RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger	Université Kasdi Merbah Ouargla	Université Ibn Khaldoun Tiaret

ECOLE DOCTORALE – SCIENCES DU SOL

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Sciences Agronomiques

Option : Sciences du sol

THEME

Dynamique du phosphore dans le système sol-plante en conditions pédoclimatiques sahariennes

Par : Mr. MIHOUB Adil

Soutenu le : 01/07/2012

Devant le jury :

Président	HALILAT Med T.	**Prof.**	**(Univ. Ghardaïa)**
Rapporteur	CHELOUFI H.	**M.C.A**	**(Univ. K.M. Ouargla)**
Examinateur	HAMDI AISSA B.	**Prof.**	**(Univ. K.M. Ouargla)**
Examinateur	SAKER Med L.	**M.C.A**	**(Univ. K.M. Ouargla)**
Invité	BOUKHALFA-DERAOUI N.	**M.A.A**	**(Univ. K.M. Ouargla)**

2011-2012

Résumé

La présente expérimentation s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche sur la fertilisation raisonnée du blé dur cultivé en conditions édapho-climatiques sahariennes. A travers deux essais (sous centre-pivot cultivé du blé et sur un sol nu), ce travail recherche le type d'engrais phosphaté (MAP, Fosfactyl et SSP) et la dose (30, 60 et 90 unités/ha) à suggérer dans ces conditions et d'apprécier l'influence de cette fertilisation phosphatée sur le prélèvement de l'azote, du phosphore et du potassium par la culture mais aussi sur le devenir de quelques paramètres physico-chimiques du sol.

Les principaux résultats obtenus attestent globalement d'un comportement de la culture différent selon la nature de l'engrais phosphaté utilisé. De ce fait, les paramètres économique et qualité du produit préciserons la dose et le type d'engrais à utiliser ; le rendement maximal d'environ 69 q/ha est l'œuvre de l'interaction Fosfactyl*(60 unités P_2O_5/ha). Les exportations des éléments majeurs (NPK) et les rendements obtenus sont corrélés positivement, dont le rendement est plus influencé par les exportations de la potasse que par les deux autres éléments (r = 0,82***).

En sol nu et dans des conditions semi-contrôlées, le suivi sur quinze semaines montre que à travers tous les traitements, une tendance à la baisse du phosphore assimilable ainsi que les bases échangeables. Cequi milite en faveur de combinaisons chimiques responsables de l'évolution du phosphore et des autres éléments vers des formes non assimilables. Par ailleurs, les apports d'engrais phosphatés ont provoqué unabaissement du pH et une légère élévation de la conductivité électrique du sol.

Mots clés : Phosphore, Engrais phosphatés, Blé dur, Fertilisation, Sahara, Algérie.

Abstract

This experiment is part of a research program on the fertilization of durum wheat grown in Saharan soil and climatic conditions. Through two tests (under center pivot grown by wheat and on uncultivated soil), this work research for the type of phosphorus fertilizer (MAP, Fosfactyl and SSP) and dose (30, 60 and 90 units / ha) to suggest in these conditions and appreciate the influence of phosphorus fertilization on of nitrogen, phosphorus and potassium exportationsbut also on the evolution of some physic and chemical parameters of soil.

The principal results demonstrate that the behavior of culturevaries with the nature of the phosphorus fertilizer used. So the economic parameters and quality of the product will specify the dose and the type of fertilizer to be used; the maximum yield is approximately 69 q/ha was obtainedby the interaction Fosfactyl* (60 P_2O_5/ha units). The yields are very strongly related to potash exports by the crop, and increase according to the quantities of exported K_2O (R = 0.82***).

On uncultivated soil and undersemi-controlled conditions, the monitoring over fifteen weeks shows that across all treatments, a tendency to the diminution in plant-available phosphorus well as the exchangeable bases. This argues in favor of chemical combinations responsible for the evolution of phosphorus and other elements into forms not available. Also, adding of phosphate fertilizers in soil caused a decrease in pH and a slight increase in electrical conductivity.

Key words: Phosphorus, Phosphorus fertilizer, Durum wheat, Fertilization, Sahara, Algeria.

ملخـــــص:

تندرج هذه الدراسة في إطار برنامج بحث حول التسميد العقلاني للقمح الصلب و المزروع في ظروف صحراوية. من خلال تجربتين مختلفتين (الأولى في تربة مزروعة بالقمح أما الأخرى غير مزروعة و في ظروف شبه مراقبة). وهذا لهدف البحث أولا عن نوع السماد المناسب(MAP، Fosfactyl أو SSP) و الجرعة (30، 60 و 90 وحدة / هكتار) التي يستحسن تطبيقها. على غرار دالكتهدف التجربة الى تقييم تأثير الأسمدة الفوسفاتية على مدى استغلال النيتروجين، الفسفور و البوتاسيوم من قبل النبات. وكذاك معرفة تأثير هاته الأسمدة على بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة.

النتائج التي توصلنا إليها تؤكد عموما أن سلوك النبات تجاه عملية التسميد تختلف باختلاف الأسمدة الفوسفاتية المستعملة. ولهذا من خلال الخصائص الاقتصادية ونوعية القمح المنتج يتم تحديد الجرعة و نوع السماد الذي يستحسن تطبيقه في هاته الظروف. أحسن مردود تم الحصول عليه هو 69 ق/هكتار وهذا باستعمال سماد Fosfactyl (60 وحدة/ هكتار).

أظهرتالمتابعة في ظروف شبه مراقبة خلال 15 أسبوع من التجربةأن هناك انخفاض في كمية الفسفور القابل للامتصاص وفي القواعد المتبادلة للتربة في جميع المعاملات. وعلى غرار هذاكان للأسمدة الفوسفاتية تأثيرفي انخفاض مستوى حموضة التربة pH و ارتفاع محسوس في الناقلية الكهربـــائية EC.

الكلمـــات الرئيسية: فسفـــور– أسمد فوسفاتية – قمح صلب- تسمـــيد – صحراء- الجزائر.

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes parents

À mes frères,

À mes sœurs,

À toute ma famille,

À mes amis,

À tous.

Avant-propos

Avant de commencer je remercie avant tout Allah tout puissant, de m'avoir guidé toutes ces années d'étude et de m'avoir donné la volonté, la patiente, le courage pour terminer ce travail.

Je tiens en premier lieu à remercier Mr. CHELOUFI H, mon directeur de recherche, pour m'avoir donné l'occasion de diriger ce projet tout le long de sa réalisation, sa patience, ses encouragements et ses conseils.Je souligne particulièrement sa rigueur, son sens de la pédagogie et son humanisme.

Je tiens également à remercier ma co-directeur Mme. BOUKHALFA-DERAOUI N. pour m'avoir fait confiance, sa disponibilité et pour avoir su m'orienter avec justesse tout au long de mon cheminement.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements au Mr. HALLILAT M.Tpour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider la commission de jury.

Je porte toute ma gratitude à Mr HAMDI AISSA B.: pour avoir bien voulu faire partie du Jury. Aussi un très grand merci à Mr. SAKER M.L d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je profite ainsi pour cette occasion pour remercier les responsables au niveau de laboratoires du département d'agronomie (UKM-Ouargla), laboratoire de bio-ressources saharienne (UKM-Ouargla), et le laboratoire de la science du sol (ENSA) et autres membres des laboratoires pour leur amitié et leur générosité.

Merci à mes parents pour qui m'ont toujours encouragé et donné le goût d'avancer.

Enfin je remercie tous ceux qui ont bien voulu m'aidé de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Adil

Liste des tableaux

Tableau 1.	Exportation de blé en (N, P_2O_5, K_2O) (PREVOST, 1999)	19
Tableau 2.	Teneur en éléments minéraux de blé (DUTIL, 1973)	20
Tableau 3.	Données climatiques de la région d'El-Goléa (1999 à 2010) (TUTIEMPO, 2011)	23
Tableau 4.	Conditions climatiques durant la compagne d'étude	25
Tableau 5.	Caractéristiques physico-chimiques du sol étudié	27
Tableau 6.	Caractéristiques chimiques de l'eau d'irrigation	27
Tableau 7.	Quantité d'eau apportée par stade de culture	31
Tableau 8.	Teneurs initiales en phosphore assimilable (Olsen) et quantité d'engrais ajoutée pour différents traitements	34
Tableau 9.	Quantités d'eau apportées durant l'expérimentation	35
Tableau 10.	Dates de prélèvement des échantillons du sol durant l'expérimentation	35
Tableau 11.	Effet de la fertilisation phosphatée sur le nombre d'épis au mètre carré	39
Tableau 12.	Effet de la fertilisation phosphatée sur le nombre grains par épi	40
Tableau 13.	Effet de la fertilisation phosphatée sur le poids de 1000 grains	42
Tableau 14.	Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en grains (q/ha)	44
Tableau 15.	Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en pailles (q/ha)	44
Tableau 16.	Influence de la fertilisation phosphatée sur la teneur en azote (% MS) de la paille	47
Tableau 17.	Influence de la fertilisation phosphatée sur la teneur en azote (% MS) de la graine	48
Tableau 18.	Influence de la fertilisation phosphatée sur l'exportation d'azote par la culture (kg/ha)	48
Tableau 19.	Influence de la fertilisation phosphatée sur la teneur en P_2O_5 de la paille (% MS)	50
Tableau 20.	Influence de la fertilisation phosphatée sur la teneur en P_2O_5des grains (% MS)	51
Tableau 21.	Influence de la fertilisation phosphatée sur les exportations de P_2O_5 par la culture (kg/ha)	51
Tableau 22.	Quantité de P_2O_5 exporté (kg) par quintal de grains produit	53
Tableau 23.	Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en potassium de la paille (% MS)	54
Tableau 24.	Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en potassium des grains (% MS)	55
Tableau 25.	Effet de la fertilisation phosphatée sur l'exportation en potassium (kg/ha)	55
Tableau 26.	Évolution des teneurs en phosphore assimilable (ppm) en fonction des périodes d'incubation des engrais (jours)	60
Tableau 27.	Évolution du pH des différents traitements durant l'incubation	63
Tableau 28.	Évolution de la salinité des différents traitements durant l'incubation	65
Tableau 29.	Évolution du calcium échangeable ($Cmol^+$/kg) des différents traitements durant l'incubation	68
Tableau 30.	Évolution du magnésium échangeable ($Cmol^+$/kg) des différents traitements durant l'incubation	69
Tableau 31.	Évolution du potassium échangeable ($Cmol^+$/kg) des différents traitements durant l'incubation	72
Tableau 32.	Évolution du sodium échangeable ($Cmol^+$/kg) des différents traitements durant l'incubation	73

Liste des figures

Figure 1.	Cycle du phosphore dans le sol (DEMERS, 2008)	7
Figure 2.	Distribution des différentes formes solubles du phosphore en fonction du pH (DROUET, 2010)	14
Figure 3.	Variation du phosphore assimilable en fonction du pH (DEMERS, 2008)	14
Figure 4.	Mécanisme de compétition de la matière organique avec le phosphate sur les sites de fixation de Al, Fe et Ca (PARENT, 2002).	15
Figure 5.	Situation de la région d'El-Goléa (Google-Earth, 2011)	22
Figure 6.	Diagramme ombrothermique de GAUSSEN d'El-Goléa (1999-2010)	24
Figure 7.	Dispositif expérimental adopté en sol cultivé	30
Figure 8.	Schéma du dispositif expérimental adopté (sol nu)	34
Figure 9.	Nombre d'épis au mètre carré par type et doses d'engrais	40
Figure 10.	Nombre de grains par épi par type et doses d'engrais	41
Figure 11.	Poids de 1000 grains (g) par type et doses d'engrais	43
Figure 12.	Rendement en grains (q/ha) par type et doses d'engrais	46
Figure 13.	Rendement en paille (q/ha) par type et doses d'engrais	49
Figure 14.	Exportations d'azote par la culture (kg/ha) par type et doses d'engrais	49
Figure 15.	Exportations de phosphore par la culture (kg/ha) par type et doses d'engrais	52
Figure 16.	Exportations de potassium par la culture (kg/ha) par type et doses d'engrais	56
Figure 17.	Relation entre le RDT en grains et nombre d'épis au m²	57
Figure 18.	Relation entre le RDT en grains et nombre de grains au m²	57
Figure 19.	Relation entre les rendements en grains et en paille (q/ha)	57
Figure 20.	Relation entre nombre de grains au m² et nombre de grains par épi	57
Figure 21.	Relation entre l'exportation du phosphore (kg/ha) et le RDT en grains (q/ha)	58
Figure 22.	Relation entre l'exportation d'azote (kg/ha) et le RDT en grains (q/ha)	58
Figure 23.	Relation entre l'exportation de la potasse (kg/ha) et le RDT en grains (q/ha)	58
Figure 24.	Relation entre PMG (g) et les prélèvements de la potasse (kg/ha)	58
Figure 25.	Relation entre les exportations d'azote et de phosphore par la culture (kg/ha)	59
Figure 26.	Relation entre les exportations de la potasse et de phosphore par la culture (kg/ha)	59
Figure 27.	Relation entre les exportations d'azote et de la potasse par la culture (kg/ha)	59
Figure 28.	Évolution des teneurs en phosphore assimilable (ppm) en fonction des prélèvements du sol	62
Figure 29.	Évolution de pH des différents traitements en fonction des prélèvements du sol	64
Figure 30.	Évolution de la conductivité électrique (dS/m) des différents traitements en fonction des prélèvements du sol	66
Figure 31.	Évolution du Ca^{2+} échangeable des différents traitements en fonction des prélèvements du sol	67
Figure 32.	Évolution du Mg^{2+} échangeable des différents traitements en fonction des prélèvements du sol	70
Figure 33.	Évolution du K^{+} échangeable des différents traitements en fonction des prélèvements du sol	71
Figure 34.	Évolution du Na^{+} échangeable des différents traitements en fonction des prélèvements du sol (jrs)	74

Table des matières

Introduction **1**

Première partie. Synthèse bibliographique

Chapitre I. Aperçu sur le phosphore dans le sol

I.1. États du phosphore dans le sol **3**
I.1.1. Phosphore total 3
I.1.2. Phosphore assimilable 3
I.2. Différentes formes du phosphore dans le sol **4**
I.2.1. Forme soluble (dans la solution du sol) 4
I.2.2. Forme minérale 5
I.2.2.1. Phosphore échangeable 5
I.2.2.2. Phosphore peu soluble ou précipité 5
I.2.3. Forme organique 6
I.3. Dynamique du phosphore dans le sol **6**
I.3.1. Adsorption-Désorption 8
I.3.2. Précipitation-Dissolution 9
I.4. Facteurs affectant la disponibilité et l'évolution du phosphore dans le sol **10**
I.4.1. Pouvoir fixateur 11
I.4.2. Facteurs physiques 11
I.4.2.1. Humidité du sol 11
I.4.2.2. Température du sol 12
I.4.2.3. Texture 12
I.4.2.4. Aération et compactage du sol 12
I.4.3. Facteurs chimiques 13
I.4.3.1. pH 13
I.4.3.2. Matière organique 15
I.4.3.3. Calcaire 16
I.4.3.4. Éléments nutritifs et sels solubles 16
I.4.4. Facteurs biologiques 17
I.4.4.1. Effet des résidus de récolte 17
I.4.4.2. Action des racines 17

Chapitre II. Le phosphore et le végétal

II.1. Importance du phosphore dans la vie du végétal **18**
II.2. Rythmes d'absorption du phosphore par la plante **19**
II.3. Exigences nutritionnelles en phosphore des plantes **19**
II.4.Teneurs des plantes en phosphore **20**
II.5. Symptômes de carence et d'excès en phosphore chez les végétaux **20**

Deuxième partie. Matériels et méthodes d'étude

Chapitre I. Description générale de la région d'étude

I.1. Situation géographique et limite **21**
I.2. Conditions climatiques de la région d'étude **23**
I.2.1. Température 23
I.2.2. Pluviométrie 23
I.2.3. Vent 24
I.2.4. Humidité relative de l'air 24
I.3. Synthèse climatique : diagramme ombrothermique de Gaussen **24**
I.4. Conditions climatiques durant la compagne d'étude **25**
I.5. Données hydrogéologiques **25**
I.5.1. Continental intercalaire ou nappe albienne 25
I.5.2. Nappe phréatique 25
I.6. Matériel d'étude **26**
I.6.1. Matériel végétal 26
I.6.2. Sol 26
I.6.3. Eau d'irrigation 27
I.6.4. Engrais testés 28

Chapitre II. Méthodologie expérimentale

II.1. Essai en sol cultivé **29**
II.1.1. Dispositif expérimental 29
II.1.2. Itinéraire technique de l'essai 30
II.1.3. Paramètres étudiés 32
II.1.3.1. Composantes du rendement 32
II.1.3.2. Rendements 32
II.1.3.3. Nutrition minérale du blé 32
II.2. Essai en sol nu **33**
II.2.1. Localisation de l'expérimentation 33
II.2.2. Matériels d'étude 33
II.2.3. Protocole expérimentale 33
II.2.3.1. Dispositif expérimental 33
II.2.3.2. Conduite de l'expérimentation 34
II.2.3.3. Paramètres étudiés 36
II.3. Méthodes d'analyses utilisées **36**
II.3.1. Analyses du sol 36
II.3.2. Analyses du végétal 37
II.4. Traitements statistiques **38**

Troisième partie. Résultats et discussion

Chapitre I. Effet de la fertilisation phosphatée sur les paramètres agronomiques et l'alimentation minérale de la plante

I.1. Effet de la fertilisation phosphatée sur les composantes du rendement **39**
I.1.2. Nombre d'épis au m² 39
I.1.3. Nombre de grains par épi 40
I.1.4. Poids de mille graines 42

I.2. Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en grains et en paille **44**

I.2.1. Rendements en grains 44
I.2.2. Rendements en paille 44
I.3. Effet de la fertilisation phosphatée sur la nutrition minérale de la plante **47**
I.3.1. Alimentation azoté du blé 47
I.3.1.1. Teneur en azote de la plante 47
I.3.1.2. Exportation d'azote par la culture 48
I.3.2. Alimentation phosphatée du blé 50
I.3.2.1. Teneur en phosphore de la plante 50
I.3.2.2. Exportation de phosphore par la culture 51
I.3.2.3. Quantité de phosphore exporté en kg par quintal de grains produits 53
I.3.3. Alimentation potassique du blé 54
I.3.3.1. Teneur en potassium de la plante 54
I.3.3.2. Exportation de potassium par la culture 55
I.4. Etude des corrélations **57**
I.4.1. Relations entre le rendement en grains et ses composantes 57
I.4.2. Relation entre les exportations des éléments minéraux et le rendement en grains 58
I.4.3. Relation entre les exportations des éléments minéraux par la culture 58

Chapitre II. Effet de la fertilisation phosphatée sur l'évolution de quelques paramètres physico-chimique du sol

II.1. Évolution des teneurs en phosphore assimilable du sol **60**
II.2. Évolution de pH du sol **63**
II.3. Évolution de la salinité du sol **65**
II.4. Évolution des teneurs en bases échangeable du sol **67**
II.4.1. Calcium échangeable 67
II.4.2. Magnésium échangeable 69
II.4.3. Potassium échangeable 71
II.4.4. Sodium échangeable 73
Conclusion générale **75**
Références bibliographiques **79**
Annexes **89**

I ntroduction

En Algérie, la zone aride représente près de 95% du territoire national dont 80% dans le domaine de l'hyperaride (saharien) (**HALITIM**, **1985**).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**).

En effet, l'utilisation des fertilisants minéraux y compris l'engrais phosphaté est devenue actuellement indispensable, ceci pour avoir une bonne production aussi bien quantitative que qualitative. Le phosphore est un élément qui est largement distribué dans la nature ; il est considéré, avec l'azote (N) et le potassium (K), comme un constituant fondamental de la vie des plantes. Les multitudes recherches à travers le monde sur la fertilisation ont montré le rôle primordial du phosphore dans la nutrition minérale des plantes ; sachant que l'azote constitue l'élément fondamental agissant sur la croissance et le développement des plantes, le phosphore rentabilise au maximum la fumure azotée.

Un engrais est un produit inorganique ou organique qui est apporté pour fournir les quantités suffisantes de un ou de plusieurs éléments essentiels pour les plantes. Les récentes préoccupations sur les effets des engrais sur l'environnement, la faible efficacité des engrais, leurs prix élevés ont rendu urgent le développement d'une approche rationnelle pour choisir les engrais à utiliser (**MOUGHLI**, **2000**).

L'application des engrais minéraux dans le sol a plusieurs effets sur les propriétés du sol, parmi les plus souvent la salinité et le pH du sol. C'est dans ce contexte là que les recherches actuelles s'orientent vers l'obtention d'une dose d'engrais optimale qui permettre aux plantes d'exprimer leurs potentialités de productives tout en surveillant l'environnement chimique du capital sol pour éviter la salinisation du sol et la pollution des nappes souterraines.

Le secteur agricole dans les régions sahariennes a connu des mutations importantes ces dernières années. Dans les régions sahariennes, la loi 83/18 portant Accession à la Propriété Foncière Agricole (APFA) est à l'origine de cette nouvelle dynamique agricole. Elle s'est matérialisée par la création de périmètres de mise en valeur dans les vastes étendues sahariennes et parconséquent de nouvelles exploitations agricoles généralement hors oasis ; les plus problématiques étant celles réservées à la céréaliculture sous centre-pivot où les niveaux de rendement demeurent faibles (**CHELOUFI et BOUAMMAR, 2010**).

La fertilisation minérale des cultures irriguées notamment celle des céréales restent à maîtriser ; c'est dans cette perspective que s'inscrit notre recherche qui portera essentiellement sur

la dynamique du phosphore dans le système sol-plante en conditions pédoclimatiques sahariennes. Ceci impliquerait, d'une part un maximum de connaissances du mécanisme qui régit le comportement de cet élément nutritif dans le sol, et d'autre part disposer de références suffisantes au niveau de la plante afin d'interpréter correctement le résultat.

De ce fait, l'étude que nous allons menée va permettre essentiellement de juger dans des conditions édapho-climatiques sahariennes l'influence de la fertilisation phosphatée sur le comportement, la productivité et l'alimentation minérale de blé conduite sous un centre pivot dans la région d'El-Goléa. Parallèlement, en conditions semi-contrôlées et sur sol nu du même site, il sera procédé à une analyse cinétique des engrais phosphatés ajoutés au sol et leurs influences sur l'évolution de quelques paramètres chimiques du sol.

Première partie.

Synthèse bibliographique

Chapitre I. Aperçu sur le phosphore dans le sol

I.1. États du phosphore dans le sol

Dans le sol, le phosphore se présente généralement sous deux états bien distincts : l'un représente la quantité globale donc c'est le phosphore total et l'autre quantité où la plante peut l'utiliser, c'est le phosphore dit assimilable.

I.1.1. Phosphore total

Cette partie du phosphore représente toutes les formes de phosphore présentes dans un échantillon de sol, qu'elles soient minérales ou organiques (**BAIZE**, **2000**).Il comprend donc une fraction minérale et une fraction organique à des pourcentages de 5 à 95% du phosphore total, une faible quantité est présente dans la solution du sol (0.002 à 2 mg/l) (**TARAFDAR et CLAASSEN, 2004**). **PIERZYNSKY et al** (**2000**), suggèrent quela fraction minérale représente 50 à 70% du phosphore total et le phosphore organique représente 25%.

La quantité de phosphore présente dans un sol est donc la conséquence directe de la richesse de la roche mère. 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 (**PEREDA CAMPOS**, **2008**).

I.1.2. Phosphore assimilable

Le phosphore dit assimilable est alors définie pour caractériser la fraction du phosphore susceptible d'être absorbée par les racines, dont il est devenu nécessaire de corréler la production agricole à une quantité de phosphore dit « ***assimilable*** » ou « ***labile*** » extrait par des procédures analytiques.Le terme du phosphore « ***labile*** » désigne la fraction du phosphore absorbé facilement par la plante et la fraction à extraire et à mesurer avec le phosphore soluble par les réactifs chimiques (**PIERZYNSKI** et **al**, **2000**).

En effet, dans le sol il y a uniquement quelques kilogrammes de phosphore présents en solution dans le sol sous forme d'orthophosphates directement assimilables par les plantes (**FROSSARD** et **al**, **2004***in***BEAUDIN**, **2008**).**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‰.

En pratique, la notion du phosphore assimilable est insuffisante ; de ce fait, on doit prendre en considération et exploiter certains nombres de paramètres à savoir : les interactions entre les composantes organiques et minérales du phosphore, les teneurs en solution et l'activité des racines et des microorganismes d'où la notion de « ***biodisponibilité du P*** ».D'après **FROSSARD** et **al** (**2004**), cette biodisponibilité est définie comme étant la quantité totale de phosphore dans le sol susceptible d'aboutir dans la solution du sol sous forme d'ions orthophosphates pendant une période équivalente à la durée de croissance de la culture.

I.2. Différentes formes du phosphore dans le sol

Les différentes formes de P 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 P organique du P inorganique (**PEREDA CAMPOS**, **2008**).

I.2.1. Forme soluble (dans la solution du sol ou forme ionique)

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 (**MOREL, 1996**).Selon **PEREDA CAMPOS** (**2008**), le phosphore de la solution du sol constitue moins de 1% du phosphore total, mais est la source principale pour les végétaux.La quantité de phosphore contenant dans la solution du sol est cependant faible du fait de la très faible solubilité de cet élément : entre 0,5 et 1 mg/l en moyenne, ce qui représente entre 0,04 et 1,6 kg P/ha (**DORÉ et al, 2006**).

Le phosphore labile est une fraction de grande importance en agriculture puisqu'elle est facilement disponible aux plantes et peut être facilement lessivée (**HEDLEY** et **al**, **1982**; **SHARPLEY** et **MOYER**, **2000**). Cette fraction représente le phosphore présent dans la solution du sol, le phosphore organique facilement minéralisé et les phosphates faiblement retenus sur les colloïdes argileux (**DEMERS**, **2008**).

I.2.2. Forme minérale

La partie du phosphore dite inorganique (minérale) peut constituer une part importante (sinon majoritaire) des réserves en phosphore du sol (**DROUET**, **2010**).

I.2.2.1. Phosphore échangeable (ou adsorbé sur les constituants du sol)

Les ions phosphates ont une charge électronégative, ils sont retenus dans le sol par le biais de cations métalliques essentiellement par le Ca^{2+}.L'acide phosphorique est un anion, et ne peut être retenu par le complexe que par l'intermédiaire d'un cation: fer, aluminium, potassium, mais plus généralement le calcium (**LAMBERT**, **1979**).

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

I.2.2.2. Phosphore peu soluble ou précipité

Ces composés sont représentés généralement par les phosphates calciques, les phosphates de fer et d'aluminium.**HOUNTIN** (**1996**), ajoute qu'il ya plus de 200 formes de phosphore minéral dans la nature ; les fluoroapatites sont les formes les plus couramment rencontrées sous forme de minerai et de composé de la plupart des sols cultivés.

D'une façon générale, le phosphore insoluble (et donc pas directement disponible) représente 95 à 99% du phosphore total ; le phosphore absorbé ou précipité est principalement sous forme de phosphate de fer ou d'aluminium dans les sols acides et sous formes de phosphate de calcium et de magnésium dans les sols alcalins et calcaires. La distribution relative entre les différentes catégories et la disponibilité dépend notamment du pH du sol (**PEREDA CAMPOS**, **2008**).

I.2.3. Forme organique

Le phosphore organique peut provenir des déchets végétaux ou des micro-organismes du sol. Selon **BROOKES**et **al**, **1984***in***VANDENBOSSOCHE** (**1999**), le phosphore microbien représente 2% à 24% du phosphore organique du sol.

Le phosphore organique représente de 20 à 80% du phosphore du sol ; Il est présent sous forme de phosphore soluble dans la solution du sol et sous forme de phosphore insoluble absorbé sur les particules du sol ou comme composant de la matière organique du sol (**PEREDA CAMPOS**, **2008**). La proportion du phosphore associé à des composés organiques varie selon les sols et leur type d'utilisation de 30 à 65% du phosphore total (**HARRISON**, **1987***in***FROSSARD** et **al**, **2004**).

La disponibilité du phosphore organique dans le sol dépend de la minéralisation par les enzymes phosphatase (**PRIYA** et **SAHI**, **2009**).Cette forme du phosphore est essentiellement associée aux acides fulviques de faible poids moléculaire(**CONDRON**et **GOH**, **1989***in***VANDENBOSSOCHE**, **1999**).

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)**.

I.3. Dynamique du phosphore dans le sol

On peut définir la dynamique du phosphore comme étant le passage des ions phosphatés d'un état à un autre sous l'effet des mécanismes physico-chimiques et biologiques.En sols sahariens, **MESMOUDI** (**1999**) suggère que la solubilité et la dynamique des ions phosphatés méritaient d'être étudier plus complètement.

Dans le sol, les ions phosphates subissent des transformations par des réactions chimiques, physiques et biologiques comme l'adsorption, la minéralisation, la précipitation, l'altération et la réorganisation microbienne. Ainsi, le cycle comprend le processus de prélèvement du phosphore par la plante, les transformations des formes organiques et les réactions chimiques de fixation et d'immobilisation dans le sol (**MOREL**, **2002 ; DEMERS**, **2008**) (Fig. 1).

D'après **DROUET** (**2010**), dans le sol un cycle actif du phosphore peut être distingué : ce cycle est très semblable à celui de l'azote et les micro-organismes jouent également un rôle important dans le processus de minéralisation et d'immobilisation.

Généralement le phosphore se retrouve dans le sol associé à des cations, à des oxydes ou des hydroxydes métalliques. Certains se retrouveront rapidement en solution, d'autres migreront plus lentement de la phase solide vers la solution et d'autres encore ne se solubiliseront qu'avec l'activité d'organismes vivants (**BEAUDIN**, **2008**).

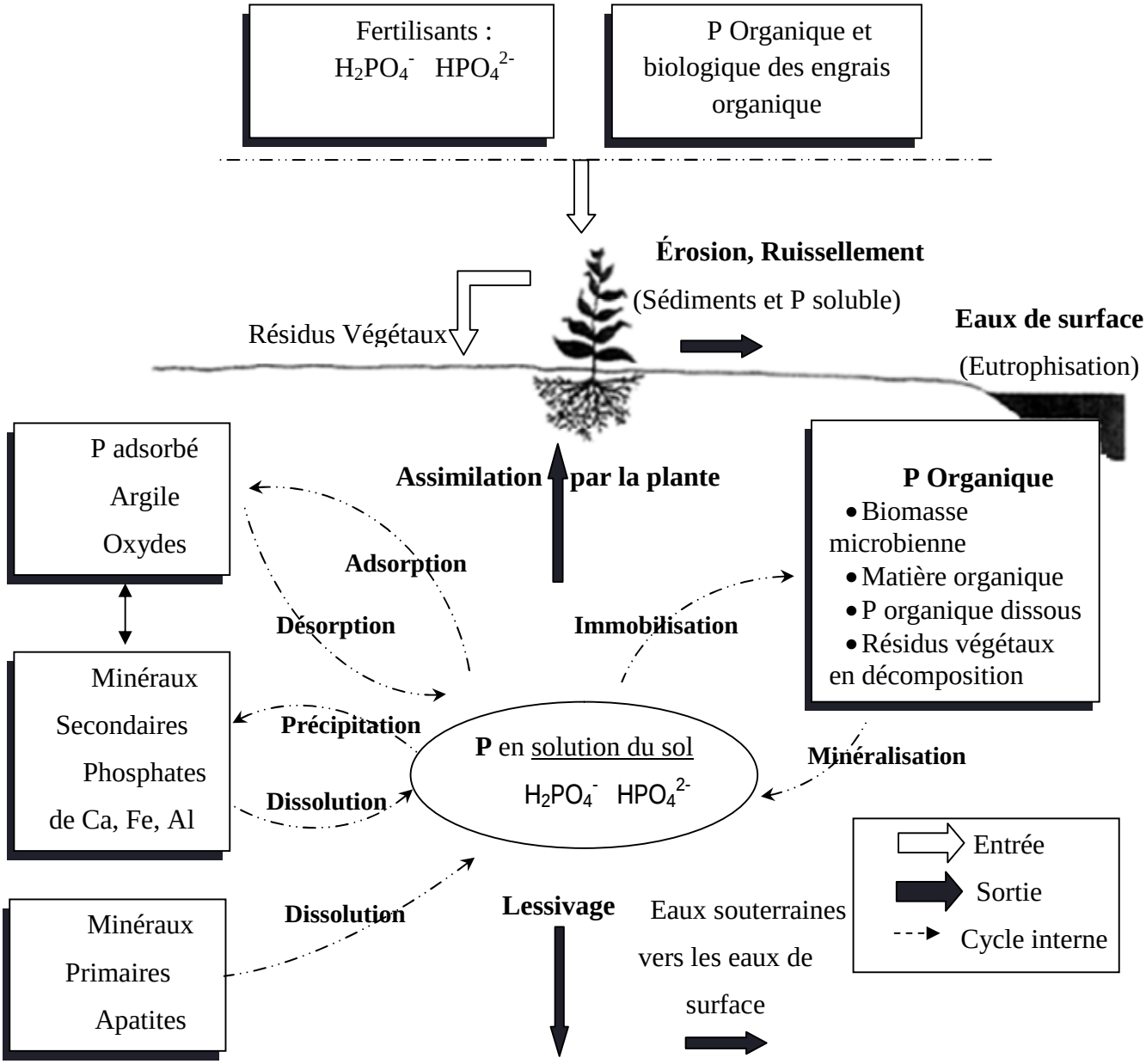


Figure 1. Cycle du phosphore dans le sol (**DEMERS**, **2008**).

Il existe toujours un système d'équilibre minéral vis-à-vis des ions phosphatés entre la phase liquide représentée bien entendu par la solution du sol et la phase solide.Cet équilibre physico-chimiqueest conditionné suite à une variation de la concentration en phosphore de la solution du sol par exportation par la plante ou par un apport de fertilisants.

L'intensité et la vitesse de déplacement de ces équilibres sont étroitement liées aux quantités et natures des constituants minéraux et organiques des sols, à la nature et quantité des engrais apportés et aux réactions physico-chimiques d'adsorption/désorption, fixation/libération et précipitation/dissolution qui en découlent (**MOUJAHID**, **2007**).Lorsqu'on additionne un engrais phosphaté au sol, cela va provoquer l'augmentation de la teneur en phosphore dans la solution du sol. De ce fait, les ions ajoutés vont déplacer de la phase liquide vers les fractions solides du sol où ils sont fixés ; Cela veut dire que le phosphore dans le sol est sujet à un système d'équilibre permanent (solide-liquide).

Le phosphore est le plus moins mobile et le moins disponible aux plantes dans la plupart conditions du sol (**SCHACHTMAN** et **al**, **1998**; **HINSINGER**, **2001***in***RAMAEKERS** et **al**, **2010**). Ceci à cause des interactions électrostatiques du phosphate avec les particules du sol et la séquestration à la surface des argiles quifont que le phosphate est l'ion majeur le moins diffusible. Cette faible mobilité a pour conséquence que l'ion est absorbé par la racine «plus vite » dont il ne migre pas dans le sol (**PEREDA CAMPOS**, **2008)**.

Au contraire, les fractions organiques du phosphore du sol sont plus mobiles et migrent plus rapidement en profondeur que les fractions minérales à cause de leur faible réactivité avec les colloïdes du sol (**HANNAPEL** et **al**, **1964** ; **ROLSTON** et **al**, **1975** *in* **HOUNTIN**, **1996**).

Les mouvements du phosphore dans le sol se réalisent de façon simultanée et en permanence selon des mécanismes bien précis.

I.3.1. Adsorption-Désorption

Elle peut être s'expliquer par le transfert des ions phosphatés de la phase solide vers la solution du sol et vice-versa.

- **Adsorption** :c'est le déplacement des ions phosphatés ($H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}) de la solution du sol suite à des réactions chimiques. A court terme, les principaux facteurs responsables de l'absorption et de la fixation des ions phosphatés sont les oxydes d'aluminium et de fer libresainsi que le calcium et le magnésium sous forme échangeables ou sous forme de carbonates (**GIROUX** et **al**,

1996 in **GAGNON** et **BEAULIEU**, **2002**).L'adsorption des ions phosphates à la surface de certaines particules (particules d'oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, sels de calcium) résulte de différents mécanismes de fixation correspondant à des adsorptions physiques et chimiques mettant en jeu des liaisons de nature électrostatique entre les ions et les constituants solides (**JAILLARD** et **HINSINGER**, **1993** *in* **MAIRE**, **2005**).

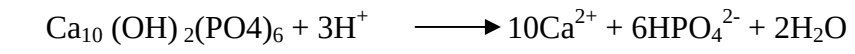
- **Désorption** : c'est la libération du phosphore de la phase solide à la phase liquide. Ce phénomène a lieu suite à la diminution de la concentration en phosphore dans le sol par les prélèvements des plantes. Seulement une faible quantité des ions adsorbés peuvent être résorbés facilement ; La plupart des ions phosphatés apportés au sol sont fixés et ne font pas l'objet d'une désorption et n'ont pas la même mobilité (**PIERZYNSKI** et **al**, **2000**).

I.3.2. Précipitation-Dissolution

Ces mouvements peuvent êtres distingués par les mouvements des ions phosphatés entre les combinaisons phosphatées et la solution du sol.

- **Précipitation** :Le phosphore dans le sol en réagissant avec des ions positifs, ces dernières provoqueront la précipitation et le phosphore prendra une forme insoluble dite « ***phosphore précipité*** ». Le phosphore minéral se trouve engagé dans des combinaisons avec le calcium, l'aluminium et le fer sous forme de sels de l'acide phosphorique H_3PO_4 : phosphates calciques issus des roches magmatiques et métamorphiques [hydroxy- et fluoroapatite: $Ca_5(PO_4)_3(OH,F)$], phosphates tricalciques [$Ca_3(PO_4)_2$] précipités en sols carbonatés, phosphates alumineux [variscite : $Al(OH)_2H_2PO_4$] et phosphates ferriques [strengite : $Fe(OH)_2H_2PO_4$] formés en sols acides (pH< 6) (**DROUET**, **2010**).D'après **FROSSARD** et **al**, (**2004**), il est difficile de distinguer rigoureusement la précipitation de l'adsorption dans les sols. La précipitation du phosphore avec un cation est observée lorsque les concentrations en phosphore et en cations sont suffisamment élevées (lorsque le produit de solubilité du minéral est atteint). Elle entraîne une diminution de la concentration en phosphore assimilable en solution et la formation d'un solide (**FROSSARD** et **al**, **2004**).Ainsi, **GIROUX** et **ROYER** (**2007)** ont montré que lorsque le phosphore est adsorbé ou précipité, un équilibre s'établit avec la solution du sol et celui-ci dépend de la nature chimique des produits de réaction, des formes du phosphore et du pH.**SNYDER** et **STATON** (**2002**) montrèrent qu'après l'irrigation d'un sol à pH basique et riche en Ca^{2+}, la plupart du phosphore se transforme en phosphates calciques insolubles, ce qui diminue la biodisponibilité de cet élément.

- **Dissolution** :la dissolution du phosphore précipité dépend largement du pH (**PIERZYNSKI** et **al**, **2000**).En effet, en cas d'absence d'apport anthropique, le phosphore du sol provient initialement de l'altération des roches. La dissolution des minéraux silicatés joue un rôle mineur ; c'est la dissolution de l'apatite qui joue le rôle majeur dans la première étape du cycle du phosphore. Dans le cas de l'hydroxy-apatite, la réaction s'écrit :



$$Ca_{10}(OH)_2(PO4)_6 + 3H^+ \longrightarrow 10Ca^{2+} + 6HPO_4^{2-} + 2H_2O$$

La dissolution peut aussi être favorisée par l'activité enzymatique des champignons mycorhiziens. La vitesse de dissolution de l'apatite en milieu acide dépend de l'accessibilité des particules ainsi que de leur morphologie (**KIRK** et **al**, **1986** *in* **ZEMOURA**, **2005**).La matière organique et les microorganismes du sol jouent un rôle majeur dans la dissolution du phosphore précipité en produisant des acides qui peuvent modifier le pH du milieu et rendant par conséquent le phosphore plus disponible pour le végétal.

I.4. Facteurs affectant la disponibilité et l'évolution du phosphore dans le sol

Les sols agricoles se distinguent par leurs caractéristiques physiques (texture, humidité…), chimiques (pH, calcaire…), biologiques (racines, mycorhizes…) et leurs pouvoir fixateur. Tous ces facteurs peuvent affecter l'évolution et le devenir des ions phosphoriques dans le sol.

Des nombreuses études ont démontré l'influence des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol sur le comportement du phosphore (**GIROUX** et **TRAN**, **1994**). LepH, la concentration en Fe, Al et Ca, la texture et le contenu en matière organique sont autant de propriétés du sol qui affectent la disponibilité du phosphore (**MKHABELAA** et **WARMAN**, **2005**).

Selon **GHAZANSHAHI** et **JAOUICH** (**2001**), l'absorption et la disponibilité du phosphore dans le sol dépend de plusieurs facteurs tels le pourcentage de la matière organique ; la biologie du sol d'où résulte la décomposition et la réorganisation des composés organiques et inorganiques phosphatés. De même la présence des colloïdes minéraux et organiques détermine la capacité d'échange des anions et des sites d'absorption des phosphates et influence l'absorption et la disponibilité du phosphore.

La rhizosphère est le volume de sol où s'exerce à la fois des mécanismes physiques, chimiques et microbiologiques déterminant et contrôlant le transfert des ions phosphoriques entre le sol et la solution et des mécanismes physiques, chimiques et microbiologiques capables de mobiliser des ions phosphoriques lors du fonctionnement du système sol-solution-plante (**MOREL** ,**2002**).

I.4.1. Pouvoir fixateur

L'apport au sol de quantités de phosphore supérieures à celles autorisées par la valeur limite d'équilibre, conduit à une migration des ions phosphatés de la phase liquide vers la phase solide où ils sont adsorbés puis intégrés dans les structures minérales : c'est le processus qui porté le nom de «***rétrogradation***» est dit maintenant «***pouvoir fixateur***» (**FARDEAU**, **1993**). Donc le pouvoir fixateur d'un sol traduit sa plus ou moins grande aptitude à fixer le phosphore sur la phase solide au détriment de la phase liquide (**PELLERIN** et **al**, **2000**).

PELLERIN et **al**. (**2006**) ont démontré que la capacité des sols à maintenir une intensité de phosphore en solution varie selon leur texture, leur genèse et leur pH.Des corrélations entre l'adsorption du phosphore et le taux d'argile ont été de nombreuses fois observées (**FOX** et **KAMPRATH**, **1970**; **UDO** et **UZU**, **1972**; **LOGANATHAN** et **al**, **1987**; **OWUSU-BENNOAH** et **ACQUAYE**, **1989**; **SOLIS** et **TORRENT**, **1989**; **BENNOAH** et **ACQUAYE**, **1989**; **SOON**, **1991**; **SANYAL** et **al**, **1993** in **DUBUS**, **1997**).

La diminution de la disponibilité du phosphore est causée non seulement par la composition chimique du sol, mais il ya d'autres facteurs qui rentrent en jeu à savoir : l'activité des argiles, le $CaCO_3$, les oxydes de fer et d'aluminium, les doses de phosphore ajoutées et le temps d'épandage (**AFFIF** et **al**, **1993***in***HALAJNIA** et **al**, **2009**).

I.4.2. Facteurs physiques

I.4.2.1. Humidité du sol

La dissolution du phosphore des engrais et de tous les composés amorphes et minéraux de phosphore dans le sol dépend de l'eau du sol ; l'eau affecte les réactions du sol en régissant la diffusion du phosphore dans la solution du sol et finalement la disponibilité du phosphore pour la croissance relative des racines (**BARKER** et **PILBEAM, 2007)**.

Dans la plupart des conditions, le phosphore est appliqué près de la surface du sol. Ainsi, pendant des périodes sèches dans les systèmes de production non irrigués, les déficiences en phosphore peuvent surgir (**HANWAY** et **OLSEN**, **1980** *in* **BARKER** et **PILBEAM, 2007)**. **MULLEN** (**2003**), a considéré que la gestion de l'humidité du sol influence d'une grande part sur la réponse profitable de la plante vis-à-vis les engrais phosphatés ; il ajoute que les racines de céréale peuvent arriver à des profondeurs d'un mètre ou de plus pour accéder à l'humidité et les éléments

nutritifs, particulièrement azote : quand l'humidité du sol est basse, le phosphore devient moins accessible.

I.4.2.2. Température du sol

Les changements de température affectent plusieurs des mécanismes impliqués dans le prélèvement des éléments nutritifs par les plantes (**GAGNON** et **BEAULIEU**, **2002**).La température du sol affecte les réactions qui régissent la dissolution, l'adsorption et la diffusion du phosphore et affecte également le potentiel de prélèvement du phosphore par les racines (**BARKER** et **PILBEAM, 2007)**. Elle influence aussi la croissance racinaire (**CHING** et **BARBER**, **1979** in **GAGNON** et **BEAULIEU**, **2002**) et la diffusion du phosphore dans le sol (**MACKAY** et **BARBER**, **1984** in **GAGNON** et **BEAULIEU**, **2002**).

I.4.2.3. Texture

La texture influe sur la disponibilité du phosphore : lorsque la teneur en argile augmente, la rétention en phosphore augmente d'où un phosphore moins soluble dans les sols argileux que dans les sols sableux. Le type d'argile influe aussi car la kaolinite et les oxydes de fer et d'aluminium retiennent beaucoup plus de phosphore que les argiles de type 2/1(**BADRAOUI** et **al**, **1995**).

Généralement, les niveaux de phosphore tendent à être moyens à élevés sur des sols qui ont des textures plus lourds. Dans des sols avec une texture plus légère, ils ont généralement des niveaux moyens à faible. Les sols ayant une texture plus légère répondent habituellement mieux à l'application des engrais phosphatés que des sols plus lourds (**MULLEN, 2003**).

I.4.2.4. Aération et le compactage du sol

L'oxygène c'est élément vital pour le prélèvement du phosphore par les racines des plantes ; dans les sols compacts, la circulation de l'eau est limitée ce qui entraîne par conséquence une mauvaise diffusion du phosphore vers les racines et dans ce cas, la plante n'absorbe pas convenablement le phosphore.

L'aération et le compactage du sol constituent deux facteurs qui influencent considérablement l'approvisionnement des racines en oxygène nécessaire pour leur croissance ; le tassement ou l'envahissement par l'eau du sol limitent le prélèvement du phosphore en le rendant moins disponible pour les plantes (**MULLEN, 2003**).

I.4.3. Facteurs chimiques

I.4.3.1. pH

Le pH du sol joue un rôle majeur dans la disponibilité du phosphore : quand le pH est inférieur à 6, la disponibilité de certains minéraux bénéfiques pour les plantes comme le phosphore est réduite (**MICHEL**, **2005**).

Pour un pH du sol inférieur à 6,8 la forme de phosphore qui domine est le monophosphate, l'anion monovalent ($H_2PO_4^-$) : c'est une forme facilement absorbé par les racines des plantes. Pour un pH entre 6,8 et 7,2 la forme prédominante est le HPO_4^{-2} (Fig. 2), forme d'ion phosphorique absorbable plus difficilement par la plante (**HOPKINS**, **2003**).

Dans la gamme des valeurs de pH communément rencontrées dans les sols agricoles (pH 4.0 - 9.0), le phosphore est soit sous forme d'anion monovalent ($H_2PO_4^-$) ou bivalent ($HPO4^{2-}$), tous deux facilement disponibles dans la solution du sol pour la nutrition de la plante (**HOUNTIN**, **1996**).

Les réactions réduisant la disponibilité du P se produisent à toutes les valeurs de pH mais sont plus prononcées dans les sols alcalins ayant un pH >7,3 et dans les sols acides ayant un pH <5,5 (**DEMERS, 2008**). Ainsi, la plus grande solubilité du P dans les sols minéraux se situe entre les pH de 6,2 et de 7,0 (**LINDSAY**, **1979** in **DEMERS, 2008**). La figure (3) illustre l'importance du pH dans la fixation du P.

Dans les sols à pH alcalin > 7, ce qui est le cas de la majorité des sols Algériens, le phosphore contenu dans les réserves est indisponible, il faut donc l'apporter sous forme soluble et acide permettant une dynamique d'échange dans la solution (**BENNAI** et **BENABBAS 2007**).

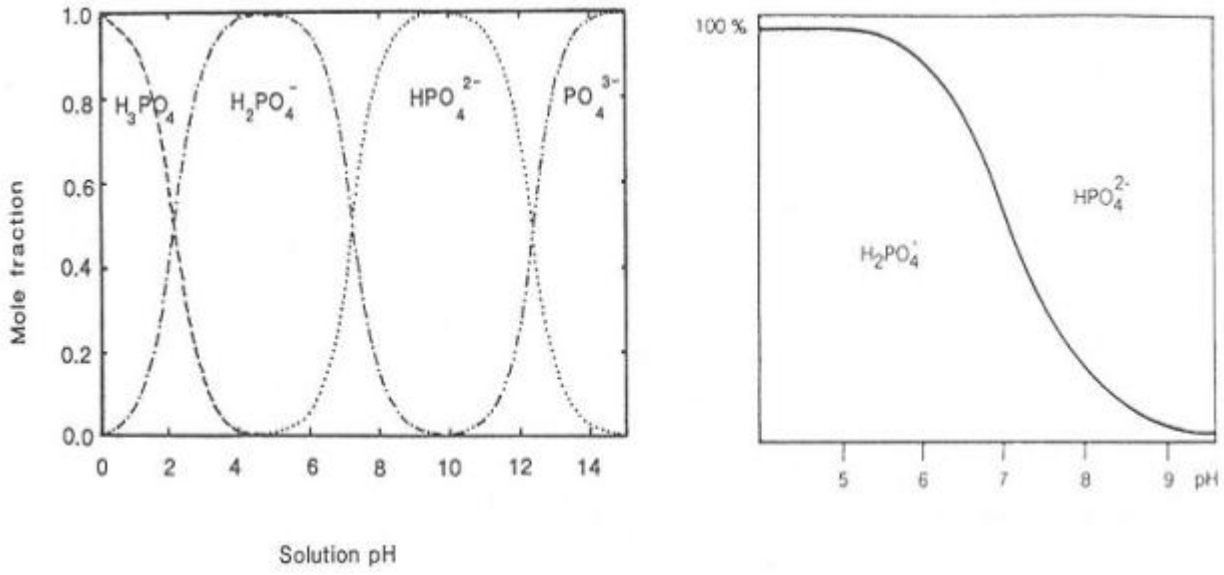


Figure 2. Distribution des différentes formes solubles du phosphore en fonction du pH (**DROUET**, **2010**).

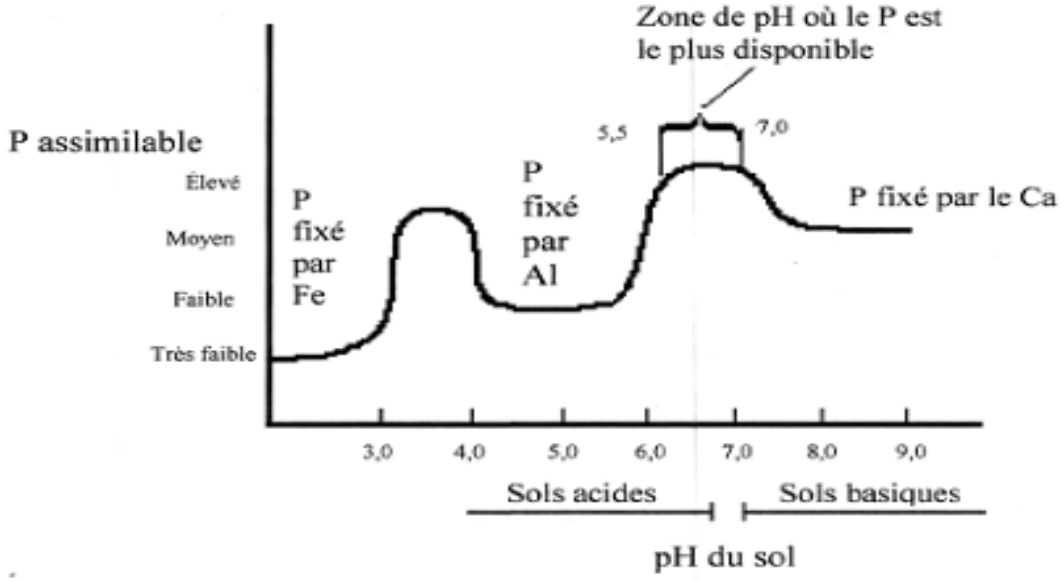


Figure 3. Variation du phosphore assimilable en fonction du pH (**DEMERS, 2008**).

I.4.3.2. Matière organique

La matière organique est une source de phosphore, sa minéralisation donne le phosphate assimilable par la plante (**DUTHIL**, **1973**). La décomposition de la matière organique donne des acides organiques qui dissolvent le phosphore minéral de fer et d'aluminium (**MICHEL** et **al**, **2003**).

D'après **DEMERS** (**2008**). Les acides organiques entrent en compétition avec le phosphore dans le sol et peuvent occasionner une dissolution des complexes Fe-P ou Al-P. Ces acides organiques sont produits lors de la décomposition de la matière organique dans le sol et par certains microorganismes. Ces acides organiques se lient au Fer et à l'aluminium pour former des complexes stables favorisant le maintien du phosphore en solution (Fig. 4).

Un enrichissement du sol en matière organique augmente la contribution du phosphore organique à la dynamique du phosphore (**PARENT** et **KHIARI**, **2003**).L'humus présente des sites de faible énergie de liaison pour le phosphore rendant sa mise en disponibilité plus facile (**DELGADO** et **al**, **2001**; **JOHNSON**, **2000**).

De ce fait. La matière organique du sol ou l'humus joue un rôle crucial dans la disponibilité du phosphore pour les plantes cultivées.

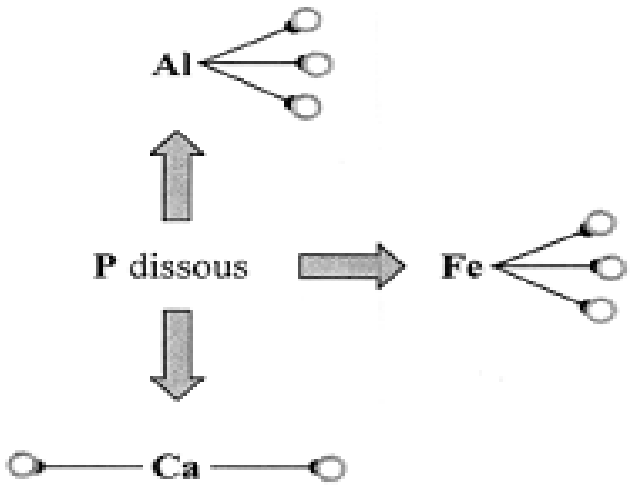


Figure 4. Mécanisme de compétition de la matière organique (cercles gris) avec le phosphate sur les sites de fixation de Al, Fe et Ca (**PARENT**, **2002**).

I.4.3.3. Calcaire

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.Dans les sols calcaires, riches en Ca^{2+}, la forme dominante du phosphore est celle du P-Ca (phosphate lié au calcium) (**MCKENZIE** et **al**, **2003**), caractérisée par une faible labilité (**GACHON**, **1988**).

La connaissance du calcaire total dans d'un sol agricole est un moyen decaractérisation du le sol de point de vue fertilité physique, chimique et même biologique; de donner une vision sur l'activité biologique du sol mais aussi d'évaluer le pouvoir fixateur du sol vis-à-vis des ions phosphoriques et connaître par conséquent les interactions des autres éléments nutritifs avec le phosphore.

I.4.3.4. Éléments nutritifs et sels solubles

Il est évident que les éléments nutritifs peuvent avoir un effet synergique ou antagoniste vis-à-vis des ions phosphoriques. D'après **GACHON** (**1969**), en milieu salin un apport phosphaté est susceptible d'augmenter le rendement ; ceci est du à une interaction positive entre le phosphore et les sels lorsque la concentration est modérée.

Plusieurs travaux ont montré la synergie existant entre les différents éléments nutritifs NPK. D'après **HAFSI** (**1990**), il existe des interactions synergétiques entre les deux engrais azotés et phosphatés qui font améliorer le rendement, la solubilité et l'absorption du phosphore.D'importantes corrélations ont été observées entre le phosphore total et certains éléments traces métalliques tels que **Cu**, **Ni**, **Pb**, **Zn**, **Cd** et **Ti** selon les types de sols considérés (**BAIZE**, **2000**).

La présence des sulfates en faible quantité dans le sol à un effet synergique vis-à-vis du phosphore.Aussi, il semble que le magnésium entraîne une meilleure dissolution du phosphore dans la solution du sol (**RAZI**, **2006** ; **AISSA** et**MHIRI**, **2001**).

I.4.4. Facteurs biologiques

I.4.4.1. Effet des résidus de récolte

Une fois incorporé au sol de grandes quantités derésidus de récolte, la biomasse microbienne par son action va permettre une immobiliser à court terme du phosphore disponible (**MULLEN**, **2003**).

I.4.4.2. Action des racines

Dans les conditions de déficience phosphatée, notamment dans les sols riches en calcaire où le phosphore serait très lié aux ions Ca^{+2}, il a été montré que les plantes sécrètent au niveau de la rhizosphère des acides organiques pour mobiliser le phosphore fixé (**LOPEZ- BUCIO** et **al**, **2000**).

Dans la plupart des sols, la quantité du phosphore dans les 10 premiers centimètres du sol est un bon indicateur sur la capacité du sol de fournir le phosphoreà la culture.Comme les racines tendent à se concentrer dans cette zone, elles peuvent gagner l'accès facile aux ions phosphoriques pour une croissance précoce des plantes (**MULLEN, 2003**).

Chapitre II. Le phosphore et le végétal

II.1. Importance du phosphore dans la vie du végétal

Dans beaucoup de systèmes agricoles, le phosphore est un aliment minéral le plus limitant pour les plantes (**RAMAEKERS** et **al**, **2010**).Le phosphore est un macroélément essentiel qui joue un rôle capital dans le transfert d'énergie, le règlement métabolique, et l'activation de protéine (**PRIYA** et **SAHI**, **2009**). Il se trouve dans la plante sous la forme de phospho-esters, comprenant les glucides phosphoryles qui jouent un rôle extrêmement important dans la photosynthèse et le métabolisme intermédiaire (**HOPKINS**, **2003**). Son rôle rentre dans tous les processus de croissance et sa répartition dans les tissus est très inégale et augmente généralement avec la teneur en azote (**GERVY**, **1970**).

LAMBERT (**1979**), ajoute que le phosphore est considéré également comme un constituant essentiel des chromosomes, il intervient partout où il y a multiplication cellulaire d'où l'importance du phosphore dans les phénomènes de croissance et de reproduction. Il joue également un rôle déterminant dans le transfert d'énergie, il est indispensable à la photosynthèse et aux processus chimico-physiologiques de la plante.

Au-delà de son rôle dans des processus de transfert, le phosphate est un composant structural des phospholipides, acides nucléiques, nucléotides, coenzymes, et phosphoprotéines (**BARKER** et **PILBEAM, 2007)**.

BENNAI et BENABBAS (**2007**), ont résumé les principaux rôles du phosphore surtout pour les céréales comme suit:

- Le phosphore est un élément nécessaire à la croissance du blé, il agit sur le développement des racines en activant son démarrage, c'est également un facteur de précocité et de fructification.

- C'est un élément qui accroît la résistance au froid et aux maladies.

- A la levée, le phosphore est nécessaire pour une bonne installation et démarrage de la culture et les besoins sont très élevés au stade épiaison.

- Il est peu mobile, pour cela il est souhaitable de l'apporter en localisé et sous forme soluble pour stimuler le développement racinaire au moment de la germination.

II.2. Rythmes d'absorption du phosphore par la plante

Le phosphore est utilisé par la plante sous forme entièrement oxydée et hydratée comme orthophosphates. Les plantes absorbent typiquement l'ion$H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-}, dans certains cas les plantes peuvent absorber les phosphates organiques solubles y compris les acides nucléiques (**BARKER** et **PILBEAM**, **2007**).

Les prélèvements du phosphore par les végétaux, lors de leurs premiers stades de développement, sont extrêmement réduits. C'est ainsi qu'un blé d'hiver, du semis jusqu'à la fin du tallage, ne puise que tout au plus 1 g de P/m^2 dont 1/10 était déjà contenu dans le grain semé. Puis la marche des prélèvements s'accélère rapidement et passe au rythme de 400 g/ha/jour de P soit près de 1 KgP_2O_5/ha/jour pendant les périodes de montaison et d'épiaison (**GERVY**, **1970**). L'absorption des éléments nutritifs par les cultures varie selon le stade végétatif. Les céréales à croissance rapide absorbent l'azote et le potassium au rythme journalier de 5 Kg/ha et le phosphore en quantité dix fois plus faibles (**BUCKMAN**, **1990**).

II.3. Exigences nutritionnelles en phosphore des plantes

EVERS (**2002**), suggère que les prélèvements du phosphore sont directement liés à la croissance de la plante.D'après **SOLTNER** (**2005**), le blé dur est classé parmi les plantes moyennement exigeantes en phosphore.

Les exportations en éléments minéraux (N, P_2O_5 et K_2O) de quelques cultures sont mentionnées dans le tableau 1.

Tableau 1. Exportation de Blé en (N, P_2O_5 et K_2O) (**PREVOST**, **1999**)

Culture	Nature du produit	N (kg/quintal)	P_2O_5(kg/quintal)	K_2O (kg/quintal)
Blé	Grain	1,9	0,95	0,5
	Paille	0,6	0,25	1,2

II.4. Teneur des plantes en phosphore

La teneur des végétaux en phosphore est soumise à des variations fort importantes; elle dépend principalement de la nature de l'espèce, de l'âge de la plante et de l'organe analysé ; elle

dépend également mais dans une moindre mesure, de la richesse du sol en P_2O_5 ; elle dépend enfin très faiblement de la présence d'autres éléments donnant lieu à des antagonismes aves l'acide phosphorique. (**GERVY**, **1970**).

Généralement la teneur des plantes en phosphore ne dépasse pas le 1% de la matière sèche produite (Tab 2).

Tableau 2. Teneurs en éléments minéraux de Blé (**DUTIL**, **1973**)

Espèce végétal	Partie de la plante	N (% MS)	P_2O_5 (% MS)	K_2O (% MS)
Blé	Graine	1,10-2,30	0,70-1,1	0,35-0,70
	Paille	0,30-0,60	0,15-0,25	1,00-1,60

II.5. Symptômes de carence et d'excès en phosphore chez les végétaux

Le déficit en matière de phosphore se manifeste sur les végétaux par des symptômes extrêmement graves :

- 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**).

- Réduction du développement des racines avec peu de ramification, l'alimentation est donc plus limitée (**BRAHIMI**, **1991**).

- Feuillage en général foncé et mat avec des teintes pourprées et une défoliation précoce commençant par la base de la plante (**PRAT** et **al**,**1971** ; **CHARLES**, **1976**).

Aussi, **GERVY** (**1970**) ajoute qu'une plante sans P_2O_5 voit sa végétation diminuée et sa floraison retardée, donc par conséquent la récolte peut diminuer jusqu'à 50% (**BAEYENS**, **1967**).D'autre part, les excès de phosphore ont en générale aucun effet négatif pour la récolte (**DUTHIL**, **1974**).

Deuxième partie.

Matériels et méthodes d'étude

Chapitre I. Description générale de la région d'étude

I.1. Situation géographique et limites

El-Goléa dite actuellement El-Menia, s'étend sur une superficie de 49 000 km², c'est une oasis rattachée à la wilaya de Ghardaïa et se trouvant à mi–chemin sur l'axe routier "Alger-Tamanrasset". Elle occupe un couloir entre la falaise et les dunes de l'erg occidental ; couloir qui correspondrait au prolongement de l'Oued – Seggeur provenant de l'Atlas saharien.

El-Goléa se trouve dans une altitude de 397m avec une longitude de :2°87 mn Est et une latitude de : 30°57 mn Nord (Fig. 5). Concernant les limites géographiques, ellese trouve presque dans le centred'Algérie ; limité au Nord par la sebkha de m'Zab, au Sud par plateau de Tademaït, à l'Est par le Hamada de Ouargla et à l'Ouest par l'Erg- occidental.

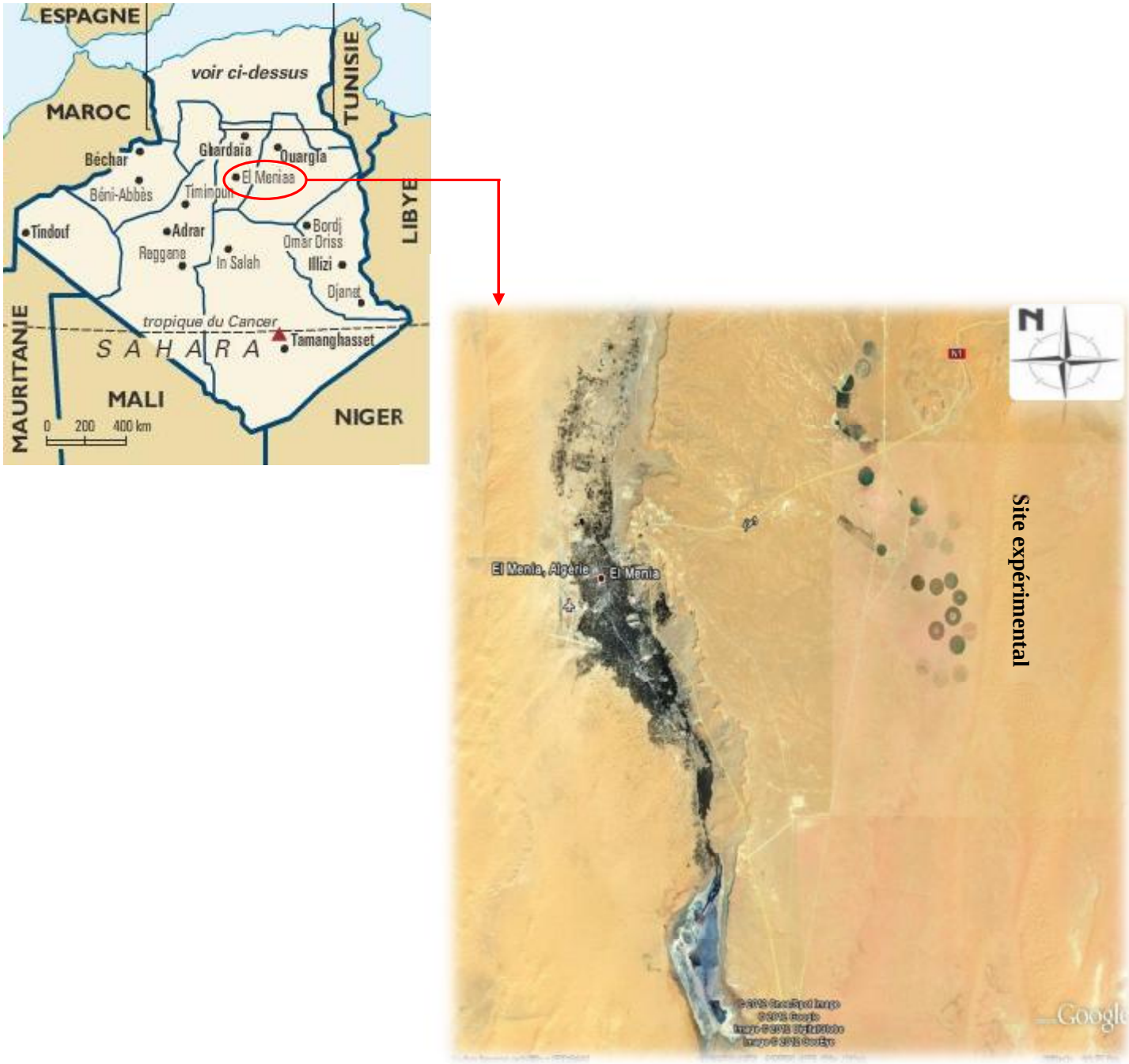


Figure 5. Situation géographique de la région d'El-Goléa et du site expérimental (**Google-Earth, 2011**)

I.2. Conditions climatiques de la région d'étude

La région est caractérisée par un climat saharien à hiver doux, une saison sèche avec des chaleurs fortes surtout durant le jour, des écarts de températures journalières importants, une intensité et une fréquence des vents élevées et une pluviométrie annuelle très faible et insuffisante.Pour une analyse climatique de la région d'El-Goléa, nous avons utilisé les donnéesclimatiques fournies sur une période allant de 1999 à 2010 (tableau 3).

Tableau 3. Données climatiques de la région d'El-Goléa (1999 à 2010)**(TUTIEMPO**, **2011)**

Mois	T max (°C)	T min (°C)	T moy (°C)	P (mm)	H (%)	V (km/h)
Janvier	18,76	2,86	9,89	10,32	61,18	12,80
Février	22,17	5,06	12,53	0,81	47,27	15,04
Mars	28,46	9,58	17,63	8,48	38,28	15,46
Avril	32,55	13,87	21,61	11,00	30,55	18,03
Mai	38,47	19,02	26,85	3,53	28,48	19,78
Juin	44,02	23,56	31,63	6,30	24,68	34,78
Juillet	47,70	26,99	35,00	2,82	22,13	15,41
Août	46,48	26,25	34,08	1,50	24,60	14,61
Septembre	41,37	22,44	29,88	2,52	32,97	15,90
Octobre	35,26	16,97	24,38	16,57	42,08	13,51
Novembre	26,07	8,80	16,15	6,93	53,72	11,52
Décembre	20,42	4,14	11,28	6,94	61,61	12,03
Moyenne	**33,47**	**14,96**	**22,58**	***77,72**	**38,96**	**16,57**

(*) : Cumul

I.2.1. Température

Au niveau de la région d'El-Goléa, les températures sont très élevées où elles peuvent dépasser les 45°C avec une grande amplitude thermique entre l'hiver et l'été ; le mois le plus chaud est juillet avec une moyenne de température 47,70°C et le mois le plus froid est janvier avec une moyenne de température de 2,86°C.

I.2.2. Pluviométrie

L'analyse des relevés mensuels durant la période étendue de (1999-2010), montre bien que les précipitations ont des valeurs faibles durant toute l'année avec un maximum atteint de 16,57mm de pluie au mois d'Octobre (Tab 3).

I.2.3. Vent

L'analyse du tableau 3, montre que la vitesse moyenne des vents enregistrée à El-Goléa est de 16,57 km/h annuellement avec un maximum de 34,78 km/h pour le mois de juin.

I.2.4. Humidité relative de l'air

Dans le Sahara, la moyenne des humidités est rarement supérieure à 65% et peutdescendre au-dessous de 30%.La moyenne des humidités la plusélevée est enregistrée au mois de janvier avec un taux de 61,18% et la plus faible au mois de Juillet avec une valeur 22,13%.

I.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 (Fig. 6).

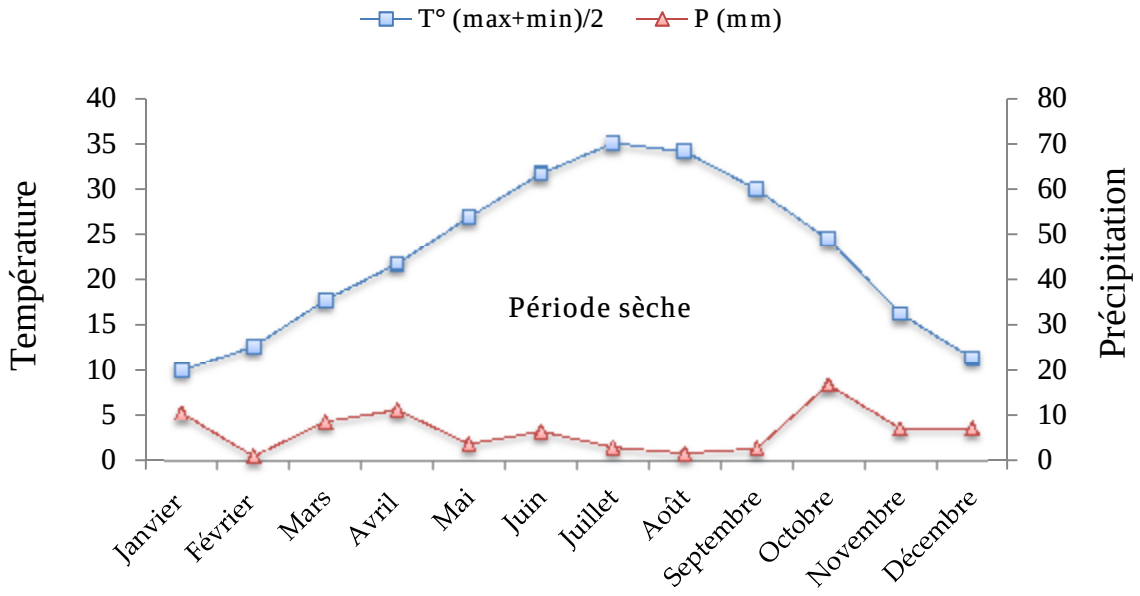


Figure 6. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN d'El-Goléa (1999-2010)

D'après ce diagramme, on déduit que la région d'El-Goléa est caractérisée par une saison sèche qui s'étale sur toute l'année (12 mois).

I.4. Conditions climatiques durant la compagne d'étude

Le tableau 4 montre que la température maximale enregistrée durant cette année est de l'ordre de 30,5 °C marquée au mois d'Avril cependant le minima est de l'ordre de 3,1 °C enregistrée au mois de Février. L'humidité relative la plus élevée au mois de Janvier avec 45,9 % elle est plus faibleau mois d'Avril avec 34,9 %. Nous avons noté aussi des précipitations au mois de Mars avec un cumul mensuel de 15,23 mm (Tab. 4).

Tableau 4. Données climatiques de la campagne 2010 – 2011 **(TUTIEMPO, 2011)**

Mois	T Max	T Min	T Moy	H (%)	P (mm)	V (Km/h)
Jan	20,4	5,5	12,4	58,3	0	9,3
Fév	20,6	5,8	13,2	48,7	0	13,7
Mars	23,9	9,5	17,3	47,2	18,55	17,6
Avr	30,9	15	23,7	37,5	0	17,8
Mai	34,1	18,9	27	35,7	0	17,6
Juin	38,4	23,5	31,8	33,6	0	17,3

I.5. Données hydrogéologiques

La région d'El-Goléa trouve son eau dans les deux types de nappes qui caractérisent le Sahara : une nappe profonde (l'albien) et une nappe superficielle.

I.5.1. Continental intercalaire ou nappe albienne

La nappe est ascendanteet jaillissante suivant les points d'eau de l'oasis, les eaux des forages correspondent à cette nappe profonde **BAHMANI** (**1987**).

I.5.2. Nappe phréatique

C'est une nappe superficielle se trouvant dans les formations du quaternaire ; elle circule dans les sables et alluviens de (l'Oued-Seggeur) dans la vallée au sont implantées les palmeraies d'El-Menia. La nappe bénéficie surtout des infiltrations provenant de la nappe albienne, soit des eaux de ruissellement. Selon **BAHMANI** (**1987**) la nappe se trouve à 1,40 m deprofondeur, elle monte progressivement vers le sud pour atteindre des profondeurs inferieurs à 1 m.

I.6. Matériel d'étude

I.6.1. Matériel végétal

Notre étude a porté sur une variété de blé dur Carioca d'origine française (R2), c'est une variété à maturité précocedont la hauteur de la tige est moyenne.Les semences testées ont une faculté germinative de 95% et un poids de 1000 grains de 55,54 g.

I.6.2. Sol

Des prélèvements du sol ont été effectués le 10/01/2011 à l'aide d'une tarière sur une profondeur de 30 cm. Les analyses ont été réalisées au niveau des laboratoires de sciences du sol du département des sciences agronomiques U.K.M. Ouargla (ex. ITAS) et l'ENSA (ex .INA).

Le sol de la parcelle d'essai est un sol peu évolué d'apport éolien (**CPCS**, **1967**). D'après les résultats analytiques, notre sol a une texture sableuse et légère (**FAO**, **2003**). En raison de la qualité de l'eau d'irrigation, la salinité est très faible (0.114 dS/m) ; d'après l'échelle de salure des sols (**AUBERT**, **1978**) c'est un sol non salé et peu calcaire **(BAIZE, 1988**). Le pH est alcalin (**GAGNARD** et **al**, **1988**).La teneur du sol en matière organique est très faible (0,6%) (**SOLTNER**, **2005b**), ce qui provoque une mauvaise rétention en eau (**MATHIEU** et **PIELTAIN**, **2003**). Le sol est moyennement riche en phosphore assimilable, tandis qu'il est très pauvre en azote (Tab.5).

Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques du sol étudié

Granulométrie	**SF (%)**	37,4
	SG (%)	55,9
	A+L (%)	6,8
CR (%)		8,6
pH $_{eau}$ (1/2,5)		8,6
CE (25°C, 1/5) (dS/m)		0,114
Salure(méq/100g sol)		0,57
Calcaire total (%)		1,84
Matière organique (%)		0,6
Azote total (%)		0,01
Phosphore assimilable (ppm)		45.662
Potassium échangeable (ppm)		63
Complexe adsorbant (méq/100g sol)	**Ca^{2+}**	3,905
	Mg^{2+}	0,185
	K^{+}	0,058
	Na^{+}	0,034
CEC (méq/100g sol)		4,2

I.6.3. Eau d'irrigation

L'eau d'irrigation appartenant au continental intercalaire a été analysée au laboratoire deL'A.N.R.H de Ouargla. D'après la classification de Riverside, cette eau appartient à la classe **C_2S_1** ; de ce fait, elle peut être utilisée sur n'importe quel type de sol avec un risque minimal d'accumuler du sodium dommageable. La salinité de l'eau est modérée, présentant un pH basique avec un léger degré de colmatage (Tab.6).

Tableau 6. Caractéristiques chimiques de l'eau d'irrigation

pH	**CE dS/m**	**Éléments en mg/l**								**SAR (méq/l)**	**Résidu sec à 110°C (mg/l)**
		Ca^{2+}	**Mg^{2+}**	**Na^{+}**	**K^{+}**	**Cl^{-}**	**SO_4^{-}**	**HCO_3^{-}**	**NO_3^{-}**		
7,79	0,41	33	15,1	27,8	7	25,9	22	176,9	12	43,35	0,41

I.6.4. Engrais testés

Dans le cadre de notre expérimentation, trois (03) engrais phosphatés ont été testés (MAP, Fosfactyl et le SSP) ; ci-après leurscaractéristiques.

- MAP (Mono – Ammonium – Phosphate)

C'est un engrais phosphaté complètementsoluble dans l'eau, binaire (12-52-00) riche en P (52%) et contenant 12% d'azote sous forme ammoniacale« (NH_4) H_2PO_4 ». Le MAP est classé parmi les produits acidifiant (pH = 4,5) ; sa solubilité est très élevée (360 g/l à 20°c).

- Fosfactyl

Le Fosfactyl (03–22–00) est un fertilisant complexe. Il contient 22% d'anhydride phosphorique (P_2O_5) dont 8% sont solubles dans l'eau et 14% solubles dans les acides minéraux. Il est soufré avec 18% d'anhydride sulfurique (SO_3) soluble dans l'eau. Le Fosfactyl contient aussi les oligoéléments: Cu, Zn, Mn, B, Co. Ce fertilisant est étudié pour répondre aux besoins et aux contraintes des sols calcaires.

- SSP (Simple super phosphate)

C'est un engrais phosphaté simple, composé de 20 % d'anhydride phosphorique total. Il constitue une bonne source de phosphore avec une solubilité dans l'eau variant entre 85% et 90%. Le SSP Contient également deux éléments secondaires : Calcium (28 %) et du soufre (12%), et des oligo-éléments : Bore (61ppm), fer (2134 ppm), manganèse (27 ppm), zinc (127 ppm), cuivre (02 ppm).

Chapitre II. Méthodologie expérimentale

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche sur la fertilisation raisonnée du blé dur cultivé sous un système pivot en conditions sahariennes ; à travers deux expérimentations complémentaires. L'expérimentation de plein champ a pour objet la comparaison de différents types d'engrais phosphatés appliqués à différentes doses sur le comportement nutritionnel et le rendement d'une culture de blé dur (var. carioca). La deuxième expérimentation de conditions semi-contrôlées sur sol nu se propose de mettre en exergue la réaction des différents engrais qui ont été testé au champ et leurs effets sur l'environnement chimique du sol.

II.1. Essai en sol cultivé

II.1.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté est un model hiérarchisé à deux facteurs fixes engrais phosphatés apportés à différentes niveaux de doses (Fig. 7)

- **SSP** (30, 60 et 90 unités P_2O_5 /ha) = **S30, S60, S90**.
- **Fosfactyl** (30, 60 et 90 unités P_2O_5 /ha) = **F30, F60, F90**.
- **MAP** (30, 60 et 90 unités P_2O_5 /ha) = **M30, M60, M90**.

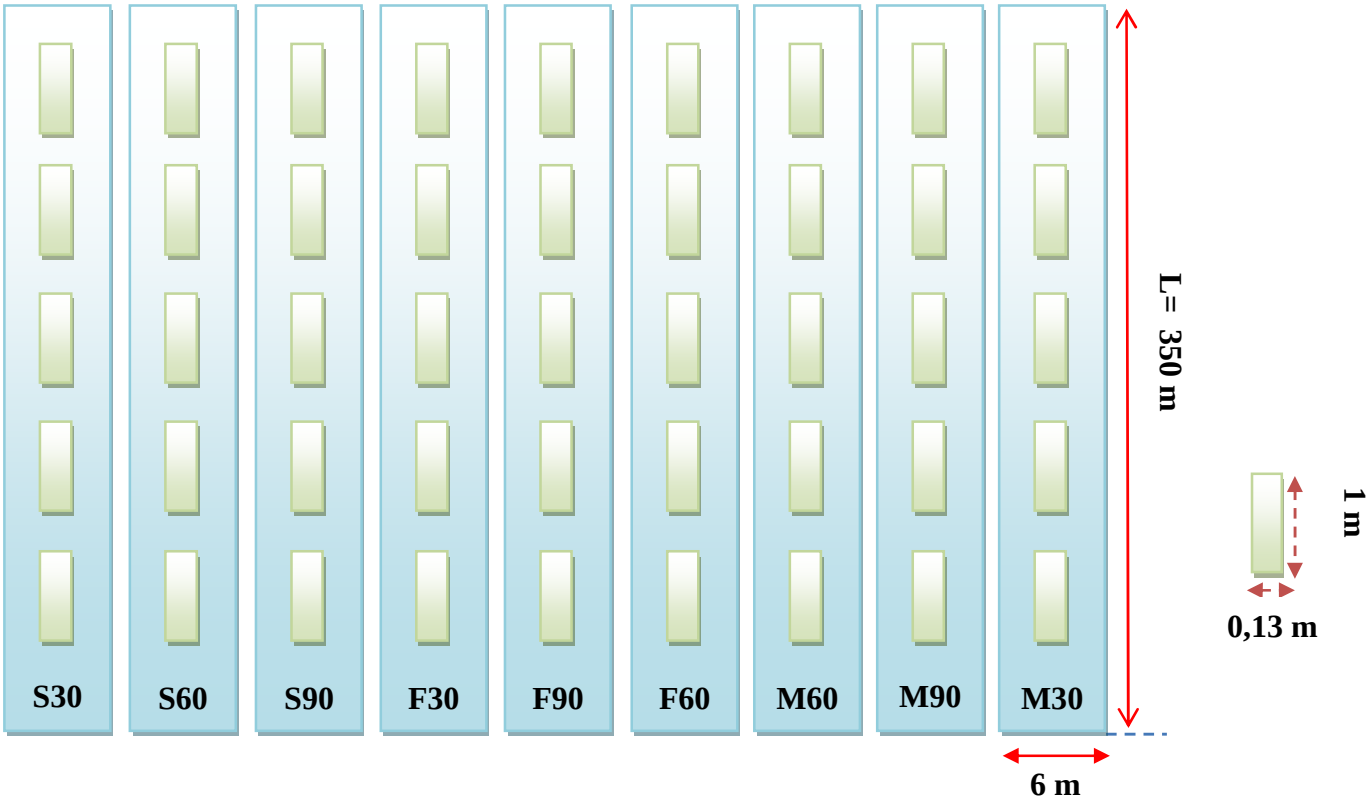


Figure 7. Dispositif expérimental adopté en sol cultivé

II.1.2. Itinéraire technique de l'essai

- **Localisation du site expérimental** :l'essai au champ a été conduit durant la campagne agricole 2010/2011 au niveau de la ferme de production HADJADJ Mahmoud qui se trouve à El-Goléa, à 270 km au sud du chef-lieu de la wilaya (Ghardaïa).

- **Précédent cultural** : notre site expérimental portait une culture de pastèque comme précédent cultural.

- **Pré-irrigation** :la pré-irrigation a commencé le 15/12/2010 dans le but d'assurer unebonne compaction du sol qui facilite le travail des équipements lors du semis et favorise aussi lagermination des graines de mauvaises herbes en vue de leur destruction avant la mise en place de la culture.

- **Travail du sol et épandage des engrais de fond** :le travail du sol a été effectué le 14/12/2010. Il a consisté premièrement en deux passages d'un cultivateur à dents ensuite le passage du semoir

combiné, ce dernier comprend un cover-crop, une herse, un rouleau et un épandeur d'engrais. Ces travaux permettent de préparer le lit de semence, d'ameublir le sol en profondeur, d'éliminer les repousses du précédent cultural, de faciliter le lessivage des sels et d'incorporer la fumure de fond.

- **Semis** : le semis a été réalisé le 18/12/2010 à l'aide d'un semoir combiné avec une dose de semis de 2 q/ha et avec un écartement entre les lignes de 0,13 m.

- **Irrigation** :l'étude climatique de la région d'El-Goléa, montre la nécessité d'apporter de l'eau aux cultures à cause du manque de précipitations.

Tableau 7. Quantité d'eau apportée par stade de culture

Stades	Période	Quantité (mm)
Semis- Levée	18 /12/ 10 - 27 /01 /11	150
Tallage	27/01/11- 17/02/11	97
Montaison- Épiaison	08/03/2011-28/03/2011	249
Épiaison-Arrêt d'irrigation	28/ 03 / 11- 03 /05/11	240
Somme		**736**

- **Désherbage et lutte chimique** : leDIALEN SUPERdésherbant chimique, a été appliqué le 10/02/11 soit au stade plein tallage avec une dose de 1 l/ha. Pour la lutte contre les pucerons, l'insecticide utilisé est L'ACKOCYTRINEappliqué le 22/03/2011 soit au stade montaison-épiaison.

- **Récolte** : l'arrêt d'irrigation a eu lieu le 03/05/2011 ; la récolté de nos échantillons a été effectuée manuellement le 25/05/2011.

II.1.3. Paramètres étudiés

Pour chaque traitement, nous avons délimité des placettes de deux mètres linéaires aunombre de cinq (pour chaque parcelle), sur lesquelles sont effectuées l'ensemble des mesures à savoir :

II.1.3.1. Composantes du rendement

- **Nombre d'épis au mètre carré** : le comptage du nombre d'épis/m² est réalisé le 20/04/11(stade floraison).

- **Nombre des grains par épi** : ce paramètre est réalisé à partir de vingt épis de la placette, le 29/05/11.

- **Nombre de grains au mètre carré** : ce nombre est calculé par la formule suivante :

$$\textit{Nombre de grains/m}^2 = \textit{nombre de grains/épi} \times \textit{nombre d'épis/m}^2$$

- **Poids de 1000 grains** : le poids de 1000 grains est la dernière composante du rendement à matérialiser, c'est aussi la dernière variable à influencer significative le rendement.

II.1.3.2. Rendements

- **Rendement en grains** : la détermination du rendement en grains est obtenue par la relation suivante :

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

- **Rendement en paille** : il est estimé à partir de la pesée de toutes les tiges récolté de chaque placette (après la séparation des épis), les valeurs obtenues sont exprimées en quintaux par hectare.

II.1.3.3. Nutrition minérale du blé

Dans le but d'apprécier l'efficience de la fertilisation phosphatée sur l'alimentation azotée, phosphatée et potassique du blé nous avons effectué au stade maturité :

- Dosage des teneurs enazote, phosphore et potassium dans la plante (paille et grain).
- Appréciation des exportations des trois éléments (N, P_2O_5 et K_2O) par la culture.

II.2. Essai en sol nu

II.2.1. Localisation de l'expérimentation

En parallèle du protocole de plein champ, un dispositif expérimental en conditions semi-contrôlées a été installé au niveau de l'exploitation de l'université de KASDI MERBAH-Ouargla (ex. ITAS).

II.2.2. Matériels d'étude

- Sol : le sol utilisé dans ce deuxième essai est un échantillon moyen de la couche arable provenant du centre-pivot de l'essai de plein champ.

- Cylindre : des cylindres en PVC (diamètre de 6 et une hauteur de 25 cm) d'une capacité de 1kg ont été utilisés. Pour retenir le sol et permettre l'aération, nous avons placé des moustiquaires à la base des cylindres.

- Engrais phosphatés: nous avons testé les mêmes engrais phosphatés apportés au champ à savoir le MAP, le Fosfactyl et le SSP.

II.2.3. Protocole expérimental

L'expérimentation consiste à un essai d'incubation des engrais dans le solpendant trois mois et demi (105 jours) et consiste en un suivi cinétique du phosphore et son influence sur quelques paramètres chimiques du sol ; l'essai a été installé le 30/01/2011.

II.2.3.1. Dispositif expérimental

Ledispositif expérimental adopté est en blocs aléatoires complets à deux critères de classification (types d'engrais - durée d'incubation). Le dispositif renferme quatre blocs dans lesquels les quatre traitements (Témoin, MAP, Fosfactyl et SSP) sont répétés selon le nombre des prélèvements (07 fois), ce qui donne un nombre de 28 échantillons/bloc (Fig. 8). Les cylindres sont soumis à la rotation quotidiennement afin d'homogénéiser les effets des facteurs écologiques.

Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4
T_0 T_1 T_2 T_3	T_0 T_1 T_2 T_3	T_0 T_1 T_2 T_3	T_0 T_1 T_2 T_3
T_2 T_0 T_3 T_1	T_2 T_0 T_3 T_1	T_2 T_0 T_3 T_1	T_2 T_0 T_3 T_1
T_1 T_2 T_0 T_3	T_1 T_2 T_0 T_3	T_1 T_2 T_0 T_3	T_1 T_2 T_0 T_3
T_0 T_1 T_3 T_2	T_0 T_1 T_3 T_2	T_0 T_1 T_3 T_2	T_0 T_1 T_3 T_2
T_3 T_2 T_0 T_1	T_3 T_2 T_0 T_1	T_3 T_2 T_0 T_1	T_3 T_2 T_0 T_1
T_0 T_1 T_2 T_3	T_0 T_1 T_2 T_3	T_0 T_1 T_2 T_3	T_0 T_1 T_2 T_3
T_2 T_3 T_1 T_0	T_2 T_3 T_1 T_0	T_2 T_3 T_1 T_0	T_2 T_3 T_1 T_0

T_0: Témoin (sans apport d'engrais) -**T_1**: MAP - **T_2**: Fosfactyl - **T_3**: SSP.

Figure 8. Schéma du dispositif expérimental adopté (sol nu)

II.2.3.2. Conduite de l'expérimentation

Les échantillons du sol ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés (2 mm). Les différents engrais phosphatés ont été broyés sous forme poudreuse afin d'augmenter leurs efficacité puis ajoutés et mélangés au sol à raison de 250 ppm par cylindre soit un kilogramme (Tab.8).

Tableau 8. Teneurs initiales en phosphore assimilable (Olsen) et quantité d'engrais ajoutée pour différents traitements

Traitements	Sans apport	MAP	Fosfactyl	SSP
Quantité ajoutée (mg)	—	48	1136	1250
P initial (mg/kg)	45	295	295	295

Durant l'expérimentation, nos échantillons ont été maintenus au 2/3 de leur humidité équivalente par de l'eau déminéralisée pour assurer l'humectation du sol et éviter tout entrainement des éléments par l'excès d'eau. Cette humidité est maintenue constante tout au long de

l'expérimentation par des apports quotidiens d'eau.En conditions de basses températures, la quantité d'eau apportée est diminuée jusqu'atteindre le 1/3 de la capacité de rétention du sol (C.R.). Cette dernière est déterminée par le principe de la méthode classique de **BOUYOUCOS** (**1983**), elle est exprimée en pourcentage du poids d'eau retenue par rapport à la terre séchée à 105° C.Dans le cas de ce type de sol, la capacité de rétention étant de : **8,6%**. Lesquantités d'eau de réajustement quotidien de l'humidité sont consignées dans le tableau 9.

Tableau 9. Quantités d'eau apportées durant l'expérimentation

	(1/3) CR	(2/3) CR
Quantité d'eau (ml/cylindre/jour)	**28,67**	**57,34**

Notre essai renferme un nombre de 112 cylindres soit 28 cylindres par bloc. Le prélèvement des échantillons du sol est réalisé périodiquement chaque 15 jour par une élimination d'un cylindre par traitement (Témoin, MAP, Fosfactyl et SSP) et par bloc. Les échantillons sont séchés à l'air libre et analysés individuellement. Les dates de prélèvement sont mentionnées dans le tableau 10.

Tableau 10. Dates de prélèvement des échantillons du sol durant l'expérimentation

Prélèvement N°	Dates	Durée d'incubation
1	15-févr	15 jours
2	30-févr	30 jours
3	15-mars	45 jours
4	30-mars	60 jours
5	15-avr	75 jours
6	30-avr	90 jours
7	15-mai	105 jours

II.2.3.3. Paramètres étudiés

Les analyses périodiques du sol pour l'établissement des différentes cinétiques ont concerné le phosphore assimilable dans le sol, le pH, la salinité du sol à travers la conductivité électrique, la capacité d'échange cationique (CEC) et les bases échangeables du sol

II.3. Méthodes d'analyses utilisées

II.3.1.Analyse du sol

- **Granulométrie** : la détermination de différentes fractions granulométriques du sol est réalisée par la méthode de tamisage pour déterminer les proportions physiques de trois particules primaires du sol (sable grossière, sable fin, et limon+ argile).

- **Potentiel d'hydrogène** : la mesure du pH a été réalisée par la méthode éléctrométrique à l'aide d'un pH mètre à électrode de verre sur une suspension de terre fine avec un rapport sol/eau 1/2,5.
- **Conductivité électrique** : la conductivité électrique exprimée en (dS/m) a été mesurée à l'aide d'un conductimètre et selon un rapport (sol/eau = 1/5) (**AUBERT**, **1978**).
- **Calcaire total** : le calcaire total est dosé par la méthode gazométrique en utilisant le calcimètre de Bernard; la méthode consiste à décomposer les bicarbonates du sol par l'acide chlorhydrique (6N) et à mesurer le volume de gaz carbonique (CO_2) dégagé.
- **Carbone organique** : le carbone organique est dosé par la méthode **ANNE** où il est oxydé par du bichromate de potassium en milieu sulfurique. L'excès de bichromates de potassium est titré par une solution de sel de Mohr en présence de diphénylamine. La matière organique est obtenue par la formule suivante : MO % = C % x 1,72.
- **Azote total (méthode de Kjeldhal)** : cette méthode consiste en une minéralisation de la matière organique à chaud par de l'acide sulfurique concentré H_2SO_4 en présence de catalyseurs $CuSO_4$ et K_2SO_4. L'azote ammoniacal (NH_4^+) produit est piégé, après une distillation dans la première solution d'acide borique 4 %. Nous dosons l'azote total après une titration avec de l'acide sulfurique H_2SO_4 (0,05 N).
- **Phosphore assimilable 'Olsen'** : l'extraction est réalisée dans une solution de bicarbonate de sodium O.5N ajusté à pH= 8,5 dans un rapport prise d'essai/volume d'extraction (m/v = 1/20).Le dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe formé par l'acide phosphorique et l'acide molybdique. Le complexe phospho-molybdique, sous l'effet de la chaleur et en présence d'acide ascorbique développe une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration de la solution en orthophosphates.

- Potassium échangeable : il est déterminé par la méthode d'ARNOLD (1962) ; on ajoute 10 ml d'acétate d'ammonium normal, puis on agite pendant 15 mn, après filtration la solution obtenue passe par une photométrie à flamme pour doser le potassium échangeable.

- Extraction des bases échangeables (à l'acétate d'ammonium) : les bases échangeables sont déterminées par agitation de l'échantillon en présence d'une solution d'acétate d'ammonium à 1N. Après filtration, l'extrait est récupéré en vue du dosage des cations passés en solution (**CIESIELSKI** et **STERCKEMAN**, **1997**) dont le dosage des cations se fait par spectrométrie. Le Mg^{2+} est dosés dans la solution filtrée par spectrophotométrie à absorption atomique et les éléments Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+} au photomètre à flamme.

- Capacité d'échange cationique (CEC) : la capacité d'échange cationique a été déterminée par la méthode **METSON**. Le sol a subit un lavage par l'alcool éthylique pour éliminer l'excès des sels. Le complexe absorbant, après déplacement des bases échangeables est saturé par de l'ammonium (NH_4^+) de la solution normale d'acétates d'ammonium (1N à pH 7). L'excès de NH_4^+ est éliminé par l'alcool éthylique, puis le NH_4^+ fixé sur le complexe absorbant sont dosé **(BAIZE, 2000)**.

II.3.2. Analyse du végétal

- Azotetotal : sa détermination a été effectuée par la méthode Kjeldhal qui consiste en une minéralisation de la matière organique à chaud par de l'acide sulfurique concentré H_2SO_4 en présence de catalyseurs $CuSO_4$ et K_2SO_4. Après une distillation dans la première solution d'acide borique 4 %, nous dosons l'azote total après une titration avec de l'acide sulfurique H_2SO_4 (0,05 N)

- Phosphore : cette analyse a été effectuée au laboratoire selon la méthode colorimétrique où l'échantillon à analyser est séché dans l'étuve (70°C pendant 48 à 72 heures) puis broyé. Après refroidissement progressif, on place 0,5 g de matière sèche dans une capsule en porcelaine mise à son tour dans un four à moufle dont la température est augmentée progressivement pour atteindre 500°C. Après refroidissement, les cendres récupérées sont soumises à une attaque acide par l'acide chloridrique à 2N. Par la suite les échantillons préparés sont soumis à une analyse colorimétrique.

- Potassium : l'extraction du potassium de la matière végétale se fait par la méthode de minéralisation. 200 mg de la poudre végétale sont introduit dans un ballon dans lequel est ajouté 10 ml d'un mélange bi-acide (HNO_3 – $HClO_4$) avec un rapport de 10/4. La minéralisation est complète quand le contenue du ballon est décoloré. Le liquide est récupéré dans des tubes à essais après avoir rincé le ballon avec de l'eau distillée chaude et acidifier par l'HCl. Le dosage se fait par photométrie à flamme.

II.4. Traitements statistiques

Les données collectées de l'expérimentation ont été soumises à une analyse de la variance par le logiciel STATISTICA 6,0. Le test de NEWMAN et KEULS au seuil de 5% a été utilisé pour comparer les moyennes des variables étudiés afin de déterminer les groupes homogènes quand il existe une différence significative entre les traitements.

Troisième partie.

Résultats et discussion

Chapitre I. Effet de la fertilisation phosphatée sur les paramètres agronomiques et l'alimentation minérale de la plante

Durant une compagne agricole, le suivi d'une culture de blé dur menée sous centre-pivot dans des conditions édapho-climatiques sahariennes nous a permis d'apprécier l'expression des potentialités productives de cette culture face à une fertilisation qualitative et quantitative phosphorique. Les principaux résultats obtenus sont consignés et discutés dans ce qui suit.

I.1. Effet de la fertilisation phosphatée sur les composantes du rendement

I.1.1. Nombre d'épis au mètre carré

Les résultats se rapportant à l'impact de la fertilisation phosphatée sur le nombre d'épis au mètre carré sont consignées dans le tableau 11 et la figure 9.

Tableau 11. Effet de la fertilisation phosphatée sur le nombre d'épis au mètre carré

	D30	D60	D90	Moyennes	C.V %	Signification statistique
MAP	341	340	388	356	**15,57**	Effet engrais : **N.S** Effet dose : **N.S** Engrais *dose : **H.S**
Fosfactyl	319	460	397	392		
SSP	415	388	336	380		
Moyenne	358	396	373	**376**		

Les résultats d'analyse de la variance ne révèlent aucun effet significatif des engrais et doses appliquées sur le peuplement épis, par contre leur interaction est hautement significative (C.V. =15,57%).

Le test de Newman et Keuls a fait ressortir 2 groupes homogènes A, B, qui se chevauchent (Annexe I). La meilleure combinaison est obtenue au niveau du traitement Fosfactyl*D60 (460 épis/m²), par contre l'interaction Fosfactyl*D30 a donné les plus faibles valeurs (319 épis/m²).

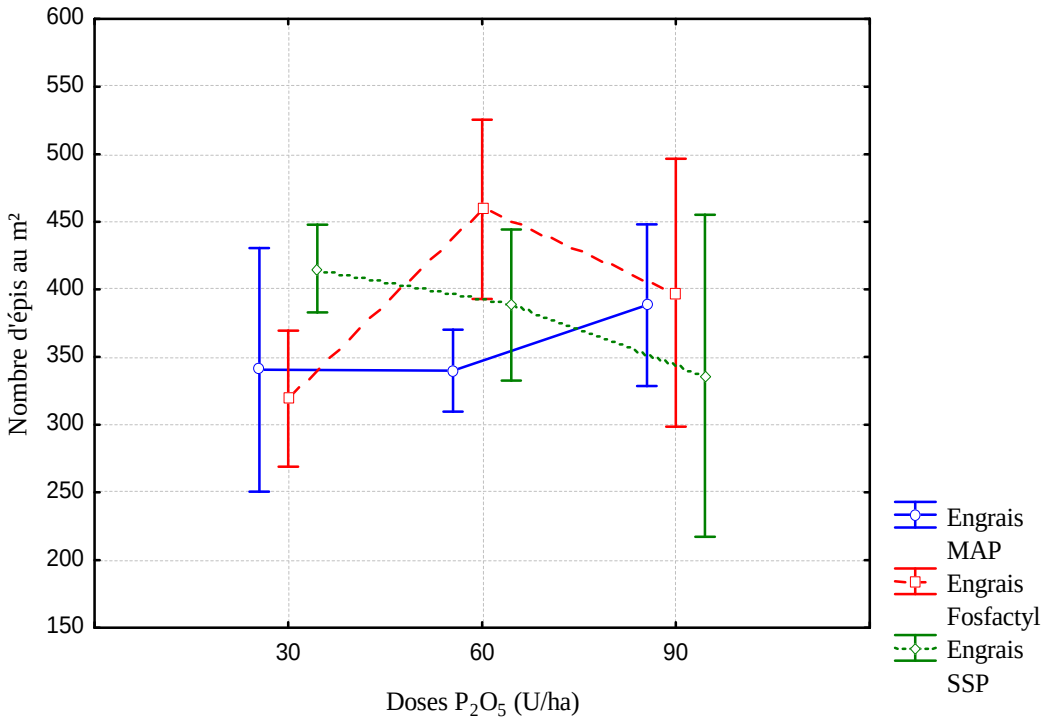


Figure 9. Nombre d'épis au mètre carré par types et doses d'engrais

I.1.2. Nombre de grains par épi

D'après **LEGRET** (**1985**), la composante la plus importante du rendement est le nombre de grains par épi et plus précisément le nombre de grains par épillet.Les résultats de l'effet de la fertilisation phosphatée sur le nombre de grains par épi sont présentés dans le tableau 12 et illustrés dans la figure 10.

Tableau 12. Effet de la fertilisation phosphatée sur le nombre grains par épi

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	31	30	33	31	**12,06**	Effet engrais : **S** Effet dose : **N.S** Engrais *dose : **N.S**
Fosfactyl	28	30	27	28		
SSP	30	29	27	28		
Moyenne	29	29	29	**29**		

Le nombre des grains/épi varie de façon significative avec le type d'engrais phosphaté apporté alors que les doses d'engrais et l'interaction engrais*doses n'ont eu aucun effet sur le nombre de grains par épi. Le MAP a favorisé le nombre de grains/épi le plus élevé (31) par contre le Fosfactyl et le SSP ont enregistrés les plus faibles valeurs avec 28 grains/épi (C.V. = 12,06%).

D'après **COUVREUR** (**1981**), le nombre de grains par épi est une caractéristique variétale qui est très influencée par lenombre d'épis au mètre carré ; **HAFSI** (**1990**) ajoute que s'il y'a une application précoce du phosphore, il y aura une augmentation dunombre de grain par épi, le nombre d'épillets par épi et la matière sèche du blé.

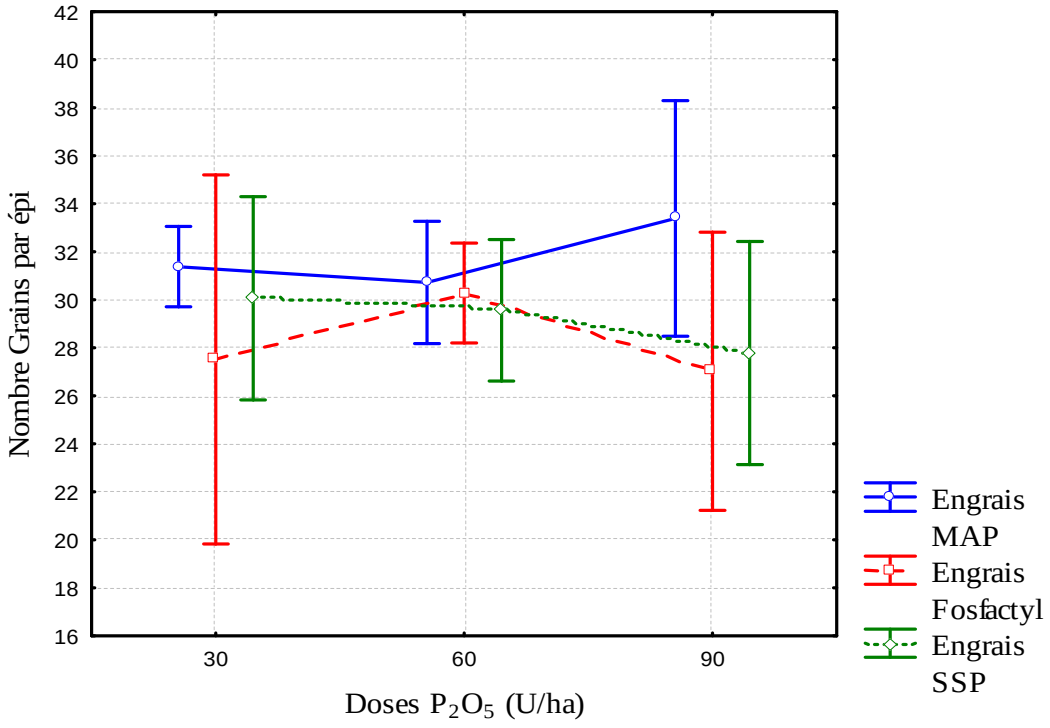


Figure 10. Nombre de graines par épi par types et doses d'engrais

I.1.3. Poids de 1000 grains

Les résultats du poids de 1000 grains sont présentés dans le tableau 13 et la figure13.

Tableau 11. Effet de la fertilisation phosphatée sur le poids de 1000 grains

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	46,78	51,56	46,92	48,42	**12,12**	Effet engrais : **S** Effet dose : **N.S** Engrais *dose : **N.S**
Fosfactyl	47,27	50,14	52	49,8		
SSP	54,32	51,39	52,74	52,82		
Moyennes	49,46	51,03	50,55	**50,35**		

Le poids de 1000 grains varie de façon significative avec les trois types des engrais (C.V. = 12,12%). Il passe de 48,42 grammes avec le MAP à 52,82 grammes avec le SSP. Soit une augmentation de 8,33% représentant ainsi un gain de 4,4 g. alors que les doses testées et l'interaction engrais*dose n'ont exercé aucun effet significatif sur ce paramètre.**LOUE (1984)**et**BATTEN** (**1992**) suggèrent que le poids de 1000 grains est un paramètre influencé par la nutrition minérale du blé notamment la nutrition phospho-potassique ; cependant, les conditions climatiques influent également sur ce paramètre (**GRIGNAC, 1981 ; MEYNARD, 1987** et **GATE, 1996**).Dans l'intervalle expérimental, nos résultats sontnettement supérieurs à ceux obtenus par **MEHDI** et **al**(**2007**) à savoir un PMG maximum de 45,72 g pour une dose de 120 U de P_2O_5/ha.

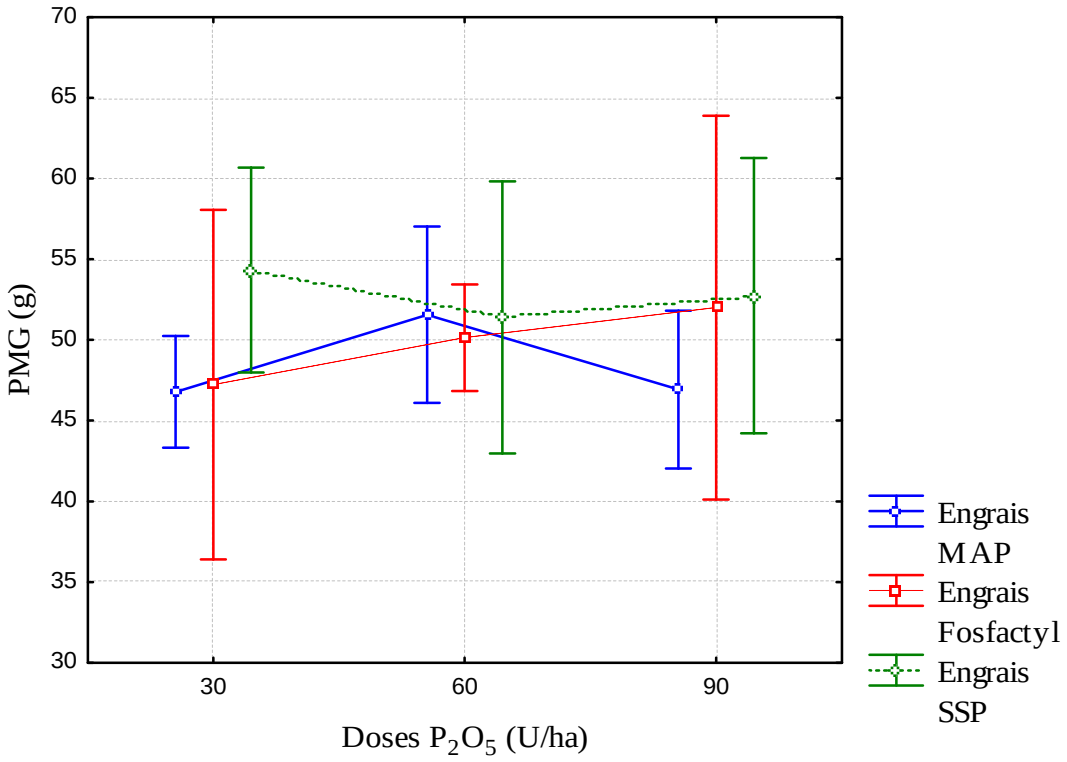


Figure 11. Poids de 1000 grains (g) par types et doses d'engrais

I.2. Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en grains et en paille

I.2.1. Rendementen grains

Les résultats du rendement en grain sont présentés dans le tableau 14 et la figure 12.

Tableau 12. Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en grains (q/ha)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	49,45	52,59	60,08	54,04	**27,74**	Effet engrais : **N.S** Effet dose : **N.S** Engrais *dose : **S**
Fosfactyl	42,22	69,19	55,74	55,72		
SSP	67,63	57,82	47,85	57,77		
Moyenne	53,10	59,87	54,56	**55,84**		

Les résultats de l'analyse de la variance montrent que les engrais et les doses du phosphore ont exercé un effet non significatif sur le rendement en grain (C.V. = 27,74%). Pour l'interaction engrais*dose, l'analyse de la variance révèle une différence significative où la combinaison Fosfactyl*D60 a donné le rendement le plus élevé avec 69,19 q/ha : le plus faible est l'œuvre de Fosfactyl*D30 avec 42,22 q/ha soit un écart d'environ 39%.

I.2.2. Rendementen paille

Les résultats de l'effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en pailles sont présentés dans le tableau 15 et illustrés dans la figure 13.

Tableau 13. Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en pailles (q/ha)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	52,372	66,522	66,338	61,74	**14,75**	Effet engrais : **N.S** Effet dose : **H.S** Engrais *dose : **S**
Fosfactyl	60,268	80,186	62,404	67,62		
SSP	64,136	68,314	55,138	62,53		
Moyenne	58,93	71,67	61,29	**63,96**		

Les résultats de l'analyse de la variance montrent que les engrais n'ont pas eu d'effet sur le rendement en paille, par contre les doses du phosphore et l'interaction engrais*doses ont exercé un effet hautement significatif et significatif respectivement sur ce paramètre (C.V. = 14,75%). Le test de Newman et Keuls fait ressortir deux (02) groupes homogènes qui se chevauchent (annexe I)

La dose qui a favorisé le rendement paille le plus élevé est la D60 en enregistrant 71,67 q/ha.Concernant l'effet des doses du phosphore sur le rendement en paille de la culture, nos résultats confirment ceux obtenus par **DERAOUI** (**2004**) et **BELAID** (**1987**).Nos résultats sont nettement supérieurs si on les compare avec les travaux de **MAHDI** et**al**, (**2007**) qui a obtenu une valeur maximale de 39 q/ha du rendement en paille pour une dose de 150 u de P_2O_5.

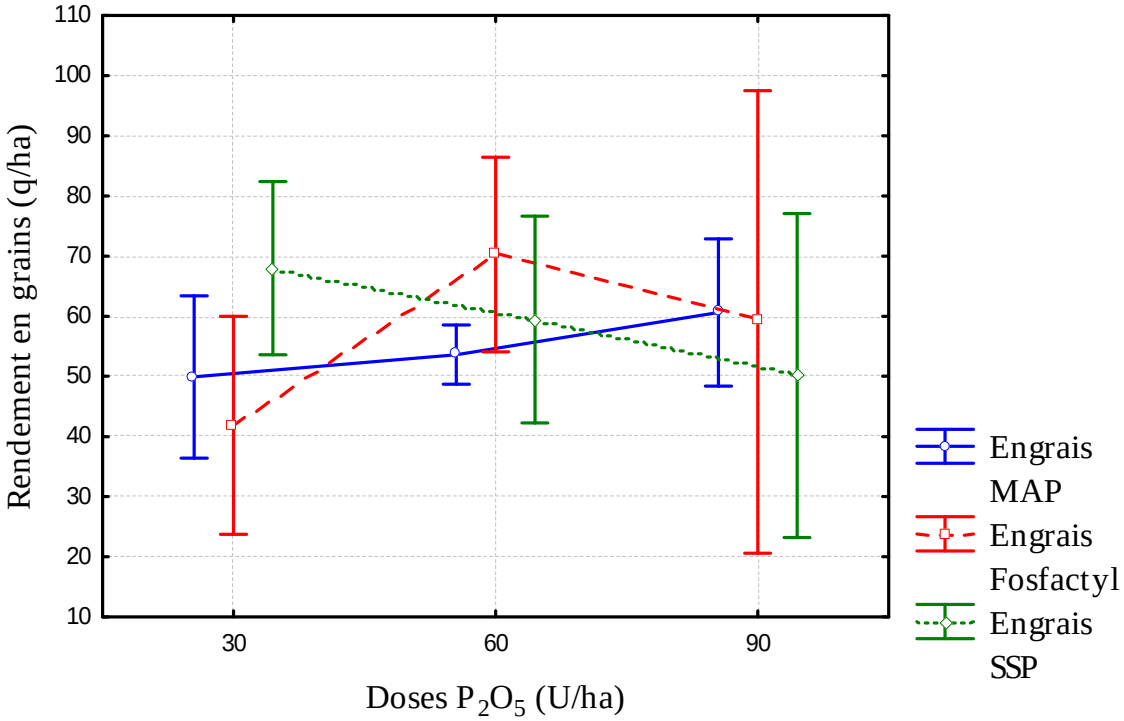


Figure 12. Rendement en grains (q/ha) par types et doses d'engrais

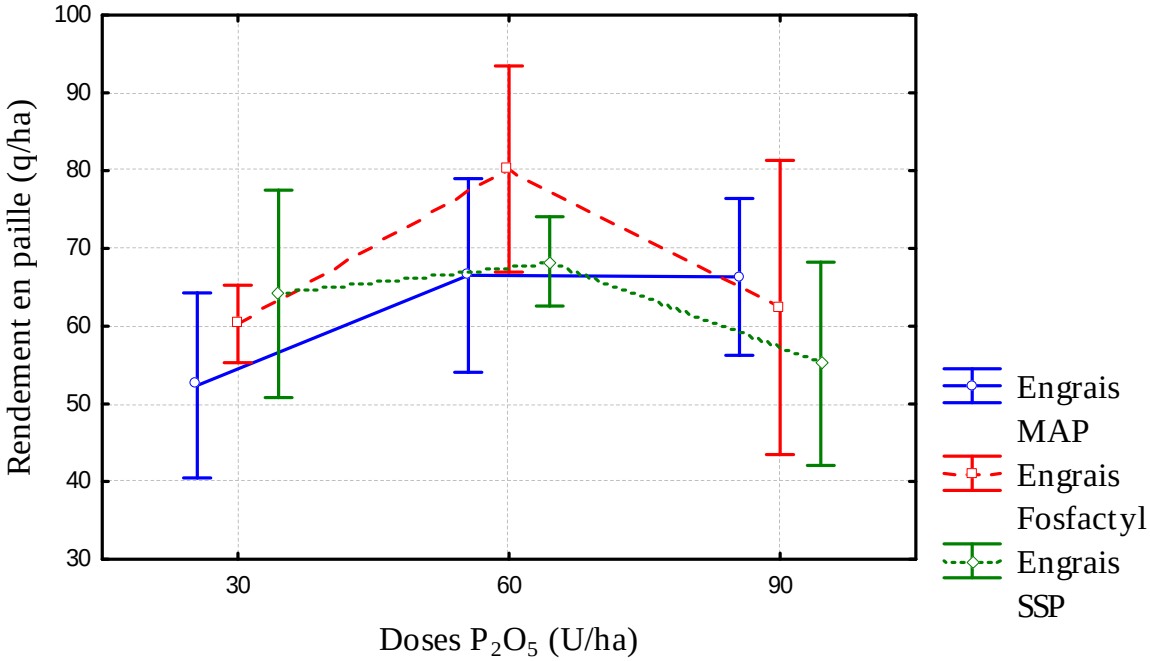


Figure 13. Rendement en paille (q/ha) par types et doses d'engrais

I.3. Effet de la fertilisation phosphatée sur la nutrition minérale de la plante

Le but de cette partie consiste à savoir la contribution de la fertilisation phosphatée dans l'amélioration de la nutrition minérale de la plante par une étude de l'effet comparé de différents engrais phosphatée appliqués à différentes doses.

I.3.1. Alimentation azotée du blé

L'azote est considéré comme le pivot de toute production végétale en particulier les cultures céréalières. Pour connaitre l'influence d'engrais phosphaté apporté sur la nutrition azotée du blé, nous avons déterminé la teneur en azote des parties aériennes de la plante au stade maturité du blé.

I.3.1.1. Teneur en azote de la plante

- **Paille**

Les résultats de la teneur en azote de la paille sont consignés dans le tableau 16.

Tableau 16. Influence de la fertilisation phosphatée sur la teneur en azote (% MS) de la paille

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	0,7	0 ,63	0,84	0,77	**42,31**	Effet engrais : **S** Effet dose : **N.S** Engrais *dose : **H.S**
Fosfactyl	0,57	0,63	0,98	0,73		
SSP	0,77	0,43	0,3	0,50		
Moyenne	0,68	0,53	0,71	**0,64**		

Les résultats indiquent clairement un effet significatif sur la teneur en azote de la paille du blé en fonction du type d'engrais (les teneurs passent de 0,5% obtenus avec le SSP à 0,77% avec le MAP) ; l'effet est hautement significatif pour les interactions Engrais*doses (la teneur la plus élevée est de 0,98% enregistrée avec la combinaison Fosfactyl*D90).

Selon **BAEYENS** (**1967**), une plante jeune est plus riche en azote qu'une plante vieille qui est riche en hydrate de carbone.**DUTIL** (**1973**) estime que la teneur en azote de la matière sèche d'une paille de blé est située entre 0,3 et 0,6%.

- **Grains**

Les résultats de la teneur en azote de la paille sont consignés dans le tableau 17.

Tableau 17. Influence de la fertilisation phosphatée sur la teneur en azote (% MS) de la graine

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	1,96	2,1	1,82	1,96	**37,11**	Effet engrais : **N.S** Effet dose : **N.S** Engrais *dose : **N.S**
Fosfactyl	1,54	1,4	1,54	1,49		
SSP	2,1	1,68	1,26	1,68		
Moyenne	1,87	1,73	1,54	**1,71**		

La fertilisation phosphatée ne montre aucune différence significative entre les traitements ; à priori et dans le cas de cette expérimentation, les types et doses d'engrais phosphatés n'ont eut aucun effet sur la teneur en azote des grains. En terme de tendance, plus le sol es riche en phosphore et moins est la teneur en azote du grain ; l'effet type d'engrais se dessine significativement. **DUTIL** (**1973**) suggère que la teneur en azote des grains de blé est comprise entre 1,1 et 2,3% MS ; les valeurs obtenues se situent dans cet intervalle.

I.3.1.2. Exportation d'azote par la culture (stade récolte)

Les résultats de l'exportation d'azote par la culture sont consignés dans le tableau 18 et illustrés par la figure 14.

Tableau 18. Influence de la fertilisation phosphatée sur l'exportation d'azote par la culture (kg/ha)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	138,04	152,63	168,1	152,92	**13,7**	Effet engrais : **N.S** Effet dose : **N.S** Engrais *dose : **H.S**
Fosfactyl	95,78	148,19	137,87	127,28		
SSP	195,19	123,76	86,1	135,02		
Moyenne	143	141,53	130,69	**138,4**		

L'analyse de variance indique un effet non significatif du phosphore sur l'exportation en azote de la culture à ce stade de maturité(C.V. = 13,7%), l'effet est hautement significatif dans le cas des interactions (Engrais*doses). Les exportations les plus élevées sont obtenues avec les combinaisons

MAP*D90, Fosfactyl*D60 et SSP*D30 avec respectivement 168 kg/ha, 148,19 kg/ha et 195,19 kg/ha.

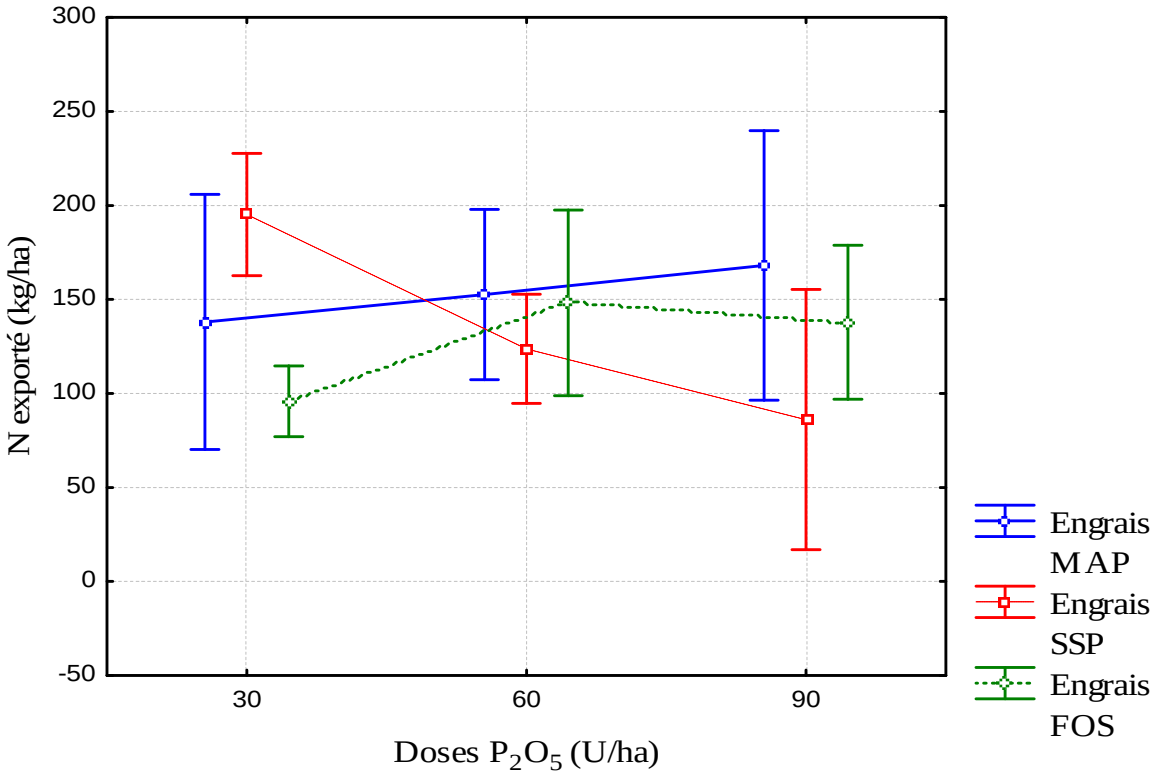


Figure 14. Exportations d'azote par la culture (kg/ha) par type et doses d'engrais

I.3.2. Alimentation phosphatée du blé

I.3.2.1. Teneur en phosphore de la plante

- **Paille**

Les résultats de l'exportation d'azote par la culture sont consignés dans le tableau19.

Tableau 19. Influence de la fertilisation phosphatée sur la teneur en P_2O_5 de la paille (% MS)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification Statistique
MAP	0,068	0,132	0,080	0,09	**38,46**	Effet engrais : **S** Effet dose : **N.S** Engrais *dose : **S**
Fosfactyl	0,140	0,128	0,153	0,14		
SSP	0,165	0,097	0,104	0,122		
Moyenne	0,124	0,119	0,112	**0,118**		

Le taux de phosphore dans les pailles varie de façon significative sous l'effet des engrais et interaction engrais*doses. Par contre les doses étaient sans effet sur ce paramètre (C.V. = 38,46). La meilleure teneur en P est obtenue par le Fosfactyl avec 0,14% MS, par contre la plus faible est obtenue par le MAP avec 0,09% MS. La combinaison SSP*D30 a permis l'obtention du taux en P des pailles le plus élevé en enregistrant 0,165% MS. D'après **GERVY** (**1970**) et **DUTIL** (**1973**), la teneur moyenne de la paille du blé en phosphore se situe entre 0,09 et 0,25% de la matière sèche totale.

- **Grains**

Les résultats de la teneur en phosphore des grains pour les différents traitements sont représentés dans le tableau 20.

Tableau 20. Influence de la fertilisation phosphatée sur la teneur en P_2O_5 des grains (% MS)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	0,493	0,597	0,780	0,623	**31,07**	Effet engrais : **N.S** Effet dose : **T.H.S** Engrais*dose : **T.H.S**
Fosfactyl	0,918	0,431	0,594	0,648		
SSP	1,065	0,570	0,507	0,714		
Moyenne	0,825	0,532	0,627	**0,662**		

L'analyse de la variance n'indique aucun effet significatif entre les différents types d'engrais ; par contre, les doses et l'interaction engrais*dose ont révélés des influences très hautement significatives sur la teneur en phosphore des grains (C.V. = 31,07%). Le test de Newman et Keuls fait ressortir trois (03) groupes homogènes A, B et C qui se chevauchent entre eux (annexe I). Nos résultats sont identiques et confirment ceux obtenus par **QAISAR** et **al** (**2005**) qui ont trouvé une influence favorable des doses de phosphore sur les teneurs en phosphore des grains. Les valeurs obtenues sont totalement situées dans l'intervalle indiqué par **GERVY**(**1970**) et **DUTIL** (**1973**) soit entre 0,45 et 1,10 % de la MS totale.

I.3.2.2. Exportation de phosphore par la culture (stade récolte)

Les résultats de ce paramètre pour les différents traitements sont représentés dans le tableau 21 et illustrés par la figure 15.

Tableau 21. Influence de la fertilisation phosphatée sur les exportations de P_2O_5 par la culture (kg/ha)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification Statistique
MAP	27,57	41,04	50,91	39,84	**36,05**	Effet engrais : N.S Effet dose : N.S Engrais*dose : T.H.S
Fosfactyl	45,1	40,72	45,18	43,67		
SSP	82,71	41,4	28,86	50,99		
Moyenne	51,79	41,05	41,65	**44,83**		

L'analyse de la variance ne montre aucune différence significative de l'effet des engrais et des doses apportées sur les quantités du phosphore prélevées par la culture, par contre leur interaction a

eu un effet très hautement significatif. Le test de Newman et Keuls a permis d'obtenir deux (02) groupes homogènes A et B (annexe I). Par ailleurs, les exportations de phosphore les plus élevées ont été enregistrées avec les interactions suivantes : MAP*D90, Fosfactyl*D90 et SSP*D30 avec respectivement 50,91 kg/ha, 45,18 kg/ha et 82,71 kg/ha. D'après **MARTIN-PRÉVEL et al. (1984),** le maximum d'absorption de blé pour le phosphore correspond à très peu près à la maturité.Nos résultats s'avèrent faibles si on les compare avec les valeurs indiquées par **PREVOST** (**1999**) qui estime une exportation de l'ordre de 72 kg du phosphore pour un rendement de 60 quintaux de blé.

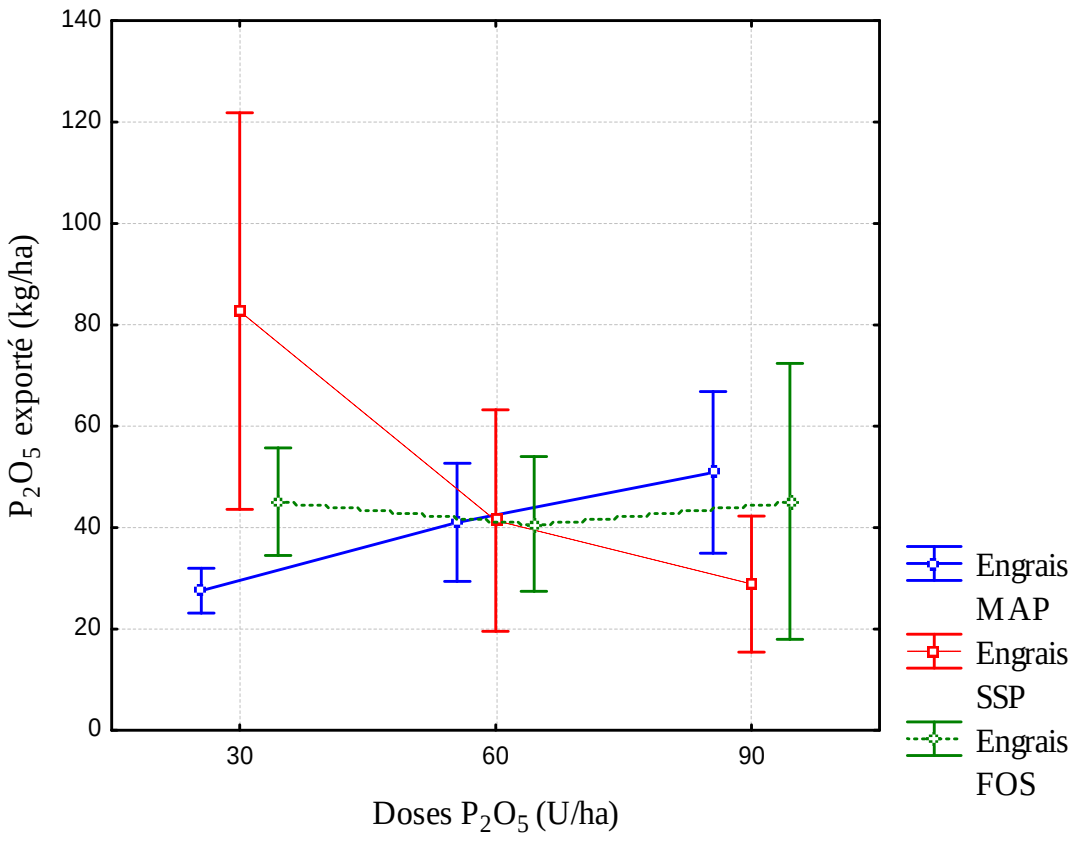


Figure 15. Exportations de phosphore par la culture (kg/ha) par type et doses d'engrais

I.3.2.3. Quantité de phosphore exporté en kg par quintal de grains produit

Les résultats de la quantité de phosphore exporté par quintal de grains produit sont présentés dans le tableau 22.

Tableau 22. Quantité de P_2O_5 exporté (kg) par quintal de grains produit

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	0,567	0,761	0,869	0,732	**30,29**	Effet engrais : **N.S** Effet dose : **T.H.S** Engrais*dose : **T.H.S**
Fosfactyl	1,150	0,585	0,775	0,837		
SSP	1,225	0,691	0,645	0,854		
Moyenne	0,981	0,679	0,763	**0,808**		

L'analyse de la variance s'est révélée non significative entre les engrais phosphatés, par contre les doses du phosphore ainsi que les interactions ont exercés un effet très hautement significatif sur la quantité du phosphore exporté par quintal de grains(C.V. = 30,29%). Le test de Newman et Keuls nous a donné trois groupes homogènes qui se chevauchent entre eux (annexe I). Les quantités nécessaires de phosphore (P_2O_5) pour produire un quintal de grains passent de 0,67 kg obtenus par la D60 à 0,98 kg obtenus avec la D30. L'interaction SSP*D30 a enregistré la quantité la plus élevée avec 1,22 kg par contre MAP*D30 a marquée la plus faible quantité avec 0,56 kg. Selon **DUTIL** (**1973**), les exportations du phosphore par le blé varié entre : 0,85 à 1,35 kg par quintal de grains ; **PREVOST** (**1999**) estime ces exportations par le blé à 1,2 kg de phosphore par quintal de grains produit.

I.3.3.Alimentation potassique du blé

I.3.3.1. Teneur en potassium de la plante

- **Paille**

Les résultats relatifs à l'exportation du potassium par la paille du blé sont consignés dans le tableau 23.

Tableau 23. Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en potassium de la paille (% MS)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	1,378	1,430	1,357	1,388	**6,17**	Effet engrais : **T.H.S** Effet dose : **S** Engrais*dose : **N.S**
Fosfactyl	1,365	1,335	1,357	1,352		
SSP	1,514	1,557	1,376	1,482		
Moyenne	1,419	1,441	1,363	**1,408**		

L'analyse statistique de ce paramètre révèle une différence très hautement significative de l'engrais phosphaté et significative des doses sur la teneur en potassium de la paille (C.V. = 6,17%). Trois (03) groupes homogènes qui se chevauchent entre eux ont été obtenus par le test de Newman et Keuls (annexe I). Les meilleures valeurs sont obtenues par l'engrais SSP (1,482%MS) et la dose D60 (1,44 %MS), alors que les plus faibles valeurs sont enregistrées par le Fosfactyl (1,35 %MS) et D90 (1,36 %MS). L'interaction (Engrais*Dose) était sans effet sur la teneur en potassium de la paille. La teneur en potassium des plantes varie selon l'espèce, la variété et l'organe considéré ; les organes de croissance sont plus riches en potassium alors que les grains en sont relativement pauvres (**COTTIGNIES, 1977**). Nos résultats sont totalement proches à ceux de **LOUE** (**1982**) qui estime que la teneur en potassium pour la paille de blé est de l'ordre de 1,10 % de la matière sèche.

- **Grain**

Les résultats de la teneur en potassium dans les grains sont présentés dans le tableau 24.

Tableau 24. Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en potassium des grains (% MS)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	0,719	0,73	0,727	0,725	**4,8**	Effet engrais : **T.H.S** Effet dose : **T.H.S** Engrais*dose : **T.H.S**
Fosfactyl	0,7	0,911	0,857	0,823		
SSP	0,854	0,827	0,773	0,818		
Moyenne	0,758	0,823	0,786	**0,789**		

La fertilisation phosphatée exerce un effet fortement favorable sur la teneur en potassium du grain (C.V. = 4,8%). Le test de Newman et Keuls fait ressortir quatre (04) groupes homogènes A, B, C, et D qui se chevauchent (annexe I). La teneur en potassium passe de 0,72 %MS obtenue avec le MAP à 0,82 %MS obtenu avec le Fosfactyl. Pour les doses d'engrais, la D60 a donné la teneur la plus élevée avec 0,82 %MS, par contre la D30 a enregistrée la plus faible teneur avec 0,758 %MS ; l'interaction Fosfactyl*D60 a donné la teneur la plus élevée avec 0,91 %MS.Les valeurs obtenues sont totalement situées dans l'intervalle indiqué par **DUTIL** (**1973**) soit 0,5 à 1,5 % de la matière sèche chez le blé.

I.3.3.2. Exportation de potassium de la culture (stade récolte)

Les résultats de l'exportation en potassium de la culture exprimés en kg/ha sont consignés et illustrés dans le tableau25 et la figure16.

Tableau 25. Effet de la fertilisation phosphatée sur l'exportation en potassium (kg/ha)

	D30	D60	D90	Moyenne	C.V %	Signification statistique
MAP	108,30	134,47	134,12	125,63	**17,35**	Effet engrais : **N.S** Effet dose : **T.H.S** Engrais*dose : **T.H.S**
Fosfactyl	111,59	170,95	134,90	139,15		
SSP	155,29	155,57	114,36	141,74		
Moyenne	125,06	153,66	127,79	**135,51**		

L'analyse statistique révèle que l'effet des engrais sur l'exportation du potassium est non significatif alors que les doses du phosphore et les interactions (engrais*dose) ont exercé un effet très hautement significatif sur ce paramètre(C.V. = 17,35%). Le test de Newman et Keuls fait ressortir deux (02) groupes homogènes qui se chevauchent. Les exportations varient entre 125,06 kg/ha et 153,66 kg/ha respectivement pour les deux niveaux de dose 30 et 60 unités P_2O_5/ha.L'interaction Fosfactyl*D60 a favorisé l'obtention de meilleures exportations avec 170,9 kg/ha, par contre les plus faibles exportations sont obtenues par la combinaison MAP*D30 (108,3kg/ha).

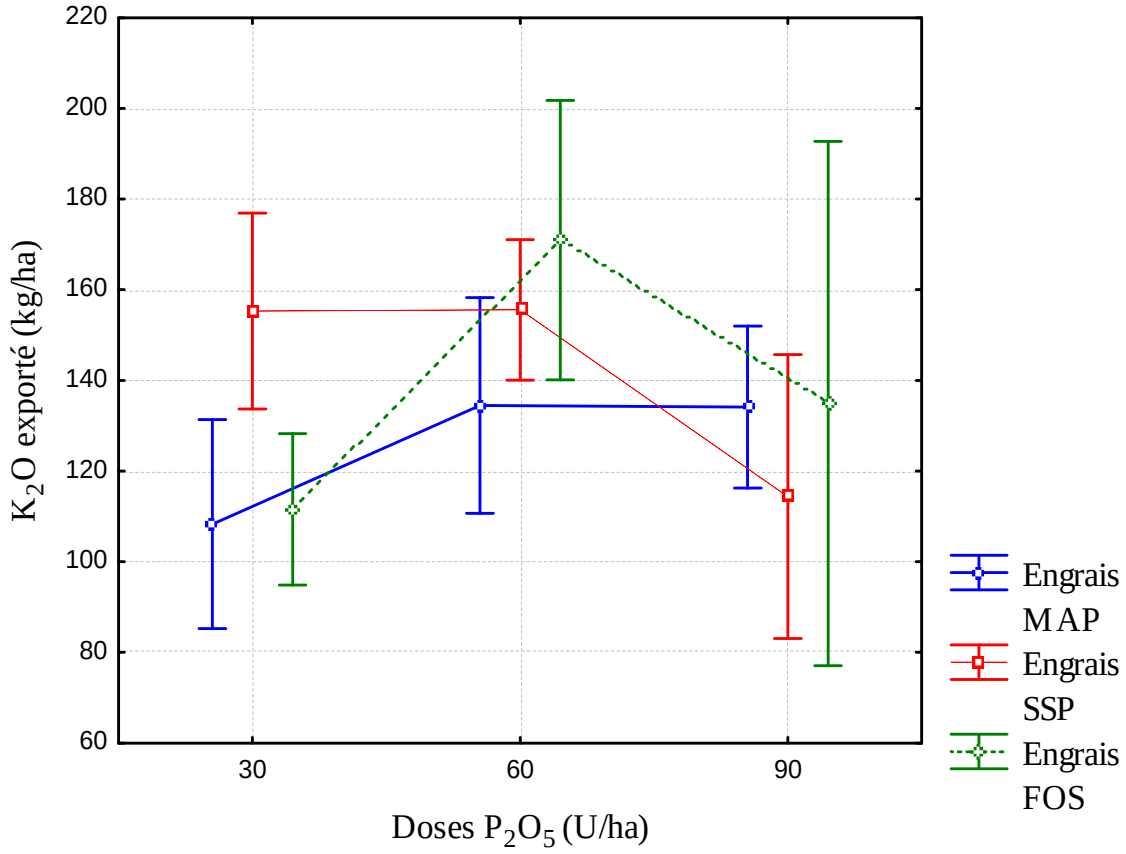


Figure 16. Exportations de potassium par la culture (kg/ha) par type et doses d'engrais

I.4. Etude des corrélations

I.4.1. Relations entre le rendement en grains et ses composantes

Les deux déterminantes du rendement : Nombre d'épis au m² et nombre de graines au m² ont enregistrés des fortes corrélations avec le rendement en grains (Fig. 17 et 18) avec des coefficients de corrélation respectivement de : (**r = 0,78*** ** et **r = 0,90*****). Ceci confirme les résultats obtenus par **LARBI** et **al** (**2000**), **DERAOUI** (**2004**).

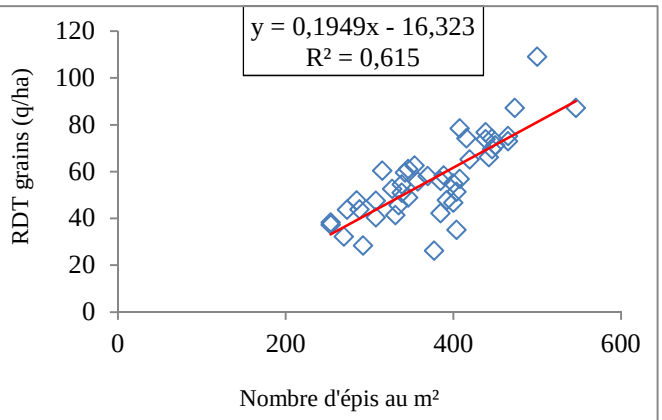


Figure 17. Relation entre RDT grains et nombre d'épis au m²

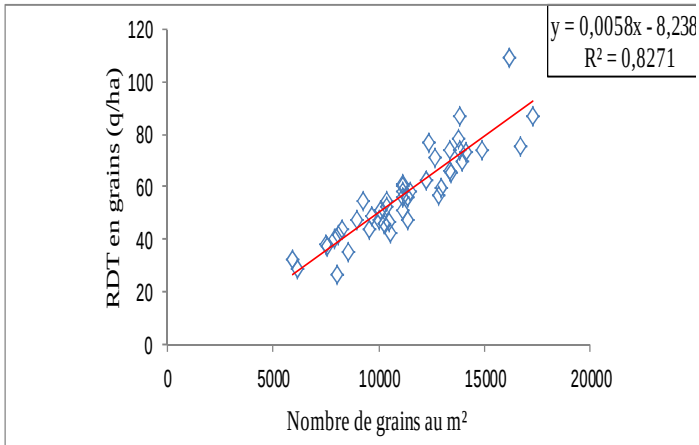


Figure 18. Relation entre RDT en grains et nombre de grains au m²

D'après nos résultats on constate qu'il y'a de très bonnes corrélations entre le rendement en grains et le nombre de grains au m², cela signifie que le rendement est très influencé par le nombre de grains au m².

Il existe par ailleurs une bonne corrélation (**r = 0,54***) entre la paille produite et le rendement en grains (Fig. 19) suggérant un rapport au profit de la paille. On remarque aussi une forte liaison entre le nombre de grains au m² et le nombre de grains par épi (**r = 0,79*****) (Fig. 20).

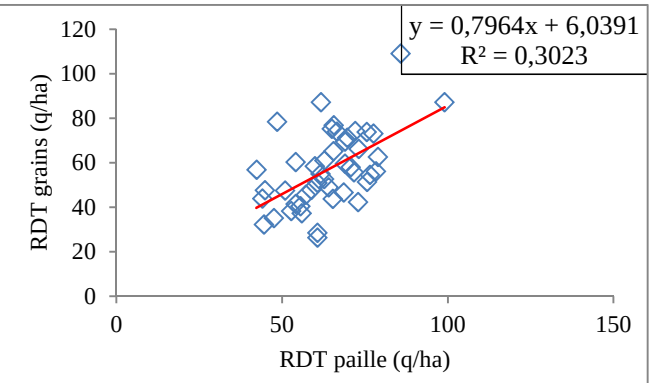


Figure 19. Relation entre rendements en pailles et en grains

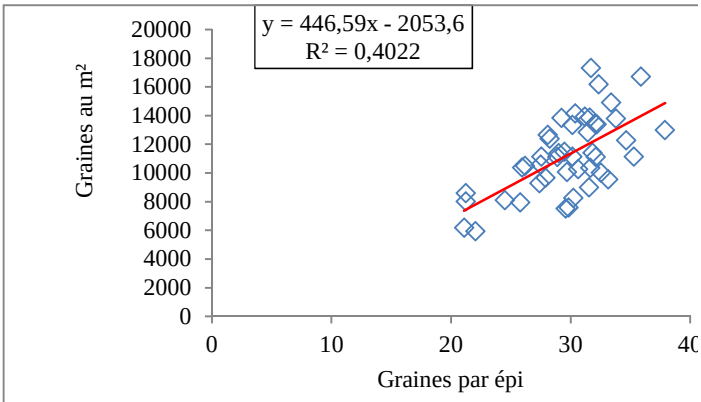


Figure 20. Relation entre le nombre de graines au m² et le nombre de graines par épi

I.4.2. Relation entre les exportations des éléments minéraux et le rendement grains

Les figures 21, 22 et 23 montrent une liaison positive entre les exportations des éléments majeurs (NPK) et les rendements obtenus : l'on constate principalement que le rendement est plus influencé par les exportations de la potasse par la culture que par les deux autres éléments (**r = 0,82*****). La figure 24montre une relation positive entre l'exportation de K_2O par la culture et le poids de 1000 grains (**r = 0,51***) sans qu'elle soit discriminante.

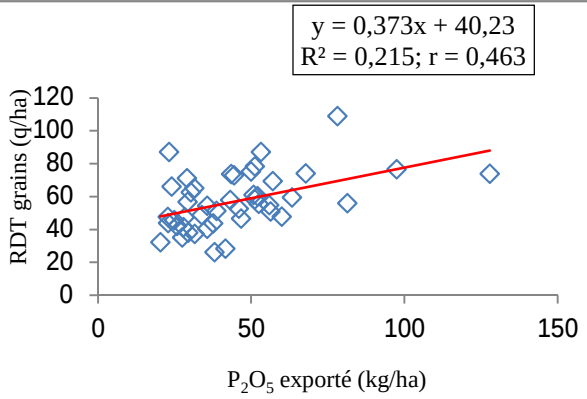


Figure 21. Relation entre l'exportation du phosphore et RDT grains (q/ha**)**

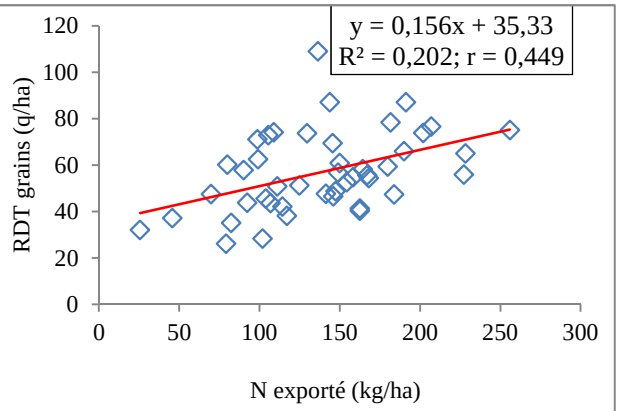


Figure 22. Relation entre l'exportation d' azote et RDT grains (q/ha**)**

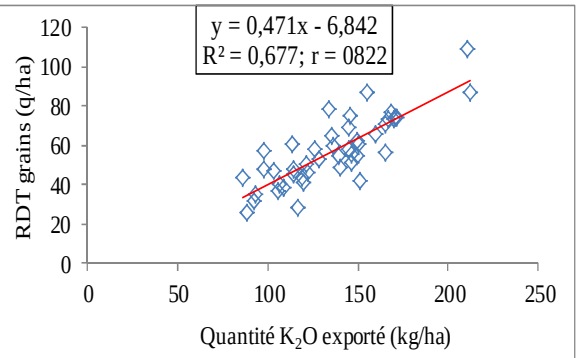


Figure 23. Relation entre l'exportation de la potasse (kg/ha) et RDT grains (q/ha)

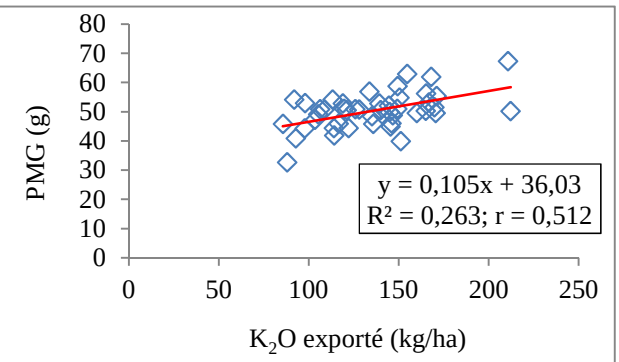


Figure 24. Relation entre les prélèvements de la potasse (kg/ha) et PMG (g)

I.5.3. Relation entre les exportations des éléments minéraux par la culture

Concernant les deux éléments N et P on a constaté que la relation entre les exportations de ces éléments par la culture est positivement et moyennement corrélée (**r = 0,44***) (Fig.25). Ce qui implique l'existence d'une liaison synergétique et proportionnelle entre l'exportation de P_2O_5 et celle de l'azote.

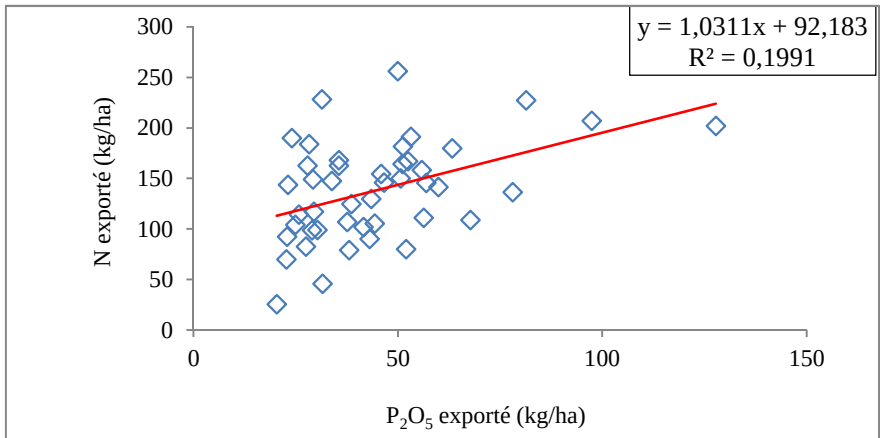


Figure 25. Relation entre les exportations d'azote et du phosphore par la culture

La droite de régression (Fig. 26 et 27) illustre la liaison existante d'une part entre les exportations de phosphore et celles de potassium (**r = 0,51***), et d'autre part entre les exportations d'azote et celles de potassium (**r = 0,43***). Les travaux de (**BELAID**, **1987** ; **HAFSI**, **1990** ; **AISSA** et **MHIRI**, **2001** ; et **HALILAT**, **2004**) ont montré qu'il existe des interactions synergétiques entre les éléments nutritifs N.P.K. ce qui confirme les corrélations significatives entre les différentes exportations de ces trois éléments par la culture.

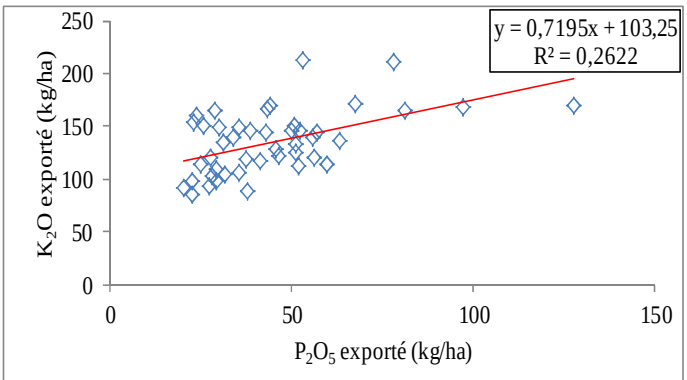


Figure 26. Relation entre les exportations de potasse et de phosphore par la culture (kg/ha)

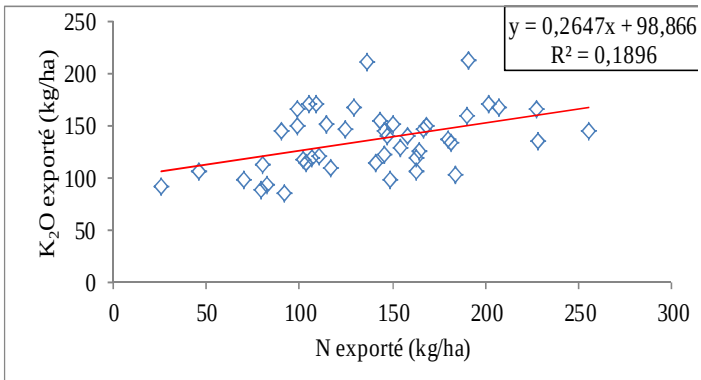


Figure 27. Relation entre les exportations d'azote et de potasse par la culture (kg/ha)

Chapitre II. Effet de la fertilisation phosphatée sur l'évolution de quelques paramètres physico-chimique du sol

II.1. Évolution des teneurs en phosphore assimilable du sol

La connaissance de la dynamique d'un élément est indispensable au diagnostic de la fertilité d'un sol et à l'estimation des correctifs à apporter (**BOSC**, **1976**).

DATAGO et **al** (**2002**) ajoutent que le changement de la composition de la solution du sol par exemple dans notre cas où nous avons apporté de l'engrais au sol, ceci peut influer sur la dynamique du phosphore.

La caractérisation du phosphore assimilable demeure toujours nécessaire à fin d'établir un jugement ou bien un diagnostic sur le comportement de la culture vis-à-vis à cet élément, ainsi elle permet d'élaborer un pronostic sur la fertilité phosphatée d'un sol et préconiser des recommandations en matière de fertilisation. C'est pourquoi, il devrait important de ressentir les relations réelles existant entre la fraction du phosphore susceptible d'être prélevée par la culture et le phosphore extrait par les réactifs chimiques conventionnels. En effet, l'évolution du phosphore assimilable dans le sol est toujours affectée par un certain nombre des paramètres à savoir : le pH, la matière organique, le calcaire, les sels solubles,...etc. tous ces paramètres rentrent en joue dans le statut phosphorique du sol.Les valeurs moyennes obtenues du dosage de phosphore assimilable (Olsen) de tous les traitements sont consignées dans le tableau 26 et la figure 28.

Tableau 26. Évolution des teneurs en phosphore assimilable (ppm) en fonction des périodes d'incubation des engrais (jours)

Traitements	Durée d'incubation (jrs)							Moy gle	C.V (%)	Signification Statistique
	15 jrs	*30 jrs*	*45 jrs*	*60 jrs*	*75 jrs*	*90 jrs*	*105 jrs*			
Témoin	64,62	75,61	84,93	64,29	66,06	64,42	62,81	68,97	**19,8**	Effet Durée : **T.H.S** Effet Engrais :**T.H.S** Effet D*Engrais: **T.H.S**
MAP	122,13	145,52	121,87	43,47	38,37	41,79	41,69	79,26		
Fosfactyl	122,88	83,32	79,97	74,57	71,36	66,86	41,42	77,2		
SSP	104,65	107,74	102,34	88,2	79,97	76,51	61,21	88,66		
Moyennes	103.58	103.04	97.28	67.64	63.95	62.40	51.78	**78.52**		

La fertilisation phosphatée a indiquée un effet très hautement significative sur l'évolution de l'élément considéré dans le sol (C.V. = 19,8%).La comparaison des moyennes par rapport aux différents engrais a fait ressortir trois groupes homogènes A, B et C qui se chevauchent (Annexe I).

Les résultats obtenus s'avèrent importantes comparés aux nomes d'interprétation habituellement employées (**OLSEN et al**, **1954**), les traitements étudiés se sont révélés riches en phosphore soluble ; ceci confirme la constatation faite par **AMRANI** (**1997**) qui indique que le taux de disponibilité du phosphore apporté aux sols est élevé dans les sols sableux et faible dans les sols argileux.

A l'issue de l'incubation, le sol soumis à enrichissement par les types d'engrais phosphatés a présenté des teneurs en phosphore assimilable meilleures que le témoin soit des taux d'accroissement d'environ de 22, 13 et 11 % respectivement pour les traitements avec SSP, MAP et Fosfactyl ; en fonction de la teneur initiale du sol en phosphore assimilable (45,66 ppm), ces taux d'accroissement et dans le même ordre d'environ 15, 5 et 3%.

Durant l'incubation et du quinzième jour jusqu'à la fin, tous les traitements ont présenté une régression dans le temps des quantités de phosphore assimilable (Fig.28). D'une manière générale, les valeurs moyennes passent de 103,58 à 51,78 ppm soit un taux de diminution est de l'ordre de 50%. Dans le cas du sol sans apport d'engrais (Témoin), la faible intensité milite en faveur d'une situation d'équilibre propre à ce type de sol.

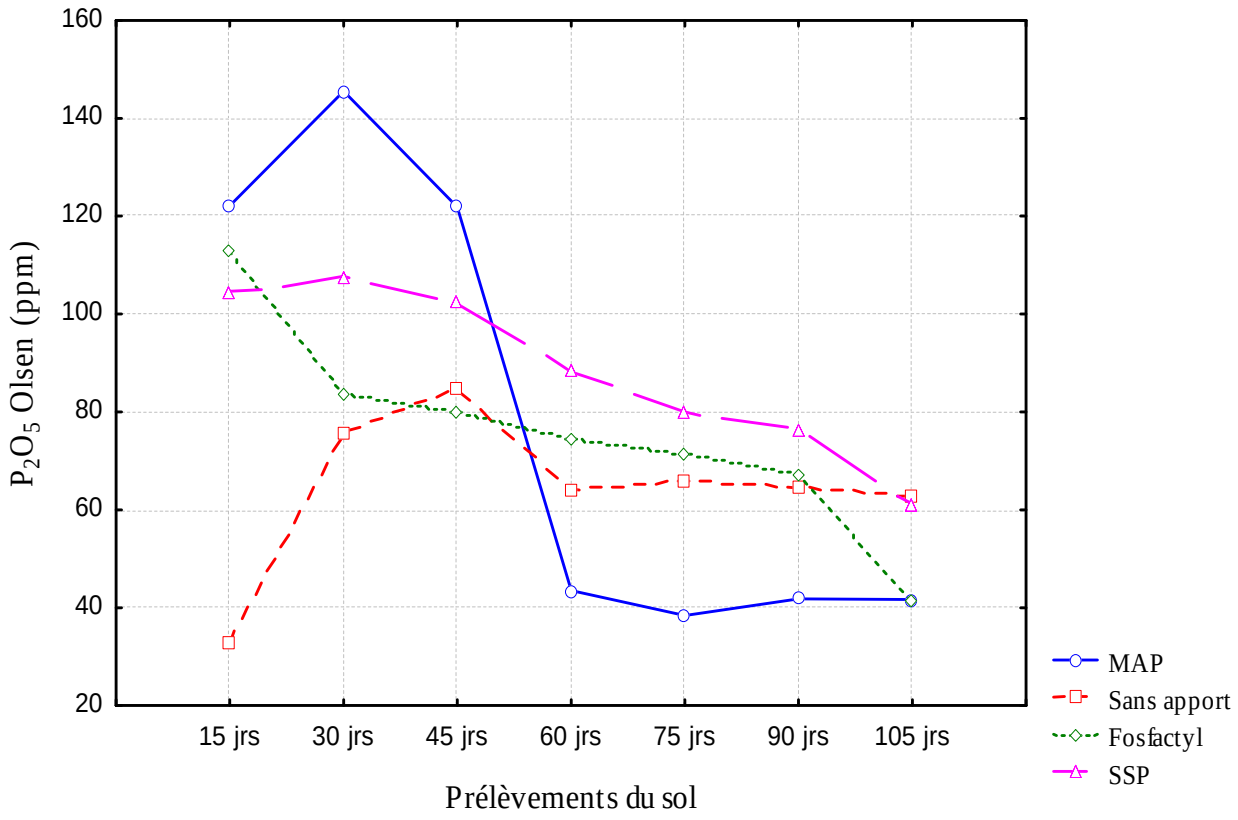


Figure 28. Évolution des teneurs en phosphore assimilable (ppm) des différents traitements en fonction des prélèvements du sol

La diminution des quantités de P peut être générée par une fixation du P par le sol. Ce phénomène commence au début par un rythme rapide et continu dans tous les traitements même pour le Témoin pour évoluer plus lentement avec un rythme plus faible et devient par la suite presque stable dans le temps surtout pour le MAP et le Témoin après 60jrs. Ceci confirme les travaux de **RAZI** (**2006**) mentionnant une intensité de fixation du phosphore décroissante en fonction du temps. De ce fait, le phosphore provenant de l'engrais va réagir dans le sol avec les ions Ca^{2+} présents en quantité importante dans la solution du sol et subit une rétention surtout devant une irrigation non drainante comme notre cas. **AKINRAMI** et **CHO** (**1991**) montrent que le phosphore réagit d'abord avec le Ca^{2+}du complexe adsorbant, puis avec le Ca^{2+} libre de la solution du sol, ensuite avec le Ca^{2+}présent sur la surface de la calcite. L'apport de l'engrais phosphaté au sol conduit à un déséquilibre chimique ; pour retrouver un nouvel équilibre, le sol doit fixer et adsorber les quantités supplémentaires du phosphore provenant de l'engrais. Les quantités du P retenu peuvent être

augmentées lorsque le temps de contact entre le sol et le phosphore apporté augmente (**FARDEAU**, **1993**). Les résultats et les constatations observées concernant l'évolution du phosphore assimilable dans le sol sont identiques et confirment celles obtenues par **HAFIDI** et **al** (**1994**). Ce dernier, ayant suivi pendant 30 jours la variation du phosphore dans le sol après apport de 200 ppm de P (KH_2PO_4), a trouvé une diminution des quantités de P "assimilables" extraites par des différentes méthodes d'extraction dans trois types de sols (acide, neutre et calcaire) au Maroc.

II.2. Évolution de pH du sol

La dissolution des engrais minéraux dans le sol a plusieurs effets sur les propriétés du sol, parmi lesquels le pH et la salinité du sol sont les plus apparents (**MOUGHLI**, **2000**). Les valeurs du pH durant l'incubation sont consignés le tableau 27.

Tableau 27. Évolution du pH des différents traitements durant l'incubation

Traitements	Durée d'incubation (jrs)							Moy gle	C.V (%)	Signification Statistique
	15 jrs	*30 Jrs*	*45 Jrs*	*60 jrs*	*75 jrs*	*90 jrs*	*105 jrs*			
Témoin	8.60	8.55	8.43	8.44	8.51	8.45	8.41	8,48	**1,44**	Effet Durée : **N.S** Effet Engrais : **T.H.S** Effet D*Engrais: **N.S**
MAP	7.84	7.91	7.81	8.01	8.00	7.98	7.97	7,93		
Fosfactyl	8.11	8.18	8.16	8.24	8.26	8.15	8.18	8,18		
SSP	8.12	8.14	8.13	8.22	8.22	8.19	8.19	8,17		
Moyennes	8.17	8.20	8.13	8.23	8.25	8.19	8.19	**8.19**		

L'analyse de la variance montre que la différence est très hautement significative entre les différents traitements (C.V. =1,44%), par contre la durée d'incubation et les interactions (Durée*Engrais) n'ont exercé aucun effet significatif sur le pH du sol. Le test de Newman-Keuls (5%) a permis d'obtenir trois groupes homogènes A, B et C (Annexe I).

Comparativement au témoin, l'apport d'engrais phosphaté a provoqué une baisse du pH dans tous les traitements. A l'issue de la période d'incubation, l'on constate une tendance générale à la stabilisation (Fig.29). Les plus faibles valeurs enregistrées dans le cas du traitement MAP sont le résultat de la nature de l'engrais : un produit acidifiant (pH=4,5) générant un apport dans le sol d'ions acides H^+, et NH_4^+. **MOUGHLI** (**2000**) suggère qu'à long terme le MAP exerce un effet fortement acide sur les sols. Le Fosfactyl dans sa dissolution induit un enrichissement de la solution du sol en ions SO_4^{--} ces derniers peuvent réagir par la suite avec les cations H^+ en formant des acides qui vont acidifier sol.

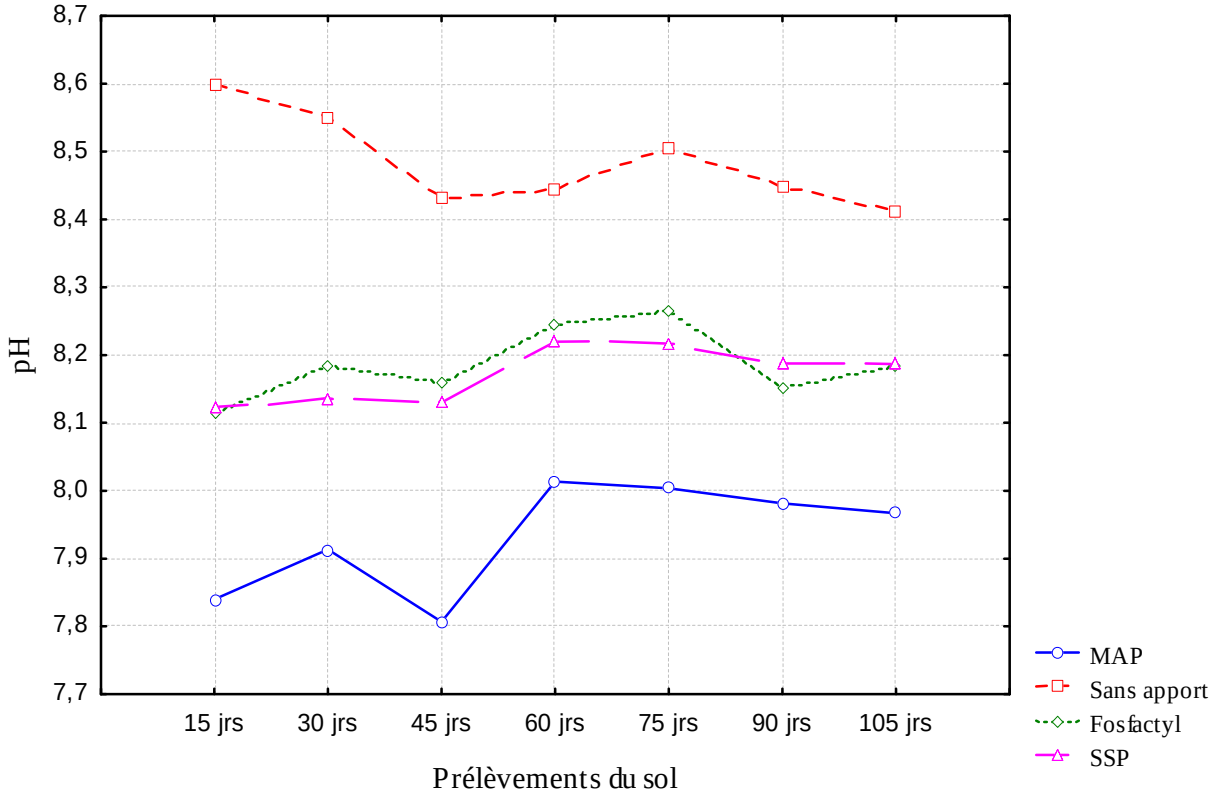


Figure 29. Évolution de pH des différents traitements durant l'incubation

II.3. Évolution de la salinité du sol

La salinité globale du sol, représentée par la conductivité électrique, définie la quantité totale en sels solubles ; elle dépend de la teneur et de la nature des sels solubles présents dans ce sol**.**

Les résultats obtenus lors de l'incubation au niveau des différents traitements sont mentionnés au et illustrés le tableau 28 et la figure 30.

Tableau 28. Évolution de la conductivité électrique des différents traitements durant l'incubation

Traitements	Durée d'incubation (jrs)							Moy gle	C.V (%)	Signification Statistique
	15 jrs	*30 jrs*	*45 jrs*	*60 jrs*	*75 jrs*	*90 jrs*	*105 jrs*			
Témoin	0.144	0.15	0.147	0.145	0.108	0.121	0.125	0.134	**8,29**	Effet Durée : **T.H.S** Effet Engrais : **N.S** Effet D*Engrais: **N.S**
MAP	0.164	0.167	0.188	0.129	0.102	0.108	0.11	0.138		
Fosfactyl	0.172	0.161	0.164	0.156	0.117	0.117	0.121	0.144		
SSP	0.168	0.147	0.155	0.147	0.123	0.136	0.139	0.145		
Moyennes	0.162	0.156	0.164	0.144	0.113	0.121	0.124	**0.140**		

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif pour la durée d'incubation (C.V. = 8,29%), et un effet non significatif entre les différents traitements et les différents interactions.

Par rapport à la valeur initiale de la salinité du sol (0,114 dS/m), l'apport des engrais a provoqué une légère augmentation des valeurs de la conductivité électrique du sol donc un enrichissement de la solution du sol en sels solubles. Ce phénomène peut être expliqué par l'effet salinisant de l'engrais apporté sur la concentration en sels de la solution de sol. Cet effet est contrôlé par l'indice partiel de salinité qui correspond à une salinisation générée par l'apport de 1kg de l'élément nutritif sous forme de l'engrais considéré (**MOUGHLI**, **2000**). Il y a probablement d'autres facteurs impliqués dans cette élévation de la salinité dont la libération des bases échangeable par le complexe adsorbant vers la solution du sol concernant essentiellement les cations les plus hydratés Na^+ et K^+.

Concernant l'évolution de la salinité du sol, les résultats attestent d'une tendance à la diminution dans tous les traitements en fonction du temps (Fig. 30). L'élévation des valeurs de la conductivité électrique en fin d'incubation pourrait être attribuée à une plus importante dissolution des sels solubles dans le sol devant une température ambiante parie à l'augmentation (voir Tab.4 p25).

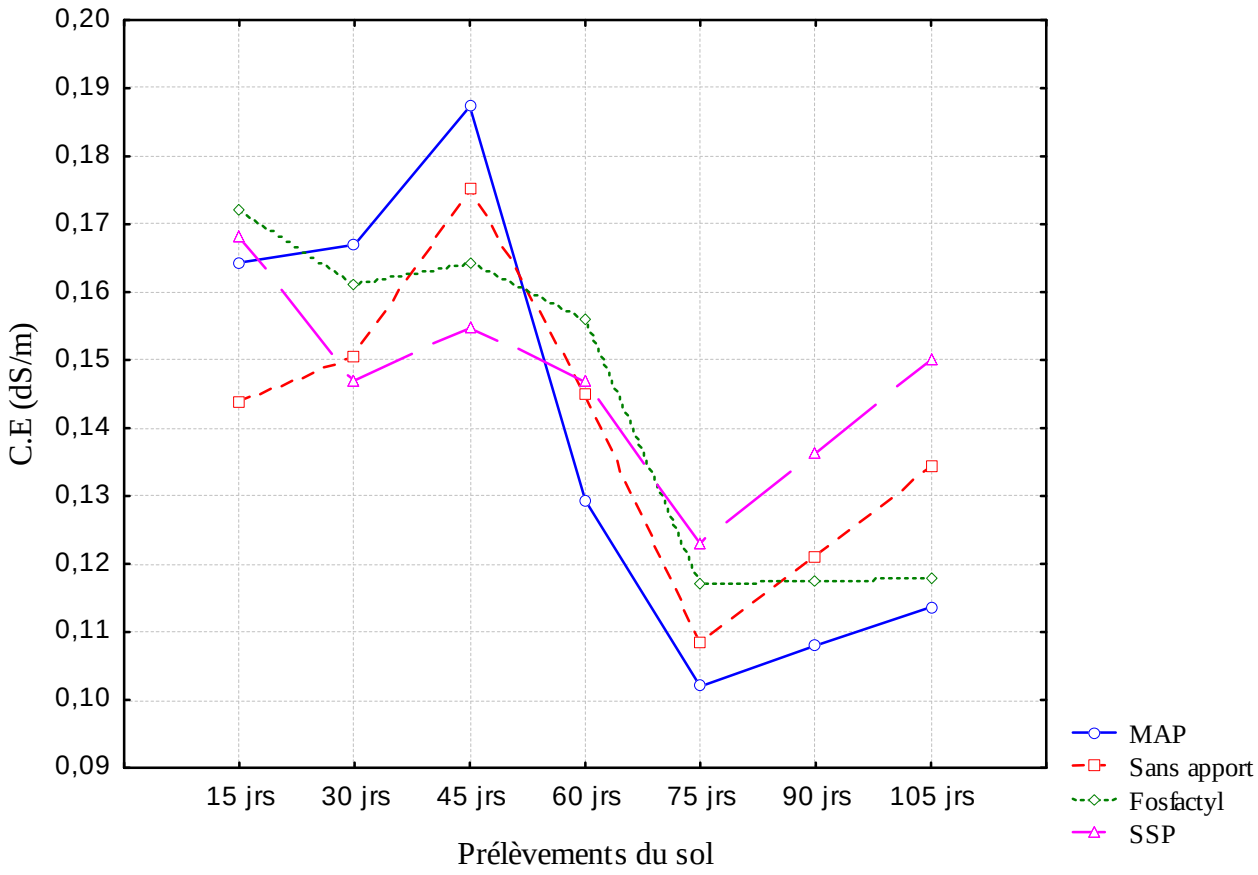


Figure 30. Évolution de la conductivité électrique (dS/m) des différents traitements durant l'incubation

II.4. Évolution des teneurs en bases échangeable du sol

Les réactions d'échange cationique entre la solution du sol et le complexe adsorbant se réfèrent à deux importants paramètres chimiques de sols, à savoir la capacité d'échange cationique (CEC) et les cations échangeables. Ce sont des indicateurs de qualité et de fertilité des sols.

II.4.1. Calcium échangeable

Les résultats de l'évolution du calcium échangeable des différents traitements sont présentés dans le tableau 29. Pour l'analyse de la variance de ce paramètre il est porté dans l'annexe II.

Tableau 29. Évolution du calcium échangeable ($Cmol^+/kg$) des différents traitements durant l'incubation

Traitements	Durée d'incubation (jrs)							Moy gle	C.V (%)	Signification Statistique
	15 jrs	*30 jrs*	*45 jrs*	*60 jrs*	*75 jrs*	*90 jrs*	*105 jrs*			
Témoin	1.695	1.73	1.726	1.391	1.077	1.075	1.152	1.407	**11,67**	Effet Durée : **T.H.S** Effet Engrais : **T.H.S** Effet D*Engrais: **T.H.S**
MAP	1.49	1.417	1.380	1.348	1.075	1.415	1.409	1.391		
Fosfactyl	0.748	0.782	0.717	0.692	0.702	0.679	0.669	0.713		
SSP	1.114	1.035	1.045	0.778	1.037	1.04	1.038	1.031		
Moyennes	1.262	1.241	1.217	1.085	1.023	1.052	1.067	**1.135**		

D'après l'analyse statistique, la fertilisation phosphatée adoptée a influé d'une façon très hautement significative sur l'évolution de cet élément dans le sol (C.V. =11,67%).La comparaison des moyennes a révélé trois groupes homogènes A, B et C (Annexe II).

Les traitements étudiés présentent de faibles quantités du calcium échangeable ; ceci peut être relié à une modification du pH suite à la dissolution des engrais phosphatés. **PERNES-DEBUYSER** et **TESSIER** (**2002**) suggèrent que la diminution du pH d'un sol met en jeu différents processus et phénomènes d'ordre physico-chimique comme la désaturation en cations alcalins et alcalino-terreux et l'aluminisation.

Les résultats attestent par ailleurs et dans tous les traitements d'une tendance à la diminution du calcium échangeable (figure 31) ; ceci suggère un gradient de précipitation de cet élément sous des formes inéchangeables.

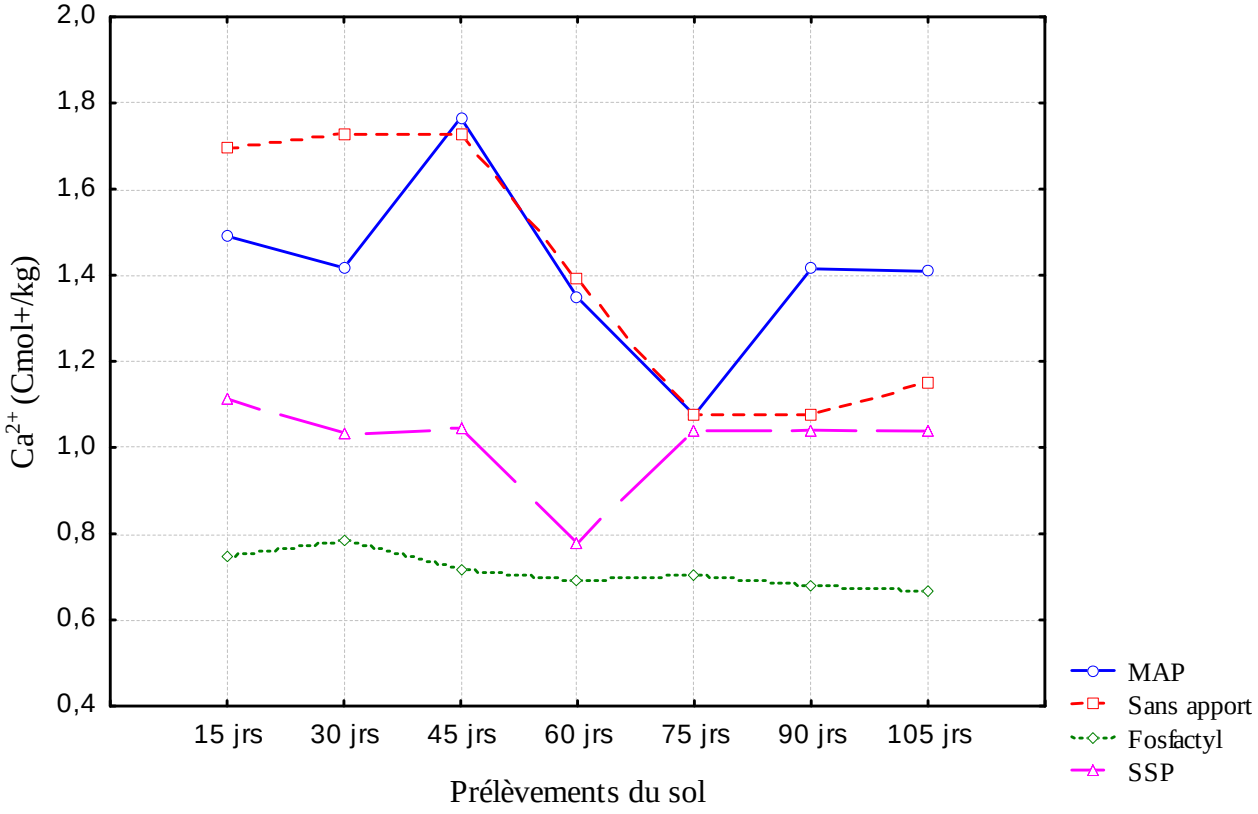


Figure 31. Évolution du Ca^{2+} échangeable des différents traitements durant l'incubation

II.4.2. Magnésium échangeable

Les résultats de l'évolution du magnésium échangeable des différents traitements durant l'incubation sont présentés dans le tableau 30.

Tableau 30. Évolution du magnésium échangeable ($Cmol^{+}$/kg) des différents traitements durant l'incubation

Traitements	Durée d'incubation (jrs)							Moy gle	C.V (%)	Signification Statistique
	15 jrs	*30 jrs*	*45 jrs*	*60 jrs*	*75 jrs*	*90 jrs*	*105 jrs*			
Témoin	0.485	0.493	0.492	0.49	0.478	0.478	0.483	0.486	**4,51**	Effet Durée : **N.S** Effet Engrais : **T.H.S** Effet D*Engrais: **N.S**
MAP	0.486	0.493	0.485	0.486	0.485	0.486	0.529	0.493		
Fosfactyl	0.479	0.477	0.469	0.485	0.477	0.47	0.426	0.469		
SSP	0.476	0.48	0.467	0.479	0.473	0.491	0.47	0.477		
Moyennes	0.482	0.486	0.478	0.485	0.476	0.481	0.477	**0.479**		

1

L'analyse de la variance a révélé un effet très hautement significatif entre les traitements (C.V. =4,51%), par contre l'effet de la durée d'incubation et les interactions sont non significatifs.Le test de Newman-Keuls a permis d'obtenir trois groupes homogènes A, B et C qui se chevauchent (Annexe II).

L'évolution de cet élément dans le temps est à la stabilité (fig. 32) sachant sa forte rétention par le complexe absorbant.

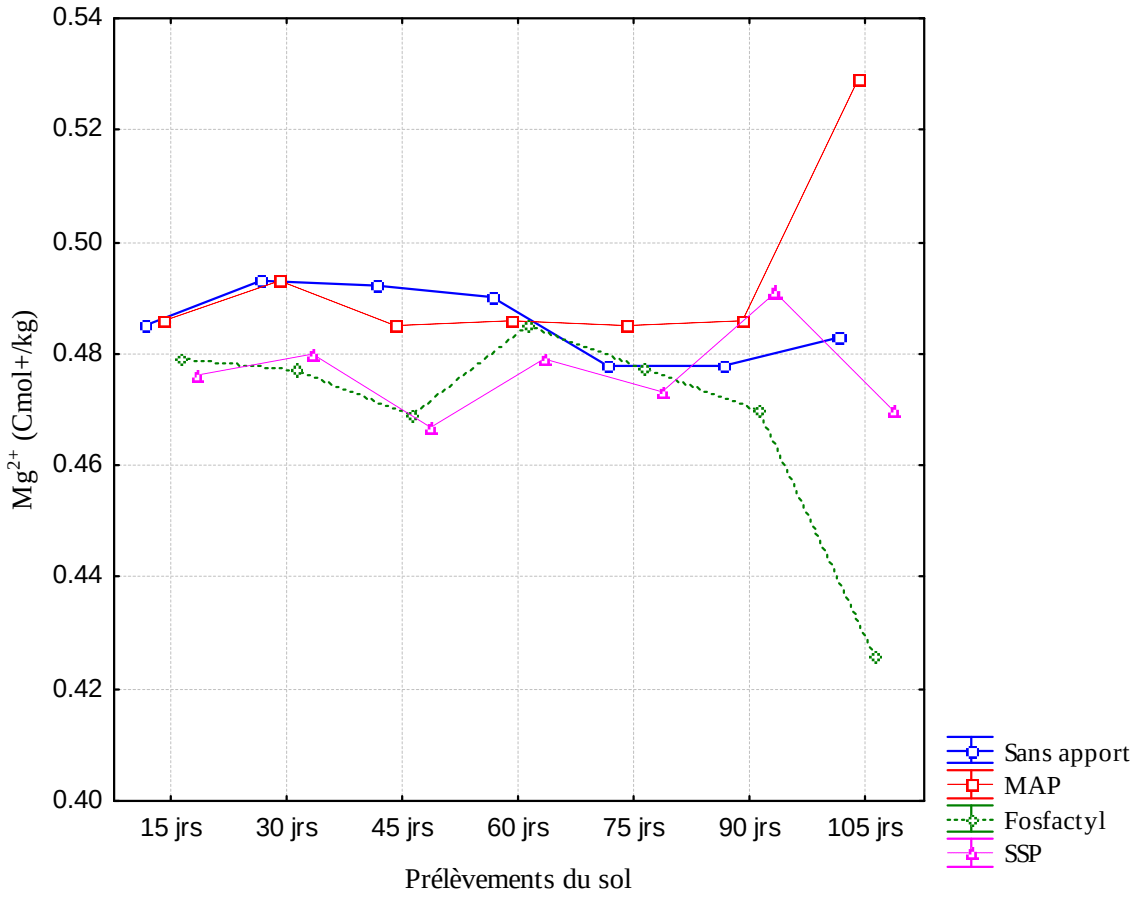


Figure 32. Évolution du Mg^{2+} échangeable des différents traitements durant l'incubation

II.4.3. Potassium échangeable

La teneur des sols en potassium diffère selon la composition minéralogique de la roche mère et l'intensité des pertes par exportation, lessivage et érosion **(HALILAT et al, 2004).**D'après **BUCKMAN et al (1990)**, la majeure partie du potassium présent dans le sol est incluse dans les composés minéraux insolubles d'où son inaccessibilité aux plantes. Une fumure régulière assure une bonne alimentation des cultures.

Les résultats de l'évolution du potassium échangeable des différents traitements durant l'incubation sont présentés dans le tableau31.

Tableau 31. Évolution du potassium échangeable ($Cmol^+/kg$) des différents traitements durant l'incubation

Traitements	Durée d'incubation (jrs)							Moy gle	C.V (%)	Signification Statistique
	15 Jrs	*30 jrs*	*45 jrs*	*60 jrs*	*75 jrs*	*90 jrs*	*105 jrs*			
Témoin	0.116	0.116	0.114	0.107	0.091	0.095	0.091	0.104	**6,42**	Effet Durée : **T.H.S** Effet Engrais : **T.H.S** Effet D*Engrais: **T.H.S**
MAP	0.133	0.129	0.114	0.092	0.089	0.095	0.091	0.108		
Fosfactyl	0.07	0.072	0.066	0.069	0.067	0.066	0.053	0.066		
SSP	0.109	0.109	0.086	0.074	0.067	0.068	0.053	0.081		
Moyennes	0.107	0.107	0.095	0.086	0.079	0.081	0.072	**0.089**		

L'analyse de la variance montre que le phosphore apporté a influé d'une façon très hautement significative les teneurs du potassium échangeable du sol (C.V. = 6,42%). La comparaison des moyennes a fait ressortir quatre groupes homogènes (A, B, C et D) formés respectivement par le Fosfactyl, le SSP, le Témoin et le MAP (Annexe II).

Dans tous les traitements, les quantités du potassium échangeable diminuent au fur et à mesure avec le temps. En effet les cations ne sont pas tous retenus avec une force égale par le sol. En général, les cations ayant une charge positive croissante et de plus petits rayons moléculaires sont retenus avec une plus grande force d'attraction. Étant monovalent, le potassium est plus hydraté ; un apport d'engrais au sol provoque un déséquilibre ionique dans le sol. Pour atteindre son équilibre, le potassium est déplacé du complexe adsorbant vers la solution du sol ce qui pourrait expliquer justifie la diminution des quantités du potassium échangeables en fonction du temps(fig. 33).

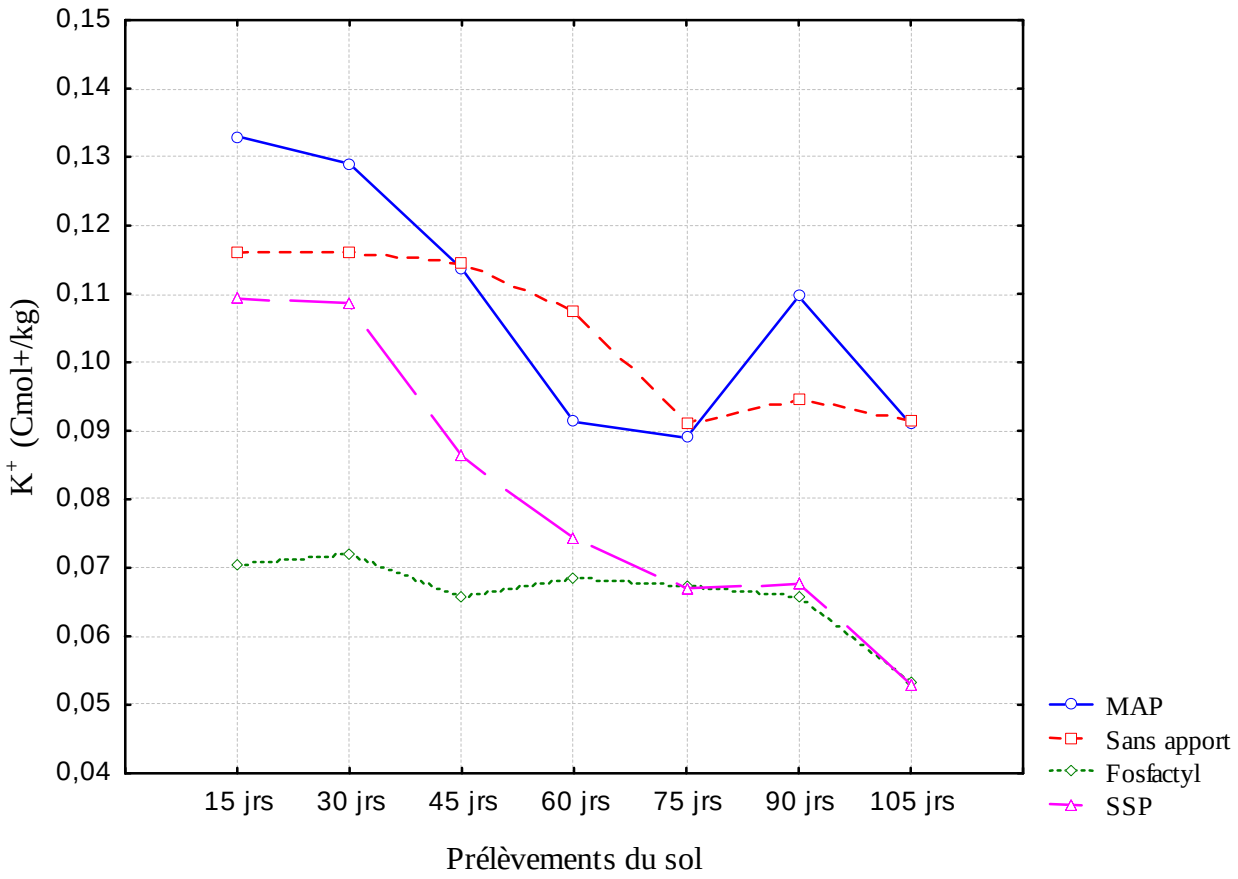


Figure 33. Évolution du K^+ échangeable des différents traitements durant l'incubation

II.4.4. Sodium échangeable

Les résultats de l'évolution du sodium échangeable des différents traitements durant l'incubation sont présentés dans le tableau 32.

Tableau 32. Évolution du sodium échangeable ($Cmol^+/kg$) des différents traitements durant l'incubation

Traitements	Durée d'incubation (jrs)							Moy gle	C.V (%)	Signification Statistique
	15 Jrs	*30 jrs*	*45 jrs*	*60 jrs*	*75 jrs*	*90 jrs*	*105 jrs*			
Témoin	0.024	0.027	0.025	0.024	0.027	0.027	0.024	0.025	**4,15**	Effet Durée : **T.H.S** Effet Engrais : **T.H.S** Effet D*Engrais: **T.H.S**
MAP	0.03	0.027	0.029	0.029	0.027	0.027	0.029	0.028		
Fosfactyl	0.022	0.022	0.018	0.017	0.013	0.015	0.011	0.017		
SSP	0.022	0.024	0.02	0.019	0.02	0.02	0.018	0.023		
Moyennes	0.025	0.025	0.023	0.022	0.022	0.022	0.021	**0.023**		

L'analyse de la variance à révélé un effet très hautement significatif de la fertilisation phosphatée sur l'évolution des quantités du sodium échangeable du sol (C.V. = 4,15%).Pour cet élément, le test de Newman-Keuls a fait ressortir quatre groupes homogènes (A, B, C et D) formés respectivement par les traitements Fosfactyl, SSP, Témoin et MAP.

Une diminution des quantités du sodium échangeables en fonction du temps marquée surtout dans les traitements avec le Fosfactyl et le SSP (fig. 34). Ces derniers ont toujours présentés les plus faibles quantités en bases échangeable par rapport aux autres. Ceci est dû éventuellement par une perte des cations échangeables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+) provoqué par l'acidification du sol et leur remplacement progressif par les ions H^+. Le Fosfactyl contient les sulfates (18%), donc après solubilisation de ce dernier il y a un enrichissement de la solution du sol en ions SO_4^-, ces derniers peuvent réagir au début avec les H^+ pour former des acides forts, puis avec les cations libérés par le complexe adsorbant pour former des sels : $CaSO_4$, K_2SO_4, $MgSO_4$…etc.

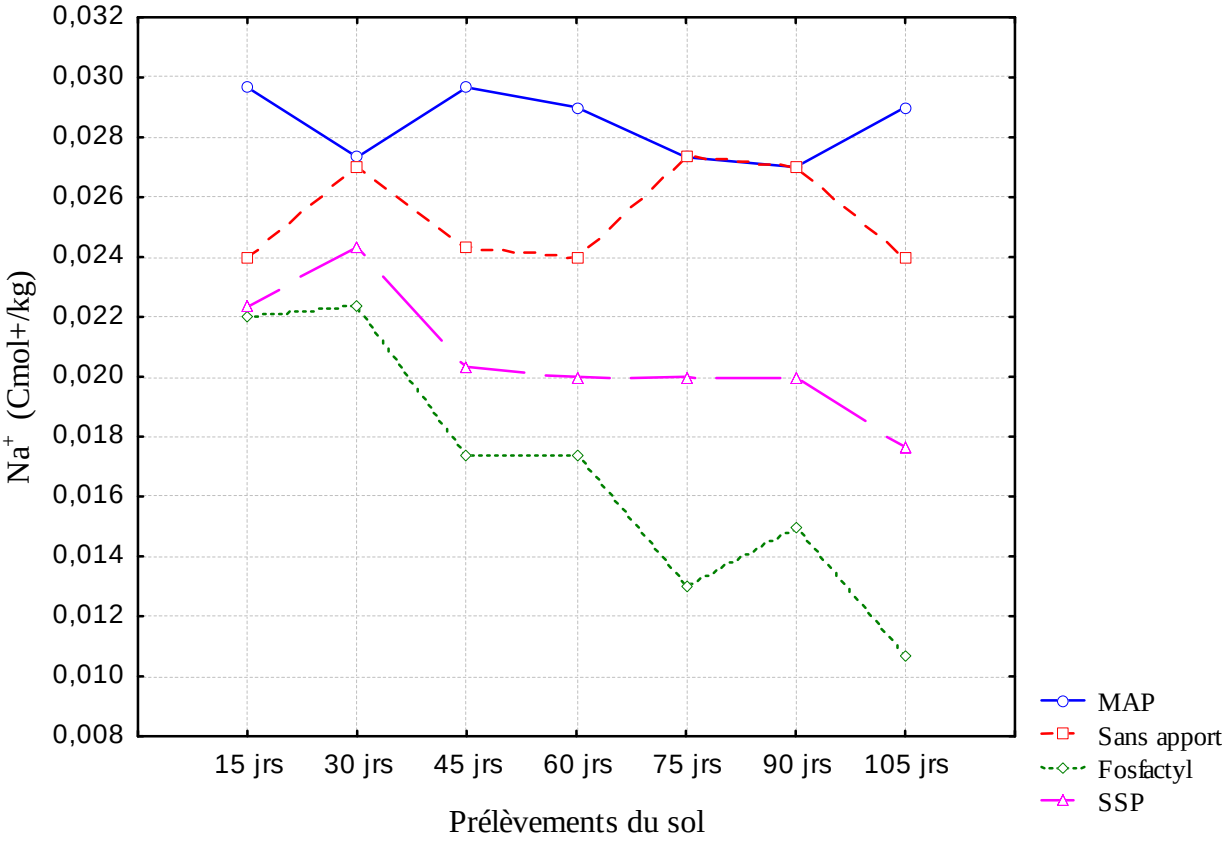


Figure 34. Évolution du Na^+ échangeable des différents traitements durant l'incubation

Conclusion générale

En zones sahariennes, les sols sableux représentent carrément un support pauvre en éléments nutritifs dont la plante a besoin ; les conditions pédoclimatiques dans ces zones constituent le problème majeur pour le développement des plantes notamment les céréales. Pour atténuer ce problème le recours à la fertilisation minérale reste jusqu'à nos jours le moyen le plus efficace pour l'obtention de rendements acceptables.

De ce fait, il devient nécessaire de raisonner convenablement les apports d'engrais minéraux. Actuellement les recherches s'orientent vers la matérialisation d'une fertilisation minérale raisonnée dans des conditions économiquement rentables et respectueuses de l'environnement. Ces approches doivent de plus s'inscrire dans le cadre d'une agriculture durable ; contexte dans lequel s'inscrit le principal objectif de notre recherche.

A travers de ce travail, nous avons essayé d'étudier l'effet comparé de trois types d'engrais phosphatés appliqués à trois doses sur le comportement, la productivité ainsi que sur la nutrition minérale du blé dur. D'autre part et en conditions semi contrôlées sur un sol nu, nous avons essayé de ressortir une appréciation sur le comportement et le devenir des trois engrais phosphatés dans le sol et d'apprécier de ce fait aussi la contribution des fertilisants phosphatés dans le devenir de certains paramètres chimiques du sol.

L'appréciation de l'efficacité des différents types d'engrais phosphatés a été réalisée sur les principales composantes du rendement au cours du cycle du blé, il en ressort :

- Le nombre d'épis au m² est influencé de façon hautement significative avec l'interaction (types avec doses du phosphore) avec une moyenne générale de 376 épis au m², le traitement Fosfactyl (60 unités P_2O_5/ha) a matérialisé le meilleur résultat avec 460 épis au m².

- Le nombre de grains par épi varié d'une façon significative sous l'action du type d'engrais utilisé. Avec une moyenne générale de 29 grains par épi, le nombre des grains par épi varie de 28 pour les deux types Fosfactyl et SSP à 31 pour le MAP.

- Le PMG est statistiquement influencé par les analyses statistiques le type d'engrais phosphaté. Généralement le poids passe de 48,42 grammes obtenu avec le MAP à 52,82 grammes obtenu avec le SSP.

- Le rendement grains est influencé favorablement avec les interactions (type avec doses phosphore). Le rendement maximal est de 69,19 q/ha obtenu avec les traitements du Fosfactyl (60 unités P_2O_5/ha), cependant le plus faible rendement est de 42,22 q/ha obtenu avec le même engrais (30 unités P_2O_5/ha).

- La production de paille du blé est influencée positivement avec l'interaction (type avec doses phosphore). Le meilleur rendement en paille est de 80,18 q/ha obtenu avec les traitements Fosfactyl (60 unités P_2O_5/ha), par contre le rendement le plus faible est de 52,37 q/ha avec les traitements MAP (30 unités P_2O_5/ha).

En ce qui concerne l'effet de la fertilisation phosphatée sur l'alimentation minérale du blé, l'étude a permis de ressortir les conclusions suivantes :

- Concernant la nutrition azotée, les doses du phosphore n'exercent aucun effet significatif sur la teneur en azote des pailles et des grains. Cependant pour les exportations d'azote on a enregistré un effet hautement significatif dans le cas des interactions (type et doses phosphore) avec une exportation moyenne de l'essai de l'ordre de 138,4 kg N/ha.D'une façon générale et pour la production d'un quintal de grains, la quantité d'azote nécessaire varie entre 2,26 kg N/ha obtenue avec le SSP à 2,78 enregistrée avec MAP.

- Pour la nutrition phosphatée du blé, les doses du phosphore ainsi que les interactions (type avec doses phosphore) ont révélés des influences très hautement significatives sur la teneur en phosphore des grains, les meilleures teneurs en P_2O_5 dans les grains sont enregistrées au niveau de la dose D30 (0,825 %MS) et la combinaison SSP*D30 avec 1,06 %MS.Pour les prélèvements du phosphore par la culture, les interactions ont exercé un effet très hautement significatif sur les quantités du phosphore exportées. Par ailleurs, les exportations de phosphore les plus élevées ont été enregistrées avec les interactions suivantes : MAP*D90, Fosfactyl*D90 et SSP*D30 avec respectivement 50,91 kg/ha, 45,18 kg/ha et 82,71 kg/ha.Les doses du phosphore ainsi que les interactions ont influencé favorablement les quantités de phosphore exportées ; pour produire un quintal de grains, il a fallut 0,67 kg/ha (D60) à 0,98 kg (D30). L'interaction SSP*D30 a enregistré la quantité la plus élevée avec 1,22 kg/ha par contre MAP*D30 a marqué la plus faible quantité avec 0,56 kg/ha.

- Concernant l'alimentation potassique du blé, la culture a réagi favorablement aux apports de phosphore dont les teneurs en potassium de la plante (pailles et grains) ont significativement augmenté suivant les doses croissantes du phosphore. La teneur en potassium des grains montre que l'apport des engrais phosphatés, les doses utilisées, ainsi que leurs interactions exercent un effet très

favorable et par conséquent la teneur en potassium des grains passe de 0,72 %MS obtenue par le MAP à 0,82 obtenue par le Fosfactyl. Pour les doses d'engrais, la D60 a donné les teneurs les plus élevées avec 0,82 %MS. L'interaction Fosfactyl*D60 a donné la teneur la plus élevée avec 0,91 %MS.Les exportations du potassium par la culture au stade récolte sont influencées significativement par cette fertilisation phosphatée ; les exportations varient entre 125,06 kg/ha et 153,66 kg/ha respectivement pour les deux niveaux de dose 30 et 60 unités P_2O_5/ha. L'interaction Fosfactyl*D60 a favorisé l'obtention des meilleures exportations avec 170,9 kg/ha, par contre les plus faibles exportations sont obtenues par la combinaison MAP*D30 (108,3kg/ha). Pour la production d'un quintal de grains, la quantité de potasse utilisée par la culture a varié de 2,31 kg K_2O/ha (MAP)à 2,59 obtenue par le Fosfactyl. D'une façon générale les rendements obtenus sont proportionnels aux quantités des éléments exportées. Ils sont très fortement liés aux exportations de la potasse par la culture, et augmentent suivant les quantités de K_2O exportés.

Le comportement de la variété utilisée en relation avec l'alimentation phosphorique ne pourrait être suffisamment expliqué que par une multiplication de ce type d'essai dans le temps, des essais pluriannuels ou de longue durée sont à recommander en élargissant la gamme des doses apportées. Cette démarche est un outil privilégié qui permet d'aller bien au-delà de la simple relation apport et rendement.

Le suivi en conditions semi contrôlées des engrais phosphatés testés nous a permet de tirer les conclusions suivantes :

- Pour la dynamique du phosphore dans le sol en conditions semi contrôlées et sur un sol nu, tous les traitements étudiés présentent une teneur supérieur à celle du Témoin. L'appréciation de l'efficacité des différents engrais phosphatés testés dans l'enrichissement du sol en matière de phosphore assimilable à été réalisée à travers les analyses périodiques du sol, il en ressort :

§ Des différences très hautement significatives entre les différents traitements, pour les deux facteurs :durées d'incubation et engrais phosphatés testés.

§ L'apport d'engrais a provoqué un accroissement des quantités du phosphore assimilable dans le sol. Les taux d'accroissement par rapport au Témoin (sans apport d'engrais) sont d'environ 22, 13 et 11% respectivement pour les traitements SSP, MAP et Fosfactyl.

§ Quelque soit le traitement, la cinétique matérialise une diminution de la quantité de phosphore assimilable en fonction du temps. Cette diminution est probablement due à l'immobilisation du phosphore en réaction avec les ions Ca^{2+} devant une irrigation non drainante provoquant le transfert du phosphore vers des formes non assimilables.

- L'évolution de l'acidité du sol pendant les 105 jours de l'essai est hautement significative ; l'apport d'engrais a provoqué une baisse des valeurs du pH dans tous les traitements. Les valeurs du pH du témoin témoignent du degré d'acidification des engrais phosphatés utilisés ce qui constitue un avantage dans nos conditions sahariennes.

- La conductivité électrique est influencée par l'apport des engrais phosphatés par une légère augmentation dans le temps ; une évolution contraire à celle du pH.

- L'apport d'engrais a influencé d'une façon très hautement significative les quantités des bases échangeables du sol (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} et Na^{+}) ; la cinétique d'évolution de ces cations montre une tendance à la baisse ce qui démontre l'évolution d'une partie vers des formes non assimilables. Enfin, les résultats obtenus tant sur le terrain qu'en conditions semi contrôlées constituent dans l'ensemble un acquis en relation avec la fertilisation phosphatée des céréales dans les conditions édapho-climatiques sahariennes ; d'autres travaux plus orientés pourraient assoir davantage une politique de fertilisation minérale garante d'une grande rentabilité économique mais aussi une meilleure préservation des ressources naturelles.

R éférences bibliographiques

1- AFIF E., MATAR A., TORRENT J., 1993. Availability of phosphate applied to calcareous soils of west Asia and North Africa. Soil .Sci. Soc. Am. J. 57, 756–760.

2- AISSA A.D., MHIRI A., 2001. Fertilisation phospho-potassique du blé dur en culture intensive en Tunisie. 5p.

3- AKINRAMI. CHO., 1991. Phosphate and accompanying cation transport in a calcareous cation exchange resin system. Siol.sci.soc.Am.j. (55) °4: 959-963.

4- AMRANI. M., 1997. Improvement of soil test P calibration and fertilization P management in crop rotations in Moroccan dry land agriculture. Ph. D. Colorado State University. 181 pages.

5- AUBERT G., 1978. Méthodes d'analyse des sols. 2ème Edition. Centre national de documentation pédagogique, Marseille, 198p.

6- BADRAOUI M., SOUDI B., MONJAHID Y., BENNANI F., MIKOU M., BOUHLASSA S., 1995. Mineralogicalconsideration in soilsfertility management in Marroco, Homes , terre et eaux, Marroco. (25) 100:80-88.

7- BAEYENS J., 1967. Nutrition des plantes de culture ou physiologie appliquée aux plantes agricoles. Ed. Naiwelaerts Louvain ; 278 pages.

8- BAHMANI M., 1987. Les réserves et les ressources en eau souterraines dans les zones arides, cas d'El-Goléa.

9-BAIZE D., 1988**.** Guide des analyses courantes en pédologie. Ed. INRA, Paris., 171 P.

10- BAIZE D., 2000. Guide des analyses en pédologie, 2e éd., INRA, Paris.280p.

11- BARKER A.V., PILBEAM D. J., 2007. Handbook of plant nutrition. Books in soils, plants, and the environment; v. 117. 662p.

12- BATTEN D., 1992. A review of phosphorus efficiency in wheat. Plant and soil. 146: 163-168.

13- BEAUDIN I., 2008. Revue de littérature. La mobilité du phosphore Version finale. Ed CRAAQ, 137p.

14- BELAID D., 1986. Aspect de la céréaliculture algérienne. Ed. Office desPublications Univer sitaires, Alger, 207p.

15- BELAID D., 1987. Étude de la fertilisation azotée et phosphatée d'une variété de blé dur (Hedba3) en condition de déficit hydrique. Mémoire de magister. E.N.S.A. 108p.

16- BENNAI M., BENABBAS B., 2007. L'amélioration des rendements des céréales par une fertilisation adaptée aux conditions pédoclimatiques algériennes. Constantine. Ed, PROFERT, 33p.

17- BENNOAH E.O., ACQUAYE D.K., 1989. Phosphate sorption characteristics of selected major Ghanaian soils. Soil Sci., 148:114-123.

18- BOSC M., 1976. Dynamique de l'alimentation phospho-potassique de la plante dans le sol. Section 6n°08. pp : 1-6.

19- BOUYOUCOS S.D., MELEHER R.G., 1983. Collection and ion chromoatography determination of ammonia and methylamines in air. American IndustialHygiene Association. Journal, 44, 2, pp. 119-122.

20- BOUZERZOUR H., DJEKOUN A et BENMHAMMED A., 1996. Analyse du déterminisme génétique de la biomasse et de l'indice de récolte dans un croisement diallèle en orge. Annales agronomiques de l'I.N.A, Vol.17, N°2 : 150-158.

21- BRADY N.C., WEIL R.R., 2002. The nature and properties of soils. 13th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education Inc.

22- BRAHIMI., 1991. Contribution à l'étude de l'utilisation des phosphates naturels dans la fertilisation phosphatée d'un sol saharien, à Biskra, Mémoire Ing. Agro. Ouargla 68p.

23- BROOKES P. C., POWLSON D. S., JEKINSON D. S., 1984. Phosphorus in soil microbial biomass. Soils boil. Biochem. 14: 319-329.

24- BUKMAN O.C., KARSTED O., LIEO.H., RICHARD I., 1990. Agriculture et fertilisation – les engrais et leur avenir. Edit. TaugenGrafiste Centre. Oslo. 258p.

25- CHELOUFI H., et BOUAMMAR B., 2010. Diagnostic du programme de mise en valeur agricole APFA dans les régions sahariennes : cas de la région de Ouargla. Colloque national sur la mise en valeur en zones arides ; plus de vingt ans de mise en œuvre, pour quels résultats. Laghouat-Algérie, 09 et 10 mai.

26- CHING P.C., BARBER S.A., 1979. Evaluation of temperature effects on K uptake by corn, Agron. J., 71: 1040-1044.

27- CIESIELSKI H., STERCKEMAN T., 1997. A comparison between three methods for the determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils. agronomie , 17, 9-15.

28- COMIFER., 1995. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. Brochure COMIFER, 1993, réact.1995, 28 pages + annexes.

29- CONDRON L. M., GOH L. M., 1989. Effect of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zeland. Jor of soil science, 40: 383-385.

30- COTTIGNIES X., 1977. Potasse et agriculture .Société commerciale des potasses et de l'azote. Mulhouse, pp. 15-37.

31- COUVREUR F., 1981. La culture du blé se raisonne. Cultivar juin, pp 39-41.

32- DATAGO., UCEDA., ANDREA., KASSEM., DELCAMPILO., 2000. Changes in Olsen phosphorus in reclaim marsh soils on gypsum R.C.S. Spain. Dprt.

33- DELGADO A., MADRID A., KASSEM S., ANDREU L., CAMPILLO M.C., 2002. Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids. Plant Soil 245, 277–286.

34- DEMERS I., 2008. Formes et disponibilité du phosphore de composts utilisés comme amendements de sols agricoles, pour l'obtention du grade de maître des sciences (M. Se.), Laval (Québec), 92p.

35- DERAOUI N., 2004. Effet de la fertilisation phosphatée sur le comportement d'une variété de blé tendre (Triticumaestivum L. Var. Anza) conduite en conditions sahariennes. Mémoire de magistère I.T.A.S. Ouargla. 84 p.

36- DORÉ T., LE BAIL M., MARTIN P., NEY B., ROGERESTRADE J., 2006. L'agronomie a ujourd'hui. Ed. Quae. 367p.

37- DPAT Ghardaïa, 2007. Annuaire statistique (Agriculture), 16p.

38- DROUET TH., 2010. Pédologie, BING-F-302. Ed. Lagev, 140p.

39- DUBUS l., 1997. La rétention du phosphore dans les sols: principes d'étude, modélisation, mécanismes et compartiments du sol impliqués. Ed. ORSTOM Nouméa, Doc. Sci de la terre- agropédologie III3. 78p.

40- DUTIL P., 1973. Élément d'écologie .Ed. J.B. TII.Paris. p155-452.

41- EVERS G.W., 2002. Ryegrass–Bermuda grass Production and Nutrient Uptake when Combining Nitrogen Fertilizer with Broiler Litter.Agron. J. 94:905–910 905-910.

42- FAO., 2003. Les engrais et leurs applications, Précis à l'usage des agents de vulgarisation agricole., Quatrième édition, Éditions F.A.O.,I.F.A. (Paris, France) et IMPHOS (Casablanca, Maroc)., 84 P.

43- FARDEAU J. C., 1991. Contribution à l'étude d'utilisation des phosphates naturels dans la fertilisation phosphatée d'un sol saharien, P11.

44- FARDEAU J. C., 1993. Le devenir du phosphore dans le sol et dans les systèmes sol plante. Perspectives agricoles n° :181-juin, pp : 17-22.

45- FOX R. L., KAMPRATH E. J., 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluatingthe phosphaterequirements of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 34:902-907.

46- FROSSARD E., JULIEN P., NEYROUD J. A., 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.

47- GACHON L., TRIBOI E., 1979. Fiabilité et limites du diagnostic de la fertilité phosphatée des sols établi à partir du phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur. C.R Acad. Ag,.ic.Fr. 13: 981-988.

48- GACHON L., TRIBOI F., 1988. Etude des méthodes d'appréciation de l'offre phosphatés du sol – le phosphore et le potassium dans les relations sol-plante. INRA.:181-191.

49- GACHON L., 1969. La fertilisation phosphatée. Panorama des recherches récentes effectuées en France. Phosphore Agri., 53. 17 -26.

50- GACHON L., 1988. Le phosphore et le potassium dans les relations sol-plant en conséquence sur la fertilisation. Inst. nat. rech. agr., Paris.

51- GAGNARD J., HUGUET C., RYSER J.P., 1988. L'analyse du sol et du végétal dans la con duite de la fertilisation. Ed. ACTA, 82p.

52- GAGNON E., BEAULIEU R., 2002. Utilisation du phosphore dans les engrais de démarrage. Min. env. S.A.A.A.C.Quebec.26p.

53- GATE P., VIGNIER L., VADON B., MINOV D., LAFARGA A., et ZAIRI M., 1996. Céréales en milieu méditerranéen un modèle pour limiter les risques climatiques. Perspectives agricoles. N°27 : 59-66.

54- GERVY R., 1970. Les phosphates et l'agriculture. Ed. Dunod. Paris 298p.

55- GHAZANSHAHI D., JAOUICH A., 2001. Effet du pH sur la solubilité du phosphore dans les sols calcaires du nord de Varamine (Iran). Agrosol. 12 (1) : 21-24.

56- GIROUX M. D. BERNIER., ÉMOND C., 1996. Utilisation agronomique et environnementale judicieuse des engrais phosphatés selon les caractéristiques des sols et des engrais, Dans Colloque sur la fertilisation intégrée des sols, CPVQ inc., p. 49-64.

57- GIROUX M. et TRAN T.S., 1994. Étude des facteurs affectant l'évolution des teneurs en P et K des sols agricoles. Agrosol 7 (2) : 23-30.

58- GIROUX M., CARRIER D., BEAUDET P., 1996. Problématique et méthode de gestion des charges de phosphore appliquées aux sols agricoles en provenance des engrais de ferme. Agrosol 9, no. 1: 36-45.

59- GIROUX M., Royer R., 2007. Effets à long terme des applications de phosphore sur les rendements, l'évolution des teneurs, de la saturation et de la solubilité du P dans deux sols très riches. Agrosolutions 18 (1) : 17-24.

60- GRIGNAC P., 1981 : Rendement et composantes de rendement du blé d'hiver dans l'environnement méditerranéen .séminaire scientifique .Paris .Pp 185 – 194.

61- HAFIDI M., BADRI W., KAEMMERER M., REVE J.C., 1994. Comparaison des méthodes d'extraction chimique et biologique pour la détermination du phosphore assimilable. Actes Inst. Agron. Veto (Maroc) 1994, Vol. 14 (3) : 43 – 48.

62- HAFSI M., 1990. Influence de la fertilisation phospho-azotée sur la variété de blé dur (*Triticumdurum*) «Mohamed Benbachir » cultivée dans les conditions des hautes plaines sétifiennes. E.N.S.A. 124p.

63- HALAJNIA A., HAGHNIA G.H., FOTOVAT A., KHORASANI R., 2009. Phosphorus fractions in calcareous soils amended with P fertilizer and cattle manure. Geoderma 150 209–213.

64- 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.

65- HALITIM A., 1985. Contribution à l'étude des régions arides d'Algérie.thèse. doc. ENSA.Renne.

66- HAMEL C., LAMBERT J., TREMBLAY N., 1994. Nutrition minérale des plantes, pp 271 à 290 in Agronomie moderne.

67- HAMMOND J.P., WHITE P.J., 2008. Diagnosing phosphorus deficiency in crop plants. In White P.J. et Hammond J.P. (Eds), The ecophysiology of plant-phosphorus interactions. Ed. Springer, pp : 225-246.

68- HANNAPEL R.J., FULLER W.H., BASMA S., Bullock J.S., 1964. Phosphorus movement in calcareous soil: 1. Predominance of organic forms of phosphorus in phosphorus movement. Soil Sci. 97:350-357.

69- HANWAY J.J., OLSON R.A., 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. In: Khasawneh, Sample, Kamprath, Eds.The Role of Phosphorus in Agriculture.

70- HARRISON A.F., 1987. Soil organic phosphorus: a review of world litterature. CAB International, Wallingford. 257p.

71- HEDLEY M. J., STEWART J. W. B., CHAUHAN B. S., 1982. Changes in inorganic and organic fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. American journal of soil science, 46: 970-976.

72- HINSINGER, 2001. Bioavailability of soil inorganic phosphorus in the rhizospheres as affected by root-induced chemical changes, review. I.N.R.A., U.M.R., plant and soil, 237: 173-175.

73- HOPKINS W. G., 2003. Physiologie végétale. Ed. de Boeck, Belgique, 514p.

74- HOUNTIN J. A., 1996. Capacité d'adsorption du phosphore et distribution des éléments C, N et P dans un sol agricole traité avec du lisier de porc pendant 14 ans. Thèse pour I 'obtention du grade de Philosophie Doctorat en sci de l'eau et de L'envir, NRS-EAU, Québec (CANADA), 166p.

75- JAILLARD B., HINSINGER P., 1993. Alimentation minérale des végétaux dans le sol. Techniques Agricoles. 1210.

76- JOHNSON A.E., 2000. Soil and plant phosphate. Edts International Fertilizer Industry Association. 46 p.

77- KIRK G. J.D., 1999. A model of phosphate solubilization by organic anion excretion from plant roots. European Journal of Soil. Science, 50, 369-378.

78- LAMBERT J.C., 1979. La fertilisation phosphatée. revue cultivars. N° 115, pp : 96-97.

79- LEGRET J., 1985. La production de blé dans le monde s'accélère, les producteurs agricoles français.

80- LINDSAY W.L., 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, NY. 449 pages.

81- LOGANATHAN P., ISIRIMAH N.O., NWACHUKU D.A., 1987. Phosphorus sorption by Ultisols and Inceptisols of the Niger delta in southern Nigeria. Soil Sci., 144:330-33.

82- LOPEZ-BUCIO J., NIETO-JACOBO M.F., RAMIREZ-RODRIGUEZ V., HERRARA-ESTRELLA L., 2000. Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. Plant Science 160: 1-13.

83- LOUÉ A., 1978. The interaction of potassium with other growth factors, particularly with other nutrients. Potass. res. rec.tre. 47-431.

84- LOUE A., 1982. Le potassium et les céréales. Dossier K_2O, SCPA n°22, pp1-40

85- LOUE A., 1984. Le potassium et les céréales. Revue de la potasse. 9(4).Pp 1-19.

86- MACKAY A.D., BARBER S.A., 1984. Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn, Soil Sci. Soc. Am. J., 48: 818-823.

87- MAIRE V., 2005. Evaluation expérimentale d'un modèle de prélèvement du phosphore par une culture de maïs irriguée sur un sol sableux landais. INRA Bordeaux, rapport de recherche, 50p.

88- MARSCHNER H., 1995. Mineral nutrition of higher plants. AcademicPress, London.

89- MARTIN-PÉRVEL P., GAGNARD J., GAUTIER P., 1984. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Ed. Tec & doc – Lavoisier, Paris (France), 700p.

90- MATHIEU C., PIELTAIN F., 2003. Analyse chimique du sol, Méthodes choisies. Ed. Tec & Doc (France), 385p.

91- MCKENZIE R. A., PRENT L. E., MACLEOOD J. A., 2003. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformation in Gleysolic soils. Can.j.soil.sci.soc.N°81: 395-403.

92- MEHDI S.M., ABID M., SARFRAZ M., HAFEEZ M., HAFEEZ F., 2007. Wheat response to applied phosphorus in Light Textured Soil in Journal of Biological Sciences 7 (8). Ed. Asian Network for Scientific Information, pp 153 à1538.

93- MEKLICHE A., 1983. Contribution à l'établissement de la fertilisation azotée du blé d'hiver dans le haut chélif. Mémoire de magister, I.N.A. Alger. 81p.

94- MESMOUDI A., 1999. Etude expérimentale sur l'efficacité du phosphate naturel de Djebel Onk, Actes du séminaire de Ouargla, CRSTRA Biskra.

95- MEYNARD J.M., 1987. L'analyse de l'élaboration de rendement sur les essais de fertilisation azotée in Perspectives agricoles, N° 115, pp 76 à 83.

96- MICHEL C. A., THIENS S. J., 2003. Phosphorus bioavailability following incorporation of grain manure crops. Soil.sci.soc.Am.j.V67: 1186-1194.

97- MICHEL T., 2005. Quelques notions de la fertilisation. Ed. Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec, 50p.

98- MILLER P., ULRICH D., ENTZ M., Mc-CONKEY., 2004. Les pois tolèrent la sécheresse. Centre de recherches sur l'agriculture des prairies semi-arides. Agriculture et agroalimentaire Canada, 6p.

99- MKHABELAA M. S., WARMAN P. R., 2005. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. Agr. Ecosys. Environ. 106: 57-67.

100- MOREL R., 1996. Les sols cultivés. Lavoisier, deuxième édition. 378 pages.

101- MOREL C., 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. Thèse d'habilitation INRA Bordeaux 80p.

102- MOUGHLI L., 2000. Les engrais minéraux : caractéristiques et utilisations. Ed. Institut Ag ronomique et Vétérinaire Hassan II, Maroc (Bulletin
mensuel d'information et de liaison du Programme National de Transfert de Technologie en Agriculture PNTTA, N° 72), 4p (Format PDF).

103- MOUJAHID Y., 2007. Physico-chimie, minéralogie et dynamique du phosphore et du potassium dans quelques sols marocains. Thèse de doctorat d'état, AGDAL, Rabat, (Maroc), 105p.

104- MULLEN L. C., 2003. Phosphorus Nutrition for Winter Crops. Agfact P1.4.5, second edition. District Agronomist, Dubbo NSW Agriculture. 16p.

105- OLSEN S.R., COLE C.V., WATANABE F.S., DEAN L.A., 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. Circ. 939.U.S. Dep. Agric., Washington, DC.

106- OWUSU-BENNOAHE.O., ACQUAYE D.K., 1989. Phosphorus sorption characteristics of selected major Ghanaian soils. Soil Sci., 148:114-123.

107- PARENT L. É., 2002. Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Colloque sur le phosphore - Ordre des agronomes du Québec, Drummondville.

108- PARENT L. É., KHIARI L., 2003. Nitrogen and phosphorus indicators of organic soil quality. Chap. 5 dans: PARENT L. É. and P. ILNICKI (Èditeurs). Organic soils and peat materials for sustainable agriculture. CRC Press, Boca Raton, FL.

109- PELLERIN A., PARENT L.É., FORTIN J., TREMBLAY C., KHIARI L., GIROUX M., 2006. Environmental Mehlich-3 soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. Can. J. Soil Sci. 86: 711-723.

110- PELLERIN F., PELLERIN S., VILETTE C., BOIFFIN j., 2000. Evolution du raisonnement de la fertilité phosphatée des grandes cultures .Etude par simulation de l'évolution des préconisations de fumure sur un échantillon test représentatif des sols et des successions de culture de Nord du Bassin Parisien. Etude et gestion des sols 7,53-71.

111- PEREDA CAMPOS M.V., 2008. Contribution à l'étude des transporteurs de phosphate de la famille PHT1 chez le Peuplier (Populustrichocarpa Torr. & Gray) et le champignon ectomycorhizien Laccariabicolor (Maire) P. D. Orton. Thèse de doctorat. Biologie Végétale et Forestière. Nancy (France), 141p.

112- PERNES-DEBUYSER A., TESSIER D., 2002. Influence de matières fertilisantes sur les propriétés des sols.Étude et Gestion des Sols, Volume 9, 3 - pages 177 à 186.

113- PIERZYNSKI G. M., SIMS J.T., VANCE G.F., 2000. Soils and environmental quality. 2end ED, CRC. Pres. Newyork. 459p.

114- PRAT S., 1971. Les céréales 2éme édition, J.B Baillière et fils, Paris, ppp9-23-315.

115- PREVOST PH., 1999. Les basses de l'agriculture. Ed II Paris- France 254p.

116- PRIYA P., SAHI S.V., 2009. Influence of phosphorus nutrition on growth and metabolism of Duo grass (Duo festulolium). Plant Physiology and Biochemistry 47 31–36.

117- QAISAR H., RANJHA A. M., REHMAN O.U., MEHDI S.M et MAHMOOD K., 2005. Effect of different doses of phosphorus fertilizer on wheat and its residual effect on sorghum fodder. Pak.J.sci., 57: 33-38.

118- QUANG V. D., THAI V. C.,TRAN THITUONG LINH., DUFEY J. E., 1996. Phosphorus sorption in soils of the Mekong Delta (Vietnam) as described by the binary Langmuir equation. Eur. J. Soil Sci., 47:113-123.

119- QUÉMENER J., 1968. Exemple d'application de la méthode Standfoprd-De ment à des problèmes d fertilisation phosphatée.Ann.agr.INRA. (5) 19: 589-604.

120- RAMAEKERSA L., REMANSB R., RAOC I. M., BLAIRC M., VANDERLEYDENA J., 2010. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. Field Crops Research 117, 169–176.

121- RAZI S., 2006. Etude expérimentale de l'influence du gypse sur la dynamique du phosphore dans le sol et sa cinétique d'absorption par le Ray-grass. Thèse. MAG. AGR. Batna: 3-36p

122- ROLSTON D.E., RAUSCHKOLB R.S., HOFFMAN D. L., 1975. Infiltration of organic phosphate compounds in soil. Soil Sci. Soc Amer. Proc. 39: 1089-1094.

123- SANYAL S. K., et DE DATTA S. K., 1991. Chemistry of phosphorus transformations in soils. Dans: Advances in soil science, ed. B. A. Stewart, tome 16, Springe.Verlag, New York, and U.S.A: 1-120.

124- SANYAL S.K., DE DATTA S.K., CHAN P.Y., 1993. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of south and Southeast Asia. Soil Sci. Soc. Am. J., 25:937-945.

125- SARAGONI H., POSS R., MARQUETTE J., LATRILLE E., 1992. Fertilisation et succession des cultures vivrières au sud du Togo : synthèse d'une expérimentation de longue durée sur terre de barre. Agronomie Tropicale.46 (2) pp. 107-119. SAS Institute 1995. StatisticsUsers Guide, Vol. 2, Version 6.1. SAS Institute, Cary, North Carolina.

126- SCHACHTMAN D.P., REID R.J., AYLING S.M., 1998. Update on phosphorus uptake. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. Plant Phys. 116, 447–453.

127- SHARPLEY A. N., MOYER B., 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. J. Environ. Quai. 29: 1462-1469.

128- SNYDER C. S., SLATON N., 2002. Effect of soil flooding and drying on phosphorus reaction.Inst. I.niews and views.4p.

129- SOLIS P., TORRENT J., 1989. Phosphate fractions in calcareous vertisols and inceptisols of Spain. Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 462–466.

130- SOLTNER D., 2005a. Les grandes productions végétales. Ed. collection sciences et techniques agricoles, Paris (20e édition), 472 p.

131- SOLTNER D., 2005b. Les bases de la production végétale (Tome I : Le sol et sonaméliorat ion). Ed. collection sciences et techniques agricoles, Paris (24e édition), 472 p.

132- SOON Y.K., 1991. Solubility and retention of phosphate in soils of the northwestern Canadian prairie. Can. J. Soil Sci., 71:453-463.

133- TARAFDAR J.C., CLASSEN N., 2004. Adsorption behaviors of inorganic and organic sources of phosphorus in soils. Agrochemica, (VXLVIII) 12: 42-49.

134- THEVENET G., 1993.La fertilisation raisonnée. Du concept du raisonnement aux applications pratiques : la démarche du comifer. Ingénieur de la vie. N°427 Février – Mars. pp : 28 – 34.

135- UDO E. J., UZU F.O., 1972. Characteristics of P adsorption by some Nigerian soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 365379484.

136- VAN DUIVENBOODEN N., 1996. La durabilitéé exprimée en termes d'élément nutritifs avec référance spécial à l'Afrique de l'Ouest -Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS) N°29, 180p.

137- VANDEN BOSSCHE H., 1999. Devenir du phosphore apporté sur les sols et risques de contamination des eaux de surface .Cas des boues de stations d'épuration .thèse doctorat, université Rennes I, 294p.

138- VILAIN M., 1997. La production végétale. Les composantes de la production. Ed 13eme. 478 p.

139- ZEMOURA A., 2005. Étude comparative de quelques méthodes de dosage du phosphore assimilable des sols calcaires en région semi-aride (w. de Batna). Thèse MAG, Batna (Algérie), 194p.

Annexes

Annexe I. Analyse de la variance des résultats et les groupes homogènes obtenus (essai en sol cultivé)

Tableau 1. Effet de la fertilisation phosphatée sur le nombre d'épis au m²

	SS	Degr. Of Freedom	MS	F	p
engrais	9876	2	4938	1,438	0,250670
Dose	10624	2	5312	1,547	0,226673
engrais*dose	62574	4	15644	4,556	0,004426
Error	123603	36	3433		

Tableau 2. Groupes homogènes obtenus pour les résultats du nombre d'épis au m²

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (épis/m²)	Groupes Homogènes
Fosfactyl	30	319.214	A
SSP	90	336.15	A
MAP	60	339.998	A
MAP	30	340.674	A
MAP	90	388.456	AB
SSP	60	388.458	AB
Fosfactyl	90	397.688	AB
SSP	30	415.382	AB
Fosfactyl	60	459.226	B

Tableau 3. Effet de la fertilisation phosphatée sur le nombre grain par épis

	SS	Degr. Of Freedom	MS	F	P
engrais	103,31	2	51,65	4,012	0,026729
dose	4,87	2	2,44	0,189	0,828423
engrais*dose	59,66	4	14,91	1,158	0,345276
Error	463,47	36	12,87		

Tableau 4. Effet de la fertilisation phosphatée sur le poids de mille grains

	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Engrais	151,8	2	75,9	2,027	0,146485
Dose	19,9	2	9,9	0,266	0,768151
engrais*dose	133,2	4	33,3	0,889	0,480238
Error	1347,9	36	37,4		

Tableau 5. Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en grains(q/ha)

	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Engrais	149,9	2	74,9	0,2846	0,753980
Dose	465,9	2	232,9	0,8846	0,421650
engrais*dose	2668,2	4	667,0	2,5333	0,057037
Error	9479,4	36	263,3		

Tableau 6. Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en pailles (q/ha)

	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
engrais	305,2	2	152,6	1,583	0,219280
dose	1379,5	2	689,7	7,155	0,002419
engrais*dose	928,6	4	232,1	2,408	0,067242
Error	3470,2	36	96,4		

Tableau 7. Groupes homogènes obtenus pour les résultats du rendement en paille (q/ha)

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (RDT paille)	Groupes Homogènes
MAP	30	52.372	A
SSP	90	55.138	A
Fosfactyl	30	60.268	A
Fosfactyl	90	62.404	AB
SSP	30	64.136	AB
MAP	90	66.338	AB
MAP	60	66.522	AB
SSP	60	68.314	AB
Fosfactyl	60	80.186	B

Tableau 8. Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en azote de la paille (%MS)

	SS	**Degr. Of freedom**	**MS**	**F**	**p**
Engrais	0,49152	2	0,24576	3,3512	0,046272
Doses	0,17662	2	0,08831	1,2042	0,311739
Engrais*Doses	0,99220	4	0,24805	3,3823	0,018968
Error	2,64012	36	0,07334		

Tableau 9. Groupes homogènes obtenus pour les résultats de la teneur en azote de la paille

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (N % M.S)	Groupes Homogènes
SSP	90	0.308	A
SSP	60	0.434	AB
Fosfactyl	30	0.574	AB
MAP	60	0.63	AB
Fosfactyl	60	0.63	AB
MAP	30	0.7	AB
SSP	30	0.77	AB
MAP	90	0.84	AB
Fosfactyl	90	0.98	B

Tableau 10. Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en azote des graines (%MS)

	SS	Degr. Of freedom	MS	F	p
Engrais	1,6551	2	0,8276	2,0541	0,142977
Doses	0,8058	2	0,4029	1,0000	0,377868
Engrais*Doses	1,2196	4	0,3049	0,7568	0,560242
Error	14,5040	36	0,4029		

Tableau 11. Effet de la fertilisation phosphatée sur l'exportation d'azote par la culture (kg/ha)

	SS	Degr. Of freedom	MS	F	P
Engrais	5190,7	2	2595,4	1,5672	0,222527
Doses	1356,2	2	678,1	0,4095	0,667046
Engrais*Doses	39312,6	4	9828,2	5,9348	0,000896
Error	59617,2	36	1656,0		

Tableau 12. Groupes homogènes obtenus pour les résultats de l'exportation d'azote par la culture

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (N exporté)	Groupes Homogènes
SSP	90	86.1039	A
Fosfactyl	30	95.784	A
SSP	60	123.7684	AB
Fosfactyl	90	137.8771	AB
MAP	30	138.0484	AB
Fosfactyl	60	148.1902	AB
MAP	60	152.6331	AB
MAP	90	168.1033	AB
SSP	30	195.1954	B

Tableau 13. Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en potassium des pailles (%MS)

	SS	Degr. Of freedom	MS	F	p
Engrais	736,7	2	368,4	8,89	0,000728
Doses	262,6	2	131,3	3,17	0,054003
Engrais*Doses	317,0	4	79,3	1,91	0,129439
Error	1491,6	36	41,4		

Tableau 14. Groupes homogènes obtenus pour les résultats de la teneur en potassium des pailles

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (K_2O % M.S)	Groupes Homogènes
Fosfactyl	60	1.335135	A
MAP	90	1.356757	AB
Fosfactyl	90	1.356757	AB
Fosfactyl	30	1.364865	AB
SSP	90	1.375676	AB
MAP	30	1.378378	AB
MAP	60	1.42973	ABC
SSP	30	1.513514	BC
SSP	60	1.556757	C

Tableau 15. Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en potassium des grains (%MS)

	SS	**Degr. Of freedom**	**MS**	**F**	**p**
Engrais	495,5	2	247,8	31,49	0,000000
Doses	173,9	2	87,0	11,05	0,000181
Engrais*Doses	577,7	4	144,4	18,36	0,000000
Error	283,2	36	7,9		

Tableau 16. Groupes homogènes obtenus pour les résultats de la teneur en potassium des grains

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (K_2O % M.S)	Groupes Homogènes
Fosfactyl	30	0.7	A
MAP	30	0.718919	AB
MAP	90	0.727027	AB
MAP	60	0.72973	AB
SSP	90	0.772973	B
SSP	60	0.827027	C
SSP	30	0.854054	CD
Fosfactyl	90	0.856757	CD
Fosfactyl	60	0.910811	D

Tableau 17. Effet de la fertilisation phosphatée sur l'exportation de potassium de la culture (kg/ha)

	SS	Degr. Of freedom	MS	F	p
Engrais P	2245,4	2	1122,7	2,029	0,146230
Doses	7474,2	2	3737,1	6,754	0,003231
Engrais P*Doses	9347,4	4	2336,8	4,223	0,006630
Error	19919,7	36	553,3		

Tableau 18. Groupes homogènes obtenus pour les résultats del'exportation de potassium de la culture

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (K_2O exporté)	Groupes Homogènes
MAP	30	108.3023	A
Fosfactyl	30	111.5875	A
SSP	90	114.3577	A
MAP	90	134.1163	AB
MAP	60	134.4662	AB
Fosfactyl	90	134.9012	AB
SSP	30	155.2937	AB
SSP	60	155.5684	AB
Fosfactyl	60	170.9542	B

Tableau 19. Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphore des pailles (%MS)

	SS	Degr. Of freedom	MS	F	p
Engrais	0,016822	2	0,008411	3,9483	0,028163
Doses	0,001143	2	0,000572	0,2684	0,766134
Engrais*Doses	0,025536	4	0,006384	2,9967	0,031139
Error	0,076690	36	0,002130		

Tableau 20. Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphore des graines (%MS)

	SS	Degr. Of freedom	MS	F	p
Engrais	0,06712	2	0,03356	0,7930	0,460211
Doses	0,66828	2	0,33414	7,8964	0,001434
Engrais*Doses	1,08907	4	0,27227	6,4343	0,000517
Error	1,52335	36	0,04232		

Tableau 21. Groupes homogènes obtenus pour les résultats de la teneur en phosphore des graines

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (P_2O_5 % M.S)	Groupes Homogènes
Fosfactyl	60	0.430532	A
MAP	30	0.492827	A
SSP	90	0.507206	A
SSP	60	0.571045	AB
Fosfactyl	90	0.5938	AB
MAP	60	0.596744	AB
MAP	90	0.7796	ABC
Fosfactyl	30	0.917735	BC
SSP	30	1.064894	C

Tableau 22. Effet de la fertilisation phosphatée sur l'exportation de phosphore de la culture (kg/ha)

	SS	Degr. Of freedom	MS	F	p
Engrais	963,73	2	481,87	1,8437	0,172861
Doses	1093,05	2	546,52	2,0911	0,138305
Engrais*Doses	8284,36	4	2071,09	7,9244	0,000109
Error	9408,87	36	261,36		

Tableau 23. Groupes homogènes obtenus pour les résultats de l'exportation de phosphore de la culture

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (P_2O_5 exporté)	Groupes Homogènes
MAP	30	27.57078	A
SSP	90	28.86487	A
Fosfactyl	60	40.72388	A
MAP	60	41.03973	A
SSP	60	41.40407	A
Fosfactyl	30	45.10337	A
Fosfactyl	90	45.1848	A
MAP	90	50.90991	A
SSP	30	82.71578	B

Tableau 24. Effet de la fertilisation phosphatée sur la quantité de phosphore exporté en kg par quintal de grains produits

	SS	**Degr. Of freedom**	**MS**	**F**	**p**
Engrais P	0,12875	2	0,06437	1,0745	0,352173
Doses	0,72705	2	0,36353	6,0678	0,005359
Engrais P*Doses	1,37335	4	0,34334	5,7308	0,001126
Error	2,15680	36	0,05991		

Tableau 25. Groupes homogènes obtenus pour les résultats de la quantité de phosphore exporté en kg par quintal de grains produits

Types engrais	Doses (U/ha)	Moyennes (P_2O_5/ ql grains)	Groupes Homogènes
MAP	30	0.567313	A
Fosfactyl	60	0.584925	A
SSP	90	0.644642	A
SSP	60	0.691372	A
MAP	60	0.761324	AB
Fosfactyl	90	0.774995	AB
MAP	90	0.869257	ABC
Fosfactyl	30	1.150398	BC
SSP	30	1.224647	C

Tableau 26. Effet de la fertilisation phosphatée sur la quantité de potassium exporté en kg par quintal de grains produits

	SS	Degr. Of freedom	MS	F	p
Engrais P	0,5992	2	0,2996	1,349	0,272397
Doses	0,2746	2	0,1373	0,618	0,544584
Engrais P*Doses	1,0072	4	0,2518	1,134	0,356237
Error	7,9971	36	0,2221		

Annexe II. Analyse de la variance des résultats et les groupes homogènes obtenus (essai en sol nu)

Tableau 1. Analyse de la variance pour les résultats du pH (tous les traitements)

	Degr. of freedom	SS	MS	F	p
Durée	6	0.105	0.017	1.2	0.299612
Traitements	3	3.216	1.072	76.3	0
Durée*Traitements	18	0.184	0.01	0.7	0.770019
Error	84	0.787	0.014		
Total	111	4.291			

Tableau 2. Groupes homogènes obtenus pour les résultats du pH (tous les traitements)

Traitements	pH moyen	Groupes Homogènes
MAP	7.93	B
SPP	8.17	A
Fosfactyl	8.18	A
Témoin	8.48	C

Tableau 3. Analyse de la variance pour les résultats de la conductivité électrique (tous les traitements)

	Degr. of freedom	SC	MC	F	p
Durée	6	1.698607	1.698607	12414.78	0
Traitements	3	0.034931	0.005822	42.55	0
Durée*Traitements	18	0.000813	0.000271	1.98	0.127424
Error	84	0.008754	0.000486	3.55	0.000139
Total	111	0.007662	0.000137		

Tableau 4. Analyse de la variance pour les résultats du calcium échangeable (tous les traitements)

	Degr. of freedom	SS	MS	F	p
Durée	6	1.2438	0.2073	11.814	0
Traitements	3	7.2798	2.4266	138.299	0
Durée*Traitements	18	1.4566	0.0809	4.612	0.000005
Error	84	0.9826	0.0175		
Total	111	10.9627			

Tableau 5. Groupes homogènes obtenus pour les résultats du calcium échangeable (tous les traitements)

Traitements	Ca^{2+}échang moyen	Groupes Homogènes
Fosfactyl	0.712	B
SPP	1.012	C
Témoin	1.406	A
MAP	1.417	A

Tableau 6. Analyse de la variance pour les résultats du magnésium échangeable (tous les traitements)

	Degr. of freedom	**SS**	**MS**	**F**	**p**
Durée	6	0.00319	0.00053	1.13	0.355277
Traitements	3	0.01121	0.00374	7.97	0.000163
Durée*Traitements	18	0.01413	0.00078	1.67	0.072667
Error	84	0.02625	0.00047		
Total	111	0.05478			

Tableau 7. Groupes homogènes obtenus pour les résultats du magnésium échangeable (tous les traitements)

Traitements	Mg^{2+}échang moyen	Groupes Homogènes
Fosfactyl	0.461	C
SPP	0.476	A
Témoin	0.485	AB
MAP	0.492	B

Tableau 8. Analyse de la variance pour les résultats du potassium échangeable (tous les traitements)

	Degr. of freedom	**SS**	**MS**	**F**	**p**
Durée	6	0.013085	0.002181	66.23	0
Traitements	3	0.024955	0.008318	252.62	0
Durée*Traitements	18	0.00453	0.000252	7.64	0
Error	84	0.001844	0.000033		
Total	111	0.044414			

Tableau 9. Groupes homogènes obtenus pour les résultats du potassium échangeable (tous les traitements)

Traitements	K^+échang moyen	Groupes Homogènes
Fosfactyl	0.066	A
SPP	0.08	B
Témoin	0.104	C
MAP	0.108	D

Tableau 10. Analyse de la variance pour les résultats du sodium échangeable (tous les traitements)

	Degr. of freedom	**SS**	**MS**	**F**	**p**
Durée	6	0.000311	0.000052	58	0
Traitements	3	0.001534	0.000511	572.64	0
Durée*Traitements	18	0.000676	0.000038	42.09	0
Error	84	0.00005	0.000001		
Total	111	0.002571			

Tableau 11. Groupes homogènes obtenus pour les résultats du sodium échangeable (tous les traitements)

Traitements	Na^+échang moyen	Groupes Homogènes
Fosfactyl	0.016	A
SPP	0.023	B
Témoin	0.025	C
MAP	0.028	D

Tableau 12. Analyse de la variance pour les résultats du phosphore assimilable (Olsen) (tous les traitements)

	Degr. of freedom	**SS**	**MS**	**F**	**p**
Durée	6	29464.6	4910.8	20.305	0
Traitements	3	6328.2	2109.4	8.722	0.000077
Durée*Traitements	18	30185.9	1677	6.934	0
Error	84	13543.4	241.8		
Total	111	79522			

Tableau 13. Groupes homogènes obtenus pour les résultats du phosphore assimilable (Olsen) (tous les traitements)

Traitements	P assimilable moyen	Groupes Homogènes
Témoin	64.4	C
Fosfactyl	75.77	A
MAP	79.26	AB
SPP	88.66	B