

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش الجزائر

Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger

## THESE

Présentée par : **Naïma BOUKHALFA-DERAOUI**

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT en Sciences Agronomiques**

### **Fertilisation phosphatée d'une culture de blé dur (*Triticum durum* Desf. Variété Carioca) irriguée, en milieu saharien (El-Menia).**

Soutenue le 15/12/2016 devant le jury composé de :

Président	M. AÏDAOUI Abdellah	ENSA	Professeur
Directeur de thèse	Mme MEKLCHE Leïla	ENSA	Professeur
Examineurs	Mme BISSATI Samia	(U. Kasdi Merbah, Ouargla)	Professeur
	Melle SALHI Nesrine	(U. Kasdi Merbah, Ouargla)	Maître de Conférences
	M. MEKLCHE Arezki	ENSA	Maître de Conférences
	M. BENBELKACEM Abdelkader	INRA Algérie	Maître de recherche

## Remerciements

Ce travail n'aurait pas vu le jour sans le soutien moral et scientifique des personnes qui m'entourent. A son terme, je tiens à leur exprimer mes profonds remerciements en s'adressant tout particulièrement à :

Ma directrice de thèse Pr. HANIFI-MEKLICHE Leila pour son soutien, sa disponibilité et ses qualités scientifiques, dont j'ai pu profiter.

Dr. MEKLICHE Arezki, pour sa contribution à la réalisation des différents dispositifs au niveau du site expérimental d'El-Menia et d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Pr AÏDAOUI Abdellah qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Au même titre, j'adresse mes sincères remerciements au Pr. BISSATI-BOUAFIA Samia, Dr. SALHI Nasrine et Dr BENBELKACEM Abdelkader qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner et de juger ce travail.

Ma profonde reconnaissance et estime à Mr HADJADJ Mahmoud, directeur de l'exploitation agricole à El-Menia, pour toute l'aide que je me suis permise de solliciter auprès de lui, durant toutes ces années d'expérimentation.

Mes remerciements s'adressent également aux professeurs LEDENT JF., TOUSSAINT Bernard, DUFÉY Jean, et LAMBERT Richard pour m'avoir accueillie au sein des deux laboratoires des sciences du sol (UCL) et le laboratoire d'écologie des prairies (Michamps), pour la confiance qu'ils m'ont témoigné et pour avoir mis à ma disposition des moyens performants pour réaliser ce travail. Un grand merci à tout le personnel technique du laboratoire d'écologie des prairies à Michamps, qui a contribué à la réalisation de ce travail.

Je remercie chaleureusement tous mes collègues du département de sciences agronomiques et de biologie, plus particulièrement Dr BABA HANI Souad pour son soutien technique et moral, si précieux, tout au long de cette thèse ; Pr CHEHMA Abdelmadjid, directeur du laboratoire de BRS et Pr CHELOUFI Hamid, directeur du laboratoire de Recherche sur la phoeniciculture.

Mes remerciements s'adressent également à mes étudiants : ZEKKOUR M., ZENDAH B., HAMMOUYA A., MIHOUB A., NADJA A., BEDRA R., DJOUAD M.O. et LAIB S. et les étudiants de l'ENSA, pour leur aide, indispensable à la réalisation des différentes expérimentations.

Enfin, une pensée concerne bien évidemment tous mes proches, en particulier mon mari Mohammed et mes enfants Hassane et Hocine. Merci à eux pour leur encouragement perpétuel.

## **Fertilisation phosphatée d'une culture de blé dur (*Triticum durum* Desf. variété Carioca) irriguée, en milieu saharien (El-Menia).**

### **Résumé**

Le présent travail a été conduit au cours de quatre années : 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 sur le site expérimental de la ferme de production de M. HADJADJ MAHMOUD, dans la région saharienne d'El-Menia. Notre objectif est d'étudier au champ, l'effet de différentes sources de Phosphore(P) apportées à différentes doses sur le comportement et la nutrition minérale du blé dur *Triticum durum* Desf. (Variété Carioca) conduit sous centre pivot et l'évolution de cet élément minéral dans le sol, en plein champ et en conditions semi-contrôlées (essai d'incubation).

Les résultats obtenus montrent que les engrais foliaires, Leader-start et Agriphos, n'ont pas eu d'effet significatif sur les paramètres de rendement et la nutrition phosphatée du blé, durant la campagne agricole (2006/2007). L'effet des engrais solides était significatif en 2006/2007 seulement, où NPKs a donné le meilleur rendement en grain, avec 57,81 q.ha<sup>-1</sup> par rapport au TSP et Fosfacyl. Indépendamment de l'année, les meilleurs résultats de ce paramètre sont enregistrés avec les doses 30 et 60 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, qui ont donné respectivement 69,43 q/ha et 69,48 q/ha. Les meilleures teneurs en P des grains sont réalisées avec l'engrais SSP (trois dernières années) et la dose 30 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (2008/2009). L'efficacité d'utilisation du P est corrélée négativement avec les doses de phosphore, quelle que soit l'année. Quelles que soient les conditions de l'essai (plein champ ou semi-contrôlées), les quantités de P assimilable diminuent dans le temps. L'apport d'engrais au sol (essai d'incubation) a influencé négativement le pH de la solution du sol ( $r = -0,311^{**}$ ) et positivement la teneur en P assimilable ( $r = 0,443^{***}$ ). Le phosphore assimilable est corrélé négativement au pH du sol ( $r = -0,677^{***}$ ) et positivement avec la C.E. ( $r = 0,585^{***}$ ).

**Mots clés :** Fertilisation minérale - Blé dur - Efficacité d'utilisation P - Phosphore assimilable - El-Menia - Sahara.

## **P fertilization of durum wheat (*Triticum durum* Desf. Variety Carioca) irrigated in Saharan environment (El Menia)**

### **Abstract**

This work was conducted during four years: 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010 and 2010/2011 on the experimental site of M. HADJADJ MAHMOUD production farm in the Saharan region of El Menia. Our aim is to study in the field; the effect of different sources of phosphorus (P) applied at different doses on growth parameters and mineral nutrition of durum wheat *Triticum durum* Desf. (Variety CARIOCA) conducted under center pivot and the evolution of this mineral element in the soil under the influence of fertilizers in the open and semi-controlled conditions (incubation test).

Foliar fertilizers, Leader-start and Agriphos had no significant effect on the yield parameters and phosphate nutrition of wheat (2006/2007). Solid fertilizer effect is significant only in 2006/2007, where fertilizer NPKS gave the best grain yield (57.81 qha<sup>-1</sup>) as compared to TSP and Fosfactyl. Regardless of the year, the best results in this setting are recorded with 30 and 60 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (69.43 t/ha and 69.48 t/ha). The best rates P grains are produced with the SSP fertilizers (past three years) and serving 30 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (2008/2009). The phosphorus use efficiency is negatively correlated with the phosphorus doses, regardless of the year. Whatever are the test conditions (field or semi-controlled), the amounts of available P diminish over time. Fertilization ground (incubation test) negatively affected the pH of the soil solution (r = -0.311 \*\*) and positively the available P content (r = 0.443 \*\*\*). Available phosphorus is negatively correlated to soil pH (r = -0.677 \*\*\*) and positively with the C.E. (r = 0.585 \*\*\*).

**Keywords:** Mineral Fertilizer - Durum wheat - P use efficiency - available Phosphorus - El Menia - Sahara.

التسميد الفوسفاتي لنبات القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) صنف كاريوكا، المروي، في الوسط  
الصحراوي (المنيعة)

ملخص

أجرى هذا العمل على مدى أربع سنوات 2006\2007، 2008\2009، 2009\2010 و 2010\2011 على مستوى الموقع التجريبي بمزرعة السيد حجاج محمود بالمنطقة الصحراوية المنيعة. هدفنا، هو دراسة أثر مختلف أنواع الأسمدة الفسفورية، المطبقة بمختلف الكميات على الخصائص المرفولوجية، الفلاحية و التغذية المعدنية لنبات القمح الصلب، صنف carioca من جهة و دراسة حركية العنصر الفسفوري في التربة تحت ظروف الحقل و الشبه المتحكم بها من جهة أخرى.

تظهر النتائج المتحصل عليها أنه لم يسجل أي أثر للأسمدة الورقية على مكونات المردود و التغذية الفوسفاتية للقمح خلال سنة 2006\2007. و كان للأسمدة الصلبة الأثر الإيجابي خلال هذه السنة فقط، حيث أعطى السماد NPKs أحسن مردود للحبوب، ب 57,81 ق\ه مقارنة ب TSP و Fosfacyl. بغض النظر على السنة، أحسن النتائج لهذا المكون قد تحصل عليها خلال مع الكميات 30 و 60 كغ\ه و اللتان أعطيتا على التوالي 69,43 ق\ه و 69,48 ق\ه. أفضل نسب الفسفور في البذور سجل مع سماد SSP (لثلاث سنوات الأخيرة) و الكمية 30 كغ\ه (2008\2009). ترتبط كفاءة استخدام الفسفور سلبا مع كميات الفسفور، بغض النظر عن السنة. مهما كانت ظروف الاختبار (الحقل أو الشبه المتحكم بها) فإن كميات الفسفور المتوافر تنخفض مع مرور الوقت. لقد أثر تطبيق السماد الفسفوري تأثيرا سلبيا على حموضة التربة (\*\*-0,311) و إيجابيا على نسبة الفسفور المتوافر (\*\*\*(0,443)). كما أن الفسفور المتوافر مرتبط سلبا مع حموضة التربة (\*\*\*(0,677-) و إيجابيا مع الملوحة (\*\*\*(0,585)).

الكلمات المفتاحية: التسميد المعدني – القمح الصلب – كفاءة استخدام الفسفور – الفسفور المتوافر – المنيعة – الصحراء.

**Table des matières**

<b><u>Titre</u></b>	<b><u>Page</u></b>
Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale	1
Chapitre I. Revue bibliographique	5
I. Importance des céréales en général et du blé dur en particulier en Algérie	5
II. Consommation des engrais à l'échelle nationale	11
III. Importance du phosphore dans la nutrition des plantes	12
III.1. Rôles et importance du phosphore	12
III.2. Disponibilité du phosphore dans le sol	13
III.3. Effet d'une déficience en phosphore	14
IV. Acquisition du phosphore par la plante	14
IV.1. Acquisition par voie racinaire	14
IV.2. Acquisition par voie foliaire	16
IV.3. Efficacité d'utilisation du phosphore par les plantes	18
IV.4. Importance de la réserve initiale de la semence en P sur l'expression des performances de la culture	19
V. Facteurs influençant la disponibilité du phosphore dans le sol	20
a) Effet du pH du sol	20
b) Effet du calcaire	21
c) Effet de la texture du sol	21
d) Effet de la matière organique	21
e) Effet du type d'engrais	23
VI. Facteurs influençant les prélèvements du phosphore par la plante	24
a) Effet de l'état hydrique du sol	24

b) Température du sol	25
c) Effet de la morphologie racinaire	25
d) Effet des exsudats racinaires	25
e) Interaction avec d'autres éléments minéraux	26
VII. Pertes du phosphore	27
Chapitre II. Matériels et méthodes	28
I. Traitements étudiés et dispositif expérimental	28
II. Localisation des essais	31
III. Conduite technique des essais	34
IV. Mesures effectuées	36
IV.1. Végétal	36
IV.1.1. Formation du rendement	36
IV.1.2. Rendement en biomasse	37
IV.1.3. Nutrition minérale du blé	37
IV.1.4. Efficacité d'utilisation du phosphore	37
IV.2. Sol	38
IV.2.1. Essai en sol cultivé	38
IV.2.2. Essai en sol non cultivé (essai d'incubation)	38
V. Méthodes d'analyse	38
V.1. Analyse chimique du végétal	39
V.2. Analyse physique et chimique du sol	39
VI. Analyse statistique	41
Chapitre III. Résultats et discussion	42
I. Elaboration du rendement en grain et en biomasse en fonction des types d'engrais et doses apportées chez le blé dur	42
I.1. Composantes du rendement et rendements en grain et en paille	42
I.2. Production de biomasse	47



---

II. Quantification des prélèvements en éléments minéraux chez le blé dur	53
II.1. Prélèvements phosphatés totaux par le blé dur et leurs répartitions entre paille et grains	53
II.2. Variation de l'efficacité d'utilisation, efficacité d'absorption et l'efficacité d'utilisation du phosphore chez le blé dur sous différentes sources et doses du phosphore	61
II.2.1. Effet des différentes sources et doses d'engrais phosphatés sur l'efficacité d'utilisation du phosphore	61
II.2.2. Effet des différentes sources et doses d'engrais phosphatés sur l'efficacité d'absorption du phosphore (EAP)	63
II.2.3. Effet des différentes sources et doses d'engrais phosphatés sur l'efficacité d'utilisation du phosphore (ECUP)	66
II.3. Prélèvements azotés totaux par le blé dur et leurs répartitions entre paille et grains	69
II.4. Teneurs en protéines totales des grains	71
II.5. Concentrations des grains du blé dur en éléments $K^+$ , $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$ et $Na^+$	73
III. Effet de la fertilisation phosphatée sur l'évolution du P dans le sol	76
III.1. Essai en sol cultivé	76
III.2. Essai en sol non cultivé	81
III.2.1. Phosphore assimilable	82
III.2.2. pH de la solution du sol	83
III.2.3. Conductivité électrique	84
IV. Analyse des corrélations	88
V. Discussion générale	93
Conclusion générale	107
Références bibliographiques	111
Annexes	133

ANRH	Agence nationale des ressources hydriques
C.O.M.I.F.E.R.	Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée.
CNCC	Centre national de contrôle et certifications des semences et des plants
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
ONM	Office national de météorologie
MAP	Mono ammonium phosphate
SSP	Simple super phosphate
TSP	Triple super phosphate
USDA	United states department of agriculture

**Liste des tableaux**

<b><u>Titre</u></b>	<b><u>Page</u></b>
<b>Tableau 1.</b> Caractéristiques physiques et chimiques des sols des essais	31
<b>Tableau 2.</b> Données climatiques de la région d'El-Menia (2001-2011)	32
<b>Tableau 3.</b> Caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation	33
<b>Tableau 4.</b> Conduite technique des essais	34
<b>Tableau 5.</b> Effet des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007)	43
<b>Tableau 6.</b> Effet des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007)	43
<b>Tableau 7.</b> Effet des engrais solides et foliaires sur les différents caractères (2006/2007)	43
<b>Tableau 8.</b> Moyennes des différents caractères pour les engrais solides et les doses (2008/2009)	45
<b>Tableau 9.</b> Moyennes des différents caractères pour les engrais solides et les doses (2009/2010)	45
<b>Tableau 10.</b> Moyennes des différents caractères pour les engrais solides et les doses (2010/2011)	45
<b>Tableau 11.</b> Moyennes des rendements en biomasse au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007) pour les engrais solides et les doses	49
<b>Tableau 12.</b> Moyennes des rendements en biomasse au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007) pour les engrais solides et les doses	49
<b>Tableau 13.</b> Moyennes des rendements en biomasse (2006/2007) pour les engrais solides et foliaires	49
<b>Tableau 14.</b> Moyennes des rendements en biomasse pour les engrais solides et doses (2008/2009)	52
<b>Tableau 15.</b> Moyennes des rendements en biomasse pour les engrais solides et doses (2009/2010)	52
<b>Tableau 16.</b> Moyennes des rendements en biomasse pour les engrais solides et doses (2010/2011)	52

<b>Tableau 17.</b> Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007) pour les engrais solides et les doses	54
<b>Tableau 18.</b> Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007) pour les engrais solides et les doses	54
<b>Tableau 19.</b> Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur (2006/2007) pour les engrais solides et foliaires	54
<b>Tableau 20.</b> Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2008/2009)	56
<b>Tableau 21.</b> Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2009/2010)	58
<b>Tableau 22.</b> Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2010/2011)	58
<b>Tableau 23a.</b> Effet des engrais solides et des doses sur les EUP au niveau des essais menés avec Agriphos et Leader-start (2006/2007)	62
<b>Tableau 23b.</b> Effet des engrais solides et des foliaires au niveau de la comparaison des deux essais (2006/2007)	62
<b>Tableau 24.</b> Effet des engrais solides et des doses sur les EUP, EAP et ECUP (2008/2009)	64
<b>Tableau 25.</b> Effet des engrais solides et des doses sur les EUP, EAP et ECUP (2009/2010)	64
<b>Tableau 26.</b> Effet des engrais solides et des doses sur les EUP, EAP et ECUP (2010/2011)	64
<b>Tableau 27.</b> Moyennes des prélèvements d'azote par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2008/2009)	70
<b>Tableau 28.</b> Moyennes des prélèvements d'azote par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2009/2010)	72
<b>Tableau 29.</b> Moyennes des prélèvements d'azote par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2010/2011)	72
<b>Tableau 30.</b> Taux de protéines des grains	72
<b>Tableau 31.</b> Moyennes des teneurs des grains en K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> et Mg <sup>2+</sup> en %	73

MS pour les engrais solides et les doses (2009/2010)

**Tableau 32.** Effet des engrais solides et doses sur les différents caractères 77  
au niveau de l'essai mené avec Agriphos

**Tableau 33.** Effet des engrais solides et doses sur les différents caractères 77  
au niveau de l'essai mené avec Leader-start

**Tableau 34.** Effet des engrais solides et foliaires sur les différents 77  
caractères

**Tableau 35.** Moyennes du phosphore assimilable, du pH et de la 81  
conductivité électrique en fonction des différents traitements (2010/2011)

Liste des figures

<u>Titre</u>	<u>Page</u>
<b>Figure 1.</b> Evolution de la superficie annuelle emblavée par les principales céréales (blé dur, blé tendre, orge et avoine) en Algérie.	6
<b>Figure 2.</b> Evolution de la production annuelle en céréales (blé dur, blé tendre, orge et avoine) en Algérie.	6
<b>Figure 3.</b> Evolution des superficies des principales céréales en Algérie.	8
<b>Figure 4.</b> Evolution des productions des principales céréales en Algérie.	8
<b>Figure 5.</b> Evolution des rendements des principales céréales en Algérie.	8
<b>Figure 6.</b> Evolution des superficies emblavées en blé dur au Sud Algérien.	10
<b>Figure 7.</b> Evolution des productions du blé dur au Sud Algérien.	10
<b>Figure 8.</b> Evolution des rendements en grain du blé dur en Algérie.	10
<b>Figure 9.</b> Effet du pH de la solution du sol sur les formes solubles du phosphore.	22
<b>Figure 10.</b> Variation du phosphore assimilable en fonction du pH.	22
<b>Figure 11.</b> Dispositifs expérimentaux des quatre essais (essai au champ).	29
<b>Figure 12.</b> Dispositif expérimental (essai d'incubation).	30
<b>Figure 13.</b> Evolution des températures mensuelles maximales pendant quatre campagnes (2006/2007 - 2008/2009 - 2009/2010 - 2010/2011).	33
<b>Figure 14.</b> Effet des engrais Fosfacyl, TSP et NPKs sur le rendement en grain du blé (Agriphos, 2006/2007)	48
<b>Figure 15.</b> Effet des engrais Fosfacyl, TSP et NPKs sur le rendement en grain du blé (Leade-start, 2006/2007)	48
<b>Figure 16.</b> Effet des engrais SSP et Fosfacyl sur le rendement en grain du blé (2008/2009)	48
<b>Figure 17.</b> Effet des engrais SSP, Fosfacyl et MAP sur le rendement en	48

grain du blé (2009/2010)

<b>Figure 18.</b> Effet des engrais SSP, Fosfactyl et MAP sur le rendement en grain du blé (2010/2011)	48
<b>Figure 19.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur la teneur en P des feuilles au stade deux nœuds du blé (Agriphos, 2006/2007)	57
<b>Figure 20.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur la teneur en P des feuilles au stade floraison (Agriphos, 2006/2007)	57
<b>Figure 21.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur la teneur en P des feuilles au stade deux nœuds du blé (Leader-start, 2006/2007)	57
<b>Figure 22.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur la teneur en P des feuilles au stade floraison du blé (Leader-start, 2006/2007)	57
<b>Figure 23.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur P prélevé par la culture du blé au stade deux nœuds du blé (Agriphos, 2006/2007)	57
<b>Figure 24.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur P prélevé par la culture du blé au stade floraison du blé (Agriphos, 2006/2007)	57
<b>Figure 25.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur P prélevé par la culture du blé au stade deux noeuds du blé (Leader-start, 2006/2007)	57
<b>Figure 26.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur P prélevé par la culture du blé au stade floraison du blé (Leader-start, 2006/2007)	57
<b>Figure 27.</b> Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur la teneur en P des feuilles au stade épi 1cm du blé (2008/2009)	59
<b>Figure 28.</b> Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur la teneur en P des feuilles au stade floraison du blé (2008/2009)	59
<b>Figure 29.</b> Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur le P prélevé par les feuilles du blé au stade épi 1cm (2008/2009)	59
<b>Figure 30.</b> Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur le P prélevé par les feuilles du blé au stade floraison (2008/2009)	59
<b>Figure 31.</b> Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur la teneur en P des grains du blé (2009/2010)	59
<b>Figure 32.</b> Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur la teneur en P des grains du blé (2010/2011)	59

<b>Figure 33.</b> Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur le P prélevé par les grains du blé (2009/2010)	59
<b>Figure 34.</b> Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur le P prélevé par les grains du blé (2010/2011)	59
<b>Figure 35.</b> Relation entre le rendement et les exportations du P par les grains (2008/2009)	60
<b>Figure 36.</b> Relation entre le rendement et les exportations du P par les grains (2010/2011)	60
<b>Figure 37.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur l'EUP (Agriphos, 2006/2007)	65
<b>Figure 38.</b> Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur l'EUP (Leader-start, 2006/2007)	65
<b>Figure 39.</b> Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur l'EUP (2008/2009)	65
<b>Figure 40.</b> Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur l'EUP (2009/2010)	65
<b>Figure 41.</b> Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur l'EUP (2010/2011)	65
<b>Figure 42.</b> Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur l'EAP (2008/2009)	68
<b>Figure 43.</b> Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur l'EAP (2009/2010)	68
<b>Figure 44.</b> Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur l'EAP (2010/2011)	68
<b>Figure 45.</b> Relation entre la teneur en phosphore des grains et taux de protéines (2008/2009)	74
<b>Figure 46.</b> Relation entre la teneur en phosphore des grains et taux de protéines (2009/2010)	74
<b>Figure 47.</b> Relation entre les teneurs en P et K des grains du blé (2009/2010)	75
<b>Figure 48.</b> Relation entre les teneurs en P et Mg des grains du blé (2009/2010)	75
<b>Figure 49.</b> Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (Agriphos, 2006/2007)	79



<b>Figure 50.</b> Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (Leader-start, 2006/2007)	79
<b>Figure 51.</b> Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (comparaison des deux essais, 2006/2007)	79
<b>Figure 52.</b> Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (Agriphos, 2006/2007)	80
<b>Figure 53.</b> Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (Leader-start, 2006/2007)	80
<b>Figure 54.</b> Evolution du phosphore assimilable en fonction des types d'engrais et de la période d'incubation	83
<b>Figure 55.</b> Evolution du pH en fonction des types d'engrais et de la période d'incubation	85
<b>Figure 56.</b> Relation entre le phosphore assimilable et le pH de la solution du sol	85
<b>Figure 57.</b> Relation entre le phosphore assimilable et la CE du sol	87
<b>Figure 58.</b> Evolution de la conductivité électrique en fonction des types d'engrais et de la période d'incubation	87

# **Introduction générale**

En Algérie, les produits céréaliers, en particulier le blé, occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale (Djermoun, 2009).

Le niveau de production céréalière nationale étant faible (moins de 5 Mt), et ne répond pas aux besoins de consommation qui sont estimés à environ 8 Mt/an (Sinacer, 2013). En effet, le blé, produit de consommation de base, figure parmi les denrées alimentaires les plus importées. Il fait l'objet d'un degré de commercialisation élevé, comparativement aux autres céréales. Avec plus de 10 millions de tonnes, qui représentent environ 8 % des achats internationaux annuels des pays de l'Afrique du nord, l'Algérie, avec 6,4 Mt, se situe au 5<sup>ème</sup> rang (Abis, 2012).

La déficience en phosphore des sols algériens est une contrainte importante pour l'obtention de bons rendements. Le phosphore est parmi les nutriments indispensables à la croissance des plantes. Il est considéré comme un facteur limitant dans de nombreux sols, en particulier dans les régions arides algériennes. Ces derniers sont caractérisés par des taux de calcaire élevés et une texture sableuse. Les sols sableux sont très pauvres en éléments nutritifs et sont caractérisés par une rétention de l'eau et une teneur en matière organique faibles (Ghonomie et Shafeek, 2005).

Contrairement aux ions de l'azote (N), les ions phosphates prélevés par la plante sont, en effet, sujets à de nombreuses interactions avec les constituants du sol et sont fortement retenus par la phase solide (Ragothama, 1999 ; Hinsinger, 2001). En tant qu'élément peu mobile dans le sol (Munns et Mosse, 1980), il est donc peu accessible pour les plantes, une fois apporté sous forme de fertilisant. Environ 80 % du phosphore apporté est immobilisé et devient donc indisponible, au moins à court terme pour les plantes à cause de l'adsorption, de la précipitation ou de la conversion sous forme organique (Holford, 1997).

Le problème qui se pose pour cet élément (P) est sa biodisponibilité essentiellement régie par le pH du sol, sa diffusion lente et sa forte fixation aux particules du sol (Goos et Johnson, 2001 ; Pandey *et al.*, 2013). Par conséquent, l'application foliaire peut être une stratégie efficace pour remédier à la faible biodisponibilité du phosphore dans le sol et pour l'amélioration immédiate du stress nutritionnel (Goos et Johnson, 2000 ; Maltais, 2006 ; Girma *et al.*, 2007). Dans le cas des

régions arides, comme l'Arizona, le pH élevé et la faible teneur en eau du sol diminuent fortement la solubilité de certains éléments (Walworth *et al.*, 2006). Plusieurs recherches ont démontré que l'utilisation de la fertilisation foliaire ne peut être une méthode alternative à la fertilisation racinaire, mais plutôt complémentaire (Ling et Silberbush, 2002 ; Mengel, 2002 ; Toscano *et al.*, 2002 ; Pandey *et al.*, 2013).

L'utilisation des fertilisants organiques et inorganiques dans l'agriculture intensive moderne est primordiale, car leur contribution est fondamentale dans l'augmentation des rendements des différentes cultures. Des quantités excessives d'engrais minéraux sont appliquées afin d'atteindre des rendements des cultures plus élevés (Stewart *et al.*, 2005). Les apports de quantités d'engrais supérieures aux exigences des cultures conduisent à une augmentation de la teneur en phosphore, qui provoque à son tour l'augmentation des taux de libération du phosphore dans le sol (Sharpley *et al.*, 1993 ; Horta et Torrent, 2007 ; Kaloi *et al.*, 2011). L'application continue à long terme de fertilisants en quantités supérieures à celles requises pour une croissance optimale de la plante peut entraîner une accumulation de phosphore dans les horizons de surface, augmentant ainsi le risque de perte de phosphore dans les eaux de surface et d'eutrophisation (Sharpley *et al.*, 1993 ; Bennett *et al.*, 2001 ; McDowell *et al.*, 2001 ; Djodjic *et al.*, 2005 ; Smith *et al.*, 2007 ; Horta et Torrent, 2007 ; Jalali, 2009 ; Jalali, 2013 ; Xu *et al.*, 2014).

De ce fait, le raisonnement de la fertilisation phosphatée devrait tenir compte non seulement des besoins de la plante en cet élément, mais aussi des mécanismes de sa mise en disponibilité et de son utilisation afin d'obtenir un rendement économique (Mhiri, 1995 ; Llorens, 2001). Cette orientation est traduite par l'efficacité d'utilisation du phosphore qui est la quantité de biomasse économique, obtenue par unité de phosphore apporté (Moll *et al.*, 1982).

D'après Vance *et al.* (2003), le phosphore est limitant pour le rendement des cultures, sur plus de 30 % des terres arables du monde, selon certaines estimations, les ressources mondiales de phosphore peu coûteux peuvent être épuisées d'ici 2050.

A l'horizon 2050, la population mondiale atteindra les 9,1 milliards d'habitants, et la plupart de cet accroissement aura lieu dans les pays en voie de développement (FAO, 2009). Une croissance démographique élevée entraîne une augmentation rapide de la

demande alimentaire, d'où une consommation plus élevée d'engrais par hectare de terres arables. Les Etats-Unis et l'Union européenne poursuivent aujourd'hui l'objectif de réduire l'usage des engrais dans la production agricole. Mais dans un contexte de croissance économique, la réduction de l'utilisation des engrais n'apparaît pas comme une priorité dans le reste du monde (Caraes et Pons, 2013).

Le maintien d'une production agricole suffisante pour répondre aux besoins futurs est une nécessité primordiale, il est actuellement admis que l'utilisation massive de fertilisants n'est pas une stratégie durable. Un nouveau modèle (ou paradigme) est apparu, qui correspond à l'intensification de la production tout en diminuant les niveaux d'intrants (fertilisants), ou intensification écologique (Tilman, *et al.*, 2002 ; Vance, 2003, Bonny, 2011) ; permettant ainsi d'améliorer l'exploitation du phosphore du sol par les cultures. Ceci permet d'augmenter les capacités d'acquisition de cet élément, ainsi que son utilisation pour la production de biomasse (Sandaña et Pinochet, 2014).

Cependant, la fertilisation phosphatée est un facteur de production coûteux et le recours à une telle pratique ne bénéficie pas complètement à la culture en place ; par conséquent, la maîtrise de la nutrition phosphatée et son amélioration (doses, dates et modes d'apport) permettrait la stabilité des rendements et la durabilité des systèmes de production.

La présente étude a pour objectif l'amélioration des productions en blé dur par les agriculteurs dans les conditions édapho-climatiques sahariennes ; tout en réduisant les coûts de production. Elle vise à étudier :

- la source de phosphore, la plus efficace ; qui permet une meilleure efficacité d'utilisation par la culture de blé dur et dont l'impact sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol favorise l'assimilation des nutriments par la culture,
- la dose d'engrais optimale qui favorise l'obtention du rendement maximal en grain, permettant ainsi l'utilisation judicieuse des ressources naturelles non renouvelables pour garantir, durablement, la rentabilité économique et le respect de l'environnement.

La démarche employée pour répondre à cet objectif repose sur une approche expérimentale, menée sur quatre années ; allant des parcelles d'essais au champ, sous pivot d'irrigation jusqu'au dispositif en pots en conditions semi-contrôlées.

# **Chapitre I. Revue bibliographique**

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en développement, particulièrement dans les pays maghrébins (Djermoun, 2009).

Les quantités de céréales produites en Algérie sont insuffisantes pour répondre aux besoins de la population (Abis, 2012). La déficience en phosphore des sols algériens est une contrainte importante pour l'obtention de bons rendements. Cependant, le recours à la fertilisation phosphatée, en plus d'être coûteux ne bénéficie pas complètement à la plante cultivée ; par conséquent, la maîtrise des mécanismes d'utilisation de cet élément et son amélioration permettrait la stabilité des rendements ainsi que la durabilité des systèmes de production.

### **I. Importance des céréales en général et du blé dur en particulier en Algérie**

En Algérie, la céréaliculture est une composante importante dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Cette spéculation est présente dans tous les étages bioclimatiques y compris les régions sahariennes. Les principales céréales cultivées dans notre pays sont le blé dur, le blé tendre, l'orge et l'avoine ; elles occupent annuellement entre 1 000 000 et 3 500 000 ha (figure 1). Cette superficie représente 11,63 % et 40,7 % de la surface agricole utile (SAU) estimée à 8,6 millions d'hectares. La production annuelle nationale varie entre 10 et 50 millions de quintaux (figure 2).

L'évolution des superficies emblavées par les principales céréales cultivées en Algérie se caractérise par des fluctuations très instables entre les années 1990 et 2000. A partir de 2001, on remarque une stabilité très nette des superficies cultivées en céréales variant entre 3 et 3,5 millions ha enregistrée en 2013 (figure 1).

L'examen de la production céréalrière (figure 2) permet de mettre en évidence des fluctuations interannuelles très importantes fortement liées à la variabilité des précipitations (Boussard et Chabane, 2011; Abis, 2012), la croissance démographique, le développement économique (Abis, 2012) et la maîtrise insuffisante de la culture.



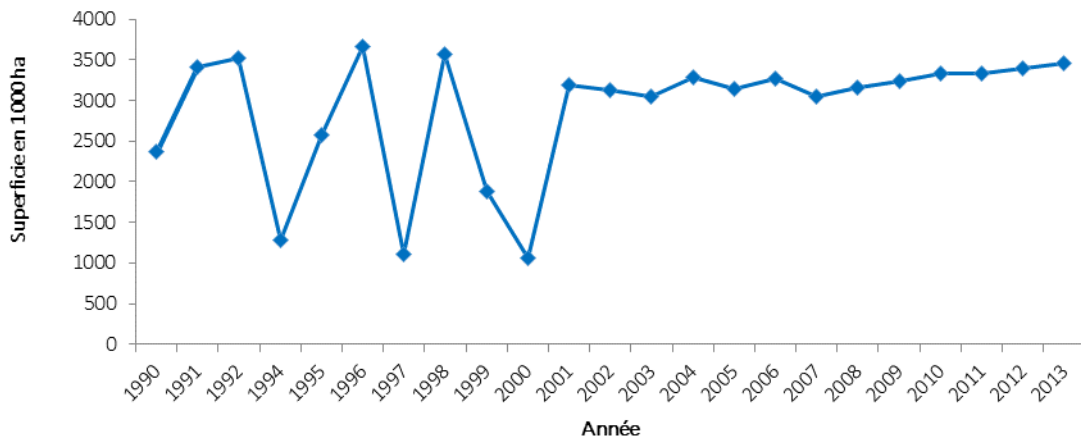


Figure 1. Evolution de la superficie annuelle emblavée par les principales céréales (blé dur, blé tendre, orge et avoine) en Algérie (source MADR, 2015)

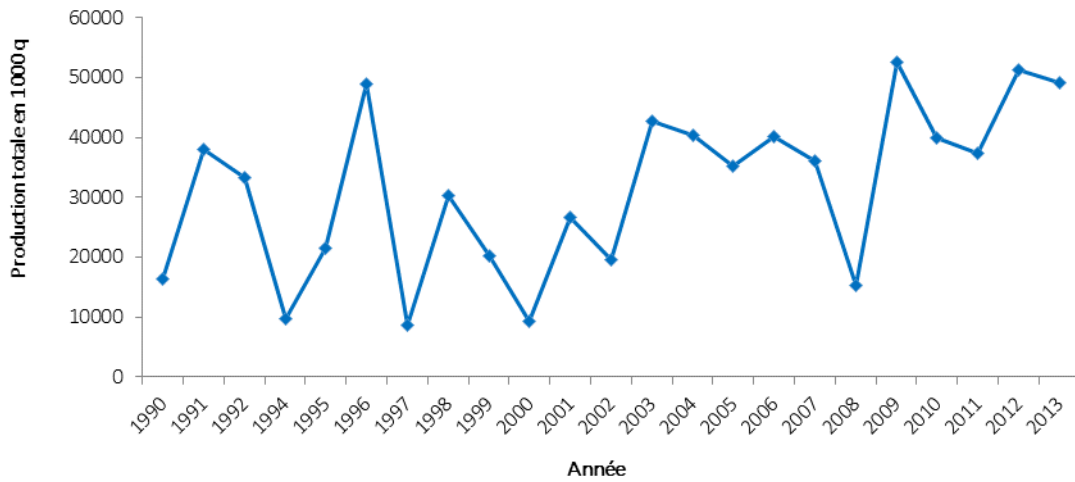


Figure 2. Evolution de la production annuelle en céréales (blé dur, blé tendre, orge et avoine) en Algérie (source MADR, 2015)

Malgré les efforts fournis pour développer la céréaliculture et améliorer les rendements, l'Algérie se retrouve dans l'impossibilité de produire des quantités suffisantes pour répondre à la demande locale (Abis, 2012).

Selon Sinacer (2013), la production nationale des céréales a atteint 4,91 Mt en 2012/2013, considérée insuffisante puisque le niveau de consommation annuel est estimé à environ 8 Mt.

A l'échelle mondiale, les produits céréaliers représentent environ 40 % de la valeur des importations des produits alimentaires (Djermoun, 2009). D'après Boussard et Chabane (2011), les céréales constituent la facture alimentaire la plus importante du pays, les importations ont augmenté aussi bien en valeur qu'en volume.

L'Algérie est l'un des premiers importateurs de blé au monde, notamment le blé tendre, la demande locale reste importante (Sinacer, 2013). Les quantités de blé importées ont atteint 3,97 millions de tonnes durant le 1<sup>er</sup> semestre 2011 (Boussard et Chabane, 2011). Alors qu'en 2013 (dix premiers mois), les importations de blé ont atteint 5,334 Mt ; 1,04 Mt pour le blé dur et 4,282 Mt pour le blé tendre (Sinacer, 2013).

D'après les figures 3, 4 et 5, on remarque que les superficies, les productions ainsi que les rendements moyens des principales céréales, en Algérie, connaissent des fluctuations interannuelles qui s'explique en partie par la variabilité climatique (faiblesse des précipitations) mais aussi par une conduite technique non adaptée. Les rendements ne dépassent pas 18 q/ha. Le rendement de blé dur varie de 7 à 17,9 q/ha.

Les cultures céréalières étant largement pratiquées par les agriculteurs (60 % de l'effectif global), associées à la jachère dans la majorité des exploitations (Djermoun, 2009), leur conduite technique reste traditionnelle. Elle est caractérisée par un faible apport d'engrais et/ou application d'engrais non adapté aux caractéristiques physico-chimiques du sol et une lutte contre les adventices insuffisante et non maîtrisée.

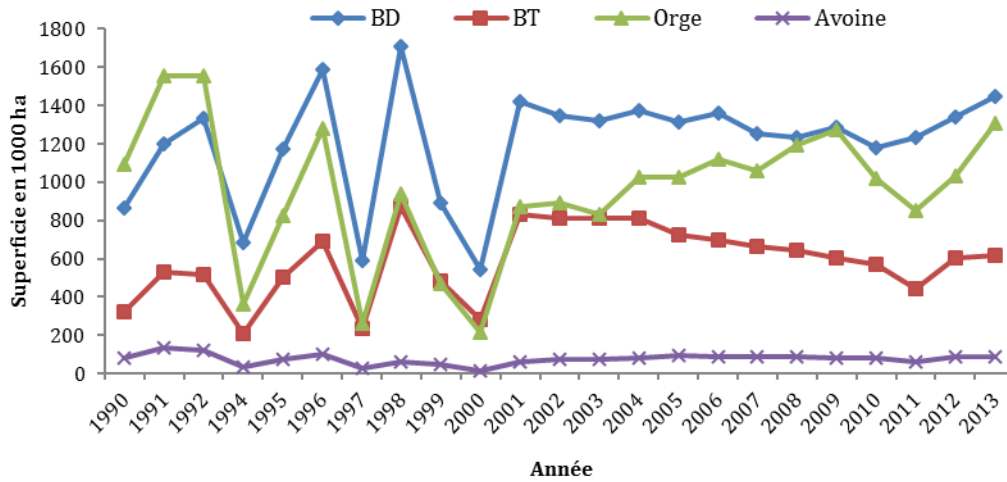


Figure 3. Evolution des superficies des principales céréales en Algérie (MADR, 2015)

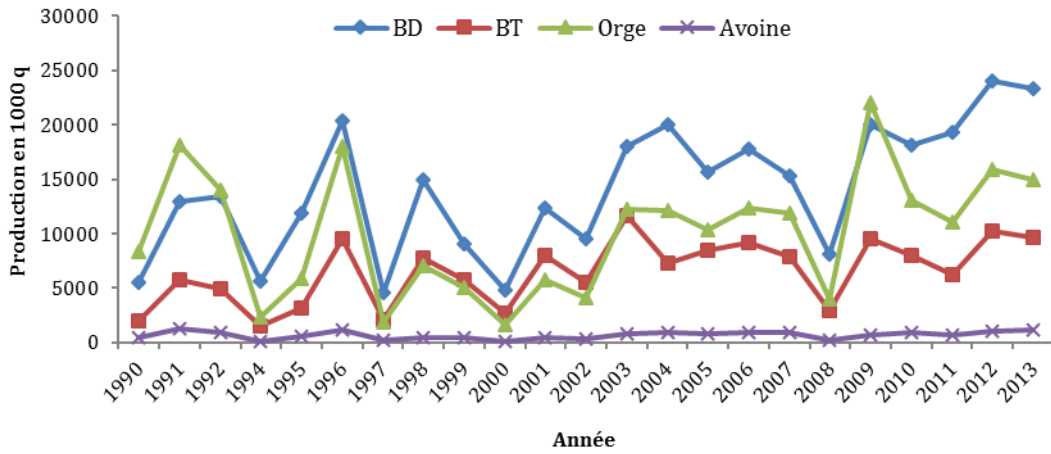


Figure 4. Evolution des productions des principales céréales en Algérie (MADR, 2015)

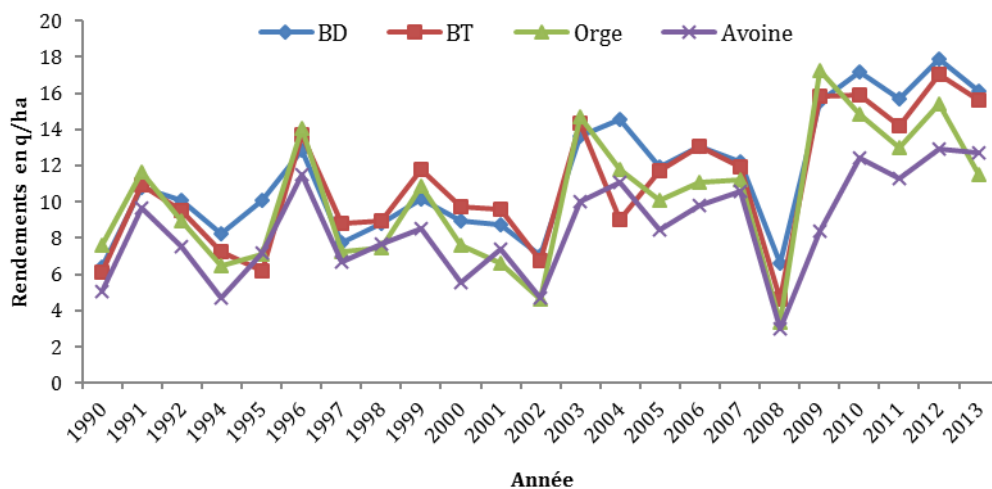


Figure 5. Evolution des rendements des principales céréales en Algérie (MADR, 2015)

En terme d'importance des emblavures en céréales, le blé dur occupe la première place avec environ 42 % suivi par l'orge (38 %), le blé tendre (18 %) et enfin l'avoine (2,5 %).

La création de grands périmètres irrigués, dans le cadre de la mise en valeur des régions arides algériennes, avait comme objectifs l'amélioration de la production céréalière et notamment le blé dur. Les wilayas du sud Algérien concernées sont Adrar, Laghouat, Biskra, Bechar, Tamanrasset, Ouargla, Illizi, Tindouf, El-oued et Ghardaïa.

La contribution de ces régions reste faible, la production des principales céréales des wilayas du sud représente 2 et 8 % de la production nationale, et la superficie emblavée varie entre 1 et 3 % de la superficie totale à l'échelle nationale.

En se référant aux figures 6 et 7 représentant respectivement les évolutions de la superficie, production et rendement de blé dur dans les régions sahariennes selon les années, on observe des tendances à l'augmentation aussi bien de la superficie que des productions annuelles.

La figure 6 illustre trois phases distinctes, la première phase allant de 1990 et 1999 évolue en dents de scie, puis les superficies se sont stabilisées entre 1999 et 2008. La dernière phase marque une augmentation des superficies à partir de 2008 jusqu'à 2013. Les superficies sont passées de 10 140 ha en 1994 à 30 979 ha en 2013.

La production en blé dur présente des variations non accentuées entre 1990 et 2008 sauf le pic de production enregistré en 1996 de 664 171 q (figure 7). Au-delà de l'année 2008, la production n'a cessé d'augmenter pour atteindre 964 647 q en 2013. Cette augmentation peut être attribuée à l'augmentation des superficies emblavées en blé dur dans ces régions.

Le rendement en grain moyen du blé dur réalisé dans les régions du sud algérien est nettement supérieur au rendement en grain obtenu à l'échelle nationale. Les écarts entre les deux rendements enregistrés ont dépassé 50 % pour la plupart des années, alors que l'écart le plus faible (21 %) est enregistré en 1992.

La courbe d'évolution du rendement en grain moyen au sud (figure 8) varie de 13 q.ha<sup>-1</sup> (1992) et 36 q.ha<sup>-1</sup> (1999). Le rendement moyen national a varié en augmentant entre 6 q.ha<sup>-1</sup> et 15 q.ha<sup>-1</sup> obtenus en 1990 et 2013 respectivement.

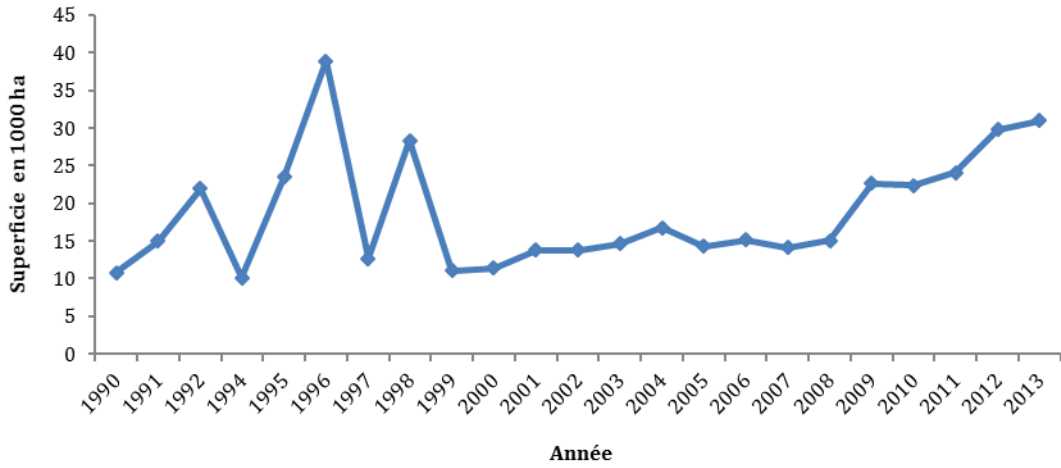


Figure 6. Evolution des superficies emblavées en blé dur au Sud Algérien (source MADR, 2015)

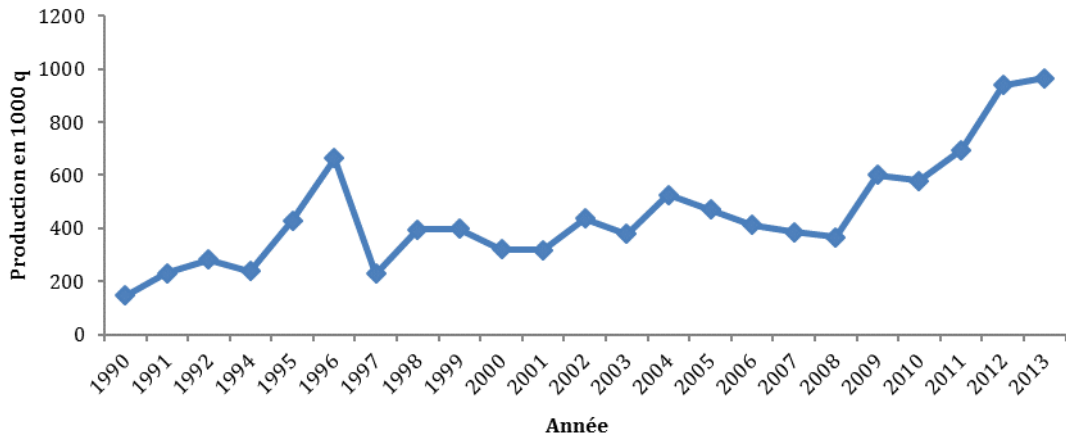


Figure 7. Evolution des productions du blé dur au Sud Algérien (source MADR, 2015)

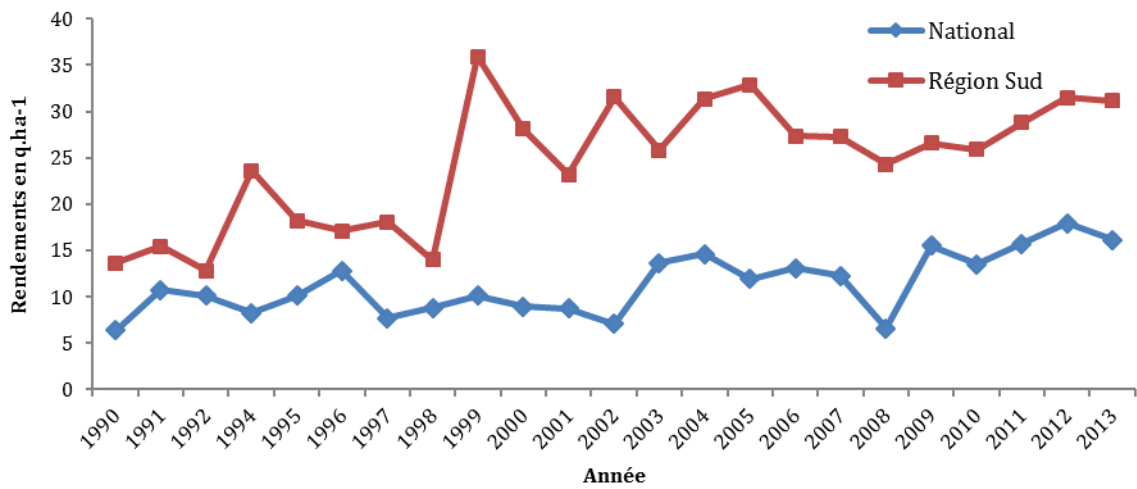


Figure 8. Evolution des rendements en grain du blé dur en Algérie (Source MADR, 2015)

## **II. Consommation des engrais à l'échelle nationale**

L'Algérie est riche en ressources naturelles dont deux des principales matières premières nécessaires à la fabrication des engrais, le phosphate naturel et le gaz naturel. La fabrication des engrais azotés et phosphatés satisfait non seulement les besoins du marché intérieur mais permet aussi l'exportation (FAO, 2005).

De 1987 à 1997, la consommation d'engrais a très fortement chuté à cause de la disparition des subventions et donc de la hausse des charges supportées par les exploitations (Bedrani et Chehat, 2001 in FAO, 2005) ; un « ajustement structurel » a impliqué une redistribution des terres, la libération des marchés et, par conséquent, une augmentation des prix des engrais (FAO, 2005).

Une reprise de la demande en engrais a été constatée qui est passée de 239 000 tonnes pour la campagne 2009/2010 (28 kg/ha) à 393 561 tonnes (46 kg/ha) (Site électronique). Selon la même source, des mesures incitatives étaient à l'origine de cette augmentation de consommation des engrais, comme, le soutien à l'utilisation des engrais (20 %), exonération de la TVA, et diversification de produits fertilisants et de fournisseurs.

Alors que la quantité minimale recommandée par la FAO est de 50 kilogrammes de fertilisants par hectare, la quantité utilisée en Algérie en 2013 n'a pas excédée 15,3 kilogrammes par hectare (Banque mondiale, 2015). Par conséquent, cette quantité reste en deçà des normes d'intensification des cultures et d'amélioration de la productivité.

L'apport des engrais est très important pour l'obtention de bon rendement chez le blé comme chez toutes les plantes cultivées. Parmi les éléments nécessaires pour une bonne production, le phosphore sera détaillé ci-dessous.

### III. Importance du phosphore dans la nutrition des plantes

#### III.1. Rôles et importance du phosphore

Le phosphore est l'un des éléments majeurs nutritifs pour les plantes qui affecte directement ou indirectement tous les processus biologiques (Ragothama, 2005).

Il participe à tous les stades de développement des végétaux en sa qualité de support énergétique (Duthil, 1973 ; Chaturvedi, 2006a). Il est important pour la croissance des plantes et favorise le développement des racines, du tallage, de la précocité à la floraison, et il complète d'autres fonctions telles que les activités métaboliques, en particulier la synthèse des protéines (Tanwar et Shaktawat, 2003). En absence d'apport, Il peut devenir un obstacle majeur à la croissance de la culture et la production des rendements (Korkmaz *et al.*, 2010).

L'application des engrais phosphatés est essentielle pour l'obtention d'un rendement optimal des cultures lorsque les sols sont limités en Phosphore (Shujie et Yunfa, 2011). Mais les quantités de phosphore exportées par les récoltes doivent être remplacées par l'application d'engrais phosphatés et de fumier pour maintenir l'équilibre du phosphore du sol. L'objectif de la fertilisation est de satisfaire les besoins des plantes en complétant l'offre du sol en éléments minéraux dans des conditions économiquement rentables et respectueuses de l'environnement (LLorens, 2001). Après l'azote, le phosphore est l'engrais le plus utilisé à travers le monde (Batten, 1992).

D'après Grant *et al.* (2005) et Storia *et al.* (2013), les apports de phosphore dépendent de la concentration de cet élément dans le sol, de l'application d'engrais phosphatés et des conditions environnementales qui affectent la quantité de phosphore disponible pour la plante et la croissance des racines. Des quantités adéquates en NPK peuvent influencer le rendement en grain et en protéines du Soja (Mazhar et Mallarino, 2005).

Dans un essai au champ, l'étude des effets de différentes doses d'engrais sur la croissance, le rendement et l'absorption des éléments nutritifs de trois variétés de blé réalisée par Laghari *et al.* (2010) a montré que des apports de 120-60-60 kg NPK/ha ont favorisé les meilleurs nombre de talles, longueur des épis, indice de récolte, rendement

en biomasse, surface foliaire et prélèvements de NPK par le blé. Dans le même contexte, l'augmentation des niveaux de phosphore à des doses allant de 60 à 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, augmentent significativement le rendement en grain et les prélèvements du phosphore par la culture du blé (Saha *et al.*, 2014).

### III.2. Disponibilité du phosphore dans le sol

Le phosphore est considéré comme l'un des éléments nutritifs le moins disponible dans le sol et sa disponibilité dans le sol est un facteur déterminant de la productivité des cultures (Ragothama et Karthikeyan, 2005). Le rendement et la qualité des récoltes sont aussi largement affectés par les concentrations disponibles de phosphore du sol (Fien et Bart, 2013).

Le phosphore assimilable (ou accessible pour les plantes) est la fraction capable de participer, à la fois, à l'alimentation du végétal et au maintien de la concentration de la solution du sol en phosphore. Cependant durant tout le cycle de croissance, la quantité d'ions phosphatés dans la solution du sol ne représente qu'environ 1 % de la quantité prélevée par les plantes. Par conséquent, environ 99 % du phosphore pris par les plantes provient de la phase solide (Grant *et al.*, 2005). Même si les niveaux de phosphore augmentent avec la fertilisation phosphatée, la teneur en phosphore disponible reste faible, d'où l'importance de raisonner les apports de phosphore pour satisfaire les besoins des plantes (Storia *et al.*, 2013) ; les pertes de phosphore par ruissellement ou lixiviation augmentent avec l'accroissement des concentrations de phosphore du sol (Rubaek *et al.*, 2010).

Dans le sol, la disponibilité du phosphore est influencée par différents facteurs, à savoir l'humidité du sol, le taux de matière organique, le taux d'argile, le pH de la solution du sol et le taux de calcaire. Ce dernier a une influence sur le pH du sol qui influe à son tour sur l'assimilation du phosphore.

En conditions de disponibilité limitée du phosphore (sols calcaires), les quantités de phosphore adsorbées par le sol augmentent avec l'augmentation de la concentration en phosphore de la solution du sol (Aslam *et al.*, 2000). Par contre, si cette teneur diminue dans le temps, le débit d'alimentation pour les plantes diminue également (Barrow, 1990).



### III.3. Effet d'une déficience en phosphore

Après le stress azoté, le phosphore est la deuxième carence la plus répandue en éléments nutritifs dans les systèmes de cultures céréalières à travers le monde (Balemi et Negisho, 2012 in Saha *et al.*, 2014). La carence en phosphore limite la croissance, le développement et la reproduction chez les plantes (Czanecki *et al.*, 2013).

La déficience en phosphore est souvent grave et se manifeste par des symptômes typiques chez les plantes (retard de croissance, coloration vert foncé des feuilles causée par l'accumulation d'anthocyanes et des nécroses foliaires). Cette carence est généralement corrélée à une diminution des niveaux d'ATP, de l'activité photosynthétique et de la conductance stomatique (Dietz et Heilos, 1990), tous ces résultats réduisent la biomasse produite.

Le manque de phosphore diminue le taux d'apparition des feuilles du blé tendre, le nombre de feuilles et la surface foliaire par plante (Gutiérrez et Thomas, 1998); par conséquent une chute du rendement en grain du blé (Prats *et al.*, 1971; Charles, 1976 ; Sandaña et Pinochet, 2014).

Chez les céréales, la déficience phosphatée entraîne une diminution de la biomasse aérienne, en réduisant la surface foliaire qui se traduit par un retard dans le rythme d'apparition des feuilles et la réduction de la vitesse de leur expansion entraînant la réduction de la taille finale des feuilles. Par conséquent, il y aura une faible demande pour les photo-assimilats au niveau de la partie aérienne, favorisant leur translocation vers les racines qui se développeront d'avantage en quête de phosphore (Amann et Amberger, 1989 in Djadjaglo et Richter, 2008 ; Basirat *et al.*, 2011).

## IV. Acquisition du phosphore par la plante

### IV.1. Acquisition par voie racinaire

Le phosphore est absorbé par les racines principalement sous forme d'orthophosphate (Pi)  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et très peu sous forme de  $\text{HPO}_4^{2-}$  de la solution du sol (Fardeau et Frossard, 1991 ; Schachtman *et al.*, 1998 ; Hopkins, 2003 ; Raghothama et Karthikeyan, 2005 ; Basirat *et al.*, 2011 ; Czarnecki *et al.*, 2013; Stora *et al.*, 2013 ; Gerke,

2015). Ce prélèvement est un processus actif qui est facilité par des transporteurs spécifiques (Schachtman *et al.*, 1998 ; Raghothama, 1999).

Le prélèvement du Pi par la racine provoque l'apparition d'une zone de déplétion au voisinage de la racine, dans laquelle la concentration en Phosphore est beaucoup plus faible que celle observée dans la solution du sol éloignée de la racine. Le Pi migre très lentement, puisque c'est un ion très fortement adsorbé sur les particules de sol (Schachtman *et al.*, 1998).

Lors de son prélèvement par une plante, le Pi doit affronter deux obstacles. D'une part, il doit être transféré contre un gradient de concentration puisqu'il est présent à des concentrations comprises entre 0,01 et 0,1 mM dans les solutions des sols agricoles, alors que dans les cellules de la racine sa concentration atteint des valeurs comprises entre 5 et 20 mM (Raghothama, 1999). D'autre part, Pi doit être transféré contre un gradient électrochimique puisque, comme la membrane cytoplasmique, les ions orthophosphates  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$  sont chargés négativement. Pour résoudre ce problème, les plantes prélèvent leur Pi par l'intermédiaire de protéines de type  $\text{H}^+$ -ATPase qui permettent le co-transport de  $\text{H}^+$  et Pi depuis le milieu extracellulaire vers l'intérieur de la cellule (Schachtman *et al.*, 1998).

Une fois absorbé par les racines, l'assimilation du phosphore se fait par formation d'un ester avec un groupe hydroxyle d'une chaîne de carbone (exemple sucre phosphate) ou attaché à un autre Pi en formant une liaison pyrophosphate riche en énergie (exemple ATP) (Marschner *et al.*, 2012 in Czarnecki *et al.*, 2013).

Les mycorhizes sont des symbioses qui s'instaurent entre les racines de plantes et certains champignons du sol. Ils sont bénéfiques pour les plantes et la production agricole car ils améliorent significativement l'absorption des nutriments en particulier le phosphore et les oligo-éléments tels que le zinc et le cuivre (Ortas *et al.*, 2002 ; Yao *et al.*, 2001 ; Brenda *et al.*, 2014 ; Fahramand *et al.*, 2014). Selon Ayling *et al.* (1997), le flux net de nutriments, en particulier le phosphore, du sol dans la plante est plus grand chez les plantes mycorhizées par rapport aux plantes non mycorhizées ; ces champignons sont responsables de plus de 50 % des prélèvements de phosphore (Li *et al.*, 2006). Ils stimulent également des substances de croissance et aident les plantes à mieux résister

aux stress environnementaux, la sécheresse et l'attaque par les agents pathogènes (Brenda *et al.*, 2014 ; Fahramand *et al.*, 2014).

Il est connu que les associations mycorhiziennes naturelles sont plus fréquentes dans les sols où la disponibilité en éléments minéraux est faible (Boukcim et Mousain, 2001 ; Grant *et al.*, 2005 ; Fahramand *et al.*, 2014). Ainsi, divers travaux réalisés en conditions contrôlées et aux champs ont mis en évidence l'effet de la concentration en nutriments (principalement le phosphore) sur l'établissement d'associations chez diverses espèces végétales. Cet effet se traduit généralement par une diminution du degré de colonisation des racines par les mycorhizes à des niveaux de fertilité élevés, notamment en phosphore (P) (Grant *et al.*, 2005 ; Li *et al.*, 2006 ; Brenda *et al.*, 2014).

Il existe d'autres microorganismes dans le sol, ce sont les bactéries solubilisant le phosphate. Ces souches affectent positivement la germination des grains de blé, la longueur des racines et des tiges (Fatima *et al.*, 2009) ; et augmentent simultanément l'absorption de phosphore par la plante et le rendement des cultures des plantes (Rodríguez et Fraga, 1999 ; Fatima *et al.*, 2009 ; Panhwar *et al.*, 2011).

L'application de simple super phosphate mélangé à un solubilisant de phosphate (*Pseudomonas striata*) améliore significativement les composantes du rendement, rendement en grain et les prélèvements de N, P et K par le blé tendre (*Triticum aestivum*) par rapport au témoin (Chaturvedi, 2006b).

#### **IV.2. Acquisition par voie foliaire**

L'apport d'engrais au sol est la méthode la plus courante pour la fourniture des éléments minéraux aux plantes. Dans ce cas, ces éléments sont absorbés par les racines. Cependant, les plantes supérieures peuvent absorber les éléments par voie foliaire lorsqu'ils sont apportés à des concentrations appropriées (Fageria *et al.*, 2009). Donc, la racine n'est pas le seul organe qui est impliqué dans l'absorption des nutriments. Le feuillage comportant les feuilles, la tige, l'inflorescence et les fruits peuvent aussi absorber des éléments nutritifs.

Les travaux de Barber (1995), Goos et Johnson (2001) et Pandey *et al.* (2013) montrent que la biodisponibilité du phosphore est essentiellement régie par le pH de la solution du sol, sa vitesse de diffusion et sa forte fixation aux particules du sol. Par

conséquent, l'application d'engrais à absorption foliaire peut être une stratégie efficace pour pallier à la faible biodisponibilité du phosphore dans le sol et pour l'amélioration immédiate du déficit nutritionnel (Goos et Johnson, 2000 ; Girma *et al.*, 2007). Mais elle ne peut couvrir qu'en partie l'absorption insuffisante par les racines (Ling et Silberbush, 2002 ; Pandey *et al.*, 2013).

L'acquisition d'éléments nutritifs inorganiques par les racines est interdépendante avec les activités d'assimilation au niveau des feuilles. Lorsqu'ils sont appliqués sur le feuillage, leur pénétration et leur absorption dans la plante par les différentes voies dépend principalement de la charge ionique sur la surface de la plante et la taille moléculaire (Pandey *et al.*, 2013), et exige une surface foliaire suffisante pour que l'engrais foliaire devienne efficace (Ling et Silberbush, 2002).

Des recherches antérieures ont montré que l'application foliaire des nutriments traverse la cire cuticulaire, la cuticule, la paroi cellulaire et la membrane successivement (Franke, 1967 in Fageria *et al.*, 2009).

Toutefois, il a été découvert plus tard que les stomates sont les principaux moyens d'absorption des éléments nutritifs dans la plante (Eichert et Burkhart, 2001 in Girma *et al.*, 2007). Lorsqu'ils sont ouverts, l'absorption foliaire est souvent plus facile (Burkhart *et al.*, 1999 in Fageria, 2009).

Les résultats obtenus par Girma *et al.* (2007) montrent que l'application foliaire améliore les rendements en grain et en biomasse du Maïs (*Zea mays*), ainsi que l'efficacité d'utilisation du phosphore en minimisant les quantités de phosphore apportées au sol par les fertilisants.

Selon Goos et Johnson (2001), l'application précoce du Phosphore foliaire (stade 4-5 feuilles du blé) augmente les prélèvements en phosphore. Une autre étude réalisée par Mosali *et al.* (2006) indique qu'une pulvérisation de phosphore foliaire au stade deux nœuds chez le blé d'hiver améliore le rendement en grain et l'absorption du phosphore ; alors qu'au stade épiaison, elle permet d'obtenir une meilleure efficacité d'utilisation du phosphore (EUP).

Avila *et al.* (2012) ont trouvé qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux sources d'engrais foliaires phosphite ( $\text{KH}_2\text{PO}_3$ ) et phosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ).

L'application foliaire a affecté significativement la concentration du phosphore des feuilles et non pas le rendement en grain de la culture par rapport au témoin (Avila *et al.*, 2012 ; Ali *et al.*, 2014).

L'efficacité du phosphore foliaire dépend du statut du phosphore du sol, de l'état hydrique du sol, de l'espèce végétale, de la forme chimique de l'engrais et des conditions climatiques régnantes (Noack *et al.*, 2010). D'après Hu *et al.* (2008), le stress hydrique a réduit l'absorption des éléments K, Ca, Mg et P, ce qui peut être attribuée à une réduction de la transpiration des plants de Maïs.

Les résultats de Fernández *et al.* (2014) révèlent que la carence en phosphore a modifié la structure de la surface et le fonctionnement des feuilles du blé, et elles sont devenues moins perméables à l'engrais foliaire.

Selon Ling et Silberbush (2002), l'efficacité de la fertilisation foliaire semble être limitée par la capacité de rétention de la surface de la feuille, ce qui a limité la pénétration des solutés ; cette dernière peut être renforcée par l'utilisation d'adjuvants (Noack *et al.*, 2010).

### **IV.3. Efficience d'utilisation du phosphore par les plantes**

Dans le but d'améliorer la productivité des céréales en général et du blé en particulier, dans les conditions de la pratique de la fertilisation des agriculteurs, l'amélioration de la nutrition minérale chez cette culture doit être étudiée profondément. Puisque cette culture est cultivée sur des sols considérés assez pauvres en azote et en phosphore, nous nous concentrons sur le phosphore.

En effet, la fertilisation phosphatée améliore significativement la croissance, le rendement en grain, ses composantes ainsi que les prélèvements des éléments nutritifs du blé (Laghari *et al.*, 2010 ; Boukhalfa-Deraoui *et al.*, 2011). Elle améliore, également, la qualité du grain de blé qui est étroitement liée à la qualité des protéines (Păunescu *et al.*, 2009). Cependant, des apports excessifs d'engrais phosphatés peuvent influencer négativement la croissance et le développement des plantes du blé (Laghari *et al.*, 2010). D'après Gao et Grant (2012), cet effet peut être attribué à l'interférence du P avec le Zn, la concentration de ce dernier (Zn) diminuerait, par réduction de sa translocation vers les parties aériennes.

Les travaux antérieurs de Moll *et al.* (1982) utilisant l'azote (N), définit l'efficacité d'utilisation de l'élément (EU) chez le maïs (*Zea mays* L.) comme étant le rendement en grain (RDT) par unité de l'élément fertilisant apporté (sol + engrais). Cette efficacité peut être décomposée en efficacité d'absorption (EAP) et en efficacité d'utilisation (ECUP) selon la formule suivante :

$$EUP = \frac{RDT}{P_{\text{apporté}}} = \left( \frac{RDT}{P_{\text{absorbé}}} \right) * \left( \frac{P_{\text{absorbé}}}{P_{\text{apporté}}} \right)$$

Où  $\left( \frac{RDT}{P_{\text{absorbé}}} \right)$  désigne le rendement en grain par unité de phosphore absorbé (Moll *et al.*, 1982 ; White & Brown, 2010) ou encore l'efficacité d'utilisation (ECUP), traduit la capacité de la plante à convertir le phosphore absorbé en rendement grain et  $\left( \frac{P_{\text{absorbé}}}{P_{\text{apporté}}} \right)$  désigne la quantité de phosphore absorbé par rapport à la quantité de phosphore apporté (EAP) (Moll *et al.*, 1982 ; White & Brown, 2010), qui traduit la capacité de la plante à extraire le phosphore du sol.

L'efficacité d'absorption est influencée par plusieurs facteurs liés à la plante, et qui sont surtout liés à l'enracinement (densité et longueur) (Sandaña et Pinochet, 2014), la colonisation par des mycorhizes (Djadjaglo et Ritchter, 2008), et les exsudats racinaires (Dakora et Philips, 2002).

Sandaña et Pinochet (2014), étudiant l'efficacité d'utilisation du phosphore (EUP) de deux espèces, blé tendre (*Triticum aestivum*) et pois (*Pisum sp.*), ont conclu qu'en conditions de déficience phosphatée, le blé a montré une EUP supérieure à celle du pois. Cependant, les différences entre les deux espèces sont attribuées à des différences dans l'utilisation du phosphore (ECUP) plutôt que de l'efficacité de l'absorption du phosphore.

#### **IV.4. Importance de la réserve initiale de la semence en Phosphore sur l'expression des performances de la culture**

Le prélèvement de phosphore est faible pendant les stades précoces de développement de la culture, la plante utilisant alors les réserves phosphatées présentes dans la graine sous forme de phytate. Selon Gervy (1970), un blé d'hiver, du semis jusqu'à la fin du tallage, ne puise tout au plus qu'1 g de P/m<sup>2</sup> dont 1/10 était contenu

dans le grain semé. Puis le rythme des prélèvements s'accélère rapidement et passe à 400 g/ha/jour de P pendant les périodes de montaison et d'épiaison.

Selon Djadjaglo et Richter (2008), quelle que soit l'espèce végétale (Sorgho ou Haricot), deux semaines après semis, les plants présentent une croissance homogène, indépendamment de la teneur en phosphore du sol. Probablement que les jeunes plantules ont utilisé le P contenu dans les semences.

## V. Facteurs influençant la disponibilité du phosphore dans le sol

### a) Effet du pH du sol

L'utilisation du phosphore par les plantes est déterminée par les formes ioniques de cet élément. La forme ionique, en revanche est déterminée par le pH de la solution dans laquelle l'ion est fondu.

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 ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) ou bivalent ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), tous deux facilement disponibles dans la solution du sol pour la nutrition de la plante (Hountin, 1996). Pour un pH du sol inférieur à 6,8 la forme de phosphore qui domine est le monophosphate, l'anion monovalent ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) est une forme facilement absorbée par les racines des plantes. Pour un pH entre 6,8 et 7,2 la forme prédominante est le  $\text{HPO}_4^{2-}$ , forme d'ion phosphorique plus difficilement absorbable par la plante (Hopkins, 2003). Les plantes absorbent le phosphore sous forme d'ions orthophosphates. Lorsque le pH augmente, apparaissent en premier lieu les ions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et en deuxième lieu les ions  $\text{HPO}_4^{2-}$  (figure 9).

La disponibilité du phosphore pour les plantes est maximale à un pH proche de la neutralité (figure 10) ; tout changement de pH, dans les deux sens, provoque sa diminution (Storia *et al.*, 2013). Le calcaire dans le sol influe sur son pH qui influe à son tour sur l'assimilation du phosphore. Dans le même contexte, Comifer (2002) et Busman *et al.* (2002) indiquent que les réactions réduisant la disponibilité du phosphore se produisent à toutes les valeurs de pH mais sont plus prononcées dans les sols alcalins ayant un pH >7,3 et dans les sols acides ayant un pH <5,5 ; d'où la faible réponse des cultures aux engrais phosphatés dans les sols acides et calcaires (Whitehead, 2000 in Storia *et al.*, 2013).

### **b) Effet du calcaire**

Dans les sols calcaires, riches en  $\text{Ca}^{2+}$ , la forme dominante du phosphore est celle du Ca-P (phosphate lié au calcium) (Mckenzie *et al.*, 2003 ; Samadi, 2006), caractérisée par une faible labilité (Gachon et Triboi, 1988).

Selon Samadi (2006),  $\text{Ca}_2\text{-P}$  est la forme de phosphore la plus facilement absorbée par les plantes de ray-grass (*Lolium perenne* cv Roper), elle est fortement liée ( $r = 0,91$ ) au phosphore assimilable (Olsen P) du sol par rapport aux fractions Al-P, Fe-P et CaO-P. L'étude d'Aslam *et al.* (2000) sur le comportement du phosphore dans plusieurs échantillons du sol caractérisés par des degrés de concentrations de calcaire différents, montre que le maximum de phosphore est fixé par le sol qui présente le maximum de  $\text{CaCO}_3$  libre. Cette constatation est confirmée par Naseri *et al.* (2010), qui indique que la carence en phosphore est très répandue dans les sols calcaires ; et c'est le principal facteur limitant des rendements des cultures annuelles dans les sols acides et alcalins (Fageria, 2001).

### **c) Effet de la texture du sol**

La disponibilité du phosphore dépend du pouvoir fixateur des sols, lié à la nature et à la finesse des constituants du sol (Benamara et Conesa, 1976 ; Pellerin *et al.*, 2006). La teneur en phosphore d'un sol croît avec la finesse de la texture, l'argile en contient plus que le sable (Bayens, 1967). Par conséquent, le phosphore est moins soluble dans les sols argileux que dans les sols sableux.

Des corrélations entre l'adsorption du phosphore et le taux d'argile ont été observées (Soon, 1991 ; Sanyal *et al.*, 1993). Selon Badraoui *et al.* (1997), le type d'argile influe aussi. La kaolinite et les oxydes de fer et d'aluminium retiennent beaucoup plus de phosphore que les argiles de type 2/1 (montmorillonite).

### **d) Effet de la matière organique**

La matière organique constitue une source appréciable d'ions phosphoriques pour la plante. D'après Dutil (1976) et Triboi (1988), elle représente une réserve non négligeable de phosphates adsorbés sur les sites humiques vis-à-vis desquels, elles ont un effet protecteur.



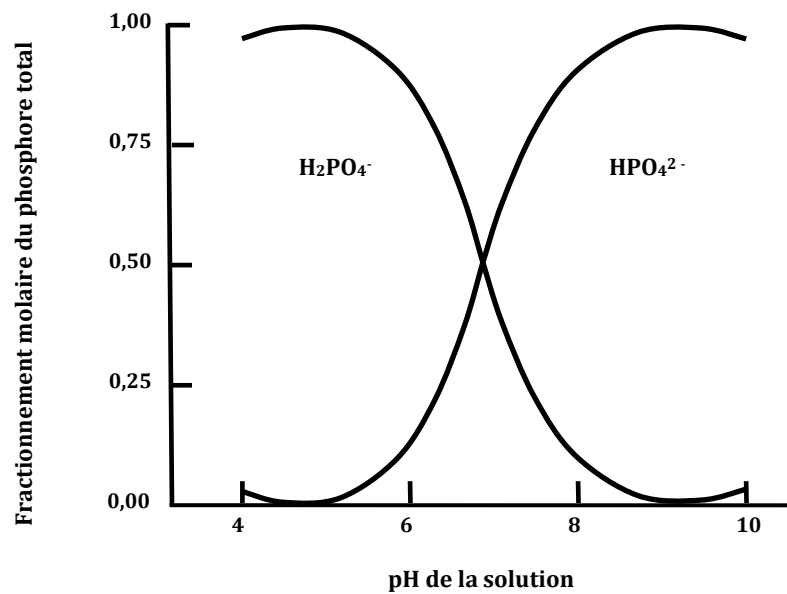


Figure 9. Effet du pH de la solution du sol sur les formes solubles du phosphore (Barber, 1995)

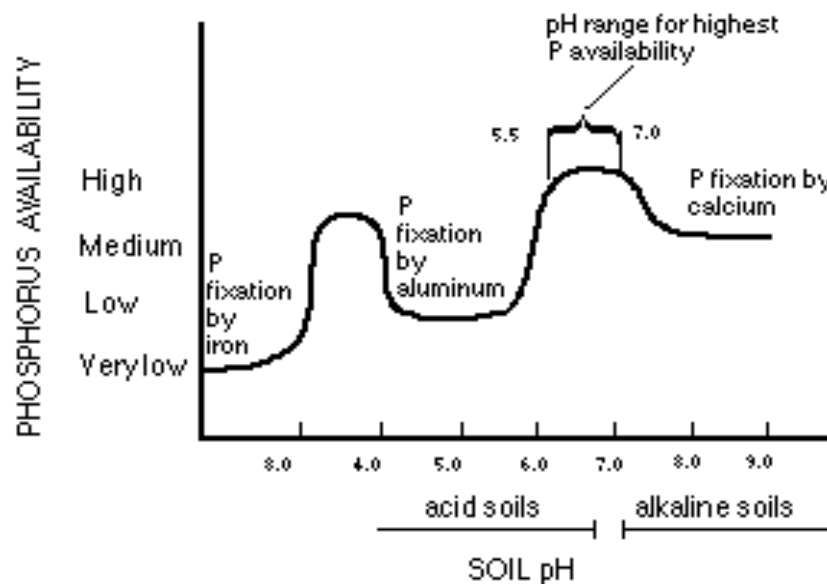


Figure 10. Variation du phosphore assimilable en fonction du pH (Busman *et al.*, 2002)

D'après Ghazanshahi et Jaouich (2001), l'absorption et la disponibilité du phosphore dans le sol dépendent 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.

L'apport de substances organiques se révèle bénéfique dans la mobilisation du phosphore du sol (Dutil, 1976 ; Triboui, 1988). Selon Gervy (1970), les acides organiques tels que les citrates, les oxalates et les lactates, issus de la décomposition de la matière organique dissolvent les phosphates de fer, d'aluminium et de calcium. Fardeau (1993) indique dans le même contexte que les quantités de phosphates fixés diminuent lorsque le contenu en matière organique croît. Donc la disponibilité phosphorique est d'autant meilleure que les sols sont mieux pourvus en matière organique, ce qui laisse supposer que l'adsorption ou les liaisons au niveau des composés humiques constituent une possibilité de mise en réserve non négligeable (Dutil, 1976).

#### **e) Effet du type d'engrais**

La disponibilité du phosphore pour les plantes varie en fonction des caractéristiques du sol, des engrais apportés, leur solubilité qui dépend largement de la forme ionique de phosphore présent dans l'engrais ajouté (Khurana *et al.*, 2003 in Saha *et al.*, 2014). Seulement 10 à 20 % du phosphore des engrais apportés annuellement sont utilisés par les cultures (Gahoonia *et al.*, 1992).

L'ajout de nutriments dans des formes efficacement utilisées par les plantes peut favoriser la croissance des plantes et augmenter la production agricole, par conséquent, les quantités d'engrais et les risques environnementaux seront réduits (El-gharbaly *et al.*, 2010).

Les différentes sources d'azote contribuent dans le changement de pH du sol au niveau de la rhizosphère. Gahoonia *et al.* (1992) indiquent que l'apport d'azote sous forme NH<sub>4</sub>-N favorise la solubilisation du phosphore par rapport au NO<sub>3</sub>-N.

## VI. Facteurs influençant les prélèvements du phosphore par la plante

### a) Effet de l'état hydrique du sol

La disponibilité du phosphore est affectée par l'eau du sol (Rahim *et al.*, 2007). Une certaine humidité est toujours nécessaire pour l'absorption des ions phosphatés par les plantes, car la dessiccation diminue la solubilité des phosphates. Elle est également nécessaire pour le processus de diffusion qui est le moyen important de transport du phosphore de la solution jusqu'à la surface racinaire (Blanchet *et al.*, 1978 ; Barker et Pilbeam, 2007).

Mullen (2003), indique que la gestion de l'humidité du sol influence fortement l'utilisation des engrais phosphatés par la plante. Dans la plupart des conditions, le phosphore est appliqué près de la surface du sol. Ainsi, pendant les périodes sèches dans les systèmes de production non irrigués, les déficiences en phosphore peuvent surgir (Hanway et Olsen, 1980). Elles sont plus précoces en année sèche, alors qu'en année humide elles sont plus tardives et souvent plus légères (Charles, 1976).

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). La faible teneur en eau du sol diminue fortement la solubilité de certains éléments et rend son absorption racinaire inefficace (Walworth *et al.*, 2006), et le phosphore devient moins accessible aux plantes (Mullen, 2003).

Les travaux de Gutiérrez et Thomas (1998) et d'He *et al.* (2002) montrent que le maintien du sol à une capacité de rétention de 75 % et 80 % respectivement, influence significativement le rendement en biomasse et les prélèvements du phosphore par les plants de blé. De même, El-Ghamry *et al.* (2009) indiquent que l'apport d'une fraction d'engrais phosphaté avant irrigation, améliore l'efficacité d'utilisation de l'engrais phosphaté par la culture de niébé.

### **b) Température du sol**

La température est un facteur écologique important, en effet à une température élevée la minéralisation de la matière organique est très poussée, cela donne bien une forte libération du phosphore.

Blanchet (1959) indique que la température a un effet sur les réactions chimiques concernant le phosphore dans la solution du sol. Elle affecte les réactions qui régissent la dissolution, l'adsorption et la diffusion du phosphore (Barker et Pilbeam, 2007). Ce flux de diffusion du phosphore provoqué par l'absorption racinaire est fonction du milieu notamment, la température et l'environnement ionique (Gilles, 1969).

### **c) Effet de la morphologie racinaire**

L'accumulation de matière sèche par la plante détermine son besoin en phosphore qui est satisfait par son prélèvement par voie racinaire. Le prélèvement de Pi est aussi contrôlé par la morphologie et l'activité du système racinaire. Ainsi, les racines fines et ramifiées des graminées présentant de nombreux poils absorbants sont capables de prélever le Pi plus rapidement que les racines moins fines et plus courtes des légumineuses (Evans, 1977). Otani *et al.* (1996) ont trouvé qu'en conditions de disponibilité du phosphore non limitées, les prélèvements du phosphore par différentes espèces végétales sont corrélés à la longueur des racines.

Djadjaglo et Richter (2008) ont conclu que la formation des poils absorbants augmente la capacité des plantes à couvrir leur besoin en phosphore sur un sol faible en phosphate. Chez le blé, le développement du système racinaire est l'un des caractères associés aux génotypes efficaces vis-à-vis du phosphore (Marschener, 1998).

### **d) Effet des exsudats racinaires**

La mobilisation chimique permet aux plantes de couvrir leurs besoins en phosphore sur des sols caractérisés par une faible solubilité du phosphore. Les exsudats racinaires sont constitués d'un mélange complexe d'acides organiques, de glucides, de vitamines, d'acides aminés (composés utilisés comme aliments par les micro-organismes du sol), d'ions inorganiques ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}^+$ ), de molécules gazeuses ( $\text{CO}_2$ ) et d'enzymes qui ont des effets importants sur l'acquisition des éléments minéraux nécessaires à la croissance de la plante (Dakora et Philips, 2002).

Les plantes absorbent la plupart des nutriments minéraux à travers la rhizosphère, où les micro-organismes interagissent avec des produits des exsudats racinaires des végétaux. Selon Djadjaglo et Richter (2008), cette mobilisation est décrite comme une augmentation de prélèvement des éléments nutritifs à la suite des modifications des paramètres chimiques dans les rhizosphères provoquées par les sécrétions des racines ou des microorganismes.

Les acides organiques des exsudats racinaires peuvent solubiliser le phosphore lié au calcium (Ca-P), au fer (Fe-P) et l'aluminium (Al-P) dans le sol (Zhang *et al.*, 1997 ; Lopez-Bucio *et al.*, 2000 ; Dakora et Philips, 2002). Les quantités d'acides organiques exsudés par les racines des plants d'*Arabidopsis* sont relativement élevées en milieu pauvre en Pi (Narang *et al.*, 2000).

Les résultats de Araújo *et al.* (2008) indiquent que l'activité des phosphatases et phytases augmente lorsque les plants de haricot (*Phaseolus vulgaris*) sont placés dans des conditions de déficience en phosphore. Particulièrement sur des sols acides, la sécrétion de l'enzyme phosphatase par les racines des plantes stimule une augmentation de l'hydrolyse et provoque, par conséquent, un prélèvement rapide du phosphore (Djadjaglo et Richter, 2008).

#### **e) Interaction avec d'autres éléments minéraux**

L'interaction entre les éléments nutritifs chez les plantes cultivées se produit lorsque l'alimentation de l'un des éléments affecte l'absorption et l'utilisation d'autres éléments (Fageria, 2001). Une sous-alimentation en phosphore peut induire une mauvaise valorisation de l'azote et du potassium (Soins et Vaysse, 1999). Les meilleures teneurs en phosphore des racines et des feuilles du riz sont obtenues avec des doses élevées de potassium (Li *et al.*, 2001). L'application de potassium à une dose optimale contribue également significativement à l'absorption d'azote et de phosphore chez différentes variétés de blé (Laghari *et al.*, 2010).

D'après Griffith (2006), l'apport d'azote sous forme d'ion ammonium augmente l'absorption du phosphore ajouté par rapport à l'application des engrais phosphatés seuls ou l'application d'azote et de phosphore séparément. La forme d'azote peut également affecter la disponibilité d'autres nutriments tels que le phosphore. Elgharbaly

*et al.* (2010), indique que l'azote apporté sous forme  $\text{NH}_4\text{-N}$  et  $\text{NH}_4\text{NO}_3\text{-N}$  ont favorisé les meilleures concentrations en phosphore des plants par rapport à  $\text{NO}_3\text{-N}$ . L'ajout de  $\text{NH}_4^+$  augmente la capacité de la plante à absorber le phosphore des sols (Hoffman *et al.*, 1994 in Elgharbaly *et al.*, 2010); l'absorption d'ammonium par les plantes diminue le pH de la rhizosphère en raison des ions  $\text{H}^+$  libérés par les racines.

Des apports excessifs de phosphore diminuent la concentration en Zn des cultures en diminuant sa translocation vers les parties aériennes (Kaya & Higgs, 2001; Li *et al.*, 2001 ; Gao et Grant, 2012 ; Mousavi *et al.*, 2012). Reinbott et Belvins (1991) ont enregistré une augmentation des teneurs en P, Ca et Mg, et une diminution de K des feuilles du blé, 48 h après application de doses croissantes de phosphore.

L'application du soufre permet souvent d'augmenter la disponibilité du phosphore en sols à pH neutre ou basique où le phosphore du sol est présent sous forme de phosphates de calcium (Griffith, 2006).

## **VII. Pertes du phosphore**

Les transferts abiotiques du phosphore au sein des agrosystèmes résultent soit du lessivage soit de l'érosion (Fardeau, 1993). Selon Buckman (1990), l'érosion est la principale cause des pertes en phosphate. L'horizon superficiel (la couche labourée) étant riche en phosphates, des pertes importantes ont lieu lorsque l'érosion est forte.

Le transfert de quantités significatives, en dessous de la couche de terre où sont appliqués les engrais, n'a lieu que dans les cas où les apports sont ou ont été très supérieurs aux exportations des cultures et où le pouvoir fixateur du sol est limité (Fardeau, 1993).

En sols sableux, les phosphates ne sont pas toujours bien retenus. Lorsque de fortes pluies suivent des apports élevés d'engrais phosphatés, le phosphore migre en profondeur avant que les interactions avec le sol n'aient pu s'établir (Buckman, 1990).

## **Chapitre II. Matériel et méthodes**

## I. Traitements étudiés et dispositif expérimental

Pour l'étude de l'effet du phosphore sur la formation du rendement du blé dur (*Triticum durum* variété Carioca) quatre essais ont été conduits au champ sous irrigation durant quatre campagnes agricoles ; 2006-2007, 2008-2009, 2009-2010 et 2010-2011.

En 2006-2007, nous avons étudié l'effet combiné de deux engrais foliaires Agriphos et Leader start avec trois engrais solides Fosfactyl NP 3:22, Superphosphate triple P 46 et NPKs 8:36:13,5+15 sur la culture de blé dur. Les trois engrais solides sont apportés au semis à quatre doses (80, 120, 160 et 200 kg.ha<sup>-1</sup>). Les caractéristiques de la variété et des engrais testés sont présentées dans l'annexe I (p133). Le dispositif expérimental est un modèle hiérarchisé à deux facteurs fixes. L'essai présente au total 24 parcelles élémentaires espacées de 1 m, chaque parcelle mesure 75 m de long sur 24 m de large, soit une superficie de 1800 m<sup>2</sup> au total 43 200 m<sup>2</sup> (figure 11).

Sur la base des résultats obtenus en 2006-2007, le même essai a été reconduit en 2008-2009 en limitant l'étude sur les engrais solides et en réduisant le nombre de doses. Deux engrais solides (Fosfactyl NP 3:22 et Simple Super Phosphate P 20) ont été mis en comparaison avec quatre doses chacun (30, 60, 90 et 120 kg.ha<sup>-1</sup>). La surface de la parcelle élémentaire est de 5 250 m<sup>2</sup> (350 m L, 15 m l) soit environ 42 000 m<sup>2</sup> au total (figure 11).

En 2009-2010 et 2010-2011, un troisième engrais phosphaté a été rajouté au deux précédents il s'agit du Mono-ammonium-phosphate NP 12:52, ces engrais sont apportés à trois doses (30, 60 et 90 kg.ha<sup>-1</sup>). La parcelle élémentaire mesure 2 100 m<sup>2</sup> (350 m L et 6 m l), soit au total environ 18 900 m<sup>2</sup> (figure 11).

La dynamique du phosphore dans le sol d'El-Menia a été étudiée simultanément avec les essais au champ. Le suivi de l'évolution du P est réalisé dans deux types de conditions différentes, les conditions de plein champ réalisé en 2006-2007 (essai en sol cultivé), et les conditions semi-contrôlées effectués en 2010-2011 (essai d'incubation des engrais). Ce dernier consiste à étudier l'impact des engrais MAP, Fosfactyl et SSP apportés à 250 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> durant 105 jours, sur la variation du P assimilable, la salinité et le pH du sol non cultivé d'El-Menia.



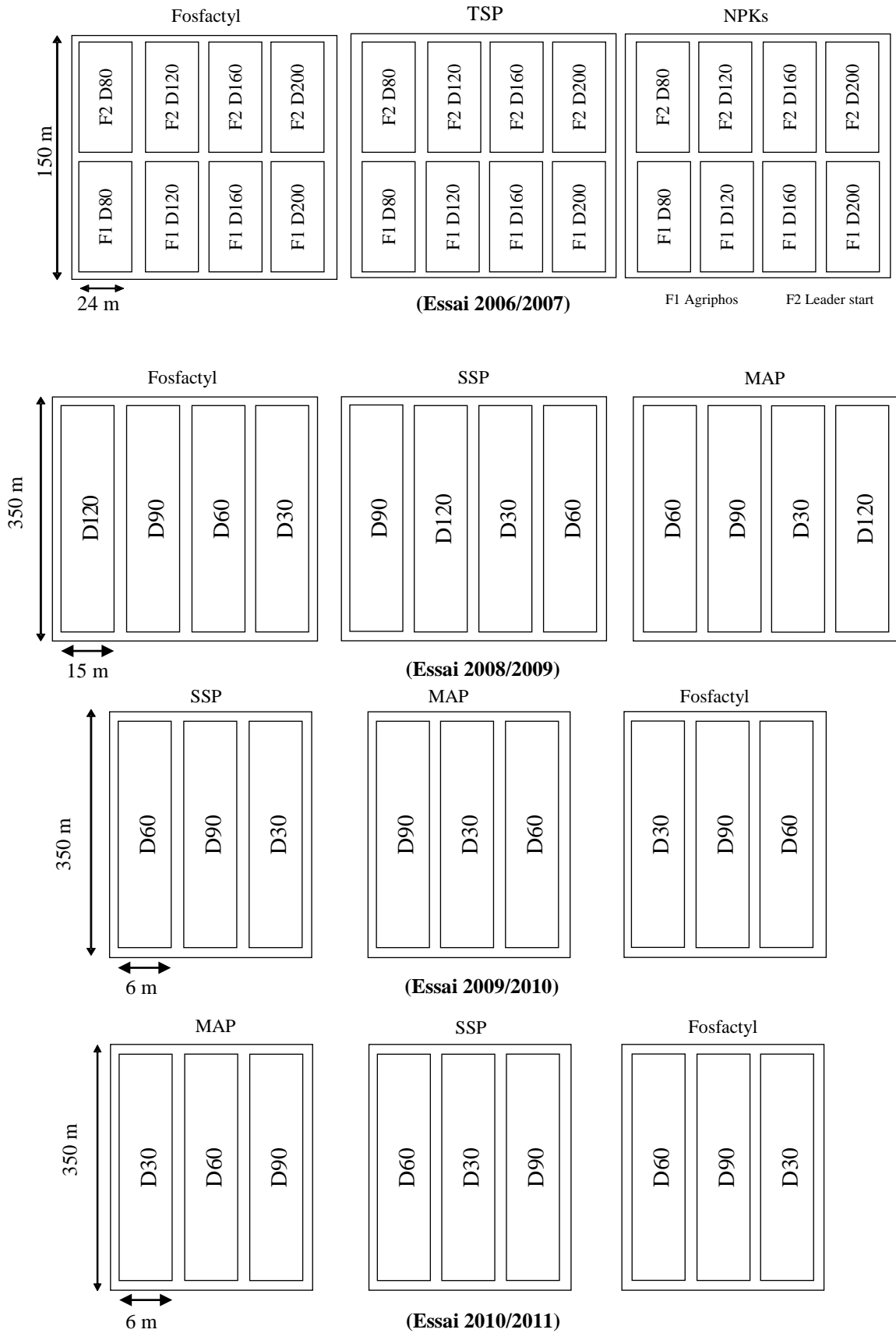
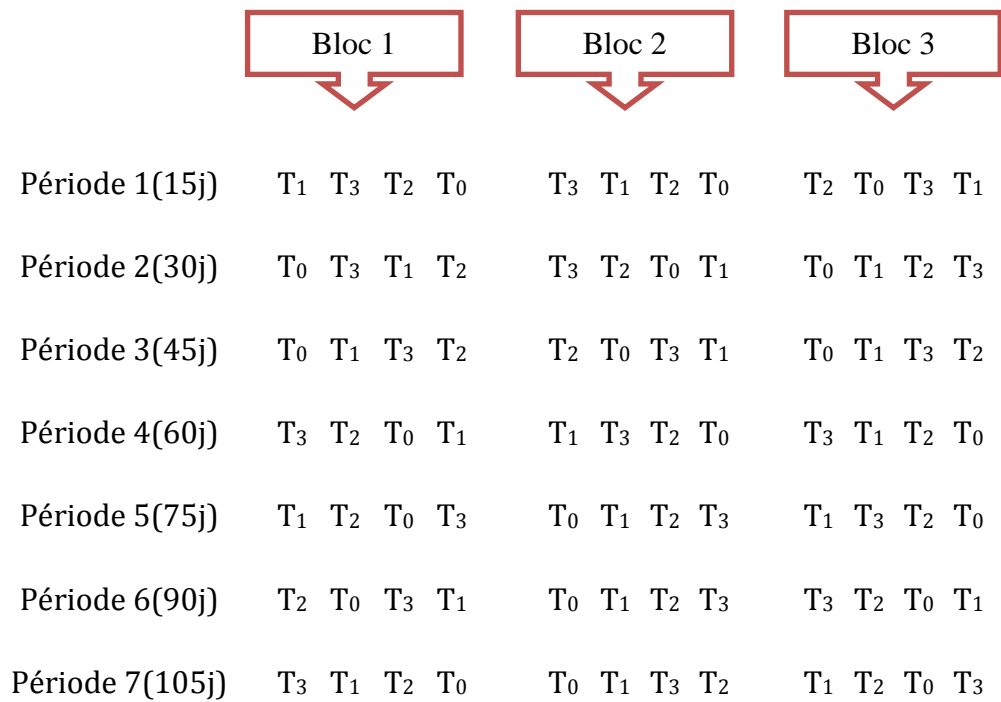


Figure 11. Dispositifs expérimentaux des quatre essais (essai au champ)

Le dispositif expérimental adopté est en blocs aléatoires complets à deux facteurs étudiés (type d'engrais et période d'incubation). Le dispositif renferme quatre blocs dans lesquels les quatre traitements (Témoin, MAP, Fosfactyl et SSP) sont répétés 07 fois (figure 12).



**Figure 12.** Dispositif expérimental (essai d'incubation)

**T<sub>0</sub>:** Témoin (sans apport)

**T<sub>1</sub>:** Mono Ammonium Phosphate MAP

**T<sub>2</sub>:** Fosfactyl

**T<sub>3</sub>:** Simple Super Phosphate SSP

## II. Localisation des essais

Les essais ont été conduits au niveau de l'exploitation de Monsieur Hadjadj Mahmoud (latitude 30°57', longitude 2°87' et une altitude de 397 m) sur un sol sableux, non salin et à pH (eau) alcalin, faiblement pourvu en matière organique. La teneur en P (Olsen) est faible pour les essais 2006-2007, 2008-2009, 2009-2010 et moyennement élevée pour l'essai 2010-2011. Les résultats des analyses physiques et chimiques sont mentionnés dans le tableau 1.

**Tableau 1. Caractéristiques physiques et chimiques des sols des essais**

Essais	Sable (%)	Limon +Argile(%)	Calcaire total (%)	Calcaire actif (%)	pH eau (1/5)	CE (dS/m)	MO (%)	Polsen (mg/kg)	N (mg/kg)
2006-2007	93,3	7	5,93	3,1	7,8	2,9	0,06	6,52	0,054
2008-2009	99,1	0,9	8,93	8,286	8,44	0,171	0,106	2,261	0,087
2009-2010	98	2,3	13,5	72,1	8,62	0,175	0,12	4,12	0,065
2010-2011	93,3	6,7	1,84	-	8,6	0,114	0,6	45,66	0,01

### Caractéristiques climatiques de la région d'étude

Les températures mensuelles relevées sous abri (2001-2011) montrent que le mois le plus froid est janvier avec 2,2°C, et le mois le plus chaud est juillet avec 43,4°C (tableau 2). La présence de gelées peut être observée, parfois, en janvier et février.

La moyenne des humidités est rarement supérieure à 50 % et peut descendre en dessous de 30 %. Les variations journalières sont importantes et peuvent parfois atteindre une valeur proche de 100 %. Les précipitations sont rares et irrégulières, la moyenne annuelle sur 11 ans (2001-2011) est de 41 mm.

La région d'El-Menia est caractérisée par une évaporation très importante. Son intensité étant fortement renforcée par les vents, notamment par ceux qui sont chauds. La fréquence et la force des vents augmentent substantiellement de la fin mars à la mi-juin. La direction est approximativement nord/sud ou nord-est/sud-ouest. L'insolation est forte, le minimum est enregistré au mois de décembre avec 234,5 heures et le maximum de 337,3 heures au mois de juillet (tableau 2).

L'évolution des températures mensuelles maximales sur les quatre campagnes d'essai (figure 13), montre que les moyennes des températures des mois de février,

mars et avril ont dépassé les 25°C jusqu'à atteindre 35°C. Ces valeurs sont considérées comme critiques et peuvent compromettre le rendement de la culture, car cette période coïncide avec les phases de formation des pièces florales et du remplissage des grains du blé.

**Tableau 2. Données climatiques de la région d'El-Menia (2001-2011)**

	Température °C			P mm	Vent m/s	Evap. mm	H %	Insol. h/mois
	Min	Max	Moy.					
<b>Janvier</b>	2,2	11,6	6,9	9,09	3,43	80,8	57,17	262,1
<b>Février</b>	4,6	20,7	12,65	0,63	3,55	109,6	46,08	245,6
<b>Mars</b>	9,1	25,9	17,5	8,69	4,08	162,7	38,50	274,4
<b>Avril</b>	13,3	29,8	21,55	4,85	4,59	206,2	32,83	286,1
<b>Mai</b>	18	34,4	26,2	2,54	4,28	250,5	29,08	307,1
<b>Juin</b>	22,9	39,8	31,35	4,22	3,77	281,5	24,83	332,3
<b>Juillet</b>	26,1	43,4	34,75	0	3,41	314,6	21,08	312,0
<b>Aout</b>	25,5	42,3	33,9	0,51	3,18	326,6	24,92	319,0
<b>Septembre</b>	22	37,6	29,8	1,06	3,43	256,8	36,25	267,6
<b>Octobre</b>	16,2	31,8	24	6,68	2,99	179,3	41,58	260,7
<b>Novembre</b>	7,7	23,3	15,5	4,66	3,10	111,3	50,42	255,3
<b>Décembre</b>	3,6	18,6	11,1	1,09	3,35	97,1	56,17	249,3
<b>Moyenne</b>	14,26	29,93	22,1	44,02*	3,60	2377,5*	38,24	3371,8

\*cumul moyen annuel

ONM, 2011

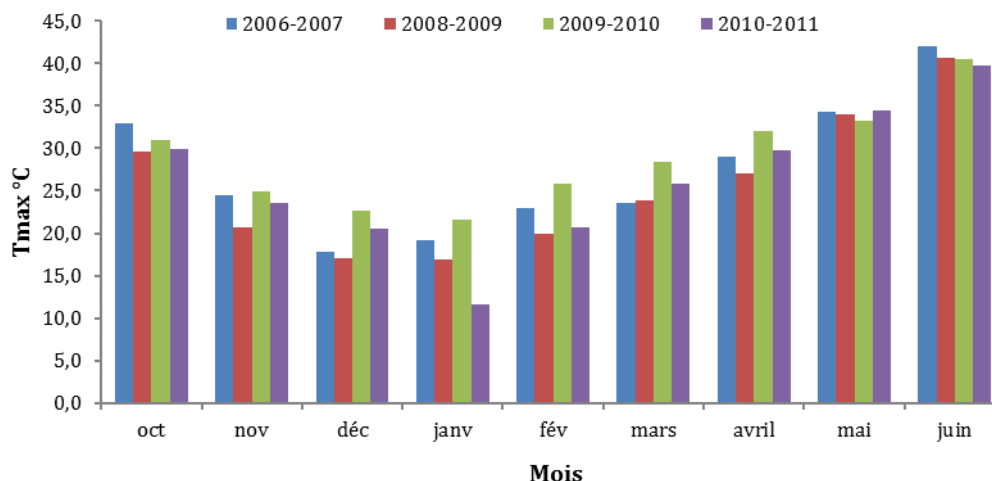


Figure 13. Evolution des températures mensuelles maximales pendant quatre campagnes (2006/2007-2008/2009-2009-2010-2010/2011)

### Caractéristiques physiques et chimiques de l'eau d'irrigation

L'eau d'irrigation est pompée à partir de la nappe du continental intercalaire qui se trouve à une profondeur de 250 m. cette eau appartient à la classe C<sub>2</sub>S<sub>1</sub> (USDA, 1954) caractérisée par un faible risque de salinité et de sodicité (tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation

Paramètres	pH	CE(ds/m) 25°C	Eléments en (méq/l)							Résidus sec (g/l) à 105°C
			Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Eau	7,8	0,38	0,776	0,346	1,503	2,50	25,68	0	15,30	0,40

ANRH, 2010

### III. Conduite technique des essais

Les essais au champ sont conduits en irrigué par centre pivot, la culture a reçu une pluviométrie d'environ 750 mm du semis jusqu'à la maturité. Les différentes opérations culturales sont mentionnées dans le tableau 4 (a, b, c et d).

Tableau 4. Conduite technique des essais

a) Campagne 2006-2007

Opération	Date/stade	Remarque
Pré-irrigation	04-11 -2006	Levée des graines de mauvaises herbes
Désherbage de pré-levée	30-11-2006	Round up (g/l glyphosate) : 2 l.ha <sup>-1</sup>
Semis direct	03-12-2006	Dose de semis : 2q.ha <sup>-1</sup>
<b>Fumure adoptée (fertirigation)</b> Azote	Fractionné en plusieurs apports	UAN (32 %) : 220 kg.ha <sup>-1</sup>
Engrais foliaires	Tallage Montaison	Safe N : 5 l.ha <sup>-1</sup> Fertileader : 2,5 l.ha <sup>-1</sup> Compound pholate : 5 kg.ha <sup>-1</sup>
Désherbage de post-levée	Tallage	Hussar of : 1 l.ha <sup>-1</sup>
Récolte	22-05-2009	Manuelle

b) Campagne 2008-2009

Opération	Date/stade	Remarque
Pré-irrigation	30-11-2008	Levée des graines de mauvaises herbes
Labour (passage croisé au cultivateur)	17-12-2008	
Désherbage de pré-levée	29-12-2008	Ridasate (360g/l glyphosate) : 2 l.ha <sup>-1</sup>
Semis	31-12-2008	Dose de semis : 2q.ha <sup>-1</sup>
<b>Fumure adoptée (fertirigation)</b> Azote	Fractionné en plusieurs apports	UAN (32 %) : 185 kg.ha <sup>-1</sup> Urée (46 %) : 24 kg.ha <sup>-1</sup>
Engrais foliaires	Tallage Montaison	Safe N : 5 l.ha <sup>-1</sup> Agriphos : 1,5 l.ha <sup>-1</sup> Phosamco : 2,5 kg.ha <sup>-1</sup> Compound pholate : 5 kg.ha <sup>-1</sup>
Désherbage de post-levée	Tallage	Hussar of : 1,2 l.ha <sup>-1</sup>
Récolte	10-06-2009	Manuelle

## c) Campagne 2009-2010

Opération	Date/stade	Remarque
Pré-irrigation	27-12-2009	Levée des graines de mauvaises herbes
Labour (passage croisé au cultivateur)	16-01-2010	
Désherbage de pré-levée	23-01-2010	Ridasate (360g/l glyphosate) : 2 l.ha <sup>-1</sup>
Semis	26-01-2010	Dose de semis : 2q.ha <sup>-1</sup>
<b>Fumure adoptée (fertirigation)</b> Azote	Fractionné en plusieurs apports	UAN (32 %) : 212 kg.ha <sup>-1</sup> Urée (46 %) : 12 kg.ha <sup>-1</sup>
Engrais foliaires	Tallage Montaison	Safe N : 10 l.ha <sup>-1</sup> Agriphos : 10 l.ha <sup>-1</sup> Agripotash : 3 l.ha <sup>-1</sup> Phosamco : 10 kg.ha <sup>-1</sup>
Désherbage de post-levée	Tallage	Hussar of : 1,2 l.ha <sup>-1</sup>
Récolte	22-06-2010	Manuelle

## d) Campagne 2010-2011

Opération	Date/stade	Remarque
Pré-irrigation	15-12-2010	Levée des graines de mauvaises herbes
Labour (passage croisé au cultivateur)	14-12-2010	
Désherbage de pré-levée		Ridasate (360g/l glyphosate) : 2 l.ha <sup>-1</sup>
Semis	18-12-2010	Dose de semis : 2q.ha <sup>-1</sup>
<b>Fumure adoptée (fertirigation)</b> Azote	Fractionné en plusieurs apports	UAN (32%) : 124 U.ha <sup>-1</sup> Urée (46%) : 46 U.ha <sup>-1</sup>
Engrais foliaires	Tallage Montaison	Safe N : 10 l.ha <sup>-1</sup> Agriphos : 10 l.ha <sup>-1</sup> Agripotash : 3 l.ha <sup>-1</sup>
Désherbage de post-levée	Tallage	Dialen super 1l. ha <sup>-1</sup>
Récolte	25-05-2011	Manuelle

Concernant l'essai d'incubation des engrais, le sol utilisé est un échantillon moyen de la couche arable provenant du pivot de l'essai de plein champ (2010-2011). Des cylindres en PVC (diamètre : 6 cm, hauteur : 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. L'essai a été installé le 30/01/2011.

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

leur efficacité puis ajoutés et mélangés au sol à raison de 250 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> par cylindre soit un kilogramme.

Concernant les conditions de l'expérimentation, les traitements sont soumis à la rotation quotidiennement afin d'homogénéiser les effets des facteurs écologiques.

Durant l'expérimentation, le sol est maintenu au 2/3 de son 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'à atteindre 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.

$$CR \% = \frac{P (\text{humide}) - P (\text{sec})}{P (\text{sec})} \times 100.$$

La capacité de rétention de ce sol est de 8,6 %, le réajustement de l'humidité du sol se fait de façon quotidienne.

## **IV. Mesures effectuées**

### **IV.1. Végétal**

#### **IV.1.1. Formation du rendement**

Des placettes de deux mètres linéaires au nombre de cinq (2006/2007), six (2008/2009 et 2010/2011) et neuf (2009/2010) ont été délimitées par parcelle, sur lesquelles ont été effectuées l'ensemble des mesures.

Les paramètres mesurés pour l'ensemble des essais sont le nombre d'épis au m<sup>2</sup>, le nombre de grains par épi, le poids de 1000 grains et les rendements en grain et en paille.



### VI.1.2. Rendement en biomasse

La détermination du rendement en biomasse est réalisée aux stades deux nœuds, floraison et maturité pour l'essai 2006-2007, alors qu'en 2008-2009 les prélèvements sont réalisés aux stades fin tallage, floraison et maturité. En 2009-2010 et 2010-2011, ce paramètre a été mesuré au stade maturité seulement.

Les échantillons de blé prélevés sont pesés après leur passage à l'étuve à 80°C pendant 48 h pour déterminer l'évolution de la matière sèche au cours du cycle.

### VI.1.3. Nutrition minérale du blé

Les échantillons du végétal utilisés pour la détermination du rendement en biomasse ont servi au dosage des minéraux.

Pendant la première année d'essai (2006-2007), le dosage du phosphore total des feuilles de blé aux stades deux nœuds et floraison a été effectué. Alors qu'en deuxième année (2008-2009), nous avons déterminé la teneur en azote et en phosphore à trois stades : fin tallage, floraison et maturité. Pour les deux dernières années, le dosage des éléments minéraux est réalisé au stade maturité seulement. En 2009/2010, les minéraux considérés sont, N, P et K (grains + paille), Ca, Mg et Na (grains) ; en 2010/2011, nous avons déterminé les éléments N, P et K (grains).

### VI.1.4. Efficience d'utilisation du phosphore

L'efficience d'utilisation du phosphore (EUP) a été calculée selon la formule suivante :

$$EUP = \frac{RDTGr}{P_{disponible}}$$

où  $P_{disponible} = P_{sol} + P_{apporté}$

P sol : L'estimation de la fourniture totale en phosphore par le sol a été calculée selon l'équation (Moll *et al.*, 1982) :

$$P_{sol\ estimé} = d * S * Z * P_{olsen}$$

d = densité = 1,4 g/cm<sup>3</sup>

S = superficie (1 ha)

Z = la profondeur racinaire (25 cm)

Polsen = phosphore déterminé par la méthode Olsen (mg P/kg sol)

	2006/2007	2008/2009	2009/2010	2010/2011
P Olsen (mg P/kg)	6,52	2,261	4,14	45,66
P estimé (kg P/ ha)	22,8	7,9	14,5	159,6

## IV.2. Sol

### IV.2.1. Essai en sol cultivé

Nous avons étudié dans l'essai 2006-2007, l'évolution du phosphore total, assimilable et du calcaire total dans le temps. Les échantillons du sol sont prélevés à raison de cinq (5) échantillons par parcelle. Ces derniers sont mélangés et ont constitué trois échantillons qui sont analysés individuellement. Le profil du sol est exploré sur une seule profondeur de 0-20 cm. Les prélèvements des échantillons du sol et du végétal sont réalisés aux stades deux nœuds, floraison et maturité.

### IV.2.2. Essai en sol non cultivé (essai d'incubation)

L'essai renferme 112 cylindres soit 28 cylindres par bloc. Le prélèvement des échantillons du sol est réalisé périodiquement tous les 15 jours par 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 analyses périodiques du sol pour l'établissement des différentes cinétiques ont concerné le phosphore assimilable, le pH et la salinité du sol à travers la conductivité électrique.

## V. Méthodes d'analyse

Les analyses du végétal et du sol ont été réalisées au niveau des laboratoires de pédologie à l'UCL (Belgique) et l'ENSA (ex. INA).

## V.1. Analyse chimique du végétal

### - Azote total

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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en présence de catalyseurs CuSO<sub>4</sub> et K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. 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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (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 chlorhydrique 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 introduits dans un ballon dans lequel est ajouté 10 ml d'un mélange bi-acide (HNO<sub>3</sub> – HClO<sub>4</sub>) avec un rapport de 10/4. La minéralisation est complète quand le contenu 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.

## V.2. Analyse physique et chimique du sol

Des prélèvements du sol ont été effectués à l'aide d'une tarière sur une profondeur de 30 cm.

### - 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 grossier, sable fin et limon + argile).

### **- Potentiel d'hydrogène**

La mesure du pH a été réalisée par la méthode électrométrique 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<sub>2</sub>) dégagé.

### **- Carbone organique**

Le carbone organique est dosé par la méthode ANNE par oxydation 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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en présence de catalyseurs CuSO<sub>4</sub> et K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. L'azote ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) produit est piégé, après une distillation dans la première solution d'acide borique 4 %. Le dosage de l'azote total est réalisé après une titration avec de l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,05 N).

### **- Phosphore assimilable "Olsen"**

L'extraction est réalisée dans une solution de bicarbonate de sodium 0,5N ajusté à pH = 8,5 dans un rapport prise d'essai/volume d'extraction (m/v) de 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 et Close (1961); on ajoute 10 ml d'acétate d'ammonium normal, puis on agite pendant 15 mn, après filtration la solution obtenue passe par un photomètre 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 Sterckman, 1997) par spectrométrie. Le  $Mg^{2+}$  est dosés dans la solution filtrée à l'aide d'un spectrophotomètre 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 subi 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 est dosé (BAIZE, 2000).

**VI. Analyse statistique**

L'analyse de la variance à trois critères de classification (engrais solide, doses d'engrais solide, engrais foliaire) pour le premier essai et à deux critères de classification pour les trois derniers essais (engrais solide, doses d'engrais) a été effectuée à l'aide du logiciel STATISTICA N°10.

Pour l'essai d'incubation, l'analyse de la variance à deux critères de classification (engrais solide, durée d'incubation) est réalisée à l'aide du même logiciel. La comparaison des moyennes a été faite selon le test de Newman-keuls au seuil de probabilité de 5 %.

## **Chapitre III. Résultats et discussion**

## I. Elaboration du rendement en grain et en biomasse en fonction des types d'engrais et doses apportées chez le blé dur

### I.1. Composantes du rendement et rendements en grain et en paille

Les résultats de l'analyse de la variance des composantes du rendement et des rendements en grain et en paille sont mentionnés dans l'annexe II (p. 135). Quel que soit l'essai (2006/2007), l'analyse de la variance montre des effets dose d'engrais significatifs pour le nombre de grains/épi ( $p < 0,05$ ) au niveau des deux essais (Agriphos et Leader-start) et des effets type d'engrais significatifs ( $p < 0,05$ ) pour le nombre d'épis par  $m^2$  au niveau de Leader-start, le poids de mille grains ( $p < 0,01$ ) et le rendement en grain ( $p < 0,01$ ) uniquement au niveau de l'essai ayant reçu l'engrais liquide Agriphos (tableaux 5 et 6). La comparaison des deux essais a montré des effets du type d'engrais solide significatifs pour le nombre d'épis/ $m^2$  ( $p < 0,05$ ), le nombre de grains/épi ( $p < 0,01$ ) et le poids de 1000 grains ( $p < 0,001$ ). L'application foliaire d'Agriphos et de Leader-start (2006/2007) a eu des effets non significatifs ( $p > 0,05$ ) sur l'ensemble des caractères étudiés (tableau 7). Les coefficients de variation sont élevés pour les caractères nombre d'épis/ $m^2$  (22,6 %) et rendement en grain (24,8 % et 28,2 respectivement au niveau des essais avec Agriphos et Leader-start). Par contre pour les caractères poids de 1000 grains (7,05 % et 4,96 % respectivement au niveau des essais avec Agriphos et Leader start) et nombre de grains/épi (12,74 % et 11,44 % respectivement au niveau des essais avec Agriphos et Leader-start), les coefficients de variation sont faibles à acceptables. Au niveau de la comparaison des deux types d'engrais liquides, le poids de 1000 grains (6,36 %) a présenté un coefficient de variation faible, pour le nombre de grains/épi le coefficient de variation est acceptable (13,3 %), tandis que pour le nombre d'épis/ $m^2$  et le rendement en grain, les coefficients de variation sont élevés (20,80 % et 25,71 % respectivement) (tableau 7).

Des effets dose d'engrais significatifs sont enregistrés pour le nombre d'épis/ $m^2$  en 2009/2010 ( $p < 0,001$ ) et 2010/2011 ( $p < 0,01$ ); le nombre de grains par épi en 2008/2009 ( $p < 0,05$ ) et 2009/2010 ( $p < 0,001$ ); le poids de mille grains en 2008/2009 ( $p < 0,001$ ) et 2009/2010 ( $p < 0,001$ ); les rendements en grain ( $p < 0,05$ ) et en paille ( $p < 0,01$ ) respectivement pour les années 2009/2010 et 2010/2011 et l'indice de récolte

Tableau 5. Effet des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007)

	Epis.m <sup>-2</sup>	NbrGr	PMG (g)	Rdt Gr (q.ha <sup>-1</sup> )
<b>Effet engrais solides</b>				
Fosfacyl	313,4	33,95	52,05 a	50,05 ab
TSP	335,0	33,90	47,14 b	46,65 b
NPKs	361,5	38,70	49,63 ab	57,81 a
Signification	ns	ns	**	**
ppds	-	-	3,354	7,856
<b>Effet doses d'engrais</b>				
80	352,3	34,93 a	49,25	47,49
120	334,6	33,73 b	52,27	51,52
160	305,8	37,73 a	48,27	54,23
200	353,8	35,67 a	49,52	52,78
Signification	ns	*	ns	ns
ppds	-	3,325	-	-
Moyennes générales	336,6	35,52	49,83	51,51
CV %	22,6	12,74	7,05	24,80

Tableau 6. Effet des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007)

	Epis.m <sup>-2</sup>	NbrGr	PMG (g)	Rdt Gr (q.ha <sup>-1</sup> )
<b>Effet engrais solides</b>				
Fosfacyl	305,2 b	35,15	49,84	54,12
TSP	351,0 a	36,55	49,72	53,38
NPKs	365,5 a	35,55	48,59	58,44
Signification	*	ns	ns	ns
ppds	45,09	-	-	-
<b>Effet doses d'engrais</b>				
80	313,0	33,40 b	50,23	54,43
120	350,5	35,80 ab	48,97	56,47
160	346,2	38,73 a	48,80	54,32
200	352,5	35,07 b	49,55	56,03
signification	ns	*	ns	ns
ppds	-	3,005	-	-
Moyennes générales	340,6	35,75	49,39	55,31
CV %	17,42	11,44	4,96	28,25

Tableau 7. Effet des engrais foliaires et solides sur les différents caractères (2006/2007)

	Epis.m <sup>-2</sup>	NbrGr	PMG (g)	Rdt Gr (q.ha <sup>-1</sup> )
<b>Effet engrais solides</b>				
Fosfacyl	309,3 b	34,55 b	50,95 a	52,09
TSP	343,0 a	35,23 ab	48,43 b	50,02
NPKs	363,5 a	37,13 a	49,01 b	58,13
Signification	*	**	***	ns
ppds	31,05	2,09	1,39	-
<b>Effet engrais foliaires</b>				
Agriphos	336,6	35,52	49,54	51,50
Leader-start	340,5	35,75	49,38	55,31
Signification	ns	ns	ns	ns
Moyennes générales	338,6	35,63	49,46	53,41
CV %	20,80	13,31	6,36	25,91

**Légende :** E.m<sup>-2</sup> = nombre d'épis/m<sup>2</sup>, NbrGr = nombre de grains/épi, PMG = poids de 1000 grains, RGr = rendement en grain. (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation, ppds = plus petite différence significative (5%).



( $p < 0,001$ ) en 2009/2010, alors que les effets type d'engrais sont significatifs pour le nombre de grains par épi ( $p < 0,05$ ) uniquement au niveau du dernier essai (2010/2011) (tableaux 8, 9 et 10). Des coefficients de variation faibles et acceptables sont obtenus pour les caractères nombre de grains/épi (7,48%) et poids de 1000 grains (4,82%) en 2008/2009 (tableau 8) ; pour tous les caractères les coefficients de variation varient entre 1,46 % et 11,8 % en 2009/2010 (tableau 9) et ils sont compris entre 12,06 % et 15,6 % pour les caractères épis/m<sup>2</sup>, grains/épi, poids de 1000 grains et rendement en paille en 2010/2011 (tableau 10). Alors que pour les caractères nombre d'épis/m<sup>2</sup> (24,1 %), rendement en grain (20,3 %) et rendement en paille (20,2 %) pour l'année 2008/2009 et seulement pour le rendement en grain (23,3 %) pour l'année 2010/2011, les coefficients sont élevés.

### ***Moyennes générales des essais***

Le nombre d'épis/m<sup>2</sup> moyen le plus élevé (657,2 épis/m<sup>2</sup>) est obtenu en 2009/2010, en dépassant de 48 %, 36 % et 43 % les résultats de 2006/2007, 2008/2009 et 2010/2011 respectivement (tableau 9). Les meilleures moyennes du nombre de grains/épi ont été enregistrées en 2008/2009 et 2006/2007 avec environ 35 grains/épi qui dépassent de 32 % et 16 % les valeurs obtenues en 2009/2010 et 2010/2011 respectivement. La moyenne la plus élevée du poids de 1000 grains a été enregistrée en 2008/2009 avec 57,28 g (tableau 8). Les écarts enregistrés sont de 14 %, 26 % et 12 % obtenus en 2006/2007, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement par rapport à 2008/2009 (tableaux 5, 6, 7, 9 et 10). Ceci peut être expliqué par les températures élevées (> 30°C) survenues pendant l'anthèse pour l'année 2009/2010 et durant le remplissage du grain (palier hydrique) pour ces trois campagnes (2006/2007, 2009/2010 et 2010/2011), par conséquent l'accumulation de la matière sèche a été interrompue d'où la chute du poids du grain de blé.

Le rendement moyen en grain le plus élevé est réalisé durant la campagne 2008/2009 avec 69,03 q.ha<sup>-1</sup>, soit un gain d'environ 15 q.ha<sup>-1</sup>, 2 q.ha<sup>-1</sup> et 11 q.ha<sup>-1</sup> par rapport à 2006/2007, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement. Le rendement en paille le plus élevé est obtenu en 2009/2010 avec 77,53 q.ha<sup>-1</sup> contre le plus faible obtenu en 2008/2009 (46,7 q.ha<sup>-1</sup>).

Tableau 8. Moyennes des différents caractères pour les engrais solides et les doses (2008/2009)

	Epis.m <sup>-2</sup>	NbrGr	PMG (g)	Rdt Gr (q.ha <sup>-1</sup> )	R.P(q.ha <sup>-1</sup> )	I.R
<b>Effet solides</b>						
SSP	402,3	35,44	57,05	65,83	45,27	0,592
Fosfactyl	445,2	35,9	57,52	72,23	48,13	0,60
Signification	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Effet doses</b>						
30	366,9	34,33 b	60,4 a	63,12	40,35	0,598
60	430	35,22 b	58,72 b	71,35	46,11	0,609
90	453,8	37,56 a	53,49 d	72,36	50,36	0,589
120	444,2	35,57 b	56,55 c	71,80	49,99	0,589
Signification	ns	*	***	ns	ns	ns
ppds	-	1,985	2,519	-	-	-
Moyennes générales	423,7	35,67	57,28	69,03	46,70	0,596
CV %	24,1	7,48	4,82	20,3	20,2	3,14

Tableau 9. Moyennes des différents caractères pour les engrais solides et les doses (2009/2010)

	Epis.m <sup>-2</sup>	NbrGr	PMG (g)	Rdt Gr (q.ha <sup>-1</sup> )	R.P(q.ha <sup>-1</sup> )	I.R
<b>Effet solides</b>						
SSP	667,9	23,77	42,8	67,96	79,14	0,467
Fosfactyl	649,3	23,56	42,31	64,56	82,74	0,439
MAP	654,5	25,29	42,16	68,96	70,7	0,492
Signification	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Effet doses</b>						
30	639,4 b	25,37 a	43,35 a	69,43 a	71,81 b	0,492 a
60	672,2 a	23,87 b	43,22 a	69,48 a	79,92 a	0,470 a
90	660,1 ab	23,37 b	40,70 b	62,58 b	80,85 a	0,436 b
Signification	***	***	***	*	**	***
ppds	31,4	1,56	1,37	0,54	4,90	0,026
Moyennes générales	657,2	24,21	42,42	67,16	77,53	0,466
CV %	8,79	11,8	5,95	1,46	11,6	10,39

Tableau 10. Moyennes des différents caractères pour les engrais solides et les doses (2010/2011)

	Epis.m <sup>-2</sup>	NbrGr	PMG (g)	Rdt Gr (q.ha <sup>-1</sup> )	R.P(q.ha <sup>-1</sup> )	I.R
<b>Effet solides</b>						
SSP	356,4	29,13 ab	52,81	59,18	62,53	0,466
Fosfactyl	392	28,27 b	49,79	59,12	67,62	0,419
MAP	380	31,83 a	48,42	54,71	61,74	0,471
Signification	ns	*	ns	ns	ns	ns
ppds	-	2,93	-	-	-	-
<b>Effet doses</b>						
30	355,6 b	29,65	49,44	55,05 b	58,93 b	0,467
60	397,8 a	30,18	51,03	61,98 a	71,67 a	0,458
90	374,1 ab	29,39	50,55	56,6 ab	61,29 b	0,431
Signification	**	ns	ns	*	**	ns
ppds	42,07	-	-	6,96	7,049	-
Moyennes générales	375,83	29,74	50,34	57,67	63,93	0,452
CV %	15,6	12,06	12,1	23,3	15,3	13,92

Légende : Se référer au tableau 5

Pour l'indice de récolte, la meilleure moyenne est enregistrée en 2008/2009 (0,596), suivie par les essais réalisés en 2009/2010 et 2010/2011 avec 0,466 et 0,452 respectivement.

### ***Effet type d'engrais***

En 2006/2007, les meilleurs résultats sont réalisés par l'engrais NPKs pour le nombre d'épis par m<sup>2</sup> au niveau des deux essais (Leader-start 365,5 épis/m<sup>2</sup> et comparaison des essais 363,5 épis/m<sup>2</sup>), le nombre de grains/épi au niveau de la comparaison (37,13 grains/épi) et le rendement en grain pour l'essai avec Agriphos (57,81 q.ha<sup>-1</sup>). Alors que l'engrais Fosfactyl a donné le poids de 1000 grains le plus élevé au niveau des deux essais Agriphos (52,05 g) et comparaison des deux essais (50,95 g). En 2010/2011, l'engrais MAP a fourni le meilleur nombre de grains par épi avec 31,83 grains/épi.

Pour l'ensemble des essais, le caractère rendement en grain n'a pas été affecté statistiquement par le type d'engrais, par conséquent, le choix d'un engrais phosphaté devra se faire selon sa disponibilité sur le marché et son prix.

### ***Effet doses d'engrais***

En 2006/2007, la dose 160 kg.ha<sup>-1</sup> a engendré le meilleur nombre de grains/épi 37,73 et 38,23 au niveau des parcelles traitées avec Agriphos et Leader-start respectivement (tableaux 5 et 6). Concernant les autres essais (tableaux 9 et 10), la dose 60 kg.ha<sup>-1</sup> a favorisé une meilleure fertilité des talles herbacées sur deux années consécutives 2009/2010 (672,2 épis/m<sup>2</sup>) et 2010/2011 (395,8 épis/m<sup>2</sup>). Une plus grande fertilité des fleurs induisant un meilleur nombre de grains est favorisée par l'apport de phosphore à des niveaux de 90 kg.ha<sup>-1</sup> (37,56 Gr/épi) et 30 kg.ha<sup>-1</sup> (25,37 Gr/épi) pour 2008/2009 et 2009/2010 respectivement. Le PMG le plus élevé est enregistré par la dose 30 kg.ha<sup>-1</sup> pour 2008/2009 (60,4 g) et 2009/2010 (43,35 g).

En ce qui concerne le rendement en grain, les deux doses 30 kg.ha<sup>-1</sup> (69,43 q.ha<sup>-1</sup>) et 60 kg.ha<sup>-1</sup> (69,48 q.ha<sup>-1</sup>) pour l'année 2009/2010 et la dose 60 kg.ha<sup>-1</sup> (61,98 q.ha<sup>-1</sup>) pour l'année 2010/2011 ont réalisé les meilleurs résultats. Pour le rendement en paille, les doses 90 Kg.ha<sup>-1</sup> (80,95 q.ha<sup>-1</sup>) et 60 Kg.ha<sup>-1</sup> (71,67 q.ha<sup>-1</sup>) respectivement pour les

années 2009/2010 et 2010/2011 ont donné les meilleures valeurs moyennes. En 2009/2010, les deux doses 30 kg.ha<sup>-1</sup> et 60 kg.ha<sup>-1</sup> qui ont réalisé les meilleurs rendements grain ont assuré la meilleure translocation des photo-assimilats vers les grains réalisant ainsi un meilleur indice de récolte avec respectivement 0,492% et 0,470% (tableau 9).

Les figures 14, 15, 16, 17 et 18 illustrent les effets des sources et doses de phosphore sur le rendement en grain. Pour l'année 2006/2007, l'engrais NPKs a réalisé les meilleurs rendements avec la dose 160 kg/ha quel que soit l'essai Agriphos (60,54 q/ha, figure 14) ou Leader-start (64,4 q/ha, figure 15). Alors que pour les autres essais, l'engrais SSP a pu enregistrer des rendements plus élevés à des doses de phosphore plus faibles. Les figures 16 et 17 montrent qu'à la dose 60 kg/ha, les rendements obtenus sont de 74,1 q/ha et 74,98 q/ha respectivement pour 2008/2009 et 2009/2010. On remarque aussi qu'en 2010/2011, les rendements diminuent avec l'accroissement des doses de P sous l'effet du SSP (figure 17). Les valeurs passent de 67,96 q/ha (dose 30 kg P/ha) à 50,14 q/ha (dose 90 kg/ha).

## **I.2. Production de biomasse**

Les résultats de l'analyse de la variance des rendements en biomasse sont consignés dans l'annexe II (p. 136). Des effets type d'engrais significatifs ( $p < 0,05$ ) sont obtenus au stade maturité pour le rendement en biomasse au niveau des essais Agriphos et Leader-start. La comparaison des deux essais a présenté des effets du type d'engrais significatifs aux stades, deux nœuds ( $p < 0,01$ ), floraison ( $p < 0,05$ ) et maturité ( $p < 0,05$ ).

La réponse à l'effet dose d'engrais diffère selon le stade de la culture et l'année. Des différences significatives sont enregistrées pour le rendement en biomasse au stade deux nœuds au niveau des deux essais Agriphos ( $p < 0,01$ ) et Leader-start ( $p < 0,001$ ) en 2006/2007, au stade floraison ( $p < 0,001$ ) pour 2008/2009 et 2010/2011 respectivement et au stade maturité ( $p < 0,05$ ) pour l'année 2010/2011.

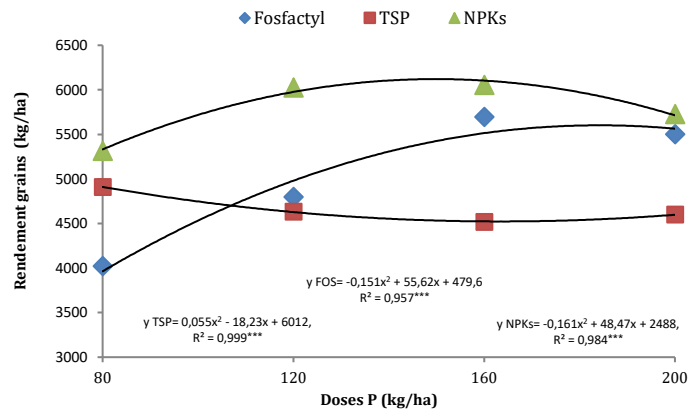


Figure 14. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur le rendement en grain du blé (Agriphos, 2006/2007)

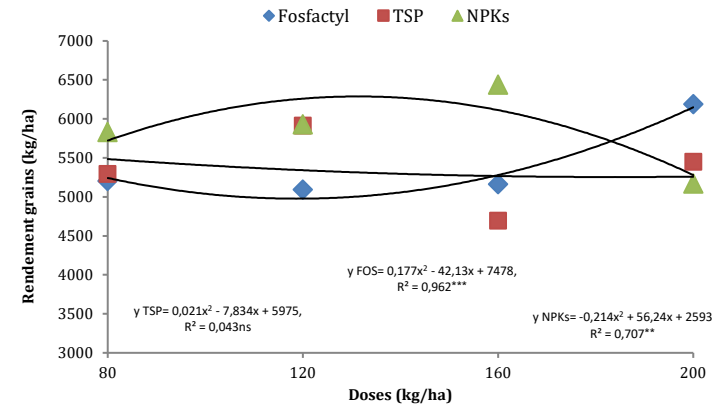


Figure 15. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur le rendement en grain du blé (Leader-start, 2006/2007)

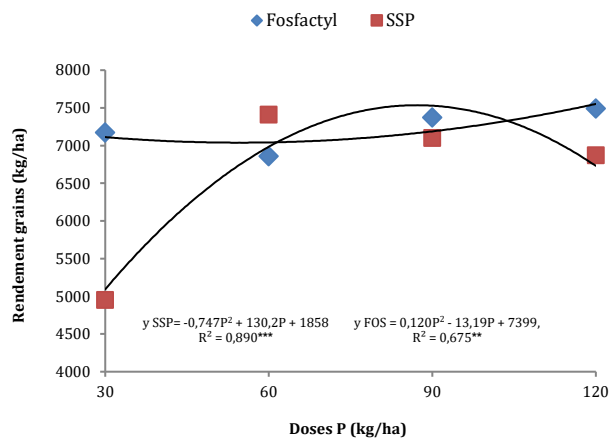


Figure 16. Effet des engrais SSP et Fosfactyl sur le rendement en grain du blé (2008/2009)

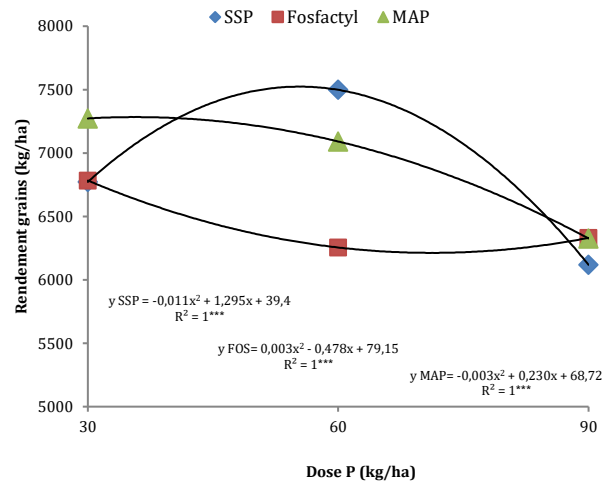


Figure 17. Effet des engrais SSP, Fosfactyl et MAP sur le rendement en grain du blé (2009/2010)

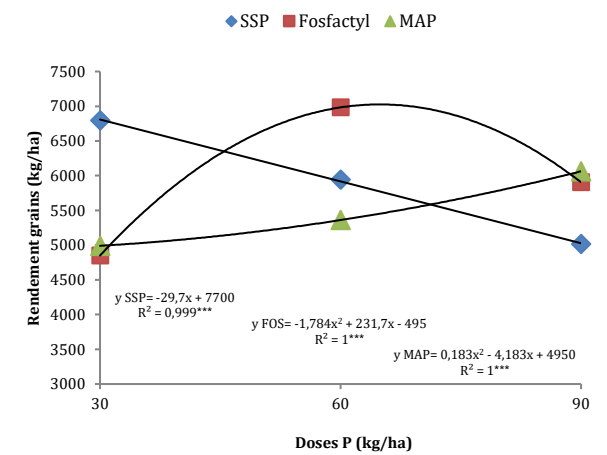


Figure 18. Effet des engrais SSP, Fosfactyl et MAP sur le rendement en grain du blé (2010/2011)

Tableau 11. Moyennes des rendements en biomasse au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007) pour les engrais solides et les doses

	Deux nœuds	Floraison	Maturité
<b>Effet engrais solides</b>			
Fosfactyl	20,12	100,7	107,9 ab
TSP	23,85	109,7	96,58 b
NPKs	24,61	113,4	115,6 a
Signification	ns	ns	*
ppds	-	-	16,06
<b>Effet doses d'engrais</b>			
80	21,70 b	98,52 b	97,57
120	22,49 b	98,99 b	113,9
160	25,67 a	120,5 a	105,2
200	21,57 b	113,9 a	109,9
Signification	**	***	ns
ppds	2,84	9,27	-
Moyennes générales	22,86	107,9	106,7
CV %	19,5	11,69	21,07

Tableau 12. Moyennes des rendements en biomasse au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007) pour les engrais solides et les doses

	Deux nœuds	Floraison	Maturité
<b>Effet engrais solides</b>			
Fosfactyl	18,71	105,9	109,4 ab
TSP	22,72	108,6	101,1 b
NPKs	22,97	98,51	122,3 a
Signification	ns	ns	*
ppds	-	-	16,19
<b>Effet doses d'engrais</b>			
80	23,41 a	103,2	106,04
120	19,82 b	101,1	118,8
160	22,72 ab	111,8	106,3
200	19,92 b	101,2	112,7
Signification	***	ns	ns
ppds	2,98	-	-
Moyennes générales	21,47	104,5	110,9
CV %	18,9	11,7	24,6

Tableau 13. Moyennes des rendements en biomasse (2006/2007) pour les engrais foliaires et solides

	Deux nœuds	Floraison	Maturité
<b>Effet engrais solides</b>			
Fosfactyl	19,42 b	103,01 b	108,6 b
TSP	23,28 a	109,9 a	98,8 b
NPKs	23,79 a	105,9 ab	118,9 a
Signification	**	*	*
ppds	2,267	6,858	10,93
<b>Effet engrais foliaires</b>			
Agriphos	22,86	107,9	106,7
Leader-start	21,46	104,4	110,9
Signification	ns	ns	ns
Moyennes générales	22,16	106,2	108,8
CV %	23,09	14,57	22,67

Légende : Rendement en biomasse (q/ha), (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

Des coefficients de variation acceptables sont obtenus pour le rendement en biomasse au stade floraison pour l'année 2006/2007 au niveau des essais avec Agriphos (11,69 %), Leader-start (11,75 %) et de la comparaison des deux essais (14,57 %), ainsi que pour les deux années 2008/2009 et 2010/2011 avec respectivement 13,05 % et 16,36 %.

### ***Moyennes générales***

La production de biomasse de la culture varie suivant l'année. En 2006/2007, le meilleur rendement en biomasse (stade deux nœuds) est obtenu au niveau de l'essai avec Agriphos (22,86 q/ha). Au stade floraison, le rendement moyen le plus élevé est obtenu en 2009/2010 (110,4 q/ha), contre le plus faible enregistré en 2010/2011 (62,96 q/ha), soit un écart de 42,97 %.

À maturité, le meilleur résultat est enregistré en 2009/2010 (164,7 q/ha), en dépassant de 33,95 %, 12,62 % et 16,75 % les valeurs moyennes réalisées en 2006/2007, 2008/2009 et 2010/2011 respectivement.

### ***Effet type d'engrais***

Les meilleurs rendements en biomasse sont réalisés par l'engrais NPKs quel que soient le stade de la culture (deux nœuds, floraison ou maturité) et le type d'essai (Agriphos, Leader-start ou comparaison des deux essais) pour 2006/2007 (tableaux 11, 12 et 13). Alors que le SSP a donné des rendements supérieurs aux autres engrais sur les trois dernières années, 2008/2009 2009/2010 et 2010/2011, en enregistrant 83,52 q.ha<sup>-1</sup> au stade floraison et 172,8 q.ha<sup>-1</sup> au stade maturité respectivement pour 2010/2011 et 2009/2010 (tableaux 14 et 15).

### ***Effet doses d'engrais***

L'accumulation de la matière sèche a été influencée par les niveaux de phosphore. Durant la première année 2006/2007, les rendements en biomasse les plus élevés sont donnés par les doses 160 kg.ha<sup>-1</sup> (25,67 q.ha<sup>-1</sup>) et 80 kg.ha<sup>-1</sup> (23,41 q.ha<sup>-1</sup>) au stade deux nœuds au niveau des deux essais Agriphos et Leader-start respectivement (tableaux 11 et 12), alors qu'à la floraison, les deux doses 160 kg.ha<sup>-1</sup> et 200 kg.ha<sup>-1</sup> au niveau de

l'essai avec Agriphos ont produit les meilleurs rendements en biomasse avec  $120,5 \text{ q.ha}^{-1}$  et  $113,9 \text{ q.ha}^{-1}$  respectivement (tableau 11).

En 2008/2009, la dose  $120 \text{ kg.ha}^{-1}$  a réalisé la meilleure production de biomasse au stade floraison ( $113,8 \text{ q.ha}^{-1}$ ), alors que la plus faible est obtenue par la dose  $30 \text{ kg.ha}^{-1}$  avec  $78,69 \text{ q.ha}^{-1}$  (tableau 14). Pour l'essai conduit en 2010/2011, les doses  $90 \text{ kg.ha}^{-1}$  et  $60 \text{ kg.ha}^{-1}$  au stade floraison et  $60 \text{ kg.ha}^{-1}$  au stade maturité ont entraîné des rendements en biomasse les plus élevés,  $72,42 \text{ q.ha}^{-1}$ ,  $66,56 \text{ q.ha}^{-1}$  et  $153,9 \text{ q.ha}^{-1}$  respectivement (tableau 16).



Tableau 14. Moyennes des rendements en biomasse pour les engrais solides et les doses (2008/2009)

	Fin tallage	Floraison	Maturité
<b>Effet engrais solides</b>			
SSP	31,53	100,7	157,3
Fosfactyl	29,74	98,07	131,6
Signification	ns	ns	ns
<b>Effet doses d'engrais</b>			
30	25,17	78,69 c	125,7
60	30,03	98,74 b	136,9
90	35,76	106,3 ab	155,2
120	31,58	113,8 a	159,8
Signification	ns	***	ns
ppds	-	9,65	-
Moyennes générales	30,64	99,39	144,4
CV %	23,83	13,05	31,17

Tableau 15. Moyennes des rendements en biomasse pour les engrais solides et les doses (2009/2010)

	Floraison	Maturité
<b>Effet engrais solides</b>		
SSP	106,2	172,8 a
Fosfactyl	110,1	164,8 b
MAP	114,7	156,6 c
Signification	ns	**
ppds	-	5,64
<b>Effet doses d'engrais</b>		
30	111,4	164,4
60	114,1	166,5
90	105,6	163,3
Signification	ns	ns
ppds	-	-
Moyennes générales	110,4	164,7
CV %	16,36	11,7

Tableau 16. Moyennes des rendements en biomasse pour les engrais solides et les doses (2010/2011)

	Floraison	Maturité
<b>Effet engrais solides</b>		
SSP	83,52 a	135,8
Fosfactyl	50,04 b	147,5
MAP	55,32 ab	128,2
Signification	*	ns
ppds	30,78	-
<b>Effet doses d'engrais</b>		
30	49,92 b	127,5 b
60	66,56 a	153,9 a
90	72,42 a	130,2 b
Signification	**	*
ppds	12,95	17,84
Moyennes générales	62,96	137,2
CV%	28,64	18,11

Légende : (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif. CV= coefficient de variation, ppds= plus petite différence significative (5%).

## II. Quantification des prélèvements en éléments minéraux chez le blé dur

### II.1. Prélèvements phosphatés totaux par le blé dur et leurs répartitions entre la paille et les grains

Lorsqu'une espèce est cultivée pour ses graines, l'essentiel du phosphore prélevé par la culture est présent dans le grain et par conséquent exporté (Castillon *et al.*, 1993).

En 2006/2007, l'effet type d'engrais est très hautement significatif ( $P < 0,001$ ) sur les teneurs et les exportations du phosphore des feuilles aux stades deux nœuds et floraison au niveau des essais d'Agriphos, Leader-start et comparaison des deux essais (Annexe II, p.137). Par contre, la fertilisation foliaire n'a eu aucun effet sur l'absorption du phosphore par la culture du blé à différents stades. Le type d'engrais a eu également un effet significatif ( $P < 0,05$ ) pour la teneur en phosphore des feuilles au stade fin tallage en 2008/2009, des grains en 2009/2010 et des pailles en 2010/2011 (Annexe II, p.139). Tandis que la réponse à l'effet dose diffère selon l'année et le caractère. Les résultats de l'analyse de la variance portés sur l'annexe II (p. 137) montrent des différences significatives entre les traitements pour la teneur en Phosphore des feuilles aux stades deux nœuds et floraison et exportations du phosphore au stade floraison pour les deux essais Agriphos et Leader-start conduits en 2006/2007.

En 2008/2009, les effets des doses de phosphore sont significatifs pour les exportations du phosphore par les feuilles du blé aux stades fin tallage ( $P < 0,05$ ) et floraison ( $P < 0,001$ ), les exportations du phosphore par les grains ( $P < 0,05$ ) et la paille ( $P < 0,01$ ) au stade maturité (Annexe II, p. 138). De même, des différences significatives sont enregistrées pour la teneur en phosphore des grains ( $P < 0,001$ ), la teneur en phosphore de la plante entière ( $P < 0,01$ ), les exportations du phosphore par les grains ( $P < 0,001$ ) et la paille ( $P < 0,05$ ) en 2010/2011 (Annexe II, p. 138).

#### ***Moyennes des essais***

La détermination des teneurs en phosphore des feuilles de blé à différents stades a été étudiée uniquement en 2006/2007 (deux nœuds et floraison) et 2008/2009 (fin tallage, floraison et maturité).

Tableau 17. Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007) pour les engrais solides et les doses

	[P]S1	[P]S2	EXP P S1	EXP P S2
<b>Effet engrais solides</b>				
Fosfacyl	0,398 c	0,340 c	7,59 c	34,91 b
TSP	0,562 b	0,472 b	13,56 b	54,74 b
NPKs	0,820 a	0,721 a	19,71 a	85,78 a
Signification	***	***	***	***
ppds	0,086	0,065	4,47	25,49
<b>Effet doses d'engrais</b>				
80	0,539 d	0,473 c	11,90	45,99 c
120	0,566 c	0,504 b	12,26	50,49 c
160	0,616 b	0,510 b	16,36	66,86 b
200	0,650 a	0,556 a	13,96	70,55 a
Signification	***	***	ns	***
ppds	0,026	0,009	-	7,03
Moyennes générales	0,593	0,511	13,62	58,47
CV%	4,51	1,85	24,2	12,3

Tableau 18. Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007) pour les engrais solides et les doses

	[P]S1	[P]S2	EXP P S1	EXP P S2
<b>Effet engrais solides</b>				
Fosfacyl	0,384 c	0,349 c	7,34 c	38,19 c
TSP	0,564 b	0,497 b	12,44 b	48,70 b
NPKs	0,846 a	0,765 a	19,10 a	74,08 a
Signification	***	***	***	***
ppds	0,0875	0,1007	4,475	10,806
<b>Effet doses d'engrais</b>				
80	0,543 c	0,476 b	13,67	46,24 b
120	0,575 b	0,510 b	11,34	50,99 b
160	0,638 a	0,586 a	13,50	60,01 a
200	0,635 a	0,576 a	13,33	57,39 a
Signification	***	***	ns	*
ppds	0,0219	0,0476	-	5,329
Moyennes générales	0,598	0,537	12,33	53,66
CV%	3,77	9,12	26,79	10,20

Tableau 19. Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur (2006/2007) pour les engrais solides et foliaires

	[P]S1	[P]S2	EXP P S1	EXP P S2
<b>Effet engrais solides</b>				
Fosfacyl	0,391 c	0,345 c	7,46 c	36,55 c
TSP	0,563 b	0,485 b	13,0 b	51,16 b
NPKs	0,833 a	0,743 a	19,4 a	79,65 a
Signification	***	***	***	***
ppds	0,031	0,032	2,10	7,157
<b>Engrais foliaires</b>				
Agriphos	0,592	0,511	13,62	57,92
Leader start	0,598	0,537	12,96	53,66
Signification	ns	ns	ns	ns
Moyennes générales	0,595	0,524	13,29	55,79
CV%	8,99	10,79	27,45	22,24

Légende : [P]= P % MS, EXP P= exportation P kg/ha, S1= stade deux nœuds, S2= stade floraison. (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, ppds= plus petite différence significative (5%), CV= coefficient de variation

En 2006/2007, les meilleures teneurs en phosphore des feuilles aux stades deux nœuds (0,598 % MS) et floraison (0,537 % MS) sont réalisées au niveau de l'essai Leader-start, alors que les meilleurs prélèvements de phosphore par la culture aux mêmes stades 13,62 kg.ha<sup>-1</sup> et 58,47 kg.ha<sup>-1</sup> sont donnés par l'essai d'Agriphos (Annexe II, p.137).

Pour l'année 2008/2009, on note qu'au stade floraison la teneur en phosphore moyenne des feuilles du blé est plus faible (0,309 % MS) par rapport à celles obtenues en 2006/2007. Par contre à maturité, les valeurs moyennes des teneurs en phosphore réalisées en 2008/2009 (0,506 % MS) sont supérieures à celles de 2010/2011 (0,367 % MS).

Les meilleures teneurs (0,734 % MS) et exportations (50,92 kg.ha<sup>-1</sup>) de phosphore par les grains ont été réalisées en 2008/2009, par rapport aux deux derniers essais. Les écarts enregistrés sont respectivement pour les deux caractères de 46,87 % MS et 47,84 % MS en 2009/2010, et de 1,64 % MS et 27,05 % MS en 2010/2011 (tableaux 20, 21 et 22).

### ***Effet du type d'engrais***

Pour l'année 2006/2007, l'engrais solide NPKs a donné les meilleures teneurs (figures 18, 19, 20 et 21) et exportations (figures 23, 24, 25 et 26) de phosphore par la culture du blé aux stades deux nœuds et floraison au niveau des essais d'Agriphos, Leader-start et comparaison des deux essais pour l'ensemble des caractères (Annexe II, p.137).

L'engrais SSP a donné les meilleures teneurs en phosphore des feuilles au stade fin tallage pour l'année 2008/2009 (figure 27) et des grains (figure 31) pour l'année 2009/2010 avec des teneurs moyennes de 0,366 % MS et 0,40 % MS respectivement (tableaux 20 et 21). Alors qu'en 2010/2011, l'engrais Fosfactyl a réalisé les meilleures teneurs en phosphore des pailles avec 0,141 % MS (tableau 22).

Concernant les exportations de phosphore par les grains de blé pendant les trois dernières années, bien que l'effet type d'engrais ne soit pas significatif, on note cependant que l'engrais SSP a donné les meilleures valeurs 53,1 kg.ha<sup>-1</sup>, 27,65 kg.ha<sup>-1</sup> et 43,90 kg.ha<sup>-1</sup> pour les années 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement.

Tableau 20. Moyennes des prélèvements de phosphore par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2008/2009)

Source de variation	[P]S1	[P]S2	[P]S3	[P]Grain	[P]paille
<b>Effet solides</b>					
SSP	0,366 a	0,311	0,515	0,738	0,139
Fosactyl	0,341 b	0,307	0,496	0,730	0,114
Signification	*	ns	ns	ns	ns
ppds	0,027	-	-	-	-
<b>Effet doses</b>					
30	0,336	0,304	0,527	0,719	0,167
60	0,352	0,313	0,505	0,721	0,096
90	0,365	0,306	0,508	0,778	0,119
120	0,363	0,313	0,483	0,718	0,124
Signification	ns	ns	ns	ns	ns
Moyennes générales	0,354	0,309	0,506	0,734	0,126
CV%	9,66	5,24	19,8	11,1	23,5
	<b>EXP P S1</b>	<b>EXP P S2</b>	<b>EXP P S3</b>	<b>EXP P Gr</b>	<b>EXP P paille</b>
<b>Effet solides</b>					
SSP	11	30,54	56,53	53,1	6,784
Fosactyl	10,96	31,03	59,88	48,74	7,79
Signification	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Effet doses</b>					
30	8,46 b	24,18 c	56,96	43,53 b	8,68 a
60	10,57 ab	30,79 b	59,72	51,63 a	7,47 b
90	12,98 a	32,53 ab	61,67	56,42 a	5,875 c
120	11,92 a	35,63 a	54,48	52,1 a	7,129 b
Signification	*	***	ns	*	**
ppds	2,12	3,30	-	7,85	1,08
Moyennes générales	10,98	30,78	58,21	50,92	7,28
CV%	25,9	14,4	25,6	20,7	20,1

Légende : [P]= P % MS, EXP P= exportation P kg/ha, S1= stade épi 1 cm, S2= stade floraison. (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, ppds= plus petite différence significative (5%), CV= coefficient de variation

### **Effet des doses d'engrais**

En 2006/2007, les meilleures teneurs et exportations de phosphore par les feuilles de blé sont obtenues par la dose 200 kg.ha<sup>-1</sup> aux stades deux nœuds et floraison au niveau d'Agriphos et les doses 160 kg.ha<sup>-1</sup> et 200 kg.ha<sup>-1</sup> au niveau de Leader-start (tableaux 17 et 18). Alors qu'en 2008/2009, l'apport de 90 kg.ha<sup>-1</sup> et 120 kg.ha<sup>-1</sup> de phosphore ont réalisé les meilleures teneurs et exportations de phosphore par la culture du blé aux stades fin tallage et floraison (tableau 20, figures 27, 28, 29 et 30).

Concernant les teneurs en phosphore des grains, la dose 30 kg.ha<sup>-1</sup> a donné les meilleures teneurs moyennes avec 0,821 % MS en 2010/2011. Les écarts enregistrés sont de 35,08 % et 23,63 % respectivement pour les doses 60 kg.ha<sup>-1</sup> et 90 kg.ha<sup>-1</sup> (tableau 22, figure 32).

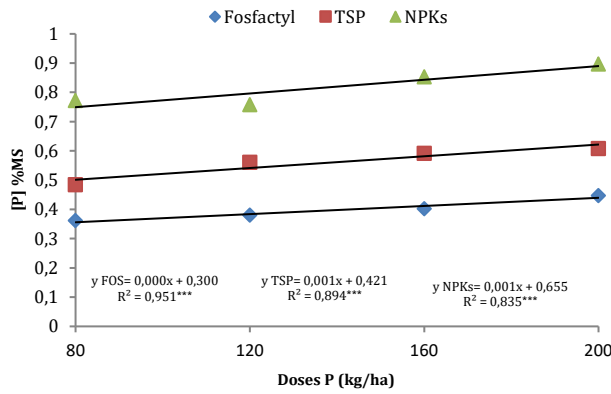


Figure 19. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur [P] des feuilles au stade deux noeuds du blé (Agriphos, 2006/2007)

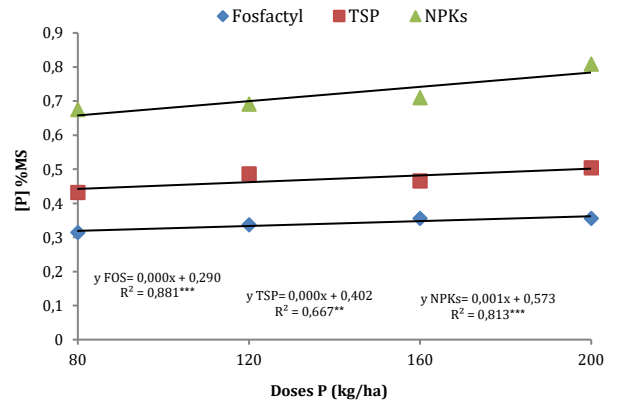


Figure 20. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur [P] des feuilles au stade floraison du blé (Agriphos, 2006/2007)

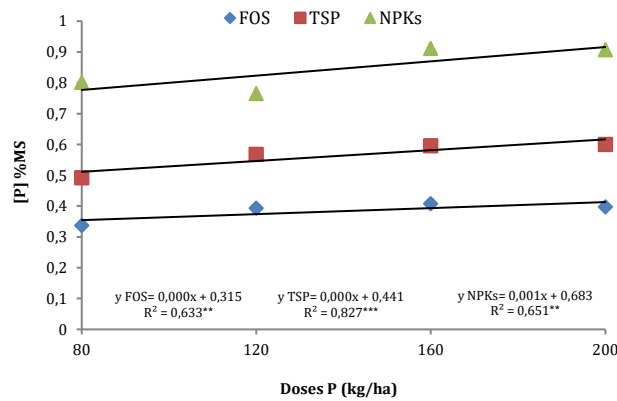


Figure 21. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur [P] des feuilles du blé au stade deux noeuds (Leader-start, 2006/2007)

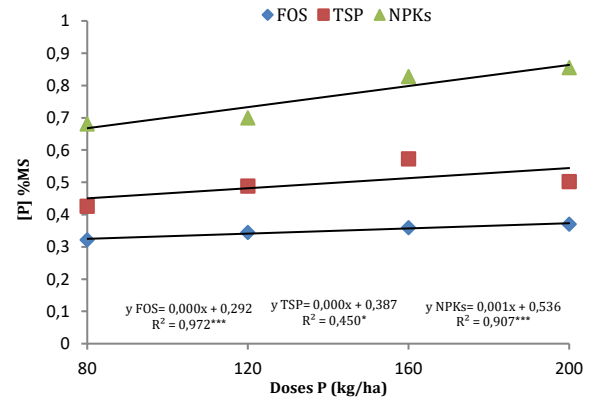


Figure 22. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur [P] des feuilles du blé au stade floraison (Leader-start, 2006/2007)

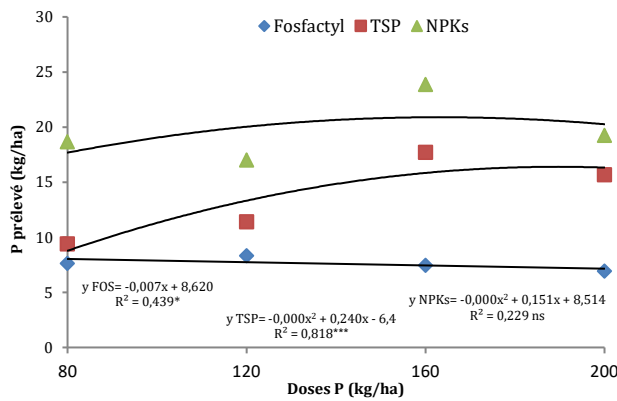


Figure 23. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur P prélevé par la culture du blé au stade deux noeuds (Agriphos, 2006/2007)

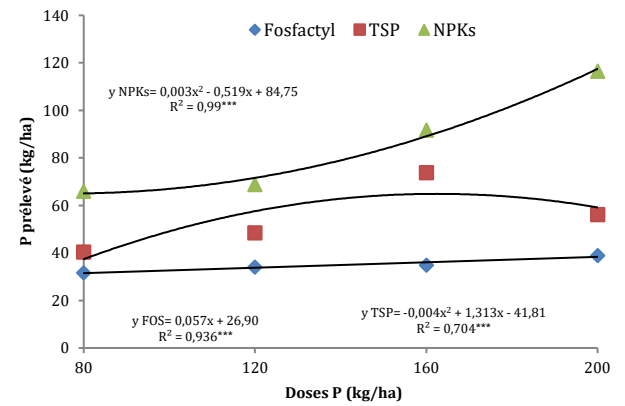


Figure 24. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur P prélevé par la culture du blé au stade floraison (Agriphos, 2006/2007)

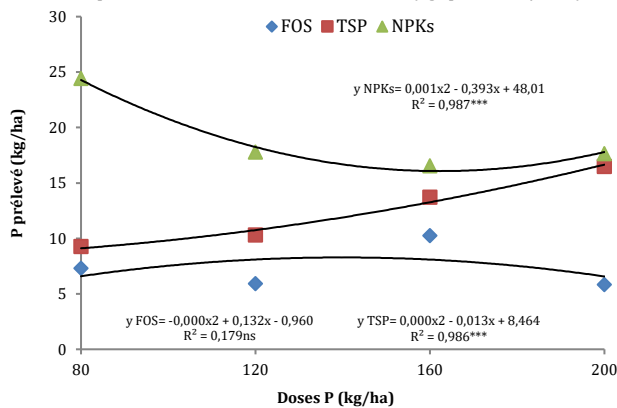


Figure 25. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur P prélevé par le blé au stade deux noeuds (Leader-start, 2006/2007)

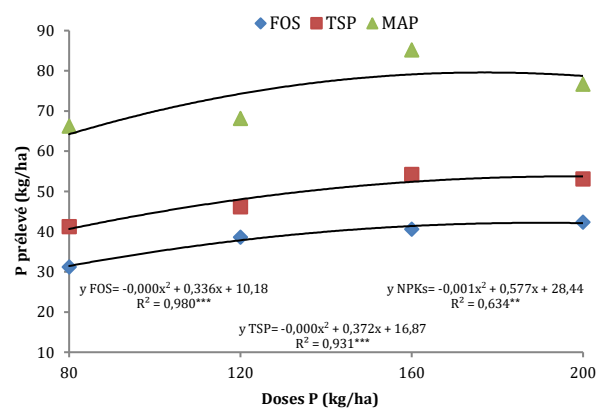


Figure 26. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur P prélevé par le blé au stade floraison (Leader-start, 2006/2007)

Pour les exportations de phosphore par les grains, on note que les trois doses 60 kg.ha<sup>-1</sup>, 90 kg.ha<sup>-1</sup> et 120 kg.ha<sup>-1</sup> ont réalisé les meilleurs résultats avec une moyenne de 53,38 kg.ha<sup>-1</sup> en 2008/2009 (tableau 20). Alors qu'en 2010/2011, la dose de phosphore 30 kg.ha<sup>-1</sup> a engendré les meilleurs prélèvements de phosphore par la culture, en dépassant de 25,66 % et 22,07 % les doses 60 kg.ha<sup>-1</sup> et 90 kg.ha<sup>-1</sup> (tableau 22, figure 34).

Les figures 35 et 36 illustrent une forte liaison entre le phosphore prélevé par la culture du blé et le rendement en grain produit en 2008/2009 et 2010/2011.

**Tableau 21. Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2009/2010)**

Source de variation	[P]Gr	EXP P Gr
<b>Effet engrais</b>		
SSP	0,40 a	27,65
Fosactyl	0,38 b	24,8
MAP	0,387 ab	27,2
Signification	*	ns
ppds	0,0144	
<b>Effet dose</b>		
30	0,387	26,5
60	0,395	28,34
90	0,389	24,82
Signification	ns	ns
Moyennes générales	0,39	26,56
CV%	4,35	13,4

**Légende :** [P]= P % MS, EXP P= exportation P kg/ha. (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, ppds= plus petite différence significative (5%), CV= coefficient de variation

**Tableau 22. Moyennes des prélèvements du phosphore par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2010/2011)**

	[P]Gr	[P]paille	[P] plt.	EXP P Gr	EXP P Paille
<b>Effet engrais</b>					
SSP	0,714	0,122 ab	0,353	43,90	8,636
Fosactyl	0,647	0,141 a	0,372	34,22	9,455
MAP	0,622	0,093 b	0,376	33,59	5,876
Signification	ns	*	ns	ns	ns
ppds	-	0,0448	-	-	-
<b>Effet dose</b>					
30	0,821 a	0,125	0,383 a	44,28 a	7,509 ab
60	0,533 c	0,119	0,321 b	32,92 b	9,17 a
90	0,627 b	0,1125	0,397 a	34,51 b	7,187 b
Signification	***	ns	**	***	*
ppds	0,147	-	0,0547	8,202	1,98
Moyennes générales	0,661	0,118	0,367	37,23	7,954
CV%	31,11	31,70	20,75	30,68	34,67

**Légende :** [P]= P % MS, EXP P= exportation P kg/ha, plt= plante entière. (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, ppds= plus petite différence significative (5%), CV= coefficient de variation

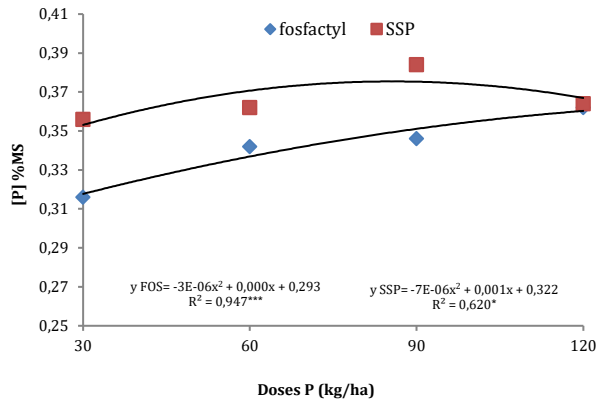


Figure 27. Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur la teneur en P des feuilles au stade épi 1 cm du blé (2008/2009)

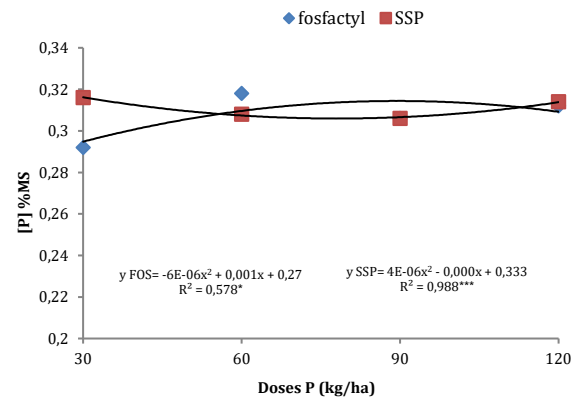


Figure 28. Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur la teneur en P des feuilles au stade floraison (2008/2009)

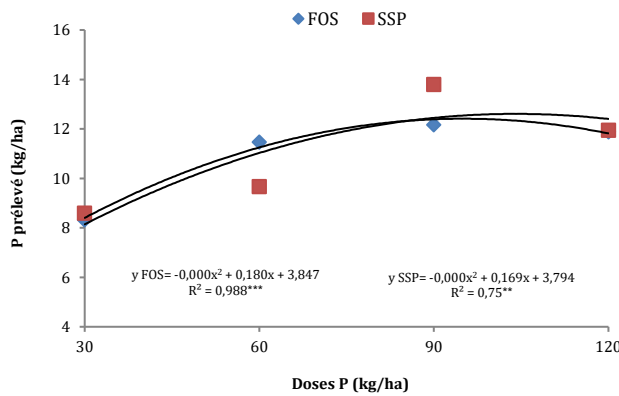


Figure 29. Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur P prélevé par les feuilles du blé au stade épi 1cm (2008/2009)

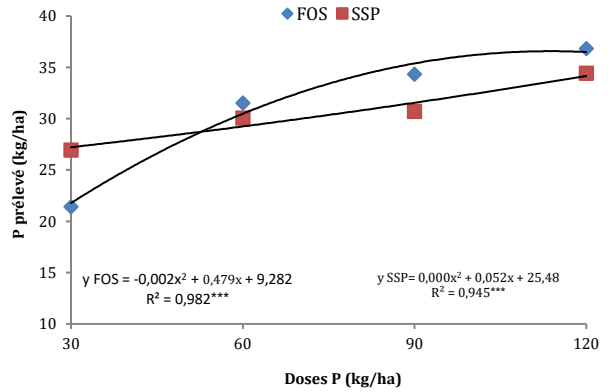


Figure 30. Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur P prélevé par le blé au stade floraison (2008/2009)

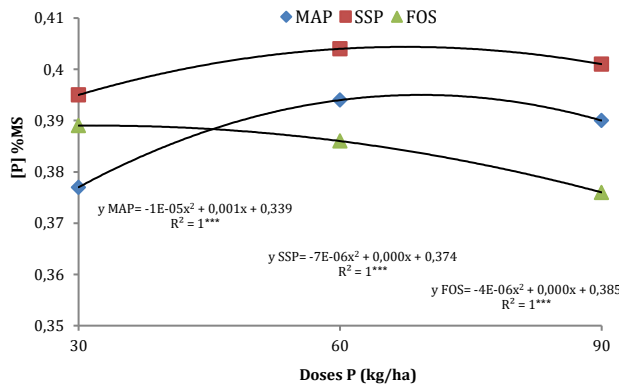


Figure 31. Effet des engrais MAP, SSP et Fosfactyl sur la teneur en P des grains du blé (2009/2010)

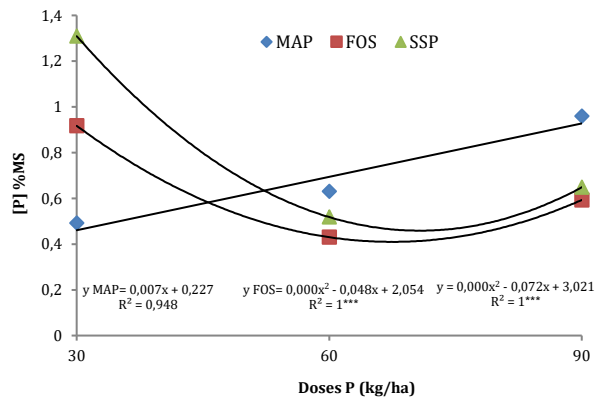


Figure 32. Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur la teneur en P des grains du blé (2010/2011)

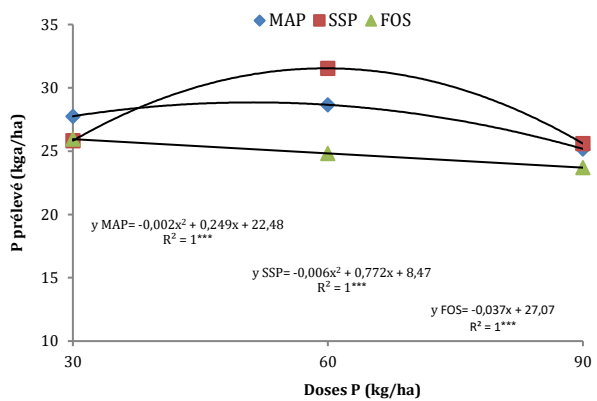


Figure 33. Effet des engrais MAP, SSP et Fosfactyl sur P prélevé par les grains (2009/2010)

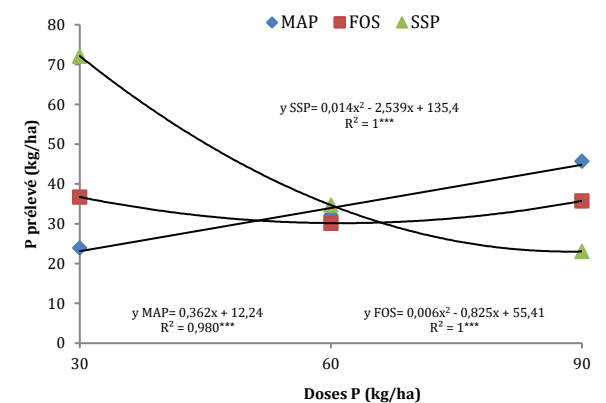


Figure 34. Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur P prélevé par les grains (2010/2011)



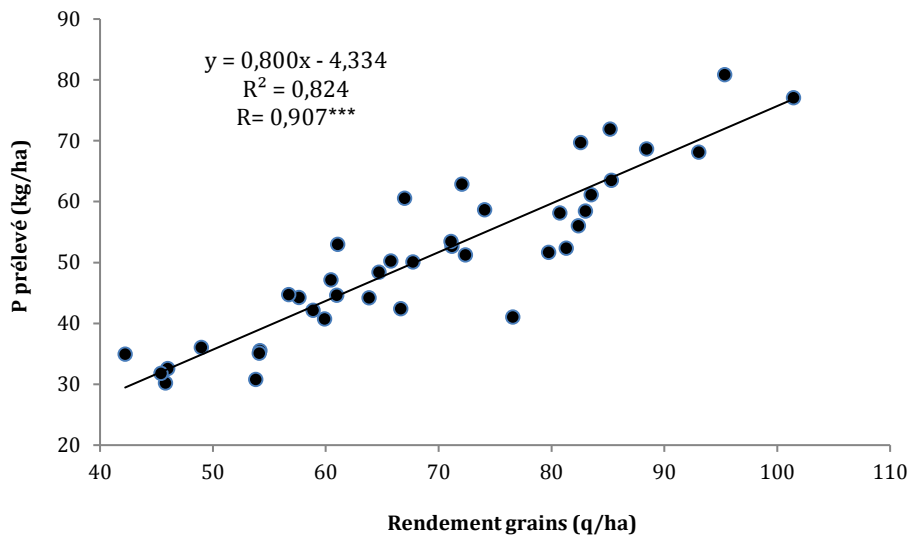


Figure 35. Relation entre le rendement et les exportations du P par les grains (2008/2009)

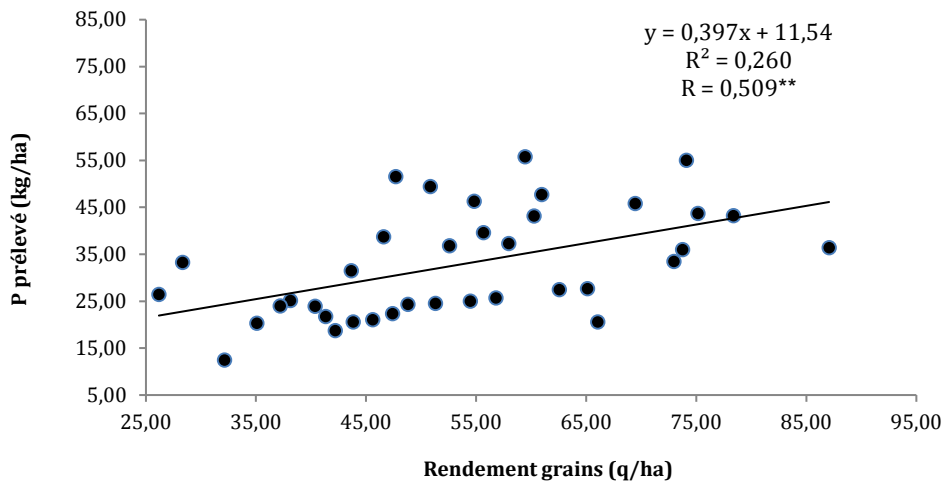


Figure 36. Relation entre le rendement et les exportations du P par les grains (2010/2011)

## **II.2. Variation de l'efficience d'utilisation, l'efficience d'absorption et l'efficacité d'utilisation du phosphore chez le blé dur sous différentes sources et doses de phosphore**

### **II.2.1. Effet des différentes sources et doses d'engrais phosphatés sur l'efficience d'utilisation du phosphore**

Les résultats portés sur l'annexe II (p. 139) montrent que l'efficience d'utilisation (EUP) du phosphore est fortement affectée ( $P < 0,001$ ) par les doses de phosphore au niveau des deux essais menés avec Agriphos et Leader-start en 2006/2007, 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011. Alors que ni les engrais solides et ni les engrais foliaires n'ont eu d'effets significatifs sur ce paramètre.

#### ***Moyennes des essais***

Les meilleurs résultats d'efficience d'utilisation du phosphore (EUP) sont obtenus en 2008/2009 avec 193 kg de grain/kg P disponible (sol + apporté) (tableau 24), suivi par les essais de 2009/2010 (181,2 kg de grain/kg P) (tableau 25), 2006/2007 (64,47 kg de grain/kg P, 69,69 kg de grain/kg P et 67,07 kg de grain/kg P respectivement pour les essais menés avec Agriphos, Leader-start et la comparaison des deux essais) (tableaux 23a et 23b), et enfin 2010/2011 (30,31 kg de grain/kg P disponible) (tableau 26). Les coefficients de variation enregistrés sont de 20,25 % en 2008/2009, 14,5 % en 2009/2010 et de 23,2 % en 2010/2011.

#### ***Effet du type d'engrais***

Bien que l'effet type d'engrais soit statistiquement non significatif, les meilleures valeurs d'efficience d'utilisation du phosphore sont obtenues par l'engrais NPKs au niveau d'Agriphos (72,82 kg de grain/kg P), de Leader-start (74,13 kg de grain/kg P) et comparaison des essais (73,47 kg de grain/kg P) pour l'année 2006/2007, engrais fosfacyl (206,3 kg de grain/kg P disponible) pour l'année 2008/2009 et engrais MAP pour les deux années 2009/2010 (188,76 kg de grain/kg P) et 2010/2011 (32,54 kg de grain/kg P) respectivement (tableaux 23, 24, 25 et 26).

#### ***Effet des doses d'engrais***

L'apport de doses croissantes de phosphore a eu un effet négatif hautement significatif sur l'EUP quelle que soit l'année. La culture du blé s'est révélée plus efficiente

pour l'utilisation du P en 2008/2009 par rapport aux autres années. L'EUP est passée de 290 kg de grain/kg P disponible pour la dose 30 kg.ha<sup>-1</sup> à 119 kg de grain/kg pour la dose 120 kg.ha<sup>-1</sup> (tableau 24). Le même résultat a été obtenu en 2009/2010 même si pour cette fois le sol choisi avait une teneur initiale en P (4,14 mg P/kg sol) qui équivaut à environ le double de celle que nous avons en 2008/2009 (2,26 mg P/kg sol). L'EUP est passé de 250,5 kg de grain/kg P disponible pour la dose 30 kg.ha<sup>-1</sup> à 118,4 kg de grain/kg P disponible pour la dose 90 kg.ha<sup>-1</sup> (tableau 25).

**Tableau 23a. Effet des engrais solides et des doses sur les EUP (kg de grains/kg Psol) au niveau des essais menés avec Agriphos et Leader-start**

	<b>Agriphos</b>	<b>Leader-start</b>
<b>Effet engrais solides</b>		
Fosfacyl	61,27	67,28
TSP	56,33	67,65
NPKs	72,82	74,13
Signification	ns	ns
<b>Effet doses d'engrais</b>		
80	82,31 a	94,34 a
120	69,04 b	75,07 b
160	58,56 b	58,40 c
200	47,99 c	50,93 c
Signification	***	***
ppds	12,54	14,87
Moyennes générales	64,47	69,69
CV %	26,47	29,00

**Tableau 23b. Effet des engrais solides et foliaires sur l'EUP (kg de Grains/kg Psol) au niveau de la comparaison des deux essais**

	<b>EUP</b>
<b>Effet engrais solides</b>	
Fosfacyl	64,27
TSP	63,49
NPKs	73,47
Signification	ns
<b>Engrais foliaires</b>	
Agriphos	64,47
Leader start	69,68
Signification	ns
Moyennes générales	67,08
CV %	35,00

**Légende :** EUP : efficacité d'utilisation P, Gr : grains, Psol : P disponible (sol + apport). (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0,05, P<0,01, P<0,001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. : coefficient de variation, ppds : plus petite différence significative (5%).

Les figures 37, 38, 39 et 40 montrent que quel que soit l'engrais apporté, l'EUP diminue avec les doses croissantes de phosphore pour les essais de 2006/2007, 2008/2009 et 2009/2010. Pour l'année 2010/2011, cette constatation est vérifiée pour l'engrais SSP seulement ; contrairement au MAP, l'EUP augmente avec les doses de phosphore. Tandis que pour le fosfactyl, la valeur maximale est enregistrée à 60 kg.ha<sup>-1</sup> P (figure 41).

### **II.2.2. Effet des différentes sources et doses d'engrais phosphatés sur l'efficience d'absorption du phosphore (EAP)**

L'efficience d'absorption du phosphore traduit la capacité de la plante à extraire le phosphore du sol. Pour les trois essais 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011, l'efficience d'absorption du phosphore est fortement affectée par les doses de phosphore (Annexe II, p. 139). Les différences entre les traitements sont très hautement significatives ( $P < 0,001$ ), alors que le type d'engrais n'a eu aucun effet significatif sur l'EAP (tableaux 23, 24 et 25).

#### ***Moyennes des essais***

En se référant aux tableaux 24, 25 et 26, les valeurs moyennes d'efficience d'absorption du phosphore (EAP) sont inversement proportionnelles aux quantités de phosphore dans le sol.

Les efficacités d'absorption obtenues sont de 1,210 kg P absorbé/kg P disponible, de 0,696 kg P absorbé/ kg P disponible et 0,192 kg P absorbé/ kg P disponible réalisées en 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement. Les coefficients de variation obtenus sont de 27,7 %, 14,3 % et 33,4 % respectivement pour les années 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011.

#### ***Effet du type d'engrais***

Quelle que soit l'année, l'effet type d'engrais est non significatif sur l'efficience d'absorption du phosphore (EAP). Cependant, on note que les engrais fosfactyl (2008/2009) et MAP (2009/2010 et 2010/2011) ont donné les meilleurs résultats.

Tableau 24. Effet des engrais solides et des doses sur les EUP, EAP et ECUP du blé dur (2008/2009)

	EUP	EAP	ECUP
<b>Effet solides</b>			
SSP	179,75	0,915	136,60
Fosactyl	206,32	1,505	138,55
Signification	ns	ns	ns
<b>Effet doses</b>			
30	290,0 a	2,082 a	140,3
60	209,8 b	1,517 b	141,1
90	153,3 c	1,195 c	129,1
120	119,05 d	0,865 d	139,7
Signification	***	***	ns
ppds	29,08	0,25	-
Moyennes générales	193,04	1,210	137,6
CV %	20,25	27,7	11,6

Tableau 25. Effet des engrais solides et des doses sur les EUP, EAP et ECUP du blé dur (2009/2010)

	EUP	EAP	ECUP
<b>Effet solides</b>			
SSP	182,13	0,697	260,5
Fosactyl	172,60	0,673	259,1
MAP	188,76	0,719	256,8
Signification	ns	ns	ns
<b>Effet doses</b>			
30	250,5 a	0,955 a	263,03 a
60	174,7 b	0,674 b	256,30 b
90	118,4 c	0,461 c	257,10 b
Signification	***	***	*
ppds	17,71	0,067	6,71
Moyennes générales	181,2	0,696	258,8
CV %	14,5	14,3	9,52

Tableau 26. Effet des engrais solides et des doses sur les EUP, EAP et ECUP du blé dur (2010/2011)

	EUP	EAP	ECUP
<b>Effet solides</b>			
SSP	29,41	0,18	169,2
Fosactyl	28,96	0,174	173,7
MAP	32,54	0,221	183,2
Signification	ns	ns	ns
<b>Effet doses</b>			
30	30,84 ab	0,242 a	144,5 b
60	33,24 a	0,174 b	194,8 a
90	26,84 b	0,16 b	186,8 ab
Signification	**	***	**
ppds	5,049	0,046	44,94
Moyennes générales	30,31	0,192	175,4
CV %	23,2	33,4	35,6

**Légende :** EUP : efficacité d'utilisation P (kg de grains/kg P disponible dans le sol), EAP : efficacité d'absorption du P (kg P absorbé/kg P disponible dans le sol), ECUP : efficacité d'utilisation du P (kg grains/kg P absorbé. (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

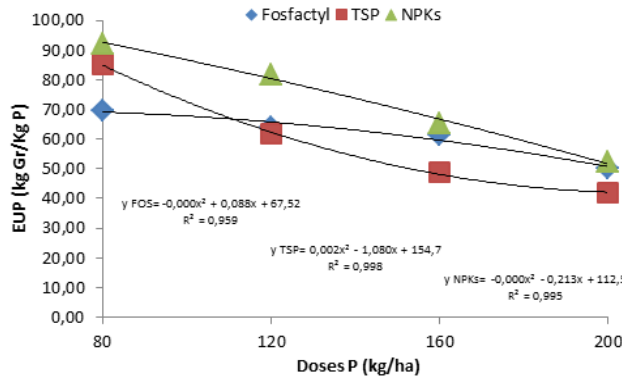


Figure 37. Effet des engrais NPKs, TSP et Fosfactyl sur l'EUP (Agriphos, 2006/2007)

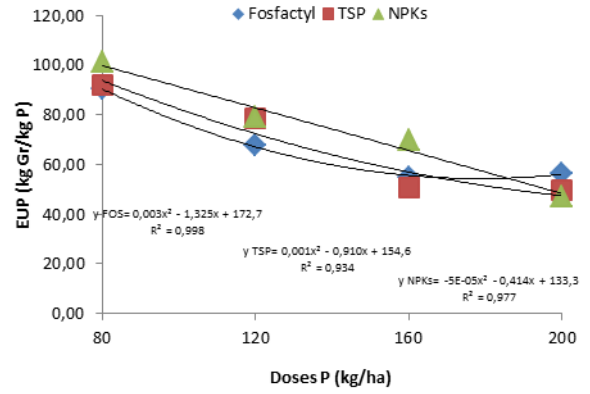


Figure 38. Effet des engrais Fosfactyl, TSP et NPKs sur l'EUP (Leader-start, 2006/2007)

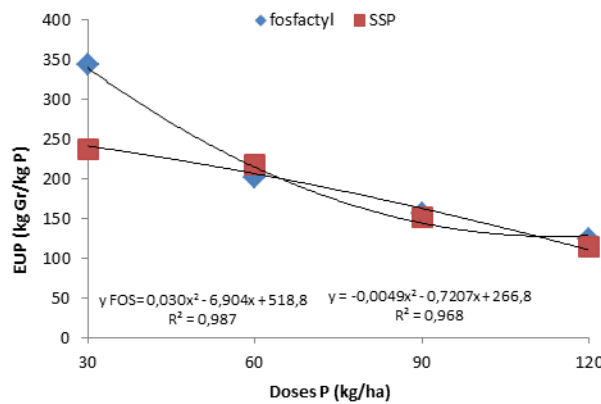


Figure 39. Effet des engrais fosfactyl et SSP sur l'EUP (2008/2009)

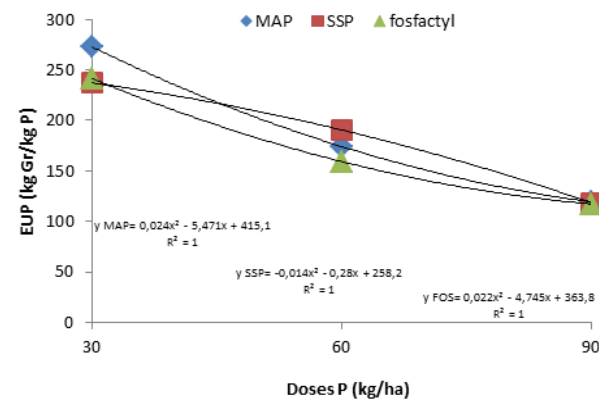


Figure 40. Effet des engrais MAP, SSP et Fosfactyl sur l'EUP (2009/2010)

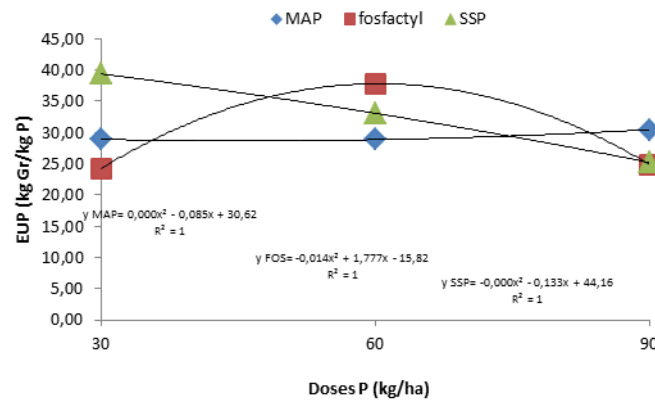


Figure 41. Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur l'EUP (2010/2011)

### ***Effet des doses d'engrais***

Pour l'ensemble des essais, l'apport de 30 kg.ha<sup>-1</sup> au sol a présenté la meilleure efficacité d'absorption du phosphore, par contre la dose la plus élevée a donné les plus faibles valeurs d'EAP. Cette efficacité a été réduite suite aux apports croissants de phosphore qui ne se sont pas traduits par une amélioration des prélèvements en cet élément.

Les résultats enregistrés varient de 2,082 kg P absorbé/ kg P disponible, de 0,955 kg P absorbé/ kg P disponible et de 0,242 kg P absorbé/ kg P disponible pour les années 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement, à 0,865 kg P absorbé/ kg P réalisée avec la dose 120 kg.ha<sup>-1</sup> (2008/2009), 0,461 kg P absorbé/ kg P (2009/2010) et 0,16 kg P absorbé/ kg P (2010/2011) obtenues avec la dose 90 kg.ha<sup>-1</sup>.

L'efficacité d'absorption du phosphore (EAP) provenant des différents engrais testés en 2008/2009 et 2009/2010 est inversement proportionnelle aux doses croissantes de P (figures 42 et 43). Le même résultat est observé chez les deux engrais SSP et MAP, par contre chez l'engrais fosfactyl, les valeurs d'EAP augmentent avec les niveaux de phosphore pour l'année 2010/2011 (figure 44).

### **II.2.3. Effet des différentes sources et doses d'engrais phosphatés sur l'efficacité d'utilisation du phosphore (ECUP)**

L'efficacité d'utilisation du phosphore traduit la capacité de la plante à convertir le phosphore absorbé en rendement grain.

Des résultats significatifs sont enregistrés en 2009/2010 et 2010/2011, marquant l'effet des doses d'engrais sur l'efficacité d'absorption du phosphore (tableaux 25 et 26), par contre l'effet type d'engrais s'avère non significatif (Annexe II, p. 139).

### ***Moyennes des essais***

La culture du blé a montré une plus grande ECUP avec 258,8 kg de grains/kg P absorbé en 2009/2010, par rapport à 137,6 kg grains/kg P absorbé et 175,4 kg de grains/kg P absorbé obtenues en 2008/2009 et 2010/2011 respectivement. Les coefficients de variation sont faibles pour les deux premiers essais 2008/2009 (11,6 %) et 2009/2010 (9,52 %), alors qu'en 2010/2011 (35,6 %) le coefficient de variation est considérablement élevé.

### ***Effet du type d'engrais***

L'efficacité d'utilisation du phosphore par la culture n'est pas influencé statistiquement par les différentes sources de phosphore étudiées quelle que soit l'année. Les meilleurs résultats sont donnés par les engrais fosfactyl (138,5 kg de grains/kg P absorbé), SSP (260,5 kg de grains/kg P absorbé) et MAP (183,2 kg de grains/kg P absorbé), respectivement pour les essais conduits en 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011.

### ***Effet des doses d'engrais***

Les meilleures valeurs d'efficacité d'utilisation du phosphore sont obtenues par la dose 30 kg.ha<sup>-1</sup> en 2009/2010 et la dose 60 kg.ha<sup>-1</sup> en 2010/2011, en enregistrant 263,03 kg de grains/kg P absorbé et 194,8 kg de grains/kg P absorbé pour les deux années respectivement.



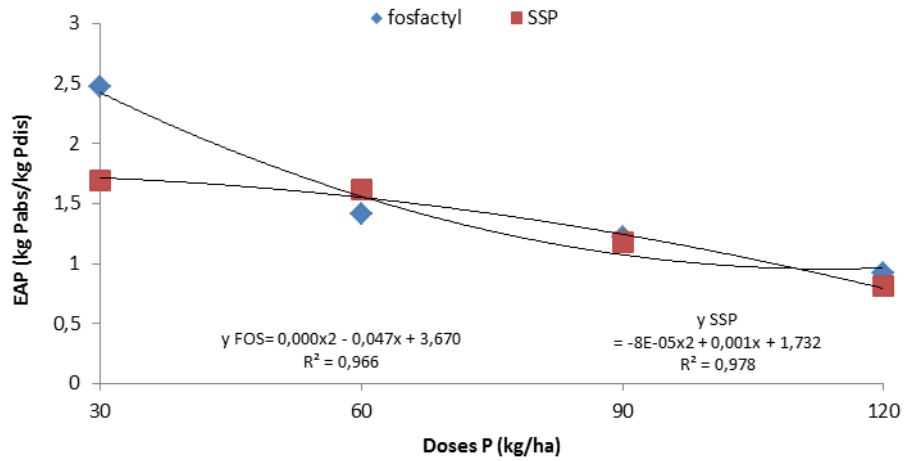


Figure 42. Effet des engrais Fosfactyl et SSP sur l'EAP (2008/2009)

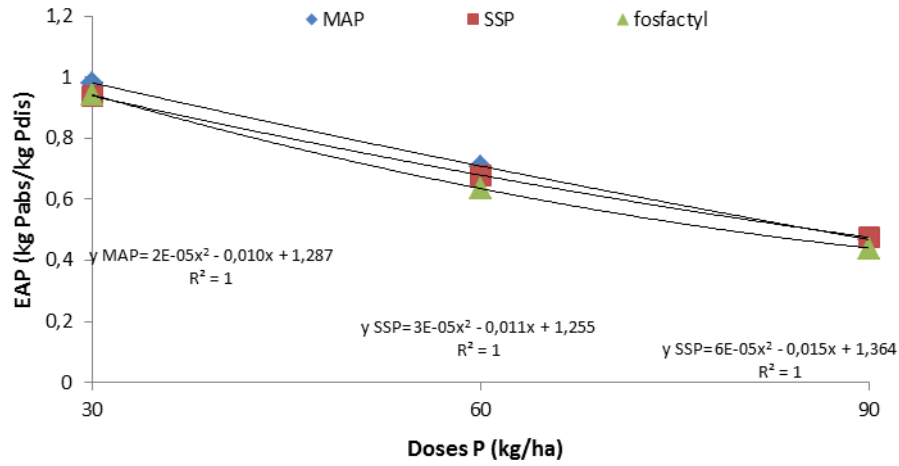


Figure 43. Effet des engrais MAP, SSP et Fosfactyl sur l'EAP (2009/2010)

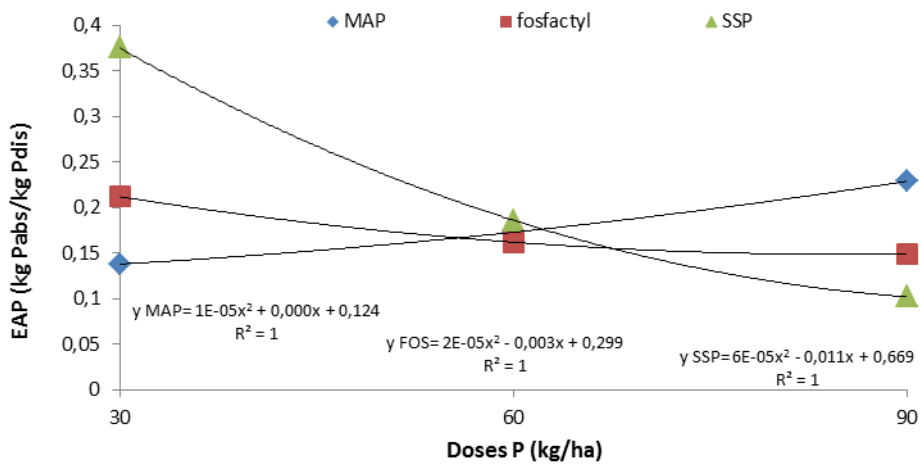


Figure 44. Effet des engrais MAP, Fosfactyl et SSP sur l'AEP (2010/2011)

### **II.3. Prélèvements azotés totaux par le blé dur et leurs répartitions entre la paille et les grains**

Les teneurs en azote ont été déterminées pour l'essai conduit en 2008/2009, aux stades fin tallage, floraison et maturité (grain + paille) du blé, alors que pour les deux dernières années (2009/2010 et 2010/2011), cet élément est déterminé uniquement dans les grains.

Les résultats de l'analyse de la variance présentés dans l'annexe II (p. 140), montrent que le type d'engrais phosphaté n'a eu aucun effet significatif sur la teneur et les exportations d'azote à différents stades (fin tallage, floraison et maturité) et par les différents organes de la culture en 2008/2009, et au niveau des grains pour les deux années 2009/2010 et 2010/2011. Tandis que les doses de phosphore apportées ont fortement affecté les teneurs en azote des feuilles aux stades floraison ( $p < 0,01$ ) et maturité ( $p < 0,001$ ), des grains ( $p < 0,001$ ), des pailles ( $p < 0,05$ ) du blé en 2008/2009 et les exportations d'azote par les grains ( $p < 0,05$ ) en 2010/2011.

#### ***Moyennes des essais***

Bien que l'apport de phosphore n'ait pas eu d'effet significatif sur le taux d'azote dans les grains en 2009/2010, on note cependant, que la meilleure moyenne obtenue est de 3,089 % MS, réalisée cette année, soient des écarts de 26,71 % et 42,32 % enregistrés par rapport aux années 2008/2009 et 2010/2011 respectivement.

Les exportations d'azote par les grains sont fortement liées à la teneur en N et au rendement en grain. Par conséquent, la moyenne la plus élevée (209,4 kg.ha<sup>-1</sup>) d'azote prélevé est obtenue en 2009/2010, où la teneur en N et le rendement en grain sont élevées (N : 3,089 % MS et rendement : 65,16 q.ha<sup>-1</sup>) (tableaux 9 et 28).

#### ***Effet du type d'engrais***

Bien que l'effet type d'engrais ne soit pas significatif statistiquement, on note que l'engrais SSP a donné les meilleures teneurs en azote à différents stades et exportations d'N par les feuilles au stade floraison de la culture pour l'essai conduit en 2008/2009 (tableau 27), teneur en azote des grains pour l'essai de 2009/2010 (tableau 28).

Tableau 27. Moyennes des prélèvements d'azote par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2008/2009)

Source de variation	[N]S1	[N]S2	[N]S3	[N]Grain	[N]paille
<b>Effet solides</b>					
SSP	0,979	0,872	1,512	2,339	0,327
Fosactyl	0,946	0,883	1,452	2,189	0,318
Signification	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Effet doses</b>					
30	0,98	0,884 b	1,492 b	2,276 b	0,345 a
60	0,922	0,858 b	1,719 a	2,556 a	0,388 a
90	0,962	0,866 b	1,248 c	1,959 c	0,224 b
120	0,987	0,949 a	1,469 b	2,266 b	0,334 a
Signification	ns	**	***	***	*
ppds	-	0,0535	0,108	0,164	0,069
Moyennes générales	0,963	0,878	1,482	2,264	0,323
CV %	11,14	6,34	7,63	7,56	22,3
	<b>EXP N S1</b>	<b>EXP N S2</b>	<b>EXP N S3</b>	<b>EXP N Gr</b>	<b>EXP N paille</b>
<b>Effet solides</b>					
SSP	29,13	85,72	170,9	155,8	15,11
Fosactyl	30,13	68,36	191,6	175,1	16,49
Signification	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Effet doses</b>					
30	24,49	65,83	161,1	146,3	14,78
60	28,27	84,57	211,8	193,1	18,65
90	34,52	80,85	163,3	151,3	11,99
120	31,22	76,9	188,8	171	17,79
Signification	ns	ns	ns	ns	ns
Moyennes générales	29,63	77,04	181,3	165,5	15,8
CV %	26,4	31,9	29,2	24,3	29,5

**Légende :** [N]= % N, EXP N= exportation N, S1= stade fin tallage, S2= stade floraison, S3= stade maturité. (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif. C.V. = coefficient de variation, ppds = plus petite différence significative (5 %).

### Effet des doses d'engrais

En 2008/2009, la dose 120 kg.ha<sup>-1</sup> a favorisé la meilleure teneur en N des feuilles au stade floraison avec 0,949 % MS, dépassant de 6,85 %, 9,59 % et 8,75 % les résultats obtenus par les doses 30 kg.ha<sup>-1</sup>, 60 kg.ha<sup>-1</sup> et 90 kg.ha<sup>-1</sup> respectivement. Tandis que la dose 60 kg.ha<sup>-1</sup> a donné les meilleures teneurs d'N de la plante entière au stade maturité et des grains de blé avec 1,719 % MS et 2,556 % MS respectivement, contre les plus faibles teneurs obtenues par la dose 90 kg.ha<sup>-1</sup>. Pour la teneur en azote des pailles, les doses 30 kg.ha<sup>-1</sup>, 60 kg.ha<sup>-1</sup> et 120 kg.ha<sup>-1</sup> ont réalisé les meilleures teneurs avec en moyenne 0,355 % MS (tableau 27). En 2010/2011, la dose 30 kg.ha<sup>-1</sup> a donné les meilleures exportations d'azote par les grains avec 104 kg N.ha<sup>-1</sup> (tableau 29).

#### **II.4. Teneurs en protéines totales des grains**

Les teneurs en protéines totales des grains de blé dur est un critère de qualité étroitement lié à la concentration en azote des grains. Elles varient sous l'influence de facteurs génétiques aussi bien qu'agro-climatiques (Triboi *et al.*, 2000).

Le taux de protéines totales a été influencé statistiquement par le type d'engrais ( $p < 0,05$ ) et les doses d'engrais ( $p < 0,01$ ) en 2008/2009. Alors que cet effet est non significatif pour 2009/2010 et 2010/2011.

##### ***Moyennes des essais***

Le taux de protéines moyen le plus élevé est obtenu en 2009/2010, avec 17,6 %, en dépassant de 26,65 % et 41,71 % respectivement les taux moyens des années 2008/2009 et 2009/2010 (tableau 30).

##### ***Effet du type d'engrais***

L'engrais SSP a enregistré le meilleur taux de protéines en 2008/2009 et 2009/2010, avec 13,34 % et 17,7 % respectivement pour les deux années. En 2010/2011, le fosfactyl a donné le taux le plus élevé (10,83 %).

##### ***Effet des doses d'engrais***

En 2008/2009, La dose 60 kg.ha<sup>-1</sup> a donné les meilleurs résultats des protéines totales des grains (14,56 %), suivi par les doses 30 kg.ha<sup>-1</sup> (12,97 %), 120 kg.ha<sup>-1</sup> (12,93 %) et 90 kg.ha<sup>-1</sup>(11,17 %).

Les droites de régression (figures 45 et 46) montrent que les teneurs en P et les protéines totales des grains sont liées négativement en 2008/2009 ( $r = -0,45^{**}$ ) et positivement en 2009/2010 ( $r = 0,408^{**}$ ). Par contre, cette liaison est non significative en 2010/2011.

**Tableau 28. Moyennes des prélèvements d'azote par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2009/2010)**

	[N]Gr	EXP N Gr
<b>Effet engrais solides</b>		
SSP	3,1	214,1
Fosactyl	3,07	196,5
MAP	3,084	217,5
Signification	ns	ns
<b>Effet doses d'engrais</b>		
30	3,096	213
60	3,073	219,3
90	3,097	195,8
Signification	ns	ns
Moyennes générales	3,089	209,4
CV%	1,51	14,9

**Légende :** [N]Gr = concentration N %MS, EXP N Gr = exportation N des grains. (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif. C.V. = coefficient de variation, ppds = plus petite différence significative (5%).

**Tableau 29. Moyennes des prélèvements d'azote par le blé dur pour les engrais solides et les doses (2010/2011)**

	[N]Gr	EXP N Gr
<b>Effet engrais solides</b>		
SSP	1,748	104,2
Fosactyl	1,88	107,3
MAP	1,719	98,43
Signification	ns	ns
<b>Effet doses d'engrais</b>		
30	1,859	104,0
60	1,688	103,2
90	1,8	102,7
Signification	ns	ns
Moyennes générales	1,782	103,3
CV%	20,7	35,7

**Légende :** Se référer au tableau 28.

**Tableau 30. Taux de protéines des grains**

	2008/2009	2009/2010	2010/2011
<b>Effet engrais solides</b>			
SSP	13,34 a	17,7	10,07
Fosactyl	12,48 b	17,53	10,83
MAP	-	17,57	9,90
Signification	*	ns	ns
ppds	0,86	-	-
<b>Effet doses d'engrais</b>			
30	12,97 b	17,58	10,7
60	14,56 a	17,59	9,72
90	11,17 c	17,63	10,37
120	12,93 b	-	-
Signification	**	ns	ns
ppds	0,528	-	-
Moyennes générales	12,91	17,6	10,26
CV%	4,38	1,51	20,79

**Légende :** (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif. C.V. = coefficient de variation, ppds = plus petite différence significative (5%).

## II.5. Concentrations des grains de blé dur en éléments K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Na<sup>+</sup>

Pour l'essai réalisé en 2009/2010, une analyse minérale globale pour la détermination des prélèvements en éléments minéraux du blé dur dans les conditions d'El-Goléa a été effectuée.

Les analyses statistiques ont montré des différences significatives ( $P < 0,05$ ) entre les différentes doses testées pour le paramètre taux de Ca<sup>2+</sup> des grains (Annexe II, p. 140). La teneur la plus élevée est donnée par la dose 60 kg.ha<sup>-1</sup> avec 0,087 % MS, contre la plus faible avec 0,058 % MS, obtenue par la dose 90 kg.ha<sup>-1</sup> (tableau 31).

**Tableau 31. Moyennes des teneurs des grains en K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> et Mg<sup>2+</sup> en % MS pour les engrais solides et les doses (2009/2010)**

Source de variation	[K <sup>+</sup> ]	[Ca <sup>2+</sup> ]	[Na <sup>+</sup> ]	[Mg <sup>2+</sup> ]
<b>Effet engrais solides</b>				
SSP	0,614	0,052	0,026	0,136
Fosactyl	0,619	0,094	0,027	0,132
MAP	0,615	0,069	0,022	0,134
Signification	ns	ns	ns	ns
<b>Effet doses d'engrais</b>				
30	0,618	0,07 b	0,029	0,134
60	0,614	0,087 a	0,024	0,135
90	0,616	0,058 b	0,0217	0,132
Signification	ns	*	ns	ns
ppds	-	0,0151	-	-
Moyennes générales	0,616	0,072	0,0236	0,134
CV%	5,36	31,3	26,79	4,5

**Légende :** [K<sup>+</sup>]= K (%MS), [Ca<sup>2+</sup>]= Ca<sup>2+</sup> (%MS), [Na<sup>+</sup>]= Na<sup>+</sup>(%MS), [Mg<sup>2+</sup>]= Mg<sup>2+</sup>(%MS), (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0,05, P<0,01, P<0,001 respectivement ; ns : non significatif.

Bien que le type d'engrais n'ait pas eu d'effet significatif sur les teneurs en K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> et Mg<sup>2+</sup>, on remarque que l'engrais fosactyl a enregistré les concentrations les plus élevées en K<sup>+</sup> (0,619 % MS), Ca<sup>2+</sup>(0,094 % MS) et Na<sup>+</sup> (0,027 % MS) et la plus faible teneur en Mg<sup>2+</sup> (0,0132 % MS), par rapport aux deux autres engrais MAP et SSP (tableau 31).

Les courbes de régression (figures 47 et 48) montrent que les teneurs en P des grains sont positivement et significativement liées à celles des deux éléments K<sup>+</sup> ( $r = 0,608^{***}$ ) et Mg<sup>2+</sup> ( $r = 0,882^{***}$ ). Ces résultats suggèrent que la disponibilité insuffisante du phosphore au niveau du sol n'affecte pas seulement l'absorption phosphatée, mais elle peut également affecter l'absorption du K<sup>+</sup>et du Mg<sup>2+</sup>.

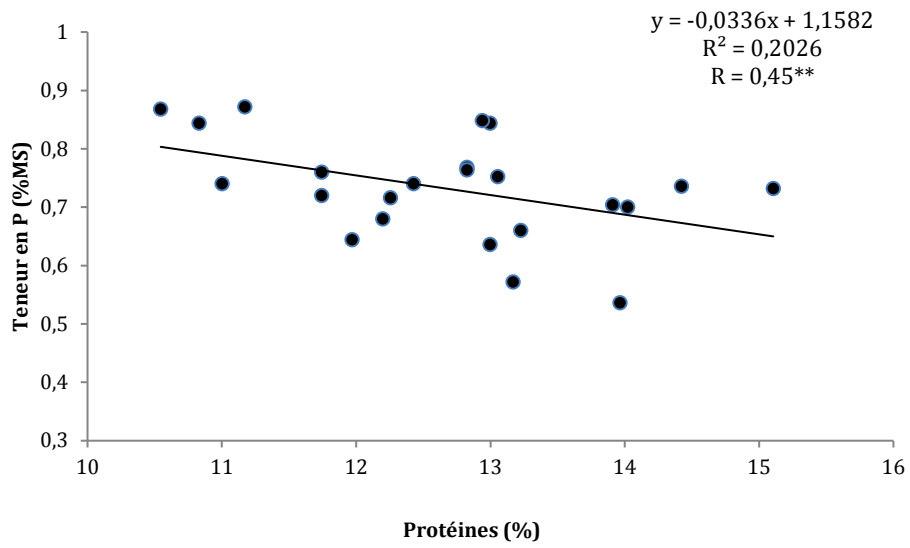


Figure 45. Relation entre la teneur en phosphore des grains et taux de protéines (2008/2009)

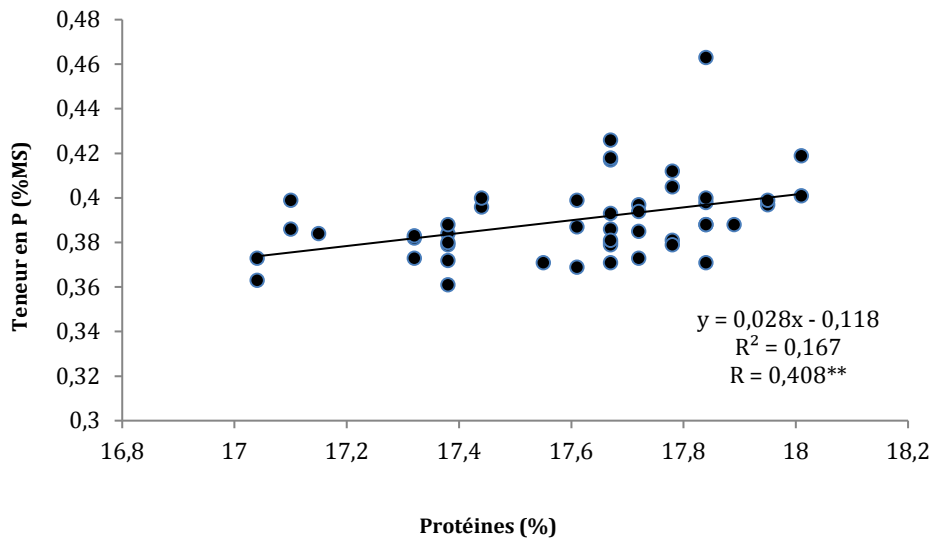


Figure 46. Relation entre la teneur en phosphore des grains et le taux de protéines (2009/2010)

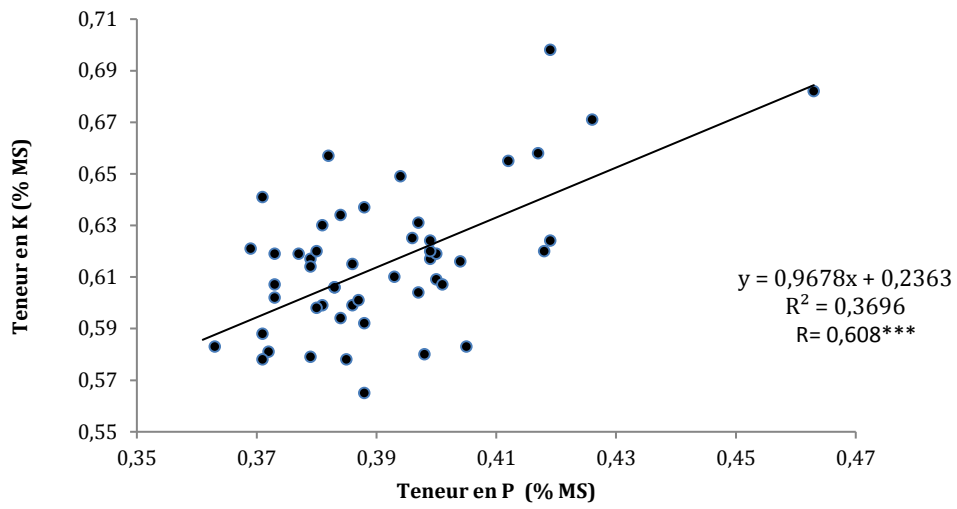


Figure 47. Relation entre les teneurs en P et K des grains du blé (2009/2010)

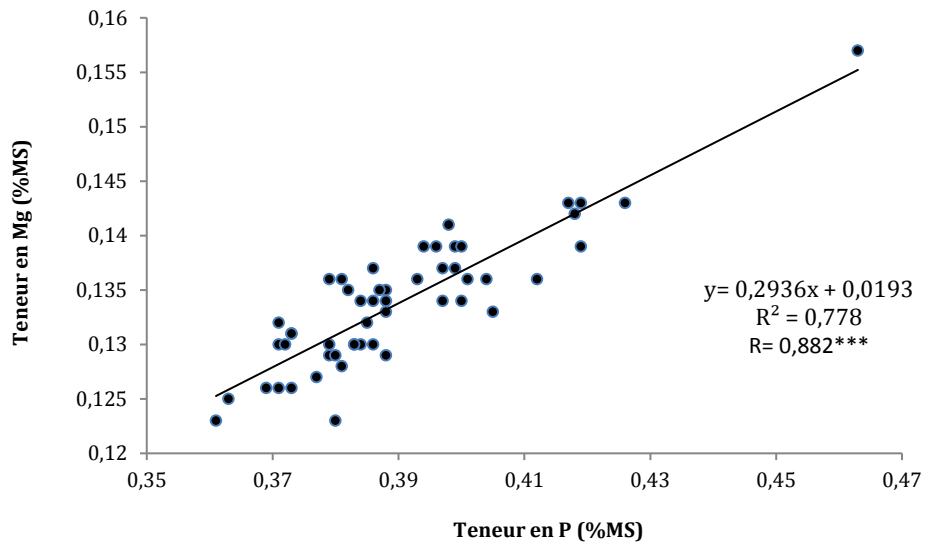


Figure 48. Relation entre les teneurs en P et Mg des grains (2009/2010)



### III. Effet de la fertilisation phosphatée sur l'évolution du phosphore dans le sol

#### III.1. Essai en sol cultivé

Dans le but de connaître la contribution de l'engrais phosphaté à l'enrichissement du sol et suivre l'évolution des teneurs de phosphore dans le sol, des prélèvements à une profondeur de 0 - 30 cm ont été effectués dans l'essai conduit en 2006/2007 pour déterminer le phosphore assimilable et le phosphore total à trois stades de la culture : deux nœuds, floraison et maturité.

En se référant aux résultats portés sur l'annexe II (p. 141), les teneurs en phosphore assimilable et total dans le sol à différents stades (deux nœuds, floraison et maturité) sont significativement ( $p < 0,001$ ) affectés par les doses d'engrais au niveau des essais réalisés avec Agriphos et Leader-start. L'effet type d'engrais (solide) est significatif ( $p < 0,05$ ) sur les teneurs en P total du sol aux stades floraison et maturité au niveau de l'essai mené avec Agriphos, et à trois stades deux nœuds, floraison et maturité au niveau de l'essai mené avec Leader-start, alors qu'au niveau de la comparaison des deux essais, un effet significatif ( $p < 0,001$ ) sur le phosphore total et assimilable est observé à différents stades de la culture. L'engrais foliaire n'a eu aucun effet sur ces paramètres.

#### ***Moyennes des essais***

Les meilleures teneurs moyennes de phosphore total et assimilable sont obtenues au niveau de l'essai Leader-start. Les valeurs enregistrées sont de 14,65 mg.kg<sup>-1</sup>, 14,56 mg.kg<sup>-1</sup> et 14,84 mg.kg<sup>-1</sup> pour le phosphore assimilable, et de 43,01 mg.kg<sup>-1</sup>, 45,08 mg.kg<sup>-1</sup> et de 43,39 mg.kg<sup>-1</sup> pour le phosphore total aux stades deux nœuds, floraison et maturité respectivement (tableau 33). Les coefficients de variation sont faibles, ne dépassant pas 7 % pour les essais avec Agriphos et Leader-start, et acceptables pour la comparaison des deux essais (tableaux 32, 33 et 34).

#### ***Effet du type d'engrais***

Les résultats du tableau 34 montrent que les teneurs de phosphore assimilable les plus élevées (15,82 mg.kg<sup>-1</sup>, 16,21 mg.kg<sup>-1</sup> et 16,1 mg.kg<sup>-1</sup>) sont obtenues par le TSP, et celles du phosphore total (48,80 mg.kg<sup>-1</sup>, 50,14 mg.kg<sup>-1</sup> et 48,81 mg.kg<sup>-1</sup>) sont réalisées par l'engrais NPKs au niveau de la comparaison des deux essais pour les trois

**Tableau 32. Effet des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Agriphos**

	Pass S1	Pass S2	Pass S3	Ptot S1	Ptot S2	Ptot S3
<b>Effet solides</b>						
Fosfacyl	14,31	14,32	13,90	37,01	36,28 b	36,77 b
TSP	15,67	16,06	15,87	43,36	43,17 ab	43,7 ab
NPKs	13,03	13,00	13,13	48,56	49,56 a	49,10 a
Signification	ns	ns	ns	ns	*	*
ppds	-	-	-	-	12,88	12,28
<b>Effet doses</b>						
80	12,76 c	12,4 d	12,53 c	43,23 b	42,78 b	43,47 b
120	13,09 c	13,32 c	13,55 b	45,23 a	45,33 a	45,51 a
160	15,07 b	15,16 b	15,12 a	43,66 ab	43,52 ab	43,84 a
200	16,42 a	16,85 a	15,99 a	39,79 c	40,38 c	39,95 c
Signification	***	***	***	***	***	***
ppds	0,763	0,873	1,087	1,998	1,846	1,639
Moyennes générales	14,34	14,46	14,30	42,98	43,00	43,19
CV %						

**Tableau 33. Effet des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Leader-start**

	Pass S1	Pass S2	Pass S3	Ptot S1	Ptot S2	Ptot S3
<b>Effet solides</b>						
Fosfacyl	14,14	13,92	14,09	36,74 b	36,72 b	36,64 b
TSP	15,99	16,37	16,34	43,26 ab	44,03 ab	44,76 ab
NPKs	13,83	13,40	14,10	49,04 a	54,48 a	48,79 a
Signification	ns	ns	ns	*	*	*
ppds	-	-	-	10,54	11,74	9,724
<b>Effet doses</b>						
80	13,13 c	13,01 c	13,32 c	43,34 b	49,70 a	43,69 b
120	14,49 b	13,97 b	14,35 b	46,35 a	47,41 a	46,34 a
160	15,49 a	15,92 a	15,70 a	43,65 b	45,62 b	44,43 ab
200	15,51 a	15,34 a	16,00 a	38,71 c	37,57 c	39,11 c
Signification	***	***	***	***	***	***
ppds	1,003	0,772	0,692	2,722	2,596	2,195
Moyennes générales	14,65	14,56	14,84	43,01	45,08	43,39
CV%						

**Tableau 34. Effet des engrais foliaires et solides sur les différents caractères (2006/2007)**

	Pass S1	Pass S2	Pass S3	Ptot S1	Ptot S2	Ptot S3
<b>Effet solides</b>						
Fosfacyl	14,23 b	14,11 b	13,99 b	36,85 c	36,50 c	36,71 c
TSP	15,83 a	16,21 a	16,10 a	43,31 b	43,60 b	44,23 b
NPKs	13,43 b	13,19 b	13,62 b	48,80 a	50,14 a	48,81 a
Signification	***	***	***	***	***	***
ppds	1,054	1,12	1,007	3,64	3,809	3,367
<b>Effet engrais foliaires</b>						
Agriphos	14,34	14,45	14,30	42,98	43,00	43,19
Leader-start	14,65	14,56	14,84	42,99	43,82	43,30
Signification	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Moyennes générales	14,50	14,51	14,57	42,99	43,41	43,25
CV %						

**Légende :** Pass= P assimilable (ppm), Ptot= Ptotal (ppm), S1= stade deux nœuds, S2= floraison, S3= maturité, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, ppds= petite différence significative, C.V. = coefficient de variation.

stades deux nœuds, floraison et maturité. Par contre les plus faibles valeurs sont obtenues par l'engrais fosfactyl quel que soit le stade de prélèvement.

### ***Effet des doses d'engrais***

La teneur en phosphore assimilable augmente avec l'accroissement des doses d'engrais phosphatés à différents stades : deux nœuds, floraison et maturité de la culture. Les meilleures teneurs en P assimilable sont réalisées par la dose 200 kg.ha<sup>-1</sup> au niveau de l'essai avec Agriphos, les deux doses 160 kg.ha<sup>-1</sup> et 200 kg.ha<sup>-1</sup> au niveau de l'essai mené avec Leader-start. Alors que cette même dose, 200 kg.ha<sup>-1</sup> a enregistré les plus faibles valeurs de phosphore total à trois stades de prélèvement du sol (tableaux 32 et 33).

L'évolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé a été illustrée par les figures 49, 50 et 51, montrant que les concentrations de cet élément sont élevées chez les parcelles traitées au TSP, contrairement au NPKs, où les concentrations en phosphore assimilable sont plus faibles quel que soit le stade de la culture. Ce résultat peut être expliqué par l'efficacité d'absorption du phosphore par la culture, induisant des teneurs élevées au niveau des feuilles de blé, de bons rendements en biomasse (stades deux nœuds et floraison) et en grain.

Les figures 52 et 53 indiquent que la diminution des teneurs du phosphore assimilable dans le sol est très marquée au début du cycle du blé (stade deux nœuds), puis une stabilité des teneurs est observée au niveau des différentes doses.

Les taux de réduction entre le stade semis et deux nœuds du blé pour les doses étudiées (80 kg.ha<sup>-1</sup>, 120 kg.ha<sup>-1</sup>, 160 kg.ha<sup>-1</sup> et 200 kg.ha<sup>-1</sup>) sont respectivement de 56,57 %, 67,93 %, 71,16 % et 74,21 % pour l'essai Agriphos ; et de 50,31 %, 64,49 %, 70,35 % et 75,64 % pour l'essai Leader-start. On note également que les taux de diminution augmentent avec les doses croissantes de P ajouté.

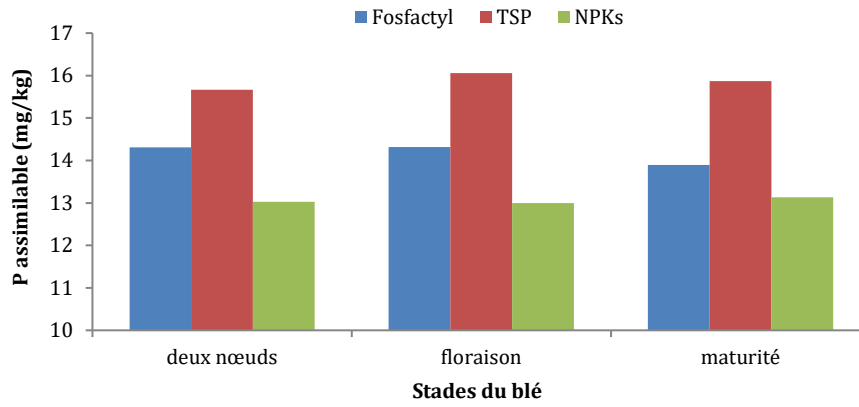


Figure 49. Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (Agriphos, 2006/2007)

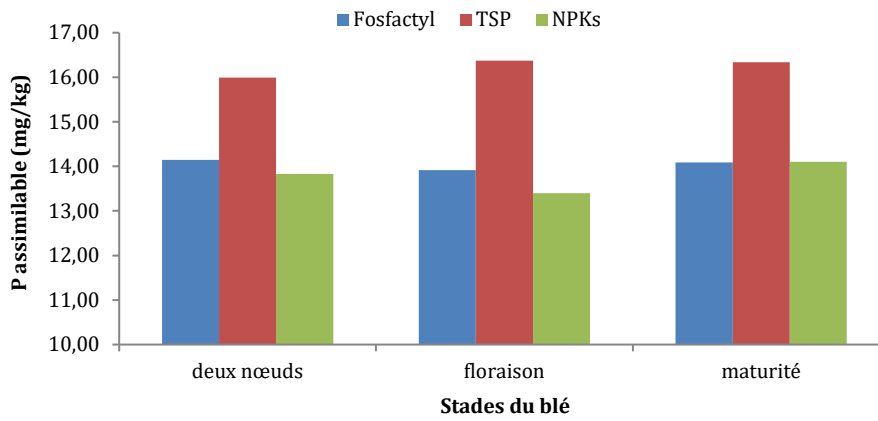


Figure 50. Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (Leader-start, 2006/2007)

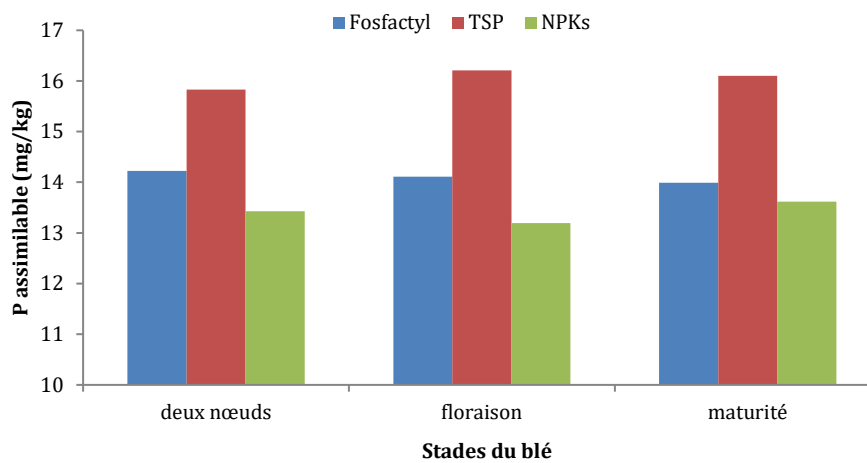


Figure 51. Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (comparaison des deux essais, 2006/2007)

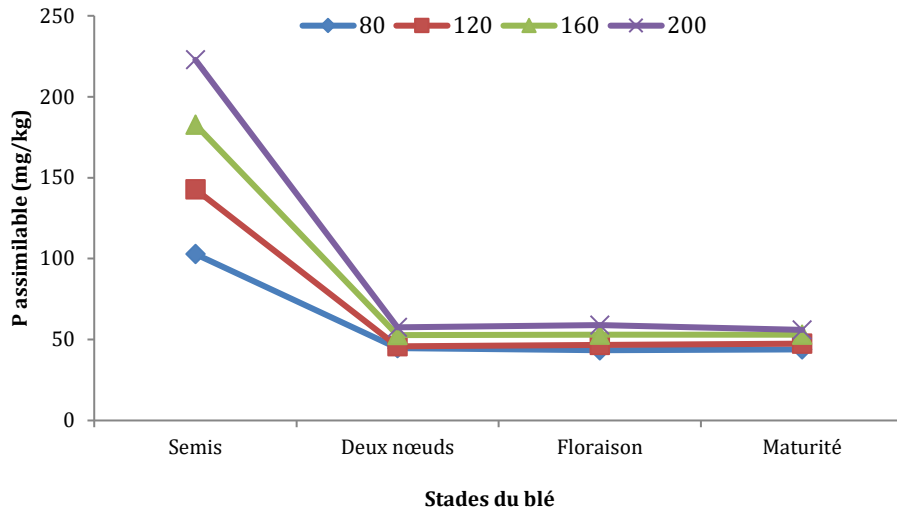


Figure 52. Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (Agriphos, 2006/2007)

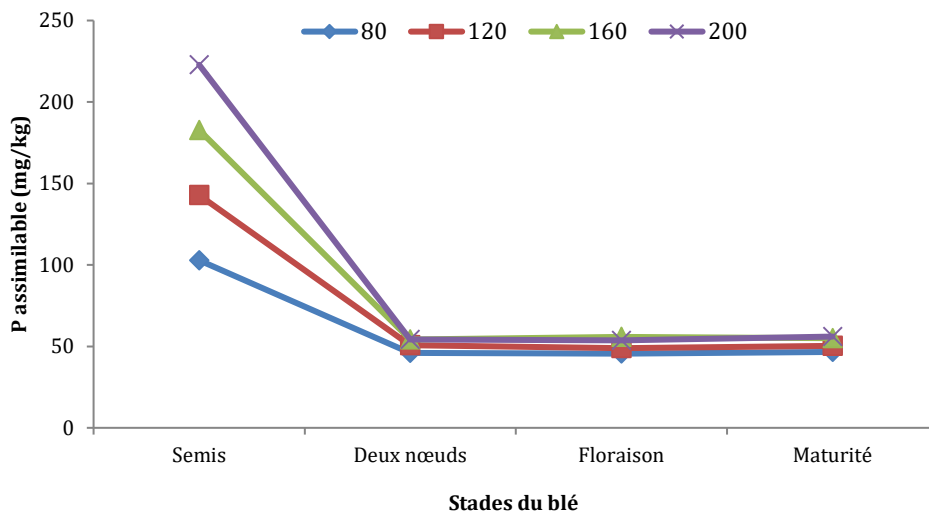


Figure 53. Evolution du phosphore assimilable en fonction des stades du blé (Leader-start, 2006/2007)

### III.2. Essai en sol non cultivé (incubation des engrais)

L'évolution du phosphore assimilable dans le sol est toujours affectée par un certain nombre de paramètres à savoir : le pH, la matière organique, le calcaire, les sels solubles, ...etc. tous ces paramètres rentrent en jeu dans le statut phosphorique du sol.

L'apport d'engrais minéral provoque des changements au niveau de la solution du sol. Suivant la nature chimique de l'engrais appliqué, différents paramètres peuvent être influencés, à savoir, la concentration en éléments nutritifs, le degré de salinité, le pH ...etc. Dans notre étude, nous avons déterminé, le phosphore assimilable, le pH et la conductivité électrique des échantillons du sol sous l'effet des engrais phosphatés testés au champ et de leur durée d'incubation. Les résultats de l'analyse statistiques des données collectées sont présentés dans l'annexe II (p. 141).

**Tableau 35. Moyennes du phosphore assimilable, du pH et de la conductivité électrique en fonction des différents traitements (2010/2011)**

	<b>P assimilable (mg/kg)</b>	<b>pH</b>	<b>C.E (dS/m)</b>
<b>Effet traitements</b>			
T0	49,20 c	8,500 a	0,140 b
MAP	89,99 a	7,915 c	0,136 b
Fosfacyl	74,01 b	8,174 b	0,144 ab
SSP	92,43 a	8,134 b	0,147 a
Signification	***	***	**
ppds	6,207	0,0705	0,00627
<b>Effet périodes</b>			
15	99,35 a	8,169 b	0,162 ab
30	94,37 a	8,196 ab	0,156 b
45	95,92 a	8,132 b	0,166 a
60	77,58 b	8,230 ab	0,144 c
75	72,46 b	8,248 a	0,112 f
90	69,25 b	8,149 b	0,121 e
105	52,49 c	8,144 b	0,129 d
Signification	***	**	***
ppds	6,780	0,0645	0,0068
Moyennes générales	76,40	8,181	0,142
CV %	10,75	1,04	5,85

**Légende :** (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ,  $P < 0.001$  respectivement ; ns : non significatif. C.V. = coefficient de variation, ppds = plus petite différence significative (5 %).

### III.2.1. Phosphore assimilable

#### *Effet du type d'engrais*

Le type d'engrais a eu un effet très hautement significatif ( $P < 0,001$ ) sur le phosphore assimilable (Annexe II, p. 141). Les meilleures teneurs moyennes sont enregistrées par le SSP ( $92,99 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), contre les plus faibles obtenues par le témoin sans apport de P ( $49,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). Les taux d'accroissement par rapport au témoin sont de 46,8 %, 33,5 % et 45,3 % respectivement pour les engrais SSP, Fosfactyl et MAP (tableau 35).

#### *Effet de la période d'incubation*

Les teneurs en phosphore assimilable dans la solution du sol sont très affectées ( $P < 0,001$ ) par la période d'incubation des engrais (tableau 35). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées par la plus courte période (15 jours d'incubation) avec  $99,34 \text{ mg.kg}^{-1}$  du sol, alors que les teneurs les plus faibles sont données par la plus longue période d'incubation (105 jours d'incubation) avec  $52,49 \text{ mg.kg}^{-1}$  du sol.

L'analyse de l'évolution du phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation indique qu'au départ, le phosphore disponible ( $P \text{ sol} + P \text{ ajouté}$ ) est évalué à  $295,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ , puis cette teneur a diminué d'environ 66 % après 15 jours d'incubation. Les taux de diminution croient avec l'augmentation des périodes d'incubation. Après une durée de 105 jours, ce taux a dépassé 80 % de diminution par rapport aux teneurs initiales (tableau 35).

Pendant les premières semaines, l'engrais MAP a présenté des teneurs élevées en P assimilable par rapport aux autres engrais, où les valeurs moyennes passent de  $145,5 \text{ mg.kg}^{-1}$  (15<sup>ème</sup> jour) à  $113,1 \text{ mg.kg}^{-1}$  (45<sup>ème</sup> jour). Ceci peut être expliqué par son effet acidifiant et son degré de solubilité élevée dans l'eau de l'ordre de 360 g/l. A partir du 4<sup>ème</sup> prélèvement (60 jours), l'engrais SSP a favorisé les meilleures teneurs quelle que soit la période d'incubation (figure 54).

Les taux de réduction sont de 80,35 %, 89,65 % et 76,73 %, respectivement pour les engrais MAP, fosfactyl et SSP. Cette diminution des teneurs en phosphore peut être générée par une fixation du phosphore par les particules du sol. Ce phénomène commence au début par un rythme rapide et continu dans tous les traitements, pour

évoluer plus lentement avec un rythme plus faible et devient par la suite presque stable dans le temps après 60 jours d'incubation.

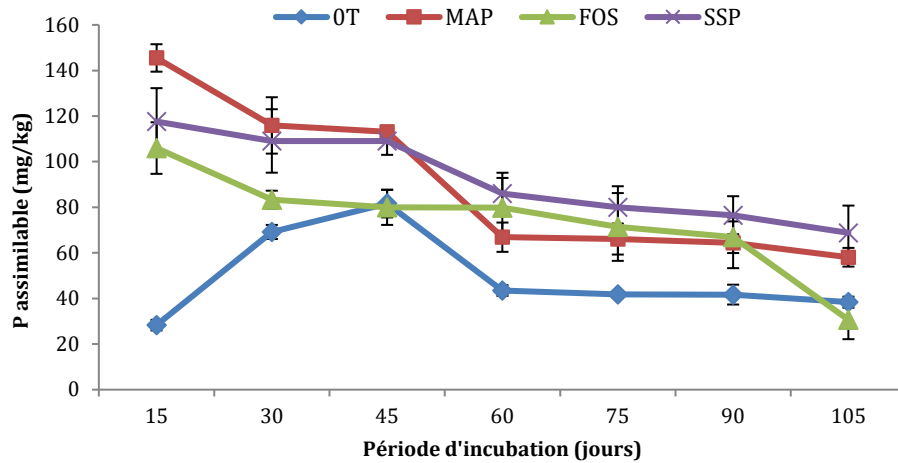


Figure 54. Evolution du phosphore assimilable en fonction des types d'engrais et de la période d'incubation

### III.2.2. pH de la solution 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. Ces effets varient avec les engrais (Moughli, 2000).

#### *Effet type d'engrais*

Les analyses statistiques révèlent des différences très hautement significatives ( $P < 0,001$ ) entre les traitements. L'engrais MAP a donné le plus faible pH (7,914), alors que le témoin sans apport a enregistré un pH plus élevé (8,5) (tableau 35).

Les résultats obtenus indiquent également que le pH des traitements fertilisés est faible par rapport à celui du témoin. Les taux de diminution sont de 6,9 % ; 4,4 % et 3,84 % pour les engrais MAP, SSP et Fosfactyl respectivement.



### ***Effet de la période d'incubation***

Le pH de la solution du sol est influencé significativement ( $P < 0,001$ ) par la période d'incubation (Annexe II, p.141). Le pH a varié de 8,6 (valeur initiale) à 8,147 après 105 jours d'incubation, la diminution enregistrée est d'environ 5 % (tableau 35).

La figure 55 illustre qu'après incorporation des engrais au sol, le phénomène de dissolution commence avec un rythme rapide, engendrant une diminution marquée du pH pendant les deux premières semaines (15 jours) d'incubation, évaluée à environ 8,8 %, 5,6 % et 5,7 % de réduction pour les engrais MAP, SSP et Fosfactyl respectivement. Puis, ce rythme devient plus lent avec l'augmentation de la durée d'incubation des engrais.

La teneur en phosphore assimilable est affectée négativement et significativement ( $r = - 0,507^{**}$ ) par le pH du sol (figure 56). L'effet de l'engrais sur le pH du sol est déterminé par la capacité de cet engrais à libérer des ions  $H^+$  et  $OH^-$  dans le sol. L'effet acidifiant, dans les sols calcaires peut contribuer à l'amélioration de la disponibilité du phosphore aux cultures.

### **III.2.3. Conductivité électrique**

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

### ***Effet du type d'engrais***

Le type d'engrais a eu un effet très hautement significatif ( $P < 0,001$ ) sur la conductivité électrique du sol (Annexe II, p. 141). L'engrais SSP a engendré la valeur la plus élevée (0,146 dS/m), par contre, la plus faible C.E. est obtenue par le témoin sans apport (0,134 dS/m), soit un écart de 8 %.

Une forte liaison positive ( $r = 0,612^{***}$ ) est établie entre la teneur en P assimilable et la C.E. du sol (figure 57), illustrant l'importance du choix des engrais et le raisonnement de leurs apports sur la durabilité des systèmes de culture.

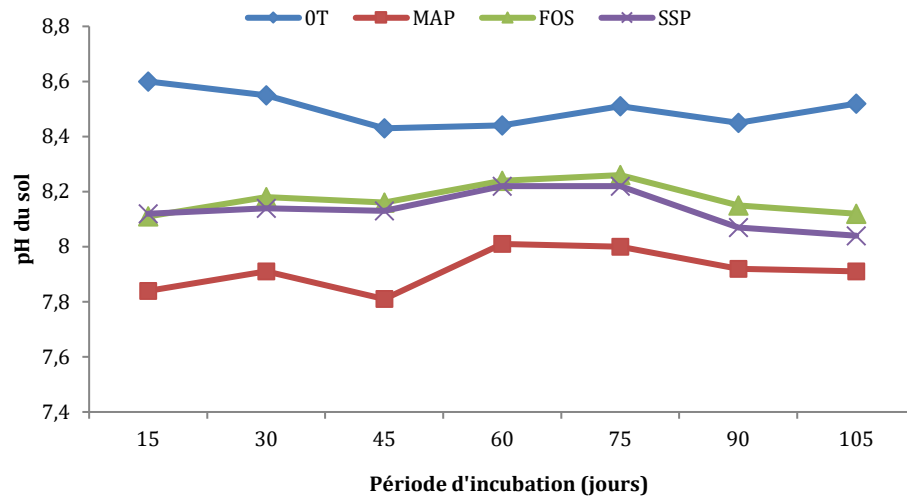


Figure 55. Evolution du pH en fonction du type d'engrais et de la période d'incubation

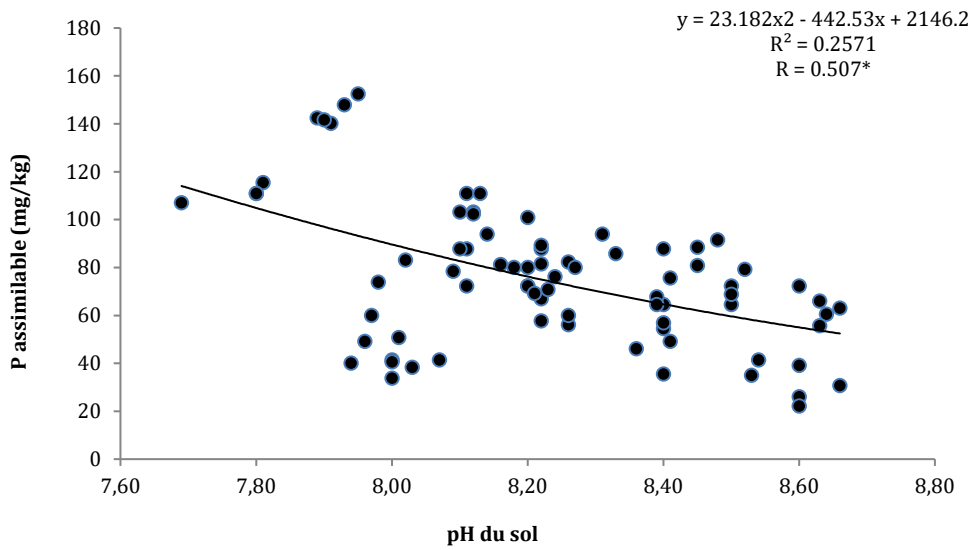


Figure 56. Relation entre le phosphore assimilable et le pH de la solution du sol

### ***Effet de la période d'incubation***

La conductivité électrique est fortement influencée par la durée d'incubation des engrais phosphatés. Les valeurs les plus élevées sont obtenues dans les premiers prélèvements (15, 30 et 45 jours), puis elles diminuent jusqu'au 75<sup>ème</sup> jour, où la plus faible C.E. (0,112 dS/m) est enregistrée (tableau 35). Une légère augmentation a été observée après le 5<sup>ème</sup> prélèvement (75 jours) (figure 58). Étant donné qu'une augmentation de la température peut augmenter la solubilité des sels, l'élévation des valeurs de la conductivité électrique dans cette période peut être liée à la dissolution des sels solubles dans le sol.

Par rapport à la valeur initiale de la salinité du sol (0,114 dS/m), l'apport des engrais a provoqué une 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 salinité qui est la libération des bases échangeables par le complexe adsorbant vers la solution du sol, ceci concerne surtout les cations les plus hydratés Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup>.

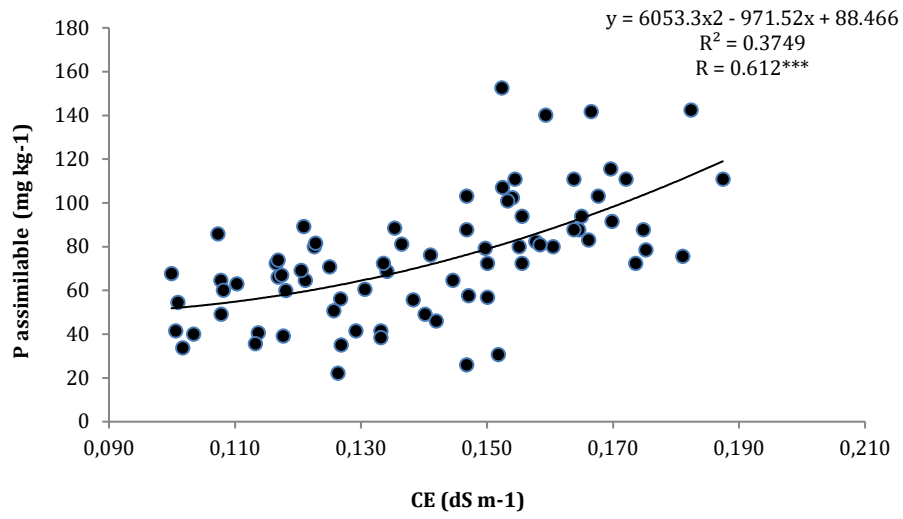


Figure 57. Relation entre le phosphore assimilable et la CE du sol

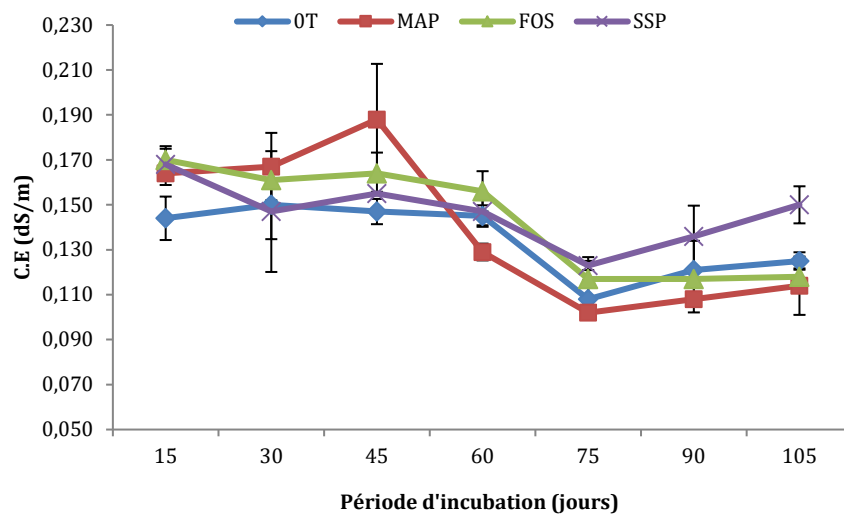


Figure 58. Evolution de la conductivité électrique en fonction du type d'engrais et la période d'incubation

#### IV. Analyse des corrélations

Pour l'étude des corrélations, nous avons pris en considération l'ensemble des données collectées au niveau de chaque essai et pour toutes les parcelles élémentaires.

En se référant à l'annexe III (p. 142), l'étude des relations entre le rendement en grain et ses principales composantes a permis de déceler des liaisons significatives et positives entre d'une part le rendement en grain et d'autre part le nombre d'épis/m<sup>2</sup> ( $r = 0,296^*$  et  $r = 0,754^{***}$ ), le nombre de grains par épi pour les années 2009/2010 et 2010/2011 ( $r = 0,565^{***}$  et  $r = 0,596^{***}$  respectivement), le poids de 1000 grains ( $r = 0,518^{***}$ ) pour l'année 2010/2011, rendement en paille pour les années 2008/2009 et 2010/2011 ( $r = 0,909^{***}$  et  $r = 0,488^{***}$  respectivement).

Le rendement en paille est corrélé positivement avec le nombre d'épis/m<sup>2</sup> pour les années 2009/2010 et 2010/2011 ( $r = 0,309^*$  et  $r = 0,602^{***}$  respectivement), et négativement avec le nombre de grains par épi ( $r = -0,351^*$ ) uniquement pour l'essai conduit en 2009/2010.

Le rendement en biomasse au stade fin tallage est corrélée négativement avec le poids de 1000 grains ( $r = -0,513^*$ ) en 2008/2009 ; tandis qu'au stade floraison, ce paramètre est lié positivement avec le nombre de grains par épi ( $r = 0,395^*$ ,  $r = 0,387^*$  et  $r = 0,359^{**}$ ) et le rendement en grain à maturité du blé pour les essais avec Agriphos, Leader-start et comparaison des deux essais ( $r = 0,774^{***}$ ,  $r = 0,712^{***}$  et  $r = 0,737^{***}$  respectivement) en 2006/2007. Alors qu'en 2009/2010, de fortes liaisons sont enregistrées entre le rendement en biomasse au stade maturité avec le nombre d'épis/m<sup>2</sup> et le rendement en paille avec des coefficients de corrélation de  $0,377^{***}$  et de  $0,462^{**}$  respectivement. Les corrélations entre les composantes du rendement montrent l'existence de relations d'interdépendance et compensation entre ces paramètres.

Pour l'essai conduit en 2006/2007, la teneur en P des feuilles est corrélée positivement avec le nombre d'épis/m<sup>2</sup> au stade deux nœuds ( $r = 0,344^*$ ,  $r = 0,283^*$ ) et floraison ( $r = 0,325^*$ ,  $r = 0,285^*$ ) respectivement pour l'essai mené avec Leader-start et comparaison des deux essais, le nombre de grains par épi au stade deux nœuds ( $r = 0,578^{***}$ ,  $r = 0,411^{***}$ ) et floraison ( $r = 0,523^{***}$ ,  $r = 0,413^{***}$ ) respectivement pour l'essai mené avec Agriphos et comparaison des deux essais. Des corrélations positives et significatives entre la concentration en P des feuilles et le rendement en grain de la

culture au stade deux nœuds ( $r = 0,33^*$ ) et floraison ( $r = 0,325^*$ ) au niveau de l'essai mené avec Agriphos ont été notées. Les prélèvements du phosphore sont corrélés significativement avec le nombre de grains par épi aux stades deux nœuds et floraison ( $r = 0,512^{**}$ ,  $r = 0,462^{**}$  respectivement) et rendement en grain au stade deux nœuds ( $r = 0,412^*$ ) pour l'essai avec Agriphos, nombre d'épis/m<sup>2</sup> ( $r = 0,342^*$ ) pour l'essai avec Leader-start, nombre de grains/épi au stade floraison pour l'essai avec Leader-start et comparaison des deux essais ( $r = 0,416^{**}$  et  $r = 0,389^{***}$  respectivement).

En 2008/2009, la concentration et les exportations du P par les feuilles au stade fin tallage sont corrélées positivement avec le nombre de grains/épi ( $r = 0,415^{**}$  et  $r = 0,340^*$  respectivement). Au stade maturité, la teneur en P de la plante entière est liée positivement à la teneur en P des grains ( $r = 0,943^{***}$ ,  $r = 0,713^{***}$ ) et des pailles ( $r = 0,586^{***}$ ,  $r = 0,394^{**}$ ) pour les deux essais de 2008/2009 et 2010/2011, alors que des corrélations négatives sont obtenues entre la teneur en P des pailles et le nombre de grains par épi ( $r = -0,345^*$ ) pour l'essai conduit en 2010/2011.

L'efficacité d'utilisation du phosphore (EUP) est corrélée négativement avec les doses de phosphore, quelle que soit l'année. Des liaisons significatives sont enregistrées en 2008/2009 ( $r = -0,86^{***}$ ) et 2009/2010 ( $r = -0,93^{***}$ ), par contre, elles sont peu marquées pour les années 2006/2007 et 2010/2011.

Des corrélations significatives sont obtenues entre d'une part l'EUP et d'autre part le poids de 1000 grains au niveau des années 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 ( $r = 0,500^*$ ,  $r = 0,315^*$  et  $r = 0,481^{***}$  respectivement), le nombre de grains par épi ( $r = 0,413^{**}$ ,  $r = 0,583^{***}$ ) et le rendement en grain ( $r = 0,555^{***}$ ,  $r = 0,974^{***}$ ) et en paille ( $r = -0,365^*$ ,  $r = 0,457^{**}$ ) pour les années 2009/2010 et 2010/2011 respectivement. De même, des corrélations positives sont enregistrées entre l'EUP et les exportations du P des grains avec des valeurs de  $r = 0,391^{**}$  et  $r = 0,482^{***}$  pour les années 2009/2010 et 2010/2011 respectivement.

Quelle que soit l'année, les corrélations entre l'EUP et l'EAP sont positives et significatives,  $r = 0,938^{***}$ ,  $r = 0,970^{***}$  et  $r = 0,497^{***}$  pour les années 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement.

L'efficacité d'absorption du phosphore (EAP) est fortement corrélée avec les doses d'engrais phosphatés quelle que soit l'année,  $r = -0,800^{***}$ ,  $r = -0,913^{***}$  et  $r = -$

0,379\*\* pour les essais conduits en 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement.

Des corrélations significatives sont enregistrées entre d'une part l'EAP et d'autre part le nombre de grains par épi ( $r = 0,384^{**}$  et  $r = 0,306^*$ ) et le rendement en grain ( $r = 0,535^{***}$  et  $r = 0,427^{**}$ ) respectivement pour les années 2009/2010 et 2010/2011, le rendement en paille ( $r = -0,34^*$ ) pour l'année 2009/2011.

Des relations significatives sont obtenues entre d'une part l'EAP et d'autre part la teneur en P des grains ( $r = 0,794^{***}$ ) pour l'essai conduit en 2010/2011, des exportations du P des feuilles au stade floraison ( $r = -0,711^{***}$ ) pour l'année 2008/2009. Au stade maturité, des liaisons positives ont été enregistrées entre d'une part l'EAP et d'autre part les exportations du P de la plante avec  $r = 0,886^{***}$  pour l'année 2010/2011, des exportations du P des grains avec  $r = 0,523^{***}$  et  $r = 0,989^{***}$  pour les années 2009/2010 et 2010/2011 respectivement.

L'efficacité d'utilisation du phosphore (ECUP) est corrélée significativement avec le poids de 1000 grains ( $r = 0,356^*$ ) pour l'année 2009/2010, le rendement en grain ( $r = 0,322^*$ ) pour l'année 2010/2011, la teneur en P des grains avec  $r = -0,985^{***}$ ,  $r = -0,515^{***}$  et  $r = -0,797^{***}$  pour les années 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement, et la teneur en P de la plante entière avec  $r = -0,909^{***}$  et  $r = -0,765^{***}$  pour les années 2008/2009 et 2010/2011 respectivement.

Des relations négatives et significatives sont enregistrées entre l'ECUP et les exportations du P des grains avec  $r = -0,613^{***}$ ,  $r = -0,56^{***}$  et  $r = -0,607^{***}$  pour les années 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement, la teneur en P de la plante entière avec  $r = -0,612^{**}$  et  $r = -0,592^{***}$  pour les années 2008/2009 et 2010/2011 respectivement.

Les teneurs en azote des feuilles aux stades tallage ( $r = 0,558^{**}$ ) et floraison ( $r = 0,546^{**}$ ) sont corrélées positivement avec le rendement en biomasse au stade maturité du blé pour l'année 2008/2009.

Des liaisons significatives sont enregistrées entre d'une part la teneur en N des grains et d'autre part les teneurs en P ( $r = -0,432^*$ ) et N ( $r = 0,978^{***}$ ) de la plante entière pour l'année 2008/2009, la teneur en P des grains ( $r = 0,413^{**}$ ) de la plante

entière ( $r = 0,385^{**}$ ) pour l'année 2010/2011. En 2009/2010, les exportations en N des grains sont étroitement corrélées à celles du P des grains ( $r = 0,927^{***}$ ).

Le taux de protéines des grains est relié positivement avec la teneur en N ( $r = 0,978^{***}$ ) et négativement avec la teneur en P ( $r = -0,434^*$ ) de la plante entière au stade maturité (2008/2009). De même, ce paramètre est également corrélé positivement avec les teneurs en N des grains avec  $r = 1^{***}$ ,  $r = 0,591^{***}$  et  $r = 1^{***}$  pour les années 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011 respectivement, et la teneur en N de la paille avec  $r = 0,684^{***}$  pour l'année 2008/2009 seulement.

La teneur en P des grains est corrélée positivement avec la teneur en protéines totale des grains pour les années 2009/2010 ( $r = 0,303^*$ ) et 2010/2011 ( $r = 0,413^{**}$ ), alors qu'en 2008/2009, cette relation est négative et non significative ( $r = -0,290^{ns}$ ).

Des relations significatives sont obtenues entre d'une part la teneur en N des grains et d'autre part l'EAP ( $r = 0,491^{***}$ ) et l'ECUP ( $r = -0,360^*$ ) pour l'année 2010/2011. Alors que les exportations d'azote des grains sont corrélées positivement avec l'EUP ( $r = 0,488^{***}$ ,  $r = 0,730^{***}$ ) et l'EAP ( $r = 0,581^{***}$ ,  $r = 0,566^{***}$ ) respectivement pour 2009/2010 et 2010/2011, et négativement avec l'ECUP ( $r = -0,490^{**}$ ) pour 2009/2010.

En ce qui concerne l'évolution du phosphore dans le sol cultivé (2006/2007), la teneur en P assimilable est corrélée positivement et significativement avec les doses d'engrais phosphatés quels que soient les stades, deux nœuds, floraison et maturité du blé. Les coefficients de corrélation sont de  $0,667^{***}$ ,  $0,728^{***}$  et  $0,623^{***}$  pour l'essai avec Agriphos, et  $0,497^{**}$ ,  $0,453^{**}$  et  $0,572^{***}$  pour l'essai avec Leader-start respectivement pour les trois stades. Des corrélations significatives sont aussi observées entre les teneurs en phosphore total dans le sol et les sources d'engrais phosphatés apportées. Les coefficients de corrélation enregistrés sont de  $0,599^{***}$ ,  $0,66^{***}$  et  $0,65^{***}$  pour l'essai avec Agriphos, de  $0,634^{***}$ ,  $0,647^{***}$  et  $0,649^{***}$  pour l'essai avec Leader-start et de  $0,617^{***}$ ,  $0,652^{***}$  et  $0,649^{***}$  au niveau de la comparaison des deux essais respectivement pour les trois stades deux nœuds, floraison et maturité. Alors que des liaisons négatives sont notées entre le phosphore total et phosphore assimilable dans le sol quel que soient l'essai et le stade du blé. Elles sont significatives dans le cas de l'essai



mené avec Agriphos et de la comparaison des deux essais, et non significatives pour l'essai mené avec Leader-start (Annexe III, p. 142 et 143).

L'efficacité d'utilisation (EUP) est étroitement liée aux teneurs du phosphore assimilable et total dans le sol. Les relations sont négatives et significatives avec le phosphore assimilable, et elles sont positives et significatives avec le phosphore total au niveau de l'essai Agriphos et la comparaison des deux essais pour les trois stades de la culture (Annexe III, p. 142 et 145).

L'analyse des corrélations de l'essai d'incubation des engrais a révélé des liaisons significatives entre la durée d'incubation et le pH ( $r = 0,288^{**}$ ), la conductivité électrique ( $r = -0,681^{***}$ ) et P assimilable ( $r = -0,597^{***}$ ) dans le sol (Annexe III, p. 148).

L'apport d'engrais au sol a influencé négativement le pH de la solution du sol ( $r = -0,311^{**}$ ) et positivement la teneur en P assimilable ( $r = 0,443^{***}$ ). Le phosphore assimilable est corrélé négativement au pH du sol ( $r = -0,677^{***}$ ) et positivement avec la C.E. ( $r = 0,585^{***}$ ).

## V. Discussion générale

L'installation de la culture du blé dépend de certains paramètres à savoir, le choix de la variété adaptée aux conditions édapho-climatiques de la région, la date, la densité et la profondeur de semis.

La date de semis joue un rôle important dans la croissance des cultures. Les dates de semis des essais de 2006-07, 2008-09 et 2010-11 sont précoces par rapport à celle de l'essai de 2009-10 (Tableau 4). Sachant que la dose de semis pour les quatre essais est en moyenne de  $355 \pm 14$  grains semés/m<sup>2</sup>, le nombre d'épis/m<sup>2</sup> moyen obtenu durant 2009-10 est de 657,2 épis/m<sup>2</sup>, dépassant d'environ 40% à 50% le peuplement épi réalisé pour les trois autres essais. Ces écarts peuvent être expliqués par les pertes à la levée et à la régression des talles herbacées.

Les relations intrinsèques lors de l'élaboration du rendement (compensation entre composantes) ont beaucoup influencé les résultats obtenus. Nous avons constaté que Le nombre de grains/épi est corrélé négativement avec le nombre d'épis par m<sup>2</sup> (2009/2010). Le poids de 1000 grains est corrélé négativement avec le nombre de grains quelle que soit l'année. Nos résultats confirment ceux de Sultana *et al.* (2002) qui ont trouvé une relation inverse entre le nombre de grains/épi et le poids de 1000 grains, qui pourrait être due à la compensation du poids du grain.

Le rendement en grain est corrélé positivement avec les composantes déterminantes du rendement. Ce paramètre est très influencé par le nombre d'épis/m<sup>2</sup> (2009/2010), le nombre de grains par épi (2006/2007, 2009/2010 et 2010/2011) et le poids de 1000 grains (2009/2010 et 2010/2011). Bahlouli *et al.* (2008) ont trouvé une liaison positive et significative entre d'une part le rendement en grain et d'autre part le nombre d'épis/m<sup>2</sup>, le nombre de grains par épi, le nombre de grains par m<sup>2</sup> et la quantité d'assimilâts transloqués.

Le nombre d'épis, le nombre de grains par épi et le poids du grain sont les principales composantes du rendement en grain du blé. Ces caractères sont contrôlés génétiquement, et sont très influencés par les facteurs environnementaux, principalement les nutriments disponibles dans le sol (Kousar *et al.*, 2015). Ils sont considérés comme de meilleurs indicateurs du fonctionnement de la plante après la floraison, et significativement affectées par la fertilisation phosphatée. Les travaux de

Mazhar *et al.* (2005), Laghari *et al.* (2010), Rahim *et al.* (2010) et Saha *et al.* (2014) ont montré qu'un apport de phosphore a favorisé le nombre de talles, la longueur des épis, l'indice de récolte, le rendement en biomasse, la surface foliaire et le rendement en grain ; et favorise la précocité du blé (Jiang *et al.*, 2006 ; Laghari *et al.*, 2010).

Saha *et al.* (2014) ont trouvé que le SSP (16 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), appliqué à 60 et 120 kg/ha améliore significativement le rendement en grain du blé par rapport aux autres sources de phosphore dans des conditions de texture sableuse et calcaire du sol. Des études antérieures ont montré que les prélèvements de phosphore par le blé augmentent linéairement avec l'accroissement des doses de SSP (Dhillon et Dev, 1993). Alors que Maqbool *et al.* (2012) rapportent que les sources de phosphore (MAP, DAP et TSP) n'ont aucun effet sur la croissance et le rendement du blé. Différentes recherches recommandent différentes doses. Chaturvedi (2006a) trouve que l'apport de 28,5 kg P ha<sup>-1</sup> représente l'optimum de croissance et de développement (hauteur de tige, tallage, grains/épi, poids de 1000 grains, rendement en grain et en paille du blé). Laghari *et al.* (2010) observe que la dose 60 kg P ha<sup>-1</sup> améliore significativement les paramètres de rendement et de croissance et raccourcit le cycle du blé.

Dans notre cas, l'engrais simple super phosphate (SSP) a pu réaliser des rendements plus élevés à des doses de phosphore plus faibles pour les trois essais conduits en 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011. La dose 60 kg P.ha<sup>-1</sup> s'est avérée plus intéressante, puisqu'elle a pu favoriser des rendements moyens d'environ 74 q.ha<sup>-1</sup> en 2008/2009 et 2009/2010. Il est à noter que la dose 30 Kg.ha<sup>-1</sup> (2009/2010) semble suffisante pour produire un rendement équivalent à celui de la dose 60 Kg.ha<sup>-1</sup> et permettant ainsi une économie certaine d'engrais dans les conditions d'El-Menia (El-Goléa).

Le poids du grain de blé est fonction de la vitesse et de la durée de la croissance des grains et est affecté par l'offre de la photosynthèse (Li *et al.*, 2000 ; El-Fakhri *et al.*, 2012). Lorsque la vitesse de remplissage des grains augmente, la durée de remplissage diminue (Bahlouli *et al.*, 2008). Selon El-Fakhri *et al.* (2012), le poids du grain est corrélé positivement avec le taux de remplissage, et négativement avec la durée de remplissage des grains de blé dur. Dordas (2012) dans son étude, indique que la réduction des épis a augmenté les produits de photosynthèse en pré-anthèse et contribue dans le

remplissage du grain, ce qui indique que la remobilisation de la matière sèche à partir de tissus végétaux était très importante pour le développement du grain.

La température peut affecter le rendement en altérant le taux et la durée du remplissage du grain (Dupont et Altenbach, 2003). Ces mêmes auteurs ajoutent que l'optimum de température pour aboutir à un maximum de rendement se situe entre 15 et 20°C, ce qui favorise une plus longue durée de remplissage du grain et une meilleure accumulation d'amidon. Par contre, si les températures dépassent 20°C, la durée de remplissage des grains est raccourcie (Wiegand et Cuellar, 1981). Selon Stone et Nicolas (1995), la température élevée peut être un facteur important dans la diminution du rendement et de la qualité du blé, et la sécheresse réduit la production de photosynthétats en raison de la fermeture des stomates (Li *et al.*, 2000). Le rendement et la qualité des grains de blé tendre sont beaucoup plus affecté par la chaleur associée à la sécheresse que par le stress thermique seul (Balla *et al.*, 2011), les chutes de rendement en grain sont de 76 % et 57 % respectivement pour les deux cas.

Dans la présente étude, les valeurs du poids de 1000 grains obtenus en 2008-2009 sont plus élevées que celles des trois autres campagnes. Ceci peut être expliqué par les températures très élevées > à 30°C (figure 13) qui ont eu lieu au cours de l'anthèse pour l'année 2009/2010 et pendant le remplissage du grain pour les années 2006/2007, 2009/2010 et 2010/2011, par conséquent, l'accumulation de matière sèche a été interrompue et le poids du grain a diminué.

L'étude de la biomasse aérienne a permis de décrire le comportement de la culture du blé vis-à-vis des différentes sources de phosphore dans les conditions de la région d'étude. Ce paramètre est également affecté par la fertilisation phosphatée (Dordas, 2009 ; Laghari *et al.*, 2010 ; Maqbool *et al.*, 2012).

A maturité, le rendement en biomasse est corrélé positivement et significativement avec les paramètres nombre d'épis/m<sup>2</sup> (2009/2010), rendement en grain (2006/2007) et rendement en paille (2009/2010 et 2010/2011). Ce paramètre a influencé positivement le nombre de grains/épi au stade floraison (2006/2007), et négativement le poids de 1000 grains au stade fin tallage du blé (2008/2009).

Une bonne production de matière sèche n'est pas toujours associée à un meilleur rendement en grain. Dans notre cas, les meilleurs rendements de biomasse

(grain+paille) ont entraîné les rendements en grain les plus élevés quelle que soit l'année. Les mêmes résultats ont été trouvés par Duan *et al.* (2014), qui ont mis en évidence une relation linéaire positive et significative entre le rendement en grain et l'accumulation de la matière sèche au stade maturité, alors que Sau et Minguez (2000) ont constaté qu'une plus grande production de biomasse n'a pas réalisé un meilleur rendement, à cause de la faible mobilisation des assimilats stockés dans les tiges et les feuilles, ce qui s'est traduit par une diminution de l'indice de récolte. Miller *et al.* (2004) ajoute qu'une culture qui accumule trop de matière sèche avant l'anthèse sera sujette à la formation incomplète de ses graines à cause des ressources hydriques limitant de plus en plus sa croissance, ce qui entraîne ainsi la réduction de l'indice de récolte.

Il est clairement établi que la qualité du grain est fonction de la composition des grains, principalement des protéines, qui dépend du génotype et de l'environnement (Triboi *et al.*, 2000). De nombreux travaux ont visé à élucider les processus écophysologiques déterminant l'élaboration de la teneur en protéines des grains de céréales. Chez le blé, 60 à 95 % de l'azote contenu dans les grains provient de remobilisations de l'azote stocké dans les organes (feuilles et tiges) avant la floraison, et les prélèvements après l'anthèse est moins important (Simpson *et al.*, 1983 ; Hirel *et al.*, 2007) et transféré vers les grains après floraison, après leur transformation en acides aminés (Jeuffroy et Oury, 2012).

La teneur en protéines résulte d'un équilibre au sein de la plante, entre la nutrition azotée et la nutrition carbonée (Jeuffroy et Oury, 2012). Selon Barbottin *et al.* (2006), la demande d'un grain est déterminée par le nombre de cellules qu'il possède, et peut être estimée à partir de la taille maximale d'un grain, représentée par le poids de 1000 grains potentiel de la variété. Debaeke *et al.* (2000) rapportent que le taux de protéines des grains doit être au minimum de 13 % pour éviter le mitadinage.

Plusieurs facteurs peuvent affecter la teneur en protéines des grains. Ainsi, la présence de maladies sur le feuillage perturbe la remobilisation de l'azote des feuilles vers les grains (Barbottin *et al.*, 2006). Mazhar *et al.* (2005) rapportent que l'apport de quantités adéquates en éléments NPK peut influencer la teneur en protéines chez le soja. Le taux de protéines des grains est fortement corrélé avec l'azote total des grains (Labanauskas *et al.*, 1978). L'application d'une fertilisation azotée tardive, au moment où la demande des grains est fixée (post-anthèse), permet en général d'accroître le taux

de protéines des grains (Bly et woodard, 2003 ; Abedi *et al.*, 2011). La déficience de l'un des macroéléments (N, P, K, Ca, Mg et S) diminue l'activité des trois enzymes, nitrate réductase, acide glutamique déshydrogénase et glutamine synthétase (Harper et Paulsen, 1969).

Dupont et Altenbach (2003) et Paunescu *et al.* (2009) montrent que les facteurs environnementaux influencent significativement le rendement en grain du blé et l'accumulation de protéines dans le grain affectant en particulier la quantité et la qualité du gluten. La sécheresse ou de fortes températures pendant le remplissage des grains, provoque la diminution du taux de protéines et de gliadines des grains (Daniel et Triboi, 2000), et affectant davantage la nutrition carbonée qu'azotée, par conséquent, elles tendent plutôt à augmenter la teneur en protéines (Jeuffroy et Oury, 2012). Ce phénomène a été également noté par d'autres auteurs (Bencze *et al.*, 2004 ; Balla et Veisz, 2007 ; Labuschange *et al.*, 2009 ; Hruškova et Švec, 2009 ; Šukalovic *et al.*, 2013). Ces constatations sont en parfaite concordance avec celles que nous avons observé en 2009/2010, où les températures mensuelles maximales en période de remplissage du grain ont dépassé 30°C (Figure 13), et le taux de protéines moyen a dépassé 17,6 % (tableau 32).

Une relation négative et significative est observée entre le rendement en grain et le taux de protéines des grains en 2008/2009 ( $r = -0,521^{**}$ ) et 2010/2011 ( $r = -0,387^{**}$ ), due probablement à une diminution de la production d'amidon (Cassman *et al.*, 1992 ; Fowler, 2003). Les mêmes résultats sont obtenus par Porter et Paulsen (1983), Alaru *et al.* (2003), Anthony et Woodard (2003) et Tuçtürk et Çiftçi (2004).

La fertilisation phosphatée n'affecte pas directement le métabolisme azoté et les protéines des grains, mais elle influe indirectement à travers le rendement en grain. L'application au champ de doses croissantes de TSP améliore le rendement en grain du blé et diminue le taux de protéines des grains (Porter et Paulsen, 1983).

L'efficacité du phosphore apporté par voie foliaire dépend du statut phosphaté du sol, de l'humidité du sol et du type de culture (Noack *et al.*, 2010). Les travaux de Hu *et al.* (2008) ont montré que la fertilisation foliaire des plants de maïs (*Zea mays*) s'avère non efficace sous conditions de stress hydrique et salin. Par contre, Kaya *et al.* (2001)

ont trouvé que la pulvérisation de KHPO améliore les effets négatifs du stress salin sur la croissance et le rendement en fruits du fraisier.

La fertilisation foliaire étudiée en 2006/2007 montre que la comparaison entre les deux engrais foliaires Leader-start et Agriphos n'a révélée aucun effet significatif sur l'élaboration du rendement en grain, en biomasse et l'absorption du phosphore par la culture de la variété de blé dur Carioca. Des résultats comparables sont obtenus par Ling et Silberbush (2002) qui illustrent des différences non significatives entre les différentes formes d'engrais foliaires minérale et organique sur une culture de maïs. Avila *et al.* (2012) ont trouvé que quelle que soit la source d'engrais foliaires phosphite ( $\text{KH}_2\text{PO}_3$ ) ou phosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), la croissance du haricot commun n'est pas affectée.

Les résultats obtenus par Avila *et al.* (2012) et Ali *et al.* (2014) ont montré que l'application d'un engrais foliaire a affecté significativement la concentration du phosphore des feuilles et non pas le rendement en grain de la culture par rapport au témoin. Ali *et al.* (2014) ont enregistré une augmentation de 11,6 % la concentration en phosphore des grains par rapport au témoin. Helmy (2013) conclu que la pulvérisation de citrine (Fe, Mn et Zn) sur le blé tendre améliore significativement les prélèvements de phosphore et de l'azote par les grains d'où une EUP élevée par rapport au traitement non pulvérisé.

Goos et Johnson (2000) et Girma *et al.* (2007) indiquent que cette application foliaire doit être une stratégie efficace pour remédier à la faible biodisponibilité du phosphore dans le sol et pour l'amélioration immédiate du stress nutritionnel. Mais elle ne peut compenser que partiellement l'absorption insuffisante par les racines (Mallarino *et al.*, 2001 ; Ling et Silberbush, 2002 ; Pandey *et al.*, 2013 ; Samad *et al.*, 2014).

Plusieurs recherches ont mis en évidence les relations de synergisme et d'antagonisme entre le phosphore et les autres éléments minéraux. En conditions de biodisponibilité du phosphore insuffisante au niveau du sol, l'absorption des éléments N,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$  est également affectée. Nos résultats d'analyse minérale des grains de blé montrent que les teneurs en  $\text{K}^+$  des grains sont plus élevés que celles du  $\text{Na}^+$ . Dans le cytosol, le potassium est présent à une concentration de 100 à 200 millimoles, c'est le cation inorganique majoritaire du cytoplasme des cellules animales et végétales. D'après Clarckson et Hanson(1980), les raisons de son accumulation préférentielle tiennent

probablement au fait que l'ion  $\text{Na}^+$  est davantage « chaotropique » (du fait de sa plus petite taille et donc du champ électrique plus fort à sa surface).

Oury *et al.* (2006) rapportent que les concentrations en Mg des grains de différents géotypes du blé tendre varient de 0,06 à 0,14 % MS. Selon le même auteur, cet élément est très dépendant de la génétique et peu de l'environnement contrairement à d'autres éléments. Nos résultats sont similaires à ceux d'Oury *et al.* (2006), où la concentration moyenne en Mg des grains obtenue dans notre essai est de 0,134 % MS.

Des régressions linéaires positives et significatives ont été mises en évidence entre les teneurs en phosphore des grains et celles des deux éléments  $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (figures 47 et 48), contrairement aux éléments Ca et Na. Cette forte liaison illustre l'importance des interactions qui existent entre ces éléments, et suggère qu'en conditions de disponibilité phosphatée insuffisante au niveau du sol, cette insuffisance n'affecte pas seulement l'absorption du phosphore, mais elle peut également affecter l'absorption du  $\text{K}^+$  et du  $\text{Mg}^{2+}$ . Des résultats similaires ont été trouvés par Reinbott et Belvins (1991) sur des feuilles de blé (*Triticum aestivum*) âgées de 41 jours. Les concentrations en K, Mg et Ca des feuilles augmentent avec l'accroissement des doses de phosphore.

Le phosphore joue un rôle très important dans la fertilité des talles et des fleurs du blé dur Carioca. Des corrélations positives sont établies entre d'une part les teneurs en phosphore des feuilles aux stades deux nœuds et floraison et d'autre part le nombre d'épis/m<sup>2</sup> et le nombre de grains par épi. De même, le poids du grain est corrélé négativement avec sa concentration en phosphore (Gao et Grant, 2012). Malgré la non signification de la liaison entre le poids du grain et sa teneur en phosphore ( $r = -0,322^{\text{ns}}$ ,  $r = -0,207^{\text{ns}}$  et  $r = -0,163^{\text{ns}}$ , respectivement pour 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011), on note que la teneur en phosphore des grains diminue avec l'augmentation du poids du grain vraisemblablement dû à la dilution. Dans le même contexte, Ali *et al.* (2014) ont montré qu'en conditions de biodisponibilité phosphatée limitée celle-ci provoque un rendement en biomasse faible et une concentration élevée des nutriments des tissus foliaires chez la culture de haricot.

La gestion de la fertilisation phosphatée est complexe en raison des diverses transformations de phosphore qui se produisent dans le système sol-plante, réduisant l'efficacité de la fertilisation et la productivité du blé dur.



Des taux élevés de phosphore sont généralement appliqués aux cultures, mais cela entraîne des risques de pollution de l'environnement (Liang *et al.*, 2015 ; Timilsena *et al.*, 2015), par accumulation de phosphore dans le sol, qui augmente le risque d'eutrophisation aquatique (White et Brown, 2010 ; Xu *et al.*, 2014). Les résultats des essais conduits en 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011, montrent que l'EUP est inversement proportionnelles aux quantités de phosphore disponible dans le sol (P ajouté + P sol).

Il est donc important d'optimiser l'efficacité avec laquelle les engrais sont utilisés dans la production agricole (White et Brown, 2010). L'augmentation de l'efficacité d'utilisation des engrais peut être atteinte par l'amélioration des pratiques de gestion des engrais et/ou en cultivant des cultures caractérisées par une utilisation efficace de ces éléments minéraux (Vance *et al.*, 2003 ; Hirel *et al.*, 2007 ; Fageria, 2009). Selon Tilman *et al.* (2002), l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs est renforcée par un meilleur approvisionnement en éléments nutritifs temporelle et spatiale correspondant à la demande de la plante.

L'efficacité d'absorption est influencée par plusieurs facteurs liés à la plante, et qui sont surtout liés à l'enracinement (densité et longueur) (Sandaña et Pinochet, 2014), la colonisation par des mycorhizes (Li *et al.*, 2006 ; Djadjaglo et Ritchter, 2008), et les exsudats racinaires (Dakora et Philips, 2002). En raison de la faible mobilité du phosphore dans le sol, la croissance des racines est très importante pour l'acquisition de phosphore (Watt et Evans, 2003 ; Lynch, 2007). Gahoonia *et al.* (1997) ont trouvé que la longueur des poils racinaires était corrélée positivement avec l'acquisition de phosphore chez l'orge.

Sandaña et Pinochet (2014), étudiant l'efficacité d'utilisation du phosphore (EUP) de deux espèces végétales, blé tendre (*Triticum aestivum*) et pois (*Pisum sp.*), ont conclu qu'en conditions de déficience phosphatée, le blé a montré une EUP supérieure à celle du pois. Cependant, les différences entre les deux espèces sont attribuées à des différences dans l'utilisation du phosphore plutôt que de l'efficacité de son absorption (Sandaña et Pinochet, 2014). Alors qu'à l'échelle intraspécifique, White et Brown (2010) explique la réponse à la fertilisation phosphatée des différents génotypes du blé étudiés par les corrélations qui existent souvent entre les rendements en grain et l'efficacité

d'absorption du phosphore. Nos résultats sont similaires à ceux de White et Brown (2010), où nous avons trouvé que le rendement en grain est influencé significativement par l'efficacité d'absorption en 2009/2010 ( $r = 0,535^{***}$ ) et 2010/2011 ( $r = 0,427^{**}$ ).

Dans le but d'améliorer l'EUP des cultures, plusieurs stratégies ont été mises en œuvre. L'assimilation des éléments minéraux est directement corrélée à la surface d'échange. Smith et Read (1997) montrent que l'utilisation de mycorhizes augmente la surface de contact de la plante avec le sol de plusieurs dizaines de fois et ont la capacité de mobiliser le phosphore organique grâce à l'excrétion de phosphatases. Par contre Shenoy et Kalagudi (2005) rapporte que l'utilisation de microorganismes qui solubilisent le phosphore minéral dans le sol n'a pas beaucoup aidé en raison de la performance incohérente de ces inoculants dans les conditions de champ. L'utilisation de plantes génétiquement améliorées avec une meilleure efficacité d'acquisition de phosphore peut représenter une solution durable pour augmenter les rendements des cultures (Ortiz-Monasterio *et al.*, 2002 ; Shenoy et Kalagudi, 2005 ; Wang *et al.*, 2008 ; Ramaekers *et al.*, 2010 ; Plassard *et al.*, 2015).

Plus récemment, plusieurs travaux ont été menés sur l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des engrais chimiques et réduire leurs effets négatifs sur l'environnement (Gandeza *et al.*, 1990 ; Shoji *et al.*, 1990 ; Nanzyo *et al.*, 1997 ; Fashola *et al.*, 2002 ; Zvomuya *et al.*, 2002 ; Yan *et al.*, 2008 ; Trenkel, 2010 ; Williams, 2010 ; Ozores-Hampton et Carson, 2013 ; Liu *et al.*, 2014 ; Timilsena *et al.*, 2015 et Carson et Ozores-Hampton, 2014). L'engrais est enrobé dans des substances comme les polyoléfinés qui contrôlent la libération de l'élément nutritif lors de la dissolution. L'exemple donné pour l'azote, où les substances d'enrobage ou bio polymères contiennent des inhibiteurs de nitrification et des inhibiteurs d'uréase (Timilsena *et al.*, 2015).

La connaissance de la dynamique d'un élément est essentielle pour le diagnostic de la fertilité du sol et l'estimation des mesures correctives (Bosc, 1976). Le changement dans la composition de la solution du sol suite à un apport peut affecter la dynamique du phosphore (Delgado *et al.*, 2002).

L'étude de l'évolution du phosphore en sol cultivé en 2006/2007, indique que les teneurs en phosphore assimilable diminuent au cours du cycle du blé. Cette diminution

est proportionnelle aux doses croissantes d'engrais phosphaté quel que soit l'essai Agriphos ou Leader-start. Bulut et Askoy (2008) ont mis en évidence une relation linéaire entre les pertes en phosphore et les niveaux d'engrais phosphatés appliqués. Ces résultats sont confirmés par Rubaek *et al.* (2010) qui ont trouvé dans leur étude que les pertes en phosphore par ruissellement ou lixiviation augmentent avec l'accroissement des concentrations de phosphore du sol. Ce qui explique qu'une partie importante des éléments nutritifs issus des engrais apportés au champ n'est pas prise par les plantes, et est perdue par différents processus (Timilsena *et al.*, 2015).

Storia *et al.* (2013) ajoutent que même si les niveaux de phosphore dans le sol augmentent avec la fertilisation phosphatée, la teneur en phosphore disponible reste faible dans la solution du sol, d'où l'importance de raisonner les apports de phosphore pour satisfaire les besoins des plantes.

La disponibilité du phosphore dans le sol provient de la dissolution (ou mobilisation) de phosphore sous forme d'orthophosphates et sa diffusion dans la solution du sol, qui représente la principale limite à l'approvisionnement de phosphore adéquat pour la croissance des plantes (Richardson et Simpson, 2011). Des travaux antérieurs ont montré que la carence en phosphore est très répandue dans les sols calcaires, il est le principal facteur limitant des rendements des cultures annuelles (Fageria, 2001 ; Shenoy et Kalagudi, 2005 ; Naseri *et al.*, 2010). Les sols des régions arides algériennes, parmi eux, le sol de notre site expérimental sont caractérisés par la présence de calcaire et un pH alcalin de la solution du sol, par conséquent, l'utilisation d'engrais phosphaté à absorption foliaire s'avère une pratique culturelle indispensable et doit être intégrée dans l'itinéraire technique des cultures céréalières pour favoriser les prélèvements des éléments nutritifs au niveau racinaire dans les conditions d'El-Menia.

D'autres recherches ont montré que les apports élevés d'engrais phosphatés diminuent la disponibilité des micro-éléments essentiels pour les plantes (Mousavi, 2011 ; Gao et Grant, 2012), parmi eux le zinc est considéré comme un composant essentiel dans la synthèse des protéines. Des apports excessifs de phosphore diminuent sa biodisponibilité dans le sol (Mousavi *et al.*, 2012) et l'efficacité des mycorhizes associées aux racines (Monreal *et al.*, 2011), ainsi que sa teneur dans les organes végétaux, suite à une diminution de sa translocation vers les parties aériennes (Kaya et Higgs, 2001 ; Li *et al.*, 2001 ; Gao et Grant, 2012 ; Mousavi *et al.*, 2012).

En ce qui concerne l'essai d'incubation des engrais, les résultats montrent que les teneurs en phosphore assimilable du sol diminuent avec l'augmentation des périodes d'incubation. La diminution des teneurs en phosphore peut être générée par une fixation du phosphore par les particules du sol. Ce phénomène commence au début par un rythme rapide et continu dans tous les traitements, pour évoluer plus lentement avec un rythme plus faible et devient par la suite presque stable dans le temps après 60 jours d'incubation. Nos résultats sont en accord avec les conclusions de Nafiu (2009) et Kaloi *et al.* (2011) qui ont rapporté que la cinétique de libération du phosphore des sols s'effectue dans un premier temps à un rythme rapide suivi d'un rythme plus lent.

L'efficacité des engrais, toutefois, est souvent assez faible au cours de la saison d'application en raison de la faible mobilité et l'immobilisation rapide après application sur le sol (Gao et Grant, 2012), car sa durée de vie en tant que molécule assimilable par les racines, est fonction du pH et du taux de calcaire du sol. Selon Gervy (1970) et Fardeau (1993), les quantités de phosphore retenu peuvent être augmentées lorsque le temps de contact entre les particules du sol et le phosphore ajouté augmente, cette diminution est due d'une part aux prélèvements du phosphore par les plantes, et d'autre part au transfert du phosphore vers des formes non assimilables.

Akhtar et Alam (2001), dans leur étude ont montré que l'augmentation du temps d'incubation a fait diminuer la disponibilité du phosphore pour les deux sources de phosphore organique et inorganique.

Les résultats d'Al-Rohily *et al.* (2013) ont mis en évidence une diminution des quantités de phosphore dans le sol calcaire à partir d'une à six semaines. Alors que cette diminution est observée à partir du 14<sup>ème</sup> jour d'incubation des engrais (Akhtar et Alam, 2001 ; Eliakira et Honde, 2014). Dans notre cas, quel que soit le traitement, les taux de phosphore deviennent relativement stables à partir du 60<sup>ème</sup> jour d'incubation.

Dans des études similaires conduites au laboratoire, l'application régulière du TSP au sol sableux a conduit aux pertes du phosphore issu des engrais de plus de 80 % (Richie et Weaver, 1993). Horta et Torrent (2007) ont constaté qu'à la fin de l'essai en pot, le phosphore a diminué d'environ 73 % en sol riche en phosphore, alors que la diminution était d'environ 30 % en sol pauvre en phosphore. Dans le même contexte, McDowell et Sharpley (2001) ont étudié l'effet de deux périodes (21 jours et 1 an) sur

les pertes de phosphore ajouté par lessivage. Les résultats ont montré que les concentrations de phosphore après 1 an d'application sont plus élevées par rapport à celles de 21 jours, attribuées au mouvement lent du phosphore vers la profondeur.

Les quantités de phosphore assimilable au niveau du traitement SSP sont nettement supérieures aux MAP, fosfactyl et le témoin sans phosphore du 60<sup>ème</sup> jour jusqu'à la fin de la période d'incubation (105<sup>ème</sup> jour). Cela indique que l'engrais SSP a favorisé le maintien du niveau de disponibilité du phosphore élevé pour une plus longue période par rapport aux autres engrais, et MAP et Fosfactyl sont plus affectés par l'adsorption par le sol caractérisé par un pH alcalin et par la présence de calcaire (Akhtar et Alam, 2001).

Les caractéristiques du sol tels que l'indice tampon du phosphate, la teneur en matière organique, la capacité d'échange cationique et la disponibilité de l'eau dans le sol affectent profondément l'absorption des nutriments par les plantes (Wu *et al.*, 2008). La capacité de rétention du sol est l'un des facteurs limitant la croissance des plantes (Ortega *et al.*, 1997). Les sols sableux sont caractérisés par une capacité d'adsorption faible. La libération du phosphore dans ces sols est contrôlé par les réactions de précipitation-dissolution plutôt que adsorption-désorption (Zhang *et al.*, 2002).

La répartition déséquilibrée de l'eau et des nutriments dans le sol peuvent limiter de manière significative la production agricole (Fu *et al.*, 2014). Une humidité du sol élevée favorise une meilleure disponibilité du phosphore aux racines, alors qu'en conditions d'humidité du sol limitée, les concentrations en phosphore des grains et de la paille du blé diminuent (Rahim *et al.*, 2007).

La disponibilité du phosphore est affectée par l'eau du sol. Une certaine humidité est toujours nécessaire pour l'absorption des ions phosphatés par les plantes, car la dessiccation diminue la solubilité des phosphates (Rahim *et al.*, 2007). Elle est également nécessaire pour le processus de diffusion qui est le moyen important de transport du phosphore de la solution jusqu'à la surface racinaire (Blanchet *et al.*, 1978 ; Barker et Pilbeam, 2007).

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). La faible teneur en eau du sol diminue fortement la solubilité de certains éléments et rend son absorption racinaire inefficace (Walworth *et al.*, 2006), et le phosphore devient moins accessible aux plantes (Mullen, 2003).

La dissolution des engrais minéraux dans le sol a plusieurs effets sur les propriétés du sol, parmi lesquels la salinité et le pH du sol sont les plus apparents. L'effet de l'engrais sur le pH du sol est déterminé par la capacité à générer des ions  $H^+$  ou  $OH^-$  par leurs réactions dans le sol. L'effet acidifiant peut réduire la productivité des cultures dans les sols acides. Par contre, dans les sols calcaires, cette acidification peut contribuer à améliorer la disponibilité de certains éléments nutritifs tels que le phosphore, le fer, le manganèse et le zinc.

L'apport d'engrais phosphaté (MAP, fosfacyl ou SSP) a contribué dans la diminution du pH de la solution du sol par rapport au témoin. La plus faible valeur est enregistrée par l'engrais MAP. Des résultats similaires montrent que l'utilisation à long-terme (Moughli, 2000), ou à court terme (Goh *et al.*, 2013) de l'engrais MAP a un effet fortement acide sur la solution du sol. Sa nature chimique et son pH acide (4,5), lui confère cet effet acidifiant sur la solution du sol, généré par la libération des ions  $H^+$  et  $NH_4^+$  après dissolution. De même, la dissolution du fosfacyl induit un enrichissement de la solution du sol par des ions sulfate  $SO_4^{2-}$ ; qui peuvent réagir avec les cations  $H^+$  par formation des acides. Cette acidification peut contribuer dans l'amélioration de la biodisponibilité du phosphore pour les cultures en particulier dans les sols à pH alcalin et riches en calcaire.

Contrairement au pH, l'apport d'engrais a contribué dans l'enrichissement de la solution du sol en sels solubles. Ce phénomène peut être expliqué par l'effet salinisant de l'engrais ajouté 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 salinité qui est la libération des bases échangeables par le complexe adsorbant vers la solution du sol, ceci concerne surtout les cations les plus hydratés  $Na^+$  et  $K^+$ . Hartsock *et al.* (2000) et Yegul *et al.* (2011) ont constaté que la conductivité électrique du sol a été positivement liée au

Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et l'humidité du sol. De fortes corrélations ont été trouvées entre la CE et Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup> et Na<sup>+</sup> (Yegul *et al.*, 2011).

## **Conclusion générale**



En Algérie, l'instabilité des rendements en grain est considérée comme étant un problème majeur chez les céréales en général et les blés en particulier. Afin de mieux gérer l'élaboration du rendement en grain, chez cette culture, plusieurs recherches ont été focalisées sur la fertilisation minérale. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la fertilisation phosphatée.

Dans les régions sahariennes algériennes, l'aridité du climat, la nature squelettique des sols, l'alcalinité du pH de la solution du sol et la présence de calcaire semblent constituer de véritables contraintes pour la croissance et le développement des cultures. Le recours à la fertilisation phosphatée pour corriger la déficience en cet élément en plus d'être coûteux et nuisible pour l'environnement, ne bénéficie pas totalement à la plante. Les apports de phosphore doivent donc tenir compte de la nature chimique des engrais et des doses appliquées d'une part, et de l'efficacité de son utilisation par la culture à mettre en place, d'autre part.

La fertilisation phosphatée a été étudiée en parcelles expérimentales au champ afin d'évaluer l'effet de différentes sources de phosphore (engrais simples et composés) et différentes doses de phosphore sur l'élaboration du rendement d'une culture de blé dur Carioca dans la région d'El-Menia d'une part, d'autre part, d'étudier l'impact des engrais apportés sur l'évolution du phosphore du sol en conditions de plein champ et semi-contrôlées.

Il en ressort que :

La comparaison entre les deux engrais foliaires leader-start et agriphos (2006/2007) n'a révélée aucune différence significative entre ces derniers pour l'élaboration du rendement en grain, en biomasse et l'absorption du phosphore par la culture de blé dur Carioca. Plusieurs travaux ont démontré l'intérêt de l'utilisation des engrais foliaires dans l'accroissement des rendements des cultures, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation du P et la diminution des quantités de phosphore apportées au sol par les fertilisants. Les contraintes liées au sol (pH alcalin et présence de calcaire) de la région d'étude en particulier et des régions du Sud algérien en général rendent l'utilisation d'engrais phosphaté à absorption foliaire une pratique culturale indispensable dans les conditions de conduite culturale en région saharienne, et doit

être intégrée dans l'itinéraire technique des cultures céréalières pour une meilleure efficacité d'utilisation des éléments nutritifs.

En 2006/2007, l'engrais NPKs a donné les meilleurs résultats pour le nombre d'épis au m<sup>2</sup>, le nombre de grains/épi et le rendement en grain (en présence d'agripfos). Alors que l'engrais Fosfactyl a donné le poids de 1000 grains le plus élevé. En 2010/2011, l'engrais MAP a fourni le meilleur nombre de grains par épi.

Le choix de la dose optimale est de la même grandeur que le choix du type d'engrais. Elle devrait donc être suffisante pour garantir une croissance harmonieuse du végétal et assurer un rendement escompté en quantité et en qualité. En 2006/2007, la dose 160 kg.ha<sup>-1</sup> a engendré le meilleur nombre de grains/épi en présence d'Agripfos ou de Leader-start. Une plus grande fertilité des fleurs induisant un meilleur nombre de grains est favorisée par l'apport de phosphore à des niveaux de 90 kg.ha<sup>-1</sup> et 30 kg.ha<sup>-1</sup> pour 2008/2009 et 2009/2010 respectivement. Concernant le peuplement-épis, la dose 60 kg.ha<sup>-1</sup> a favorisé une meilleure fertilité des talles herbacées sur deux années consécutives 2009/2010 et 2010/2011. Le poids de 1000 grains le plus élevé est enregistré par la dose 30 kg.ha<sup>-1</sup> pour 2008/2009 et 2009/2010.

L'engrais simple SSP (20 % de P) a pu réaliser des rendements en grain plus élevés à des doses de phosphore plus faibles pour les trois derniers essais comparativement aux engrais testés en 2006/2007. La dose 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.ha<sup>-1</sup> s'est avérée plus intéressante, puisqu'elle a pu favoriser des rendements moyens d'environ 74 q.ha<sup>-1</sup> en 2008/2009 et 2009/2010 ; et la dose de 30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.ha<sup>-1</sup> (2009/2010) semble suffisante pour produire un rendement équivalent à celui de la dose 60 Kg.ha<sup>-1</sup> permettant ainsi une économie certaine d'engrais dans les conditions d'El-Menia (El-Goléa). Malgré cela, la différence avec la teneur en protéine de la dose 30 Kg.ha<sup>-1</sup> pourrait être considérée comme faible. Cependant, pour assurer une teneur en protéines supérieure à ce seuil tout en diminuant les coûts dus aux apports d'engrais, il faudrait étudier des doses de phosphore intermédiaires entre 30 et 60 Kg.ha<sup>-1</sup> pour la dose d'azote utilisée dans les essais.

En ce qui concerne les prélèvements de phosphore, les meilleures teneurs et exportations de phosphore aux deux stades deux nœuds et floraison sont données par l'engrais NPKs en 2006/2007. Alors que le SSP a réalisé des taux et exportations de

phosphore élevés des grains par rapport aux autres engrais pendant les trois essais 2008/2009, 2009/2010 et 2010/2011. La dose de phosphore 30 Kg.ha<sup>-1</sup> a engendré les meilleures teneurs et exportations de phosphore des grains en 2010/2011.

Bien que l'effet type d'engrais soit statistiquement non significatif, les meilleures valeurs d'efficacité d'utilisation du phosphore sont obtenues par l'engrais NPKs pour l'année 2006/2007, engrais fosfactyl pour l'année 2008/2009 et engrais MAP pour les deux années 2009/2010 et 2010/2011 respectivement.

Quel que soit l'engrais apporté, l'EUP diminue avec les doses croissantes de phosphore pour les essais de 2006/2007, 2008/2009 et 2009/2010. Pour l'année 2010/2011, cette constatation est vérifiée pour l'engrais SSP seulement ; contrairement au MAP, l'EUP augmente avec les niveaux de doses de phosphore. Tandis que pour le fosfactyl, la valeur maximale est enregistrée à 60 kg.ha<sup>-1</sup> phosphore.

L'étude de l'évolution du phosphore en sol cultivé en 2006/2007, indique que les teneurs en phosphore assimilable diminuent au cours du cycle du blé. Cette diminution est proportionnelle aux doses croissantes d'engrais phosphaté.

La relation inverse entre le phosphore total et le phosphore assimilable pourrait être expliquée en partie par le transfert du phosphore vers des formes non assimilables quand le temps de contact entre l'engrais apporté et les particules du sol augmentent dans les conditions de l'intervalle expérimental.

Dans l'essai en pots en conditions semi-contrôlées, l'engrais SSP a favorisé le maintien du niveau de disponibilité du phosphore élevé pour une plus longue période par rapport aux autres engrais.

L'apport d'engrais phosphaté (MAP, fosfactyl ou SSP) a contribué dans la diminution du pH de la solution du sol par rapport au témoin. La diminution du pH observée dans le sol a en effet été suffisante pour induire une augmentation de disponibilité phosphatée significative. Compte tenu de la relation entre le pH et le phosphore assimilable du sol étudié, la diminution du pH observée a pu, en l'occurrence, être expliquée par la modification induite par les engrais.

## **Perspectives**

Le travail mené à El-Menia doit être complété par :

- L'adoption d'un itinéraire technique bien étudié et adapté aux conditions pédoclimatiques de la région.
- Le choix de variétés efficaces pour l'utilisation des éléments minéraux, notamment le phosphore qui a un rôle important dans le système agricole intensif.
- Une réévaluation des méthodes d'analyse de phosphore bio-disponible dans le sol de la région d'El-Ménia car à travers le comportement de la culture du blé dur sur quatre années d'essais, le sol du site expérimental s'avère riche en phosphore bio-disponible (avec l'itinéraire technique appliqué).

## **Références bibliographiques**

- **Abedi, T., A. Alemzadeh, S. A. Kazemeini, 2011.** Wheat yield and grain protein response to nitrogen amount and timing. *Aust. J. Crop Sci.*, 5(3):330-336.
- **Abis S., 2012.** Le blé en Méditerranée: sociétés, commerce et stratégies. Economie et territoire – Relations commerciales. 241-247.
- **Agence National des Ressources Hydriques (A.N.R.H.), 2010.** Rapport des analyses physico-chimiques de l'eau d'irrigation d'El-Goléa. 2p.
- **Akhtar, M., S.M. Alam. 2001.** Effect of incubation period on phosphate sorption from two P sources. *J. Biological sciences*, 1(3) : 124-125.
- **Alaru, A., Ü. Laur, E. Jaama, 2003.** Influence of nitrogen and weather conditions on the grain quality of winter triticale. *Agron. Res.*, 1: 3-10.
- **Ali, M.S., A. Sutradhar, M.L. Edano, J.T. Edwards, K. Girma. 2014.** Response of winter wheat grain yield and phosphorus uptake to foliar phosphate fertilization. *International journal of agronomy*, 8 pages.
- **Al-Rohily, K.M., A.M. Ghoneim, A.S. Modaihsh, M.O. Mahjoub, 2013.** Phosphorus availability in calcareous soil amend with chemical phosphorus fertilizer, cattle manure compost and sludge manure. *International Journal of Soil Science*, 8: 17-24.
- **Anthony, G.B. et H.J. Woodard, 2003.** Foliar nitrogen application timing influence on grain yield and protein concentration of hard red winter and spring wheat. *Agron. J.*, 95: 335-338.
- **Araújo, A.P., C. Plassard, J.J. Drevon. 2008.** Phosphatase and phytase activities in nodules of common bean genotypes at different levels of phosphorus supply. *Pant and soil*, 10p.
- **Arnold, P.W., B.M. Close. 1961.** Potassium-releasing power of soils Agde 1 rotation experiment assessed by glasshouse cropping. *J. Agric. Sci*, 57: 381-386.
- **Aslam, M., M. Sharif Zia, Rahmat Ullahm, M. Yasin. 2000.** Application of freundlich adsorption isotherm to determine phosphorus requirement of several rice soils. *Int. J. of Agri. & Biol.* 2(4): 286-288.

- **Aubert, G., 1978.** Méthodes d'analyse des sols. 2<sup>ème</sup> Edition. Centre national de documentation pédagogique, Marseille, 198p.
- **Avila, F.W., V. Faquin, A.K. Lobato, D. Baliza, D.J. Marques, A.M.A. Passos, C.E.A. Bastos, E.M.S. Guedes. 2012.** Growth, phosphorus status, and nutritional aspect in common bean and foliar- applied phosphorus forms. *Scientific research and essays*, 7(25): 2195-2204.
- **Ayling, S.M., S.E. Smith, F.A. Smith, P. Kolesik. 1997.** Transport process at the plant-fungus in mycorrhizal associations: physiological studies. *Plant and soil*, 196: 305-310.
- **Badraoui, M., B. Soudi, Y. Monjahid, F. Bennani, M. Mikou, S. Bouhalassa. 1997.** Mineralogical considerations in soil fertility management in Morocco. In: Accomplishments and future challenges in dry land soil fertility research in the Mediterranean area. J. Ryan Ed., ICARDA, ISBN, 92-9127-040-7, 267-278.
- **Bahlouli, F., H. Bouzerzour, A. Benmahammed. 2008.** Effet de la vitesse et de la durée du remplissage du grain ainsi que de l'accumulation des assimilâts de la tige dans l'élaboration du rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans les conditions de culture des hautes plaines orientales d'Algérie. *Base (Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement)*, 12: 31-39.
- **Balla, K. et O. Veisz, 2007.** changes in the quality of cereals in response to heat and drought stress. *Acta agronomica Overiensis*, 49: 451-455.
- **Balla, K., M. Rakszegi, Z. Li, F. Bekes, S. Bencze, O. Veisz, 2011.** Quality of winter wheat in relation to heat and drought shock after anthesis. *Czech J. Food Sci.*, 29: 117-128.
- **Banque mondiale, 2015.** Consommation d'engrais (kilogramme par hectare de terres arables).  
<http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/AG.CON.FERT.ZS>
- **Barber, S.A. 1995.** Soil nutrient bioavailability : A mechanistic approach. Second edition. John Wiley and Sons, 414 pages.
- **Barbottin, A., M. Le Bail, M.H. Jeuffroy. 2006.** The azodyn crop model as a decision support tool for choosing cultivars. *Agronomy for sustainable*, 26 (2): 107-115.

- **Barker, A.V., D. J. Pilbeam. 2007.** Handbook of plant nutrition. Books in soils, plants and the environment, 117: 662p.
- **Barrow, N.J., 1990.** Relating chemical process management systems. Phosphorus requirements for sustainable agriculture in Asia and Oceania. *Proceeding of a symposium 6-10 march 1989.* pp:199-209.
- **Basirat, M., M.A. Malboodi, A. Mousavi, A. Asgharzadeh, S. Samavat. 2011.** Effects of phosphorus supply on growth, phosphate distribution and expression of transporter genes in tomato plants. *Australian journal of crop science*, 5(5): 537-543.
- **Batten, G.D. 1992.** A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant and soil*, 146:163-168.
- **Bayens, J. 1967.** Nutrition des plantes de culture ou physiologie appliquée aux plantes agricoles. Ed. Nauwelaerts, Louvain. 278 pages.
- **Benamara, M., A.P. Conesa. 1976.** Appréciation de la fertilité phosphorique de quelques sols d'Algérie. *Annales de l'I.N.A.* VI(2): 81-90.
- **Bencze, S., O.Veisz, Z. Bedó, 2004.** Effects of high atmospheric CO<sub>2</sub> and heat stress on phytomass, yield and grain quality of winter wheat. *Cereal research communication*, 32: 75-82.
- **Bennett, E.M., S.R. Carpenter, N.F. Caraco. 2001.** Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: A global perspective. Increasing accumulation of phosphorus in soil threatens rivers, lakes, and coastal oceans with eutrophication. *BioScience*, 51 (3): 227-234.
- **Blanchet, R. 1959.** Energie d'absorption des ions minéraux: phosphore. *Annales Agronomiques*, 11: 138-154.
- **Blanchet, R., M. Bosc, C. Maertens. 1978.** Influence de l'état hydrique du sol sur l'alimentation phosphorique des plantes dans le sol. *Phosphore et agriculture*, 72: 1-11.
- **Bly, A. G., H. J. Woodard. 2003.** Foliar nitrogen application timing influence on grain yield and protein concentration of hard red winter and spring wheat. *Agron. J.* 95: 335-338.



- **Bonny, S., 2011.** L'agriculture écologiquement intensive : nature et défis. Cah. Agric. 20 : 451-462.
- **Bosc, M., 1976.** Dynamics of phosphorus-potassium nutrition of the plant in the soil. *Cultivar*, 35: 31-33.
- **Boukcim, H., D. Mousain. 2001.** Effets de la fertilisation phosphatée sur la mycorhization, la croissance et la nutrition en phosphore et en azote de semis de Cèdre (*Cedrus atlantica Manetti*) inoculés en pépinière par *Tricholoma tridentinum* Sing. Var. cedretorum Bon. *Ann. For. Sci.* 58 : 289-300.
- **Boukhalfa-Deraoui, N., M.T Halilat, A. Mekliche. 2011.** Effet de la fertilisation phosphatée sur une culture de blé tendre conduite en conditions sahariennes. *Revue des Bioressources*, 1 (1) : 39-46.
- **Boussard J-C et Chabane M., 2011.** La problématique des céréales en Algérie: Défis, enjeux et perspectives. 5èmes journées de recherche en sciences sociales à AgroSup, Dijon, 8- 9 décembre 2011.
- **Bouyoucos, S.D., R.G. Meleher. 1983.** Collection and ion chromatography determination of ammonia and methylamines in air. *American Industrial Hygiene Association J.*, 44(2): 119-122.
- **Brenda, R., N. Philip, M. Jacinta, O. Augustino. 2014.** Mycorrhizal development and phosphorus concentration in selected kenyan sorghum cultivars. *Int. Res. J. Microbiol.*, 5 (4): 62-72.
- **Buckman, O.C., O. Karsted, H. Lieo, I. Richard. 1990.** Agriculture et fertilisation- les engrais et leur avenir. Ed. Taugen Grafiste Centre. Oslo. 258p.
- **Bulut, E., A. Aksoy. 2008.** Impact of fertilizer usage on phosphorus loads to lake Uluabat. *Desalination*, 226 (3): 289-297.
- **Busman, L., J. Lamb, G. Randall, G. Rehm, M. Smitt. 2002.** The nature of phosphorus in soils. Consulté le 12/01/2014.  
<http://www.extension.umn.edu/agriculture/nutrient-management/phosphorus/the-nature-of-phosphorus/>

- **Caraes, D., V. Pons. 2013.** Economie mondiale des engrais, le centre de gravité s'est déplacé dans les pays émergents. *Chambres d'agriculture* n° 1024 : 10-14.
- **Carson, L., M. Ozores-Hampton. 2014.** Description of enhanced-efficiency fertilizers for use in vegetable production. *IFAS Extension, University of Florida*, 9 pages.
- Cassman, K.G., D.C. Bryant, A.E. Fulton, L.F. Jackson, 1992.** Nitrogen supply effects on partitioning of dry matter and nitrogen to grain of irrigated wheat. *Crop science*, 32: 1251-1258.
- **Castillon, P., P.Villemin, J.C. Fardeau. 1993.** Résidus de culture à intégrer dans le raisonnement. *Perspectives Agricoles*, 181 : 33-34.
- **Charles G, 1976.** Diagnostic de la carence phosphorique des sols par symptomatologie végétale. *Annales de l'I.N.A.* VI (2) : 119-121.
- **Chaturvedi, I. 2006a.** Effects of different phosphorus levels on growth, yield and nutrient uptake of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Int.J. plant Sci.* 1(2): 278-181.
- **Chaturvedi, I. 2006b.** Effects of phosphorus levels alone or in combination with phosphate-solubilizing bacteria and farmyard manure on growth, yield and nutrient uptake of wheat (*Triticum aestivum*). *J. Agri. Social Sci.*, 2(2): 96-100.
- **Clarkson, D.T., B. Hanson. 1980.** The mineral nutrition of higher plants. *Annual review of plant physiology*, 31: 239-298.
- **Comifer, 2002.** Les atouts décisifs du chaulage en terres de brande. *Perspectives agricoles*, 284 : 66-70.
- **Czarnecki, O., J. Yang, D.J. Weston, G.A. Tuskan and J.G. Chen. 2013.** A Dual Role of Strigolactones in Phosphate Acquisition and Utilization in Plants. *Int. J. Mol. Sci.* 14: 7681-7701.
- **Dakora, F.D., D.A. Philips. 2002.** Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and soil*, 254: 35-47.
- Daniel, C. et E. Triboi, 2000.** Effects of temperature and nitrogen nutrition on the grain composition of winter wheat : effects on gliadin content and composition. *J. Cereal Sci.*, 32: 45-56.

- **Debaeke, P., J.M. Nolot, P. Bataillon, D. Raffailac. 2000.** Evaluation d'itinéraires techniques pour le blé dur dans le Sud-Ouest de la France. In: Durum wheat improvement in the mediterranean region : new challenges, Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N., Araus J.L., (ed.) *CIHEAM*, Zaragoza, pp : 587-590.
- **Delgado, A., A. Madrid, S. Kassem, L. Andreu, M.C. del Campillo, 2002.** Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids. *Plant Soil*, 245: 277-286.
- **Dhillon, N.S., G. Dev. 1993.** Production potential of crop rotations under varying levels of native and applied phosphate in a typical Ustochrept. *J. Indian Soc. Soil.*, 41: 87-89.
- **Dietz, K.J., L. Heilos. 1990.** Carbon metabolism in spinach leaves as affected by leaf age and phosphorus and sulfur nutrition. *Plant Physiol.* 93: 1219-1225.
- **Djadjaglo, D., C. Richter. 2008.** Efficacité de prélèvement du phosphore par les plantes *Sorghum bicolor* (L.) Moench et *Phaseolus vulgaris* L. *Agro solutions*, 19 : 45-50.
- **Djermoun A., 2009.** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Nature et technologie*, 1 : 45-53.
- **Djodjic, F., L. Bergström, C. Grant. 2005.** Phosphorus management in balanced agricultural systems. *Soil use and management*, 21 (1): 94-101.
- **Dordas, C., 2009.** Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source-sink relations. *Eur. J. Agron.*, 30: 129-139.
- **Dordas, C., 2012.** Variation in dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in barley as affected by fertilization, cultivar and source-sink relations. *Eur. J. Agron.*, 37: 31-42.
- **Duan, W., Z. Yu, Y. Zhang, D. Wang, Y. Shi, Z. Xu. 2014.** Effects of nitrogen application on biomass accumulation, remobilization, and soil water contents in a rainfed wheat field. *Turkish J. field crops*, 19(1): 25-34.

- **Dupont, F.M., S.B. Altenbach, 2003.** Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *J. Cereal Sci.*, 38: 133-146.
- **Duthil J., 1973 :** Eléments d'écologie et d'agronomie, T3, ed. J.B. Baillièrè. 654p.
- **Dutil, P., 1976.** La fertilisation phosphatée des sols calcaires. *An. Agro. I.N.A.*, 6 (2): 75-80.
- **El-Ghamry, A.M., A.A. Mosa, E.M. El-Naggar. 2009.** Optimum time for phosphorus fertilization on Egyptian alluvial soil. *Acta Agronomica Hungarica*, 57 (3): 363-370.
- El-Fakhri, M., S. Mahboub, M. Benchkroun, N. Nsarellah, 2012.** Grain filling and stem accumulation effects on durum wheat (*Triticum durum Desf.*) yield under drought. *Nature et technology*, 7: 67-73.
- **Elgharbaly, A., P. Marshner, P. Rengasamy. 2010.** Wheat growth in a saline sandy loam soil as affected by N form and application rate. *Plant soil*, 328: 303-3012.
- **Eliakira, K., C. Honde. 2014.** Incubation of selected Tanzanian chromic acrisol with minjingu mazao fertilizer, cattle and poultry manures and their effects on phosphorus availability. *Asian j. Agricultural research*, 8: 30-41.
- **Evans, P. S. 1977.** Comparative root morphology of some pastures grasses and clovers. *New Zealand J. Agric.Res.*, 20 (3): 331-335.
- **Fahramand, M., M. Adibian, A. Sobhkhizi, M. Noori, H. Moradi, K. Rigi. 2014.** Effect of arbuscular mycorrhiza fungi in agronomy. *Journal of novel applied sciences*, 3: 400-404.
- **Fageria, V.D., 2001.** Nutrient interactions in crop plants. *J. Plant Nutr.*, 24(8): 1269-1290.
- **Fageria, V.D., M.P.B. Filho, A. Moreira, C.M. Guimarães. 2009.** Foliar fertilization of crop plants. *J. Plant Nutr.*, 32: 1044-1064.
- **FAO. 2005.** Utilisation des engrais par culture en Algérie. FAO Rome, Italie. 43 p.
- **FAO. 2009.** Comment nourrir le monde en 2050. *Forum d'experts de haut niveau. Rome, 12-13 Octobre.* [www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/fr/](http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/fr/)

- **Fardeau, J. C., 1993.** Le devenir du phosphore dans le sol et dans les systèmes sol plante. *Perspectives agricoles*, 181 : 17-22.
- **Fardeau J.C et Frossard M., 1991 :** Processus de transformation du phosphore dans les sols de Afrique de l'ouest semi-aride : Application au phosphore assimilable. In Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. Regional workshop4, Africa. Univ. Saskatchewan, pp : 1-15.
- **Fashola, O., K. Hayashi, T. Wakatsu. 2002.** Effect of water management and polyolfin-coated urea on growth and nitrogen uptake of indica rice. *J. Plant Ntr.*, 25(10): 2173-2190.
- **Fatima, Z., M. Saleem, M. Zia, T. Sultan, M. Aslam, R.U. Rehman, F. Chaudhary. 2009.** Antifungal activities of plant growth-promoting rhizobacteria isolates against *Rhizoctonia solani* in wheat. *African journal of biotechnology*, 8(2): 219-225.
- **Fernández, V., P. Guzmán, C. Peirce, T.M. Mcbeath, M. Khayet, M. McLaughlin. 2014.** Effect of winter wheat phosphorus status on leaf surface properties and permeability to foliar-applied. *Plant soil*, 384: 7-20.
- **Fien, A., V. Bart. 2013.** The phosphorus cycle in North-West European agricultural soils. NUTIRENT: Nutrient management, nutrient legislation and innovative techniques in intensive horticulture. September 16-18, Ghent, Belgium. Pp: 124-129.
- **Fowler, D.B., 2003.** Crop nitrogen demand and grain protein concentration of spring and winter wheat. *Agronomy journal*, 95: 260-265.
- **Fu, Q.P., Q.J. Wang, X.L. Shen, J. Fan. 2014.** Optimizing water and nitrogen inputs for winter wheat cropping system on the loess plateau, China. *J Arid land*, 6 (2) : 230 – 242.
- **Gachon, L., F. Triboi. 1988.** Etude des méthodes d'appréciation de l'offre phosphatée du sol. Le phosphore et le potassium dans les relations sol-plante. INRA. Pp : 181-191.
- **Gahoonia, T.S., N. Claassen et A. Jungk. 1992.** Mobilization of residual of different phosphate fertilizers in relation to pH in the rhizosphere of ryegrass. *Fertilizer research*, 33: 229-237.

- **Gahoonia, T.S., D. Care, N.E. Nielsen. 1997.** Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. *Plant and Soil*, 191: 181-188.
  
- **Gandeza, A. T., S. Shoji, I. Yamada. 1990.** Simulation of Crop Response to Polyolefin-Coated Urea: I. Field Dissolution. *SSSAJ*, 55(5): 1462-1467.
  
- **Gao, X., C.A. Grant. 2012.** Cadmium and Zinc Concentration in Grain of DurumWheat in Relation to Phosphorus Fertilization, Crop Sequence and Tillage Management. *Applied and environmental soil scienc*, 10 pages.
  
- **Gerke, J. 2015.** Phytate (Inositol Hexakisphosphate) in Soil and Phosphate Acquisition from Inositol Phosphates by Higher Plants. A Review. *Plants*, 4:253-266.
  
- **Gervy, R. 1970.** Les phosphates et l'agriculture. Edition DUNOD, Paris. 298p.
  
- **Ghazanshahi D., A. Jaouich. 2001.** Effet du pH sur la solubilité du phosphore dans les sols calcaires du nord de Varamine (Iran). *Agrosol*. 12 (1) : 21-24.
  
- **Ghoname, A, M.R. Shafeek. 2005.** Growth and Productivity of Sweet Pepper (*Capsicum annum* L.) Grown in Plastic House as Affected by Organic, Mineral and Bio-N-Fertilisers. *J. Agro*. 4(4): 369-372.
  
- **Gilles, 1969.** Rôle de la fumure phosphatée dans l'alimentation hivernale du blé. *Phosphore et Agri.*, 52 : 19-26.
  
- **Girma, K., K.L. Martinm K.W. Freeman, J. Mosali, R.K. Teal, W.R. Raun, S.M. Moges, D.B. Arnall. 2007.** Determination of optimum rate and growth stage for foliar-applied phosphorus in corn. *Communications in soil science and pant analysis*, 38: 1137-1154.
  
- **Goh, T.B., R.E. Karamanos, J. Lee. 2013.** Effects of phosphorus form on short-term solubility and availability in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 44: 136-144.
  
- **Goos, R.J. and B.E. Johnson. 2000.** A comparison of three methods for reducing iron deficiency chlorosis in soybean. *Agron. J.*, 92 (2): 1135-1139.
  
- **Goos, R.J. and B.E. Johnson. 2001.** Response of spring wheat to phosphorus and sulphur starter fertilizers of differing acidification potential. *J. Agr. Sci.* 136: 283-289.

- **Grant, C., S. Bittman, M. Montreal, C. Planchette et C. Morel. 2005.** Soil and fertilizer phosphorus : effect on plant P supply and mycorrhizal development. *Can. J. Plant Sci.* 85: 3-14.
- **Griffith, B., 2006.** Efficient fertilizer use – Phosphorus. Use manual. Publisher : Mosaic. <http://www.back-to-basics.net/efu/pdfs/Phosporus.pdf>
- **Gutiérrez, F., GT. Thomas. 1998.** Phosphorus nutrient affects response to water deficit. *Agronomy journal*, 90 (2): 166-171.
- **Hanway, J.J., R.A. Olsen. 1980.** Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. In: F.E. Khasawneh, E.C. Sample, and E.J. Kamprath, Eds. *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, Wisconsin. Pp: 681-692.
- **Harper J.E., G.M. Paulsen. 1969.** Nitrogen assimilation and protein synthesis in wheat seedlings as affected by mineral nutrition. i. macronutrients. *Plant physiol.*, 44: 69-74.
- **Hartsock, N.J., T.G. Mueller, G.W. Thomas, R.I. Barnhisel, K.L. Wells, S.A. Shearer, 2000.** Soil electrical conductivity variability. In *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture and Other Resource Management*, July 16-19, 2000, Bloomington, MN., USA. (Eds PC Robert, RH Rust, WE Larson), Vol. 5. (ASA, CSSA: Madison, WI)
- **He, Y.Q., Y.G. Zhu, S.E. Smith, F.A. Smith. 2002.** Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot culture. *J. Plant Nutr.* 25(4): 913-925.
- **Helmy, A.M. 2013.** Impact of phosphorus fertilization and foliar application of trace elements on growth and yield of two wheat cultivars. *Acta Agronomica Hungarica*, 61 (2): 139-148.
- **Hinsinger, P. 2001.** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237: 173-195.
- **Hirel, B., J. Le Goulis, B. Ney, A. Gallais. 2007.** The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants : towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany*, 58: 2369–2387.

- **Holford, I.C.R., 1997.** Soil phosphorus: its measurement and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.*, 35: 227-240.
- **Hopkins W. G., 2003.** Physiologie végétale. Ed. de Boeck, Belgique, 514p.
- **Horta, M. do C., J. Torrent. 2007.** The Olsen P method as an agronomic and environmental test for predicting phosphate release from acid soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 77: 283-292.
- **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 Doctorat en sciences de l'eau et de L'environnement, NRS-EAU, Québec (CANADA), 166p.
- Hruškova, M., I. Švek, 2009.** Wheat hardness in relation to other quality factors. *Czech journal of food sciences*, 27: 240-248.
- **Hu, Y., Z. Burcs, U. Schmidhalter. 2008.** Effect of foliar fertilization application on the growth and mineral nutrient content of maize seedlings under drought and salinity. *Soil science and plant nutrition*, 54(1): 133-141.
- **Jalali, M. 2009.** Phosphorus concentration, solubility and species in the groundwater in a semi-arid basin, southern Malayer, western Iran. *Environmental Geology*, 57: 1011-1020.
- **Jalali, M. 2013.** Using chemical analysis and modeling to enhance the understanding of soil solution of some calcareous soils. *Environmental Earth Sciences*, 68 (7): 2041-2049.
- **Jeuffroy, M.H., F.X. Oury. 2012.** Impact de nouvelles techniques de production, impliquant de faibles niveaux d'intrants, sur la quantité de protéines. *Innovations agronomiques*, 19 : 13-25.
- **Jiang, D., H. Hengsdijk, D. Ting-Bo, W. de Boer, J. Qi, C. Wei-Xing. 2006.** Long-Term Effects of Manure and Inorganic Fertilizers on Yield and Soil Fertility for a Winter Wheat-Maize System in Jiangsu, China. *Pedosphere*, 16(1): 25-32.
- **Kaloi, G.M., N. Bhughio, R.N. Panhwar, S. Junejo, A.H. Mari, M.A. Bhutto. 2011.** Influence of incubation period on phosphate release in two soils of district Hyderabad. *J. animal and plant sciences*, 21(4): 665-670.



- **Kaya, C., H. Kirnak, D. Higgs. 2001.** An experiment to investigate the ameliorative effects of foliar potassium phosphate sprays on salt-stressed strawberry plants. *Aust. J. Agric. Res.*, 52 (10): 995-1000.
- **Kaya, C., D. Higgs. 2001.** Growth enhancement by supplementary phosphorus and iron in tomato cultivars grown hydroponically at high zinc. *J. Plant Nutr.*, 24(2) : 1861-1870.
- **Korkmaz K., H. Ibrikci, E. Karnez, G. Buyuk, J. Ryan, H. Oguz, A. Can Ulger. 2010.** Responses of wheat genotypes to phosphorus fertilization under rainfed conditions in the Mediterranean region of Turkey. *Scientific Research and Essays*, 5(16): 2304-2311.
- **Kousar, P., L. Ali, A. Raza, A. Maqbool, S. Maqbool, S. Rasheed, N. Irum, 2015.** Effect of different levels of nitrogen on the economic yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) variety Aas-11. *Inter. J. Agronomy and agricultural research*, 6 (3): 7-11.
- **Labanauskas, C.K., F.T. Bingham, A. Cedra, 1978.** Free and protein amino acids, and nutrient concentrations in wheat grain as affected by phosphorus nutrition at various salinity levels. *Plant and soil*, 49: 581-593.
- **Labuschange, M.T., O. Elago, E. Koen, 2009.** The influence of temperature extremes on some quality and starch characteristics in bread, biscuit and durum wheat. *J. Cereal sci.*, 49 : 184-189.
- **Laghari, G.M., F.C. Oad, S. D Tunio, A.W. Gandahi, M.H. Siddiqui, A.W. Jagirani, S.M. Oad. 2010.** Growth yield and nutrient uptake of various wheat cultivars under different fertilizer regimes. *Sarhad J. Agric.* 26 (4): 489-497.
- **Li, A.G., Y.S. Hou, G.W. Wall, A. Trent, B.A. Kimball, P.J. Pinter, 2000.** Free-air CO<sub>2</sub> enrichment and drought stress effects on grain filling rate and duration in spring wheat. *Crop Sci.*, 10: 1263-1270.
- **Li, H., S.E. Smith, R.E. Holloway, Y. Zhu, F.A. Smith. 2006.** Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to phosphorus uptake by wheat grown in phosphorus-fixing soil even in the absence of positive growth responses. *New phytologist*, 172: 536-543.
- **Li, H., X. Yang, A. Luo. 2001.** Ameliorating effect of potassium on iron toxicity in hybrid rice. *J. Plant Nutr.* 24 (12): 1849-1860.

- **Liang, L.Z., H.J. Qi, P. Xu, X.Q. Zhao, X.Y. Dong, R.F. Shen. 2015.** High phosphorus at seedling stage decreases the post-transplanting fertilizer requirement of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Scientia horticulturae*, 190(16): 98-103.
- **Ling, F., M. Silberbush. 2002.** Response of maize to foliar vs. soil application of nitrogen-phosphorus- potassium fertilizers. *Journal of plant nutrition*, 25 (11): 2333-2342.
- **Liu, G., L. Zotarelli, Y. Li, D. Dinkins, Q. Wang, M. Ozores-Hampton. 2014.** Controlled-release and slow-release fertilizers as nutrient management tools. *IFAS Extension, University of Florida*, 7 pages.
- **Llorens, J.M. 2001.** La méthode de raisonnement de la fertilisation PK un outil pour la fertilisation. *COMOFER-GEMAS, 5<sup>ème</sup> rencontre de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre*, Blois, France, 27-29 Novembre.
- **Lopez-Bucio, J., M.F. Nieto-Jacobo, V. Ramirez-Rodriguez, L. Herrera-Esrella. 2000.** Organic acid metabolism in plants: from adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. *Plant Science*, 160: 1-13.
- **Lynch, J.P. 2007.** Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 55: 493-512.
- **Marschener, H. 1998.** Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. *Field crop research*, 56: 203-207.
- **Mallarino, A.P., U. Mazhar, D. Wittry, M. Bermudez. 2001.** Variation of Soybean response to early season foliar fertilization among and within fields. *Agronomy J.*, 93 (6): 1220-1226.
- **Maltais, A.M., 2006.** Facteurs et conditions favorables à l'efficacité de la fertilisation foliaire des cultures maraichères du Québec. *Revue de littérature, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Département de phytologie, unv. Laval.* 21p.
- **Maqbool, M.M., A. Maqbool, A. Ali, R. Mehmood, M. Ahmed, M. Sarwar. 2012.** Optimizing the method and source of phosphatic nutrition for wheat (*Triticum aestivum*) under agro-climate of dera Ghazi khan, Pakistan. *Pak. J. Nutr.*, 11(9): 787-792.

- **Mazhar, U., A.P. Mallarino. 2005.** Response of soybean grain oil and protein concentrations to foliar and soil fertilization. *Agron. j.* 97: 910-918.
- **McDowell, R.W., A.N., Sharpley. 2001.** Phosphorus losses in subsurface flow before and after manure to intensively farmed land. *Science of the total environment*, 278 (3): 113-125.
- **Mckenzie R. A., L.E. Prent, J.A. Macleood 2003.** Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformation in Gleysolic soils. *Can. J. Soil Sci. Soc.* 81: 395-403.
- **Mengel, K. 2002.** Alternative or complementary role of foliar supply in mineral nutrition. *Acta Horticulturae*, 594: 33-47.
- **Mhiri, A. 1995.** « Production and use of chemical fertilizers in Tunisia », Proceedings of the seminar “Products and use of chemical fertilizers and environment”, 17-21 dec. 1994, Cairo, Egypt, N.R.C. 1995, p. 65-84.
- **Miller P., Ulrich D., Entz M., McConkey B., 2004 :** Les pois tolèrent la sécheresse. Centre de recherches sur l’agriculture des prairies semi-arides. Agriculture et Agroalimentaire Canada. 6p.
- **Moll, R.H., E.J. Kamprath, W.A. Jackson. 1982.** Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization utilization. *Agronomy journal*, 74: 562-564.
- **Monreal, M.A., C.A. Grant, R.B. Irvine, R.M. Mohr, D.L. McLaren, M. Khakabazan. 2011.** Crop management effect on arbuscular mycorrhize and root growth of flax. *Can. J. Plant Sci.*, 91 (2): 315-324.
- **Mosali, J., K. Girma, R.K. Teal, K.W. Freeman, K.L. Martin, W.R. Raun. 2006.** Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield, phosphorus uptake and use efficiency. *J. Plant Nutrition*, 29(12): 2147-2163.
- **Moughli, L., 2000.** Mineral fertilizers: Characteristics and uses. Institut Agronomique et Veterinaire Hassan II (IAVH2), Rabat, Morocco, pp: 72-74.
- **Mousavi, S.R., M. Galavi, M. Rezaei. 2012.** The interaction of zinc with other elemnts in plants : a review. *Int. J. Agri. Crop Sci.*, 4 (24): 1881-1884.

- **Mousavi, S.R. 2011.** Zinc in crop production an interaction with phosphorus. *Aust. J. Basic & Appl. Sci.*, 5(9): 1503-1509.
- **Mullen, L. C., 2003.** Phosphorus Nutrition for Winter Crops. Agfact P1.4.5, second edition. District Agronomist, Dubbo NSW Agriculture. 16p.
- **Munns, D.N., B. Mosse. 1980.** Mineral nutrition of legume crops. In *Advances in legume Science* (Summerfield, R.J. and Bunting, A.H., eds). HMSO. London, UK. pp: 115-125.
- **Nafiu, A., 2009.** Effects of soil properties on the kinetics of desorption of phosphate from Alfisols by anion-exchange resins. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 172: 101-107.
- **Nanzyo, M., H. Kurosaki, S.I. Yamasaka. 1997.** Characteristics of P supply from polyolefin-coated P fertilizers in soil. *Plant nutr. For suistainable food production and environment.* pp: 625-630.
- **Narang, R. A., A. Bruene, T. Altmen. 2000.** Analysis of phosphate acquisition efficiency in different Arabidopsis accessions. *Plant physiology*, 124: 1786-1799.
- **Naseri, A.A., Y. Hosseini, H. Moazed, F. Abbasi, H.M.V. Samani. 2010.** Determining of soil phosphorus requirement with application of freundlich adsorption isotherm. *Asian J. Agri. Res.* 4 (4): 226-231.
- **Noack, S.R., T.M. Mcbeath, M.J. Mclaughlin. 2010.** Potential for foliar fertilization of dryland cereal crops: a review. *Crop and pasture science*, 61(8): 659-669.
- **Office national de météorologie (ONM). 2011.** Données climatiques de la région d'El-Goléa.
- **Ortas, I., D. Ortakçi, Z. Kaya, A. Çinar, N. Önelge. 2002.** mycorrhizal dependency of sour orange in relation to phosphorus and zinc nutrition. *Journal of plant nutrition*, 25 (6): 1263-1279.
- **Ortega R.A., D.G. Westfall, G.A. Peterson. 1997.** Variability of phosphorus over landscapes and dryland winter wheat yields. *Better Crops*, 81(2): 24-27.
- **Ortiz-Monasterio, J.I., R.J. Pena, W.H. Pfeiffer, A.H. Hede. 2002.** Phosphorus use efficiency, grain yield, and quality of triticale and durum wheat under irrigated

conditions. *Proceeding of the 5<sup>th</sup> international triticale symposium, Annex, june 30 – july 5, Radzikow, Poland. Pp: 9-14.*

- **Otani, T., N. Ae and H. Tanaka. 1996.** Phosphorus (P) uptake mechanisms of crops grown in soils with low P status. II. Significance of organic acids in root exudates of pigeonpea. *Soil Sci Plant Nutr.* 42: 553-560.

- **Oury , F.X., F. Leenhardt, C. Rémésy, E. Chanliaud, B. Duperrier, F. Balfourier, G. Charmet. 2006.** Genetic variability and stability of grain magnesium, zinc and iron concentrations in bread wheat. *European J. of Agronomy*, 25(2): 177-185.

- **Ozores-Hampton, M., L.C. Carson. 2013.** Methods for measuring nitrogen release from controlled-release fertilizer used for vegetable production. *IFAS Extension, univeristy of Florida*, 7 pages.

- **Pandey, R., V. Krishnapriya, P.S. Bindraban. 2013.** Biochemical nutrient pathways in plants applied as foliar spray: phosphorus and iron. Virtual fertilizer research center report USA. 16 pages

- **Panhwar, Q.A., R. Othman, Z.A. Rahman, S. Meon, M.R. Islam. 2011.** Effect of phosphatic fertilizer on root colonization of aerobic rice by phosphate-solubilizing bacteria. *International conference on food engineering and biotechnology*, 9: 145-149.

- **Păunescu, G., G. Matei, L. Olaru. 2009.** Fertilization and crop rotation influence to wheat grain quality in Oltenia central area conditions. *44<sup>th</sup> Croatian & international symposium on agriculture*, 16-20/ feb. pp: 610-613.

- **Pellerin, A., L.E. Parent, J. Fortin, C. Tremblay, L. Khiari, M. Giroux. 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.

- **Plassard, C., A. Robin, E. Le Cadre, C. Marsden, J. Trap, L. Herrmann, K. Waithaisong, D. Lesueur, E. Blanchart, L. Chapuis-Lardy, P. Hinsinger. 2015.** Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol. *Innovations Agronomiques 43 : 115-138.*

-**Porter, M.A. et G.M. Paulsen, 1983.** Grain protein response to phosphorus nutrition of wheat. *Agron. J.*, 75 (2) : 303-305.

- **Prats, J., M. Clément-grancourt.** 1971. Les céréales. J.B.Baillièrre et fils : Editeurs. Pp : 54-58.
  
- **Rahim, A., G.H. Abbasi, M. Rashid, A.M. Ranjha.** 2007. Methods of phosphorus application and irrigation schedule influencing wheat yield. *Pak. J. Agri. Sci.* 44(3): 420-423.
  
- **Rahim, A., A.M. Ranjha, Rahmatullah, E.A. Warraich.** 2010. Effect of phosphorus application and irrigation sheduling on wheat yield and phosphorus use efficiency. *Soil & Environ.* 29(1): 15-22.
  
- **Ragothama, K.G.,** 1999. Phosphate acquisition. *Annu. Rev. plant physiol. plant mol. Biol.*, 50: 665-693.
  
- **Ragothama, K.G.,** 2005. Phosphorus and plant nutrition: An overview. *Agronomy*, 46: 355-373.
  
- **Ragothama, K.G., A.S. Karthikeyan.** 2005. Phosphate acquisition. *Plant and soil*, 274: 37-49.
  
- **Ramaekers, L., R. Remans, I.M. Rao, M.W. Blair, J. Vanderleyden.** 2010. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field crops research*, 117: 169-176.
  
- **Reinbott, T.M., D.G. Blevins.** 1991. Phosphate interaction with uptake and leaf concentration of magnesium, calcium, and potassium in winter wheat seedlings. *Agron. J.* 83: 1043-1046.
  
- Richardson, A.E., R.J. Simpson.** 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant physiology*, 156 (3): 989-996.
  
- **Richie, G.S.P., D.M. Weaver.** 1993. Phosphorus retention and release from sandy soils of the Peel-Harvey catchment. *Fertilizer Research*, 36: 115-122.
  
- **Rodríguez, H., R. Fraga.** 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology advances*, 17: 319-339.

- **Rubaek, GH, C. Kjaergaard, N. Glaesner, G. Heckrath, J. Magid. 2010.** Adapting agricultural practice to minimize P leaching. In: International phosphorus workshop 6, 27 Sep–1 Oct 2010. Seville, Spain, p 176.
- **Saha, S., B. Saha, S. Muru, S. Pati and P. Roy. 2014.** Grain yield and phosphorus uptake by wheat as influenced by long-term phosphorus fertilization. *African J. Agr. Res.* pp: 607-612.
- **Samad, A., D. Muhammad, M. Musarat, W. Ullah. 2014.** Enhancing wheat yield and phosphorus use efficiency through foliar application in calcareous soil. *J. Natural Sci. Res.*, 4(7): 70-74.
- **Samadi, A. 2006.** Contribution of inorganic phosphorus fractions to plant nutrition in alkaline-calcareous soils. *J. Agric. Sci. Technol.* 8: 77-89
- **Sandaña, P., D. Pinochet. 2014.** Grain yield and phosphorus use efficiency of wheat and pea in a high yielding environment. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 14 (4): 973-986.
- **Sanyal, S.K., S.K. Datta, P.Y. Chan. 1993.** Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of south and Southeast Asia. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 25: 937-945.
- **Sau, F., M.I. Minguez. 2000.** Adaptation of indeterminate faba beans to weather and management under Mediterranean climate. *Field Crops Res.*, 66: 81-99.
- **Schachtman, D.P., R.J. Reid, S.M. Ayling. 1998.** Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant physiology*, 116(2): 447-453.
- **Sharpley, A., N., S. C. Chapra, R. Wedepohl, J. T. Sims, T. C. Daniel and K. R. Reddy. 1993.** Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters : Issues and Options. *J. environmental quality*, 23 (3): 437-451.
- **Shenoy, V.V., G.M. Kalagudi. 2005.** Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping. *Biotechnology advances*, 23: 501-513.
- **Shoji , S., A. T. Gandeza, K. Kimura. 1990.** Simulation of Crop Response to Polyolefin-Coated Urea: II. Nitrogen Uptake by Corn. *SSSAJ*, 55(5): 1468-1473.

- **Shujie, M., Q. Yunfa. 2011.** Effect of phosphorus concentration on adaptive mechanisms of high-and-low-P efficiency soybean genotypes when grown in solution. *Plant Soil Environ.*, 57(2): 61-66.
- **Simpson R.J., H. Lambers, M.J. Dalling. 1983.** Nitrogen redistribution during grain growth in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology*, 71(1): 7-14.
- **Sinacer L., 2013.** Céréales : hausse de 5% de la facture des importations les dix premiers mois de 2013. Lical : la lettre d'information de la chambre Algérienne de commerce et d'industrie. [www.lical.caci.dz](http://www.lical.caci.dz)
- **Soins, P., P., Vaysse. 1999.** Fertilisation des vergers. Environnement et qualité. Ed. CTIFL, pp : 47-52.
- **Soon, Y.K. 1991.** Solubility and retention of phosphate in soils of the northwestern Canadian prairie. *Can. J. Soil Sci.*, 71: 453-463.
- **Smith, D.R., P.R. Owens, A.B. Leytem, E.A. Warnemuende. 2007.** Nutrient losses from manure and fertilizer applications as impacted by time to first runoff event. *Environmental pollution*, 147 (1): 131-137.
- **Smith, S.E., D.J. Read. 1997.** Mycorrhizal symbiosis. *New phytologiste*, 137 (3): 563-567.
- **Stewart, W., L. Hammond, S.J.V. Kauwenbergh. 2005.** Phosphorus as a natural resource. Phosphorus: Agriculture and the environment, Agronomy Monograph N°46. Madison, American society of agronomy, Crop science society of America, Soil science society of America. 3-21.
- **Stone, P.J., M.E. Nicolas, 1995.** Effect of timing of heat stress during grain filling on two wheat varieties differing in heat tolerance. I. Grain growth. *Aust. J. Plant Physiol.*, 22: 927-934.
- **Storia, C., A. Berbecea, N. Baghina, I. Gaica, M. Storia, I. Radulov. 2013.** Phosphorus dynamics on acidic grassland soil. *Res. J. Agr. Sci.*, 45(1): 78-83.



- **Sultana, S., M.A. Islam, M.R. Islam, M.M. Morshed, M.R. Islam. 2002.** Correlations and regression analysis for heading date, yield and yield contributing characters in wheat under water and phosphorus stress. *Pak. J. Biol. Sci.*, 5 (2): 149-151.
- Šukalovic, V.H.T., D. Dodig, S. Žilic, Z. Bazic, V. Kandic, N. Delic, M. Miritescu, 2013.** Genotypic and environmental variation of bread durum wheat proteins and antioxidant compounds. *Romanian agricultural research*, 30 : 125-134.
- **Tanwar, S.P.S. and M.S. Shaktawat, 2003.** Influence of sources, levels and solubilizers on yield, quality and nutrient uptake of soybean (*Glycin max*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping system in southern Rajasthan. *Indian J. Agric. Sci.*, 73: 3-7.
- Tilman, D., G. Kenneth, K.G. Cassman, A. Pamela, P.A. Matson, R. Naylor, S. Polasky. 2002.** Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418: 671-677.
- **Timilsena, Y.P., R. Adhikari, P. Casey, T. Muster, H. Gill, B. Adhikari. 2015.** Enhanced efficiency fertilizers : a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the science of food and agriculture*, 95 (6): 1131-1142.
- **Toscano, P., G. Godino, T. Belfiore, C. Bricolli-Bati. 2002.** Foliar fertilisation: a valid alternative for olive cultivar. *Acta Horticulturae*, 594: 191-195.
- **Trenkel, M.E. 2010.** Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. Second edition, International Fertilizer Industry Association, 133p.
- **Triboi, F., 1988.** Evolution à long terme de la fertilité phosphatée d'un sol calcaire soumis à l'influence de fumure minérale ou organique. Phosphore potassium dans les relations sol - plante : Conséquences sur la fertilisation. I.N.R.A, 241-254.
- **Triboi, E., A. Abad, A. Michelena, J. Loveras, C. Daniel. 2000.** Effet de l'environnement sur la qualité du blé ; la variation qualitative et quantitative des protéines. *European journal of agronomy*, 13(1): 47-64.
- Tuçtürk, M., V. Çiftçi. 2004.** Relationships among traits using correlation and path coefficient analysis in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) sown different fertilization levels and row spacing. *Asian journal of plant sciences*, 3(6): 683-686.

- **USDA, 1954.** Diagnosis and Improvement of saline and alkaline soils. Agri. Hand b. n°60. United states salinity laboratory, Riverside, C.A. 160p.
- **Vance, C.P., C. Uhde-Stone, D.L. Allan. 2003.** Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New physiologist*, 157: 423-447.
- **Walworth J.L., A.P. Pond, G.J. Sower, W. Kilby. 2006.** Fall-applied foliar zinc for pecans. *HortScience*, 41(1): 275-276.
- **Wang, X., C. Tang, C.N. Guppy, P.W.G. Sale. 2008.** Phosphorus acquisition characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and white lupin (*Lupinus albus* L.) under P deficient conditions. *Plant and soil*, 312(1): 117-128.
- **Watt. M., J.R. Evans. 2003.** Phosphorus acquisition from soil by white lupin (*Lupinus albus* L.) and soybean (*Glycine max* L.), species with contrasting root development. *Plant Soil*, 248: 271-283
- **Wiegand, C.L., J.A. Cuellar, 1981.** Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. *Crop Sci.*, 21: 95-101.
- **Williams, K. R. 2010.** Fertilizers, then and now. *Journal of chemical education*, 87 (2): 135-138.
- **White, P.J., P.H. Brown. 2010.** Plante nutrition for sustainable development and global health. *Annals of botany*, 105: 1073-1080.
- **Wu, L., M. Liu, R. Liang. 2008.** Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention. *Bioresource technology*, 99 (3):547-554.
- **Xu, P., L.Z. Liang, X.Y. Dong, J. Xu, P.K. Jiang, R.F. Shen. 2014.** Response of soil phosphorus required for maximum growth of *Asparagus officinalis* L. to inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi. *Pedosphere*, 24 (6): 776-782.
- **Yan, X., J.Y. Jin, P. He, M.Z. Liang. 2008.** Recent Advances on the Technologies to Increase Fertilizer Use Efficiency. *Agricultural sciences in China*, 7 (4): 469-479.

- **Yao, Q., X. Li, P. Christie. 2001.** Factors affecting arbuscular mycorrhizal dependency of wheat genotypes with different phosphorus efficiencies. *Journal of plant nutrition*, 24 (9): 1409-1419.
  
- **Yegul, U., U. Turker and B. Talepour, 2011.** Determination of some soil parameters with electromagnetic induction sensor. *Tarim Makinalari Bilimi Dergisi [J. Agric. Mach. Sci.]*, 7: 19-25.
  
- **Zhang, F.S., J. Ma, Y.P. Cao. 1997.** Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (*Raghanus sativus* L.) and rape (*Brassica napus* L.) plants. *Plant and soil*, 196: 261-264.
  
- **Zhang, M.K., Z.L. Calvert, P.J. Stoffela, Y.C. Li, E.M. Lamb. 2002.** Release potential of phosphorus in florida sandy soils in relation to phosphorus fractions and adsorption capacity. *Journal of environmental science and health*, 37 (5): 793-809.
  
- **Zvomuya, F., C. J. Rosen, M. P. Russelle, S. C. Gupta. 2002.** Nitrate Leaching and Nitrogen Recovery Following Application of Polyolefin-Coated Urea to Potato. *Journal of environmrntal quality*, 32(2): 480-489.

### Références électroniques

**Site électronique** : Travaux personnels encadrés sur les engrais en Algérie. Note sur l'engrais en Algérie. Consulté le 15/09/2016.

<http://engrais-algerie.jimdo.com/analyses-sur-l-alg%C3%A9rie/>

## **Annexes**

**Annexe I.****Tableau 1.** Caractéristiques de la variété Carioca (CNCC, 2009)

<b>Fiche variétale</b>	
Variété	Carioca
Obtenteur	Serasem
Demandeur	ITGC
Origine	France
Année d'inscription	1999
Pedigree	H114 18 X Mon dur
<b>Caractéristiques agronomiques</b>	
Rendement	Elevé
<b>Caractéristiques technologiques</b>	
Poids de 1000 grains	Elevé
Qualité semoulière	Bonne
Mitadinage	Sensible
Teneur en protéines	14,79 %
<b>Résistance aux maladies</b>	
Oïdium feuille	Faiblement sensible
Rouille brune	Moyennement sensible
Oïdium Epi	résistante
Septoriose	Faiblement sensible
<b>Désignation du caractère</b>	
Epoque d'épiaison	Précoce
Hauteur de la plante (tige, épi et barbes)	Courte
Couleur de la barbe	Noire
Couleur de l'épi à maturité	Blanc
Forme du grain	Allongée
Type de développement	Hiver

**Tableau 2.** Poids de mille grains et taux de germination de la variété Carioca

Année	Poids 1000 grains (g)	Taux de germination (%)
2006/2007	54,8	98
2008/2009	56,4	97
2009/2010	59	98
2010/2011	55,54	93

**Tableau 3.** Caractéristiques des engrais étudiés

Engrais	Caractéristiques
<b>MAP</b> <b>Mono Ammonium</b> <b>Phosphate</b>	[NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ], dose 11 % N, 52 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 2 % CaO et 3 % SO <sub>3</sub> , est un engrais phosphaté binaire complètement soluble dans l'eau, et contenant de l'azote sous forme ammoniacale. Il est classé parmi les produits acidifiants (pH = 4,5).
<b>Fosfactyl</b>	Engrais binaire qui dose 3 % d'azote et 22 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> et 18 % SO <sub>3</sub> .
<b>NPKs</b>	Engrais composé, qui dose 8 % N, 36 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 13,5 % K <sub>2</sub> O, 15 % SO <sub>4</sub>
<b>SSP</b> <b>Simple Super</b> <b>Phosphate</b>	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O, CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O  Engrais phosphaté simple, composé de 20 % d'anhydride phosphorique. 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 : Cu, Zn, Mn, B et Fe.
<b>TSP</b> <b>Triple Super</b> <b>Phosphate</b>	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O  Engrais phosphaté simple, dose 46 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .

**Annexe II**➤ **Composantes du rendement et rendements en grain et en paille****Tableau 1. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=48)	CV %
Epis.m <sup>-2</sup>	11608 ns	8275 ns	5816,00	22,6
NbrGr	152,02 ns	50,24*	20,47	12,74
PMG	120,70**	22,00 ns	12,2	7,05
Rdt Gr	654,40**	120,60 ns	163,2	24,80

Légende : E.m<sup>-2</sup> = nombre d'épis/m<sup>2</sup>, NbrGr = nombre de grains/épi, PMG = poids de 1000 grains(g), RGr = rendement en grain(q/ha). ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 2. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=48)	CV %
Epis.m <sup>-2</sup>	19788*	3975 ns	3522	17,42
NbrGr	10,40 ns	36,45*	16,72	11,44
PMG	9,60 ns	5,80 ns	6,00	4,96
Rdt Gr	149,10 ns	132,40 ns	244,3	28,25

Légende : Se référer au tableau 1.

**Tableau 3. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais foliaires et solides sur les différents caractères (2006/2007)**

Caractères	Foliaires (ddl=1)	Solides (ddl=4)	Erreur (ddl=114)	CV %
Epis.m <sup>-2</sup>	460,21 ns	15698,21*	4898,63	20,80
NbrGr	1,633 ns	81,208**	22,503	13,31
PMG	0,714 ns	65,13***	9,830	6,36
Rdt Gr	435,29 ns	401,72 ns	191,54	25,91

Se référer au tableau 1.

**Tableau 4. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les différents caractères (2008/2009)**

Caractères	Solides (ddl=1)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=32)	CV %
Epis.m <sup>-2</sup>	18390,8 ns	15057,3 ns	10422,2	24,1
NbrGr	2,116 ns	17,19 *	7,119	7,48
PMG	2,237 ns	56,534 ***	7,644	4,82
Rdt Gr	409,99 ns	327,38 ns	196,65	20,3
R.P	82,154 ns	160,03 ns	88,882	20,2
I.R	0,00058 ns	0,000604 ns	0,00035	3,14

Légende : E.m<sup>-2</sup> = nombre d'épis/m<sup>2</sup>, NbrGr = nombre de grains/épi, PMG = poids de 1000 grains(g), RGr = rendement en grain(q/ha), RP= rendement en paille(q/ha), IR= indice de récolte. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 5. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les différents caractères (2009/2010)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=72)	CV %
Epis.m <sup>-2</sup>	2500,0 ns	16949,6 ***	3342,57	8,79
NbrGr	24,078 ns	53,342 ***	8,261	11,8
PMG	3,0457 ns	52,419 ***	6,378	5,95
Rdt Gr	1,435 ns	2,431 *	0,973	1,46
R.P	1031,04 ns	291,31 **	81,66	11,6
I.R	0,019306 ns	0,011359***	0,002348	10,39

**Légende** : E.m<sup>-2</sup> = nombre d'épis/m<sup>2</sup>, NbrGr = nombre de grains/épi, PMG = poids de 1000 grains(g), RGr = rendement en grain(q/ha), RP= rendement en paille(q/ha), IR= indice de récolte. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 6. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les différents caractères (2010/2011)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=36)	CV %
Epis.m <sup>-2</sup>	4937,88 ns	12199,7 **	3433,41	15,6
NbrGr	51,6537 *	10,7546 ns	12,8742	12,06
PMG	75,8986 ns	25,5151 ns	37,4426	12,1
Rdt Gr	123,042 ns	541,576 *	181,259	23,3
R.P	152,611 ns	384,672 **	96,394	15,3
I.R	0,012061 ns	0,006763 ns	0,003961	13,92

**Légende** : E.m<sup>-2</sup> = nombre d'épis/m<sup>2</sup>, NbrGr = nombre de grains/épi, PMG = poids de 1000 grains(g), RGr = rendement en grain(q/ha), RP= rendement en paille(q/ha), IR= indice de récolte. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation.

### ➤ Rendement en biomasse

**Tableau 7. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur le rendement en biomasse au niveau de l'essai men avec Agriphos (2006/2007)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=48)	CV %
Deux nœuds	115,52 ns	62,806 **	19,99	19,5
Floraison	852,65 ns	1101,59 ***	159,18	11,7
Maturité	1828,16 *	504,11 ns	505,44	21,07

**Légende** : Rendement en biomasse (q/ha), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

**Tableau 8. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur le rendement en biomasse au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=48)	CV %
Deux nœuds	113,79 ns	74,377 ***	16,473	18,9
Floraison	547,51 ns	286,17 ns	149,37	11,7
Maturité	2279,6 *	512,84 ns	749,64	24,6

**Légende** : Rendement en biomasse (q/ha), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.



**Tableau 9. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais foliaires et solides sur le rendement en biomasse (2006/2007)**

Caractères	Foliaires (ddl=1)	Solides (ddl=4)	Erreur (ddl=114)	CV %
Deux nœuds	58,228 ns	114,66 **	26,186	23,09
Floraison	395,42 ns	700,08 *	239,47	14,57
Maturité	544,87 ns	2053,9 *	608,74	22,67

**Légende :** Rendement en biomasse (q/ha), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

**Tableau 10. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur le rendement en biomasse (2008/2009)**

Caractères	Solides (ddl=1)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=32)	CV %
Fin tallage	31,989 ns	112,77 ns	53,35	23,83
Floraison	68,932 ns	1269,91 ***	168,34	13,05
Maturité	6562,6 ns	1931,01 ns	2026,5	31,17

**Légende :** Rendement en biomasse (q/ha), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

**Tableau 11. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur le rendement en biomasse (2009/2010)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=72)	CV %
Floraison	491,22 ns	546,18 ns	326,28	16,36
Maturité	1779,5 **	71,957 ns	373,48	11,7

**Légende :** Rendement en biomasse (q/ha), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

**Tableau 12. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur le rendement en biomasse (2010/2011)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=36)	CV %
Floraison	5030,5 *	1187,4 **	325,3	28,64
Maturité	1422,1 ns	1927,6 *	617,7	18,11

**Légende :** Rendement en biomasse (q/ha), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

### ➤ Nutrition minérale

**Tableau 13. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les prélèvements du phosphore par le blé dur au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=48)	CV %
[P]S1	0,5429 ***	0,0087 ***	0,00071	4,51
[P]S2	0,4473 ***	0,0049 ***	8,99E-05	1,85
EXP P S1	440,9 ***	23,489 ns	10,912	24,2
EXP P S2	7372,3 ***	762,34 ***	52,041	12,3

**Légende :** [P]= P (%MS), EXP P= exportation P (kg/ha), S1= stade deux nœuds, S2= stade floraison. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, CV= coefficient de variation.

**Tableau 14. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les prélèvements du phosphore par le blé dur au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=48)	CV %
[P]S1	0,6526***	0,0089***	0,0005	3,77
[P]S2	0,5350***	0,0119***	0,0024	9,12
EXP P S1	440,98***	23,483 ns	10,912	26,79
EXP P S2	4085,2***	136,95*	29,999	10,20

Légende : [P]= P (%MS), EXP P= exportation P (kg/ha), S1= stade deux nœuds, S2= stade floraison. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, CV= coefficient de variation.

**Tableau 15. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais foliaires et solides sur les prélèvements du phosphore par le blé dur (2006/2007)**

Caractères	Foliaires (ddl=1)	Solides (ddl=4)	Erreur (ddl=66)	CV %
[P]S1	0,0004 ns	0,5978***	0,00286	8,99
[P]S2	0,0123 ns	0,4912***	0,0032	10,79
EXP P S1	7,923 ns	429,2***	13,305	27,45
EXP P S2	380,8 ns	5711,4***	154,00	22,24

Légende : [P]= P (%MS), EXP P= exportation P (kg/ha), S1= stade deux nœuds, S2= stade floraison. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, CV= coefficient de variation.

**Tableau 16. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et doses sur les prélèvements du phosphore par le blé dur (2008/2009)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=48)	CV %
[P]S1	0,0063 *	0,0013 ns	0,0012	9,66
[P]S2	0,0002 ns	0,0004 ns	0,00023	5,24
[P]S3	0,0034 ns	0,0049 ns	0,0101	19,8
[P]Grain	0,0007 ns	0,0052 ns	0,0067	11,1
[P]paille	0,0007 ns	0,0021 ns	0,0009	23,5
EXP P S1	0,0192 ns	21,615 *	8,1448	25,9
EXP P S2	1,4043 ns	141,09 ***	19,718	14,4
EXP P S3	112,29 ns	110,97 ns	222,70	25,6
EXP P Gr	0,9979 ns	344,62 *	111,38	20,7
EXP P paille	3,3624 ns	7,7435 *	2,1452	20,1

Légende : [P]= P (%MS), EXP P= exportation P (kg/ha), S1= stade fin tallage, S2= stade floraison, S3= stade maturité. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, CV= coefficient de variation.

**Tableau 17. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et doses sur les prélèvements du phosphore par le blé dur (2009/2010)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=44)	CV %
[P]Gr	0,0013 *	0,0003 ns	0,00028	4,35
EXP P Gr	15,331 ns	9,3228 ns	12,799	13,4

Légende : [P]Gr = P grains (%MS), EXP P Gr = exportation P grains (kg/ha). ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, CV= coefficient de variation.

**Tableau 18. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et doses sur les prélèvements du phosphore par le blé dur (2010/2011)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=36)	CV %
[P]Gr	0,0335 ns	0,2928 ***	0,0423	31,11
[P]paille	0,0088 *	0,0025 ns	0,0014	31,70
[P] plt.	0,0028 ns	0,0260 **	0,0058	20,75
EXP P Gr	310,04 ns	998,69 ***	130,49	30,68
EXP P Paille	40,802 ns	19,028 *	7,672	34,67

Légende : [P] = P (%MS), EXP P = exportation P (kg/ha). ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, CV= coefficient de variation.

**Tableau 19. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur l'EUP au niveau des essais menés avec Agriphos et Leader-start et comparaison des essais (doses confondues) (2006/2007)**

	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=48)	CV %
<b>Agriphos</b>	1064,12 ns	1236,21 ***	291,39	26,47
<b>Leader-star</b>	296,44 ns	2009,75 ***	409,67	29,00
	Foliaire (ddl=1)	Solides (ddl=4)	Erreur (ddl=114)	CV %
<b>Comparaison des deux essais</b>	861 ns	655,9 ns	562,5	35,00

Légende : EUP : efficacité d'utilisation P (kg de Grains/kg Psol), ddl=degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0,05, P<0,01, P<0,001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. : coefficient de variation.

**Tableau 20. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur l'EUP, EAP et ECUP (2008/2009)**

Caractères	Solides (ddl=1)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=32)	CV %
EUP	7041,3 ns	31597,8 ***	1527,5	20,25
EAP	0,3263 ns	1,56905 ***	0,1129	27,7
ECUP	38,220 ns	205,939 ns	257,98	11,6

Légende : EUP : efficacité d'utilisation P (kg de grains/kg P disponible dans le sol), EAP : efficacité d'absorption du P (kg P absorbé/kg P disponible dans le sol), ECUP : efficacité d'utilisation du P (kg grains/kg P absorbé). ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

**Tableau 21. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur l'EUP, EAP et ECUP (2009/2010)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=45)	CV %
EUP	1183,6 ns	27209 ***	695,41	14,5
EAP	0,0098 ns	0,3693 ***	0,0099	14,3
ECUP	62,143 ns	1605,5 *	607,57	9,52

Légende : EUP : efficacité d'utilisation P (kg de grains/kg P disponible dans le sol), EAP : efficacité d'absorption du P (kg P absorbé/kg P disponible dans le sol), ECUP : efficacité d'utilisation du P (kg grains/kg P absorbé). ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

**Tableau 22. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur l'EUP, EAP et ECAUP (2010/2011)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=36)	CV %
EUP	57,143 ns	183,17 **	49,447	23,2
EAP	0,0099 ns	0,0375 ***	0,0041	33,4
ECUP	764,42 ns	16212 **	3918,2	35,6

**Légende :** EUP : efficacité d'utilisation P (kg de grains/kg P disponible dans le sol), EAP : efficacité d'absorption du P (kg P absorbé/kg P disponible dans le sol), ECUP : efficacité d'utilisation du P (kg grains/kg P absorbé. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif.

**Tableau 23. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et doses sur les prélèvements de l'azote par le blé dur (2008/2009)**

Caractères	Solides (ddl=1)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=32)	CV %
[N]S1	0,0076 ns	0,0119 ns	0,0115	11,14
[N]S2	0,0012 ns	0,0124**	0,0031	6,34
[N]S3	0,0351 ns	0,1241***	0,0128	7,63
[N]Grain	0,135 ns	0,225***	0,029	7,56
[N]paille	0,0004 ns	0,0160*	0,0052	22,3
EXP N S1	9,96 ns	107,79 ns	61,21	26,4
EXP N S2	3014,18 ns	1132,00 ns	607,45	31,9
EXP N S3	4301,40 ns	6395,01 ns	2812,69	29,2
EXP N Gr	287,33 ns	2949,73 ns	1613,86	24,3
EXP N paille	1,93 ns	42,30 ns	21,79	29,5
Protéines	1,56*	4,17**	0,32	4,38

**Légende :** [N]= N (%MS), EXP N= exportation N(kg/ha), S1= stade fin tallage, S2= stade floraison, S3= stade maturité. ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif. C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 24. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et doses sur les prélèvements de l'azote par le blé dur (2009/2010)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=45)	CV %
[N]Gr	0,0044 ns	0,0031 ns	0,0022	1,51
EXP N Gr	2122,24 ns	1654,81 ns	980,34	14,9
Protéines	0,145ns	0,102ns	0,071	1,51

**Légende :** [N]= N (%MS), EXP N= exportation N(kg/ha), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif. C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 25. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et doses sur les prélèvements de l'azote par le blé dur (2010/2011)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=36)	CV %
[N]Gr	0,1108 ns	0,2379 ns	0,1371	20,7
EXP N Gr	305,93 ns	3396,49*	1361,04	35,7
Protéines	3,67ns	7,90ns	4,55	20,79

**Légende :** [N]= N (%MS), EXP N= exportation N(kg/ha), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif. C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 26. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et doses sur les teneurs des grains en K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> et Mg<sup>2+</sup> en % MS (2009/2010)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=6)	Erreur (ddl=45)	CV %
[K <sup>+</sup> ]	0,0001 ns	0,0004 ns	0,0011	5,36
[Ca <sup>2+</sup> ]	0,0022 ns	0,0015 ns	0,0005	31,3
[Na <sup>+</sup> ]	0,00012 ns	0,00007*	0,00004	26,79
[Mg <sup>2+</sup> ]	0,000076 ns	0,000024 ns	0,000037	4,5

**Légende :** [K<sup>+</sup>]= K (%MS), [Ca<sup>2+</sup>]= Ca<sup>2+</sup> (%MS), [Na<sup>+</sup>]= Na<sup>+</sup> (%MS), [Mg<sup>2+</sup>]= Mg<sup>2+</sup>(%MS), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0,05, P<0,01, P<0,001 respectivement ; ns : non significatif, CV= coefficient de variation.

## ➤ Sol

**Tableau 27. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Agriphos (2006/2007)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=24)	CV %
Pass S1	20,81 ns	13,30***	0,51	4,98
Pass S2	28,28 ns	13,17***	0,67	5,66
Pass S3	23,95 ns	10,54***	1,04	7,13
Ptot S1	401,63 ns	129,01***	4,44	4,89
Ptot S2	529,58 *	129,31***	3,79	4,52
Ptot S3	458,72 *	117,58***	2,99	4,00

Légende : Pass= P assimilable (mg/kg), Ptot= Ptotal (mg/kg), S1= stade deux nœuds, S2= floraison, S3= maturité, ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 28. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau de l'essai mené avec Leader-start (2006/2007)**

Caractères	Solides (ddl=2)	Doses (ddl=9)	Erreur (ddl=24)	CV %
Pass S1	16,37 ns	6,99 ***	1,06	7,04
Pass S2	30,29 ns	11,03 ***	0,63	5,45
Pass S3	20,13 ns	7,717 ***	0,507	4,79
Ptot S1	458,95 *	130,49 ***	7,83	6,5
Ptot S2	588,31 *	161,57 ***	7,12	5,92
Ptot S3	441,48 *	110,90 ***	5,09	5,19

Légende : Pass= P assimilable (mg/kg), Ptot= Ptotal (mg/kg), S1= stade deux nœuds, S2= floraison, S3= maturité, ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 29. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et des doses sur les différents caractères au niveau des engrais foliaires et solides (2006/2007)**

Caractères	Foliaire (ddl=1)	Solides (ddl=4)	Erreur (ddl=66)	CV %
Pass S1	1,80 ns	18,59 ***	3,34	12,6
Pass S2	0,21 ns	29,29 ***	3,77	13,4
Pass S3	5,22 ns	22,04 ***	3,05	11,9
Ptot S1	0,004 ns	430,29 ***	39,85	14,7
Ptot S2	12,06 ns	558,94 ***	43,63	15,2
Ptot S3	0,21 ns	450,10 ***	34,09	13,5

Légende : Pass= P assimilable (mg/kg), Ptot= Ptotal (mg/kg), S1= stade deux nœuds, S2= floraison, S3= maturité, ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation.

**Tableau 30. Carrés moyens de l'analyse de la variance des effets des engrais solides et période d'incubation sur les différents caractères (2010/2011)**

	Pass	pH	C.E
Traitements (ddl=3)	8 307,6***	1,2259***	0,0004 **
Périodes (ddl=6)	4 736,7***	0,0239**	0,0053 ***
Blocs (ddl=14)	73,82 ns	0,0060 ns	0,0002 **
Traitements x périodes (ddl=18)	842,35 ***	0,0099 ns	0,0004 ***
Erreur (ddl=42)	67,58	0,007306	0,00007
CV %	10,75	1,04	5,85

Légende : Pass= P assimilable (mg/kg), CE= conductivité électrique (dS/m<sup>2</sup>), ddl= degré de liberté, (\*, \*\*, \*\*\*) : Significatif à P<0.05, P<0.01, P<0.001 respectivement ; ns : non significatif, C.V. = coefficient de variation.

**Annexe III****Tableau 1. Matrice de corrélations cas de l'essai mené avec Agriphos (Essai 2006/2007)**

	Epis/m <sup>2</sup>	Gr/épi	PMG	RDTGr	MS1	MS2	MS3	PS1	PS2	EXPS1	EXPS2	EUP	PassS1	PassS2	PassS3	PtotS1	PtotS2	PtotS3
Epis/m <sup>2</sup>	1																	
Gr/épi		1																
PMG			1															
RDTGr				1														
MS1					1													
MS2		0,395*				1												
MS3				0,774***			1											
PS1		0,578***		0,33*		0,428**		1										
PS2		0,523***		0,325*		0,369*		0,982***	1									
EXPS1		0,512**		0,412*	0,78***	0,423**		0,817***	0,778***	1								
EXPS2		0,462**									1							
EUP				0,686***		-0,453**	0,466**					1						
PassS1						0,471**						-0,544***	1					
PassS2						0,51*						-0,514**	0,877***	1				
PassS3						0,43**						-0,506**	0,852***	0,842***	1			
PtotS1			-0,324*					0,489**	0,474**	0,43**		0,392*	-0,418***	-0,425**	-0,363*	1		
PtotS2				0,333*				0,568***	0,551***	0,488**		0,377*	-0,401*	-0,425**	-0,362*	0,956***	1	
PtotS3								0,531***	0,526***	0,47**		0,409*	-0,443**	-0,436**	-0,377*	0,954***	0,948***	1

Tableau 2. Matrice de corrélations cas de l'essai mené avec Leader-start (Essai 2006/2007)

	Epis/m <sup>2</sup>	Gr/épi	PMG	RDTGr	MS1	MS2	MS3	PS1	PS2	EXPS1	EXPS2	EUP	PassS1	PassS2	PassS3	PtotS1	PtotS2	PtotS3
Epis/m <sup>2</sup>	1																	
Gr/épi		1																
PMG			1															
RDTGr				1														
MS1					1													
MS2		0,387*				1												
MS3				0,712***			1											
PS1	0,344*					-0,354*		1										
PS2	0,325*					-0,321*		0,962***	1									
EXPS1					0,32*			0,289*		1								
EXPS2	0,342*	0,416**						0,94***	0,939***		1							
EUP												1						
PassS1	0,343*	0,315*											1					
PassS2	0,327*	0,355*										-0,319*	0,828***	1				
PassS3	0,403*	0,34*											0,943***	0,896***	1			
PtotS1								0,544***	0,501**		0,512**					1		
PtotS2								0,553***	0,53***		0,521***					0,922***	1	
PtotS3								0,554***	0,488**		0,518***					0,937***	0,922***	1

Tableau 3. Matrice de corrélations cas de la comparaison des deux essais (Essai 2006/2007)

	Epis/m <sup>2</sup>	Gr/épi	PMG	RDTGr	MS1	MS2	MS3	PS1	PS2	EXPS1	EXPS2	EUP	PassS1	PassS2	PassS3	PtotS1	PtotS2	PtotS3
Epis/m <sup>2</sup>	1																	
Gr/épi		1																
PMG			1															
RDTGr		0,25*		1														
MS1					1													
MS2		0,359**				1												
MS3				0,737***			1											
PS1	0,283*	0,411***			0,233*			1										
PS2	0,285*	0,413***						0,969***	1									
EXPS1					0,301**			0,304**	0,288*	1								
EXPS2		0,389***						0,425***	0,402***		1							
EUP				0,389***		- 0,316**						1						
PassS1						0,309**						- 0,366**	1					
PassS2						0,346**						- 0,399***	0,853***	1				
PassS3			- 0,242*			0,267*						- 0,35**	0,889***	0,86***	1			
PtotS1				0,291*			0,255*	0,52***	0,49***	0,257*			- 0,323**	- 0,357**	- 0,309**	1		
PtotS2				0,26*				0,56***	0,542***	0,231*			- 0,329**	- 0,355**	- 0,311*	0,937***	1	
PtotS3				0,293*				0,544***	0,506***				- 0,294*	- 0,334**	- 0,28*	0,944***	0,933***	1



Tableau 4. Matrice de corrélations (Essai 2008/2009)

	épis/m <sup>2</sup>	Gr/épi	PMG	RDT Gr	RDTpail	MS1	MS2	MS3	PS1	PS2	PS3	NS1	NS2	NS3	PGr	Ppail	EXPS1	EXPS2	EXP S3	EXPGr	EXPpail	NGr	Npaille	Protéin	EXNS1	EXNS2	EXNS3	EXNGr	EXNpail	EUP	EAP	ECAUP	IR		
épis m <sup>2</sup>	1																																		
Gr/épi		1																																	
PMG			1																																
RDTGr				1																															
RDTpail					0,909***	1																													
MS1			-0,513*			1																													
MS2							1																												
MS3								1																											
PS1	0,43*								1																										
PS2										1																									
PS3											1																								
NS1												0,558**	1																						
NS2													0,546**	1																					
NS3														1																					
PGr															0,943***	1																			
Ppaille																0,546**	-0,709***	1																	
EXPS1																	0,453*		1																
EXPS2																				1															
EXP S3																					1														
EXPGr																						0,994***	1												
EXPpail																							0,628***	0,538*	1										
NGr																								-0,627**	1										
Npaille																									-0,493*	1									
Protéin																									-0,627**	1	0,684***	1							
EXNS1	0,458*																										1								
EXNS2																													1						
EXNS3	0,425*																													1					
EXNGr																																			
EXNpail																																			
EUP																																		1	
EAP																																		0,938***	1
ECAUP																																			1
IR																																			1

Tableau 5. Matrice de corrélations (Essai 2009/2010)

	épis/m <sup>2</sup>	Gr/épi	PMG	RDTGr	RDT pail	MS2	MS3	PGr	NGr	KGr	EUP	EAP	ECAUP	IR	CaGr	NaGr	MgGr	EXPGr	EXNGr	EXKGr	Protéin	
épis/m <sup>2</sup>	1																					
Gr/épi	-0,485***	1																				
PMG			1																			
RDTGr	0,296*	0,565***		1																		
RDT pail	0,309*	-0,351*			1																	
MS2						1																
MS3	0,377***				0,462**		1															
PGr								1														
NGr			-0,29*						1													
KGr								0,485***		1												
EUP		0,413**	0,315*	0,555***	-0,365*						1											
EAP		0,384**		0,535***	-0,34*						0,97***	1										
ECAUP			0,356*					-0,515***		-0,294*			1									
IR		0,597***		0,709***	-0,683***						0,546***	0,536***		1								
CaGr					0,325*									-0,306*	1							
NaGr										0,333*			-0,313*		0,403**	1						
MgGr	0,283*							0,836***		0,51***			-0,403**	0,281*			1					
EXPGr	0,353*	0,436**		0,793***				0,359*			0,391**	0,523***	-0,56***	0,594***			0,453**	1				
EXNGr		0,506***		0,804***							0,486***	0,581***	-0,409**	0,586***				0,927***	1			
EXKGr		0,481***		0,762***						0,344*	0,468***	0,583***	-0,47***	0,604***			0,352*	0,933***	0,892***	1		
Protéin			-0,333*					0,303*	0,591***				-0,345*								1	

Tableau 6. Matrice de corrélations (Essai au champ, 2010/2011)

	Epis/m <sup>2</sup>	PMG	RDTpail	Gr/épi	MS2	MS3	RDTGr	Ppail	PGr	PS3	EXPpail	EXPGr	EXPS3	NGr	EXNGr	EAP	ECAUP	EUP	IR	Protéin
Epis/m <sup>2</sup>	1																			
MS2																				
PMG		1																		
RDTpail	0,602***		1																	
Gr/épi				1																
MS2					1															
MS3			0,34*			1														
RDTGr	0,754***	0,518***	0,488***	0,596***			1													
Ppail				-0,344*				1												
PGr									1											
PS3								0,394**	0,713***	1										
EXPpail	0,388**		0,512***					0,858***		0,319*	1									
EXPGr	0,311*			0,316**			0,435**		0,79***	0,567***	0,371*	1								
EXPS3	0,339*		0,354*	0,304*			0,397**	0,391**	0,779***	0,612***	0,533***	0,912***	1							
NGr									0,413**	0,385**		0,503***	0,488***	1						
EXNGr	0,684**	0,453**	0,504***	0,414**			0,743***				0,313*	0,584***	0,564***	0,662***	1					
EAP	0,298*			0,306*			0,427**		0,794***	0,539***	0,352*	0,989***	0,886***	0,491***	0,566***	1				
ECAUP							0,322*		-0,797***	-0,765***		-0,607***	-0,592***	-0,36*		-0,605***	1			
EUP	0,723***	0,481***	0,457**	0,583***			0,974***					0,482***	0,415**		0,73***	0,497***		1		
IR				0,63***			0,591***					0,361*			0,377**	0,367*		0,635***	1	
Protéin									0,413**	0,385**		0,503***	0,488***	1***	0,662***	0,491***	-0,36*			1

Tableau 7. Matrice de corrélations (Essai d'incubation des engrais, 2010/2011)

	période	engrais	pH	CE	P olsen
période	1				
engrais	-0,003	1			
pH	0,288**	-0,311**	1		
CE	-0,681***	0,142 <sup>ns</sup>	-0,160 <sup>ns</sup>	1	
P olsen	-0,597***	0,443***	-0,677***	0,585***	1