUKHALFA-DERAOUI (2014), l'apport de l'engrais

phosphaté a influencé significativement le rendement en grains et ces composantes. Les apports de phosphore constituent un facteur primordial d'amélioration du rendement des céréales d'hiver (**BELAID, 2013**). Sur blé dur, ces améliorations se font principalement par l'augmentation: de la fertilité des épis (**BELAID, 1987 et ATI, 2010 in BELAID, 2013**) et du poids du grain (**BELAID 1987 in BELAID, 2013**), **AISSA et MHIRI (2002)**.

D'autre coté, les rendements estimés sont influencé de façon significative par le mode d'apport de l'engrais (Tableau 7), cela aussi traduit la variation de rendement entre les traitements ayant reçu des ions phosphatés à partir d'engrais ajouté soit au sol soit aux feuillages. La comparaison des moyennes (tableau 7) nous permet de remarquer que les rendements les plus élevé sont obtenu au niveau de traitement localisé (T_3) et le traitement mixte ente la localisation et la pulvérisation (T_8) qui se regroupe dans un même groupe homogène (A) avec une moyenne de 60qx/ha et le faible rendement est obtenue dans l'apport au fond (T_2) avec une moyenne de 41,36 qx/ha. Ces résultats montrent que la localisation d'engrais (T_3) ou le traitement mixte (T_8) ont une réaction favorable et efficace sur l'amélioration de rendement par rapport aux autres modes d'apport grâce à la quantité importante des ions phosphatés relativement disponibles à la nutrition des plantes. A partir de ces résultats on peut considérer que la localisation de la même dose d'engrais appliquée au fond comme une augmentation de la dose (**BARBER 1977**), ce qui permet de minimiser le problème de surface de contact entre les particules du sol et les ions de phosphore autant que le sol exploité est un sol calcaires. Ce dernier favorise la précipitation des engrais phosphatés et par conséquent restent en dehors de la disponibilité des racines des plantes cultivé. Les engrais phosphatés peuvent avoir un effet positif sur le rendement quand ils sont apportés au semis et localisés (**AISSA et MHIRI, 2000 in AISSA et MHIRI, 2002**). L'augmentation de l'apport en phosphore au sol a permis d'augmenter le poids sec du blé, les concentrations de phosphore dans le tissus et la surface foliaire (**SINGH et al., 1977 in FERNANDEZ et al., 2014**). En plus la pulvérisation foliaire d'engrais permet d'éviter la perte des ions phosphatés fourni par l'engrais ajouté sous l'effet de processus de fixation et la précipitation dans les sols calcaires.

Tableau n° 7. Tableau d'analyse de la variance relative au rendement théorique

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
T ₈	60,505	A				
T ₃	60,334	A				
T ₄	56,287		B			
T ₅	55,749		B			
T ₆	47,660			C		
T ₇	47,635			C		
T ₂	41,361				D	
T ₁	33,584					E

5. Rendement machine

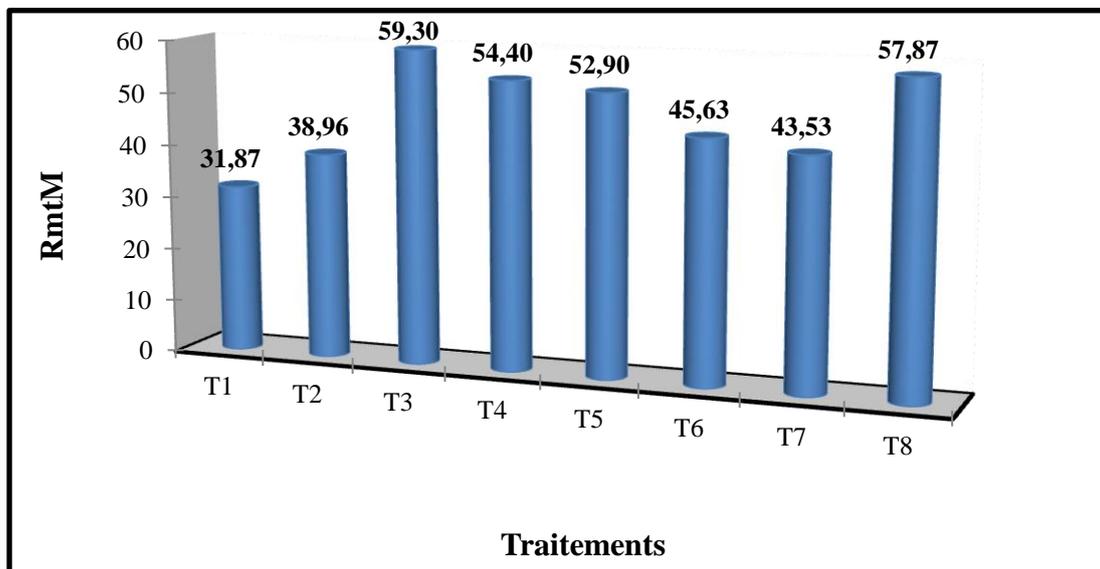


Figure n° 11: rendement machine (qx/ha)

Le tableau d'analyse statistique (tableau 8) permet de remarquer une influence significative du phosphore sur les rendements en grains réellement obtenus à la récolte, ils sont en accord avec les rendements théoriques calculés (figure n°11). Cette influence est claire entre les traitements recevant un apport d'engrais phosphaté et le témoin (T₁) qui présente le faible rendement avec une moyenne de 31,87 qx/ha ce qui traduit le rôle primordial du phosphore dans l'amélioration des rendements des cultures. **FAGERIA et BALIGAR (1997) in FAGERIA et al., (2009)**, concluent que la déficience en phosphore est le principal nutriment limitant le rendement pour la production annuelle de cultures.

BEN NACEUR (1991), montre qu'un apport de phosphate améliore le rendement quelque soit la méthode d'application.

Concernant les rendements des traitements reçus du phosphore sous différents mode d'apports sont aussi influencés par ce dernier comme il est illustré dans le tableau (8) et la figure (11). La comparaison des moyennes permet de trouver que les rendements les plus élevés sont obtenus dans le traitement localisé (T_3) avec une moyenne de 59 qx/ha et le traitement mixte entre la localisation et la pulvérisation (T_8) avec une moyenne de 57.87 qx/ha en constituant le groupe homogène (A), cependant le faible rendement est obtenu dans l'apport au fond (T_2) avec une moyenne de 38,96 qx/ha. Il semble que le traitement localisé (T_3) et le traitement mixte entre la localisation et la pulvérisation (T_8) favorisent l'amélioration de rendement de cette culture grâce aux ions phosphatés présents en quantité relativement suffisantes pour la nutrition des plantes cultivées. **SOENEN et al., (2013)**, montre que les essais de la localisation des engrais au semis montrent qu'elle a souvent un réel intérêt pour le phosphore: elle améliore la disponibilité de cet élément à la jeune plante, ce qui se traduit par un gain de vigueur au départ et peut avoir des effets bénéfiques sur le rendement, ils ajoutent que cette technique peut contribuer à limiter les pertes en éléments fertilisants. **VALE (2010)**, conseiller de localiser les apports d'engrais phosphaté dans la zone de sol où se développent les racines des jeunes plantes en phases précoces de leur développement où les plantes sont les plus sensibles à la carence en phosphore afin d'éviter ses effets négatives sur la production finale. Ces résultats mettent en évidence le rôle important de la localisation (T_3) et le traitement mixte (T_8) dans l'amélioration de la productivité de la culture de blé et la maintenance d'un niveau de nutrition phosphatée favorable aux plantes en milieu calcaire. Dans les sols calcaires, la dynamique du phosphore est contrôlée par la calcite (**BERTRAND et al 1999**).

Sans oublier le traitement pulvérisé (T_4) malgré l'application de la moitié de la dose appliqué au sol, il donne un rendement acceptable ce qui apprécier le rôle important de l'application foliaire dans l'alimentation de végétal et l'amélioration de rendement. **ARIF et al., (2006)**, montrent que trois pulvérisations foliaires de solution nutritive avec les moitiés de doses recommandées d'azote et de phosphore ont contribué à améliorer le rendement et les composantes du rendement du blé. **ABDULKAREEM et AI-ANSARI (1997)**, montrent que la pulvérisation de plantes avec N ou PNK a significativement augmenté le pourcentage de rendement précoce par rapport à l'application du sol. Les

résultats de MALAKONDAIAH *et al* (1981), montrent que la fertilisation foliaire est plus efficace que par des méthodes conventionnelles de fertilisation des sols.

Tableau n° 8. Tableau d'analyse de la variance relative au rendement machine

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
T ₃	59,300	A				
T ₈	57,867	A				
T ₄	54,400		B			
T ₅	52,900		B			
T ₆	45,633			C		
T ₇	43,533			C		
T ₂	38,960				D	
T ₁	31,867					E

6. Rendement en paille

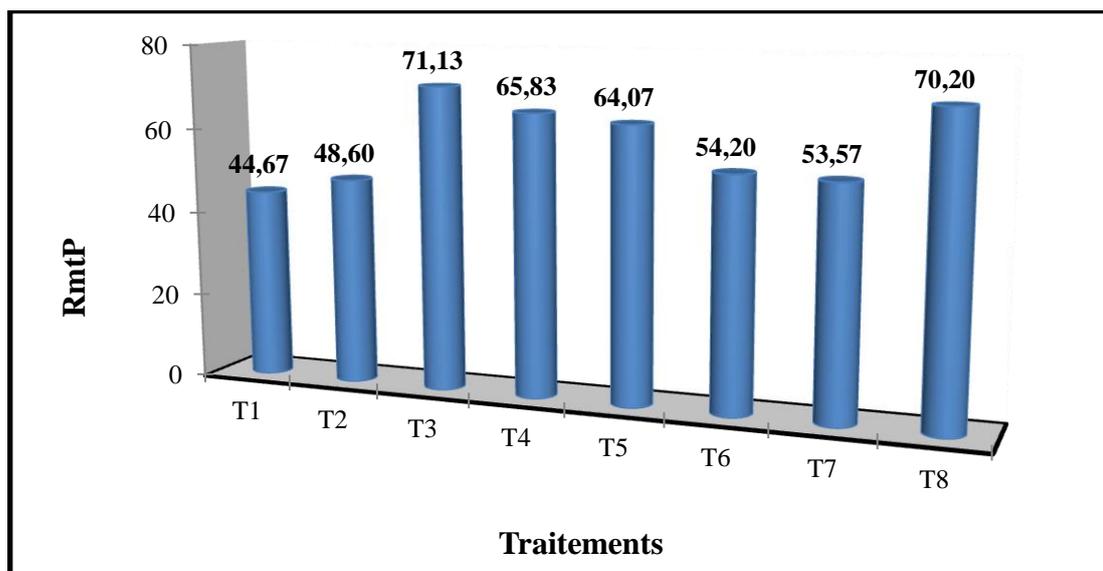


Figure n° 12: Rendement paille (qx/ha)

Les rendements en paille obtenus sont influencés significativement par l'apport de phosphore (tableau n°9, figure n°12), si on compare les traitements ayant reçu de phosphore et le témoin (T₁) qui présente le rendement le plus faible en paille avec une moyenne 44,67 qx/ha. Ces résultats apprécier le rôle de phosphore dans la production de matière sèche. Les résultats de MIHOUBE (2012) et ARSHAD *et al.*, (2016), montrent que le phosphore appliqué à augmenter de façon significative le rendement grain et paille.

La comparaison des moyennes illustrées dans le tableau (9) montre un effet positif de mode d'apport d'engrais phosphaté sur le rendement en paille et nous permet de remarquer que les rendements les plus élevés sont obtenus dans le traitement localisé (T₃) avec une moyenne de 71,13 qx/ha et le traitement mixte entre la localisation et la pulvérisation (T₈) avec une moyenne de 70,20 qx/ha qui se regroupent ensemble dans un même groupe homogène (A). Cependant le faible rendement est enregistré chez l'apport au fond (T₂) avec une moyenne de 48,6 qx/ha. Il semble que la forte concentration en ions phosphatés soit dans le sol soit dans la plante favorise l'élaboration de la matière sèche du végétal. **GERVY (1970)** montre que la teneur en matière sèche augmente par l'augmentation de la concentration du phosphore, dans la très grande majorité des cas, indépendamment de la richesse du sol. **COHAN et LE SOUDER (2012)**, montrent que dans le cas des apports de phosphore, la localisation permettra une mise en contact plus rapide du système racinaire des cultures avec l'élément. Cela est important que les besoins des cultures pour cet élément particulièrement aux stades jeunes du développement et la mise en position du phosphore à proximité des racines répondent parfaitement aux problèmes de faible mobilité de cet élément.

Les rendements en paille importants chez les traitements foliaires (T₄ et T₈) montrent que la pulvérisation d'engrais phosphaté participe à l'amélioration de la production de matière sèche en évitant les problèmes de fixation et assurant la nutrition des plantes en phosphore. Les résultats de **MALAKONDAIAH et al., (1981)**, montrent que les pulvérisations foliaires de phosphore ont augmenté significativement le poids sec de la luzerne et de l'orge.

Tableau n° 9. Tableau d'analyse de la variance relative au rendement paille

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
T ₃	71,133	A				
T ₈	70,200	A				
T ₄	65,833		B			
T ₅	64,067		B			
T ₆	54,200			C		
T ₇	53,567			C		
T ₂	48,600				D	
T ₁	44,667					E

Conclusion

Le rendement et ses composantes (poids de mille grains, nombre d'épis/m² et le nombre des grains/épis) sont nettement influencés par l'apport de l'engrais phosphaté, ceci est remarqué entre le témoin et les autres traitements. Ainsi le mode d'apport de cet engrais a amélioré de façon significative ces paramètres où le traitement localisé et le traitement pulvérisé et leur mélange ont donné des résultats supérieurs par rapport aux résultats obtenus en apport au fond malgré l'application de la même dose pour le traitement localisé et la moitié de cette dose pour l'application foliaire. Ces résultats apprécie le rôle important de mode d'apport d'engrais dans l'amélioration des paramètres agronomiques de la culture de blé et d'éviter ou minimiser les risque de fixation dans les sols calcaire.

IV. Action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur la nutrition des plantes en P_2O_5

L'évolution des teneurs en phosphore de végétal aux principaux stades de développement de la culture permet d'apprécier la nutrition phosphatée des plantes. Nous avons effectué trois prélèvements au cours de cycle végétatif pour l'analyse au laboratoire au stade tallage, au stade montaison et à la maturité, les résultats obtenus sont les suivants.

1. Prélèvement du phosphore par les plantes au stade tallage:

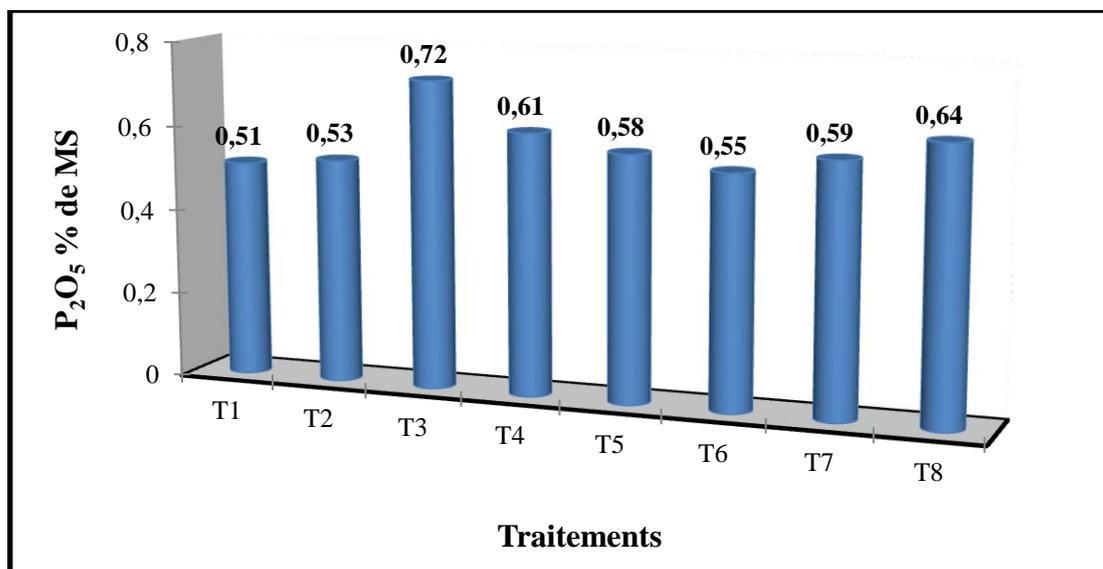


Figure n° 13: Evolution de la teneur du végétal en P_2O_5 au stade tallage

Les résultats de la teneur des feuilles en phosphate à ce stade nous permettent de connaître le régime d'absorption du phosphore sous l'influence des traitements utilisés. Les résultats (tableau n°10, figure n° 13) montrent des différences significatives manifestées entre les traitements ayant reçus des phosphates et les plantes témoins, marquant l'effet significatif d'un apport d'engrais sur la nutrition des plantes en phosphore à ce stade.

Ces résultats indiquent que le mode d'apport a un effet significatif dans la variation de la concentration entre les différents traitements et mettent en évidence l'efficacité de l'application localisé (T_3) qui présente la teneur la plus importante avec une moyenne de 0,72 % plus supérieur par rapport à l'apport au fond qui présente une moyenne de 0,53 %. Ce dernier résultat se traduit par la faible disponibilité des ions phosphatés dans la solution de sol due d'une part à la faible mobilité de cet élément dans le sol et d'autre part à sa

fixation sur le carbonate de calcium présent en grandes quantité, ce qui valorise le rôle de l'apport de phosphore en zone de forte activité racinaire dans l'efficacité de la nutrition des plantes en phosphore. D'après **BARBER (1977)**, il y a une relation entre la concentration en phosphore de la solution et la quantité de phosphate absorbée par la plante et lorsque l'engrais phosphaté est localisé dans le sol, une partie de système racinaire reçoit une dose élevée de phosphore, ainsi des doses élevées en phosphore dans le sol augmente la vitesse de diffusion. Donc on conclue que la localisation est une des solutions possibles pour compenser la faible mobilité de ces ions dans le sol calcaire.

On remarque à partir de tableau (10) et la figure (13) que des concentrations élevées sont observées chez les traitements foliaires (T₄, T₇, T₈) malgré la faible richesse du sol en phosphore assimilable et malgré aussi l'application de la moitié de la dose apportée au sol ceci se traduit par le grand rôle de la pulvérisation foliaire de l'engrais et l'absorption directe des ions phosphate dans la nutrition des plantes en cet élément.

Ces résultats montrent l'importance des modes d'apport efficaces des phosphates apportés au végétal soit par l'incorporation dans le sol près de la zone racinaire soit par la pulvérisation foliaire sur l'absorption de la plante du phosphore en comparaison avec les plantas témoin (T₁) et l'apport au fond (T₂). L'analyse de variance (tableau n°10) confirme ces remarques et apprécie l'importance de l'application foliaire dans l'augmentation de concentration en P₂O₅ dans les plantes, Nos résultats confirment ceux obtenus par **MALAVOLTA et NEPTUNE (1977)**, sur la pulvérisation foliaire dans l'efficacité de la fertilisation phosphaté en montrant qu'elle est trois fois plus efficace. L'application foliaire peut garantir la disponibilité des nutriments aux cultures pour obtenir des rendements élevés (**ARIF et al., 2006**).

Tableau n° 10. Tableau d'analyse de la variance relative à la teneur du végétal en P_2O_5 au stade tallage

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
T ₃	0,723	A	
T ₈	0,637	A	B
T ₄	0,613	A	B
T ₇	0,587		B
T ₅	0,577		B
T ₆	0,547		B
T ₂	0,527		B
T ₁	0,510		B

2. Prélèvement du phosphore par les plantes au stade montaison:

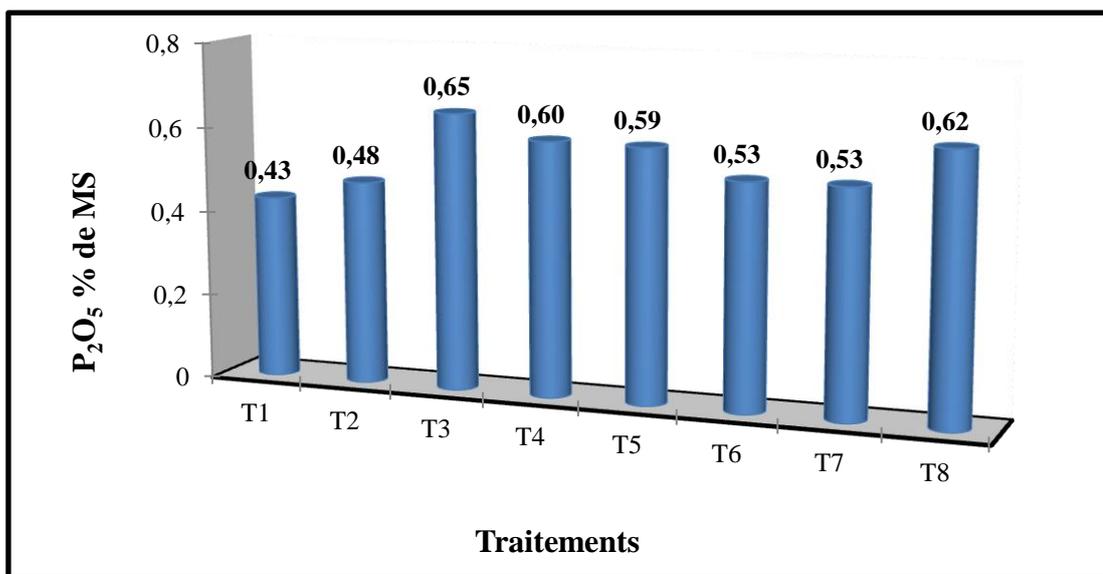


Figure n° 14: Evolution de la teneur du végétal en P_2O_5 au stade montaison

Les résultats (tableau n°11, figure n° 14) montrent une différence de concentration entre les traitements reçus un apport de phosphore et les plantes témoins (T₁) qui présente la plus faible teneur avec une moyenne de 0,43 %, cette remarque montre l'effet positif d'un apport de phosphore sur la nutrition de végétal.

Concernant la teneur selon le mode d'apport on trouve aussi une différence significative entre les traitements, on observe que les concentrations les plus élevées sont trouvées chez l'application localisée (T₃) et le traitement mixte entre cette dernière et

l'application foliaire (T_8) avec des moyennes de 0,65 % et 0,62 % respectivement qui se groupe dans le même groupe homogène (A) tandis que, la faible concentration est enregistrée chez l'apport au fond (T_2) avec une teneur de 0,48 %. Il semble que l'application localisée (T_3) et le traitement mixte entre cette dernière et l'application foliaire (T_8) participent mieux dans la nutrition des plante en phosphore que les autres traitements par les ions de phosphore libres dans le sol et apportés au feuillage par la pulvérisation. Donc la disponibilité du phosphore dans le sol et les feuilles pour les plantes représente un grand intérêt agronomique dans le but de l'amélioration de la production agricole et permet éviter ou minimiser le risque de perte des ions phosphatés par les processus de fixation que présente l'apport au fond. **TOMAS (2011)**, montre que dans les sols très calcaires il est plus judicieux de localiser les apports en phosphore proche de la culture afin d'améliorer l'efficacité des engrais. Selon **BARBER (1977)**, le degré de fixation de phosphore est également influencé par la dose d'application, des doses plus élevées d'application entraîne moindre degré de fixation. Il ajoute que lorsque l'engrais phosphaté est localisé dans le sol, une partie de système racinaire reçoit une dose élevée de phosphore. Selon **DUTIL (1976)**, l'insolubilisation moyenne en sol calcaire est de l'ordre de 30 %. La réserve initiale de P_2O_5 provenant des reliquats des fumures et de minéralisation des résidus des récoltes passe progressivement sous des formes plus difficilement assimilables suite au processus de rétrogradation et ajoute que ce processus accentue d'avantage dans les sols appauvris en matière organique (**RADET, 1961**). Les ions introduits qui ont perdu leur labilité en sol calcaire alimentent presque exclusivement la fraction P-Ca (**GACHON, 1973 in MASMOUDI, 1998**). Dans les sols calcaires et alcalins en raison du pH élevé et de la forte concentration d'ions calcium, certains nutriments tels que le phosphore, le fer et le zinc, leur disponibilité est diminué (**HEYDARNEZHAD et al., 2012**). A un pH neutre, la solubilité de phosphore est principalement contrôlée par des réactions d'adsorption, il peut précipiter sous forme de phosphate de Ca (**WENG et al. 2011 in DUFFNER et al., 2012**).

Le prélèvement de phosphore par la culture de blé exprimé en pourcentage de la matière sèche dans ce stade montre que les concentrations en phosphore de la plante sont plus élevées au stade tallage par rapport au stade montaison se traduit par l'âge des plantes (plus les plantes sont jeune plus l'absorption de phosphore augmente), ces résultats sont accord avec les résultats de **GACHON (1983)**, qui montre que la concentration en phosphore est

la plus forte dans les organes les plus jeunes et il montre que les métabolites phosphatés vont se transférer vers les organes reproducteurs. **BARBER (1977)**, montre que les racines des jeunes plantes absorbent le phosphore bien plus rapidement que les racines des plantes âgées et les réponses sont plus grandes au phosphore en début de croissance. Les traitements de l'application foliaire (T₄ et T₈) montrent aussi des teneurs importantes et présents des moyennes élevées. Cette augmentation de la concentration de phosphore dans la plante a été accompagnée par un effet positif sur le rendement et le poids spécifique des grains.

Tableau n° 11. Tableau d'analyse de la variance relative à la teneur du végétal en P₂O₅ au stade montaison

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
T ₃	0,650	A			
T ₈	0,624	A			
T ₄	0,596	A	B		
T ₅	0,593	A	B		
T ₇	0,530		B	C	
T ₆	0,529		B	C	
T ₂	0,478			C	D
T ₁	0,430				D

3. Prélèvement du phosphore par les plantes à la maturité:

➤ Teneur des grains en P_2O_5

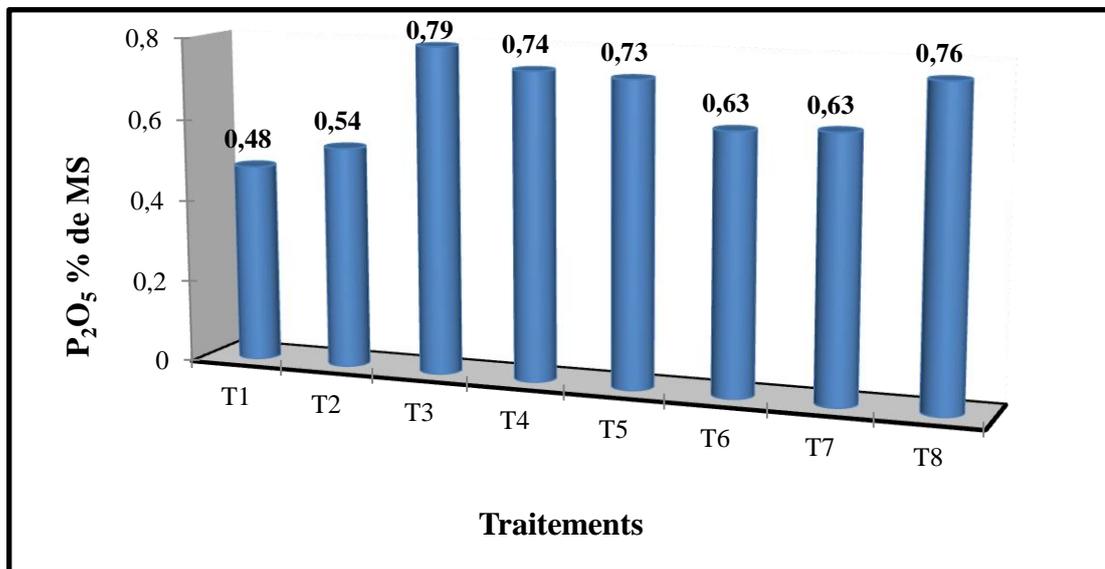


Figure n° 15: Evolution de la teneur des grains en P_2O_5

Les résultats (tableau 12, figure n° 15) montrent des variations observables entre les traitements ayant reçu d'apport d'engrais phosphaté et le traitement témoin (T₁) qui présente la faible concentration.

Selon les différents modes d'application d'engrais phosphaté on remarque aussi que la teneur des grains en phosphore augmente avec l'augmentation de la teneur des feuilles et n'est pas obligatoirement avec l'augmentation de la richesse de sol en phosphore assimilable. Ces résultats apprécier le rôle important de mode d'application dans l'exportation de phosphore par la culture. Le test de Newman – Keuls a montré un effet significatif de la fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphore des grains (tableau 12), les moyennes varient de 0,54 % à 0,79%, les meilleurs valeurs sont obtenu chez les traitements : T₃, T₄, T₅ et T₈ (apport localisé, application foliaire, apport en bande et le traitement mixte ente la localisation et la pulvérisation par ordre) qui se regroupe dans le même groupe homogène et les faibles teneurs sont enregistré à l'apport au fond (T₂) avec une moyenne de 0,54 %. D'après CASTILLON *et al* (1993), lorsqu'une espèce est cultivée pour ses graines, l'essentiel du phosphore prélevé par la culture est présent dans le grain et donc exporté. GACHON (1983) et MASMOUDI (1998), montrent que les métabolites phosphatés transfèrent vers les organes de réserve, notamment vers les organes

reproducteurs. **GERVY (1970)**, indique que le phosphore s'accumule dans les grains qui sont à maturité.

Tableau n° 12. Tableau d'analyse de la variance relative à la teneur des grains en P_2O_5 au stade maturation

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
T ₃	0,793	A			
T ₈	0,760	A			
T ₄	0,745	A			
T ₅	0,735	A			
T ₇	0,635		B		
T ₆	0,626		B		
T ₂	0,539			C	
T ₁	0,483				D

Conclusion

Selon les résultats obtenus sur les prélèvements du phosphore par la plante, la teneur en phosphore augmente au stade tallage, quand les plantes étant jeunes absorbent une quantité importante de phosphore par rapport au stade montaison. La teneur en phosphore diminue avec le vieillissement des plantes par contre les quantités du phosphore contenues dans les grains augmentent grâce à l'accumulation et le transfert des métabolites phosphatés vers les grains. Le mode d'apport a un effet positif sur la nutrition des plante, la localisation des engrais phosphaté constitue un mode efficace pour minimiser les processus de perte et de rétrogradation des ions phosphatés dans le sol. En plus, le phosphore pulvérisé a réagi de façon significative malgré l'application de la moitié de la dose dans la nutrition des plantes et permet ainsi d'éviter le processus de fixation calcaire.

V. Action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur la richesse du sol en phosphore assimilable

Dans le but d'apprécier l'expression de l'engrais phosphaté apporté en différents modes dans l'enrichissement du sol en phosphore assimilable et de suivre l'évolution des teneurs de ce dernier dans le sol, ainsi que la connaissance de la dynamique de cet élément, on a effectué deux prélèvements durant le cycle de la culture à une profondeur de 0-20cm pour doser au laboratoire la teneur en phosphore assimilable à deux stades de la culture : tallage et maturité.

Les résultats obtenus sont consignés et discutés dans ce qui suit.

1. Richesse du sol en phosphore assimilable au stade tallage :

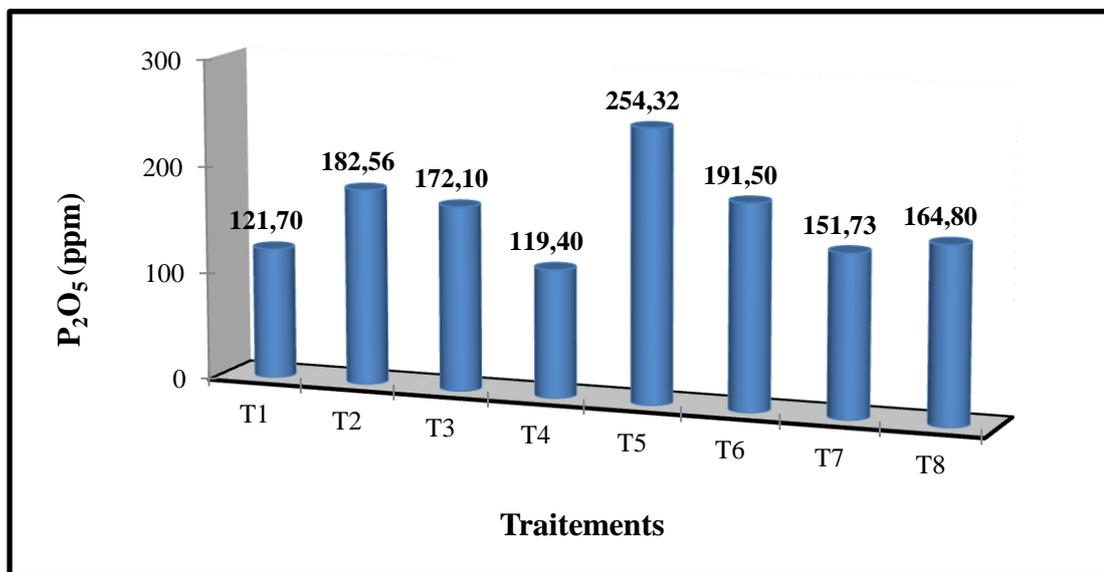


Figure n°16: Evolution du phosphore assimilable au stade tallage

les résultats (tableau 13, figure n° 16) montrent une action positive de l'apport d'engrais sur la richesse du sol en phosphore assimilable, ceci est illustré par l'effet des traitements du phosphore incorporé au sol par rapport aux parcelles qui n'ont rien reçu du phosphore (témoins (T₁) et l'application foliaire total (T₄)), ces derniers ont enregistré les teneurs les plus faibles avec des moyennes de 121,7 ppm et 119,4 ppm respectivement, cela est dû à l'action de triple superphosphate apporté au sol qui a libéré des ions phosphatés dans le sol qui ont contribué significativement à la richesse du sol en phosphore assimilable. **GACHON (1977)**, montre que le flux d'ions dépend évidemment de la masse d'ions phosphatés qui participent aux échanges sol-solution.

Le tableau 13 montre une variation de richesse entre les différents modes d'apport, elle montre que la richesse moyenne le plus important est enregistrée chez l'apport en bande (T₅) qui constitue un groupe homogène (A) avec une moyenne de 254,32 ppm et la teneur la plus faible est enregistrés chez l'application foliaire (T₄) avec une moyenne de 119,396 ppm. **MALAVOLTAT et NEPTUNE (1977) et BARBER (1977)**, montrent une réponse significative de végétal en cas d'application en bande d'engrais phosphaté.

Dans ce cadre on parle aussi de mode d'apport pour une même dose d'engrais qui agisse positivement dans la richesse de sol en phosphore assimilable et la minimisation des effets néfastes des sols calcaires qui ont une capacité élevée de précipitation et rétrogradation des ions phosphatés et leurs développement vers des composés stables non profitable par le végétal ce qui participe à la diminution de la concentration de la solution de sol en P₂O₅, donc la présence de calcaire est souvent présenté comme un variable puissant de l'acide phosphorique, qu'il rendait inefficace en le faisant évoluer en formes insolubles. Dans les sols où le pH est élevé, comme dans le cas des sols de la région semi-aride, une petite partie de ce phosphore appliqué au sol est adsorbé à la surface des minéraux secondaires de la fraction argileuse et faible teneur en oxyhydroxydes de Fe et Al), tandis que la majeure partie est précipitée avec du Ca⁺⁺ de la solution du sol, formant de l'hydroxyapatite (Ca₅(PO₄)₃OH) (**NOVAIS et SMYTH, 1999 in COSTA SANTOS et al., 2011**). **RUPA et al., (2001) in SATO et COMERFORD, (2005)**, ont pensé que la diminution de la désorption à des valeurs de pH élevées était due à la précipitation de phosphore sous forme de phosphate de Ca, étant donné que les sols étaient a teneur élevé en Ca⁺⁺ échangeable. Les travaux d'**ARVIEU et BOUVIER (1974)** ont démontré que dans un sol calcaire représentatif, les phosphates monocalciques précipitent rapidement avec le carbonate de calcium (Ca⁺⁺CO₃⁻⁻) pour donner des phosphates dicalciquesdihydratés évoluant ensuite en apatites. En sols à pH très élevé (pH> 8) les phosphates mono et dicalciques se transforment en phosphates tricalciques, puis en phosphates cristallisés de type apatite (**LOUCHE, 2009**). Le phosphore apporté au sol par les engrais phosphatés peut être précipité par les formes libres de calcium, de fer ou d'aluminium plus ou moins abondantes selon le type de sol, et conduire à la néoformation de minéraux stables (**TISDALE et al., 1985 in PLASSARD et al., 2015**). **TROUNG (1988)**, montre que le phosphore réagit avec le CaCO₃ ou Ca⁺⁺ est précipité en forme insoluble tricalcique.

Tableau n° 13. Tableau d'analyse de la variance relative à l'évolution du phosphore assimilable au stade tallage

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
T ₅	254,322	A	
T ₆	191,503	A	B
T ₂	182,555	A	B
T ₃	172,100	A	B
T ₈	164,802	A	B
T ₇	151,735		B
T ₁	121,703		B
T ₄	119,396		B

2. Richesse du sol en phosphore assimilable au stade récolte :

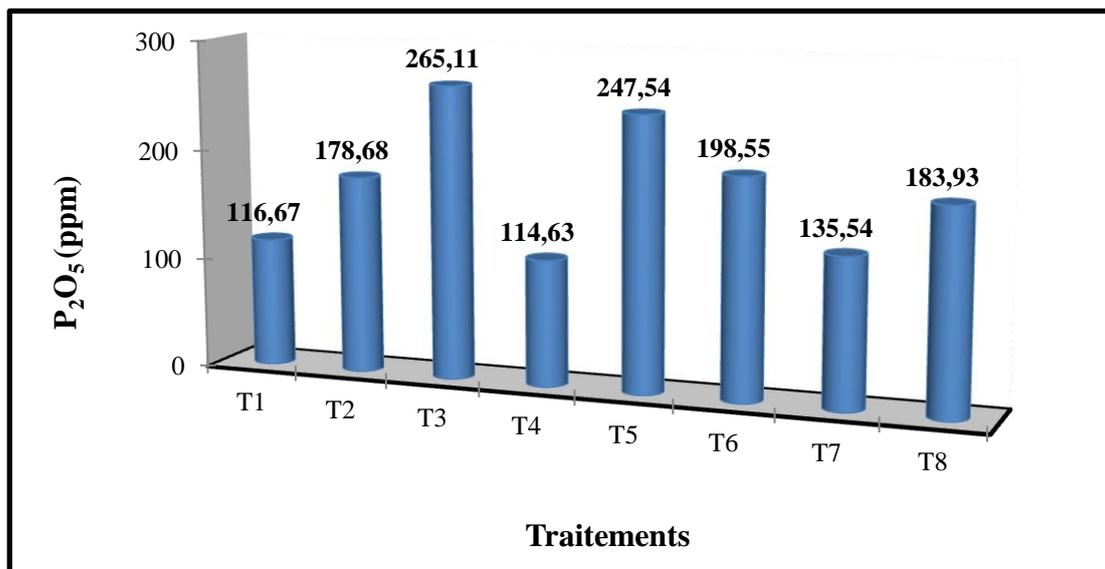


Figure n° 17: Evolution du phosphore assimilable au stade récolte

A partir des résultats obtenus (tableau 14, figure n° 17) on remarque qu'il y a une variation de richesse toujours entre les traitements où l'engrais phosphaté est incorporé dans le sol en comparaison avec le traitement témoin (T₁) et l'application foliaire total (T₄) qui ont enregistré habituellement les teneurs les plus faibles avec des moyennes de 116,67 ppm et 114,36 ppm respectivement.

Concernent les traitements dont le phosphore est apporté dans le sol, les modes d'apport aussi ayant un effet significative sur la richesse du sol en phosphore assimilable. Les résultats d'extraction de phosphore du sol (tableau 14) montrent que les fortes teneurs

sont enregistrées chez l'application localisé (T_3) avec une moyenne de 265,11ppm et l'apport en bande (T_5) avec une moyenne de 247,54 ppm qui se regroupe dans le même groupe homogène (A) et la teneur faible est enregistré chez l'apport au fond (T_2) avec une moyenne de 178,64 ppm. Cette variation correspond à l'action de mode d'apport d'engrais et leur importance dans la disponibilité des ions phosphatés dans le sol pour être assimilables par les racines. **BARBER (1977)**, montre que l'épandage en plain a l'avantage de mettre en contact la plupart des racines des plantes mais a l'inconvénient d'un mélange avec une grande quantité de sol de sorte que le potentiel de perte par fixation est élevé, cependant la localisation et l'application en bande permet de minimiser la surface du contact entre l'engrais et le sol de sorte que les processus de la fixation soit au minimum.

A ce stade on remarque aussi une diminution de richesse en comparaison avec le stade tallage. Cette diminution est due bien sûr à l'absorption par la culture et la fixation par les constituants du sol lorsque le temps de contact entre sol et apport d'engrais augmente. La diminution de la teneur en phosphore assimilable peut s'expliquer par le fait que l'engrais soluble apporté au sol tel que le TSP, libère ces ions phosphoriques, réagit plus rapidement et évolue très vite dans le temps dans un sol calcaire (**TROUNG et al., 1984**). **MASMOUDI (1998)**, montre une diminution rapide et progressive de la teneur en phosphore soluble suivi d'une éventuelle fixation ou rétrogradation et un enrichissement notable de la fraction P-Ca, c'est la transformation de certains ions phosphoriques vers les formes calcique. Les résultats de **BARBER (1977)** montrent que les ions phosphatés sont rapidement adsorbés sur les surfaces des particules de sol et précipités sous formes de phosphate de calcium, de fer et d'aluminium ; et **PARENT (2003)**, trouve que le phosphore apporté au sol sous forme d'engrais évolue vers des formes de moins en moins bio-disponibles. **VELAYUTHAM (1980)**, montre qu'à un pH supérieur à 6 on aura une précipitation de phosphate de calcium. **ARVIEU (1972)**, montre que le phosphore monocalcique est rapidement insolubilisé sous forme de phosphates dicalcique dihydraté et ajoute que le carbonate de calcium en particulier provoque la transformation progressive de ce dernier en en phosphate octacalcique. Dans les sols, l'adsorption des ions phosphatés s'effectue par l'intermédiaire des cations sur les colloïdes argileux et humiques ou directement sur le calcaire et des hydroxydes métallique (**ARAKRAK et al., 2006**).

Ces résultats apprécient le rôle de la localisation des engrais pour minimiser la perte des ions phosphatés par cette fixation, aussi elle permet d'augmenter la concentration de cet élément par rapport au témoin et l'apport au fond.

A partir de la comparaison des teneurs de sol en phosphore assimilable au stade tallage et au stade maturation on remarque une augmentation de teneur chez le traitement localisé (T₃) et dans une moindre mesure chez le traitement mixte entre la localisation et l'apport au fond (T₆) qui se traduit par la vigueur et les excretions acides des racines ce qui en accord avec les résultats de **GACHON (1983)** qui montre que l'excrétion d'acides organiques par les racines et/ou par microorganismes du rhizocylindre provoquant la solubilisation de phosphates calciques, soit la chélation (**HINSINGER, 2011** et **PLASSARD et al., 2015**). Un apport localisé de phosphore permet une prolifération des racines **HINSINGER (2001)**. Les plantes peuvent modifier radicalement les conditions chimiques dans la rhizosphère par la libération des exsudats des racines, tels que les ligands organiques, c'est une autre activité de la racine qui peut altérer la concentration de phosphore dans la solution du sol en modifiant les équilibres dissolution / précipitation et désorption / adsorption, les racines peuvent influencer la mobilité du phosphore dans le sol (**BERTRAND et al., 1999**)

Tableau n° 14. Tableau d'analyse de la variance relative à l'évolution du phosphore assimilable à la maturité

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
T ₃	265,105	A		
T ₅	247,543	A		
T ₆	198,551		B	
T ₈	183,930		B	
T ₂	178,682		B	
T ₇	135,535			C
T ₁	116,670			C
T ₄	114,626			C

Conclusion

D'après les résultats d'action de mode d'apport d'engrais phosphaté sur la richesse du sol en phosphore assimilable au stade tallage et au stade récolte nous montrons que l'application d'un apport d'engrais phosphaté a provoqué un enrichissement significatif du sol en phosphore assimilable en comparaison le témoin. Ainsi cet enrichissement est varié en fonction de mode d'application de cet engrais. Les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité et le rôle primordial de la localisation de l'engrais phosphaté dans l'augmentation de taux des réserves assimilables de phosphore e d'une part et de minimiser le problème de la fixation calcaire dans ce type de sol. La diminution des valeurs de teneur en P_2O_5 entre le stade tallage et la récolte est due d'une part aux prélèvements des plantes, et d'autre part au transfert des ions phosphates vers des formes non assimilables.

Etude des corrélations

Tableau n° 15. Matrice de corrélation (Pearson) :

Variables	Hp/ r	NG/E	NE/m ²	PMG	Rmt T	Rmt M	Rmt P	P ₂ O ₅ f-t	P ₂ O ₅ f-m	P ₂ O ₅ G	P ₂ O ₅ s-t	P ₂ O ₅ s-r
Hp/ r	1	0,968	0,844	0,975	0,986	0,974	0,947	0,809	0,970	0,972	0,337	0,525
NG/E	0,968	1	0,761	0,906	0,941	0,918	0,865	0,705	0,903	0,927	0,339	0,437
NE/m ²	0,844	0,761	1	0,886	0,906	0,915	0,919	0,915	0,912	0,875	0,176	0,585
PMG	0,975	0,906	0,886	1	0,991	0,992	0,991	0,860	0,993	0,991	0,286	0,543
Rmt T	0,986	0,941	0,906	0,991	1	0,996	0,982	0,857	0,990	0,990	0,281	0,529
Rmt M	0,974	0,918	0,915	0,992	0,996	1	0,990	0,872	0,993	0,988	0,259	0,547
Rmt P	0,947	0,865	0,919	0,991	0,982	0,990	1	0,885	0,988	0,980	0,199	0,512
P ₂ O ₅ f-t	0,809	0,705	0,915	0,860	0,857	0,872	0,885	1	0,909	0,862	0,020	0,515
P ₂ O ₅ f-m	0,970	0,903	0,912	0,993	0,990	0,993	0,988	0,909	1	0,991	0,235	0,545
P ₂ O ₅ G	0,972	0,927	0,875	0,991	0,990	0,988	0,980	0,862	0,991	1	0,257	0,509
P ₂ O ₅ s-t	0,337	0,339	0,176	0,286	0,281	0,259	0,199	0,020	0,235	0,257	1	0,786
P ₂ O ₅ s-r	0,525	0,437	0,585	0,543	0,529	0,547	0,512	0,515	0,545	0,509	0,786	1

Concernant les composantes du rendement (Nombre d'épis / m², nombre de grain/épi et le poids mille grains) on a enregistré des fortes corrélations avec le rendement en grains (tableau n° 15), cela signifie que le rendement est très influencé par ces composantes. Il existe par ailleurs une bonne corrélation entre la paille produite et le rendement en grains (tableau n° 15).

Ces résultats montrent une relation positive entre la teneur des feuilles en P₂O₅ et les composantes de rendement et une liaison positive entre les exportations de phosphore et les rendements obtenus, on constate principalement que le rendement est très influencé par la fertilisation phosphatée et l'exportation des plantes en cet élément.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire nous permis d'avoir certains renseignements sur l'effet de mode d'apport d'engrais phosphaté sur le problème de blocage et de rétrogradation des ions phosphatés par le carbonate de calcium qui est présent dans les sols calcaires à partir de l'étude de certains paramètres d'une culture de blé (la croissance des plantes, le rendement de la culture et ces composantes, la nutrition phosphaté de la culture et la richesse du sol en phosphore assimilable). Ces paramètres ont été évalués afin d'identifier le mode le plus efficace dans les sols calcaires dont l'objectif de profiter en maximum de la fertilisation phosphaté et d'éviter la perte des ions phosphatés par la fixation calcaire dans ce type de sol et pour obtenir un rendement économique maximal.

A partir des résultats obtenus, il est possible de retenir les points essentiels suivants :

L'application d'un engrais phosphaté sur la culture de blé agit de façon significative, la croissance de la culture de blé est illustrée par une augmentation d'hauteur des tiges, cette dernière se manifeste entre les traitements ayant reçu un engrais phosphaté et les plantes témoin. Ainsi l'application de phosphore a influencé positivement tous les composantes de rendements, la richesse du sol en phosphore assimilable et la nutrition phosphaté des plantes.

L'application au fond d'engrais phosphaté permet une surface de contact importante entre l'engrais et le sol riche en carbonate de calcium, ce qui favorise la fixation des ions phosphatés par le calcaire et la réaction de précipitation calcique du phosphore, ce qui minimise l'efficacité de la fertilisation phosphatée appliquée dans ce type de sols, se traduit par une chute de rendement et une faible croissance. En plus, la teneur du sol en phosphore assimilable assez faible par rapport à l'apport localisé et la nutrition phosphatée de la culture étudiée à partir de la teneur de feuilles en P_2O_5 est assez faible aussi en comparaison avec les autres modes d'apport.

Concernant l'application en bande, les résultats obtenus pour ce mode d'apport sont satisfaisants soit pour la croissance et le rendement soit pour la nutrition phosphaté de la culture et la richesse du sol en phosphore assimilable. Il peut constituer une bonne solution

pour le problème de fixation calcaire des ions phosphatés car l'engrais est appliqué en petite surface et à la proximité des racines de la culture ce qui minimise la surface de contact entre l'engrais et le sol donc, ce mode d'apport assure une efficacité de fertilisation phosphatée en sol calcaire.

L'application localisée de l'engrais phosphaté permet de mettre une quantité importante d'engrais très proche à la rhizocylindre ce qui assure une bonne nutrition de la culture en phosphore et minimise ainsi la fixation des ions phosphatés par le calcaire et par conséquent une bonne croissance des plantes cultivées par la mise en offre d'une quantité importante en phosphore assimilable à la disponibilité des racines. Les rendements obtenus par ce traitement sont les plus élevés par rapport autres rendements obtenus par les autres modes, il constitue un mode efficace parmi les modes proposés dans cette étude dans le type de sol concerné.

L'application foliaire est un mode d'apport d'engrais appliqués hors sol, par conséquent aucun contact entre l'engrais et le sol. Les résultats obtenus par ce mode d'apport sont satisfaisant pour les paramètres étudiés malgré l'utilisation de la moitié de la dose utilisée pour les autres modes, donc ce mode d'apport peut constituer un des solutions contre l'insolubilisation des phosphates en sols calcaires.

Si on parle des traitements mixtes le traitement commun entre la pulvérisation et la localisation donne des bons résultats pour tous les paramètres étudiés avec une supériorité des rendements obtenus avec ce traitement grâce à la mise d'une quantité importante d'engrais près des racines des plantes donc et en plus la dose appliquée sur les feuilles participe favorablement dans la nutrition de la culture. Donc ce mode d'apport constitue un mode très efficace dans les sols calcaires

L'analyse chimique effectuée sur les feuilles et les grains montre que l'application localisée et l'application mixte entre la localisation et la pulvérisation assure une bonne nutrition phosphatée pour la culture. Ainsi que l'analyse de phosphore assimilable du sol montre que la localisation de l'engrais phosphaté permet de mettre une quantité importante de phosphore assimilable à la disponibilité des plantes.

En conclusion on peut dire que l'application localisée et l'application mixte entre la localisation et la pulvérisation sont les modes les plus efficaces pour les sols calcaires pour

minimiser le blocage et la rétrogradation des phosphates des engrais minéraux et par conséquent l'augmentation des rendements des cultures.

On peut suggérer l'exploitation des résultats obtenus dans cette étude dans des recherches appliquées liées à l'amélioration de la fertilité et la rentabilité des sols calcaires dans le but d'alléger ou éviter l'effet néfaste de carbonate de calcium sur le phosphore dans le milieu nutritionnel des plantes cultivées.

Références bibliographique

- **ABDU N., 2006** - Soil-phosphorus extraction methodologies: A review. African Journal of Agricultural Research Vol 1 (5). Pp 159 à 161.
- **ABDULKAREEM M and AL-ANSARI A M S., 1997** - Response of tomato growth to foliar and soil - applied nitrogen alone or with potassium and phosphorus, I. Growth parameters and yield. Emirates Journal of Food and Agriculture Volume 9, Issue 1. Pp 81 à 99.
- **AISSA A D et MHIRI A., 2002** - Fertilisation phospho-potassique du blé dur en culture intensive en Tunisie. Cahiers Agricultures n°11. Pp 391 à 397.
- **AMIR Y, 2014** - La dépendance alimentaire et les aléas du climat. Revue Campus N°7. Pp 58 à 59.
- **ARAKRAK A., FROSSARD E et JACQUIN F, 2006** - Adsorption du phosphore dans les sols calcaires. COVAPHOS II Vol 3. Pp 159 à 169.
- **ARIF M., CHOHAN M A., ALI S., GUL R AND KHAN S., 2006** - Response of wheat to foliar application of nutrients. Journal of Agricultural and Biological Science. Vol. 1, NO. 4. Pp 30 à 34.
- **ARSHAD M., ADNAN M., AHMED S., KHAN A., ALI I., ALI M., ALI A., KHAN A., KAMAL M A., GUL F AND KHAN M A., 2016**-Integrated Effect of Phosphorus and Zinc on Wheat Crop. American-Eurasian J. Agric and Environ. Sci., 16 (3). Pp 455 à 459.
- **ARVIEU J C et BOUVIER., 1974** - les processus chimiques de l'évolution des phosphates en sol calcaire. BAFES 4. Pp 207 à 224.
- **ARVIEU J C., 1972** - Contribution à la connaissance de l'évolution des engrais phosphatés en sol calcaire. Thèse de Doctorat en sciences physiques, Université de Nice, 151 p
- **ARVIEU J C., 1980** – réaction des phosphates minéraux en milieu calcaire, conséquences sur l'état et la solubilité du phosphore. BAFES 4. Pp 207 à 224.
- **BAIZE D ET JABIOL B., 1995** - Guide de description des sols. Ed. AFES-INRA, Paris. 388p.
- **BAIZE D., 2000** - Guide des analyses en pédologie, 2e éd., INRA, Paris. p 280.
- **BARBER S.A., 1977** - Application des engrais phosphatés: méthode, dose, et époque d'application en fonction de l'état phosphorique des sols. Phosphore et agriculture n° 70. Pp 121 à 128.

- **BEAUDINE I., GIROUX M., MICHAUD A et BEAUDET 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.
- **BELAID D., 2013** - zones semi-arides: revisiter la fertilisation phosphatée des céréales. Communication au 1er séminaire international Problématiques agronomiques en régions arides et semi-arides. Batna du 28-29 au 30 octobre 2013. 6 p.
- **BEN NACEUR M., 1991** – effet positif de la fertilisation phosphatés sur les composantes de rendement du niébé (*Vigna unguiculata* L) en Tunisie. *Tropicultura* 9. 2. Pp 77 à 80.
- **BENBELKACEM A., SADLI F., BRINIS L, 1995** - La recherche pour la qualité des blés durs Algérie. CIHEM - Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n° 22. Pp 61 à 65.
- **BERTRAND P. , HINSINGER B. , JAILLARD AND ARVIEU J C., 1999** - Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. *Plant and Soil* 211. Pp 111 à 119.
- **BLANCHET L., 1965** – Quelques aspects récents des études relative à l'alimentation minérale des plantes dans le sol. *Science de sol* 2. P 109-119.
- **BOCKMAN O., KCRARSTAD O., LIE H O et RICHARDS I., 1990** – Agriculture et fertilisation, les engrais et leurs avantages. Ed. Norsk hydro a.s. 258p.
- **BOUKHALFA-DERAOUI N., 2004** – Effet de la fertilisation phosphatée sur le comportement d'une variété de blé tendre (*Triticum aestivum* L. Var. Anza) conduite en conditions sahariennes. *Memmag. Univ d'Ourgla*. 81 p.
- **BOUKHALFA-DERAOUI N., HALILAT M et MEKLCHE A., 2011** -Effet d'un apport de phosphore sur une culture de blé tendre conduite en conditions irriguées. *Revue des Bio-Ressources* Vol 1 N° 1. Pp 39-46.
- **BOUKHALFA-DERAOUI N., HANIFI-MEKLCHE L et MEKLCHE A, 2015** - Effet de la nutrition phosphatée sur le rendement en grain et la concentration des grains en p, mg²⁺ et k⁺ du blé. *Revue des BioRessources* Vol 5 N° 1. Pp 10-17.
- **BRUN D et COHAN JP. , 2013** - Fertilisation sur orge de printemps. L'urée, un engrais à localiser avec précaution. *Perspectives agricoles* - n°396. Pp 14 à 18.

- **CASTILLON P., VILLEMIN Pet FARDEAU J.C., 1993** - Résidus de culture à intégrer dans le raisonnement. Perspectives Agricoles n° 181. Pp 33 à 34.
- **COHAN J P et BRUN D., 2016** –engrais localisé au semis. Comment les céréales à paille peuvent en profiter. Perspectives agricoles N°429. Pp 62 à 65.
- **COHAN J P et LE SOUDER C., 2012** Dossier Localisation au semis : assurer l'absorption des engrais NPK : Localiser l'engrais pour optimiser son absorption par les cultures. Perspectives Agricoles, 385. Pp 20-21.
- **COSTA SANTOS H., DEOLIVEIRA F H T., SALCEDO I H., DE SOUZA A P et DA MOTA SILVA V D., 2011** - kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of paraíba. R. Bras. Ci. Solon° 35. Pp 1301 à 1310.
- **DABIN. B, 1970** : méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux.Coton et fibres tropicales Vol 27 (XXV), Pasc 3. 45 p.
- **DANIEL P S., ROBERT J R., AYLING S M., 1988** – phosphorus uptake by plants: from soil to cell. Plant Physiol 116. Pp 447 à 453.
- **DIUHIL K., 1974** – Agriculture général. Ed J.B.Baillièrè, Paris. 396p.
- **DJERMOUN A., 2009** - La production céréalière en Algérie: les principales caractéristiques. Revue Nature et Technologie .n° 01. Pp 45 à 53.
- **DJILI K., 2000** - Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie. Thèse doc. INA, Alger. 243p.
- **DJILI K., DAOUD Y et AYACHE N., 1999-** Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. Etude et gestion des sols, 6, 3. Pp 201 à 213.
- **DUFFNER A., HOFFLAND E end TEMMINGHOFF E J M., 2012** - Bioavailability of zinc and phosphorus in calcareous soils as affected by citrate exudation. Plant Soil 361. Pp 165 à 175.
- **DUTHIL J., 1973** – Eliment d'écologie et d'agronomie. tome III. Ed. J.B. bailliere. Paris. 656p.
- **DUTIL P, 1976** – la fertilité phosphaté des sols calcaires. Séminaire national de sciences du sol 21-26 avril El Harache, Alger. 6p.
- **ELALAOUI A C, 2007** – fertilisation minérale des cultures ; les éléments fertilisants majeurs (Azote, potassium, phosphore). Transfert de technologie en agriculture. Bulletin mensuelle d'information et de liaison du PNTA n° 155. 4p
- **ELIARD J.L., 1979** – Manuel d'agriculture générale, base de la production végétale. Ed J.B Baillièrè, Paris. 344p.

- **FAGERIA N K., BARBOSA FILHO M P., MOREIRA A and GUIMARAES C. M., 2009** – Foliar Fertilization of Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition*, 32. Pp 1044 à 1064.
- **FAO., 2003** - Les engrais et leurs applications. Précis à l’usage des agents de vulgarisation agricole. 4^{ème} édition. Association internationale de l’industrie des engrais institut mondial du phosphate rabat, 2003. 84p.
- **FARDEAU J.C., 2005** - Dynamique du phosphore et du potassium dans le système sol-plante. Dans « Fertilisation P-K : raisonner pour agir », ARVALIS Institut du Végétal. Pp 12- 19.
- **FARDEAU J.C., MOREL C ET BONIFACE R., 1991** - Cinétiques de transfert des ions phosphate du sol vers la solution du sol : paramètres caractéristiques. *Agronomie* (1991) 11. Pp 787 à 797.
- **FERNANDEZ V., GUZMÁN P., PEIRCE C A E., MCBEATH T M., KHAYET M et MCLAUGHLIN M J., 2014** - Effect of wheat phosphorus status on leaf surface properties and permeability to foliar-applied phosphorus. *Plant Soil* n° 384. Pp 7 à 20.
- **FROSSARD E., CONDRON L. M., OBERSON A., SINAJ S., FARDEAU J. C., 2000** –Processes Governing Phosphorus Availability in Temperate Soils. *J. Environ. Qual* 29. p15-23.
- **FROSSARD E., JULIEN P., NEYROUD J A et SINAJ S., 2004** -Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. Cahier de l'environnement n° 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 p.
- **GACHON L., 1969** – Les méthodes d’application de la fertilité phosphorique des sols. *BAFES* 4, 53. 17 à 31
- **GACHON L., 1977** – Utilité d’un bon niveau de réserves phosphatées du sol. *Phosphore et agriculture* n° 70. P 27 à 33.
- **GACHON L., 1983** – L’alimentation phosphatée des cultures. *B.T.I* 376. Pp 45 à 53.
- **GERVY R., 1970** - les phosphates et l’agriculture. Ed. Dunod. Paris. 298p.
- **GROS A., 1979** – Guide pratique de la fertilisation. Ed maison rustique. Paris. 356p.
- **GUIMER. K et BARKAT. B, 2014** : conséquence d’un apport gypseux en présence de la matière organique sur quelques paramètres essentiels du sol et du blé dur (*Triticum turgidum*). *Courrier du Savoir* – N°18. Pp 123 à 128.

- **HAFIDI M., BADRP W., KAEMMERER M et REVEL J.C, 1994 -** Comparaison des méthodes d'extraction chimique et biologique pour la détermination du phosphore assimilable. Actes Inst. Agron. Veto (Maroc), Vol 14 (3). Pp 43 à 48.
- **HALAJNIA A., HAGHNIA G.H., FOTOVAT A et KHORASANI R., 2009 -** Phosphorus fractions in calcareous soil samended with P fertilizer and cattlemanure. Geoderma 150. Pp 209–213.
- **HALILAT M T., 2004 -** Effect of Potash and Nitrogen Fertilization on Wheat under Saharan Conditions. IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa; Rabat, Morocco, 24-28 November, 2004. 16p.
- **HALITM A., 1988-**Les sols des régions arides d'Algérie. Ed, OPU, 361p.
- **HERNANDO V., 1977 –** Problème du phosphore dans les sols calcaires espagnols. Phosphore et agriculture n° 70. Pp 53 à 69.
- **HEYDARNEZHAD F., SHAHINROKHSAR P., VAHED H S and BESHARATI H., 2012 -** Influence of Elemental Sulfur and Sulfur Oxidizing Bacteria on Some Nutrient Deficiency in Calcareous Soils. Intl J Agri Crop Sci. Vol., 4 (12). Pp 735 à 739.
- **HINSINGER P., 2011 -** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Plant and Soil n° 237. Pp 173 à 195.
- **HOLFORD I C R., 1997 –** Soil phosphorus: its measurment, and it suptake by plants. Australian Journal of Soil Research. Vol 35. Pp 227 à 240
- **HOSSAIN M B etRYU K S., 2009 -** Effect of foliar applied phosphatic fertilizer on absorption pathways, yield and quality of sweet persimmon. Scientia Horticulturae n ° 122. Pp 626 à 632.
- **LAMBERT J.C., 1979 -**La fertilisation phosphatée. revue cultivars. N° 115. Pp 96 à 97.
- **LEGROS J P., 2007 –** Les grands sols du mondes. Presses polytechniques et universitaires romandes. Espagne. 574 p.
- **LOUCHE J., 2009 -** régulation de la sécrétion des phosphatases acides des champignons ectomycorhiziens et mobilisation de phosphore organique dans la rhizosphère des arbres forestiers : approches biochimiques et moléculaires. Mem doc. Montpellier SupAgro. 164 p.

- **MALAKONDAIAH N., SAFAYA N M and WALI M K., 1981** - Responses of alfalfa and Barley to foliar application of N and P on a coal mine spoil. *Plant and Soil*. Volume 59, Issue 3. Pp 441 à 453.
- **MALAVOLTA E., NEPTURNE A.M.L., 1977** – Etude de la localisation des engrais sur des cultures tropicales. *Phosphore et agriculture* n°70. P 103 à 107.
- **MASMOUDIA, 1998-** Etude expérimentale sur l'efficacité du phosphate naturel de djebel Onk (Tébessa) par rapport au TSP dans la fertilisation des sols au sahara. *Mem mag, univ. Batna*, 93p.
- **MICHEL C et BOUZOUBAA A., 1980** -premiers résultats des essais de fumure de redressement phosphate au Maroc. *Al-Awamia* 60. Pp 45 à 64.
- **MIHOUB A., 2012** – Dynamique du phosphore dans le système sol-plante en conditions pédoclimatiques sahariennes. Thèse magister, univ d'Ouargla. 119p.
- **MIHOUB A., CHELOUFI H et BOUKHALFA-DERAOUI N., 2012** - dynamique du phosphore dans le système sol-plante (cas du blé dur) en conditions agro-climatiques sahariennes. *Bio-Ressources* Vol 2 N 2. Pp 70 à 78.
- **MIHOUBE A and BOUKHALFA-DERAOUIN., 2014** – performance of different phosphorous fertilizer types on weat grown in calcareous sandy soil of El-Menia, southern Algeria. *Asian journal of crop science* 6 (4). Pp 383 0 391.
- **MOREL C., BUTLER F., CASTILLON P., CHAMPOLIVIER L., DENOROY P., DUVAL R., HANOCQ D., KOUASSI A.S., KVARNSTRÖM E., MESSIGA A., METRAILLE M., RABEHARISOA L., RABOURDIN N., RAYNAL C., SAVOIE T., SINAJ S et ZIADI N., 2011** - Gestion à long terme de la dynamique du phosphore dans les sols cultivés. 10^{èmes} rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER-GEMAS, Reims, 23-24 novembre 2011. 12 pages.
- **MOREL C., PLENCHETTE C et FARDEAU JC., 1992** - La fertilisation phosphatée raisonnée de la culture du blé. *Agronomie* 12. Pp 565 à 579.
- **MOREL R., 1996** -Les sols cultivés. Lavoisier, 2^{ème} édition. p 378
- **MOSALI J.,DESTA K.,TEAL R K. , FREEMAN K W., MARTIN K L.,LAWLES J W.,AND RAUN W R.,2006-** Effect of Foliar Application of Phosphorus on Winter Wheat Grain Yield, Phosphorus Uptake, and Use Efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 29. Pp 2147 à 2163.

- **MOUGHLI L., 2000** – les engrais minéraux, caractéristiques et utilisations. Transfert de technologie en agriculture. Bulletin mensuelle d'information et de liaison du PNTA n° 72. 4p
- **NEWMAN E I., 1995** - phosphorus inputs to terrestrial ecosystems. Journal of ecology, 83. Pp 713 à 726.
- **OLSEN S R., BOWMAN R. A et WATANABE F.J., 1977** -comportement du phosphore dans le sol et interactions avec les autres éléments nutritifs. Phosphore et agriculture n° 70. Pp 35 à 52.
- **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
- **PEREDA CAMPOS M.V., 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. Université Henri Poincaré, Nancy I (France). P 141.
- **PLASSARD C., ROBIN A., LE CADRE E., MARSDEN C., TRAP J., HERRMANN L., WAITHAISONG K., LESUEUR D., BLANCHART E., CHAPUIS-LARDY L., HINSINGER P., 2015** -Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ?. Innovations Agronomiques 43. Pp 115-138.
- **RADET E., 1961** – contribution à l'étude des phosphates naturels dans les sols de craie. Ann agron 12 (5). Pp 473 à 489.
- **RUELLAN .A, 1967** - Individualisation et accumulation du calcaire dans les sols et les dépôts quaternaires du Maroc. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. V, n°4. Pp 421 à 462.
- **RUELLAN. A, 1971** - Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : les sols a profil calcaire. différencié des plaines de la basse Moulouya (Maroc oriental). Mémoires ORSTOM n° 54, Paris, p295.
- **RUELLAN. A, 1973** – Morphologie et répartition des sols calcaires dans les régions méditerranéennes et désertiques. Mémoires ORSTOM n° 21. Pp 272 à 300.
- **RUELLAN. A, 1977** – individualisation et accumulation du calcaire dans les sols et les dépôts quaternaires du Maroc. Cah. O.R.S.R.O.M., sér. Pédal., vol. V, n°4, 1967.

- **RUELLAN. A, 1984** - les sols calcaires: les principaux travaux des pédologues français. Livre jubilaire du cinquantenaire AFES 1934-1984. Pp 111 à 121.
- **SAMADI A et GILKES R., 1998** - Forms of phosphorus in virgin and fertilised calcareous soils of Western Australia. Australian Journal of Soil Research 36(4). Pp 585 à 602.
- **SATO S and COMERFORD N B., 2005-** influence of soil ph on inorganicphosphorus sorption and desorption in a humid Brazilian ultisol. R. Bras. Ci. Solo n° 29. Pp 685à 694.
- **SCHEINER J D., 2005** -Spéciation du Carbone, de l'azote et du Phosphore de différentes boues de stations d'épuration au cours de leurs incubations contrôlées dans deux types de sol. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, spécialité : Agronomie. 218 p.
- **SCHVARTZ C ; MULER J et DECROUX J, 2005** – Guide de la fertilisation raisonnée ; grandes cultures et prairies. Ed. France agricole, Paris. P 125.
- **SOENEN B., COHAN J P et BRUN D., 2013** - Fertilisation du maïs. Localiser l'engrais au semis pour une meilleure vigueur au départ. Perspectives agricoles N°398. Pp 48 à 52.
- **SOLTNER D., 2005** - Les grandes productions végétales. Ed. collection sciences et techniques agricoles, Paris (20e édition). 472 p
- **TOMAS F., 2011** - localisation de la fertilisation maintenant une évidence. techniques culturales simplifiées n°61. Pp 20 à 27.
- **TROUNG B., CHEVASSUS R.C et DJEGUI N., 1984** – étude de l'évolution de trois phosphates (DAP, TSP, Phospal) dans un sol sableux calcaire du désert de Libye. L'agronomie tropicale 39 (1). Pp 31 à 33.
- **VALE M., 2010** - Perspectives d'évolution pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée. Conférence phosphore SAS Laboratoire / AGRO-Systèmes – CHALONS EN CHAMPAGNE – 30 septembre 2010. 25p.
- **VELAYUTHAM M., 1980** – le problème de la fixation des phosphates par les minéraux et les colloïdes du sol. Phosphore et agriculture. N° 77. Pp 1 à 7.
- **YOUCEF F., 2016** - Contribution à la reconstitution du paléo-environnement au Sahara septentrional dans les sols de bassins endoréiques: Cas de la région d'Ouargla. Thèse doc. Univ d'Ouargla. 150 p.

Annexes

Annexe n° 1. Analyse de la variance relative au nombre de grains/Epi :

Source	Source	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	373,778	53,397	10,314	< 0,0001
Erreur	64	331,333	5,177		
Total corrigé	71	705,111			

Annexe n° 2. Analyse de la variance relative au nombre d'épi/m²:

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	7808,097	1115,442	43,988	< 0,0001
Erreur	64	1622,889	25,358		
Total corrigé	71	9430,986			

Annexe n° 3. Analyse de la variance relative au PMG :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	1285,873	183,696	97,700	< 0,0001
Erreur	64	120,333	1,880		
Total corrigé	71	1406,207			

Annexe n° 4. Analyse de la variance relative au rendement théorique:

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	5793,334	827,619	68,031	< 0,0001
Erreur	64	778,582	12,165		
Total corrigé	71	6571,917			

Annexe n° 5. Analyse de la variance relative au rendement machine:

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	5917,886	845,412	150,365	< 0,0001
Erreur	64	359,833	5,622		
Total corrigé	71	6277,719			

Annexe n° 6. Analyse de la variance relative au rendement paille:

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	6400,620	914,374	106,330	< 0,0001
Erreur	64	550,360	8,599		
Total corrigé	71	6950,980			

Annexe n° 7. Analyse de la variance relative au teneur des grains en P₂O₅:

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	0,792	0,113	39,764	< 0,0001
Erreur	64	0,182	0,003		
Total corrigé	71	0,974			

Annexe n° 8. Analyse de la variance relative au teneur de sol en P₂O₅ au stade tallage

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	92323,306	13189,044	3,948	0,002
Erreur	52	173716,267	3340,697		
Total corrigé	59	266039,572			

Annexe n° 9. Analyse de la variance relative au teneur des grains en P₂O₅ au stade récolte :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	201850,157	28835,737	37,743	< 0,0001
Erreur	64	48896,545	764,009		
Total corrigé	71	250746,703			

Annexe n° 10. Analyse de la variance relative au teneur des feuilles en P₂O₅ au stade tallage:

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	0,099	0,014	2,311	0,078
Erreur	16	0,098	0,006		
Total corrigé	23	0,197			

Annexe n° 11. Analyse de la variance relative au teneur des feuilles en P_2O_5 au stade montaison :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	0,359	0,051	13,309	< 0,0001
Erreur	64	0,246	0,004		
Total corrigé	71	0,605			

Annexe n° 12. Analyse de la variance relative aux paramètres étudiés.

	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
Hauteur des plantes au stade récolte	86,71 _c	100,24 _B	116,33 _A	114,11 _A	113,88 _A	103,66 _B	105,12 _B	116,46 _A
Nombre de grains par épi	25,67 _c	29,11 _B	32,22 _A	32,78 _A	32,33 _A	31,11 _{AB}	31,11 _{AB}	32,78 _A
Nombre d'épi par mètre carrée	329,11 _c	333,0 _C	360,0 _A	343,0 _B	343,67 _B	342,0 _B	339,68 _B	359,67 _A
Poids de mille grains	39,76 _E	42,74 _D	52,04 _A	50,04 _B	50,22 _B	44,8 _C	45,11 _C	51,33 _{AB}
Rendement théorique	33,58 _E	41,36 _D	60,33 _A	56,29 _B	55,75 _B	47,66 _C	47,64 _C	60,51 _A
Rendement machine	31,87 _E	38,96 _D	59,3 _A	54,4 _B	52,9 _B	45,63 _C	43,53 _C	57,87 _A
Rendement paille	44,67 _E	48,6 _D	71,13 _A	65,83 _B	64,06 _B	54,2 _C	53,58 _C	70,2 _A
P₂O₅ des feuilles au stade tallage	0,51 _B	0,53 _B	0,72 _A	0,61 _{AB}	0,58 _B	0,55 _B	0,59 _B	0,64 _{AB}
P₂O₅ des feuilles au stade montaison	0,43 _D	0,48 _{CD}	0,65 _A	0,6 _{AB}	0,59 _{AB}	0,52 _{BC}	0,53 _{BC}	0,62 _A
teneur des grains en P₂O₅	0,483 _D	0,539 _C	0,79 _A	0,75 _A	0,74 _A	0,63 _B	0,64 _B	0,76 _A
P₂O₅ assimilable au stade tallage	121,7 _B	182,56 _{AB}	172,1 _{AB}	119,4 _B	254,32 _A	191,5 _{AB}	151,74 _B	164,8 _{AB}
P₂O₅ assimilable à la récolte	116,67 _C	178,68 _B	265,11 _A	114,63 _C	247,54 _A	198,55 _B	135,54 _C	183,93 _B